

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 984 478**

51 Int. Cl.:

**G21G 1/04** (2006.01)

**H05H 6/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.12.2022 PCT/EP2022/088084**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.08.2023 WO23151859**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.12.2022 E 22840228 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.04.2024 EP 4285390**

54 Título: **Sistema de diana líquida**

30 Prioridad:

**08.02.2022 EP 22155720**

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

**29.10.2024**

73 Titular/es:

**SCK.CEN (100.0%)  
Herrmann-Debrouxlaan 40  
1160 Brussel, BE**

72 Inventor/es:

**JACQUET, PATRICE;  
MAERTENS, DOMINIC;  
LEYSEN, WILLEM y  
HEINITZ, STEPHAN**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 984 478 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

Sistema de diana líquida

Campo técnico de la Invención

5 La presente invención se refiere al campo de radioisótopos. Más específicamente, la presente invención se refiere a un sistema de diana líquida para la producción de radioisótopos, así como al uso del mismo y un método correspondiente.

Antecedentes de la invención

10 Para la producción de radioisótopos, en general, se están usando dianas sólidas por su alto rendimiento en sistemas del estado de la técnica, como para dianas sólidas, se puede lograr fácilmente una gran densidad de un nucleido original, a partir del cual se pueden lograr fácilmente los radioisótopos. De hecho, un inconveniente del uso de dianas líquidas es la solubilidad limitada de la mayoría de los compuestos nucleidos originales en agua (habitualmente utilizados como solvente líquido) a temperatura ambiente. Por ejemplo, las sales de Ra-226, que se pueden utilizar como productos químicos básicos para proporcionar el nucleido original para producir el radioisótopo Ra-225 que se puede descomponer en el radioisótopo Ac-225, tienen una solubilidad limitada en agua. A manera de ilustración, la sal de nitrato de radio  $\text{Ra}(\text{NO}_3)_2$  tiene una solubilidad de 13,9g por 100g de  $\text{H}_2\text{O}$  a 20°C.

15 Sin embargo, una ventaja de usar una diana líquida en lugar de una diana sólida es que se requieren menos (o ninguna) conversión de líquido a sólido y de sólido a líquido en el proceso químico para separar los radioisótopos de la diana. Este paso de proceso químico habitualmente tiene un gran riesgo de pérdidas (no controladas) de radioisótopos y generación de desechos radiactivos. No se requiere esta conversión para dianas líquidas, lo cual es una gran ventaja de estas dianas.

20 Además, la desventaja potencial de una baja concentración de nucleidos originales en dianas líquidas se debe colocar en perspectiva. Como un ejemplo, se considera la producción de Ra-225 a partir de Ra-226 mediante una reacción fotonuclear. La producción de Ra-225 en función del tiempo puede depender de la corriente de haz de electrones (mA), la energía de electrones (MeV), el diseño de convertidor y el diseño de diana. En la presente, el convertidor se diseña para detener los electrones de alta energía y producir fotones Radiación de frenado de alta energía que se necesitan para la reacción fotonuclear. A más fotones de alta energía que se producen, y más Ra-226 directamente en frente del haz de fotones, más Ra-225 se formará. Sin embargo, suponiendo una conversión de fotones de electrón a Radiación de frenado de aproximadamente 50%, aún aproximadamente la mitad de la energía de los electrones se puede depositar en el convertidor. La deposición de muy alta energía en el pequeño volumen de convertidor asociado con el mismo puede limitar fácilmente la capacidad de producción, reduciendo por lo tanto el rendimiento de fotones de Radiación de frenado de alta energía.

30 Una forma de lidiar con esto es tener una pluralidad de rebanadas delgadas de material de convertidor separadas por medios de enfriamiento y, además, agrandar el haz de electrones sobre un área de superficie más grande del convertidor. Sin embargo, el área de superficie más grande inevitablemente tendrá una influencia negativa en la tasa de producción. La consecuencia de una mayor área de superficie del convertidor es que Ra se debe dividir en todo el área de superficie donde están presentes los gammas de alta energía, en tanto que los rendimientos más altos se obtienen al colocar el Ra lo más cerca del convertidor como sea posible. Esto se puede considerar un inconveniente para cualquier tipo de diana sólida, puesto que la alta densidad que se puede lograr (por ejemplo, 3-5 g/cc), no se puede aprovechar de manera óptima cuando la densidad de corriente del convertidor es el factor limitante (por ejemplo, 0,125 – 0,25 mA/cm<sup>2</sup>), y la relación de superficie con respecto a volumen se va a incrementar.

40 US 2014/0362964 A1 describe un sistema de producción de isótopos configurado para irradiar un líquido de inicio con un haz de partículas para generar radioisótopos y para transformar una porción del líquido de inicio en vapor.

Por lo tanto, hay algunos inconvenientes asociados con dianas sólidas. Sin embargo, la eficiencia y el rendimiento de las dianas líquidas es en general muy bajo, por lo que en el estado de la técnica, el enfoque permanece en las dianas sólidas. Por lo tanto, aún existe la necesidad en la técnica de dispositivos y métodos que puedan mejorar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de diana líquida.

45 Sumario de la invención

Un objeto de la presente invención es proporcionar un buen sistema de diana líquida. Un objeto adicional de la presente invención es proporcionar un buen método para producir radioisótopos.

El objetivo anterior se logra por un método y aparato de acuerdo con la presente invención.

50 Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que el rendimiento y la producción de radioisótopos puedan ser comparables a esos de una diana sólida. Una ventaja adicional de las realizaciones de la presente invención es que

la cantidad de material de nucleido original necesaria para obtener una cierta cantidad de radioisótopos es limitada. Aún es una ventaja adicional de las realizaciones de la presente invención que se proporcionan dianas líquidas que permiten la producción de radioisótopos con baja generación de desechos radiactivos.

5 Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que el sistema de diana líquida se pueda enfriar de manera continua y eficientemente, impidiendo de esta manera el sobrecalentamiento de la diana líquida. Una ventaja adicional de las realizaciones de la presente invención es que el sistema de diana líquida permite evacuar el calor de una manera estable, continua y confiable.

10 Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que la diana líquida pueda tener un gran volumen total, tal que los efectos adversos esperados de las pérdidas por, por ejemplo, formación de hidrógeno o agua no condensada, se pueden limitar. Una ventaja adicional de las realizaciones de la presente invención es que el sistema de diana líquida puede ser seguro de operar. Aún es una ventaja adicional de las realizaciones de la presente invención que la operación de la diana líquida se puede monitorear, por ejemplo, por el seguimiento exacto de la temperatura y/o presión, que a menudo es difícil para las dianas sólidas.

15 En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un sistema de diana líquida para la producción de radioisótopos. El sistema de diana líquida comprende una cámara de ebullición para contener el líquido y los productos químicos básicos a partir de los cuales se pueden producir los radioisótopos utilizando irradiación. La cámara de ebullición comprende una ventana de irradiación para permitir que el líquido y los productos químicos básicos se irradien, lo que provoca que el líquido se evapore en vapor. El sistema de diana líquida se configura tal que el sobrecalentamiento de la diana líquida se controle por la termodinámica del proceso de evaporación.

20 Donde en las realizaciones de la presente invención se hace referencia a una ventana de irradiación, se hace referencia a un área en la pared de la cámara de ebullición que permite que la radiación requerida para irradiar los productos químicos básicos a partir de los cuales se pueden producir los radioisótopos ingrese a la cámara de ebullición. El tipo de ventana de irradiación que se utiliza puede depender del tipo de irradiación. Por ejemplo, en el caso del uso de radiación gamma, la pared puede, por ejemplo, ser transparente para la radiación de todos modos. En realizaciones, el sistema de diana líquida que se configura tal que el sobrecalentamiento de la diana líquida se controla por la termodinámica del proceso de evaporación, puede comprender que el sistema de diana líquida se configura para usar la evaporación del líquido para impedir este sobrecalentamiento, preferentemente para controlar la temperatura de la diana líquida. El sobrecalentamiento de la diana líquida puede dar por resultado la evaporación de sustancialmente todo el líquido en la diana líquida, tal que los productos químicos básicos se ebullicen hasta sequedad.

30 Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que, como se puede impedir el sobrecalentamiento de la diana líquida, el sistema de diana líquida permite evitar la liberación de gases no condensables de los materiales químicos, permite evitar la sinterización de los materiales químicos y/o permite evitar la formación de materiales químicos insolubles. Este sobrecalentamiento se puede presentar como resultado de la gran cantidad de energía de irradiación depositada en la diana líquida. En particular, la llamada reacción de producción de pares contribuye al calentamiento de la diana líquida. 35 En la reacción de producción de pares, un fotón de alta energía en la presencia de un núcleo Z alto (por ejemplo, un nucleido original Ra-226) se convierte en un electrón y un positrón con energía cinética restante. Conforme las partículas cargadas, es decir, el electrón y el positrón, se ralentizan (y se hibridan en el caso del positrón), liberarán su energía cinética dentro de la diana líquida, que se transfiere en calor.

40 Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que puede no ser necesario un circuito de enfriamiento para el sistema de diana líquida, controlado por bombas, en donde el líquido y los productos químicos básicos se bombean en el circuito de enfriamiento. Una ventaja adicional de las realizaciones de la presente invención es que se pueden evitar grandes intercambiadores de calor que requieren una gran área de contacto con la diana líquida, tal que se puede limitar la cantidad de diana líquida que se requiere.

45 Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que el sistema permite la concentración ascendente durante la operación. Más particularmente, en tanto que la concentración inicial de los productos químicos básicos utilizados para producir radioisótopos en el líquido a la temperatura de inicio se puede limitar debido a la solubilidad en el solvente, por ejemplo, agua, y concentraciones más altas a esta temperatura de inicio darían por resultado la precipitación, es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que la concentración se puede incrementar durante el calentamiento de la diana líquida, en línea con el incremento de la solubilidad de los productos químicos básicos en el agua o agua pesada. Este último se establece por evaporación del solvente, en tanto que los productos químicos básicos se mantienen en el área irradiada.

En las realizaciones, el agua evaporada se puede almacenar en el sistema como vapor o como líquido.

55 En las realizaciones, el sistema de diana líquida comprende además un área de condensación colocada por encima de la cámara de ebullición, el área de condensación tiene paredes para condensar el vapor líquido en condensado líquido, en donde el condensado líquido puede retornar o proporcionar sistemáticamente a la cámara de ebullición. Estas paredes

también se pueden conocer como superficies de enfriamiento. En realizaciones, el sistema de diana líquida se configura para retornar sistemáticamente el condensado líquido en la cámara de ebullición, por ejemplo, por una conexión fluidica directa entre el área de condensación y la cámara de ebullición, o por goteo de condensado líquido del área de condensación (por ejemplo, debido a la gravedad) sistemáticamente en la cámara de ebullición.

5 En las realizaciones, la al menos un área de recolección de condensado por lo tanto se puede colocar en las paredes para condensar el vapor y se puede proporcionar con un mecanismo de goteo para retornar sistemáticamente el condensado a la cámara de ebullición.

10 En realizaciones preferidas, el sistema de diana líquida comprende además al menos un área de recolección de condensado para recolectar el condensado líquido, la por lo menos un área de recolección de condensado que se coloca fuera de la cámara de ebullición (es decir, el por lo menos un área de recolección de condensado y la cámara de ebullición se separan entre sí), en donde el por lo menos un área de recolección de condensado y la cámara de ebullición se interconectan a fin de para actuar como recipientes de comunicación. En realizaciones, el por lo menos un área de recolección de condensado y la sala de ebullición se configuran tal que una relación de un volumen del condensado líquido, es decir, el líquido, presente en el por lo menos un área de recolección de condensado líquido a un volumen del líquido presente en la cámara de ebullición es por lo menos 0,5, preferentemente por lo menos 1, más preferentemente por lo menos 2. En realizaciones, una relación de un área de una sección transversal horizontal de al menos un área de recolección de condensado a un área de una sección transversal horizontal de la cámara de ebullición es al menos 0,5, preferentemente al menos 1, más preferentemente al menos 2. Las dimensiones del sistema se pueden seleccionar a fin de obtener una concentración ascendente a un factor 2. Es una ventaja de estas realizaciones que, como los productos químicos básicos se pueden llegar a concentrar en la cámara de ebullición, y pueden estar ausentes en el al menos un área de recolección de condensado, durante el funcionamiento del sistema de diana líquida, es posible una concentración ascendente de los productos químicos básicos en la cámara de ebullición que alcanza al menos 50%, preferentemente al menos 100%, preferentemente al menos 200%, más alta que una concentración inicial de los productos químicos básicos cuando están presentes en todo el líquido, incluyendo en cualquier líquido presente en el al menos un área de recolección de condensado.

En las realizaciones, el volumen de la cámara de ebullición es de 5 mL a 500 mL. En realizaciones, el volumen total del por lo menos un área de recolección de condensado es de 5 mL a 500 mL.

30 En las realizaciones, esta interconexión entre la cámara de ebullición y la por lo menos un área de recolección de condensado comprende una separación o una tubería. En realizaciones, una entrada de la interconexión para dejar que el líquido entre en la cámara de ebullición se ubica cerca de una parte inferior de la cámara de ebullición, por ejemplo, en una pared o en la parte inferior. Preferentemente, esta entrada se ubica a una altura en la cámara de ebullición por debajo de 25% de la altura de la cámara de ebullición, preferentemente por debajo del 10% de la altura de la cámara de ebullición, más preferentemente sustancialmente en la parte inferior de la cámara de ebullición. En realizaciones, un área de sección transversal de esta interconexión, perpendicular a la dirección de flujo nominal dentro de esta interconexión, es como mucho 10%, preferentemente como mucho 5%, más preferentemente como mucho 2%, de al menos uno, por ejemplo, ambos, de un área de sección transversal vertical u horizontal de la cámara de ebullición.

40 A manera de ilustración, las realizaciones no se limitan a estas, un ejemplo se analiza a continuación. Para una diana que recibe, por ejemplo, 1200 W, con el 50% de la energía utilizada efectivamente para convertir líquido en vapor, y una abertura individual de 0,2 cm<sup>2</sup> (que corresponde a un radio de aproximadamente 2,5 mm en una abertura circular), el líquido recorrería a una velocidad de 1,33 cm/s. A más pequeña sea la abertura, más grande será la velocidad. Al utilizar una pequeña sección para la interconexión, se evita el contraflujo desde la cámara de irradiación hacia la cámara de condensado. Al seleccionar la sección suficientemente pequeña, el líquido está fluyendo uniformemente en una dirección con una velocidad suficientemente alta. La longitud y/o el diámetro de la interconexión se pueden diseñar para crear una caída de presión que creará una diferencia de nivel de líquido. En algunas realizaciones, el diseño se hace a fin de almacenar el condensado por encima del nivel de irradiación de cámara de irradiación. Esto garantiza que la mayor parte del condensado retorne a la cámara de irradiación cuando la irradiación y, por lo tanto, la parte superior en ebullición. De esta manera, los productos químicos se diluyen y se evita la precipitación cuando la solución se enfría. En ejemplos alternativos, la entrada se puede colocar en la parte superior del sistema y operar mediante goteos.

50 Es una ventaja de estas realizaciones que la disipación de calor en el sistema de diana líquida (y por lo tanto la prevención del sobrecalentamiento) se garantice por el proceso de ebullición y condensación del líquido. El área de condensación se puede enfriar por un sistema secundario que contiene un fluido de enfriamiento que no contiene material radiactivo. En las realizaciones, el sistema de diana líquida comprende además un baño de fluido de refrigerante y/o un sistema secundario de circulación de fluido refrigerante para enfriar el área de condensación. En realizaciones preferidas, el área de condensación y al menos un área de recolección de condensado se circunda al menos parcialmente por el sistema secundario de circulación de fluido refrigerante.

Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que el sistema de diana líquida pueda actuar automáticamente como un concentrador, tal que la concentración de productos químicos básicos puede incrementar en el volumen irradiado durante el proceso de calentamiento, y la evaporación de líquido posterior, provocada por la

irradiación. Además, como la solubilidad de los productos químicos básicos en el líquido incrementa habitualmente con la temperatura, la diana líquida puede contener una alta concentración de productos químicos básicos, sin precipitar, lo que permite la producción eficiente de los radioisótopos. De hecho, puesto que la solubilidad de los materiales químicos básicos a partir de los cuales se generan los radioisótopos es relativamente baja a temperatura ambiente, es una ventaja que la concentración se pueda incrementar durante el proceso de calentamiento provocado por la irradiación, aprovechando la solubilidad más alta de los materiales químicos básicos en el líquido a más alta temperatura.

En las realizaciones, el sistema comprende además un generador de haz de irradiación configurado para irradiar el líquido y los productos químicos básicos. En la presente, el generador de haz de irradiación se ubica habitualmente fuera de la cámara de ebullición, y se configura para irradiar el líquido y los productos químicos básicos a través de la ventana de irradiación. En realizaciones, el generador de haz de irradiación se selecciona de: una pistola de haz de electrones; una pistola de haz gamma; una pistola de haz de protones; y una pistola de haz de neutrones. En realizaciones que comprenden la pistola de haz de electrones o la pistola de haz de protones, el generador de haz de irradiación puede comprender además un convertidor para convertir un haz de partículas cargadas (es decir, haz de electrones o haz de protones) en fotones de Radiación de frenado de alta energía, que forman el haz de irradiación.

En las realizaciones que comprenden la por lo menos un área de recolección de condensado, el generador de haz de irradiación se puede configurar tal que el haz de irradiación se propague desde el generador de haz de irradiación ubicado fuera de la cámara de ebullición, a través de la ventana de irradiación, en la cámara de ebullición, sin pasar a través del por lo menos un área de recolección de condensado. Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que cualquier líquido en el por lo menos un área de recolección de condensado no se ebulle, transformando de esta manera el líquido en el por lo menos un área de recolección de condensado en vapor. Esto puede dar por resultado una concentración ascendente de los productos químicos básicos presentes en al menos un área de recolección de condensado, lo que puede dar por resultado una reducción en la concentración de los productos químicos básicos en la cámara de ebullición. Una ventaja adicional de estas realizaciones es que el haz de irradiación puede no atenuarse por absorción por el condensado líquido en la por lo menos un área de recolección de condensado.

En las realizaciones, el sistema de diana líquida comprende una unidad de presurización para presurizar el sistema para controlar el tamaño de burbuja y la temperatura de ebullición del líquido. En estas realizaciones, el sistema puede comprender además un sensor de presión para medir la presión de la cámara o sistema de ebullición.

En las realizaciones, la cámara de ebullición, el área de condensación y el por lo menos un área de recolección de condensado forman un sistema que tiene un diseño cilíndrico. Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que la cantidad de soldaduras en un diseño cilíndrico es habitualmente limitada, lo que puede hacer que el sistema sea resistente a la presión. En las realizaciones, la cámara de ebullición comprende una entrada y salida para generar un flujo de un gas inerte, por ejemplo, argón, helio o nitrógeno, preferentemente helio, a través de la cámara de ebullición. La pérdida de agua no condensada (humedad) que sale del sistema de diana líquida a la misma velocidad de flujo que el gas inerte, se podría compensar al exponer el gas inerte al agua (humedad) antes de adicionar el mismo al sistema de diana. De esta manera, el balance de masa de agua se puede mantener como una constante (con la excepción del gas hidrógeno que sale del sistema).

Es una ventaja de estas realizaciones que se pueda lograr un buen control de presión. Una ventaja adicional es que el flujo de gas inerte se puede utilizar para remover cualquier material gaseoso formado en la cámara de ebullición de la cámara de ebullición, para recolectar este material gaseoso (por ejemplo, Rn cuando el nucleido original comprende Ra-226). En las realizaciones, la cámara de ebullición comprende una entrada para introducir y/o remover la diana líquida, es decir, el líquido y los productos químicos básicos, de la cámara de ebullición.

De acuerdo con la invención, los productos químicos básicos son sales que comprenden un radionúclido para formar los radioisótopos cuando se exponen a la irradiación. Este radionúclido es habitualmente un catión, y la sal comprende además un anión. De acuerdo con la invención, el líquido es agua o agua pesada y los productos químicos básicos son sales que tienen una entalpía positiva para el agua. En realizaciones, los productos químicos básicos son cualquiera o una combinación de  $Ra(NO_3)_2$ ,  $RaCl_2$ , y  $Ba(NO_3)_2$ . Se debe observar que, en tanto que en realizaciones de la presente invención a menudo se hace referencia a la producción de Ac-225, las realizaciones no se limitan a esta y también se contemplan sistemas de diana líquidas para la producción de otros isótopos. Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que estas sales tienen suficiente solubilidad en agua. En realizaciones, la sal comprende uno de: una sal de Ca, que se puede utilizar para la producción de Sc-47; una sal de Zn, que se puede utilizar para la producción de Cu-67; una sal de Ba, que se puede utilizar para la producción de Cs-131; y sal de Dy, que se puede utilizar para la producción de Tb-155. En realizaciones, el sistema de diana líquida se adapta para producir Sc-47, Cu-67, Cs-131, Tb-155, Ra-225, o Ac-225, preferentemente Ac-225.

Cualquier rasgo de cualquier realización del primer aspecto puede ser independientemente como se describe correspondientemente para cualquier realización de cualquiera de los otros aspectos de la presente invención.

En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un método para producir radioisótopos. El método se define en la reivindicación 12. En la presente, la termodinámica de este proceso de evaporación se utiliza a fin de controlar el

sobrecalentamiento de la diana líquida.

En las realizaciones, el método se puede realizar usando un sistema de diana líquida de acuerdo con realizaciones del primer aspecto de la presente invención.

5 En las realizaciones, el método comprende un paso, después de esta irradiación, de recolectar los radioisótopos de la diana líquida.

En las realizaciones, esta irradiación se realiza usando una potencia incidente en la diana líquida de, por ejemplo, 1,5 kW, por ejemplo, de una potencia entre 0,5 kW y 10 kW, por ejemplo, entre 0,5 kW y 5 kW, por ejemplo, entre 0,5 kW y 3 kW. En realizaciones, el paso de irradiar se realiza a una presión de entre vacío y 6 MPa (60 bar), por ejemplo, entre 0,05 MPa (0,5 bar) y 1 MPa (10 bar). Se debe observar que, en principio, también se pueden usar presiones más altas.

10 En las realizaciones preferidas, la diana líquida tiene una concentración de productos químicos básicos, por ejemplo, en la ubicación de irradiación, durante al menos parte de esta irradiación, que es mayor que una solubilidad, es decir, concentración máxima antes de que se presente la precipitación, de los productos químicos básicos en el líquido a una temperatura de 25 °C y una presión de 0,1013 MPa (1 atm), preferentemente al menos 20% más alta, más preferentemente al menos 50% más alta, incluso más preferentemente al menos 100% más alta, incluso más  
15 preferentemente al menos 200% más alta. Habitualmente, la concentración máxima que se puede lograr es igual a la solubilidad de los productos químicos básicos, puesto que cualquier producto químico básico adicional no se disolvería en el líquido, por ejemplo, precipitaría del líquido.

Cualquier rasgo de cualquier realización del segundo aspecto puede ser independientemente como se describe correspondientemente para cualquier realización de cualquiera de los otros aspectos de la presente invención.

20 En un tercer aspecto, la presente invención se refiere a un uso del sistema de diana líquida de acuerdo con realizaciones del primer aspecto para producir radioisótopos.

Cualquier rasgo de cualquier realización del tercer aspecto puede ser independientemente como se describe correspondientemente para cualquier realización de cualquiera de los otros aspectos de la presente invención.

25 Los aspectos particulares y preferidos de la invención se exponen en las reivindicaciones independientes y dependientes anexas. Los rasgos de las reivindicaciones dependientes se pueden combinar con características de las reivindicaciones independientes y con características de otras reivindicaciones dependientes según corresponda y no simplemente como se expone explícitamente en las reivindicaciones.

30 Aunque ha habido una mejora, cambio y evolución constantes de los dispositivos en este campo, se cree que los presentes conceptos representan mejoras nuevas y novedosas sustanciales, incluyendo las desviaciones de las prácticas anteriores, lo que da por resultado la provisión de dispositivos más eficientes, estables y fiables de esta naturaleza.

Las anteriores y otras características, rasgos y ventajas de la presente invención llegarán a ser evidentes a partir de la siguiente descripción detallada, tomada en conjunto con las figuras anexas, que ilustran, a manera de ejemplo, los principios de la invención. Esta descripción se da por el bien de ejemplo solamente, sin limitar el alcance de la invención. Las figuras de referencia citadas a continuación se refieren a las figuras anexas.

35 Breve Descripción de las Figuras

La figura 1A es una vista esquemática en separación de las partes de al menos parte de un sistema de diana líquida de acuerdo con realizaciones de la presente invención.

La figura 1B es una sección transversal vertical esquemática de al menos parte del sistema de diana líquida de la figura 1A que está de acuerdo con realizaciones de la presente invención.

40 La figura 2 es una gráfica de la solubilidad, en gramos de la sal por 100 mL de H<sub>2</sub>O, como que depende de la temperatura, en grados Celsius, para Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

La figura 3 es una ilustración esquemática de un sistema de diana líquida de acuerdo con realizaciones de la presente invención.

45 La figura 4 es una sección transversal vertical esquemática de un sistema de diana líquida de acuerdo con realizaciones de la presente invención.

La figura 5 es una sección transversal vertical esquemática del sistema de diana líquida de la figura 4, después del

calentamiento de la dianas líquida por irradiación de esta diana líquida.

En las diferentes figuras, los mismos signos de referencia se refieren a los mismos elementos o análogos.

Descripción de las realizaciones ilustrativas

5 La presente invención se describirá con respecto a las realizaciones particulares y con referencia a ciertas figuras, pero la invención no se limita a las mismas sino sólo por las reivindicaciones. Las figuras descritas son sólo esquemáticas y no son limitantes. En las figuras, el tamaño de algunos de los elementos se puede exagerar y no dibujarse a escala con propósitos ilustrativos. Las dimensiones y las dimensiones relativas no corresponden a reducciones reales a la práctica de la invención.

10 Además, los términos primero, segundo, tercero y similares en la descripción y en las reivindicaciones se utilizan para distinguir entre elementos similares y no necesariamente para describir una secuencia, ya sea de manera temporal, espacialmente, en clasificación o de cualquier otra manera. Se va a entender que los términos utilizados de esta manera son indistintos bajo circunstancias apropiadas y que las realizaciones de la invención descrita en la presente son capaces de la operación en otras secuencias distintas a las descritas o ilustradas en la presente.

15 Además, los términos superior, inferior, sobre, debajo y similares en la descripción y las reivindicaciones se usan con propósitos descriptivos y no necesariamente para describir posiciones relativas. Se va a entender que los términos utilizados de esta manera son indistintos bajo circunstancias apropiadas y que las realizaciones de la invención descrita en la presente son capaces de la operación en otras orientaciones distintas a las descritas o ilustradas en la presente.

20 Se va a observar que el término "que comprende", utilizado en las reivindicaciones, no se debe interpretar como que se restringe a los medios listados más adelante; no excluye otros elementos o pasos. Por consiguiente, se va a interpretar como que especifica la presencia de las características, números enteros, pasos o componentes indicados como se conocen, pero no impide la presencia o adición de una o más otras características, números enteros, pasos o componentes, o grupos de los mismos. Por lo tanto, el término "que comprende" cubre la situación donde sólo están presentes las características indicadas y la situación donde estas características y una o más de otras características están presentes. Por lo tanto, la palabra "que comprende" de acuerdo con la invención también incluye como una  
25 realización que no hay componentes adicionales presentes. Por consiguiente, el alcance de la expresión "un dispositivo que comprende los medios A y B" no se deben interpretar como que se limitan a los dispositivos que constan sólo de los componentes A y B. Significa que, con respecto a la presente invención, los únicos componentes pertinentes del dispositivo son A y B.

30 De manera similar, se va a observar que el término "acoplado" no se debe interpretar como que se restringe sólo a conexiones directas. Se pueden utilizar los términos "acoplado" y "conectado", junto con sus derivados. Se debe entender que estos términos no proponen como sinónimos entre sí. Por lo tanto, el alcance de la expresión "un dispositivo A acoplado a un dispositivo B" no se debe limitar a dispositivos o sistemas en donde una salida del dispositivo A se conecta directamente a una entrada del dispositivo B. Significa que existe una ruta entre una salida de A y una entrada de B que puede ser una ruta que incluye otros dispositivos o medios. "Acoplado" puede significar que dos o más elementos están  
35 ya sea en contacto físico o eléctrico directo, o que dos o más elementos no están en contacto directo entre sí, pero aún así cooperan o interactúan entre sí.

40 La referencia de principio a fin de esta especificación a "una realización" o "una realización" significa que un rasgo, estructura o característica particular descrita con relación a la realización se incluye en al menos una realización de la presente invención. Por consiguiente, las apariciones de las frases "en una realización" o "en una realización" en varios lugares de principio a fin de esta especificación no todas se refieren necesariamente a la misma realización, pero pueden hacerlo. Además, los rasgos, estructuras o características particulares se pueden combinar de cualquier manera adecuada, como sería evidente para un experto en la técnica a partir de esta descripción, en una o más realizaciones.

45 De manera similar, se debe apreciar que en la descripción de las realizaciones de ejemplo de la invención, diversos rasgos de la invención a veces se agrupan en una realización, figura, o descripción individual de esta con el propósito de optimizar la divulgación y ayudar en la comprensión de uno o más de los diversos aspectos inventivos. Este método de divulgación, sin embargo, no se debe interpretar como que refleja una intención de que la invención reivindicada requiera más rasgos de las que se citan expresamente en cada reivindicación. En su lugar, como reflejan las siguientes reivindicaciones, los aspectos inventivos yacen en menos de todos los rasgos de una realización individual divulgada anteriormente. Por consiguiente, las reivindicaciones que siguen a la descripción detallada se incorporan expresamente por la presente en  
50 esta descripción detallada, con cada reivindicación por sí misma como una realización separada de esta invención.

Además, en tanto que algunas realizaciones descritas en la presente incluyen algunas, pero no otros rasgos incluidos en otras realizaciones, combinaciones de rasgos de diferentes realizaciones se propone que estén dentro del alcance de la invención, y formen diferentes realizaciones, como se entendería por aquellos expertos en la técnica. Por ejemplo, en las siguientes reivindicaciones, cualquiera de las realizaciones reivindicadas se puede utilizar en cualquier combinación.

Además, algunas de las realizaciones se describen en la presente como un método o combinación de elementos de un método que se puede implementar por un procesador de un sistema de computadora o por otros medios para llevar a cabo la función. Por lo tanto, un procesador con las instrucciones necesarias para llevar a cabo este método o elemento de un método forma un medio para llevar a cabo el método o elemento de un método. Además, un elemento descrito en la presente de una realización de aparato es un ejemplo de un medio para llevar a cabo la función realizada por el elemento con el propósito de llevar a cabo la invención.

En la descripción proporcionada en la presente, se exponen numerosos detalles específicos. Sin embargo, se entiende que las realizaciones de la invención se pueden practicar sin estos detalles específicos. En otros casos, los métodos, estructuras y técnicas bien conocidos no se han mostrado en detalle a fin de no oscurecer una comprensión de esta descripción.

La invención se describirá ahora por una descripción detallada de varias realizaciones de la invención. Está claro que otras realizaciones de la invención se pueden configurar de acuerdo con el conocimiento de personas expertas en la técnica sin desviarse de la enseñanza técnica de la invención, la invención que se limita sólo por los términos de las reivindicaciones anexas.

En un primer aspecto, la presente invención se refiere a un sistema de diana líquida para la producción de radioisótopos, como se define por la reivindicación 1.

En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un método para producir radioisótopos. El método se define por la reivindicación 13.

En un tercer aspecto, la presente invención se refiere a un uso del sistema de diana líquida de acuerdo con realizaciones del primer aspecto para producir radioisótopos.

Se hace referencia a la figura 1A, que es una vista esquemática en separación de las partes de al menos parte de un sistema de diana líquida 10 de acuerdo con realizaciones de la presente invención. Simultáneamente, se hace referencia a la figura 1B, que es una vista transversal vertical esquemática de esta al menos parte del sistema de diana líquida 10. En este ejemplo, el sistema de diana líquida, es decir, para la producción de radioisótopos, comprende una cámara de ebullición 2 para contener una diana líquida 8, que consta de un líquido y productos químicos básicos a partir de los cuales se pueden producir radioisótopos utilizando irradiación. Una ventana de irradiación 23, que en este ejemplo es parte de una pared de la cámara de ebullición 2, a través de la cual esta irradiación se puede propagar, se comprende en una pared de la cámara de ebullición 2. En este ejemplo, el líquido comprendido en la diana líquida 8 en la cámara de ebullición 2 es agua, y los productos químicos básicos disueltos en el agua es una sal que comprende el nucleído original Ra-226, por ejemplo,  $(\text{Ra-226})(\text{NO}_3)_2$ , aunque la invención no se limita a la misma. Como tal, en este ejemplo, la diana líquida 8 consta del líquido y la sal que comprende Ra-226.

La diana líquida 8 se irradia continuamente por un haz de fotones de alta energía a través de la ventana de irradiación 23. Como resultado, la diana líquida 8 ebullicirá bajo esta irradiación continua, transformando de esta manera el líquido en vapor, es decir, vapor de agua (flechas blancas). Posteriormente, el vapor de agua se condensa en un área de condensación 3 ubicada por encima de la cámara de ebullición 2, transformando de esta manera el vapor en condensado líquido. Al menos el área de condensación 3, pero posiblemente también el área de recolección de condensado 4, y posiblemente también la cámara de ebullición 2, se pueden enfriar por un baño de fluido refrigerante de agua y/o un sistema secundario de circulación de agua de fluido refrigerante forzado.

En este ejemplo, el sistema de diana líquida comprende además dos áreas de recolección de condensado 4, diferentes de la cámara de ebullición 2 y, en este ejemplo, separadas entre sí por paredes de separación 21. Las dos áreas de recolección de condensado 4 se ubican en lados opuestos de la cámara de ebullición 2, cada vez separadas por las paredes de separación 21. El sistema de diana líquida se configura tal que el condensado formado en el área de condensación 3 se mueva, por ejemplo, caiga, en las áreas de recolección de condensado 4 (flechas llenas de franjas horizontales). Esto se logra, en este ejemplo, conforme las paredes de las áreas de recolección de condensado 4 se conectan a las paredes del área de condensación 3, tal que el líquido condensado en las paredes del área de condensación 3 se puede mover, por ejemplo, hacia abajo sobre esta pared, hacia las áreas de recolección de condensado 4. Además, en este ejemplo, el sistema de diana líquida comprende un elemento de dirección de condensado 5, que dirige cualquier condensado, lejos de la cámara de ebullición, a las áreas de recolección de condensado 4 (que de otra manera se pueden llamar cámaras de recolección de condensado).

Las áreas de recolección de condensado 4 se acoplan de manera fluida a la cámara de ebullición 2, por ejemplo, mediante aberturas 24 en las paredes de separación 21. Por ejemplo, como en este ejemplo, al menos una porción de las paredes de separación 21 se puede separar de una parte inferior de la cámara de ebullición 2 por una separación 24, a través de la cual el líquido se puede mover entre las áreas de recolección de condensado 4 y la cámara de ebullición 2. De manera alternativa, por ejemplo, se puede utilizar una tubería para implementar este acoplamiento fluido. De esta manera, el condensado líquido 41 recolectado en las áreas de recolección de condensado 4 puede fluir hacia la cámara de ebullición

2 (flechas negras).

Como tal, se puede considerar que las áreas de recolección de condensado 4 y la cámara de ebullición 2 como que funcionan como, en este ejemplo, tres recipientes de comunicación, en donde la diana líquida 8 en la cámara de ebullición 2 está ebulliciendo, que se coloca directamente en el haz de fotones de alta energía, en tanto que el condensado se recolecta en las áreas de recolección de condensado 4, que no está ebulliciendo debido a la deposición de energía menor en las áreas de recolección de condensado 4. De hecho, el condensado, es decir, el líquido, en las áreas de recolección de condensado 4 puede no comprender Ra-226 en cantidades significativas para absorber la irradiación, debido a un flujo de líquido efectivo continuo (flechas negras) desde las áreas de recolección de condensado 4, a través de la separación, a la cámara de ebullición 2, que compensa un flujo de vapor (flechas blancas) y un flujo de condensado (flechas con franjas horizontales) mediante el área de condensación 3. En un estado estacionario, las tasas de cada uno de estos tres flujos pueden ser sustancialmente iguales. El condensado 41 estará a un nivel de irradiación significativamente más bajo. Además, debido a la ausencia de Ra, hay una menor absorción de calor que provoca que el condensado no ebullicione. En otras palabras, como las áreas de recolección de condensado 4 y la cámara de ebullición 2 son esencialmente recipientes de comunicación, la pérdida continua de masa de agua en la cámara de ebullición 2 debido a esta ebullición se compensará por un flujo continuo de agua desde las áreas de recolección de condensado 4, a través del agujero en la parte inferior de la diana, hacia la cámara de ebullición 2. El tamaño de la separación (o, alternativamente, un diámetro de la tubería) se optimiza preferentemente tal que haya un flujo continuo de condensado, es decir, líquido, hacia la cámara de ebullición 2, tal que sustancialmente ningún Ra-226 se mueva en la dirección opuesta, es decir, desde la cámara de ebullición 2, hacia y en las áreas de recolección de condensado 4. Por lo tanto, la abertura no debe ser demasiado estrecha ni demasiado grande. Preferentemente, una velocidad de flujo de líquido a través de la abertura, hacia la cámara de ebullición es de 0,1 cm/s a 20 cm/s, preferentemente de 0,5 cm/s a 5 cm/s, por ejemplo, 1 cm/s. Preferentemente, esta velocidad de flujo de líquido resulta sustancialmente de manera completa de la pérdida de líquido en la cámara de ebullición 2 debido a la ebullición debido a la irradiación, y la ganancia de líquido en el área de recolección de condensado 4 debido a la recolección posterior de condensado en la misma. Debido al flujo continuo de retorno de condensado, es decir, líquido a la diana líquida en la cámara de ebullición 2, la diana líquida puede no ebullicir a sequedad, y se impide el sobrecalentamiento.

En este ejemplo, la irradiación de la diana líquida 8 da por resultado la producción de Ac-225, por la reacción fotonuclear Ra-226 ( $\gamma, n$ ) Ra-225 ( $\beta^-$ ) Ac-225. Se prefiere que cualquier Ac-225 formado se pueda separar de la diana líquida 8. En este ejemplo, el sistema de diana líquida comprende una abertura 22 en una parte inferior de la cámara de ebullición 2, que funciona como una entrada y/o salida para la diana líquida 8, por ejemplo, antes y después, pero preferentemente no durante, la irradiación. De esta manera, la diana líquida 8 puede, después de la irradiación, moverse a través de la abertura 22 a, por ejemplo, una instalación de celda caliente para la separación química y purificación de Ac-225. Después de esta separación, la diana líquida se puede mover de nuevo a través de esta abertura 22 hacia la cámara de ebullición 2. Para evitar la cristalización y las pérdidas en cualquier ruta fluidica, por ejemplo, tubería, interconexión de la cámara de ebullición 2 y la instalación de celda caliente, preferentemente se usa un cierto volumen de enjuague de líquido, por ejemplo, ácido nítrico diluido, directamente después de transferir la diana líquida 8 a través de esta ruta fluidica. Esto puede diluir aún más los productos químicos básicos en la diana líquida 8 y, por lo tanto, reducir los rendimientos, es decir, por el exceso de volumen introducido por el volumen de enjuague. Este exceso de volumen se puede remover al ebullicir, en la cámara de ebullición 2, la diana líquida 8 en tanto que se establece un flujo de un gas inerte, por ejemplo, helio o N<sub>2</sub>, desde la abertura 22 a la abertura 31, removiendo de esta manera cualquier exceso de vapor. Sin embargo, por el diseño adecuado de la diana (relación del volumen de la cámara de ebullición 2 al volumen de las cámaras de condensado 4), este exceso de volumen puede no ser un problema. De hecho, se puede optimizar la relación de volumen entre el líquido en la sala de ebullición 2, es decir, irradiado por el haz, y el líquido en las cámaras de recolección de condensado 4, y se puede incrementar la concentración de Ra en la cámara de ebullición. Por ejemplo, en el caso de una relación de volumen de 1/1, la concentración de Ra en el haz se puede duplicar en la operación, es decir, durante la irradiación de la diana líquida 8, en comparación a un diseño que no comprende las cámaras de recolección de condensado 4. Como resultado, los rendimientos de producción también se duplicarán. Es una ventaja de esta concentración ascendente que puede ser necesaria una baja cantidad de nucleido original, por ejemplo, Ra-226, para la ruta de producción gamma para obtener un alto rendimiento de isótopos de Ra-225. Esta concentración incrementada puede, durante la irradiación, no ser un problema con respecto a un máximo en la solubilidad de radio, puesto que la diana líquida se puede calentar fuertemente, por ejemplo, a 100 °C que es la temperatura de ebullición del agua a presión estándar o incluso por encima de 100 °C cuando la presión está por encima de la presión estándar, tal que la solubilidad se pueda incrementar adicionalmente.

En este ejemplo, la al menos parte del sistema de diana líquida 10, es decir, la cámara de ebullición 2, el área de condensación 3 y las áreas de recolección de condensado 4, forman una forma cilíndrica, a fin de limitar la cantidad de soldaduras, y lo que incrementa la resistencia de esta parte del sistema de diana líquida que puede operar a presiones elevadas. Esta presión más alta se puede utilizar para incrementar el punto de ebullición del agua, y puede influir en la termodinámica del proceso de evaporación. De hecho, cuando se opera este diana líquida 8 en el haz, cualquier calor generado se debe evacuar de una manera que la operación en estado estacionario sea segura y fiable. Se prefiere una diana líquida en ebullición 8, puesto que es una forma eficiente y conveniente de remover el exceso de calor de una solución, es decir, la diana líquida 8. Debido al tamaño relativamente pequeño de la diana líquida 8, se puede preferir fuertemente la presurización para controlar el tamaño de burbuja en la diana líquida en ebullición 8. A más alta es la

presión, más pequeñas pueden ser las burbujas y mejor puede ser el rendimiento de ebullición. La presión y la temperatura de estado estacionario se pueden controlar para optimizar el rendimiento termohidráulico de la diana líquida 8.

(Ra-226)(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> es adecuado para usarse en realizaciones de la presente invención, puesto que tiene una solubilidad relativamente alta en agua en comparación a otras sales de Ra-226. El compuesto es soluble para 13,9 g/ 100 g de agua a 20 °C y presión estándar (ver Erbacher, O. Löslichkeits-Bestimmungen einiger Radiumsalze; Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, 1930; Vol. 63: 141-156). Sin embargo, también se pueden utilizar otros compuestos, por ejemplo, (Ra-226)Cl<sub>2</sub>. La solubilidad de (Ra-226)(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> incrementa significativamente a temperaturas más altas. Para aproximar la solubilidad de (Ra-226)(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> a temperaturas elevadas, la solubilidad del nitrato de bario se puede tomar como una buena aproximación, debido al comportamiento muy similar de los átomos de metales alcalinotérreos Ra y Ba o del Grupo 2 (aunque la solubilidad de Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> es ligeramente menor que esa de Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Se hace referencia a la figura 2, que es una gráfica de la solubilidad, en gramos de la sal por 100 mL de H<sub>2</sub>O, dependiendo de la temperatura, en grados Celsius. Los datos se muestran para Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ([http://periodic-table-of-elements.org/SOLUBILITY/barium\\_nitrate](http://periodic-table-of-elements.org/SOLUBILITY/barium_nitrate)) que son los puntos oscuros conectados por la curva punteada, en un intervalo de temperatura de 0 °C a 100 °C, y para Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, para el que sólo se tienen datos a 20 °C. Se puede observar que a 100 °C, la solubilidad de Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> incrementa por un factor de 3 en comparación a su solubilidad a 20 °C. Como tal, se espera que la solubilidad a 100 °C sea alrededor de 3 veces mayor también para Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Se espera una solubilidad aún mayor por encima de 100 °C. De hecho, el punto de ebullición del agua se puede incrementar, en primer lugar por la presencia de la sal disuelta en la misma, y en segundo lugar por un incremento en la presión.

También se puede derivar una dependencia de presión de Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> al comparar con Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. La solubilidad en agua de Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> incrementa de 0,394 a 0,841 ± 0,005 mol/kg (de 13,79 a 29,435 ± 0,175 g/100 g H<sub>2</sub>O) cuando se incrementa la presión desde la presión estándar hasta 200MPa. (B.R. Churagulov, S.L. Lyubimov, A.N. Baranov, A.A. Burukhin. Influence of Pressures up to 300 MPa on the Water Solubilities of Poorly Soluble Salts. Septiembre de 1999. Russian Journal of Inorganic Chemistry 44(9): 1489- 1493). Como tal, no se espera que las presiones elevadas en la cámara de ebullición puedan tener una influencia negativa (disminución) en la solubilidad de Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> en el agua de la diana líquida.

Ahora se procede con un ejemplo cuantitativo. Con referencia de nuevo a la figura 1A y la figura 1B, como un ejemplo, se puede considerar una diana líquida 8 que tiene un volumen de 25 cm<sup>3</sup>, y no se prefiere exceder la solubilidad a temperatura ambiente, que es de 13,9 g/ 100 g de agua. De hecho, la diana líquida 8 se debe bombear en una salida de la cámara de ebullición 2, es decir, entre la cámara de ebullición 2 y la instalación de celda caliente, que normalmente está aproximadamente a temperatura ambiente. Una concentración más alta puede, por lo tanto, dar por resultado la precipitación en la ruta fluidica que conecta la cámara de ebullición 2 con la instalación de celda caliente. Como tal, cuando está a temperatura ambiente, la diana líquida sólo puede contener alrededor de 2 gramos de Ra-226. Sin embargo, el objetivo es tener 6 gramos de los productos químicos básicos en la cámara de ebullición 2, para incrementar la eficiencia y el rendimiento del sistema de diana líquida. Como tal, en cambio, se puede prever una diana de 6 gramos de Ra-226 disuelto en 125 ml, y una relación de volumen entre el líquido en la cámara de ebullición 2 y las cámaras de recolección de condensado 4 que es igual a 1/4. Como tal, inicialmente, 100 mL de la diana líquida están presentes en las cámaras de recolección de condensado 4, y 25 mL están presentes en la cámara de ebullición 2. Al inicio de la irradiación, el Ra-226 se divide homogéneamente entre los compartimentos. Cuando la cámara de ebullición 2 comienza a ebulir bajo la influencia de esta irradiación, debido al mecanismo explicado anteriormente, el Ra-226 de las cámaras de recolección de condensado 4 fluiría hacia la cámara de ebullición 2 y permanecerá allí durante el curso de la irradiación. Como tal, con el transcurso del tiempo, el Ra-226 se agotará en las cámaras de recolección de condensado 4, tal que las cámaras de recolección de condensado 2 sólo comprenden líquido, es decir, condensado 41. Además, la cámara de ebullición 2, que comprende 25 cm<sup>3</sup> de la diana líquida, contiene todo el Ra-226 restante (es decir, 6 gramos menos lo que ha reaccionado para formar Ra-225 o Ac-225). Es decir, de manera efectiva, sólo la cámara de ebullición 2 comprende la diana líquida 8. Conforme el agua se calienta, por ejemplo, a 80 °C o 100 °C, la concentración de productos químicos básicos en la diana líquida 8 aún está por debajo del límite de solubilidad para Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Además del calentamiento debido a la irradiación, se puede realizar un calentamiento forzado (que no resulta de la irradiación) de la cámara de ebullición 2, hasta que se logre el estado estacionario. Es una ventaja que se puede lograr rápidamente un estado estacionario, en el que la termodinámica es continua y predecible. Además, cuando se enfría la diana líquida 8 después de esta irradiación, se puede preferir un enfriamiento lento para evitar cualquier precipitación del Ra(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Una de las formas de lograr esto podría ser sumergir el cilindro o recipiente de diana, y entonces al menos la cámara de ebullición 2 y las áreas de recolección de condensado 4, en un baño de agua que opera a, por ejemplo, 70-80 °C. Alternativamente, se puede introducir un gas de purga, que provoca la mezcla forzada, por ejemplo, a través de la abertura 22 y dejar a través de la abertura adicional 31 ubicada por encima de la cámara de ebullición 2.

Se hace referencia a la figura 3, que es una vista esquemática de un sistema de diana líquida 1 de acuerdo con realizaciones de la presente invención, que puede comprender la al menos parte del sistema de diana líquida 10 de la figura 1A y la figura 1B. La cámara de ebullición comprendida en la al menos parte del sistema de diana líquida 10 se puede irradiar por un haz de irradiación 26 que se origina a partir de un generador de haz de irradiación 25. En este ejemplo, una abertura 22 en una parte inferior de la cámara de ebullición se puede acoplar a un recipiente de agente amortiguador 6 mediante la válvula V3. Este recipiente de agente amortiguador 6 se acopla, mediante la válvula V8, a una instalación de celda caliente 61. Este recipiente de agente amortiguador 6 se conecta además, mediante la válvula V5, a

una entrada para introducir agua desmineralizada 62. Esta entrada para introducir agua desmineralizada 62 se conecta además, mediante la válvula V7, a la abertura adicional 31. En este ejemplo, se puede introducir gas comprimido, por ejemplo, N<sub>2</sub> o He, desde una fuente de gas comprimido 63, por ejemplo, un cilindro de gas comprimido, a través de la abertura 22, mediante la válvula V4, el recipiente de agente amortiguador 6 y la válvula V3, o a través de la abertura adicional 31, a través de la válvula V2. Además, se puede introducir un vacío, desde una fuente de vacío 64, por ejemplo, una bomba, a través de la abertura 22, mediante la válvula V6, el recipiente de agente amortiguador 6 y la válvula V3, o alternativamente a través de la abertura adicional 31, a través de las válvulas V6, V4, y V2. La abertura adicional 31 se puede acoplar a una chimenea 7, mediante un volumen que comprende carbón activo 71 o cualquier otro sistema para capturar gases radioactivos no condensables.

En un estado inicial, todas las válvulas V1-8 están cerradas. El recipiente de agente amortiguador 6 se puede llenar, posteriormente, con diana líquida al abrir las válvulas V6 y V8, tal que un vacío extraiga la diana líquida de la instalación de celda caliente 61.

Posteriormente, la diana líquida se puede mover a la cámara de ebullición y las áreas de recolección de condensado al abrir las válvulas V4, V3 y V1, para introducir un flujo de gas (por ejemplo, He o N<sub>2</sub>) a través del recipiente de agente amortiguador 6 a través de la cámara de ebullición en la al menos parte del sistema de diana líquida 10, entonces a través del carbón activo 71, y a la chimenea 7, moviendo de esta manera la diana líquida desde el recipiente de agente amortiguador 6 a la cámara de ebullición. La conexión de fluido que conecta la cámara de ebullición con el recipiente de agente amortiguador 6 se puede lavar con agua desmineralizada desde la entrada para introducir agua desmineralizada 62, al llenar primero el recipiente de agente amortiguador 6 con agua desmineralizada al tener sólo la válvula V5 abierta, entonces cerrar V5, abrir la válvula V4 y abrir la válvula V3. Alternativamente, el lavado se puede realizar al abrir la válvula V7. Esto puede dar por resultado líquido adicional en la cámara de ebullición, pero en la presente invención, esto puede no ser un problema debido a la concentración ascendente potencial de los productos químicos básicos en la cámara de ebullición. Además, en el siguiente paso, el exceso de líquido en la cámara de ebullición se puede evaporar y remover de la cámara de ebullición por un flujo de gas desde la fuente de gas comprimido 63, a través de la cámara de ebullición, a la chimenea 7, reduciendo de esta manera el volumen de líquido en la cámara de ebullición.

En el siguiente paso, la válvula V1 se abre, y la diana líquida en la cámara de ebullición se ebulle por el uso de un haz de irradiación de baja potencia 26 que se origina en el generador de haz de irradiación 25. Entonces, al irradiar, no se pueden abrir válvulas o, alternativamente, sólo es posible que se puedan abrir las válvulas V4 y V3, y V1 se abre ligeramente, a fin de introducir gas comprimido (por ejemplo, Ar, He o N<sub>2</sub>) en la al menos parte del sistema de diana líquida 10, y a fin de obtener una presión preferida, por ejemplo, alta, en la al menos parte del sistema de diana líquida 10. El flujo se puede controlar mediante el controlador de flujo 631 y el regulador de presión 632. La presión incrementada en la cámara de ebullición puede permitir que el líquido en la cámara de ebullición esté a una temperatura incrementada en comparación a las presiones atmosféricas, lo que puede mejorar la solubilidad de los productos químicos básicos. Además, por ejemplo, cuando los productos químicos básicos comprenden Ra-226, se puede retener un pequeño flujo de gas a fin de remover y recolectar cualquier gas, por ejemplo, Rn, formado en la cámara de ebullición. Es una ventaja de las realizaciones de la presente invención que el sistema de diana líquida es compatible con la recolección de Rn.

Después de la reacción fotonuclear en la cámara de ebullición, se puede recolectar cualquier radioisótopo formado en la cámara de ebullición. Para esto, todas las válvulas se pueden cerrar, entonces las válvulas V2 y V3 se pueden abrir, para mover, por un flujo de gas, la diana líquida, que comprende los radioisótopos, desde la cámara de ebullición hasta el recipiente de agente amortiguador 6. Posiblemente, después, la tubería que conecta la cámara de ebullición al recipiente de agente amortiguador 6 se puede lavar con agua desmineralizada al abrir la válvula V7. Finalmente, el recipiente de agente amortiguador 6 se puede vaciar a la instalación de celda caliente 61, al cerrar todas las válvulas, entonces al abrir las válvulas V8 y V4, seguido por una breve abertura de válvula V5 para el lavado con agua desmineralizada.

Aunque se ha asumido que la al menos parte del sistema de diana líquida 10 en la explicación anterior es la realización del ejemplo con relación a la figura 1A y la figura 1B, la al menos parte del sistema de diana líquida 10 puede ser, en su lugar, las realizaciones del ejemplo posterior, o comprender rasgos de ambos ejemplos.

Se hace referencia a la figura 4, que es una representación esquemática de un ejemplo adicional de un sistema de diana líquida de acuerdo con realizaciones de la presente invención. La cámara de ebullición 2 comprende una diana líquida 8, que comprende el líquido y los productos químicos básicos a partir de los cuales se pueden producir radioisótopos. La irradiación 26 incidente en la diana líquida 8 da por resultado el calentamiento de la diana líquida 8, tal que el líquido se evapore para formar vapor en un volumen 9 por encima de la cámara de ebullición 2. Paredes de este volumen aisladas térmicamente por el material de aislamiento 91, tal que se pueda lograr una alta temperatura del vapor en este volumen. Por consiguiente, se puede lograr una concentración más alta del vapor en el volumen, lo que permite que se acumule la presión. En otras palabras, el volumen 9 puede comprender una gran cantidad del líquido en la fase de vapor, es decir, el vapor. En realizaciones, una relación entre un volumen del vapor de gas en el volumen 9 y un volumen de la diana líquida 8 en la cámara de ebullición 2 es al menos 2, preferentemente al menos 5.

En otras palabras, además de condensar directamente el vapor que se forma, alternativamente el volumen por encima de la cámara de ebullición se puede utilizar para almacenar el solvente evaporado como vapor.

5 Se hace referencia a la figura 5. Como resultado de la evaporación debido a la irradiación, y la gran cantidad de vapor que se forma, se reduce el volumen de la diana líquida 8. Por consiguiente, se incrementa la concentración de los productos químicos básicos en la misma, lo que puede incrementar la eficiencia y el rendimiento de la reacción nuclear, por ejemplo, una reacción fotonuclear, de los productos químicos básicos para formar los radioisótopos. En realizaciones, la irradiación se adapta para producir una presión en el volumen 9 que es de hasta 2 MPa (20 bar), por ejemplo, hasta 1 MPa (10 bar). El límite superior de la presión se limita habitualmente por la presión que las paredes del sistema de diana líquida pueden soportar. La alta presión que se usa puede mejorar la solubilidad de los productos químicos básicos en la diana líquida 8 conforme incrementa la temperatura de ebullición, lo que permite, a su vez, que se evapore más líquido sin dar por resultado la precipitación de los productos químicos básicos de la diana líquida 8. Durante la irradiación de la diana líquida 8, la concentración de productos químicos básicos en el líquido es preferentemente más alta que una solubilidad de los productos químicos básicos en el líquido a temperatura ambiente, por ejemplo, en la ausencia de la irradiación. En este ejemplo, una alta irradiación puede, por lo tanto, dar por resultado un alto rendimiento tanto debido a esta alta irradiación como a la concentración ascendente de productos químicos básicos en la diana líquida 8. Además, se puede impedir el sobrecalentamiento al encontrar un equilibrio entre la potencia de irradiación y la pérdida de potencia debido a la evaporación del líquido de la diana líquida 8.

10 Se debe observar que en realizaciones de la presente invención, las condiciones de operación así como las medidas adicionales se pueden seleccionar a fin de limitar o impedir la radiólisis, o revertir la misma por recombinación de oxígeno con hidrógeno. Estas medidas se conocen en la técnica. Un ejemplo de una solución técnica se proporciona por <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02387473>.

20 Se debe entender que, aunque las realizaciones preferidas, las construcciones y configuraciones específicas, así como los materiales, se han analizado en la presente para los dispositivos de acuerdo con la presente invención, se pueden realizar diversos cambios o modificaciones en la forma y el detalle sin desviarse del alcance de esta invención. Se pueden adicionar pasos a los métodos descritos dentro del alcance de la presente invención, que se define por las reivindicaciones anexas.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de diana líquida (1) para la producción de radioisótopos, el sistema de diana líquida (1) que comprende una cámara de ebullición (2) que contiene el líquido y los productos químicos básicos a partir de los cuales se pueden producir los radioisótopos utilizando irradiación, la cámara de ebullición (2) comprende una ventana de irradiación para permitir que el líquido y los productos químicos básicos se irradien, lo que provoca que el líquido se evapore en vapor, en donde el sistema de diana líquida se configura tal que el sobrecalentamiento de la diana líquida (8) se controle por la termodinámica del proceso de evaporación, en donde el líquido es agua o agua pesada caracterizado porque los productos químicos básicos son sales que tienen una entalpía positiva para el agua.
2. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el agua evaporada se almacena como vapor o como líquido.
3. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, el sistema de diana líquida (1) que comprende además un área de condensación (3) colocada por encima de la cámara de ebullición (2), el área de condensación (3) que tiene paredes para condensar el vapor en condensado líquido,
- en donde el condensado líquido se puede retornar o proporcionar sistemáticamente a la cámara de ebullición (2).
4. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con la reivindicación 3, el sistema de diana líquida (1) que comprende además al menos un área de recolección de condensado (4) para recolectar el condensado líquido, la al menos un área de recolección de condensado (4) que se coloca fuera de la cámara de ebullición (2).
5. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con la reivindicación 4, en donde la al menos un área de recolección de condensado (4) y la cámara de ebullición (2) se interconectan a fin de actuar como recipientes de comunicación.
6. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con la reivindicación 4, en donde la al menos un área de recolección de condensado (4) se coloca en las paredes para condensar el vapor, y se proporciona con un mecanismo de goteo para retornar sistemáticamente el condensado a la cámara de ebullición.
7. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 3 a 6, en donde la cámara de ebullición (2), el área de condensación (3) y la al menos un área de recolección de condensado (4) forman un sistema que tiene un diseño cilíndrico y/o en donde el sistema de diana líquida (1) comprende además un baño de fluido de regulación y/o un sistema secundario de circulación de fluido de regulación (32) para aislar o controlar la temperatura del área de condensación (3).
8. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con la reivindicación 7, en donde la pared externa de la cámara de ebullición (2), el área de condensación (3) y la al menos una área de recolección de condensado (4) se circunda al menos parcialmente por el baño de fluido refrigerante y/o el sistema secundario de circulación de fluido refrigerante (32).
9. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, el sistema que comprende además un generador de haz de irradiación (25) configurado para irradiar el líquido y los productos químicos básicos y/o en donde el sistema comprende además una unidad de presurización para presurizar la cámara de ebullición para controlar el tamaño de burbuja y la temperatura de ebullición del líquido.
10. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con la reivindicación 9, en donde el sistema (1) comprende además un sensor de presión para medir la presión en la cámara de ebullición (2).
11. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde los productos químicos básicos son cualquiera o una combinación de  $Ra(NO_3)_2$ ,  $RaCl_2$  y  $RaBr_2$ .
12. El sistema de diana líquida (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el sistema de diana líquida (1) se adapta para producir Sc-47, Cu-67, Cs-131, Tb-155, o Ac-225, preferentemente Ac-225.
13. Un método para producir radioisótopos, que comprende: irradiar una diana líquida (8) que comprende el líquido y los productos químicos básicos a partir de los cuales se pueden producir los radioisótopos utilizando irradiación, lo que provoca que el líquido se evapore en vapor, en donde la termodinámica de este proceso de evaporación se utiliza a fin de

controlar el sobrecalentamiento de la diana líquida (8), en donde el líquido es agua o agua pesada y los productos químicos básicos son sales que tienen una entalpía positiva para el agua.

14. El uso del sistema de diana líquida (1) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12 para producir radioisótopos.

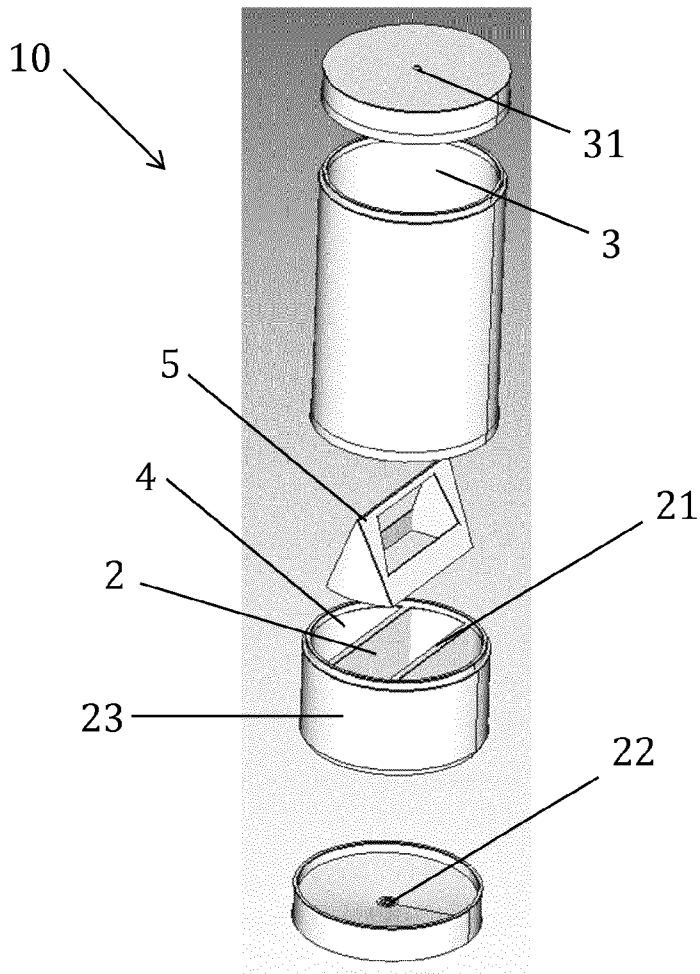


FIGURA 1A

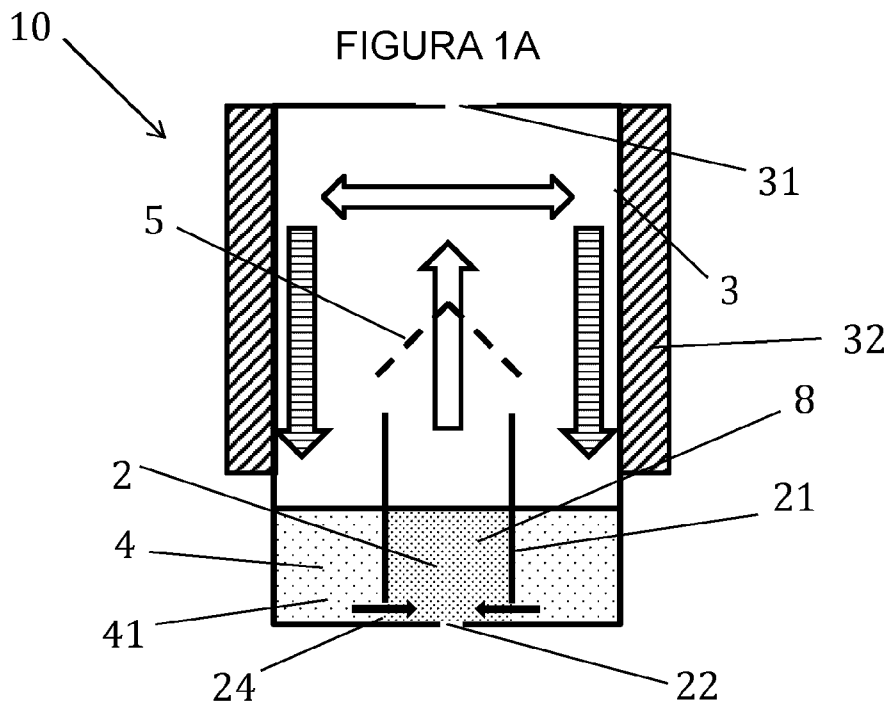


FIGURA 1B

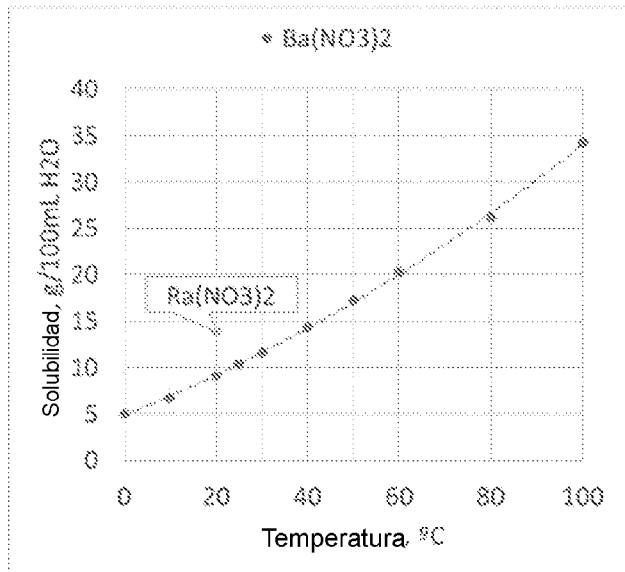


FIGURA 2

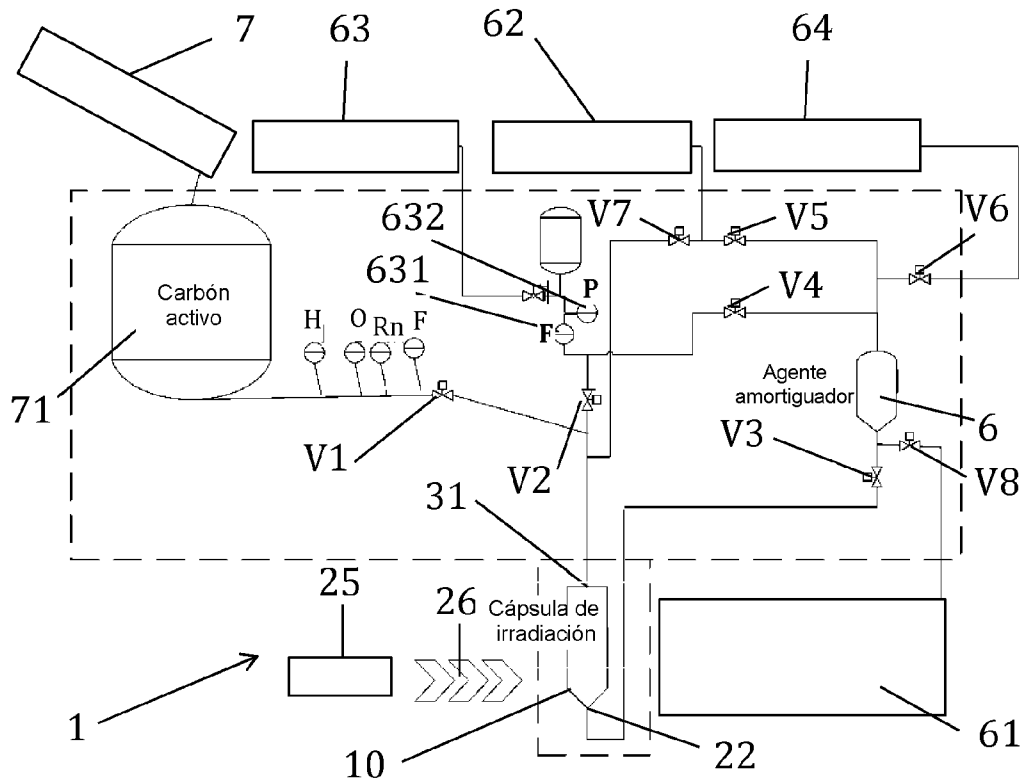


FIGURA 3

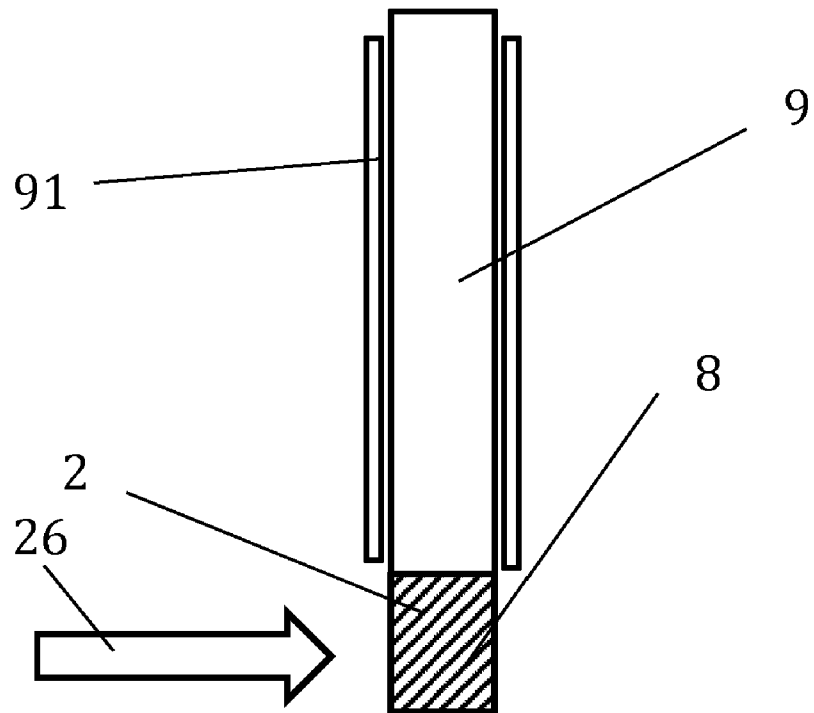


FIGURA 4

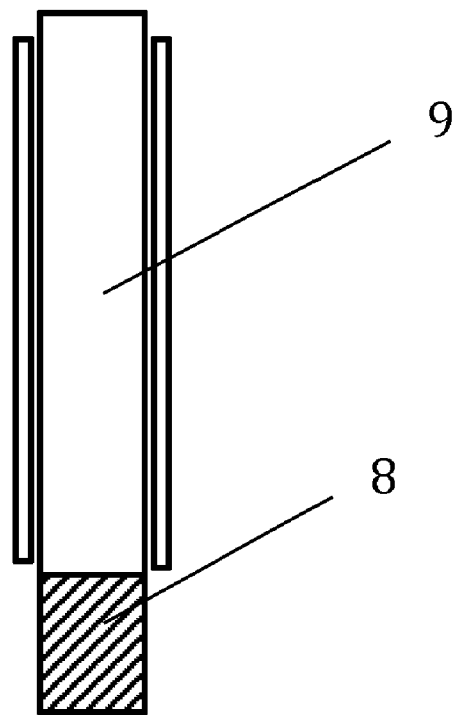


FIGURA 5