

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **3 003 308**

(51) Int. Cl.:

G21B 1/13 (2006.01)

G21C 3/62 (2006.01)

G21C 21/02 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.11.2020 E 20383029 (4)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2024 EP 4006919**

(54) Título: **Combustible de grano encapsulado**

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.03.2025

(73) Titular/es:

UNITED KINGDOM ATOMIC ENERGY AUTHORITY (100.00%)
Culham División, Culham Science Centre
Abingdon, Oxfordshire OX14 3DB, GB

(72) Inventor/es:

PLAZA, FRANCISCO JOSE CALVO;
FERNANDEZ, JORGE FRADERA;
CIPRIAIN, SERGIO SADABA y
HA, SAMUEL

(74) Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 3 003 308 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

Combustible de grano encapsulado

5 Campo de la invención

La divulgación se refiere a un grano encapsulado, un método de fabricación del grano, un módulo de manta de cría, un reactor de fusión que comprende el grano y/o la manta de cría, y usos de los mismos.

10 Antecedentes de la invención

El grano combustible es conocido en procesos de fusión nuclear así como en procesos de fisión nuclear. En los procesos de fisión, el grano suele estar compuesto por capas de carbono pirolítico impermeables, cada una de las cuales contiene una gran cantidad de partículas de combustible, como partículas TRISO.

15 También se han propuesto lechos de granos para los reactores de fusión, específicamente como parte de la manta cría. En un reactor de fusión, la manta de cría envuelve el núcleo del reactor donde se genera el plasma y proporciona protección contra los neutrones generados en el plasma al absorberlos, extrae calor para la generación de energía y genera tritio, necesario para lograr el principio de autosuficiencia de un reactor de fusión.

20 Las mantas existentes se pueden dividir en dos categorías: mantas de combustible líquido (combustible fundido) y mantas de combustible sólido. Las mantas líquidas tienen problemas termohidráulicos y de compatibilidad de materiales debido a la corrosión a altas temperaturas, mientras que las mantas sólidas tienen problemas con, por ejemplo, la extracción de tritio.

25 El documento US 3,878,041 describe un combustible nuclear para su uso en reactores refrigerados por gas que comprende un kernal recubierto de carbono de $UO_{2-x}N_{3/4x}$ donde $0 < x \leq 1$. El documento WO 2011/071575 A1 describe un grano multiplicador de neutrones que incluye un núcleo de berilio que tiene al menos uno de berilio poroso y beriluro metálico, en donde el núcleo de berilio es esférico y tiene un radio de aproximadamente 0,1 mm a aproximadamente 20 mm, y el grano multiplicador de neutrones incluye un recubrimiento sobre el núcleo de berilio. El documento US 4,634,567 A describe objetivos de fusión, en particular la producción de objetivos de fusión por confinamiento inercial de múltiples capas.

30 35 Compendio de la invención

Como se señaló anteriormente, existen limitaciones con las mantas existentes para los procesos de fusión. Por lo tanto, sería valioso contar con una mejora destinada a abordar estas limitaciones.

40 45 Por lo tanto, de acuerdo con un primer aspecto, se proporciona un grano encapsulado, que comprende:

un núcleo de combustible de fisión o un núcleo de combustible de fusión;

una jaula que encapsula el núcleo de combustible, en donde la jaula comprende al menos un canal de transporte de gas a través de la misma y el diámetro interno de la jaula es mayor que el diámetro externo del núcleo de combustible; y

50 una cubierta de cerámica contenida dentro de la jaula y que rodea el núcleo de combustible y/o un inserto de cerámica dispuesto en al menos un canal de transporte de gas, en donde la cubierta de cerámica o el inserto de cerámica comprende una cerámica permeable al gas.

La jaula que encapsula el núcleo proporciona soporte estructural y protege el núcleo contra el impacto al mismo tiempo que permite que el gas salga del grano.

55 Segundo aspecto, se proporciona un método para formar un grano encapsulado, que comprende:

encapsular un núcleo de combustible de fisión o un núcleo de combustible de fusión dentro de una jaula, en donde la jaula comprende al menos un canal de transporte de gas a través de la misma y el diámetro interno de la jaula es mayor que el diámetro externo del núcleo de combustible, comprendiendo el método formar una cubierta cerámica permeable al gas alrededor del núcleo de combustible de fisión o el núcleo de combustible de fusión y encapsular la cubierta cerámica formada dentro de la jaula, o introducir un inserto cerámico permeable al gas en al menos un canal de transporte de gas.

60 65 Segundo aspecto, se proporciona un módulo de manta de cría para un reactor de fusión, que comprende:

- una pluralidad de lechos de granos conectados en serie y/o en paralelo; y
- una pluralidad de granos encapsulados dentro de cada lecho de granos, en donde al menos un grano encapsulado comprende un núcleo de combustible de fusión de acuerdo con el primer aspecto.
- 5 Al conectar la pluralidad de lechos de granos en serie y/o en paralelo, se pueden lograr procesos de enfriamiento y extracción de tritio más eficientes.
- Según un cuarto aspecto, se proporciona un método para operar el módulo de manta de cría del tercer aspecto,
- 10 que comprende:
- proporcionar un flujo de gas refrigerante al módulo de manta de cría;
- 15 permitiendo que el gas refrigerante extraiga calor y tritio del módulo de manta de cría, proporcionando un gas calentado y enriquecido con tritio;
- retirar el gas calentado del módulo de manta de cría; y
- 20 extrayendo el tritio del gas calentado.
- Según con un quinto aspecto, se proporciona un reactor de fusión que comprende al menos un grano encapsulado que comprende un núcleo de combustible de fusión de acuerdo con el primer aspecto.
- 25 Los usos del grano encapsulado del primer aspecto y del módulo de manta de cría del tercer aspecto constituyen aspectos adicionales de la divulgación.
- Según los aspectos descritos anteriormente, se abordan las limitaciones de las técnicas existentes. En particular, las funciones de refrigeración, soporte estructural y contención se separan en los diferentes componentes del grano encapsulado. El módulo de manta de cría también tiene una masa reducida de material estructural. De este modo, se obtiene un grano encapsulado mejorado, una manta de cría y sus usos.
- 30 Estos y otros aspectos serán evidentes y se aclararán con referencia a la(s) realización(es) descritas a continuación.
- 35 Breve descripción de los dibujos
- A continuación se describirán realizaciones, a modo de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:
- 40 la figura 1A describe un grano encapsulado según una realización;
- la figura 1B describe un grano encapsulado según una realización;
- 45 la figura 2 describe granos encapsulados empaquetados juntos en un lecho de granos de acuerdo con una realización; y
- la figura 3 describe un módulo de manta de cría según una realización.
- 50 Descripción detallada de las realizaciones
- 55 *Grano encapsulado*
- Como se ha indicado anteriormente, en el presente documento se proporciona un grano encapsulado que comprende un núcleo y una jaula que encapsula el núcleo. En algunas realizaciones, el grano encapsulado puede ser un grano de combustible, adecuado para su uso en un reactor de fisión. En algunas realizaciones, el grano encapsulado puede ser un grano de cría, adecuado para su uso en una manta de cría de un reactor de fusión. Se entenderá que los términos grano de cría y grano combustible pueden usarse indistintamente en este documento cuando se describen componentes similares a ambos sistemas.
- 60 La jaula comprende al menos un canal de transporte de gas a través de la misma, para permitir que el gas salga del núcleo y evitar una acumulación excesiva de presión dentro del núcleo. Si bien la presente divulgación se ocupa principalmente de granos encapsulados para su uso en mantas de cría de reactores de fusión nuclear, se observa que los granos también pueden encontrar uso en procesos de fisión, por ejemplo en reactores de sal fundida en los que se producen productos de fisión gaseosos y volátiles como xenón, criptón y yodo y deben capturarse y eliminarse. Tal como se utiliza en el presente documento, el término "jaula" debe entenderse como una estructura tridimensional en la que están contenidos uno o más materiales, por ejemplo, un núcleo y/o una

cubierta de cerámica. La jaula tiene una estructura lo suficientemente resistente como para no deformarse con el uso, protegiendo así su contenido de posibles daños por impacto con otros objetos.

El grano encapsulado comprende un núcleo de combustible. En algunos ejemplos, el núcleo de combustible también puede denominarse aquí núcleo de cría. En los procesos de fusión, el material de cría genera tritio, que es el combustible para el proceso de fusión y por lo que también se denomina aquí núcleo generador de combustible o núcleo de combustible. En algunos ejemplos, el núcleo de combustible comprende un material de cría capaz de generar tritio, como los conocidos en los procesos de fusión existentes. Las temperaturas de funcionamiento de las mantas de cría para los procesos de fusión suelen ser superiores a 300 °C, por lo que el núcleo del combustible puede estar compuesto por una sal fundida que es líquida a una temperatura superior a unos 300 °C. Hay muchas sales fundidas diferentes que se pueden utilizar en las mantas de cría. Normalmente, el material de cría comprende una sal de litio, por ejemplo Li₂BeF₄ (FLiBe), ya que la producción de tritio en reactores de fusión normalmente se logra por medio de las reacciones Li⁶(n,α)H³ y Li⁷(n,n',α)H³. Se sabe que el FLiBe tiene una elevada tasa de generación de tritio (TBR) y tiene un punto de fusión de 459 °C, aunque otros criadores líquidos como las aleaciones de PbLi, por ejemplo Pb₁₇Li₈₃O las sales LiF-LiI-LiCl también son adecuados. Se entenderá que la composición del material de cría, por ejemplo una mezcla de LiF-LiI-LiCl, puede adaptarse a los requisitos operativos.

En algunas realizaciones, el núcleo de combustible comprende además un material de control redox, por ejemplo berilio metálico. En realizaciones en las que el núcleo de combustible comprende una sal de fluoruro, una reacción redox entre el tritio y el fluoruro generados puede dar como resultado fluoruro de tritio. El fluoruro de tritio es tan corrosivo como el fluoruro de hidrógeno y podría corroer los componentes de la manta de cría, incluida la jaula si está hecha de metal. Sin embargo, la inclusión de un material de control redox como el berilio metálico puede evitar la generación de fluoruro de tritio, de modo que se forme tritio diatómico (molecular) en su lugar. También podrían utilizarse otros controladores redox como el circonio.

El grano encapsulado comprende una jaula que encapsula el núcleo de combustible. La jaula proporciona suficiente soporte estructural o rigidez alrededor del núcleo de combustible en uso y, cuando está presente, la cubierta de cerámica, para evitar el contacto entre los granos para evitar la generación de polvo, soporta el peso del lecho empaquetado y permite deformaciones debido a cargas mecánicas sin impactar en la extracción de tritio o el enfriamiento de los granos. En algunas realizaciones, la jaula puede ser esférica o cilíndrica. Los granos esféricos son particularmente adecuados para ser colocados en un lecho de granos, como un lecho de combustible cilíndrico como el descrito en este documento.

La jaula comprende al menos un canal de transporte de gas a través de ella, para permitir la permeación de tritio y helio desde el núcleo a través de la jaula. De esta manera, se puede mejorar la eficiencia de la extracción de tritio, al tiempo que se contiene la sal fundida in situ y se evita la acumulación de gas dentro del grano. En algunas realizaciones, la jaula comprende una pluralidad de canales de transporte de gas, aumentando así la eficiencia de la extracción de tritio. El canal de transporte de gas puede ser un canal mecanizado, por ejemplo producido mediante perforación láser de la jaula para proporcionar orificios de aproximadamente 0,5 µm. En otras realizaciones, el canal de transporte de gas puede formarse mediante la inclusión de poros dentro de la jaula. En otras realizaciones, la jaula comprende una estructura similar a un alambre, por ejemplo, que comprende una malla de fibras tejidas o no tejidas. En algunos ejemplos, las fibras que forman la malla tejida o no tejida pueden tener un diámetro inferior a 5 mm, por ejemplo, un diámetro inferior a 3 mm, por ejemplo, aproximadamente 1 mm. En algunos ejemplos, la malla puede estar formada por fibras de una sola hebra o fibras trenzadas de varias hebras.

En algunas realizaciones, el diámetro de la jaula es menor de 20 mm, por ejemplo menor de 15 mm, por ejemplo aproximadamente 10 mm o menos. En algunas realizaciones, la jaula tiene un espesor de menos de 2 mm, por ejemplo menos de 1,5 mm, por ejemplo aproximadamente 1 mm o menos. En algunas realizaciones, el diámetro interno de la jaula puede ser mayor que el diámetro externo del núcleo de combustible. En realizaciones en las que el grano encapsulado comprende una cubierta de cerámica que rodea el núcleo de combustible, el diámetro interno de la jaula puede ser mayor que el diámetro externo de la cubierta de cerámica. De esta manera se puede crear un espacio entre la jaula y los componentes internos. Si se deja un espacio entre el núcleo de combustible y la jaula, o entre la cubierta cerámica y la jaula, el tritio extraído puede permeabilizarse eficazmente desde el núcleo de combustible y salir del grano hacia el lecho de granos.

La máxima eficiencia térmica de la manta de cría está determinada por la temperatura operativa máxima de los materiales estructurales. Por lo tanto, la selección de materiales estructurales como la jaula está impulsada en parte por su activación y su rendimiento a altas temperaturas. El mayor beneficio se puede obtener trabajando en régimen de fluencia, evitando el estrés térmico cíclico excesivo. Las cargas cíclicas indeseables provocan interacciones de fatiga por fluencia y deformación progresiva. Si la temperatura del material se reduce demasiado, los efectos de la radiación de fragilización pasan a ser dominantes. En algunas realizaciones, la jaula comprende una jaula metálica, por ejemplo formada a partir de una aleación metálica, por ejemplo un acero. La aleación metálica puede comprender un acero martensítico ferrítico de activación reducida, un acero austenítico o un acero con dispersión de óxido. Los aceros utilizados en la industria nuclear son bien conocidos.

- En una realización, la jaula comprende o está formada a partir de EUROFER 97, un acero martensítico ferrítico de activación reducida. Otros materiales adecuados incluyen los aceros conocidos MHT-9, ODS, F82H y ORNL 9Cr-2WVTa. En otras realizaciones, la jaula comprende un material fibroso, por ejemplo fibra de carbono o fibra de vidrio. En algunas realizaciones, el material fibroso tiene un canal de transporte de gas en virtud de ser un material fibroso poroso, por ejemplo una malla tejida o no tejida. En algunas realizaciones, la jaula comprende una cerámica estructural como sílice o un compuesto de fibra de carbono.
- En algunas realizaciones, el grano encapsulado comprende una cubierta de cerámica. La cubierta de cerámica puede ser una capa intermedia entre el núcleo de combustible y la jaula. En algunas realizaciones, la cubierta de cerámica encierra el núcleo de combustible. En algunas realizaciones, la cubierta de cerámica está dispuesta sobre el núcleo de combustible y en contacto directo con él.
- En algunas realizaciones, el grano encapsulado comprende un inserto cerámico dispuesto dentro del al menos un canal de transporte de gas. En algunas realizaciones, el grano encapsulado comprende una pluralidad de canales de transporte de gas, cada uno con un inserto de cerámica dispuesto en el mismo.
- La cerámica es porosa, por ejemplo permeable a los gases, lo que permite el transporte de gas (tritio, helio) desde el núcleo de combustible fuera del grano hacia el resto de la manta de cría. En algunas realizaciones, la cerámica es permeable a los gases, pero impermeable a los líquidos, lo que permite el confinamiento de una sal fundida dentro del núcleo de combustible.
- La cerámica es permeable a los gases, lo que significa que tiene un tamaño de poro que permitirá la permeación de tritio y/o helio desde el núcleo, a través de una cubierta de cerámica hasta un vacío entre la jaula y la cubierta de cerámica, o a través de un inserto de cerámica dispuesto en un canal en la jaula, desde donde el gas puede ser transportado a través de la jaula. El tamaño de poro necesario para permitir la permeación del gas y evitar fugas de material de generación de tritio líquido dependerá de la temperatura de funcionamiento en la manta de cría y, por lo tanto, de la diferencia de presión a través de la cerámica porosa. Normalmente, el tamaño de los poros será inferior a 1 µm, por ejemplo, inferior a 0,5 µm, por ejemplo, inferior a 0,25 µm, por ejemplo, inferior a 0,1 µm. En la técnica se conocen métodos para controlar el tamaño de los poros o la cerámica, por ejemplo, mediante la inclusión de materiales de plantilla de sacrificio y el control del tiempo de sinterización y/o la temperatura de sinterización.
- La cerámica puede comprender un material seleccionado por su inercia a una sal fundida del núcleo de combustible. La cerámica puede estar compuesta por un material seleccionado por su capacidad para soportar temperaturas de funcionamiento dentro de una manta de cría, donde las temperaturas pueden alcanzar fácilmente más de 300 °C y pueden superar los 900 °C. Por ejemplo, la cerámica puede comprender un material seleccionado entre sílice, grafito poroso, carburo de silicio, carburo de zinc, carburo de titanio y mezclas de los mismos.
- En estas realizaciones, la cerámica protege el resto de la manta de cría de la naturaleza corrosiva del núcleo fundido durante el funcionamiento, pero también protege la jaula de las temperaturas internas del núcleo de combustible durante el funcionamiento, ya que las operaciones térmicas cíclicas hasta estas temperaturas pueden estresar los metales e impactar negativamente en la vida útil de la jaula a través de la deformación y la fatiga. La naturaleza porosa o permeable a los gases de la cerámica también permite la permeación de tritio y helio gaseosos desde el núcleo para evitar la acumulación de presión interna, al tiempo que evita el escape de combustible fundido. Cuando está presente, la cerámica está protegida de la erosión física o la abrasión por la jaula metálica.
- En algunas realizaciones, se proporciona una bolsa de gas en el grano encapsulado. En algunas realizaciones, la bolsa de gas se proporciona dentro de una cubierta de cerámica dispuesta dentro de la jaula. En algunas realizaciones, la jaula está provista de inserciones de cerámica y la bolsa de gas está provista dentro de la jaula. En algunos ejemplos, la bolsa de gas comprende un gas refrigerante, que puede ser el mismo gas refrigerante que se utiliza en la manta de cría, o puede ser un gas refrigerante diferente. En algunos ejemplos, el gas refrigerante comprende gas nitrógeno, helio, criptón y xenón. Proporcionar un volumen de gas refrigerante dentro del grano encapsulado de combustible permite acomodar los cambios de presión dentro del núcleo de combustible, y proporciona una ubicación dentro del grano en la que el helio y el tritio molecular pueden desorberse o desgasificarse antes de permeabilizarse desde el núcleo de combustible.
- Se proporcionan ejemplos de granos encapsulados en las figuras 1A y 1B. Los ejemplos muestran realizaciones particulares, como por ejemplo el uso de una jaula metálica, pero se entenderá que éstas son sólo a modo de ejemplo y son posibles otras configuraciones y materiales. La figura 1A muestra la estructura de un grano encapsulado 100 que comprende una jaula metálica 102 como cubierta más externa, una cubierta cerámica 108 dentro de la jaula metálica 102 y un núcleo de combustible 110 dentro de la cubierta cerámica 108. La jaula metálica 102 está provista de una pluralidad de orificios o canales de transporte de gas 104 que permiten el flujo de gas en ambas direcciones. Como se describió anteriormente, los canales de transporte de gas 104 permiten el flujo de helio y tritio generados dentro del núcleo de combustible 110 para salir del grano

- de combustible encapsulado 100. Aunque no se muestra claramente en la figura 1A (pero se muestra en la figura 2 que se describe a continuación), el radio interno de la jaula metálica 102 es mayor que el radio externo de la cubierta de cerámica 108, lo que proporciona espacio libre entre la jaula metálica 102 y la cubierta de cerámica 108. Este espacio libre significa que el gas refrigerante puede ingresar al espacio entre la jaula metálica 102 y la cubierta de cerámica 108 y enfriar directamente la cubierta de cerámica 108, lo que aumenta la eficiencia del proceso de enfriamiento. Dentro de la cubierta de cerámica 108 se dispone un núcleo de combustible 110. El núcleo de combustible 110 puede comprender una sal de litio, tal como FLiBe descrita anteriormente. Los neutrones que escapan del plasma del reactor de fusión reaccionan con el litio y generan tritio. Se proporciona una bolsa de gas refrigerante 106 dentro de la cubierta de cerámica 108, a la que el tritio y el helio moleculares pueden desorberse del núcleo de combustible 110 antes de permeabilizar a través de la cubierta de cerámica porosa 108 y salir del grano encapsulado de combustible 100 a través de los canales 104 de transporte de gas. Para controlar las reacciones redox dentro del núcleo de combustible 110 y minimizar la cantidad de fluoruro de tritio corrosivo producido, también se han incluido semillas de material redox 112, como berilio metálico, en el núcleo de combustible 110.
- La figura 1B muestra la estructura de un grano 100 encapsulado alternativo. El grano 100 de la figura 1B tiene la misma jaula metálica 102 que el grano 100 de la figura 1A, pero tiene insertos cerámicos 114 en lugar de la cubierta cerámica 108. Los insertos cerámicos 114 se introducen en los canales de transporte de gas (no numerados) de la jaula metálica 102, proporcionando de este modo un camino permeable al gas pero impermeable a la sal fundida para que el tritio y el helio salgan del grano 100 encapsulado. Al igual que en el grano de la figura 1A, se dispone una bolsa de gas 106, esta vez dentro de una jaula metálica 102, inicialmente llena de gas refrigerante pero en la que se pueden desorber tritio y helio durante el funcionamiento. Aunque no se muestra, también se incluirían semillas de material redox dentro del núcleo de combustible 110, para evitar la formación de materiales corrosivos que de otro modo degradarían la jaula metálica 102.
- La figura 2 muestra un esquema de una pluralidad de granos encapsulados empaquetados juntos, por ejemplo como cuando están presentes en un lecho de granos de un módulo de manta de cría como el descrito en el presente documento. La parte izquierda de la figura 2 muestra un ejemplo en el que las jaulas metálicas 102 (en ausencia de cualquier componente interno del grano encapsulado) se pueden empaquetar juntas. Cada jaula metálica 102 está provista de una pluralidad de canales de transporte de gas, en comunicación fluida con los huecos entre las jaulas metálicas 102 y con los canales de transporte de gas de otras jaulas metálicas 102. Así, cuando está presente en un lecho de granos, el cuerpo de las jaulas metálicas 102 proporciona una red de malla a través de la cual puede fluir el gas refrigerante. La parte derecha de la figura 2A muestra un lecho empaquetado de granos encapsulados 100 basado en el mismo empaquetamiento de jaulas metálicas 102 que se muestra en la parte izquierda de la figura. Como se puede observar, las dimensiones externas de las cubiertas de cerámica 108 son menores que las dimensiones internas de las jaulas metálicas 102, proporcionando así una trayectoria de flujo para el gas refrigerante entre las dos. Para completar el grano encapsulado, se proporcionan cubiertas de cerámica 108 con un núcleo de combustible 110 y una bolsa de gas 106, como se describió anteriormente.
- Método para formar un grano encapsulado*
- También se describe en este documento un método para formar un grano encapsulado. El grano encapsulado puede ser como el descrito anteriormente.
- Son posibles varios métodos para formar los diversos componentes de un grano encapsulado, como lo apreciarán los expertos en la materia.
- Por ejemplo, se conocen métodos para formar pequeñas esferas metálicas huecas sobre soportes de sacrificios tales como poliestireno (<https://www.hollomet.com/en/home.html>), en los que el soporte se mantiene en un lecho fluidizado y se pulveriza una suspensión de polvo metálico con aglutinante (por ejemplo agua) sobre la superficie del soporte en un método de deposición por pulverización. El tratamiento térmico puede quemar el soporte de sacrificio y el aglutinante, dejando el cuerpo verde de una esfera metálica hueca que luego puede sinterizarse en condiciones controladas para formar la jaula metálica con porosidad definida. La perforación láser puede entonces, formar una abertura en la jaula a través de la cual se puede insertar un combustible, seguida de una soldadura para sellar la abertura. Al menos un canal de transporte de gas a través de la jaula metálica se puede formar, por ejemplo, mediante perforación láser. Las técnicas de perforación láser son capaces de proporcionar con precisión agujeros de hasta 0,5 µm de diámetro, por ejemplo.
- En un proceso alternativo, se pueden formar hemisferios metálicos sobre soportes de sacrificio como el indicado anteriormente. Después de que se han quemado el soporte de sacrificio y el aglutinante orgánico, y se han sinterizado los hemisferios metálicos, se puede disponer un núcleo de combustible en un primer hemisferio, que formará una primera parte de la jaula metálica, y una segunda parte de la jaula metálica en forma de un segundo hemisferio se puede unir al primer hemisferio para encapsular el núcleo de combustible. Los dos hemisferios se pueden unir mediante soldadura, por ejemplo, para encapsular el núcleo del combustible.

También se pueden formar esferas o hemisferios cerámicos huecos sobre soportes de sacrificio como se describió anteriormente (<https://www.hollomet.com/en/home.html>). En la realización en la que se proporciona una bolsa de gas dentro de una cubierta cerámica, puede utilizarse un soporte de sacrificio de las mismas dimensiones que la bolsa de gas en combinación con un núcleo de combustible moldeado como plantilla para la deposición cerámica, quemándose posteriormente el soporte de sacrificio. A continuación, los cuerpos cerámicos verdes pueden sinterizarse en condiciones controladas para producir la cubierta cerámica con una porosidad definida. El control del tamaño de poro en cerámica es conocido en la técnica: véase, por ejemplo, Isobe et al., Pore size control of Al₂O₃ ceramics using two-step sintering, Ceramics International (2012), Vol 38(1), 787-793 que describe el control de la formación del tamaño de poro para proporcionar tamaños de poro promedio tan bajos como 22 nm y métodos para determinar el tamaño de poro. En una realización, la cubierta de cerámica se forma alrededor del núcleo de combustible formando dos hemisferios de cerámica, disponiendo un núcleo de combustible en uno de los hemisferios de cerámica y uniendo los dos hemisferios para encapsular el núcleo de combustible. Los dos hemisferios se pueden unir colocando una banda, por ejemplo una banda metálica, alrededor de los dos hemisferios y sujetándolos juntos.

15

Módulo de manta de cría para un reactor de fusión

También se describe en este documento un módulo de manta de cría para un reactor de fusión, que comprende: una pluralidad de lechos de granos conectados en serie y/o en paralelo; y una pluralidad de granos encapsulados dentro de cada lecho de granos. Al menos uno, pero en algunos ejemplos todos, de la pluralidad de granos encapsulados son granos con un núcleo de combustible de fusión como se describe en este documento. En algunos ejemplos, los lechos de granos pueden denominarse lechos de combustible, ya que el combustible de tritio para el reactor se genera dentro de ellos.

25

Los lechos de granos pueden estar dispuestos paralelos entre sí en una matriz de lechos. En algunos ejemplos, cada lecho de granos de la pluralidad de lechos de granos está en comunicación fluida con una entrada de gas y una salida de gas a través de un colector de entrada de gas y un colector de salida de gas respectivamente. El colector de entrada de gas puede estar conectado a una fuente de gas refrigerante, por ejemplo, una fuente de gas nitrógeno, helio o criptón. El flujo de gas refrigerante a través de los lechos de granos tiene dos propósitos: proporcionar enfriamiento a los granos encapsulados y también extraer el tritio generado. El colector de salida de gas puede configurarse para reciclar el tritio en el plasma de un reactor de fusión como combustible.

30

En algunos ejemplos, uno o ambos de los colectores de entrada de gas y de salida de gas están provistos de un plenum, configurado para recibir y permitir la acumulación de cualquier material de cría que se escape de los granos de combustible encapsulados para evitar cualquier impacto en el rendimiento de la unidad de cría.

35

En algunas realizaciones, cada lecho de granos es un lecho alargado. Cada lecho puede ser cilíndrico, lo que permite un empaquetamiento eficiente de los granos encapsulados. Sin embargo, se prevén otras configuraciones. En una realización, el lecho de granos comprende una estructura de panal en la que cada lecho comparte al menos una pared con un lecho adyacente. Independientemente de la forma geométrica de los lechos, cada lecho puede tener un primer extremo y un segundo extremo, y en una realización el colector de entrada de gas está configurado para acoplarse con el primer extremo y el colector de salida de gas está configurado para acoplarse con el segundo extremo de manera que la pluralidad de lechos estén conectados en paralelo.

45

En algunas realizaciones, el colector de entrada de gas y el colector de salida de gas están configurados para definir una o más trayectorias de flujo a través de la pluralidad de lechos. Por ejemplo, cada lecho de la pluralidad de lechos se proporciona en uno de al menos dos grupos de lechos, que pueden definirse en función de la trayectoria de flujo definida por las configuraciones del colector. Un primer grupo de los al menos dos grupos puede definir una primera trayectoria de flujo de gas desde la entrada de gas a través de al menos un lecho del primer grupo hasta la salida de gas, y un segundo grupo de los al menos dos grupos define una segunda trayectoria de flujo de gas desde la entrada de gas a través de al menos un lecho del segundo grupo hasta la salida de gas. La primera trayectoria de flujo de gas y la segunda trayectoria de flujo de gas pueden estar conectadas en paralelo desde la entrada de gas hasta la salida de gas, aunque se entenderá que en cualquier momento de operación, el flujo de gas en un lecho puede estar fluyendo en contracorriente al flujo de gas en un lecho adyacente o no adyacente. Sin embargo, dentro de cada grupo de lechos, cada lecho está conectado en serie con al menos otro lecho. Es decir, el gas refrigerante fluye, por ejemplo, desde el fondo o primer extremo de un lecho y regresa al fondo o segundo extremo del siguiente lecho. El número de grupos de lechos se puede seleccionar en función del número total de lechos y la ruta o rutas de flujo óptimas del gas refrigerante para proporcionar el enfriamiento requerido a los granos encapsulados. En una realización, los colectores están configurados para dirigir el gas refrigerante en una o más trayectorias de flujo que comienzan con los lechos más cercanos al plasma, para proporcionar el máximo enfriamiento a aquellos lechos que más lo necesitan, antes de continuar hacia los lechos espaciados desde el frente (lado del plasma) del módulo de manta de cría.

- La pluralidad de lechos de combustible pueden ser lechos alargados, cada uno con una o más paredes para definir un volumen interno para recibir los granos encapsulados. La pared o paredes de los lechos pueden estar formadas de cualquier material adecuado para su uso en una manta de cría para un reactor de fusión, por ejemplo, un acero martensítico ferrítico de activación reducida tal como el descrito anteriormente en relación 5 con la jaula del grano encapsulado.
- En algunas realizaciones, y para maximizar los procesos de extracción de tritio, la pluralidad de lechos están provistos de un revestimiento de barrera de permeación de tritio, por ejemplo, un revestimiento de cromo (Cr_2O_3) o alúmina (Al_2O_3). Esto garantiza que el tritio fluya desde los lechos a través del colector de salida de 10 gas, punto en el que puede extraerse y enviarse al plasma del reactor.
- En algunas realizaciones, la pluralidad de lechos están espaciados entre sí con huecos dispuestos entre ellos. Se puede proporcionar un material multiplicador de neutrones, por ejemplo sulfuro de plomo, en los huecos 15 entre lechos adyacentes. Se conocen materiales multiplicadores de neutrones en mantas de cría y se pueden utilizar para mejorar la proporción de generación de tritio en el material de cría. Por lo tanto, se entenderá que se pueden utilizar otros materiales multiplicadores de neutrones, por ejemplo, Zr_5Pb_4 , berilio puro o Be_{12}Ti . En algunas realizaciones, el material multiplicador de neutrones se proporciona en forma de una pluralidad de 20 granos en un lecho de granos, o un lecho de polvo comprimido, entre los tubos o lechos refrigerantes.
- En algunas realizaciones, se proporciona un panel reflector de neutrones en el módulo de manta de cría. El panel reflector de neutrones puede estar situado en la parte posterior de los lechos de cría, de modo que, cuando se utilizan, los lechos están situados entre el panel reflector y una primera pared. El uso de un panel reflector puede mejorar la economía de neutrones de la manta y también generar más tritio, lo que significa que se puede reducir el espesor total del módulo de la manta. En algunas realizaciones, el panel reflector de 25 neutrones comprende o está formado a partir de un material reflector de neutrones, por ejemplo, carburo de tungsteno o boruro de tungsteno. En algunas realizaciones, el panel reflector de neutrones comprende una cubierta de acero, por ejemplo una cubierta de acero EUROFER 97, que está rellena con un material reflector de neutrones, por ejemplo carburo de tungsteno o boruro de tungsteno. En algunas realizaciones, el panel reflector de neutrones está provisto de refrigeración. En algunas realizaciones, el panel reflector de neutrones 30 está provisto de una entrada y una salida para el suministro de un refrigerante, por ejemplo, un gas refrigerante como los descritos en este documento o un refrigerante líquido.
- En algunas realizaciones, al menos dos de los granos encapsulados dentro de la pluralidad de lechos de combustible comprenden núcleos de combustible que tienen las mismas composiciones. En otras 35 realizaciones, al menos dos de los granos encapsulados comprenden núcleos que tienen composiciones diferentes. Por ejemplo, en una realización al menos dos de los granos encapsulados comprenden un núcleo de $\text{Li}_2\text{-BeF}_4$, mientras que en otra realización al menos uno de los granos de combustible encapsulados comprende un $\text{Li}_2\text{-BeF}_4$ y al menos uno de los granos de combustible encapsulados comprende un núcleo diferente a $\text{Li}_2\text{-BeF}_4$.
- En algunas realizaciones, el módulo de manta de cría está configurado para acoplarse con un primer 40 componente de pared de un reactor de fusión. En algunas realizaciones, el reactor de fusión es un tokamak, por ejemplo un tokamak esférico. En algunas realizaciones, el tokamak esférico puede ser un tokamak esférico compacto. En algunas realizaciones, el módulo de manta de cría está dispuesto de tal manera que, en uso, en un reactor de fusión tal como un tokamak esférico, los lechos de combustible están orientados poloidalmente. En algunas realizaciones, la pluralidad de lechos de combustible están dispuestos en una matriz, con una 45 primera fila o banco de lechos de combustible estando dispuesto adyacente a un primer componente de pared del reactor de fusión con otras filas o bancos de lechos de combustible estando dispuestos detrás de la primera fila o banco de lechos de combustible.
- En la figura 3 se muestra un ejemplo de un módulo de manta de cría. El módulo de manta de cría 200 comprende una pluralidad de lechos de granos 202 en forma de una pluralidad de unidades alargadas y cilíndricas. Cada lecho de granos, al que también se puede denominar unidad de cría, está provisto de una pluralidad de granos de fel encapsulados, por ejemplo como los que se describen en este documento. Sin embargo, se apreciará que se podrían utilizar otros granos capaces de generar tritio en un proceso de fusión. Los lechos de granos 202 están unidos y tapados en sus extremos, por los colectores 204 y 206. Los colectores 50 204 y 206 están provistos de entrada de gas 208 y salida de gas 210 respectivamente, aunque se observa que la dirección del flujo de gas es arbitraria y podría invertirse, lo que significa que la característica 210 podría usarse como entrada de gas y la característica 208 podría usarse como salida de gas. El panel reflector 212, que comprende material reflectante de neutrones, está dispuesto en el extremo posterior (en uso) del módulo de manta de cría 200, y está provisto de conectores separados 214 y 216 para el flujo de refrigerante. Se entenderá que no se muestran otros componentes del módulo de manta de cría 200, tales como soportes y medios para fijarlo a otros componentes del reactor. En particular, el módulo de manta de cría 200 puede estar provisto de una cubierta o pared exterior, para permitir el relleno de un lecho de material multiplicador de neutrones entre los lechos adyacentes 202, y entre los lechos 202 y la cubierta o pared exterior. El módulo de manta de cría 200 puede configurarse para unirse, interactuar o acoplarse con un primer componente de pared 55 60 65

del reactor de fusión.

Modo de funcionamiento del módulo de manta de cría y usos

- 5 También se describe en el presente documento un método de funcionamiento de un módulo de manta de cría como el descrito, que comprende: proporcionar un flujo de gas refrigerante al módulo de manta de cría; permitir que el gas refrigerante extraiga calor y tritio del módulo de manta de cría proporcionando un gas calentado enriquecido con tritio; extraer el gas calentado del módulo de manta de cría; y extraer el tritio del gas calentado.
- 10 El módulo de manta de cría puede estar presente en un reactor de fusión y puede ser calentado por el reactor. El gas refrigerante puede comprender uno o más gases refrigerantes seleccionados entre nitrógeno, helio y dióxido de carbono.

También se describe un reactor de fusión que comprende un grano encapsulado con un núcleo de combustible de fusión y/o un módulo de manta de cría como se describe en este documento, junto con el uso de un grano encapsulado como se describe en este documento en un reactor de fusión o un reactor de fisión, y un uso de

- 15 un módulo de manta de cría como se describe en este documento en un reactor de fusión. El reactor de fusión puede ser un reactor tokamak, por ejemplo un reactor tokamak esférico.

- 20 Los estudios de modelado de los granos encapsulados y del módulo de la manta de cría que contiene los granos encapsulados demuestran la viabilidad y factibilidad de los granos y de la manta de cría en los reactores de fusión.

REIVINDICACIONES

1. Un grano encapsulado (100), que comprende:
 - 5 un núcleo de combustible (110) de fisión nuclear o un núcleo de combustible (110) de fusión nuclear; y una jaula (102) que encapsula el núcleo de combustible (110), en la que la jaula (102) comprende al menos un canal de transporte de gas (104) a través de la misma y el diámetro interno de la jaula (102) es mayor que el diámetro externo del núcleo de combustible (110);
 - 10 caracterizado por una cubierta de cerámica (108) contenida dentro de la jaula (102) y que rodea el núcleo de combustible (110); o
 - 15 un inserto cerámico (114) dispuesto en al menos un canal de transporte de gas (104), en donde la cubierta de cerámica (108) o el inserto de cerámica (114) comprende una cerámica permeable a los gases.
- 20 2. El grano encapsulado (100) según la reivindicación 1, en donde la cerámica permeable a los gases se selecciona entre una sílice permeable a los gases, un grafito permeable a los gases o un carburo de silicio permeable a los gases, teniendo cada uno un radio de poro de menos de 0,25 µm.
- 25 3. El grano encapsulado (100) según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en donde el diámetro interno de la jaula (102) es mayor que el diámetro externo de una cubierta de cerámica (108) contenida dentro de la jaula (102).
- 30 4. El grano encapsulado (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el núcleo de combustible (110) comprende:
 - una sal fundida que es líquida a una temperatura superior a unos 300 °C; o
 - una sal de litio, por ejemplo Li₂BeF₄; o
 - 35 un material de control redox (112) que comprende berilio metálico.
- 40 5. El grano encapsulado (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde se proporciona una bolsa de gas (106) en el grano encapsulado (100); opcionalmente: en donde se proporciona un gas refrigerante seleccionado entre nitrógeno y helio en la bolsa de gas (106).
- 45 6. El grano encapsulado (100) de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la jaula (102) comprende una aleación metálica, por ejemplo un acero martensítico ferrítico de activación reducida.
7. U método de formación de un granos encapsulados (100), que comprende:
 - 50 encapsular un núcleo de combustible nuclear de fisión (110) o un núcleo de combustible nuclear de fusión (110) dentro de una jaula (102), en la que la jaula (102) comprende al menos un canal de transporte de gas (104) a través de la misma y el diámetro interno de la jaula (102) es mayor que el diámetro externo del núcleo de combustible (110), comprendiendo el método la formación de una envoltura cerámica permeable al gas (108) alrededor del núcleo de combustible de fisión (110) o del núcleo de combustible de fusión (110) y el encapsulamiento de la envoltura cerámica formada (108) dentro de la jaula (102), o la inserción de un inserto cerámico permeable al gas (114) en al menos un canal de transporte de gas (104).
 - 55 8. El método de la reivindicación 7, comprende además:
 - (i) disponer el núcleo de combustible (110) en una primera parte de la jaula (102); unir una segunda parte de una jaula (102) a la primera parte de manera de encapsular el núcleo de combustible (110); o
 - 60 (ii) formar la jaula (102);
 - formar una abertura en la jaula (102);
 - insertar un combustible a través de la abertura de manera que se forme un núcleo de combustible (110) dentro de la jaula (102);

- sellarse la abertura de manera de encapsular el núcleo de combustible (110); y
introducir el inserto cerámico permeable al gas (114) en al menos un canal de transporte de gas (104).
- 5 9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 7 a 8, comprende formar al menos un canal de transporte de gas (104) perforando con láser la jaula (102) o controlando la porosidad de la jaula (102) durante un proceso de sinterización de formación de la jaula (102).
- 10 10. Un módulo de manta de cría para un reactor de fusión, que comprende:
una pluralidad de lechos de granos conectados en serie y/o en paralelo; y
una pluralidad de granos encapsulados dentro de cada lecho de granos, en donde al menos un grano encapsulado de la pluralidad de granos encapsulados es un grano encapsulado que comprende un núcleo de combustible de fusión como se define en cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.
- 15 11. El módulo de manta de cría de la reivindicación 10, en donde cada lecho de granos de la pluralidad de lechos de granos está en comunicación fluida con una entrada de gas y una salida de gas a través de un colector de entrada de gas y un colector de salida de gas respectivamente, en donde cada lecho de granos es
20 un lecho de granos alargado que tiene un primer extremo y un segundo extremo, y en donde el colector de entrada de gas está configurado para acoplarse con el primer extremo y el colector de salida de gas está configurado para acoplarse con el segundo extremo.
- 25 12. El módulo de manta de cría de cualquiera de las reivindicaciones 10 u 11, en donde cada lecho de guijarros de la pluralidad de lechos de guijarros se proporciona en uno de al menos dos grupos de lechos de guijarros;
en donde un primer grupo de los al menos dos grupos define una primera trayectoria de flujo de gas desde la entrada de gas a través de al menos un lecho de granos del primer grupo hasta la salida de gas, y un segundo grupo de los al menos dos grupos define una segunda trayectoria de flujo de gas desde la entrada de gas a
30 través de al menos un lecho de combustible del segundo grupo hasta la salida de gas,
en donde la primera trayectoria de flujo de gas y la segunda trayectoria de flujo de gas están conectadas en paralelo desde la entrada de gas hasta la salida de gas o en donde
35 cada lecho de granos de cada grupo de lechos de granos está conectado en serie con al menos otro lecho de granos del mismo grupo de lechos de granos.
13. El módulo de manta de cría según una cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, donde:
- 40 se introduce sulfuro de plomo en los huecos entre lechos de granos adyacentes; o
el módulo de manta de cría comprende un panel reflector de neutrones que comprende carburo de tungsteno; o
45 el módulo de manta de cría está dispuesto de tal manera que, mientras se usa, en un reactor de fusión, los lechos de granos están orientados poloidalmente; o
la pluralidad de lechos de combustible forman una estructura de panal en donde cada lecho de granos de la
50 pluralidad de lechos de granos comparte al menos una pared con un lecho de granos adyacente; o
la pluralidad de lechos de guijarros comprende paredes de acero martensítico ferrítico de activación reducida, provistas de un revestimiento de barrera de permeación de tritio que comprende un revestimiento de cromo (Cr_2O_3) o alúmina (Al_2O_3).
- 55 14. Un método de funcionamiento del módulo de manta de cría de una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, que comprende:
proporcionar un flujo de gas refrigerante al módulo de manta de cría;
60 permitir que el gas refrigerante extraiga calor y tritio del módulo de manta de cría, proporcionando un gas calentado y enriquecido con tritio;
retirar el gas calentado del módulo de manta de cría; y
65 extraer el tritio del gas calentado.

opcionalmente, en donde la manta de cría está presente en un reactor de fusión y se calienta mediante la reacción de la generación de tritio en el grano encapsulado y/o mediante el plasma en el núcleo del reactor, y/o en donde el gas refrigerante comprende uno o más gases refrigerantes seleccionados entre nitrógeno, helio y dióxido de carbono.

5

15. Un reactor de fusión que comprende un grano encapsulado (100) que comprende un núcleo de combustible de fusión según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.

DIBUJOS

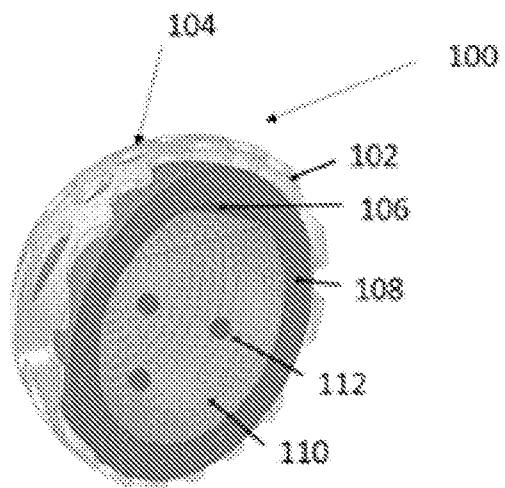


Figura 1A

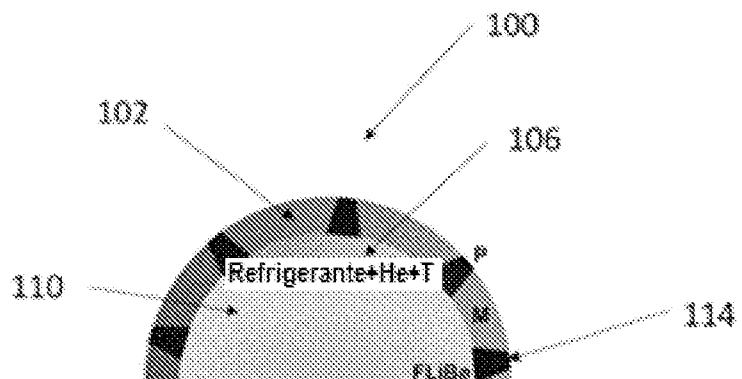


Figura 1B

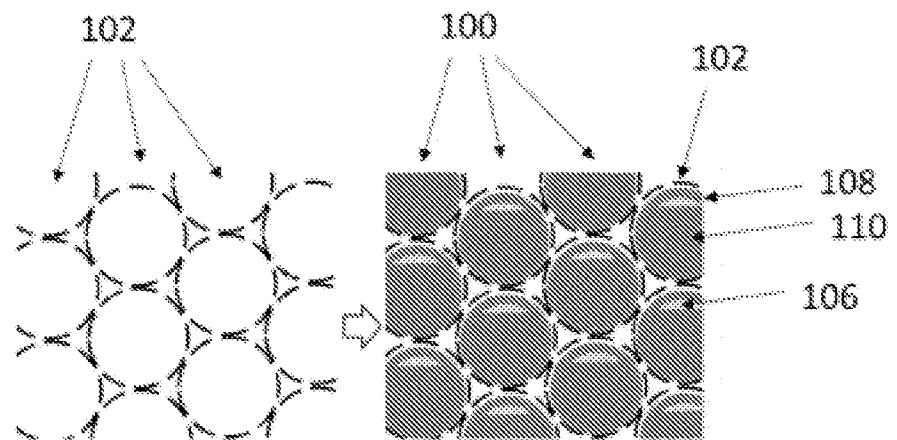


Figura 2

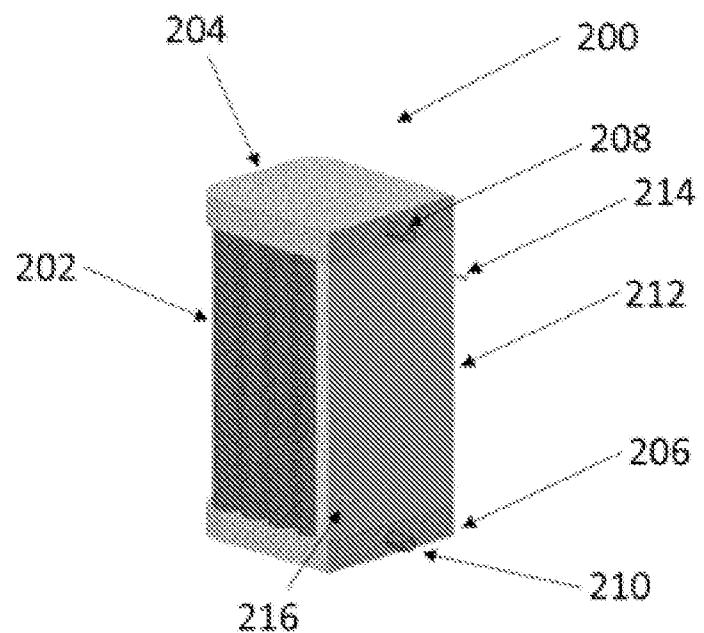


Figura 3