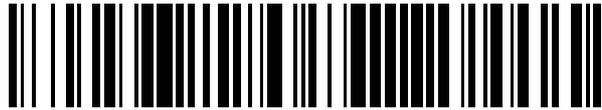


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 796 367**

51 Int. Cl.:

G21C 21/04 (2006.01)
G21C 3/62 (2006.01)
G21C 3/06 (2006.01)
G21C 21/02 (2006.01)
C04B 35/565 (2006.01)
G21C 3/04 (2006.01)
G21C 3/20 (2006.01)
C04B 35/628 (2006.01)
C04B 35/515 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.07.2016 PCT/US2016/043897**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **02.02.2017 WO17019620**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.07.2016 E 16831203 (1)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.04.2020 EP 3326173**

54 Título: **Método para la fabricación de combustible nuclear micro-encapsulado totalmente cerámico**

30 Prioridad:

25.07.2015 US 201562196975 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
26.11.2020

73 Titular/es:

**ULTRA SAFE NUCLEAR CORPORATION (100.0%)
188 Piedra Loop
Los Alamos, New Mexico 87544, US**

72 Inventor/es:

SNEAD, LANCE LEWIS

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 796 367 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para la fabricación de combustible nuclear micro-encapsulado totalmente cerámico

5 **CAMPO DE LA INVENCION**

La presente invención se refiere a un método mejorado para formar combustible mejorado de fisión nuclear. Más específicamente, la presente invención se refiere a un método para producir en masa un combustible micro-encapsulado totalmente cerámico tolerante a accidentes.

10 **REFERENCIA A APLICACIONES RELACIONADAS**

Esta solicitud reclama el beneficio para la Solicitud provisional de Patente de U.S. número 62/196.975, presentada el 25 de julio de 2015.

ANTECEDENTES

15 En la explicación que sigue de los antecedentes, se hace referencia a ciertas estructuras y/o métodos. No obstante, las siguientes referencias no deben ser interpretadas como una admisión de que estas estructuras y/o métodos constituyen la técnica anterior. El solicitante se reserva expresamente el derecho de demostrar que tales estructuras y/o métodos no se califican como estado de la técnica anterior.

20 El combustible nuclear comercial puede ser de muchas formas específicas para un tipo de reactor particular, aunque, esencialmente, todos los reactores de potencia comerciales utilizan uranio como material fisionable inicial. El tipo de combustible más común es el granulado de óxido de uranio (UO₂) alojado dentro de un revestimiento delgado de aleación de circonio de un reactor de agua ligera (LWR – Light Water Reactor, en inglés). Este tipo de combustible se utiliza en las dos variantes de LWR: la configuración del reactor de agua a presión (PWR – Pressured Water Reactor, en inglés) y del reactor de agua en ebullición (BWR – Boiling Water Reactor, en inglés).
25 Este granulado de UO₂ es producido en masa a través de una ruta de procesamiento cerámico convencional. Una vez que se alcanza un polvo de pureza y riqueza apropiadas, es presionado y, a continuación, sinterizado en presencia de hidrógeno, y llevado a la dimensión final mediante trituración sin centro. Se sigue un proceso muy similar para llegar al UO₂ en revestimiento de zircaloy para la producción del combustible del reactor moderado en agua pesada CANDU (deuterio-uranio de Canadá – CANada Deuterium-Uranium, en inglés), aunque el polvo de partida puede incluir enriquecimiento natural, uranio reciclado (RU – Recycled Uranium, en inglés), u óxido mixto (MOX – Mixed OXide, en inglés). El CANDU y los LWR constituyen la gran mayoría de la actual flota internacional de energía nuclear que hace que el UO₂ en revestimiento de zircaloy sea el sistema de combustible nuclear dominante. Podría decirse que el revestimiento de zircaloy de este combustible es la barrera principal de gas de fisión en estos
30 sistemas de LWR y CANDU.
35

Los reactores refrigerados por gas de alta temperatura (HTGR – High Temperature Gas-Cooled Reactors, en inglés), que aún no se han convertido en una plataforma nuclear comercial significativa, ya sea en la configuración prismática o de lecho de guijarros, utilizan un combustible diseñado específicamente como una barrera principal
40 para la retención de productos de fisión. Esto se logra a través de capas de ingeniería de carbono, grafito y SiC alrededor del núcleo de combustible UO₂ (u otro), de modo que el SiC se convierta en un recipiente a presión. Esta estructura, también conocida como combustible TRISO (Tri-Structure Isotropic, en inglés) se combina con muchas esferas pequeñas del orden de ~ 1 mm de diámetro que, a continuación, son compactadas (prensadas) en una matriz de grafito hospedadora y ha sido utilizado en un pequeño número de reactores de potencia comerciales. Una
45 ventaja principal de seguridad de dicho combustible es la eliminación del revestimiento de zircaloy, que puede interactuar con el refrigerante bajo ciertas condiciones de accidente.

Más recientemente, se ha desarrollado una forma de combustible mediante la cual el TRISO, en lugar de ser compactado en grafito, como es el caso de HTGR, se compacta dentro de una matriz de carburo de silicio (SiC) resistente e impermeable. Este relativamente nuevo combustible de matriz de SiC basado en TRISO se conoce
50 como combustible micro-encapsulado totalmente cerámico (FCM – Fully Ceramic Microencapsulated, en inglés). La mezcla de una pluralidad de partículas de TRISO dentro de dicha matriz de SiC da como resultado dos barreras para la liberación de producto de fisión, mejorando significativamente los aspectos de seguridad del combustible nuclear en comparación con el LWR estándar UO₂-zircaloy o el HTGR-estándar TRISO-grafito compacto.

55 Aunque el HTGR TRISO y el FCM posiblemente brinden beneficios de seguridad a los sistemas nucleares, tanto el propio TRISO como la metodología mediante la cual se procesa el FCM son más complejos en comparación con el proceso de UO₂, lo que resulta en un combustible que es marginalmente más costoso, o para el caso del FCM, potencialmente poco práctico para la producción en masa. Actualmente, debido a las relativamente altas
60 temperatura y presión requeridas para el procesamiento de CFM, el método preferido era el prensado en caliente, que no es un proceso que se presta a los niveles de producción en masa requeridos para el combustible nuclear. Además, dada la naturaleza heterogénea del combustible, la etapa de trituración sin centro común para el UO₂ y el proceso FCM actual es problemática, porque la exposición del núcleo de TRISO es indeseable. En consecuencia, sigue existiendo la necesidad de un método mejorado para formar un combustible mejorado de fisión en forma de
65 combustible a base de TRISO micro-encapsulado totalmente cerámico.

El documento de patente US 2012/140867 A1 da a conocer un método para proporcionar partículas de combustible nuclear isotrópico tri-estructural, que son sinterizadas en una matriz de SiC mediante un prensado en caliente convencional.

- 5 El documento de patente WO 2014/028731 A1 da a conocer la utilización de sinterización por plasma de chispa para la sinterización de polvo de UO₂ en una matriz de SiC.

COMPENDIO

10 Se ha descubierto que un proceso tal como el que se describe a continuación puede lograr la producción en masa de un combustible que incluye TRISO totalmente micro-encapsulado dentro de una cerámica totalmente densa. En consecuencia, el proceso permite la producción en masa de un combustible mejorado de fisión que contiene dos barreras para la liberación de producto de fisión y, por lo tanto, mejora significativamente los aspectos de seguridad del combustible nuclear en comparación con otros combustibles de fisión.

15 El método de acuerdo con la invención está definido en la reivindicación 1. Este método logra la producción en masa de un combustible que incluye TRISO totalmente micro-encapsulado dentro de una cerámica totalmente densa, que comprende: proporcionar una pluralidad de partículas de combustible isotrópico tri-estructural; mezclar la pluralidad de partículas de combustible isotrópico tri-estructural con polvo cerámico para formar una mezcla; colocar la mezcla en una matriz; y aplicar una corriente a la matriz para sinterizar la mezcla mediante sinterización de corriente
20 continua para formar un elemento de combustible.

En una realización de acuerdo con el método anterior, el método incluye, además, agregar la mezcla a un manguito de combustible cerámico antes de la etapa de colocar la mezcla dentro del manguito de combustible cerámico en la matriz.

25 En una realización de acuerdo con el método anterior, el manguito de combustible cerámico incluye carburo de silicio (SiC).

30 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el manguito de combustible cerámico incluye la misma composición que el polvo cerámico.

35 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, la matriz incluye más de una abertura paralela y el método incluye colocar una mezcla de la pluralidad de partículas de combustible isotrópico tri-estructural con polvo cerámico en cada una de las aberturas.

En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, la matriz incluye más de una abertura paralela y el método incluye colocar un manguito de combustible cerámico que contiene una mezcla de la pluralidad de partículas de combustible isotrópico tri-estructural con polvo cerámico en cada una de las aberturas.

40 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, la matriz comprende grafito.

45 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el elemento de combustible tiene una dimensión precisa de la parte exterior después del proceso de sinterización, sin que se produzca un procesamiento adicional después del proceso de sinterización para obtener la dimensión precisa de la parte exterior.

50 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el polvo cerámico comprende carburo de silicio (SiC).

En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el polvo cerámico comprende, además, aditivos de sinterización.

55 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, los aditivos de sinterización comprenden alúmina u óxido de metal de tierras raras o una combinación de los mismos.

En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el óxido de metal de tierras raras es itria.

60 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el polvo cerámico incluye los aditivos de sinterización en una cantidad de hasta el 10 por ciento en peso del peso total del polvo cerámico.

65 En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el elemento de combustible comprende SiC casi estequiométrico.

En una realización de acuerdo con cualquiera de los métodos anteriores, el tiempo de ejecución total para formar el elemento de combustible es inferior a una hora.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Las realizaciones de la invención se describirán a continuación a modo de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos, de los cuales:

- 5 La figura 1 es un diagrama esquemático que ilustra el combustible FCM para ser procesado dentro de una matriz de combustible múltiple;
 la figura 2 es un gráfico que ilustra los resultados de FCM sustituto compactado utilizando un proceso de sinterización de corriente continua (DCS – Direct Current Sintering, en inglés); y
 la figura 3 es una micrografía SEM de una microestructura FCM producida mediante DCS.

10 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE REALIZACIONES PARTICULARES

La siguiente descripción detallada se puede leer en relación con los dibujos adjuntos en los que números similares designan elementos similares.

- 15 La figura 1 es un diagrama esquemático que ilustra la formación y el procesamiento de un combustible FCM en un bloque de matriz de múltiples prensas. En la figura 1, un elemento 1 de combustible no procesado incluye una pluralidad de partículas 10 de combustible micro-encapsulado mezcladas con una matriz 3 cerámica. La pluralidad de partículas 10 de combustible micro-encapsulado son partículas de combustible isotrópico tri-estructural (TRISO). El término “partícula de combustible TRISO”, tal como se utiliza en el presente documento, se refiere a cualquier tipo de micropartícula de combustible que comprende un núcleo de combustible y una o más capas de materiales isotrópicos que rodean el núcleo de combustible. Solo a modo de ejemplo, la partícula 10 de combustible puede tener un diámetro de aproximadamente 1 milímetro.

- 20 En la realización mostrada en la figura 1, la partícula 10 de combustible incluye un núcleo 11 de combustible en su centro. El núcleo de combustible puede comprender materiales fisibles y/o fértiles (por ejemplo, uranio, plutonio, torio, etc.) en forma de óxido, carburo u oxcarburo. En una realización particular, el núcleo 11 de combustible incluye uranio poco enriquecido (LEU – Low Enriched Uranium, en inglés) de cualquier nivel de enriquecimiento adecuado.

- 25 Cuando el elemento de combustible se utiliza para la reducción y/o la eliminación de residuos, el núcleo 11 de combustible puede incluir, alternativa o adicionalmente, transuránicos (TRU – TRansUranics, en inglés) y/o productos de fisión extraídos o reprocesados de los combustibles consumidos.

- 30 Por ejemplo, el elemento de combustible puede ser utilizado para la destrucción de desechos transuránicos generados, por ejemplo, por reactores de agua ligera o armas nucleares desmanteladas. Para ese propósito, el elemento de combustible puede incluir núcleos 11 de combustible formados por elementos transuránicos extraídos de un combustible consumido de un reactor de agua ligera y/o un núcleo de un arma nuclear. De acuerdo con una realización particular, un elemento de combustible formado de acuerdo con los métodos descritos puede ser utilizado como combustible para un reactor de agua ligera, para destruir el desecho transuránico mientras, al mismo tiempo, genera energía a partir del mismo.

- 35 La partícula 10 de combustible ilustrada en la figura 1 incluye, asimismo, cuatro capas distintas recubiertas sobre el núcleo 11 de combustible, a saber (1) una capa absorbente 15 de carbono poroso; (2) una capa interior 14 de carbono pirolítico (PyC); (3) una capa cerámica 13; y (4) una capa exterior 12 de PyC.

- 40 La capa absorbente 15 de carbono poroso rodea el núcleo 11 de combustible y sirve como un depósito para contener la acumulación de gases de fisión que se difunden fuera del núcleo 11 de combustible y cualquier deformación mecánica que el núcleo 11 de combustible pueda sufrir durante el ciclo de combustible.

- 45 La capa interior 14 de PyC puede estar formada de PyC relativamente denso y sella la capa absorbente 15 de carbono.

- 50 La capa cerámica 13 puede estar formada de un material de SiC y sirve como una barrera principal de producto de fisión y un recipiente a presión para el núcleo 11 de combustible, que retiene productos de fisión gaseosos y metálicos en la misma. Asimismo, la capa cerámica 13 proporciona una integridad estructural general de la partícula 10 de combustible.

- 55 En algunas realizaciones, el SiC en la capa cerámica 13 puede ser reemplazado o complementado con carburo de circonio (ZrC) o cualquier otro material adecuado que tenga propiedades similares a las del SiC y/o ZrC.

- 60 La capa exterior 12 de PyC protege la capa cerámica 13 del ataque químico durante la operación y actúa como un límite de difusión adicional a los productos de fisión. La capa exterior 12 de PyC también puede servir como un sustrato para unirse a la matriz cerámica 3 circundante.

- 65 La configuración y/o composición de la partícula 10 de combustible no está limitada a las realizaciones descritas anteriormente. Por el contrario, se debe entender que una partícula de combustible consistente con la presente invención puede incluir una o más capas adicionales, dependiendo de las propiedades deseadas de la partícula de

combustible. Por ejemplo, en ciertas realizaciones, la partícula de combustible está revestida con una capa cerámica adicional (es decir, una capa de SiC) antes de mezclarse con el material de la matriz.

En realizaciones particulares, la matriz cerámica 3 incluye polvo de SiC mezclado con aditivos de sinterización y puede estar en forma de suspensión a base de polvo, suspensión cerámica para colada en cinta o cualquier otro tipo de mezcla conocido en la técnica. Antes de la mezcla, las partículas 10 de combustible pueden ser recubiertas con un material adecuado de protección superficial. El polvo de SiC puede tener un tamaño promedio de menos de 1 mm y/o un área superficial específica mayor de 20 m²/g. A modo de ejemplo, el tamaño del polvo de SiC puede variar entre aproximadamente 15 nm y aproximadamente 51 nm, siendo el tamaño medio de partícula de aproximadamente 35 nm.

Durante o antes de la mezcla, se pueden agregar aditivos de sinterización, tales como, por ejemplo, alúmina y óxidos de tierras raras, por ejemplo, Y₂O₃, individualmente o en combinación, al polvo de SiC, y/o ser recubiertos sobre la superficie del polvo de SiC. En ciertas realizaciones, la cantidad de aditivos de sinterización es de hasta 15 % en peso o, en ciertas realizaciones adicionales, entre 6 % en peso y 10 % en peso. Cuando es mezclado con las partículas 10 de combustible, el material precursor a base de SiC que contiene el polvo de SiC puede estar en una variedad de estados físicos (por ejemplo, polvo, líquido, suspensión, etc.) dependiendo del método de mezcla y/o fabricación utilizado.

El pequeño tamaño o la gran área superficial específica del polvo de SiC, con una fracción de masa limitada de los aditivos de sinterización, puede permitir la formación de una matriz de SiC altamente cristalina, de densidad casi total, en condiciones suficientes para garantizar la integridad de las partículas 10 de combustible. La matriz de SiC proporciona una barrera adicional a los productos de fisión que pueden ser liberados durante el funcionamiento normal y temperaturas de accidente y contaminar el refrigerante del reactor. Asimismo, la matriz de SiC ayuda a contener productos de fisión después de la eliminación.

Por ejemplo, la figura 3 muestra una vista microscópica, en sección transversal parcial de un elemento de combustible 20 fabricado con un método consistente con los métodos descritos en el presente documento. Tal como se puede ver en la figura 5, el elemento de combustible 20 tiene interfaces muy limpias entre las partículas 10 de combustible y la matriz cerámica 3. Además, la matriz cerámica 3 tiene una porosidad muy baja (por ejemplo, solo aproximadamente entre 3-4% de microporosidad cerrada), formando una barrera impermeable a los gases que actúa como barrera secundaria a la difusión de los productos de fisión/actínidos y otras liberaciones de radiactividad de las partículas 10 de combustible.

Además, la matriz cerámica 3 tiene una permeabilidad muy baja al helio (por ejemplo, del orden de aproximadamente 10⁻¹⁰ a 10⁻¹¹ m²/s), que es sustancialmente más baja que la de grafito y la hace particularmente adecuada para un reactor de gas refrigerado que utiliza helio como refrigerante. La baja permeabilidad de la matriz cerámica 3 también puede garantizar la retención del gas del producto de fisión.

Adicionalmente, un elemento de combustible 1 producido de acuerdo con los métodos descritos en el presente documento tiene una conductividad térmica sustancialmente mayor que la del elemento de combustible UO₂. Una conductividad térmica más alta tiene muchos efectos beneficiosos. Por ejemplo, una conductividad térmica más alta puede permitir la operación del reactor nuclear a una temperatura más alta. La operación de un reactor a una temperatura más alta puede aumentar la eficiencia y la densidad de potencia, lo que puede permitir la reducción del tamaño del reactor. Una conductividad térmica más alta también puede permitir una mayor combustión del elemento de combustible mientras se mantiene la integridad general del combustible. Además, tal como se mencionó anteriormente, una mayor combustión puede no solo reducir el volumen total de residuos, sino también limitar la posible proliferación nuclear y las oportunidades de desvío. Además, el combustible con alta conductividad térmica puede sufrir transitorios de temperatura menos severos durante una condición de accidente, tal como un accidente por pérdida de refrigerante (LOCA – Loss Of Coolant Accident, en inglés). En condiciones de funcionamiento de un reactor de agua ligera, no se espera que ocurra una migración de los productos de fisión (incluidos gases) fuera de las partículas de combustible TRISO y de la matriz de SiC.

Además, la matriz cerámica 3 tiene mayor resistencia a la fractura, mayor resistencia a la irradiación y menor hinchado por irradiación que el grafito o el UO₂. La combinación de un mejor rendimiento de irradiación y una mejor conductividad térmica puede dar como resultado un mejor rendimiento mecánico en comparación con el grafito o el elemento de combustible UO₂. En realizaciones particulares, la matriz cerámica 3 resultante se considera una forma de SiC casi estequiométrica, resistente a la radiación, que permite que el elemento de combustible sea estable en el depósito para su eliminación directa, incluso después de un quemado sustancial (por ejemplo, entre el 60 y el 99 % de quemado).

Tal como se mencionó anteriormente, los métodos citados anteriormente para fabricar un elemento de combustible que comprende partículas de combustible y una matriz cerámica incluían el prensado en caliente de una mezcla de partículas de combustible y una matriz cerámica. Por ejemplo, la mezcla estaría sujeta a presiones cercanas, pero no superiores a 10 MPa y temperaturas cercanas, pero no superiores a 1850 °C para lograr una matriz cerámica de grano grande continua, sin poros, que rodea las partículas TRISO que permanecen intactas e íntimamente unidas

con la matriz cerámica externa. Después del prensado en caliente, el elemento de combustible será procesado para obtener la configuración final. El procesamiento generalmente incluía una etapa de triturado sin centro común al proceso UO₂. Asimismo, tal como se mencionó anteriormente, la naturaleza heterogénea del elemento de combustible proporciona que la etapa de triturado podría dejar expuesto indeseablemente un núcleo de TRISO.

En realizaciones del método descrito en el presente documento, se evita el procesamiento adicional tal como una etapa de triturado, preparando un cuerpo verde que tenga la configuración final. El cuerpo verde o elemento de combustible 1 no procesado ilustrado en la figura 1 incluye las partículas 10 de combustible mezcladas con la matriz cerámica 3 dentro de un manguito 2 de combustible cerámico, que se ilustra como un tubo. Se debe observar que otras formas también son adecuadas, tal como un granulado cilíndrico, una esfera o una varilla alargada, según el tipo y/o las características de funcionamiento del reactor nuclear en el que se pretende utilizar el elemento de combustible.

El manguito 2 de combustible cerámico puede ser fabricado a partir, por ejemplo, de SiC de pedigrí similar a la matriz cerámica o de grafito de grado nuclear. Alternativamente, el manguito de combustible cerámico puede incluir fibras de SiC o cuerpos verdes de densidad intermedia de SiC de nano polvo. Cuando el manguito de combustible cerámico es un cuerpo verde de densidad intermedia de nano polvo de SiC, los constituyentes de nano polvo contienen cantidades similares de alúmina e itria como la matriz cerámica. En ciertas realizaciones del SiC de nano polvo del manguito de combustible cerámico, el polvo de SiC es algo más grande que el polvo de SiC de la matriz cerámica para retardar el flujo durante la sinterización, e inhibir de este modo el movimiento del TRISO a través de esta pared exterior.

El grosor de la pared del manguito de combustible cerámico se determina a partir de consideraciones estructurales del combustible y neutrónicas del reactor. En ciertas realizaciones, el grosor de la pared es de 0,5 mm o mayor. Cuando se desean estructuras más rígidas, el grosor de la pared puede ser aumentado hasta 2 mm. La utilización del manguito de combustible cerámico ayuda a eliminar la necesidad del mecanizado final.

La mezcla de partículas 10 de combustible y la matriz cerámica 3 puede ser uniforme en todas partes o como una estructura en capas, donde las capas superior e inferior de la mezcla no contienen partículas de combustible. Un ejemplo de esta estructura en capas se ilustra en la figura 1 con el número de referencia 3A, que se refiere a la región central del cuerpo verde o al elemento de combustible 1 sin procesar, que contiene partículas de combustible junto con los constituyentes de polvo de matriz cerámica y el número de referencia 3B que se refiere a la parte superior y áreas inferiores, que no contienen partículas de combustible. En ciertas realizaciones, el grosor nominal de las capas 3B es igual o similar al grosor de la pared del manguito de combustible cerámico. Por ejemplo, el grosor nominal de las capas 3B está comprendido entre 0,5 y 2 mm.

En ciertas realizaciones, las capas 3B, si están presentes, funcionarían como una capa que tiene una cantidad reducida de ayuda de sinterización para problemas de compatibilidad del refrigerante del reactor. El nivel de ayuda de sinterización puede ser tan bajo como cero. En ciertas realizaciones, las capas 3B, si están presentes, funcionan para proporcionar una seguridad adicional al combustible, al aumentar la longitud del trayecto para que los productos de fisión migratorios lleguen a la superficie libre del combustible.

El cuerpo verde o el elemento de combustible 1 no procesado se compacta siendo colocado en un bloque de matriz 4 resistivo de multi-prensa para su posterior fabricación. En la figura 1, el bloque de matriz 4 resistivo de multi-prensa contiene múltiples aberturas paralelas para cuerpos verdes o elementos de combustible 1 no procesados. Pudiendo contener el bloque de matriz para compresión múltiples cuerpos verdes o elementos de combustible 1 no procesados simultáneamente, reduce significativamente el tiempo de procesamiento, permitiendo el procesamiento de muestras paralelas. Por ejemplo, el tiempo de ejecución total para la producción de elementos de combustible que utilizan realizaciones de los métodos descritos en el presente documento es inferior a 15 horas. En ciertas realizaciones, el tiempo de ejecución total es inferior a 45 minutos. En ciertas realizaciones adicionales más, el tiempo de ejecución total no es mayor de 35 minutos. Adicionalmente, manteniendo para compresión múltiples cuerpos verdes o elementos de combustible sin procesar en aberturas paralelas en una sola matriz, combustible idéntico consistente con la producción en masa. En realizaciones particulares, el bloque de matriz está formado de grafito.

Después de cargar el bloque de matriz 4 resistivo de multi-prensa, es colocado en el interior de un sistema de sinterización de corriente continua (DCS – Direct Current Sintering, en inglés). La DCS, similar en función a un sistema de sinterización por plasma de chispas (SPS – Spark Plasma Sintering, en inglés), pasa una corriente a través del bloque de matriz 10 y, en menor medida, los cuerpos verdes o los elementos de combustible 1 no procesados alcanzan rápidamente la temperatura objetivo de una manera controlada.

En realizaciones particulares, los parámetros de DCS son controlados para obtener un elemento de combustible con una densidad de envoltorio de 3,22 g/cm³ (casi teórica). Uno de tales parámetros incluye el desplazamiento de la matriz, que incluye la expansión relativa en primer lugar con la expansión térmica del polvo prensado en frío y a continuación, la contracción a medida que comienza el proceso de sinterización. En el método, el desplazamiento total de la matriz depende de la densidad inicial de prensado en frío y se encuentra que el producto final es casi

5 teórico en un amplio rango de densidades iniciales de polvo de prensado en frío. Por esta razón, en ciertas realizaciones, se elige una presión fría inicial comprendida entre 5 y 10 MPa para evitar la ruptura de la cubierta cerámica de la partícula de TRISO. Otro parámetro incluye la rampa de temperatura. En los métodos anteriores de prensado en caliente, la rampa de temperatura es de aproximadamente 10 °C/min. No obstante, el procesamiento de DCS puede lograr una microestructura de matriz idéntica y una densidad casi teórica con velocidades de calentamiento compactas superiores a 10 °C/min. Por ejemplo, la velocidad de calentamiento puede ser mayor de 40, 50 o 70 °C/min, y menor de 200, 180, 160 o 150 °C/min. En realizaciones particulares, la rampa de temperatura o velocidad de calentamiento está comprendida entre 70 y 150 °C/min. Otra realización más es la temperatura de mantenimiento durante el procesamiento de DCS. En ciertas realizaciones, la temperatura de mantenimiento está
10 comprendida entre 1.650 y 1.900 °C, o entre 1.700 y 1.800 °C en realizaciones más particulares.

Ejemplo

15 La figura 2 proporciona la rampa de temperatura y el desplazamiento de la matriz para un combustible representativo que alcanzó 3,22 g/cm³ de densidad envolvente (casi teórica). En esta ejecución se eligió una temperatura de proceso de 1.700 °C con un tiempo de permanencia de 10 minutos mientras se aplica una carga de 5 MPa. El tiempo de ejecución total, incluida la extracción y el enfriamiento de la parte de FCM fue de 35 minutos, lo que se compara favorablemente con varias horas para la producción de FCM prensado en caliente.

20 Aunque se ilustra en figuras separadas, cualquier característica ilustrada y descrita en una figura o realización podría ser sustituida o agregada a cualquiera de las otras realizaciones descritas anteriormente.

Aunque se describe en relación con las realizaciones preferidas de las mismas, los expertos en la materia apreciarán que se pueden realizar adiciones y modificaciones no descritas específicamente sin apartarse del alcance de la invención tal como está definida en las reivindicaciones adjuntas.
25

REIVINDICACIONES

1. Un método que comprende:

- 5 proporcionar una pluralidad de partículas (10) de combustible isotrópico tri-estructural, en donde las partículas de combustible isotrópico tri-estructural comprenden un núcleo (11) de combustible, una capa absorbente (15) de carbono poroso, una capa interior (14) de carbono pirolítico, una capa cerámica (13) y una capa exterior (12) de carbono pirolítico;
- 10 mezclar la pluralidad de partículas de combustible isotrópico tri-estructural con polvo cerámico para formar una mezcla;
- colocar la mezcla en una matriz (4); y
- aplicar una corriente a la matriz para sinterizar la mezcla mediante sinterización de corriente directa en un elemento de combustible.
- 15 2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende, además, agregar la mezcla a un manguito (2) de combustible cerámico antes de colocar la mezcla en la matriz, en donde colocar la mezcla en la matriz incluye colocar el manguito de combustible cerámico que contiene la mezcla en la matriz.
- 20 3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el manguito de combustible cerámico comprende carburo de silicio, SiC.
4. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el manguito de combustible cerámico comprende la misma composición que el polvo cerámico.
- 25 5. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la matriz incluye más de una abertura paralela y el método incluye colocar una mezcla de la pluralidad de partículas de combustible isotrópico tri-estructural con polvo cerámico en cada una de las aberturas.
- 30 6. El método de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la matriz incluye más de una abertura paralela, y el método incluye colocar un manguito de combustible cerámico que contiene una mezcla de la pluralidad de partículas de combustible isotrópico tri-estructural con polvo cerámico en cada una de las aberturas.
7. El método de acuerdo con la reivindicación 6, en el que la matriz 5 comprende grafito.
- 35 8. El método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el elemento de combustible tiene una dimensión precisa de la parte exterior después del proceso de sinterización, sin que se produzca ningún procesamiento adicional después del proceso de sinterización para obtener la dimensión precisa de la parte exterior.
- 40 9. El método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el polvo cerámico comprende SiC.
10. El método de acuerdo con la reivindicación 9, en el que el polvo cerámico comprende, además, aditivos de sinterización.
- 45 11. El método de acuerdo con la reivindicación 10, en el que los aditivos de sinterización incluyen alúmina o un óxido de metal de tierras raras o una combinación de los mismos.
12. El método de acuerdo con la reivindicación 11, en el que el óxido de metal de tierras raras es itria.
- 50 13. El método de acuerdo con una de las reivindicaciones 10 a 12, en el que el polvo cerámico incluye los aditivos de sinterización en una cantidad de hasta el 10 por ciento en peso del peso total del polvo cerámico.
14. El método de acuerdo con una de las reivindicaciones 9 a 13, en el que el elemento de combustible comprende SiC casi estequiométrico
- 55 15. El método de acuerdo con la reivindicación 14, en el que el tiempo total de ejecución del método es inferior a una hora.
- 60 16. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, en el que el polvo cerámico forma una matriz cerámica (3) que rodea la pluralidad de partículas de combustible tri-estructural isotrópico.

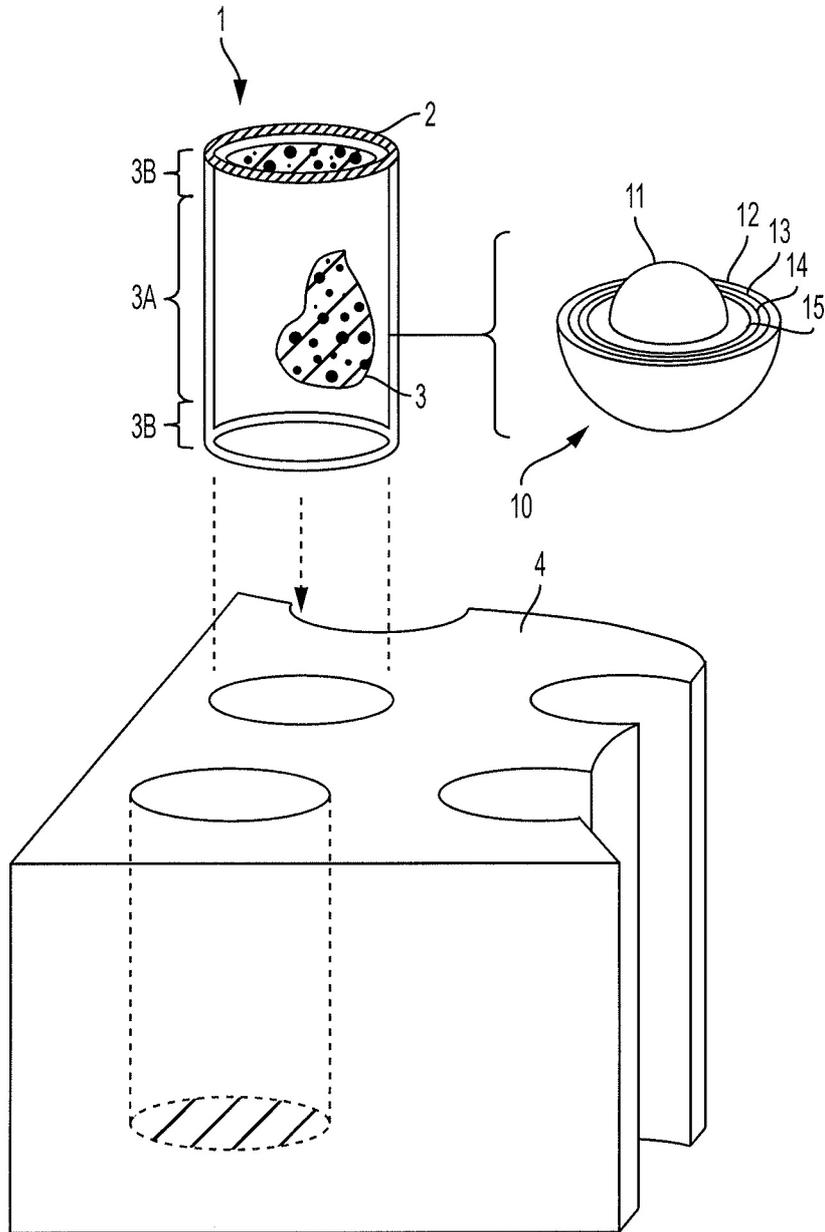


Figura 1

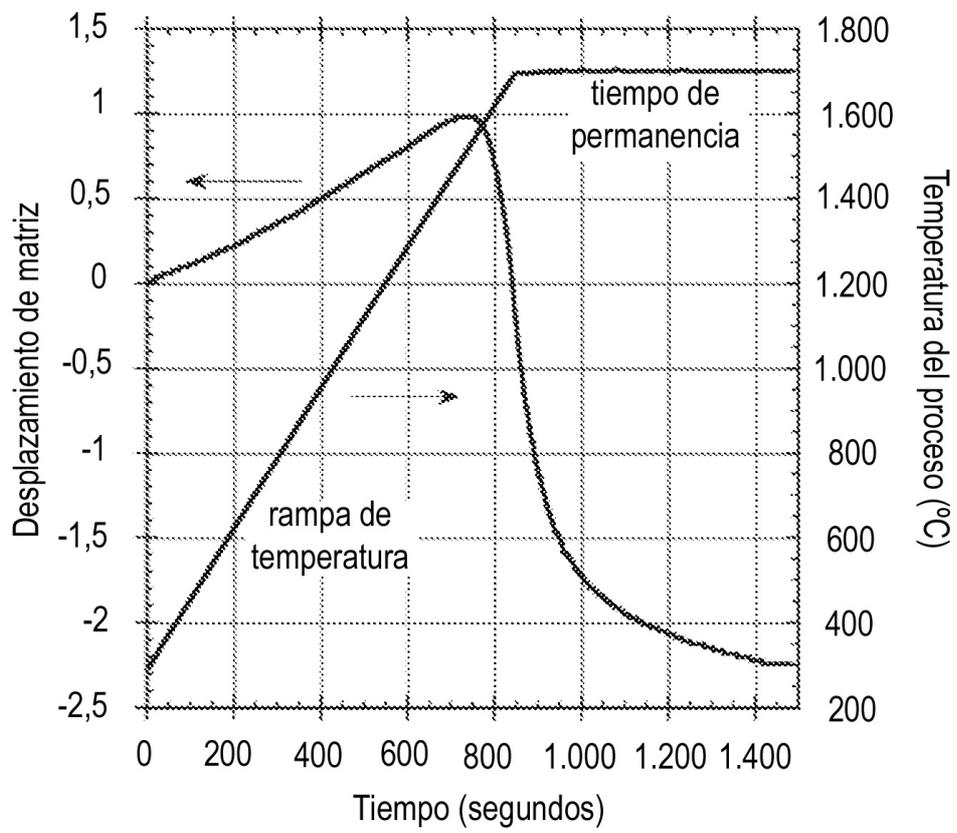


Figura 2

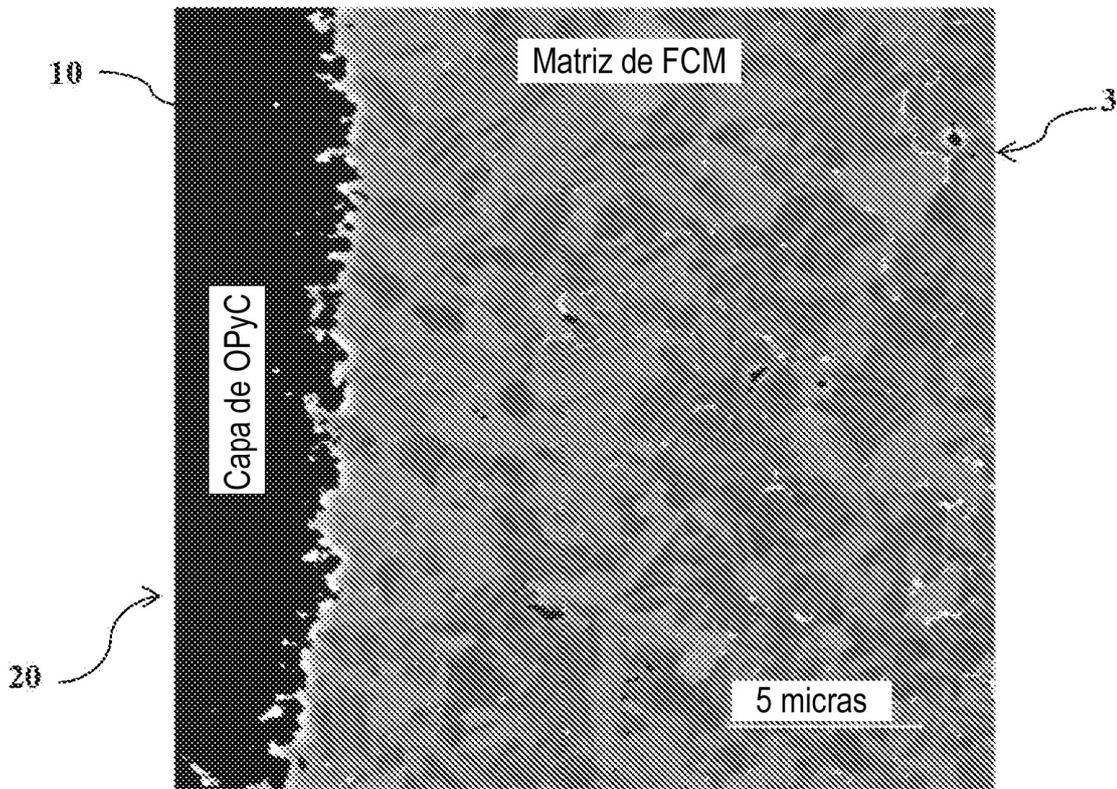


Figura 3