

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 804 824**

51 Int. Cl.:

G01T 1/40 (2006.01)

G01T 7/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.03.2012** **PCT/EP2012/054222**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.09.2012** **WO12123392**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.03.2012** **E 12707797 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020** **EP 2686706**

54 Título: **Dispositivo de espectrometría fotónica, procedimiento correspondiente y uso del dispositivo**

30 Prioridad:

14.03.2011 FR 1152071

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
09.02.2021

73 Titular/es:

FRAMATOME (100.0%)
1 Place Jean Millier, Tour Areva
92400 Courbevoie , FR

72 Inventor/es:

BERRUYER, ERIC

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 804 824 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

Dispositivo de espectrometría fotónica, procedimiento correspondiente y uso del dispositivo

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a un dispositivo de espectrometría fotónica, del tipo que comprende al menos un sensor capaz de detectar fotones, al menos una fuente estándar emisora de fotones que tiene una línea espectral de referencia y medios de procesamiento capaces de proporcionar para cada sensor un espectro de mediciones correspondiente a las mediciones por cada sensor de las radiaciones de un producto durante un intervalo de tiempo y de establecer a partir del o de cada espectro de mediciones un espectro neto corregido en función de una
- 10 línea característica medida correspondiente a cada fuente estándar.
- [0002]** La producción o el reciclaje de combustible nuclear da lugar a la producción de coproductos, desechos o efluentes. Debe verificarse que el contenido de material radiactivo de estos coproductos, desechos o efluentes sea aceptable con respecto a los umbrales reglamentarios.
- 15 **[0003]** Por ejemplo, el óxido de uranio ($UxOy$), incluido el dióxido de uranio (UO_2), se utiliza como combustible nuclear. El óxido de uranio se obtiene, por ejemplo, mediante la conversión de hexafluoruro de uranio (UF_6) en óxido de uranio. La conversión se lleva a cabo, por ejemplo, en un horno de circulación a contracorriente de hexafluoruro de uranio en polvo y agua (H_2O). Tal proceso de fabricación se describe en el documento FR2771725.
- 20 **[0004]** Esta conversión genera ácido fluorhídrico (HF) como un coproducto recuperable. Debe verificarse que la concentración de uranio en el ácido fluorhídrico no exceda los umbrales reglamentarios definidos por la autoridad de seguridad nuclear.
- 25 **[0005]** Para hacer esto, es posible tomar muestras regularmente y analizarlas en un laboratorio, por ejemplo, utilizando un espectrómetro de masas, un espectrofotómetro de absorción molecular...
- [0006]** Sin embargo, tales análisis requieren la implementación por parte de personal cualificado de aparatos de laboratorio sofisticados que resultan caros de comprar, mantener y operar. Requieren una duración que puede
- 30 variar de varias decenas de minutos a un día, dependiendo de las preparaciones necesarias y el tipo de medición realizada. Se realizan a intervalos regulares pero espaciados. Estos análisis no son adecuados para vigilar un proceso industrial continuo y en este caso requieren almacenamiento intermedio y procesamiento por lotes en ciertas etapas del proceso industrial.
- 35 **[0007]** El documento EP0256902A2 describe un dispositivo de conteo de rayos gamma que comprende una fuente de referencia.
- [0008]** Glenn F Knoll: "Calibration and linearity of a multichannel analyser" In: "Radiation detection and measurement", Wiley, New York, NY [u.a.], ISBN: El documento 978-0-471-07338-3, páginas 688-690, 26 de enero
- 40 de 2000, describe la calibración de un espectrómetro con fuentes estándar.
- [0009]** El documento US3009062A describe un dispositivo de análisis que comprende un bloque de material de moderación de neutrones provisto de pocillos en los que se disponen las muestras, una fuente de neutrones y detectores de neutrones para contar los neutrones, siendo el número de neutrones que llegan a los detectores una
- 45 función de las muestras.
- [0010]** Un objeto de la invención es proponer un dispositivo de espectrometría fotónica adecuado para monitorizar procesos industriales.
- 50 **[0011]** Para este fin, la invención propone un dispositivo de espectrometría fotónica según la reivindicación 1. Las características opcionales del dispositivo de espectrometría de fotones se definen en las reivindicaciones 2 a 5.
- [0012]** La invención se refiere igualmente a un procedimiento de espectrometría fotónica según la reivindicación 6. Las características opcionales de este procedimiento de espectrometría fotónica se definen en las reivindicaciones
- 55 7 y 8.
- [0013]** La invención se refiere además al uso de un dispositivo de espectrometría fotónica según la reivindicación 9.
- 60 **[0014]** La invención y sus ventajas se comprenderán mejor con la lectura de la siguiente descripción, dada únicamente a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales:
- la figura 1 es una vista esquemática de un dispositivo de espectrometría fotónica según la invención;
 - la figura 2 es una vista esquemática de un espectrómetro fotónica del dispositivo de espectrometría fotónica de
- 65 la figura 1;

- las figuras 3 y 4 son vistas en sección y desde arriba de un conjunto de detección del dispositivo de la figura 1;
- la figura 5 es un diagrama que ilustra un espectro obtenido usando un espectrómetro del dispositivo de espectrometría fotónica de la figura 1;
- las figuras 6 a 8 son vistas esquemáticas de instalaciones de producción o reciclaje de combustible nuclear que incorporan un dispositivo de espectrometría fotónica según la invención.

[0015] El dispositivo de espectrometría fotónica 2 ilustrado en la figura 1 es adecuado para medir la radiación emitida por un producto 4.

10 **[0016]** El dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende varios espectrómetros 6 fotónicos y un módulo electrónico de procesamiento 8, en lo sucesivo "módulo de procesamiento". El dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende un bus 10 de intercambio de datos que conecta el módulo de procesamiento 8 a la salida de cada espectrómetro 6.

15 **[0017]** Cada espectrómetro 6 es capaz de establecer un espectro del número de fotones detectados durante un intervalo de tiempo o intervalo de medición, en función de la energía de los fotones detectados. Cada espectrómetro 6 está diseñado para garantizar la linealidad de su respuesta (espectro de energía) con respecto a la información presentada en su entrada (energía de cada fotón).

20 **[0018]** Cada espectrómetro 6 comprende un único sensor 12 de radiación, un módulo electrónico de detección y cuantificación 14, en adelante "módulo de detección", y un módulo electrónico de análisis 16, en adelante "módulo de análisis", asociados.

25 **[0019]** El sensor 12 puede detectar fotones gamma, también llamados rayos gamma, y/o fotones X, también llamados rayos X, y emitir para cada fotón detectado una señal de salida eléctrica proporcional a la energía del fotón detectado. El sensor 12 es alimentado con energía eléctrica por una fuente de energía eléctrica de alto voltaje 18.

30 **[0020]** El módulo de detección 14 recibe como entrada la señal de salida del sensor 12 asociado y emite como salida una señal digital representativa del valor de la energía de cada fotón detectado por el sensor 12. El módulo de detección 14 es alimentado con energía eléctrica por una fuente de energía eléctrica de bajo voltaje 20.

35 **[0021]** El módulo de análisis 16 es adecuado para contar las señales emitidas por el módulo de detección 14, cada señal correspondiente a un fotón detectado por el sensor 12, y para establecer un espectro de mediciones de la cantidad de fotones detectados por el sensor 12 en función de la energía (keV) para un intervalo de medición.

40 **[0022]** El sensor 12, el módulo de detección 14 y el módulo de análisis 16 están separados y unidos por enlaces de transmisión de datos. El sensor 12 proporciona una señal eléctrica en la salida. La entrada del módulo de detección 14 está conectada a la salida del sensor 12 por un enlace cableado 22. El módulo de detección 14 emite una señal de salida digital óptica. La entrada del módulo de análisis 16 está conectada a la salida del módulo de detección 14 por un enlace óptico 24, típicamente una fibra óptica.

[0023] Los espectrómetros 6 son capaces de operar simultáneamente y de procesar simultáneamente los fotones emitidos por el producto 4.

45 **[0024]** El módulo de procesamiento 8 está conectado a la salida de cada espectrómetro 6 por el bus 10. El módulo de procesamiento 8 está configurado para realizar un procesamiento específico de los espectros de medición adquiridos simultáneamente durante el mismo intervalo de tiempo y establecido por los espectrómetros 6 para poder entregar un espectro global representativo determinado a partir del conjunto de los espectros de medición.

50 **[0025]** El módulo de procesamiento 8 está conectado a una interfaz hombre/máquina 26 para mostrar resultados y/o recibir instrucciones.

55 **[0026]** El módulo de procesamiento 8 está conectado a una unidad de control 28 capaz de usar el resultado proporcionado por el módulo de procesamiento 8 para controlar una instalación 30, por ejemplo, una instalación de producción o reciclaje de combustible nuclear o una instalación de evacuación de efluentes de una planta de producción y/o reciclaje de combustible nuclear.

60 **[0027]** Los espectrómetros 6 son idénticos. Los sensores 12 de los espectrómetros 6 son idénticos, los módulos de detección 14 de los espectrómetros 6 son idénticos y los módulos de análisis 16 de los espectrómetros 6 son idénticos.

[0028] Como se muestra en la figura 2 que ilustra un espectrómetro 6, el sensor 12 de cada espectrómetro 6 es un sensor de centelleo. Comprende un cristal 32 centelleador, por ejemplo un centelleador inorgánico del tipo alcalino de haluro dopado, como por ejemplo NaI(Tl) o del tipo de compuesto mineral como LaBr₃(Ce) y un fotomultiplicador 34 acoplado ópticamente al cristal 32. Cuando un fotón es absorbido por el cristal 32, emite una señal

de luz cuya energía es proporcional a la del fotón absorbido. El fotomultiplicador 34 entrega en la salida una señal eléctrica proporcional a la energía luminosa emitida por el cristal 32.

[0029] Por lo tanto, el sensor 12 entrega, en la salida, una señal eléctrica analógica proporcional a la energía liberada por el fotón en el cristal 32.

[0030] El módulo de detección 14 comprende un convertidor analógico/digital 36 para convertir la señal de entrada analógica en una señal de salida digital.

[0031] El módulo de detección 14 es ajustable para ajustar la señal de salida del módulo de detección 14 en función de la señal de entrada que recibe. Para hacer esto, el módulo de detección 14 incluye un regulador proporcional 38 capaz de aplicar un coeficiente de multiplicación a la señal que recibe. El regulador proporcional 38 es ajustable para poder ajustar el coeficiente de multiplicación.

[0032] Volviendo a la figura 1, el dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende al menos dos fuentes estándar S1, S2 asociadas con la pluralidad de espectrómetros 6. Cada fuente estándar S1, S2 emite un espectro de fotones determinado. Las fuentes estándar S1, S2 emiten espectros de fotones diferentes. Preferiblemente, cada fuente estándar S1, S2 emite un espectro que tiene una línea espectral característica alrededor de una energía de referencia o línea de referencia, y las fuentes estándar S1, S2 tienen una o más líneas de referencia a diferentes energías de referencia.

[0033] Las fuentes estándar S1, S2 están dispuestas para garantizar una irradiación idéntica de cada sensor 12 de cada espectrómetro 6. Por ejemplo, para garantizar una irradiación idéntica, cada fuente estándar S1, S2 está dispuesta equidistante de los sensores 12 de los espectrómetros 6. En otras palabras, los espectrómetros 6 usan al menos dos fuentes estándar S1, S2 comunes.

[0034] Las fuentes estándar S1, S2 están separadas de los espectrómetros 6 y en particular del sensor 12 de cada espectrómetro 6. Por lo tanto, cada espectrómetro 6 está asociado con al menos dos fuentes estándar S1, S2 separadas del sensor 12 de este espectrómetro 6.

[0035] El módulo de procesamiento 8 es adecuado para analizar cada espectro de mediciones individualmente durante un intervalo de medición dado para comparar, para cada espectrómetro 6, la línea espectral característica medida correspondiente a cada fuente estándar S1, S2 con la línea de referencia correspondiente, para calcular las constantes de las funciones afines que se aplicarán para hacer que las líneas espectrales características medidas de las fuentes S1, S2 coincidan con sus líneas de referencia, para aplicar las funciones afines en cualquier punto del campo espectral para reajustar el espectro de mediciones y así determinar un espectro neto correspondiente y finalmente sumar el espectro neto de cada uno de los espectrómetros 6 para obtener el espectro global.

[0036] El reajuste se realiza en energía y/o eficiencia. El reajuste en energía consiste en determinar una función afín para hacer que la energía de la línea espectral característica medida correspondiente a cada fuente estándar S1 y S2 corresponda a la energía de la línea de referencia de cada fuente estándar S1, S2. El reajuste en eficiencia consiste en determinar una función afín para hacer corresponder el número de fotones detectados de la línea espectral característica medida correspondiente a cada fuente estándar S1 y S2 al número esperado de fotones, correspondiente a la eficiencia de detección inicial del sensor 12 del espectrómetro 6 en cuestión durante el intervalo de medición.

[0037] El módulo de procesamiento 8 que recibe los espectros de medición y/o el módulo de análisis 16 que establece los espectros de las mediciones es/ son ventajosamente capaces de almacenarlos al menos temporalmente. Esto permite consultar los espectros de las mediciones, por ejemplo para fines de calificación o control o en caso de anomalía o incidente operativo.

[0038] Los medios de procesamiento están formados por el módulo de procesamiento 8 adecuado para determinar un espectro neto de cada uno de los espectros de medición suministrados por los espectrómetros 6 y para determinar un espectro global resultante de la suma de los espectros netos.

[0039] En una variante, el módulo de análisis 16 de cada espectrómetro 6 es capaz de establecer el espectro de mediciones y llevar a cabo su procesamiento para determinar el espectro neto correspondiente. En este caso, los medios de procesamiento están formados por el módulo de análisis 16 de cada espectrómetro 6 y por el módulo de procesamiento 8 que recibe los espectros netos determinados por los módulos de análisis 16 y realiza su suma para obtener el espectro global.

[0040] Como se ilustra en las figuras 3 y 4, los sensores 12 se distribuyen regularmente a lo largo de un círculo de sensores C1 imaginario centrado en un eje de simetría A. Como se ilustra en la figura 4, los sensores 12 son 8 y están distribuidos alrededor del eje A, con el mismo valor métrico de radio y siguiendo un paso angular regular igual a 45°.

[0041] Las fuentes estándar S1, S2 están dispuestas en el centro del círculo de sensores C1. Por lo tanto, cada fuente estándar S1, S2 es equidistante de los sensores 12. Como resultado, cada sensor 12 recibe estadísticamente sustancialmente la misma cantidad de fotones de las fuentes estándar S1, S2, durante el mismo intervalo de medición.

5 **[0042]** El dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende un recipiente 40 para la circulación del producto 4 que se desea controlar, que tiene una simetría de revolución alrededor del eje de simetría A. Como resultado, cada sensor 12 recibe estadísticamente sustancialmente la misma cantidad de fotones del producto 4 presente en el recipiente 40.

10 **[0043]** Los sensores 12 están dispuestos en el recipiente 40 de manera que el espacio para recibir el producto 4 en el recipiente 40 se encuentra entre los sensores 12 y alrededor de los sensores 12. Esto asegura una buena irradiación de los sensores 12 por los fotones emitidos por el producto 4.

[0044] Como se ilustra en las figuras 3 y 4, el recipiente 40 comprende un tanque 42 de sección circular que se extiende a lo largo del eje de simetría A y una cubierta 44 de contorno circular que cierra, herméticamente si es necesario, el tanque 42.

[0045] La cubierta 44 es de forma generalmente circular. La cubierta 44 comprende al menos un dispositivo de llenado 48 dispuesto cerca del centro de la cubierta 44 coincidiendo con el eje A y asegurando un llenado rápido del
20 recipiente 40 y al menos un dispositivo de vertido 46 colocado en la periferia de la cubierta 44 y asegurando la evacuación del desbordamiento del recipiente 40. Como se ilustra en las figuras 3 y 4, cuando están presentes varios dispositivos de llenado 48, los dispositivos de llenado 48 están separados y regularmente distribuidos en un círculo centrado en el eje A. Según la configuración de la instalación 30, el dispositivo de llenado 48 también se puede disponer en una cara lateral o en la parte inferior del tanque 42.

25 **[0046]** El tanque 42 comprende al menos un dispositivo de vaciado 56 que se alimenta en el punto más bajo del tanque 42 y asegura el vaciado del recipiente 40 controlado por la válvula de evacuación 58. Como se ilustra en la figura 3, el tanque 42 comprende un dispositivo de vaciado 56 que se alimenta en el centro del fondo del tanque 42.

30 **[0047]** La cubierta 44 comprende una pluralidad de células de sensor 50 que se proyectan hacia el interior del recipiente 40 y se abren hacia el exterior del recipiente 40. Cada célula de sensor 50 define en la cubierta 44 un alojamiento para recibir un sensor 12. Las células de sensor 50 están dispuestas a lo largo del círculo de sensores C1. Las células de sensor 50 están distribuidas angularmente de manera regular alrededor del eje A.

35 **[0048]** La cubierta 44 comprende una pluralidad de dispositivos de retención 52 del módulo de detección 14 abiertos hacia el exterior del recipiente 40. Cada dispositivo de retención 52 proyecta desde el exterior de la cubierta 44 un alojamiento para recibir un módulo de detección 14. Los dispositivos de retención 52 están dispuestos en un círculo de módulos de detección C2 imaginario centrado en el eje A. Los dispositivos de retención 52 están distribuidos angularmente de manera regular alrededor del eje A.

40 **[0049]** La cubierta 44 comprende una célula de fuente estándar 54 centrada en el eje A. La célula de fuente estándar 54 está dispuesta entre los dispositivos de llenado 48. Las fuentes estándar S1, S2 están dispuestas en la célula de fuente estándar 54. Cada fuente estándar S1, S2 está ubicada en el centro del círculo de sensores C1 a lo largo del cual están dispuestos los sensores 12.

45 **[0050]** El recipiente 40 se coloca cerca de una instalación 30. El conjunto de detección formado por el recipiente 40 de medición, los sensores 12 y sus módulos de detección 14 asociados se suministran con el producto 4 que se va a controlar, por una vía directa o por una vía derivada (vía paralela) de la instalación 30.

50 **[0051]** El recipiente 40 se coloca, por ejemplo, en la salida de un horno para producir uranio y ácido fluorhídrico, en una salida de ácido fluorhídrico líquido, en una habitación cerrada.

[0052] Los módulos de detección 14 dispuestos cerca de los sensores 12 permiten utilizar conexiones cableadas 22 cortas entre los módulos de detección 14 y los sensores 12, para maximizar la relación señal/ruido
55 durante la detección.

[0053] Los módulos de análisis 16 asociados con los módulos de detección 14 y con los sensores 12 pueden colocarse fuera de la habitación cerrada. El enlace óptico 24 por fibra óptica asegura la transmisión de datos a una velocidad alta y confiable a largas distancias, por ejemplo, varias decenas de metros.

60 **[0054]** En funcionamiento, durante un intervalo de tiempo determinado, los espectrómetros 6 miden simultáneamente los fotones emitidos por el producto 4 presente en el recipiente 40 de medición. Cada espectrómetro 6 proporciona un espectro de mediciones. Después del reajuste individual de cada espectro de mediciones para determinar un espectro neto, el módulo de procesamiento 8 agrega los espectros netos para determinar un espectro
65 global resultante de la suma de los espectros netos. Desde el espectro global, el módulo de procesamiento 8 determina

una o más mediciones, por ejemplo, una concentración de uranio 235 en el producto 4.

[0055] El dispositivo de espectrometría fotónica 2 permite reemplazar una medición realizada por un aparato de laboratorio en una muestra del producto 4 durante un período de tiempo T, por n mediciones simultáneas ($n > 1$) en el producto 4 en la salida de la instalación 30, realizadas por varios espectrómetros 6 al tiempo que garantiza un resultado de la misma precisión estadística adquirido en una duración más corta, que puede, por ejemplo, reducirse a T/n .

[0056] El dispositivo de espectrometría fotónica 2 permite realizar mediciones satisfactorias en un intervalo de medición de unos pocos minutos, por ejemplo de 1 a 5 minutos, mientras que las técnicas convencionales de muestreo y análisis con equipos de laboratorio requieren varias decenas de minutos o incluso varias horas y, según el producto que se quiere muestrear, la intervención humana en un entorno potencialmente peligroso como un área cerrada.

[0057] El dispositivo de espectrometría fotónica 2 permite, por lo tanto, realizar mediciones muy rápidamente, durante un intervalo de medición compatible con la supervisión de un proceso industrial o el control de un proceso industrial.

[0058] Sin embargo, la espectrometría es una medida de tipo estadística. Todos los fotones emitidos por el producto 4 durante el intervalo de medición no se detectan necesariamente. Cada sensor 12 detecta solo una parte de los fotones que llegan al sensor 12.

[0059] El principio de la adición de las mediciones suministradas por diferentes espectrómetros 6 solo puede considerarse justificado físicamente si el dispositivo de espectrometría fotónica 2 verifica el principio de ergodicidad.

[0060] Esto significa en la práctica que las diferentes vías de medición de la misma cantidad deben poder considerarse idénticas o sustancialmente idénticas para proporcionar resultados idénticos o suficientemente idénticos en las mismas condiciones de medición.

[0061] Para satisfacer esta condición o al menos acercarse lo suficiente, el dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende varios espectrómetros 6 idénticos.

[0062] En la práctica, debido a las inevitables tolerancias de fabricación, los sensores 12, aunque son idénticos, tienen una dispersión y, en las mismas condiciones, proporcionan mediciones diferentes.

[0063] El valor de las señales suministradas por un sensor 12 también depende de su suministro de alto voltaje. Incluso un pequeño cambio en el valor relativo del voltaje de esta fuente de alimentación de alto voltaje cambia significativamente el valor de las señales suministradas. Ajustar este voltaje individualmente para cada sensor 12 teóricamente podría permitir la calibración de los sensores 12, pero este ajuste individual requiere una fuente de energía eléctrica de alto voltaje 18 específica por sensor 12 y no industrial debido al mantenimiento importante que implica. Para cumplir con las limitaciones de un proceso industrial, es preferible mantener un único valor de alto voltaje, que opcionalmente permite el uso de una sola fuente de energía eléctrica de alto voltaje 18 para todos los sensores 12. Al recibir todos los sensores 12 el mismo valor de alto voltaje, las señales entregadas serán diferentes debido a las diferencias en ganancia y eficiencia de detección de cada sensor 12.

[0064] Según un aspecto de la invención, el sensor 12 de cada espectrómetro 6 está acoplado al módulo de detección 14 asociado de este espectrómetro 6. El sensor 12 y el módulo de detección 14 asociado se calibran conjuntamente.

[0065] Según una realización, el módulo de detección 14 de cada espectrómetro 6 se ajusta inicialmente para que las señales suministradas por los diferentes pares de sensor 12/módulo de detección 14 sean idénticas y lineales o sustancialmente idénticas y lineales en las mismas condiciones de medición.

[0066] Ventajosamente, cada par de sensor 12/módulo de detección 14 se regula ajustando la ganancia del fotomultiplicador 34 acoplado al cristal 32 del sensor 12 y a continuación ajustando el módulo de detección 14, por ejemplo ajustando el regulador proporcional 38 del módulo de detección 14.

[0067] Por lo tanto, según la invención, el ajuste se realiza en cada par de sensor 12/módulo de detección 14, y no en cada sensor 12. Esto permite tener en cuenta la dispersión entre los sensores 12 y entre los módulos de detección 14 y garantizar que cada espectrómetro 6 proporcione sustancialmente el mismo espectro neto en presencia de la misma fuente de radiación.

[0068] El ajuste inicial de cada espectrómetro 6 se lleva a cabo, por ejemplo, en presencia de al menos una fuente estándar S1, S2. El regulador proporcional 38 del módulo de detección 14 se ajusta de modo que las señales de salida suministradas por el módulo de detección 14 corresponden a los valores esperados en presencia de la fuente estándar S1, S2.

[0069] Como resultado, cada sensor 12 y el módulo de detección 14 asociado con este último forman un par inseparable. Dos módulos de detección 14 no pueden intercambiarse sin invertir los dos sensores asociados 12 y un sensor 12 no puede reemplazarse sin asociar con él su propio módulo de detección 14.

[0070] Los sensores 12 son alimentados por el mismo valor de alto voltaje y son alimentados ventajosamente por la misma fuente de energía eléctrica de alto voltaje 18. Esto simplifica el suministro de los sensores 12 y las operaciones de mantenimiento. Por otras razones, como el principio de redundancia implementado en instalaciones nucleares, como se ilustra en la figura 1, es posible proporcionar una fuente de energía eléctrica de alto voltaje 18 común a, por ejemplo, dos sensores 12. En la figura 1, los espectrómetros 6 están agrupados en pares, los dos sensores 12 de los espectrómetros 6 de cada grupo son alimentados por la misma fuente de energía eléctrica de alto voltaje 18.

[0071] Cada sensor 12 puede tener una desviación con el tiempo y los sensores 12 pueden tener diferentes desviaciones.

[0072] Según un aspecto de la invención, el dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende al menos dos fuentes estándar S1, S2 comunes a los diferentes espectrómetros 6 para la corrección de la desviación de los sensores 12. Los sensores 12 están dispuestos simétricamente alrededor de cada fuente estándar S1, S2. Por lo tanto, la corrección de la desviación de los sensores 12 se realiza desde la misma fuente estándar S1, S2, que es una garantía adicional para el respeto del principio de ergodicidad.

[0073] La desviación de cada sensor 12 se corrige restableciendo cada espectro de medición en función de la línea espectral característica medida correspondiente a cada fuente estándar S1, S2 y de la línea de referencia de cada fuente estándar S1, S2 para determinar un espectro neto de radiación emitida por el producto 4 y cada fuente estándar S1, S2.

[0074] Según un aspecto de la invención, el dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende al menos una fuente estándar S1 que tiene una energía de referencia mayor que la de un elemento que se va a detectar.

[0075] El isótopo 235 de uranio exhibe, entre otras cosas, una emisión característica de fotones gamma conforme al valor de 185,7 keV. Un dispositivo de espectrometría fotónica 2 adecuado para detectar el isótopo 235 de uranio comprende, por ejemplo, una fuente estándar de cesio 137 que tiene una emisión de fotones gamma referencia característica conforme al valor de 662 keV cuya influencia en las cuentas para la energía 185,7 keV, es decir, los resultados del recuento durante el intervalo de medición proporcionado por el módulo de análisis 16, se hace fácilmente insignificante.

[0076] Al garantizar que cada canal espectrométrico tenga una característica de linealidad de respuesta, es posible corregir el espectro de mediciones en función de la diferencia entre el valor medido para una fuente estándar y el valor de referencia de la fuente estándar. Un error —en valor relativo— de X% en la medición del valor de referencia de la fuente estándar conduce a una corrección —en valor relativo— de X% de todos los valores medidos.

[0077] Como resultado, una pequeña desviación de la medición en valor absoluto sobre la energía de referencia de una fuente estándar conduce a una mayor corrección en valor absoluto en todas las mediciones de energías superiores a la de la fuente estándar y una menor corrección en valor absoluto en todas las mediciones de energías inferiores a la de la fuente estándar. Esto significa que para una incertidumbre de medición dada, la incertidumbre es más alta para todas las mediciones de energía más altas que la de la fuente estándar y es más baja para todas las mediciones de energía más bajas que la de la fuente estándar.

[0078] La elección de una fuente de energía estándar superior a la del elemento a detectar permite así reducir al mínimo las incertidumbres de medición en valor absoluto en las gamas de energía correspondientes a la del elemento a detectar.

[0079] Según un aspecto de la invención, el dispositivo de espectrometría fotónica 2 comprende dos fuentes estándar S1 y S2 que tienen líneas espectrales características cuyas energías de referencia son diferentes.

[0080] Preferentemente, las energías de referencia de las fuentes estándar S1 y S2 se eligen de manera que presenten una energía de emisión que se sitúa para una de ellas en uno de los dos extremos de la banda de análisis espectral de energía de un espectrómetro 6 y para la otra en el otro extremo de la banda de análisis espectral de energía del mismo espectrómetro.

6. Así, con dos fuentes que proporcionan dos energías diferentes, tan separadas como sea posible en el intervalo espectral de análisis, la corrección es óptima para todos los fotones detectables en esta banda de energía de análisis.

[0081] El isótopo 235 de uranio exhibe, entre otras cosas, una emisión característica de fotones gamma

conforme al valor de 185,7 keV. Un dispositivo de espectrometría fotónica 2 adecuado para detectar uranio 235 comprende, por ejemplo, una fuente estándar de americio 241 que tiene una energía de referencia de 59,5 keV y, por lo tanto, una línea de referencia en el espectro de energía alrededor de la abscisa 60 keV y una fuente estándar de cesio 137 que tiene una energía de referencia de 662 keV y, por lo tanto, una línea de referencia en el espectro de energía alrededor de la abscisa 662 keV.

[0082] La figura 5 ilustra un ejemplo de un espectro que se puede obtener en presencia de una fuente estándar de americio 241, de una fuente estándar de cesio 137 y de una muestra que contiene uranio 235. La abscisa representa la energía en keV de los fotones recibidos y la ordenada el número de fotones detectados.

[0083] La corrección de la desviación se lleva a cabo corrigiendo cada espectro de medición en función de la línea espectral característica medida y de la línea de referencia de cada fuente estándar S1, S2, lo que garantiza una corrección más precisa.

[0084] Las funciones afines de reajuste se determinan de manera que las líneas características medidas de las fuentes estándar S1, S2 utilizadas coincidan, en energía y en recuento, con las líneas de referencia respectivas de las fuentes estándar S1, S2 y a continuación se apliquen a cada punto del espectro de mediciones.

[0085] La mayoría de los sensores de fotones incluyen una fuente estándar, por ejemplo, americio 241, colocada en el sensor, sellada o incluso sellada con cristal durante su fabricación. Según la legislación sobre fuentes selladas, las fuentes estándar tienen una vida regulatoria limitada. La fuente y, por lo tanto, el sensor debe destruirse al final de la vida útil reglamentaria, independientemente de la condición del sensor, lo que limita la vida útil del sensor. Del mismo modo, si un sensor es defectuoso, el sensor completo se reemplaza y la fuente estándar se destruye con el sensor.

[0086] El uso de una fuente estándar asociada a un sensor pero físicamente separada del sensor permite limitar el costo de funcionamiento del conjunto limitando el costo de sustitución de un sensor y haciendo posible mantener el sensor aunque la fuente estándar tenga que ser sustituida y viceversa. Esto también permite el uso de la misma fuente estándar para varios sensores, lo que no solo limita el costo del conjunto de medidas, sino que también garantiza una mejor adecuación a la limitación de la ergodicidad de un dispositivo que utiliza varios sensores simultáneamente.

[0087] En una realización, se determina al menos una función de reajuste para el reajuste de los espectros de mediciones de un espectrómetro 6 para cada espectro de mediciones proporcionado por el espectrómetro 6. Alternativamente, se determina por lo menos una función de reajuste para reajustar los espectros de mediciones de un espectrómetro 6 a partir de al menos un espectro de medición de referencia del espectrómetro 6 para hacer coincidir una línea espectral característica del espectro de mediciones de referencia, para cada fuente normalizada S1, S2, con la línea espectral de referencia de esta fuente normalizada S1, S2. La función de reajuste o cada función de reajuste se usa para reajustar varios espectros de mediciones sucesivos del espectrómetro 6. La función de reajuste o cada función de reajuste se determina periódicamente con una periodicidad que depende de la estabilidad del espectrómetro 6. La periodicidad puede ser del día, la semana o más.

[0088] Las figuras 6 a 8 ilustran esquemáticamente las instalaciones industriales 30 que utilizan un dispositivo de espectrometría fotónica 2 según la invención para controlar el contenido de radioisótopos de coproductos y de efluentes de descarga.

[0089] En la figura 6 se ilustra una instalación de conversión de hexafluoruro de uranio en óxido de uranio que comprende un horno 60 que recibe, entre otras cosas, hexafluoruro de uranio UF_6 y agua H_2O que fluye en contracorriente a través del horno 60 en la entrada, y que proporciona óxido de uranio U_xO_y como producto y ácido fluorhídrico HF como coproducto en la salida.

[0090] Como se ilustra, el recipiente 40 del dispositivo de espectrometría fotónica 2 se coloca en serie en una salida de ácido fluorhídrico después de la condensación en HF líquido a fin de verificar que el contenido de uranio 235 en el ácido fluorhídrico está por debajo de los umbrales reglamentarios.

[0091] La figura 7 ilustra una instalación de reciclaje de material radiactivo que comprende un reactor 62 que recibe en la entrada residuos que contienen material radioactivo WMF y reactivos R capaces de precipitar el material radiactivo y que suministra a la salida material radiactivo reciclado RMF y efluentes E.

[0092] Como se ilustra, el recipiente 40 del dispositivo de espectrometría fotónica 2 está dispuesto en paralelo en una salida de efluentes E para comprobar que el contenido de radioisótopos, por ejemplo ciertos radioisótopos de torio, uranio 235, plomo 212, ..., u otras impurezas radiactivas resultantes, por ejemplo, del uso de uranio procedente del procesamiento de combustible irradiado, conocido como uranio de reprocesamiento, plutonio, ... está por debajo de los umbrales reglamentarios.

[0093] La instalación de reciclaje comprende una línea de recirculación 64 que se extiende entre la salida del

recipiente 40 de medición del dispositivo de espectrometría fotónica 2 y la entrada de desechos WMF, de modo que los efluentes E se reciclan siempre que tengan un contenido de uno o más radioisótopos demasiado alto.

5 [0094] La figura 8 ilustra un conjunto de tratamiento de materiales radiactivos 66 que comprende varias instalaciones 68 de tratamiento de materiales radiactivos que producen efluentes E, recogidos en un circuito de descarga con vistas a su descarga.

10 [0095] El dispositivo de espectrometría fotónica 2 se coloca en el circuito de descarga para verificar que los efluentes E recogidos tienen un contenido de radioisótopos según los umbrales reglamentarios de descarga.

[0096] El dispositivo de espectrometría fotónica 2 está instalado en una tubería principal 70 para realizar las mediciones en todos los efluentes E o en una tubería de derivación para realizar las mediciones en una fracción de los efluentes E recogidos.

15 [0097] Es posible utilizar el dispositivo de espectrometría fotónica 2 para determinar el origen de la contaminación de los efluentes por material radiactivo. De hecho, dependiendo del proceso industrial que causa, por ejemplo, la contaminación de uranio, los elementos químicos característicos del procedimiento utilizado pueden estar asociados con el uranio. Por ejemplo, la presencia de plomo 212 en combinación con uranio 235 es un signo de contaminación de una instalación que utiliza uranio reprocesado.

20 [0098] Así, según un aspecto de la invención, el módulo de procesamiento 8 del dispositivo de espectrometría fotónica 2 está configurado para determinar a partir del espectro global la presencia de radioisótopos además, por ejemplo, de uranio 235.

25 [0099] En general, la elección de la implementación del dispositivo de espectrometría fotónica 2 en serie o en derivación en una salida del producto 4 a controlar depende de la instalación 30 y del caudal del producto en la línea de salida.

30 [0100] Según una opción, el módulo de procesamiento 8 comprende una memoria en la que se almacenan los espectros de referencia característicos de ciertos tipos de contaminación, y está configurado para, por ejemplo, emitir una alerta o activar el cierre de la instalación 30 en caso de correspondencia de un espectro neto con un espectro de referencia pregrabado.

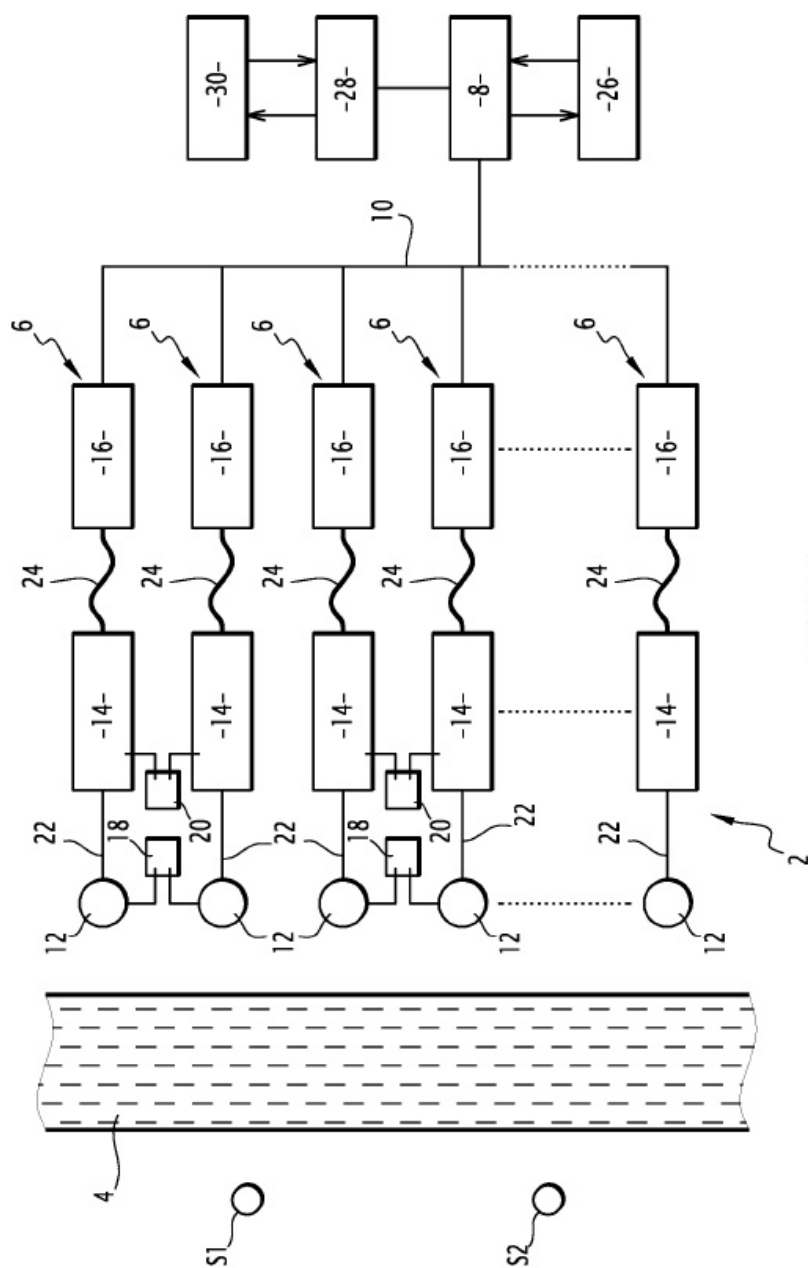
35 [0101] Gracias a la invención, es posible realizar mediciones rápidas de radiación gamma y/o X compatibles con la vigilancia o el control de procesos industriales. El dispositivo de espectrometría fotónica se puede producir a partir de elementos comerciales y se puede colocar *in situ* cerca o en una instalación para controlar los productos suministrados por esta instalación y/o controlar la instalación.

40 [0102] La invención se aplica en particular a la medición del contenido de uranio 235 al final de un proceso de fabricación de combustible nuclear a base de uranio o de un proceso de reciclaje de uranio. En general, la invención se aplica a la medición del contenido de cualquier elemento radiactivo.

[0103] La invención se aplica a la medición de cualquier radiación gamma o X. Los espectrómetros de la invención son espectrómetros fotónicos gamma y/o X según el centelleador utilizado.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de espectrometría fotónica (2), que comprende varios sensores (12) idénticos, siendo cada sensor (12) capaz de detectar fotones, y al menos dos fuentes estándar (S1, S2) que emiten fotones con diferentes líneas espectrales de referencia, recibiendo cada sensor (12) estadística y sustancialmente la misma cantidad de fotones de cada fuente estándar (S1, S2) durante el mismo intervalo de tiempo, y medios de procesamiento (8, 16) capaces de proporcionar para cada sensor (12) un espectro de mediciones correspondiente a las mediciones realizadas por el sensor (12) de las radiaciones de un producto (4) y de cada fuente estándar (S1, S2) durante un intervalo de tiempo y para establecer un espectro neto a partir de cada espectro de mediciones, reajustando cada espectro de mediciones para hacer coincidir, para cada fuente estándar (S1, S2), una línea espectral característica medida por cada sensor (12) con la línea espectral de referencia de esta fuente estándar (S1, S2).
2. Dispositivo de espectrometría fotónica según la reivindicación 1, en el que los medios de procesamiento (8, 16) son capaces de establecer cada espectro neto mediante el reajuste del o de cada espectro de mediciones mediante al menos una función afín de reajuste determinada de manera que una línea espectral característica medida por el sensor (12) coincida, para cada fuente estándar (S1, S2), con la línea espectral de referencia de esta fuente estándar (S1, S2).
3. Dispositivo de espectrometría fotónica según la reivindicación 1, en el que las fuentes estándar (S1, S2) están dispuestas fuera del o de cada sensor (12).
4. Dispositivo de espectrometría fotónica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende un recipiente (40) de medición para la circulación de un fluido dentro del recipiente (40), que comprende un alojamiento para recibir cada fuente estándar (S1, S2) fuera del recipiente (40) y un alojamiento respectivo para recibir cada sensor (12).
5. Dispositivo de espectrometría fotónica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende dos fuentes estándar (S1, S2) que tienen líneas espectrales de referencia que enmarcan una línea espectral característica de un elemento que detectar, en particular uranio 235.
6. Procedimiento de espectrometría fotónica que comprende las siguientes etapas:
 - establecer espectros de mediciones a partir de señales de medición suministradas por varios sensores (12) sensibles a los fotones en presencia de un producto (4) que emite radiación y al menos dos fuentes estándar (S1, S2) que tienen líneas espectrales de referencia diferentes, estableciéndose un espectro de mediciones respectivo para cada sensor (12), en el que cada sensor (12) recibe estadística y sustancialmente la misma cantidad de fotones de cada fuente estándar (S1, S2) para el mismo intervalo de tiempo;
 - establecer un espectro neto de cada espectro de mediciones reajustando el espectro de mediciones mediante al menos una función de reajuste determinada para hacer coincidir, para cada fuente estándar (S1, S2), una línea espectral característica medida por el sensor (12) y con la línea espectral de referencia de esta fuente estándar (S1, S2).
7. Procedimiento de espectrometría fotónica según la reivindicación 6, en el que la radiación se mide en presencia de dos fuentes estándar (S1, S2), y cada espectro neto se establece reajustando un espectro de mediciones por al menos una función afín, dependiendo del reajuste de cada fuente estándar (S1, S2).
8. Procedimiento de espectrometría fotónica según la reivindicación 6 o la reivindicación 7, en el que se establece un espectro global como la suma de los espectros netos obtenidos mediante el reajuste de los espectros de mediciones establecidos mediante mediciones simultáneas de un mismo producto (4) que emite radiación durante el mismo intervalo de tiempo por estos sensores idénticos (12).
9. Uso de un dispositivo de espectrometría fotónica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5 para medir el contenido de uranio del ácido fluorhídrico resultante de la fabricación de óxido de uranio, para medir el contenido de por lo menos un radioisótopo en el efluente de una planta de reciclado de materiales radiactivos o para medir el contenido de por lo menos un radioisótopo en el efluente de una planta de procesamiento de materiales radiactivos antes de la descarga.



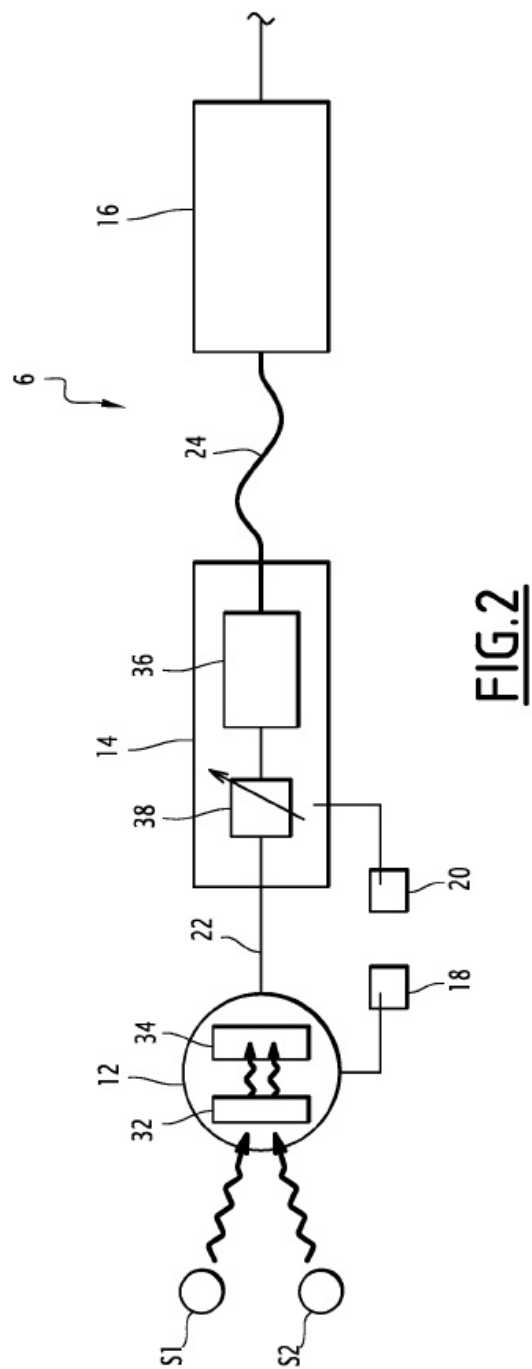


FIG. 2

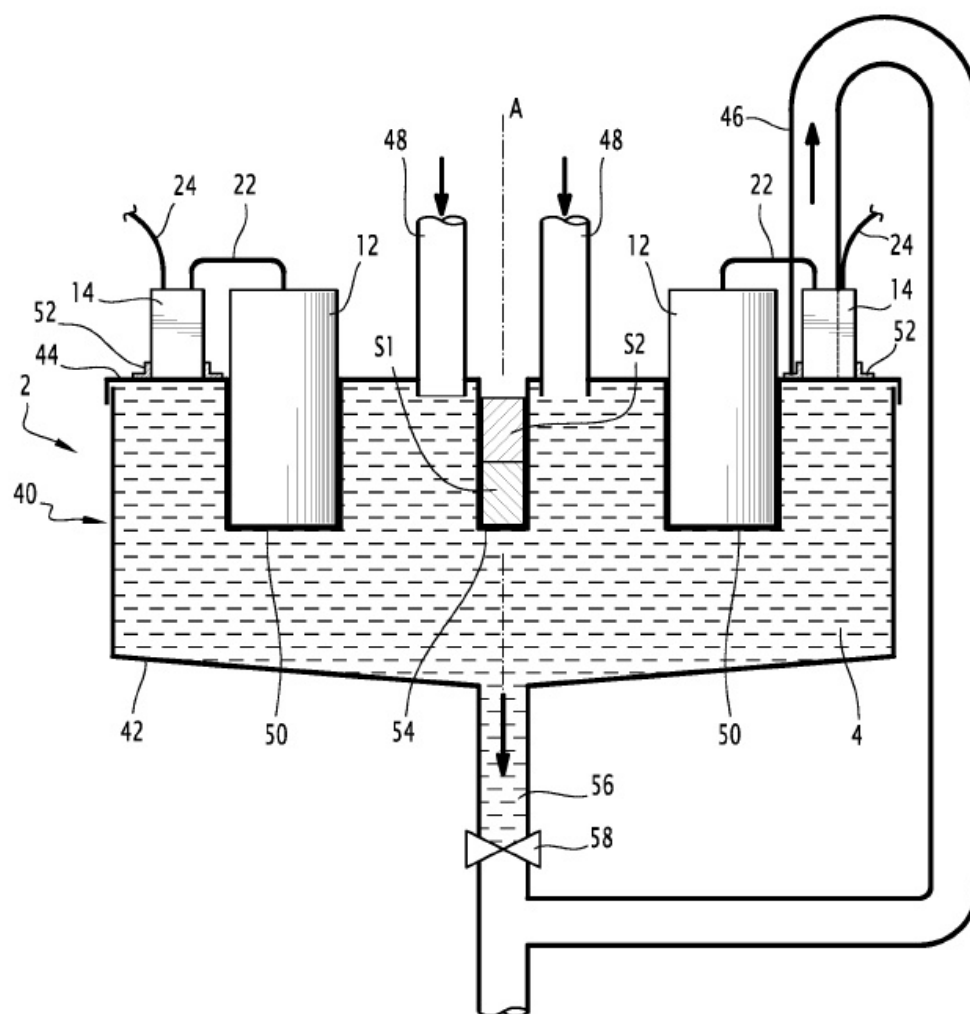


FIG.3

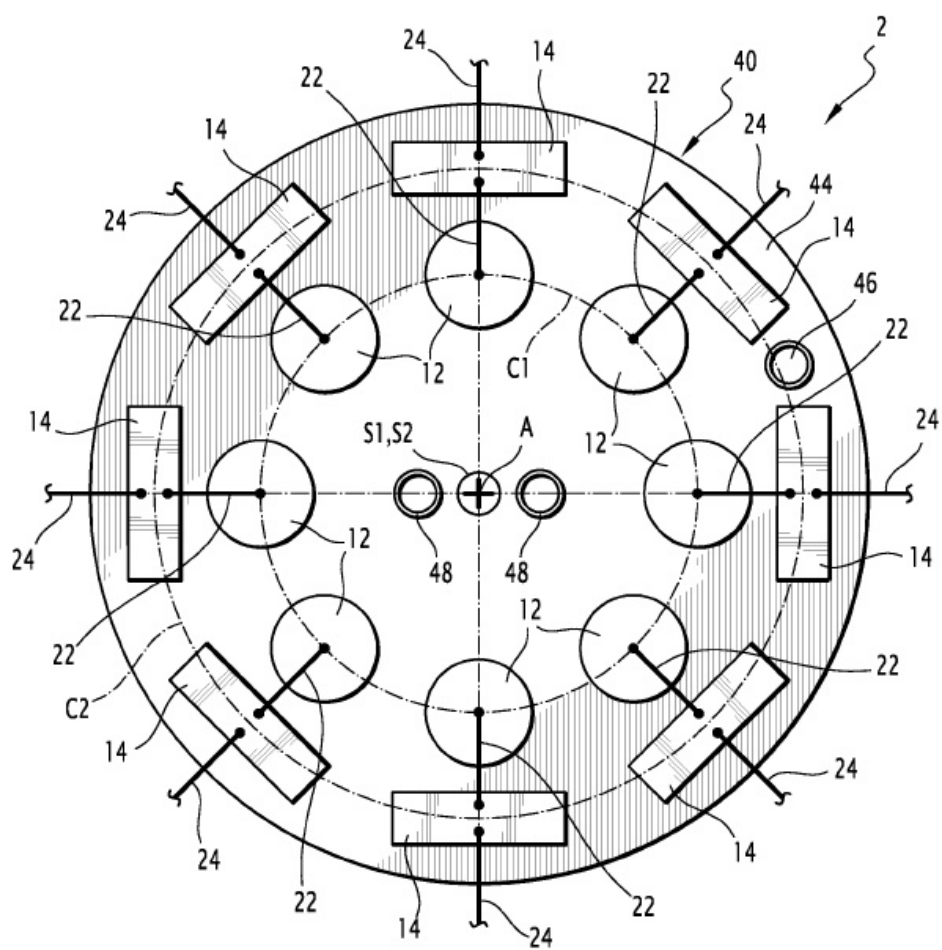


FIG. 4

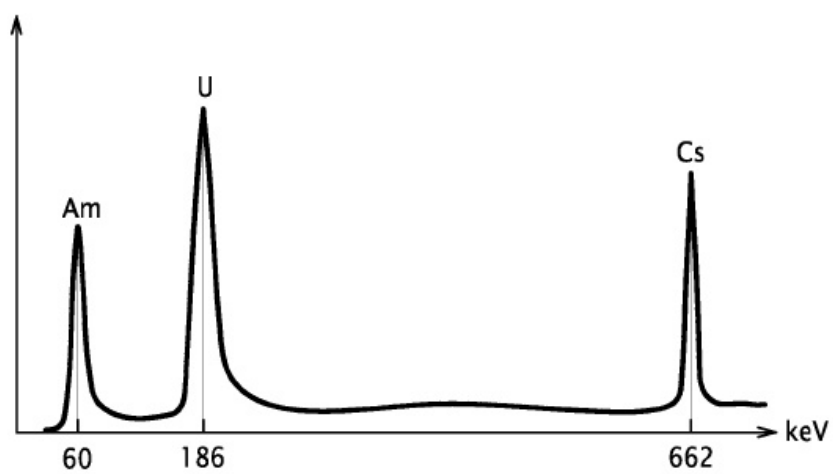


FIG.5

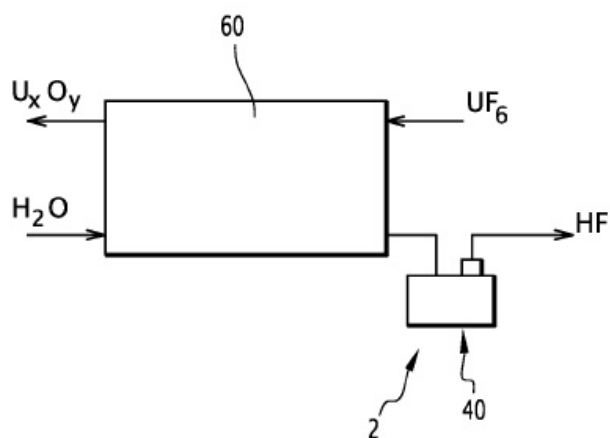


FIG.6

