

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 700 787**

51 Int. Cl.:

**G21F 9/14** (2006.01)

**G21C 1/00** (2008.01)

**G21F 9/00** (2006.01)

**G21F 9/32** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.10.2011 PCT/US2011/057301**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.04.2013 WO13058772**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.10.2011 E 11874351 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.10.2018 EP 2769384**

54 Título: **Descontaminación térmica de grafito con gases reductores**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**19.02.2019**

73 Titular/es:

**ELECTRICITÉ DE FRANCE (100.0%)  
22-30 Avenue de Wagram  
75008 Paris, FR**

72 Inventor/es:

**MASON, J., BRADLEY;  
BROWN, THOMAS;  
TORABZADEH, SAHAR y  
OLANDER, JONATHAN**

74 Agente/Representante:

**VEIGA SERRANO, Mikel**

**ES 2 700 787 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

Descontaminación térmica de grafito con gases reductores

5 **Sector de la técnica**

La presente invención se refiere, en general, a métodos para la descontaminación de grafito para eliminar el tritio, el carbono-14, y el cloro-36 usando un tratamiento térmico con gases de purga que incluyen la reducción de los gases.

10 **Estado de la técnica**

El grafito, que consiste predominantemente del elemento carbono, se usa como moderador en una serie de diseños de reactores nucleares, como el MAGNOX y reactores enfriados con gases AGR en el Reino Unido, y el diseño RBMK en Rusia. Durante la construcción, el moderador del reactor se instala, en general, como una estructura de enclavamiento de ladrillos de grafito. Al final de la vida útil del reactor, el moderador de grafito, que normalmente pesa alrededor de 2000 toneladas, es una forma de desecho radiactivo que requiere una eliminación segura. El grafito es una forma química del carbono relativamente estable, que en muchos aspectos es adecuada para su eliminación directa sin procesamiento. Sin embargo, después de la irradiación de neutrones, el grafito contendrá la energía de Wigner almacenada. El potencial de liberación de esta energía debe adaptarse a cualquier estrategia que se base en la eliminación del grafito de una forma no procesada. Como alternativa, el procesamiento del grafito antes de la eliminación puede permitir la liberación segura de cualquier energía de Wigner almacenada.

El grafito también contiene cantidades significativas de radionucleidos de las reacciones provocadas por neutrones, tanto en el propio grafito como en las impurezas menores que contiene. Debido a la estructura del grafito, que incluye foliatos o capas poco compactadas, los radioisótopos pueden quedar atrapados dentro de los espacios o poros del grafito. El contenido de radioisótopos puede dividirse convenientemente en dos categorías: isótopos de vida corta e isótopos de vida larga. Los isótopos de vida corta (tal como el cobalto-60) hacen que el grafito sea difícil de manejar inmediatamente después de la parada del reactor, pero se descomponen después de unas pocas decenas de años. Los isótopos de vida larga (principalmente el carbono-14 y el cloro-36) son preocupantes por la posibilidad de su descarga a la biosfera. El carbono-14 se produce en el grafito de una de dos maneras. Una forma es la activación del gas nitrógeno, con el carbono-14 presente en los poros del grafito como gas de dióxido de carbono. La segunda forma es a través de la activación de neutrones del carbono-13, que es un isótopo de carbono natural y estable, que constituye un poco más del 1 por ciento del carbono en el grafito. El carbono-14 producido de esta manera sería parte de la matriz de grafito. El cloro-36 se forma de manera similar mediante la irradiación del cloro que queda en la matriz de grafito durante el proceso de sinterización de grafito. El procesamiento del grafito ofrece la oportunidad de separar la mayoría del grafito a granel (carbono) de los radioisótopos de larga duración. Este procesamiento, a su vez, facilita la eliminación de los residuos de grafito poco después del final de la vida útil del reactor, y puede permitir el reciclaje.

Debido a las características del grafito y su masa, el procedimiento más común hasta la fecha para el desmantelamiento de reactores moderados por grafito es almacenar el núcleo del reactor in situ durante un período de decenas de años siguientes a la parada del reactor. Durante este período, los radioisótopos de corta duración se desintegran lo suficiente como para permitir el desmantelamiento manual final del moderador de grafito. A continuación, la mayoría de los planes asumen que el grafito se desechará en su forma química existente, con un empaquetado adicional apropiado para evitar la degradación o la liberación durante el largo período de la desintegración del carbono-14 y el cloro-36.

El almacenamiento tiene ciertas consecuencias negativas, tales como las siguientes: 1) una implicación de la responsabilidad financiera a largo plazo, 2) una estructura de almacenamiento visualmente intrusiva que no tiene ningún fin productivo, y 3) un requisito impuesto a una generación futura (que no obtuvo ningún beneficio del activo original) para completar la liquidación final. Si la alternativa de almacenamiento se reemplaza por un manejo a corto plazo, es esencial que el grafito se procese de manera segura y radiológicamente aceptable.

Ciertas técnicas anteriores para tratar el grafito radiactivo aplicaban calor y gases oxidantes para tratar el grafito con el fin de eliminar una fracción suficiente de los radionucleidos de vida larga dentro del grafito. Estos procesos han demostrado que calentar o "tostar" con gases inertes, tales como nitrógeno o argón, solo pueden eliminar sustancialmente todo el hidrógeno-3 (tritio), pero el proceso no puede eliminar más de aproximadamente el sesenta (60) por ciento del carbono-14. Se han realizado unos procesos alternativos para mejorar la eliminación del carbono-14 agregando cantidades limitadas de gases que contienen oxígeno al gas inerte para proporcionar oxígeno que puede convertir preferentemente el carbono-14 en monóxido de carbono o en gases de dióxido de carbono, que a continuación pueden eliminarse del grafito. Las pruebas con gases inertes y gases que contienen oxígeno (vapor, dióxido de carbono, óxido nitroso, oxígeno) han demostrado que es posible una mejor eliminación del carbono-14, pero la presencia de oxígeno tiende a aumentar dramáticamente la gasificación del grafito a granel. Para reducir este efecto de gasificación cuando los gases que contienen oxígeno se combinan con los gases inertes, la temperatura de operación del proceso de tostado debe reducirse o limitarse para evitar la gasificación excesiva del grafito. Desafortunadamente, al reducir o limitar la temperatura de tostado, la cantidad de eliminación de carbono-14

también se reduce o limita en gran medida. Como consecuencia, cuando los gases que contienen oxígeno se introducen con los gases inertes, la concentración de estos gases oxidantes debe reducirse de tal manera que puedan usarse temperaturas más altas. Aun así, cuando las temperaturas de tostado superan aproximadamente los 1200° Celsius, la cantidad de grafito a granel gasificado es excesiva, independientemente de la concentración reducida de gases que contienen oxígeno que se usan.

Los resultados del ensayo de estos procesos demuestran que, si la concentración de gases que contienen oxígeno se limita lo suficiente para reducir la gasificación de grafito a granel, a temperaturas superiores a aproximadamente 1200° Celsius, la eliminación de carbono-14 se reduce considerablemente a menos de aproximadamente el sesenta (60) por ciento, lo que es insatisfactorio. Si la concentración de gas que contiene oxígeno aumenta de manera tal que la eliminación del carbono-14 es satisfactoria, entonces se gasifica demasiado grafito a granel. En cualquier caso, no puede lograrse el objetivo de volatilizar más del noventa (90) por ciento del carbono-14 mientras se reduce simultáneamente la gasificación de grafito a granel a menos del cinco (5) por ciento en peso con estos métodos convencionales.

El documento US 2008/0181835 desvela un sistema para el tratamiento y el reciclaje de los radionucleidos que contienen grafito en un tostador térmico con el uso de pequeñas cantidades de oxígeno.

Lo que se necesita son sistemas y métodos que puedan someter el grafito a un intervalo de temperaturas suficiente para volatilizar los radionucleidos sin gasificar el grafito a granel y, específicamente, unos sistemas y métodos que puedan eliminar más de un 90 por ciento del carbono-14, mientras que se gasifica menos del 5 por ciento del grafito a granel.

### Objeto de la invención

Las realizaciones a modo de ejemplo de la presente invención proporcionan métodos que pueden someter al grafito a un intervalo de temperaturas suficiente para volatilizar los radionucleidos sin gasificar significativamente el grafito a granel. Un aspecto de la invención proporciona un método que incluye las etapas de (1) calentar un tostador a una temperatura entre 800° Celsius y 2000° Celsius; (2) introducir grafito contaminado con radionucleidos en el tostador; (3) introducir un gas inerte en el tostador; (4) introducir un gas reductor en el tostador; y (5) eliminar los radionucleidos volatilizados del tostador, en el que una cantidad del gas reductor introducido en el tostador está entre el 2 y el 20 % de una cantidad total de gas introducido en el tostador. Este método también puede incluir las etapas adicionales de:

- agregar un gas oxidante al tostador, y/o
- reducir el tamaño del grafito antes de introducir el grafito en el tostador.

Este método también puede caracterizarse por que:

- menos del cinco (5) por ciento del grafito está gasificado;
- la temperatura del proceso está entre 1200° Celsius y 1500° Celsius;
- los radionucleidos comprenden carbono-14 y al menos el setenta (70) por ciento del carbono-14 se elimina del grafito;
- los radionucleidos comprenden carbono-14 y al menos el noventa (90) por ciento del carbono-14 se elimina del grafito;
- el gas de purga comprende al menos uno de entre nitrógeno, helio y argón y el gas reductor comprende al menos uno de entre hidrógeno, hidrazina, amoníaco, monóxido de carbono y vapor de hidrocarburo;
- el gas de purga comprende uno o más gases reductores que pueden producir hidrógeno libre, monóxido de carbono (CO), amonio o vapor orgánico;
- el gas oxidante comprende al menos uno de entre vapor, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), oxígeno (O<sub>2</sub>), aire, alcoholes (con grupos OH) u otros vapores oxigenados;
- las etapas para introducir el gas inerte en el tostador e introducir el gas reductor en el tostador comprenden introducir el gas inerte y el gas reductor en una localización cerca de la parte inferior del reactor y en el que el gas inerte y el gas reductor fluyen a través del grafito; y/o
- el tostador comprende un reactor de lecho móvil orientado verticalmente y donde la etapa de introducir el grafito contaminado con radionucleidos en el tostador incluye introducir el grafito cerca de la parte superior del tostador y donde las etapas de introducir el gas inerte en el tostador e introducir el gas reductor en el tostador incluyen introducir los gases cerca de la parte inferior del tostador.

### Descripción de las figuras

La figura 1 representa un diagrama de bloques de un sistema para tratar el grafito radiactivo de acuerdo con una realización a modo de ejemplo de la presente invención.

La figura 2 representa un diagrama de flujo de un proceso para tratar el grafito radiactivo de acuerdo con una

realización a modo de ejemplo de la presente invención.

La figura 3 representa un diagrama esquemático de un tostador para tratar el grafito radiactivo de acuerdo con una realización a modo de ejemplo de la presente invención.

5

### Descripción detallada de la invención

Las realizaciones a modo de ejemplo de la presente invención proporcionan sistemas y métodos para el tratamiento de grafito radiactivo contaminado con tritio, carbono-14, y cloro-36 y otros radionúclidos generados durante el funcionamiento de un reactor nuclear u otro proceso nuclear. Los sistemas y métodos incluyen un tostador que opera a temperaturas en el intervalo de 800° Celsius a 2000° Celsius con gases inertes, oxidantes y reductores opcionales. La combinación de temperaturas y gases permite la eliminación de más del 90 por ciento del carbono-14 dentro del grafito mientras que se gasifica menos del 5 por ciento del grafito a granel.

10

La figura 1 representa un diagrama de bloques de un sistema 100 para tratar el grafito radiactivo de acuerdo con una realización a modo de ejemplo de la presente invención. Haciendo referencia a la figura 1, un componente de manejo de materiales 110 recibe el grafito a tratar en el sistema 100. Normalmente, el grafito se ha usado como moderador en un núcleo de reactor nuclear. Otras fuentes de grafito incluyen, pero no se limitan a, manguitos de elementos de combustible, tirantes u otros componentes del reactor irradiados por el flujo de neutrones del reactor. Este grafito normalmente estará contaminado con radionúclidos tales como el hidrógeno-3 (tritio), el carbono-14, el cloro-36, el hierro-55 y el cobalto-60 y puede incluir otros productos típicos de fisión y activación.

15

20

El componente de manejo de materiales 110 dimensiona y mantiene el grafito en preparación para la introducción del grafito en un tostador 120. El grafito recibido en el componente de manejo de materiales 110 se habría eliminado del reactor nuclear por cualquier proceso convencional. Estos procesos pueden incluir procesos húmedos, procesos secos o una combinación de ambos. La presente invención puede adoptar grafito seco o húmedo en cualquier tamaño o forma resultante del proceso de eliminación. Además, el grafito puede empaparse en agua u otra solución antes de recibirse en el componente de manejo de materiales 110.

25

El grafito puede tratarse en forma granular o en polvo. Un subcomponente reductor de tamaño 112 del componente de manejo de materiales 110 reduce el tamaño del grafito recibido antes de su introducción en el tostador 120. En esta realización a modo de ejemplo, el grafito recibido se reduce a un tamaño inferior a 20 mm. Este pequeño tamaño mejora la volatilización de los radionúclidos del grafito. Para reducir el tamaño del grafito, el subcomponente reductor de tamaño a modo de ejemplo 112 incluye una mandíbula o trituradora rotativa. Pueden usarse otros equipos reductores de tamaño. Un subcomponente de tolva 114 del componente de manejo de materiales 110 recibe el grafito de tamaño reducido y mantiene el grafito a la espera de su introducción en el tostador 120. La atmósfera interior del subcomponente reductor de tamaño a modo de ejemplo 112 y el subcomponente de tolva 114 incluye un manto de gas inerte, como argón, nitrógeno, dióxido de carbono u otro gas inerte similar. La atmósfera interior del subcomponente reductor de tamaño a modo de ejemplo 112 y el subcomponente de tolva 114 están conectados al sistema de gases de salida del tostador 120, ya que algunos radionúclidos pueden liberarse del grafito durante el proceso de reducción de tamaño. En una realización alternativa, el grafito puede recibirse en una forma y tamaño adecuados para su introducción en el tostador 120 sin necesidad de una reducción de tamaño. De manera similar, un proceso continuo puede omitir el subcomponente de tolva 114.

30

35

40

El tostador 120 incluye un recipiente usado para tratar el grafito dimensionado. El tostador 120 funciona en un intervalo de temperatura de entre 800 ° Celsius y 2000 ° Celsius. La capacidad, la forma y el tamaño del tostador 120 pueden variar de acuerdo con la aplicación. El tostador 120 está construido de materiales adecuados para operaciones de alta temperatura, tales como un recipiente de acero revestido con material refractario. La presión de funcionamiento puede variar desde un vacío fuerte hasta una presurización ligera. Puede usarse cualquier tipo de tostador o aparato que incluya un tostador de lecho fluidizado, de lecho móvil, de lecho por lotes o estático. Un tostador a modo de ejemplo es un tostador de lecho móvil orientado verticalmente, donde el grafito nuevo se introduce por la parte superior de la pila y el grafito tratado se elimina por la parte inferior de la pila mientras el gas de purga fluye hacia arriba (contracorriente) a través de la pila de grafito. (Véase la figura 3, que se explica más adelante) El tratamiento por lotes del grafito normalmente involucraría grafito en polvo que usa un enfoque de lecho fluidizado. Para el grafito que es más grande que los polvos, se prefiere un tostador de lecho móvil continuo. En la realización a modo de ejemplo, el tostador 120 se calienta eléctricamente, pero podrían usarse otros tipos de calentamiento. Se prefiere el calentamiento eléctrico ya que reduce la necesidad de introducir gases oxidantes en el recipiente, que pueden gasificar el grafito a granel y facilita el control de la temperatura y la eficacia energética. El tostador 120 recibe el grafito por una entrada de materiales 117. Puede usarse una variedad de técnicas mecánicas para mover el grafito desde el componente de manejo de materiales 110 al tostador 120 a través de la entrada de materiales 117. En un sistema a modo de ejemplo, se usa una técnica de doble válvula con cámara de aire para evitar que los gases que se encuentran dentro del tostador escapen del tostador y para limitar la introducción de otros gases que no sean gases inertes en el tostador con el grafito.

45

50

55

60

El tostador 120 incluye las entradas de gas 130, 140, 150 para recibir uno o más gases de purga inertes, uno o más gases reductores, y opcionalmente uno o más gases oxidantes. Por supuesto, las entradas de gas 130, 140, 150

65

pueden ser una sola entrada conectada a tres fuentes de gas diferentes, una fuente que proporciona gas de purga inerte, una segunda fuente que proporciona un gas reductor y una tercera fuente que proporciona un gas oxidante. Normalmente, la entrada o entradas de gas se colocarían cerca de la parte inferior del tostador 120, de tal manera que los gases puedan entrar al recipiente y viajar a través del grafito que reside en el tostador 120. El gas puede introducirse a través de un divisor o distribuidor de flujo para distribuir el gas a través del volumen del grafito, pero este componente no es necesario. El tostador incluye una salida 122 para los radionúclidos volatilizados, que se sacan de la salida 122 mediante el gas de purga inerte. El tostador 120 también incluye una salida 124 para el grafito tratado.

Los radionúclidos volátiles se sacan de la tostadora por el flujo de gas de purga y se estabilizan en el subsistema de tratamiento 160, usando una técnica apropiada para el tratamiento de los radionucleidos. El grafito tratado se procesa adicionalmente en el subsistema de tratamiento 170, donde se empaqueta para su eliminación definitiva como desechos "limpios" (no radiactivos) o se recicla.

El carbono-14 es más reactivo que o más móvil que el carbono-12 a granel en la matriz de grafito. La presencia de pequeñas cantidades de oxígeno proporciona el oxígeno necesario para convertir el carbono-14 en monóxido de carbono. Los gases reductores suprimen la oxidación del carbono-12 en la matriz de grafito. Un beneficio a modo de ejemplo de agregar gas reductor es que los posibles compuestos de carbono-14 en el grafito incluyen cianuro. La introducción de hidrógeno en el tostador proporcionará átomos de hidrógeno para unirse al cianuro para producir cianuro de hidrógeno, que es volátil, por lo que puede eliminarse algo de carbono-14 por la presencia del gas reductor, incluido el hidrógeno.

La figura 2 representa un diagrama de flujo de un proceso 200 para el tratamiento de grafito radiactivo de acuerdo con una realización a modo de ejemplo de la presente invención. Haciendo referencia a las figuras 1 y 2, en la etapa 210, el grafito se introduce en el tostador 120 desde el subcomponente de tolva 114 del componente de manejo de materiales 110 mediante una transferencia mecánica del grafito al tostador. En esta realización a modo de ejemplo, el proceso se realiza por lotes. Como alternativa, el grafito puede tratarse en un proceso continuo, tal como cuando el grafito entra por la parte superior del tostador 120 y sale por la parte inferior del tostador 120 y los gases reactivos entran por la parte inferior del tostador 120 y salen por la parte superior del tostador 120. El subcomponente de tolva 114 puede omitirse.

Antes de introducir el grafito en el tostador 120, el tostador 120 se lleva hasta la temperatura de tratamiento. Esta temperatura varía de 800° Celsius a 2000° Celsius. En esta realización a modo de ejemplo, el intervalo de temperatura preferido es de 1200° Celsius a 1500° Celsius, ya que los gases reductores se utilizan en este proceso a modo de ejemplo. Los procesos de tratamiento con grafito anteriores para eliminar el carbono-14 del grafito estaban limitados a temperaturas de aproximadamente 1200° C, debido a la alta gasificación del grafito que resultaba de operar un tostador con gases que contienen oxígeno por encima de 1200° Celsius. Al introducir los gases reductores en el proceso de tratamiento, el tostador 120 puede operar a temperaturas superiores a 1200° C. Estas temperaturas de operación más altas permiten la liberación de prácticamente todo el tritio, sustancialmente todo (más del 90 por ciento) el cloro-36, y la mayoría (más del 70 por ciento) del carbono-14 del grafito.

En la etapa 220, los gases de reacción se introducen en el tostador 120. Estos gases hacen contacto con el grafito calentado a medida que fluyen a través del grafito calentado. Estos gases de reacción incluyen al menos un gas de purga inerte y un gas reductor. Los gases de purga incluyen uno o más de entre nitrógeno, argón o un gas no reactivo similar. No deberían usarse gases inertes como el dióxido de carbono, ya que estos gases proporcionarían una fuente de oxígeno que puede gasificar el carbono a granel. También se introduce un gas reductor, tal como hidrógeno, hidrazina, amoníaco, monóxido de carbono, vapor de hidrocarburo y otros gases reductores que pueden producir hidrógeno libre, monóxido de carbono o vapor de amonio u orgánico en la etapa 220. La cantidad de gas reductor introducido está en el intervalo del dos (2) al veinte (20) por ciento del total de gas introducido y es más preferible entre el dos (2) y el diez (10) por ciento. Esta mezcla de gas de purga inerte y gas reductor se introduce en el tostador 120 cerca de la parte inferior del tostador 120. El gas se mueve hacia arriba a través del grafito y transporta los radionúclidos volatilizados fuera del tostador 120 por la salida 124. Incluso con la inclusión de un gas oxidante, la inclusión del gas reductor reduce en gran medida la gasificación del grafito a granel, de tal manera que se gasifica menos del cinco (5) por ciento del grafito a granel. Además, operando a temperaturas de aproximadamente 1200° Celsius y usando una mezcla de un gas de purga inerte, un gas oxidante y un gas reductor, se elimina la mayoría de prácticamente todo el carbono-14. En una realización alternativa, los gases de reacción también incluyen un oxidante. La presencia de oxígeno convierte el carbono-14 sólido en dióxido de carbono o gas CO, lo que facilita su difusión desde la matriz de grafito. La combinación del gas de purga inerte (preferiblemente nitrógeno) con una cantidad limitada de gases que contienen oxígeno, tales como vapor, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), oxígeno (O<sub>2</sub>), aire, alcoholes (grupos OH), u otros vapores oxigenados y gases reductores, tales como el hidrógeno, proporcionan una mejor eliminación de radionúclidos de carbono-14 en comparación con todas las técnicas anteriores, al tiempo que limitan la gasificación del grafito a granel. El gas oxidante preferido es el vapor que constituiría aproximadamente entre un uno (1) y un cincuenta (50) por ciento del total de gases de reacción de entrada (preferiblemente entre un dos (2) y un diez (10) por ciento). Si se utilizara dióxido de carbono u óxido nitroso como gas oxidante, constituirían aproximadamente entre un uno (1) y un diez (10) por ciento del total de gases de reacción de entrada. La inclusión del gas reductor reduce en gran medida la gasificación del grafito a granel en

presencia del oxidante, de tal manera que se gasifica menos del cinco (5) por ciento del grafito a granel. El gas reductor desplaza el equilibrio de reacción para el oxígeno con el grafito a granel, de tal manera que la velocidad de reacción del gas que contiene oxígeno se inhibe sustancialmente, evitando de este modo que el oxidante reaccione con el grafito a granel.

5 En la etapa 230, el gas de purga se recoge en el subsistema de tratamiento 160, donde los radionucleidos se estabilizan usando métodos conocidos. En la etapa 240, el grafito se retira del tostador 120 y se trata en el subsistema de tratamiento 170. Por lo general, el grafito tratado se eliminaría en un relleno sanitario o se reciclaría y se trataría como un desecho radioactivo de bajo nivel en lugar de como un desecho radioactivo de nivel intermedio.  
10 El proceso termina en la etapa 250. El proceso puede repetirse si es necesario.

La figura 3 muestra un esquema de un tostador a modo de ejemplo 300. El grafito se introduce a través de un sistema de alimentación (no mostrado), tal como una tolva, en una entrada 310, bajo un manto de gas inerte. Los gases de reacción se introducen por una entrada 370, de tal manera que los gases de reacción fluyen hacia arriba a través del grafito y salen por la salida de gas 320 a medida que el grafito se desplaza hacia abajo en el recipiente 330. A medida que el grafito se mueve a través del recipiente 330, que puede ser un tubo cerámico, se calienta (representado como el grafito caliente 340). El recipiente 330 está rodeado por una fuente de calentamiento 350, tal como unas bobinas de calentamiento eléctrico. El recipiente 330 y la fuente de calentamiento 350 están contenidos dentro de un recipiente exterior 360, tal como una cubierta de metal revestida con material refractario. El grafito tratado se elimina del recipiente 330 a través de un puerto de salida 380.  
15  
20

Un experto en la materia entenderá que la presente invención proporciona unos métodos para tratar el grafito radiactivo contaminado con tritio, carbono-14, y cloro-36 y otros radionúclidos generados durante el funcionamiento de un reactor nuclear u otro proceso nuclear. Los métodos incluyen un tostador que funciona a temperaturas en el intervalo de 800° Celsius a 2000° Celsius con gases inertes, gases reductores y gases oxidantes opcionales. La combinación de temperaturas y gases permite la eliminación de la mayoría de prácticamente todo el carbono-14 dentro del grafito, al tiempo que limita sustancialmente la gasificación del grafito a granel.  
25

**REIVINDICACIONES**

1. Un método que comprende las etapas de:

- 5
- calentar un tostador a una temperatura entre 800° Celsius y 2000° Celsius;
  - introducir grafito contaminado con radionúclidos en el tostador;
  - introducir un gas inerte en el tostador;
  - introducir un gas reductor en el tostador; y
  - eliminar los radionúclidos volatilizados del tostador,

10 en el que una cantidad del gas reductor introducido en el tostador está entre el 2 y el 20 % de una cantidad total del gas introducido en el tostador.

2. El método de la reivindicación 1, en el que menos del cinco (5) por ciento del grafito está gasificado.

15 3. El método de la reivindicación 1, en el que la temperatura está entre 1200° Celsius y 1500° Celsius.

4. El método de la reivindicación 1, en el que los radionúclidos comprenden carbono-14 y al menos el setenta (70) por ciento del carbono-14 se elimina del grafito.

20 5. El método de la reivindicación 1, en el que los radionúclidos comprenden carbono-14 y al menos el noventa (90) por ciento del carbono-14 se elimina del grafito.

25 6. El método de la reivindicación 1, en el que el gas inerte comprende al menos uno de entre nitrógeno, helio y argón y el gas reductor comprende al menos uno de entre hidrógeno, hidracina, amoníaco, monóxido de carbono y vapor de hidrocarburo.

30 7. El método de la reivindicación 1, en el que el gas reductor comprende uno o más gases reductores que pueden producir hidrógeno libre, monóxido de carbono (CO), amonio o vapor orgánico.

8. El método de la reivindicación 1, que comprende además la etapa de añadir un gas oxidante al tostador.

35 9. El método de la reivindicación 8, en el que el gas oxidante comprende al menos uno de entre vapor, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), oxígeno (O<sub>2</sub>), aire, alcoholes (con grupos OH) u otros vapores oxigenados.

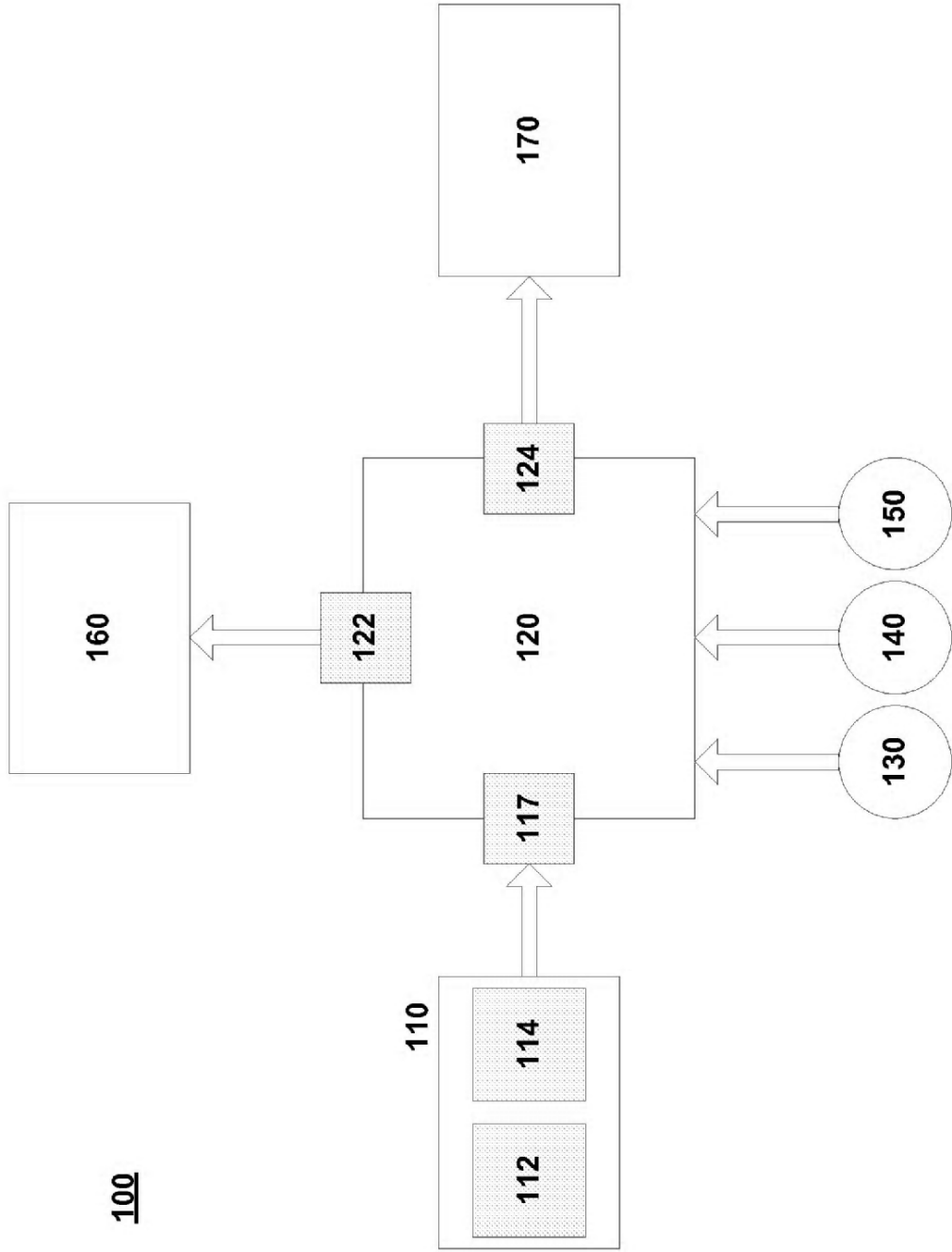
10. El método de la reivindicación 1, en el que las etapas de introducir el gas inerte en el tostador e introducir el gas reductor en el tostador comprenden introducir el gas inerte y el gas reductor en la parte inferior del reactor y en el que el gas inerte y el gas reductor fluyen a través del grafito.

40 11. El método de la reivindicación 1, que comprende además la etapa de reducir el tamaño del grafito antes de introducir el grafito en el tostador.

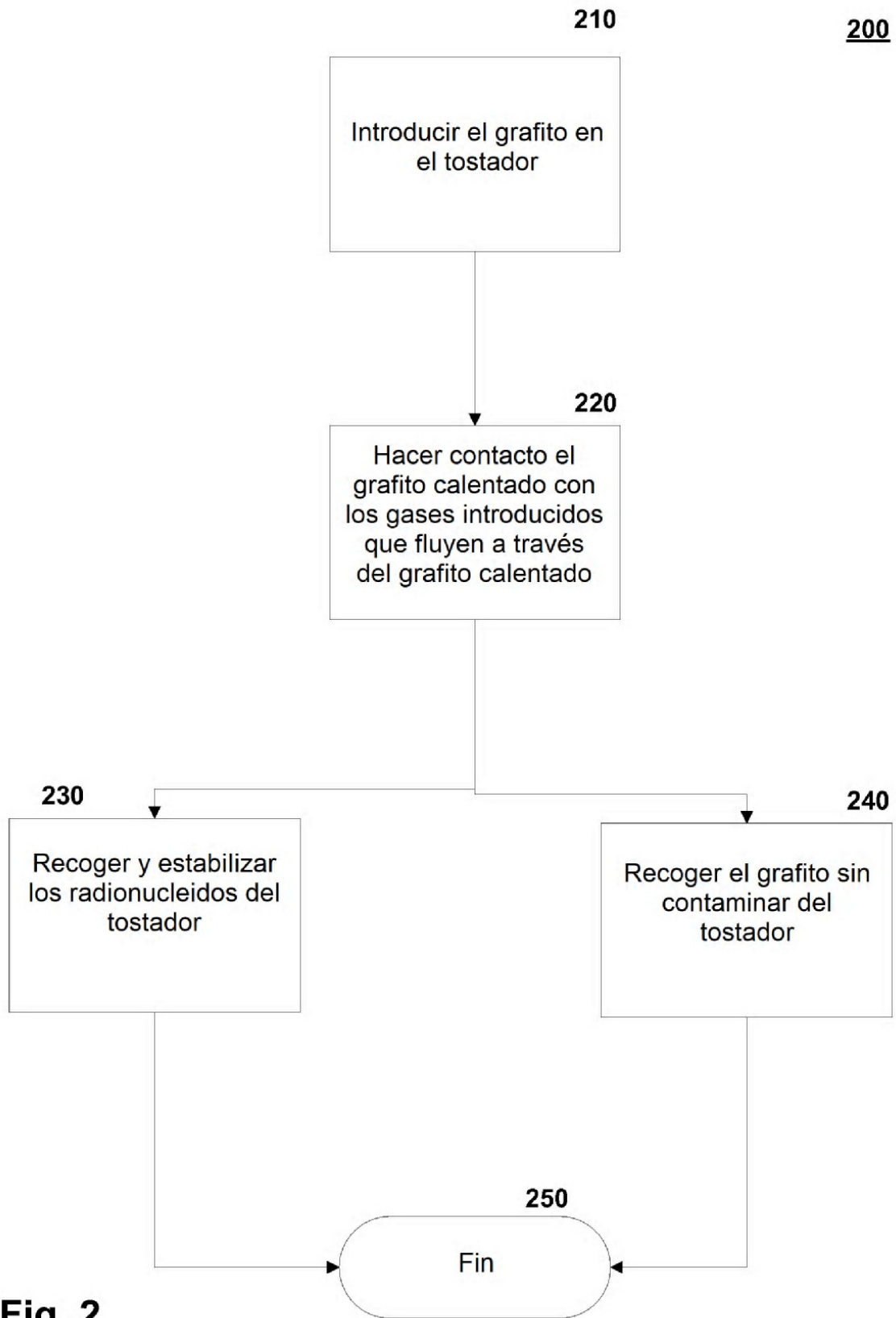
45 12. El método de la reivindicación 1, en el que el tostador comprende un reactor de lecho móvil orientado verticalmente y en el que la etapa de introducir el grafito contaminado con radionúclidos en el tostador comprende introducir el grafito en la parte superior del tostador y en el que las etapas de introducir el gas inerte en el tostador e introducir el gas reductor en el tostador comprenden introducir los gases en la parte inferior del tostador.

50 13. El método de la reivindicación 8, en el que una cantidad del gas oxidante añadida al tostador está entre el 1 y el 10 % de una cantidad total del gas introducido en el tostador.

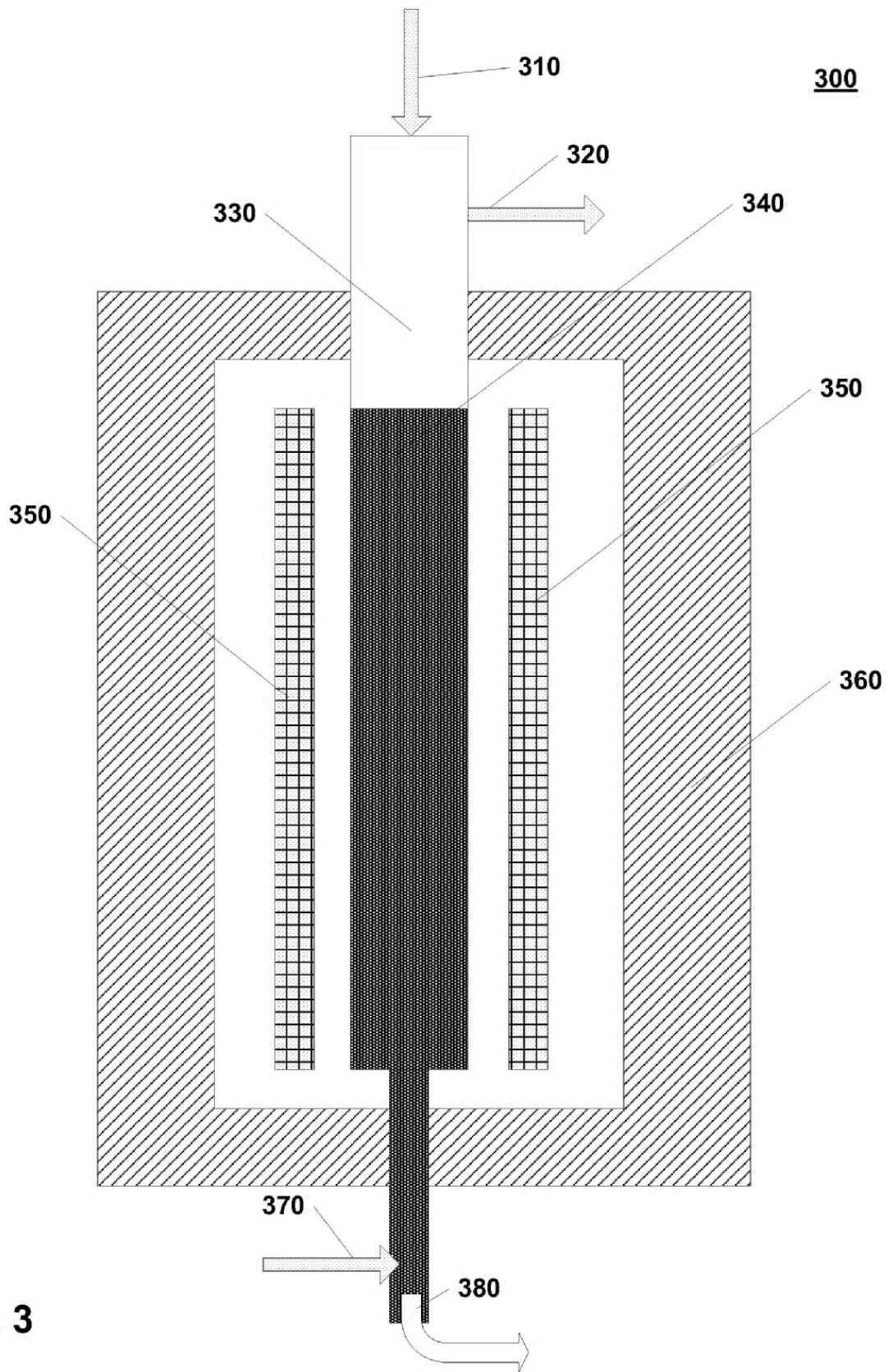
**Fig. 1**







**Fig. 2**



**Fig. 3**