

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 886 217**

51 Int. Cl.:

G21C 17/108 (2006.01)

G21C 13/02 (2006.01)

G21C 17/116 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.07.2018 PCT/EP2018/068944**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.01.2019 WO19012044**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.07.2018 E 18737301 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.08.2021 EP 3652753**

54 Título: **Reactor nuclear con detectores neutrónicos internos a la vasija y externos al núcleo y procedimiento de control correspondiente**

30 Prioridad:

12.07.2017 FR 1756619

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

16.12.2021

73 Titular/es:

**SOCIÉTÉ TECHNIQUE POUR L'ENERGIE
ATOMIQUE (100.0%)**

**Route de Saint-Aubin, Lieudit Les Hautes Rives
91190 Villiers Le Bacle, FR**

72 Inventor/es:

**BRUN, MICHEL y
SPYCKERELLE, SANDRINE**

74 Agente/Representante:

PONTI & PARTNERS, S.L.P.

ES 2 886 217 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

Reactor nuclear con detectores neutrónicos internos a la vasija y externos al núcleo y procedimiento de control correspondiente

5

[0001] La invención se refiere en general a sistemas de control y protección de reactores nucleares, habitualmente denominados Instrumentación y Control (I&C).

10 **[0002]** Más específicamente, según un primer aspecto, la invención se refiere a un reactor nuclear equipado con tal sistema de control y protección.

15 **[0003]** Los sistemas de control y protección típicamente incluyen un dispositivo de medición continua del flujo neutrónico emitido por el núcleo. Este dispositivo mide continuamente el flujo neutrónico, tanto en la puesta en marcha del reactor como durante su funcionamiento normal, en términos de potencia.

[0004] El sistema de control y protección asegura la protección del reactor, basándose, entre otras cosas, en la información proporcionada por el dispositivo de medición del flujo neutrónico. El sistema debe realizar mediciones en tiempo real en todo el intervalo de potencia del reactor, desde el nivel de origen hasta la potencia máxima.

20 **[0005]** Por lo tanto, es muy importante que esto último proporcione mediciones neutrónicas con una constante de tiempo corta, que va desde unas pocas decenas de segundos hasta una fracción de segundo, compatible con el rendimiento requerido para la función de protección.

25 **[0006]** Los detectores neutrónicos del dispositivo de medición continua del flujo neutrónico se disponen generalmente en el exterior de la vasija del reactor. La tasa de recuento de estos detectores depende de:

- la sensibilidad del detector, que está limitada para las tecnologías disponibles a un valor de aproximadamente 0,1 a 40 cp/(n/cm²·s);

30 - el flujo residual en el exterior de la vasija, que a su vez depende por un lado de la actividad residual del núcleo cuando se detiene y por otro lado de la geometría del reactor.

[0007] La tasa de recuento afecta directamente a la constante de tiempo de respuesta del sistema de control y protección.

35 **[0008]** En los reactores nucleares que disponen de un núcleo pequeño como, por ejemplo, el SMR (reactor modular pequeño, por sus siglas en inglés), puede suceder que los niveles de recuento pueden ser demasiado bajos para garantizar un tiempo de respuesta suficientemente rápido con respecto a los accidentes que pueden ocurrir al arrancar el reactor.

40 **[0009]** Una primera posibilidad es realizar desarrollos tecnológicos que permitan mejorar la sensibilidad de los detectores neutrónicos. Esta sensibilidad se puede aumentar asociando en paralelo un gran número de celdas detectoras unitarias. Sin embargo, esta solución se enfrenta a limitaciones tecnológicas, particularmente el efecto de sombra entre las diferentes celdas. Además, conduce a un aumento significativo en el coste de los detectores.

45 **[0010]** Otra solución sería establecer una ruta de neutrones con baja atenuación. Una solución de este tipo se describe, por ejemplo, en el documento WO 2015/099855. Esta solución tiene el defecto de crear localmente una discontinuidad en la protección radiológica de la vasija y la instalación.

50 **[0011]** Además, las denominadas cadenas neutrónicas "internas al núcleo", cuya función es realizar mapas periódicos del flujo neutrónico en el núcleo, no pueden utilizarse para realizar las mediciones neutrónicas necesarias para el sistema de control y protección del reactor nuclear. Las denominadas cadenas internas al núcleo no cubren todo el rango y/o no son mediciones en tiempo real. Además, los detectores de las cadenas internas al núcleo no están posicionados permanentemente en el núcleo y deben retirarse para que no se gasten demasiado rápido por la fluencia del núcleo.

55

[0012] Los documentos JP2008175732A y JPH04232497A describen reactores nucleares con un detector neutrónico dispuesto en la capa de agua primaria que separa el núcleo de la vasija.

60 **[0013]** En este contexto, la invención pretende proponer un reactor nuclear cuyo dispositivo de medición continua del flujo neutrónico no tenga los defectos anteriores. Para este fin, la invención se refiere a un reactor nuclear que comprende:

- una vasija que tiene un eje central;

- un núcleo dispuesto en la vasija, comprendiendo el núcleo una pluralidad de conjuntos de combustibles nucleares,

65 una capa de agua primaria que separa el núcleo de la vasija radialmente a partir del eje central y rodeando el núcleo;

- un sistema de control y protección del reactor nuclear configurado para asegurar el control y la protección del reactor en un intervalo de potencia predeterminado, típicamente entre una potencia residual en reposo y una potencia nominal, comprendiendo dicho sistema de control y protección un dispositivo de medición continua del flujo neutrónico emitido por el núcleo;

5

caracterizado porque el dispositivo de medición comprende al menos un detector neutrónico que mide continuamente dicho flujo neutrónico, estando el uno o más detectores neutrónicos dispuestos en la capa de agua primaria radialmente entre el núcleo y la vasija, estando el uno o más detectores neutrónicos colocados en una o más posiciones radiales elegidas para obtener, debido a la atenuación de la capa de agua, una o más tasas de recuento adecuadas para el sistema de control y protección del reactor nuclear para todo el intervalo de potencia predeterminado.

10

[0014] La disposición del o cada detector neutrónico en la capa de agua permite optimizar la respuesta del detector para todo el intervalo de medición. Está lo suficientemente cerca del núcleo para tener una tasa de recuento suficiente al arrancar el reactor, permitiendo un tiempo de respuesta adecuado del sistema de control y protección del reactor en caso de una situación anormal del reactor.

15

[0015] Cuando el reactor funciona a plena potencia, por un lado, la capa de agua asegura una atenuación suficiente del flujo para que el detector se mantenga dentro de su intervalo de medición, y, por otro lado, la capa de agua ofrece suficiente protección, de manera que la vida útil del detector neutrónico sea satisfactoria.

20

[0016] Estos resultados se obtienen sin tener que crear una discontinuidad en la protección radiológica, ya que la capa de agua ubicada entre el núcleo y el entorno, incluida la vasija, permanece intacta.

25

[0017] El reactor puede tener además una o más de las siguientes características, consideradas individualmente o según todas las combinaciones técnicamente posibles:

- el o cada detector nuclear se sumerge directamente en el agua primaria, sin la interposición de un termopozo;
- al menos uno de los detectores neutrónicos es un detector fijo, dispuesto a una distancia radial fija del núcleo;

30

- dicha distancia radial se elige de tal forma que:
 - cuando el reactor nuclear está detenido, el flujo neutrónico en el detector fijo corresponde a un recuento de entre 1 y 100 cp/s;
 - cuando el reactor nuclear está funcionando a plena potencia, el flujo neutrónico en el detector fijo corresponde a una medición que permanece dentro de un intervalo de medición en el modo corriente del detector fijo;

35

- todos los detectores neutrónicos son fijos y están dispuestos a dicha distancia radial del núcleo;
- todos los detectores neutrónicos son fijos, estando al menos dos de los detectores neutrónicos dispuestos a diferentes distancias radiales respectivas del núcleo entre sí, adaptados para diferentes rangos de potencia del reactor nuclear;
- al menos uno de los detectores neutrónicos es un detector móvil, que se puede mover radialmente con respecto al núcleo en la capa de agua primaria;
- el dispositivo de medición comprende un mecanismo de desplazamiento del detector móvil, configurado para desplazar radialmente el detector móvil al menos entre una posición interna relativamente más cercana al núcleo y una posición externa relativamente más alejada del núcleo;
- la posición interna se elige de tal forma que, cuando el reactor nuclear está detenido, el flujo neutrónico en el detector móvil corresponda a un recuento de entre 1 y 100 cp/s;
- la posición externa se elige de tal forma que, cuando el reactor nuclear está funcionando a plena potencia, el flujo neutrónico en el detector móvil corresponda a una medición que permanece dentro de un intervalo de medición en el modo corriente del detector móvil;
- el dispositivo de medición comprende al menos un detector fijo y al menos un detector móvil.

40

45

50

[0018] Preferentemente, el reactor nuclear comprende al menos un elemento absorbedor de neutrones y un dispositivo de desplazamiento capaz de insertar el o cada elemento absorbedor de neutrones en el núcleo, comprendiendo el sistema de control y protección un controlador configurado para controlar el dispositivo de desplazamiento utilizando mediciones realizadas por el o cada detector neutrónico.

55

[0019] Según un segundo aspecto, la invención se refiere a un procedimiento para controlar un reactor nuclear que tiene las características anteriores:

60

- cuando el reactor nuclear está detenido o funcionando a una potencia inferior a un primer límite, medir el flujo neutrónico emitido por el núcleo con él o cada detector móvil, colocado en la posición interna;
- cuando el reactor nuclear está funcionando a una potencia superior al primer límite, medir el flujo neutrónico emitido por el núcleo con él o cada detector fijo.

65

[0020] Además, el procedimiento de control puede ser de tal forma que el o cada detector móvil se desplace a la posición externa cuando el reactor nuclear pasa de una potencia inferior a un segundo límite a una potencia superior al segundo límite.

5 **[0021]** Otras características y ventajas de la invención se desprenderán de la descripción detallada que se ofrece a continuación, a título indicativo y en ningún modo limitativo, en referencia a las figuras adjuntas, en las que:

- La figura 1 es una ilustración esquemática simplificada de un reactor nuclear según una primera realización, considerada en sección en un plano perpendicular al eje central de la vasija;

10 - la figura 2 es una ilustración esquemática simplificada del reactor nuclear de la figura 1, considerada en sección en un plano radial con respecto al eje central de la vasija;

- la figura 3 es una ilustración esquemática de un detector neutrónico de la figura 1;

- la figura 4 es una vista similar a la de la figura 1, para un reactor nuclear según una segunda realización de la invención;

15 - la figura 5 es una ilustración esquemática simplificada del mecanismo de desplazamiento de uno de los detectores móviles de la figura 4; y

- la figura 6 es una vista similar a la de la figura 1, para un reactor nuclear según una tercera realización de la invención.

[0022] El reactor nuclear 1 mostrado en la figura 1 es típicamente un reactor de agua a presión (PWR, por sus siglas en inglés) del tipo SMR (reactor modular pequeño, por sus siglas en inglés). En una variante, este reactor es de otro tipo, por ejemplo, es un reactor de alta potencia, o, por el contrario, un reactor de baja potencia, o un reactor de prueba.

25 **[0023]** El reactor nuclear 1 comprende una vasija 3 que tiene un eje central X, y un núcleo 5 dispuesto en la vasija 3.

[0024] El núcleo 5 comprende una pluralidad de conjuntos de combustible nuclear.

30 **[0025]** La vasija 3 se llena con el líquido primario, que aquí es agua, con cualquier aditivo. El líquido primario se designa aquí con el término agua primaria.

[0026] La vasija 3 contiene típicamente aún otro equipo. Contiene las placas inferior y superior del núcleo, compartimentos dispuestos alrededor de conjuntos de combustible nuclear y, particularmente, que permiten canalizar la circulación del agua primaria dentro de la vasija, y además otros interiores que no se enumeran aquí.

35 **[0027]** Una capa de agua primaria 7 separa el núcleo 5 de la vasija 3 radialmente desde el eje central X.

[0028] La capa de agua primaria 7 rodea completamente el núcleo, es decir, se extiende por toda la periferia del núcleo.

40 **[0029]** Radialmente tiene un espesor de entre 100 y 800 mm.

[0030] Por lo tanto, el núcleo 5 ocupa el centro de la vasija, teniendo la capa de agua primaria 7 una forma anular y ocupando la periferia de la vasija 3.

45 **[0031]** El reactor nuclear 1 incluye además un sistema de control y protección 9 del reactor nuclear. Está configurado para asegurar el control y la protección del reactor en un intervalo de potencia predeterminado, típicamente entre una potencia residual en reposo y una potencia nominal del reactor nuclear.

50 **[0032]** El sistema 9 a su vez comprende un dispositivo de medición continua 11 del flujo neutrónico emitido por el núcleo 5.

[0033] El dispositivo de medición continua 11 del flujo neutrónico comprende una pluralidad de detectores neutrónicos 12, midiendo continuamente dicho flujo neutrónico.

55 **[0034]** El reactor nuclear 1 incluye además al menos un elemento absorbedor de neutrones 13 y un dispositivo de desplazamiento 15 capaz de insertar el o cada elemento absorbedor de neutrones 13 en el núcleo 5 (figura 2). Típicamente, el reactor nuclear incluye una pluralidad de elementos absorbedores de neutrones 13, denominados barra de control o grupo de control, mostrándose uno solo de estos elementos en la figura 2. Estos elementos están hechos de un material absorbedor de neutrones. Típicamente, se desplazan verticalmente por el dispositivo 15 a fin de variar la reactividad del núcleo.

65 **[0035]** El sistema de control y protección 9 comprende un controlador 17 configurado para controlar el dispositivo de desplazamiento 15 del o cada elemento absorbedor de neutrones, utilizando las mediciones realizadas por el dispositivo de medición neutrónica 11.

[0036] El controlador 17 está configurado, durante el funcionamiento normal del reactor nuclear, para controlar el dispositivo de desplazamiento 15 a fin de controlar uno o varios parámetros de funcionamiento del reactor, tales como la temperatura media en el núcleo o el desplazamiento axial.

5

[0037] El controlador 17 está configurado para controlar, en una situación anormal del reactor, el dispositivo de desplazamiento 15 para asegurar la protección del reactor. Típicamente, el controlador 17 provoca, por ejemplo, la caída de al menos determinados elementos absorbedores de neutrones 13, a fin de provocar una parada de emergencia del reactor nuclear.

10

[0038] Por lo tanto, el dispositivo de medición 11 debe suministrar imperativamente una medición continua del flujo neutrónico emitido por el núcleo 5, a fin de permitir que el sistema de control y protección realice una monitorización continua del núcleo e intervenga en cualquier momento en caso de una situación accidental.

15 **[0039]** Según la invención, el o cada detector neutrónico 12 se dispone en la capa de agua 7 que separa el núcleo 5 de la vasija 3, radialmente entre el núcleo 5 y la vasija 3, estando el uno o más detectores neutrónicos 12 colocados en una o más posiciones radiales elegidas para obtener, debido a la atenuación de la capa de agua 7, una o más tasas de recuento adecuadas para el sistema de control y protección del reactor nuclear 9 para todo el intervalo de potencia predeterminado.

20

[0040] Por lo tanto, el o cada detector neutrónico 12 se coloca en la vasija, pero fuera del núcleo (internos a la vasija y externos al núcleo).

25 **[0041]** El o cada detector neutrónico 12 se sumerge directamente en el agua primaria, sin la interposición de un termopozo del tipo utilizado para introducir las sondas internas al núcleo en el núcleo de un reactor nuclear.

[0042] En otras palabras, cada detector neutrónico 12 se coloca permanentemente en la capa de agua primaria 7 y no se inserta en el interior de un conducto que se comunica con el exterior de la vasija y permite la inserción y extracción del detector neutrónico en la vasija.

30

[0043] El o cada detector neutrónico 12 es de un tipo adecuado para funcionar de forma continua a una temperatura compatible con las condiciones imperantes en la vasija 3, es decir, con una temperatura del orden de 300 °C. Por ejemplo, el detector neutrónico 12 comprende un elemento de medición 19 comercializado por la empresa Photonis con la referencia CFUC07.

35

[0044] El elemento de medición 19 está protegido de la presión por una camisa metálica 21. La camisa metálica 21 rodea completamente el elemento de medición 19. Está dimensionada para resistir la presión que prevalece en la vasija 3 del reactor nuclear. Por ejemplo, está hecha de acero inoxidable o inconel.

40 **[0045]** El o cada detector neutrónico 12 está conectado físicamente mediante un cable 23 a una cadena de medición 24 ubicada fuera de la vasija 3. Las señales de medición pasan a través del cable 23.

[0046] El dispositivo de medición 11 incluye además penetraciones eléctricas 25 a través de las cuales los cables 23 pasan a través de la vasija 3. Las penetraciones eléctricas 25 son ventajosamente del tipo descrito en la solicitud de patente WO 2017/001409.

45

[0047] La cadena de medición 24 recoge los datos suministrados por el o cada detector neutrónico 12. Es del tipo denominado alta dinámica, lo que permite una medición durante aproximadamente 10 a 12 décadas con un mismo detector. Ventajosamente, esta cadena de medición se ajusta a la norma IEC 61501 de noviembre de 1998.

50

[0048] La cadena de medición 24 se usa típicamente en el modo recuento en la parte inferior del intervalo de medición y en el modo corriente en la parte superior del intervalo de medición. Cuando se usa en modo recuento, la cadena de medición 24 mide el número de recuentos por segundo registrados por el detector 12. Cuando se usa en modo corriente, la cadena de medición 24 mide la corriente eléctrica de la señal transmitida por el detector 12.

55

[0049] Según una primera realización, representada en la figura 1, el o cada detector neutrónico 12 es un detector fijo, dispuesto a una distancia radial fija del núcleo 5.

[0050] Esta realización se implementa típicamente cuando el sistema de control y protección 9 se satisface con una medición durante 10 a 12 décadas. Este es particularmente el caso de los núcleos 5 que tienen una actividad residual sustancial en reposo.

60

[0051] La distancia radial entre el o cada detector 12 y el núcleo 5 se elige de modo que se verifiquen las dos condiciones siguientes.

65

- [0052]** Cuando se detiene el reactor nuclear 1, el flujo neutrónico en el detector fijo 12 corresponde a un recuento de entre 1 y 100 cp/s, preferentemente entre 5 y 50 cp/s.
- [0053]** Cuando el reactor nuclear 1 está funcionando a plena potencia, el flujo neutrónico en el detector fijo 12 corresponde a una medición que permanece dentro de un intervalo de medición en el modo corriente del detector neutrónico 12.
- [0054]** En el caso de un detector neutrónico con un elemento de medición 19 del tipo CFUC07, el intervalo de medición en el modo corriente es de aproximadamente 2 mA en la parte superior del intervalo.
- [0055]** Ventajosamente, el dispositivo de medición 11 comprende una pluralidad de detectores neutrónicos 12 distribuidos circunferencialmente alrededor del núcleo 5, como se ilustra en la figura 1.
- [0056]** Todos los detectores neutrónicos 12 son fijos y están dispuestos a la misma distancia radial del núcleo 5.
- [0057]** El número de detectores neutrónicos 12 depende del nivel de redundancia requerido por razones de seguridad y disponibilidad. Por ejemplo, el dispositivo de medición incluye cinco detectores 12, cada uno asociado con una cadena de medición dedicada 24.
- [0058]** Cada cadena de medición 24 proporciona el valor del flujo neutrónico medido por el detector neutrónico 12 correspondiente al controlador 17.
- [0059]** Preferentemente, el dispositivo de medición incluye un sexto detector neutrónico 12, que se pone en servicio solo en caso de fallo de uno de los otros cinco detectores neutrónicos 12. A continuación, se conecta a la cadena de medición 24 del detector defectuoso.
- [0060]** Ahora se describirá en detalle una segunda realización de la invención, con referencia a la figura 4. A continuación se describirán en detalle solamente los puntos en los que la segunda realización se diferencia de la primera realización.
- [0061]** Los elementos idénticos o que realizan la misma función se designarán mediante las mismas referencias que en la primera realización.
- [0062]** Esta segunda realización es particularmente adecuada para el caso en el que el sistema de control y protección del reactor requiera una medición durante más de diez décadas. Este es particularmente el caso de los reactores electrógenos recargados con un nuevo núcleo.
- [0063]** En la segunda realización, el dispositivo de medición 11 comprende al menos un detector neutrónico fijo 12 y al menos un detector neutrónico móvil 12.
- [0064]** Típicamente, el dispositivo de medición 11 incluye una pluralidad de detectores fijos 12 y una pluralidad de detectores móviles 12.
- [0065]** Los detectores fijos y los detectores móviles son del tipo descrito anteriormente con referencia a la primera realización, y típicamente tienen todos los mismos rendimientos de detección.
- [0066]** Los detectores fijos 12 se disponen como se describe en referencia a la primera realización.
- [0067]** El o cada detector móvil 12 es radialmente móvil con respecto al núcleo 5 en la capa de agua primaria 7.
- [0068]** En este caso, el dispositivo de medición 11 comprende, para él o cada detector móvil 12, un mecanismo de desplazamiento 29 del detector móvil 12 (véase la figura 5). El mecanismo de desplazamiento 29 está configurado para desplazar radialmente el detector móvil 12 entre al menos una posición interna relativamente más cercana al núcleo 5 y una posición externa relativamente más alejada del núcleo 5.
- [0069]** El o cada detector fijo 12 se coloca a una primera distancia radial del núcleo 5.
- [0070]** El o cada detector móvil 12, en la posición externa, está preferentemente situado sustancialmente en dicha primera distancia radial del núcleo 5.
- [0071]** La amplitud del movimiento radial de cada detector móvil 12 es, por ejemplo, entre 200 y 400 mm.
- [0072]** Por lo tanto, el detector móvil en su posición interna se encuentra en las inmediaciones del núcleo, por

ejemplo, a una distancia radial del orden de 200 mm del núcleo.

[0073] La distancia se toma en relación con el conjunto de combustible nuclear ubicado más cerca del detector neutrónico.

5

[0074] La posición interna se elige de modo que, cuando el reactor nuclear 1 está detenido, el flujo neutrónico en el detector móvil 12 corresponda a un recuento entre 1 y 100 recuentos por segundo, preferentemente entre 5 y 50 recuentos por segundo, con un tiempo de respuesta aceptable, por ejemplo, una constante de tiempo de filtrado de varios segundos a decenas de segundos. Por ejemplo, la posición interna se elige de modo que la tasa de recuento sea de 5 recuentos por segundo.

10

[0075] En principio, no hay limitación en la posición interna del detector móvil, que puede estar extremadamente cerca del núcleo para alcanzar el recuento mínimo incluso con una actividad residual muy baja del núcleo cuando se detiene.

15

[0076] La posición externa se elige de tal forma que, cuando el reactor nuclear 1 está funcionando a plena potencia, el flujo neutrónico en el detector móvil 12 corresponda a una medición que permanece dentro de un intervalo de medición en el modo corriente del detector móvil 12.

20

[0077] Típicamente, el intervalo de medición normal en el modo corriente de un detector con un elemento de medición del tipo CFUC07 es de 2 mA en la parte superior del intervalo.

[0078] Los detectores fijos permiten típicamente cubrir el intervalo de potencia del 0,1 % al 100 % de la potencia nominal.

25

[0079] Los detectores móviles se utilizan en reposo y típicamente cubren el intervalo de potencia de hasta el 1 % de la potencia nominal.

30

[0080] Por lo tanto, el posicionamiento de los detectores móviles con respecto a los detectores fijos hace posible que exista un solapamiento entre el intervalo de potencia cubierto por los detectores móviles en la posición interna, y el intervalo de potencia cubierto por los detectores fijos y los detectores móviles en la posición externa.

35

[0081] Cuando los detectores móviles están en la posición externa, las mediciones para la protección del reactor se realizan por los detectores fijos. Los detectores móviles se utilizan para detectar cualquier distorsión azimutal del flujo neutrónico, lo que permite, por ejemplo, detectar una caída imprevista de un elemento absorbedor de neutrones.

40

[0082] El mecanismo de desplazamiento 29 está diseñado para asegurar el desplazamiento del detector móvil 12 y la detección segura de su posición radial en la capa de agua primaria 7.

[0083] Según una variante ventajosa, el mecanismo de desplazamiento es de tipo electromecánico (figura 5).

45

[0084] Este mecanismo de desplazamiento 29 comprende una superficie de soporte 31, un soporte deslizante 33 sobre el que se fija el detector móvil 12 y un dispositivo de accionamiento 35 del soporte deslizante 33 a lo largo de la superficie de soporte 31.

[0085] La superficie de soporte 31 es, por ejemplo, un carril que se extiende radialmente o cualquier otro soporte adecuado.

En este caso, el soporte deslizante 33 se desliza en el carril.

50

[0086] El dispositivo de accionamiento 35 es, por ejemplo, un tornillo motorizado, como se muestra en la figura 5. El dispositivo incluye un motor paso a paso 37, con o sin reductor, y un tornillo 39 girado por el motor 37. El tornillo 39 coopera con un elemento formador de tuerca, dispuesto en el soporte deslizante 33. El tornillo 39 se extiende radialmente. Se gira selectivamente por el motor 37 en el sentido horario o en el sentido antihorario. El motor 37 está controlado por un elemento de control 41 que forma parte del dispositivo de medición 11.

55

[0087] Por lo tanto, el detector 12 se desplaza radialmente hacia el eje central X o por el contrario alejándose del eje X, dependiendo de la dirección de rotación del motor 37.

60

[0088] Según una variante no mostrada, el motor 37 hace girar el tornillo 39 mediante una cadena cinemática, no mostrada, que incluye reenvíos en ángulo, de manera que el motor 37 se posiciona en una zona de la vasija 3 que está protegida de neutrones que vienen directamente del núcleo. Por ejemplo, el motor 37 está dispuesto a una distancia por encima del núcleo 5.

65

[0089] El mecanismo de accionamiento del tipo tornillo/tuerca puede derivarse, por ejemplo, directamente de

las disposiciones de mando de los mecanismos de control del grupo del tipo descrito en la solicitud francesa publicada con el número FR 3.039.695.

[0090] La posición radial del detector móvil 12 se mide usando un codificador integrado en el motor 37, o usando detectores de final de carrera proporcionados para detectar cuando el detector móvil 12 alcanza la posición interna y la posición externa.

[0091] La posición del detector móvil 12 también se puede calcular midiendo el número de pasos de control entregados a las fases del motor 37 o el número de pasos de rotación del rotor del motor 37, como se describe para los mecanismos de control de grupos en la solicitud de patente presentada con el número de registro FR1653366.

[0092] Según una variante no mostrada, el mecanismo de desplazamiento del detector móvil 12 es exclusivamente mecánico. Este mecanismo está dispuesto de modo que el detector móvil 12 se coloque radialmente hacia su posición externa bajo el efecto de la circulación del agua primaria en la vasija 3, y regrese por un medio de retorno pasivo hacia su posición interna. A alta potencia, el caudal primario sustancial se usa para desplazar radialmente el detector hacia el exterior. A baja potencia, el caudal primario reducido permite que el dispositivo de retorno pasivo devuelva el detector a la posición interna.

[0093] Por ejemplo, el mecanismo de desplazamiento incluye un carril radial a lo largo del cual el detector móvil puede deslizarse libremente. También incluye compartimentos que canalizan el flujo de agua primaria hacia el detector móvil, dispuestos de modo que el flujo de agua primaria impulse al detector móvil radialmente hacia el exterior de la vasija. El medio de retorno pasivo es, por ejemplo, un resorte. En una variante, el medio de retorno pasivo es la gravedad, estando el carril, por ejemplo, inclinado de tal manera que el detector móvil 12 se deslice hacia su posición interna bajo el efecto de su propio peso. El recorrido del detector móvil está limitado por topes mecánicos, en la posición interna y en la posición externa. Los detectores de final de carrera permiten detectar la llegada del detector móvil 12 en sus posiciones interna y externa.

[0094] En un ejemplo de realización, el dispositivo de medición 11 comprende dos detectores neutrónicos móviles 12 y tres detectores neutrónicos fijos 12, cada uno asociado con una cadena de medición 24.

[0095] Los dos detectores móviles 12 permiten una medición segura al arrancar el reactor.

[0096] Los tres detectores fijos 12 permiten una medición segura en términos de potencia. Cuando el reactor nuclear funciona con energía, los dos detectores móviles 12 se colocan en sus posiciones externas y permanecen operativos. Permiten mejorar el conocimiento del flujo neutrónico en el acimut.

[0097] Ventajosamente, el dispositivo de medición 11 incluye además un detector móvil de repuesto 12, que puede conectarse a una de las cinco cadenas de medición 24 en caso de fallo de un detector fijo o de un detector móvil.

[0098] El elemento de control 41 del dispositivo de medición 11 está típicamente programado para realizar las siguientes etapas:

- cuando el reactor nuclear 1 está detenido o funcionando a una potencia inferior a un primer límite, medir el flujo neutrónico emitido por el núcleo 5 con el o cada detector móvil 12, colocado en la posición interna;
- cuando el reactor nuclear 1 está funcionando a una potencia superior al primer límite, medir el flujo neutrónico emitido por el núcleo 5 con el o cada detector fijo 12.

[0099] El primer límite es, por ejemplo, igual al 1 % de la potencia nominal de funcionamiento del reactor.

[0100] Ventajosamente, cuando el reactor nuclear 1 pasa de una potencia inferior a un segundo límite a una potencia superior al segundo límite, el o cada detector móvil 12 se desplaza automáticamente a su posición externa.

[0101] A la inversa, cuando el reactor nuclear 1 pasa de una potencia superior al primer límite a una potencia inferior al primer límite, el o cada detector móvil 12 se devuelve automáticamente a su posición interna.

[0102] El segundo límite es un porcentaje de la potencia nominal del reactor, por ejemplo, el 3 %.

[0103] Son posibles otras lógicas para la programación del elemento de control 41, siempre que respeten el principio de solapamiento de las cadenas definidas previamente.

[0104] Según otra variante, los desplazamientos del o de cada módulo detector 12 se controlan manualmente desde la sala de control del reactor nuclear.

[0105] El procedimiento para controlar el reactor nuclear 1 según la segunda realización se describirá ahora en

detalle.

[0106] El procedimiento comprende las siguientes etapas:

- 5 - cuando el reactor nuclear 1 está detenido o funcionando a una potencia inferior a un primer límite, medir el flujo neutrónico emitido por el núcleo 5 con el o cada detector móvil 12, colocado en la posición interna;
- cuando el reactor nuclear 1 está funcionando con una potencia superior al primer límite, medir el flujo neutrónico emitido por el núcleo 5 con el o cada detector fijo 12.

10 **[0107]** Típicamente, el procedimiento incluye además la siguiente etapa:

- desplazar el o cada detector móvil 12 a la posición externa cuando el reactor nuclear 1 pasa de una potencia inferior a un segundo límite a una potencia superior al segundo límite.

15 **[0108]** El primer y segundo límites son los descritos anteriormente.

[0109] El procedimiento de control incluye preferentemente la siguiente etapa:

- cuando el reactor nuclear 1 pasa de una potencia superior al primer límite a una potencia inferior al primer límite, devolver los detectores móviles a una posición interna.

[0110] Esta etapa se realiza preferentemente de forma automática y se activa por cada detector móvil 12 en función de su propia medición, de forma autónoma.

25 **[0111]** El elemento de control 41 del dispositivo de medición 1 está programado para realizar el procedimiento anterior.

[0112] Según una variante de realización aplicable a la segunda realización, ningún detector móvil se puede mover entre dos posiciones, concretamente, una posición interna y una posición externa, sino una pluralidad de posiciones radiales, distribuidas entre la posición interna y la posición externa.

30

[0113] Esto permite optimizar los solapamientos entre los detectores fijos y los detectores móviles.

[0114] Ahora se describirá una tercera realización de la invención, con referencia a la figura 6. A continuación se describirán en detalle solamente los puntos en los que la tercera realización se diferencia de la primera realización.

35

[0115] Los elementos idénticos o que realizan la misma función se designarán mediante las mismas referencias que en la primera realización.

40 **[0116]** En la tercera realización, todos los detectores neutrónicos 12 son fijos y al menos dos de los detectores neutrónicos 12 se disponen a diferentes distancias radiales respectivas del núcleo 5 entre sí, adaptados para diferentes intervalos de potencia del reactor nuclear.

[0117] Preferentemente, los detectores neutrónicos 12 están distribuidos a varias distancias radiales diferentes del núcleo 5 entre sí, por ejemplo, dos distancias radiales diferentes, tres distancias radiales diferentes o más de tres distancias radiales diferentes entre sí.

45

[0118] En el ejemplo mostrado en la figura 6, dos detectores neutrónicos 12 se disponen a una primera distancia radial del núcleo. Estos detectores son preferentemente diametralmente opuestos con respecto al eje central de la vasija.

50

[0119] Otros dos detectores neutrónicos 12 se disponen a una segunda distancia radial del núcleo, menor que la primera distancia. Estos detectores son preferentemente diametralmente opuestos con respecto al eje central de la vasija.

55

[0120] Aún otros dos detectores neutrónicos 12 se disponen a una tercera distancia radial del núcleo, a mitad de camino entre la primera y la segunda distancia. Estos detectores son preferentemente diametralmente opuestos con respecto al eje central de la vasija.

60 **[0121]** Esta tercera realización permite conmutar la medición gradualmente desde los detectores más internos hacia los detectores más externos, mientras se beneficia del mejor posicionamiento en el intervalo de mediciones.

[0122] Según una variante de realización, los detectores neutrónicos 12 están situados a distancias radiales respectivas del núcleo 5, todas diferentes entre sí.

65

[0123] Según una cuarta realización, el dispositivo de medición solo incluye detectores neutrónicos móviles. Por ejemplo, los tres detectores neutrónicos fijos de la segunda realización se reemplazan por detectores móviles. Estos detectores móviles complementarios son del mismo tipo que los detectores móviles descritos con referencia a la segunda realización.

5

[0124] El controlador 17 y/o el dispositivo de control 41, por ejemplo, comprenden una unidad de procesamiento de información formada por un procesador y una memoria asociada con el procesador. En una variante, el controlador 17 y/o el dispositivo de control 41 se realizan en forma de componentes lógicos programables, tales como FPGA (matriz de puertas programables por campo, por sus siglas en inglés) o circuitos integrados dedicados, tales como

10 ASIC (circuito integrado para aplicaciones específicas, por sus siglas en inglés).

REIVINDICACIONES

1. Reactor nuclear (1), que comprende:
 - 5 - una vasija (3) que tiene un eje central (X);
 - un núcleo (5) dispuesto en la vasija (3), comprendiendo el núcleo (5) una pluralidad de conjuntos de combustibles nucleares, una capa de agua primaria (7) que separa el núcleo (5) de la vasija (3) radialmente a partir del eje central (X) y rodeando el núcleo (5);
 - 10 - un sistema de control y protección (9) del reactor nuclear configurado para asegurar el control y la protección del reactor en un intervalo de potencia predeterminado, típicamente entre una potencia residual en reposo y una potencia nominal, comprendiendo dicho sistema de control y protección (9) un dispositivo de medición continua (11) del flujo neutrónico emitido por el núcleo (5);

caracterizado porque el dispositivo de medición (11) comprende al menos un detector neutrónico (12) que mide
 15 continuamente dicho flujo neutrónico, estando el uno o más detectores neutrónicos (12) dispuestos en la capa de agua primaria (7) radialmente entre el núcleo (5) y la vasija (3), estando el uno o más detectores neutrónicos (12) colocados en una o más posiciones radiales elegidas para obtener, debido a la atenuación de la capa de agua, una o más tasas de recuento adecuadas para el sistema de control y protección del reactor nuclear (9) para todo el intervalo de potencia predeterminado.
- 20 2. Reactor según la reivindicación 1, en el que el o cada detector nuclear (12) se sumerge directamente en el agua primaria, sin la interposición de un termopozo.
3. Reactor según la reivindicación 1 o 2, en el que al menos uno de los detectores neutrónicos (12) es un
 25 detector fijo, dispuesto a una distancia radial fija del núcleo (5).
4. Reactor según la reivindicación 3, en el que dicha distancia radial se elige de manera que:
 - 30 - cuando el reactor nuclear (1) está detenido, el flujo neutrónico en el detector fijo (12) corresponde a un recuento de entre 1 y 100 cp/s;
 - cuando el reactor nuclear (1) está funcionando a plena potencia, el flujo neutrónico en el detector fijo (12) corresponde a una medición que permanece dentro de un intervalo de medición en el modo corriente del detector fijo (12).
- 35 5. Reactor según la reivindicación 3 o 4, en el que todos los detectores neutrónicos (12) son fijos y están dispuestos a dicha distancia radial del núcleo (5).
6. Reactor según la reivindicación 3 o 4, en el que todos los detectores neutrónicos (12) son fijos, estando
 40 al menos dos de los detectores neutrónicos (12) dispuestos a diferentes distancias radiales respectivas del núcleo (5) entre sí, adaptados para diferentes rangos de potencia del reactor nuclear.
7. Reactor según cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en el que al menos uno de los detectores neutrónicos (12) es un detector móvil, que puede moverse radialmente con respecto al núcleo (5) en la capa de agua
 45 primaria (7).
8. Reactor según la reivindicación 7, en el que el dispositivo de medición (11) comprende un mecanismo de desplazamiento (29) del detector móvil (12), configurado para desplazar radialmente el detector móvil (12) al menos
 50 entre una posición interna relativamente más cercana al núcleo (5) y una posición externa relativamente más alejada del núcleo (5).
9. Reactor según la reivindicación 8, en el que:
 - la posición interna se elige de tal forma que, cuando el reactor nuclear (1) está detenido, el flujo neutrónico en el detector móvil (12) corresponda a un recuento de entre 1 y 100 cp/s;
 - 55 - la posición externa se elige de tal forma que, cuando el reactor nuclear (1) está funcionando a plena potencia, el flujo neutrónico en el detector móvil (12) corresponda a una medición que permanece dentro de un intervalo de medición en el modo corriente del detector móvil (12).
10. Reactor según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9 en combinación con la reivindicación 3 o 4, en el
 60 que el dispositivo de medición (11) comprende al menos un detector fijo (12) y al menos un detector móvil (12).
11. Un procedimiento de control de un reactor nuclear (1) según la reivindicación 10, comprendiendo el procedimiento las siguientes etapas:
 - 65 - cuando el reactor nuclear (1) está detenido o funcionando a una potencia inferior a un primer límite, medir el flujo

neutrónico emitido por el núcleo (5) con él o cada detector móvil (12), colocado en la posición interna;
- cuando el reactor nuclear (1) está funcionando a una potencia superior al primer límite, medir el flujo neutrónico emitido por el núcleo (5) con él o cada detector fijo (12).

- 5 12. Procedimiento de control según la reivindicación 11, en el que el o cada detector móvil (12) se desplaza a la posición externa cuando el reactor nuclear (1) pasa de una potencia inferior a un segundo límite a una potencia superior al segundo límite.

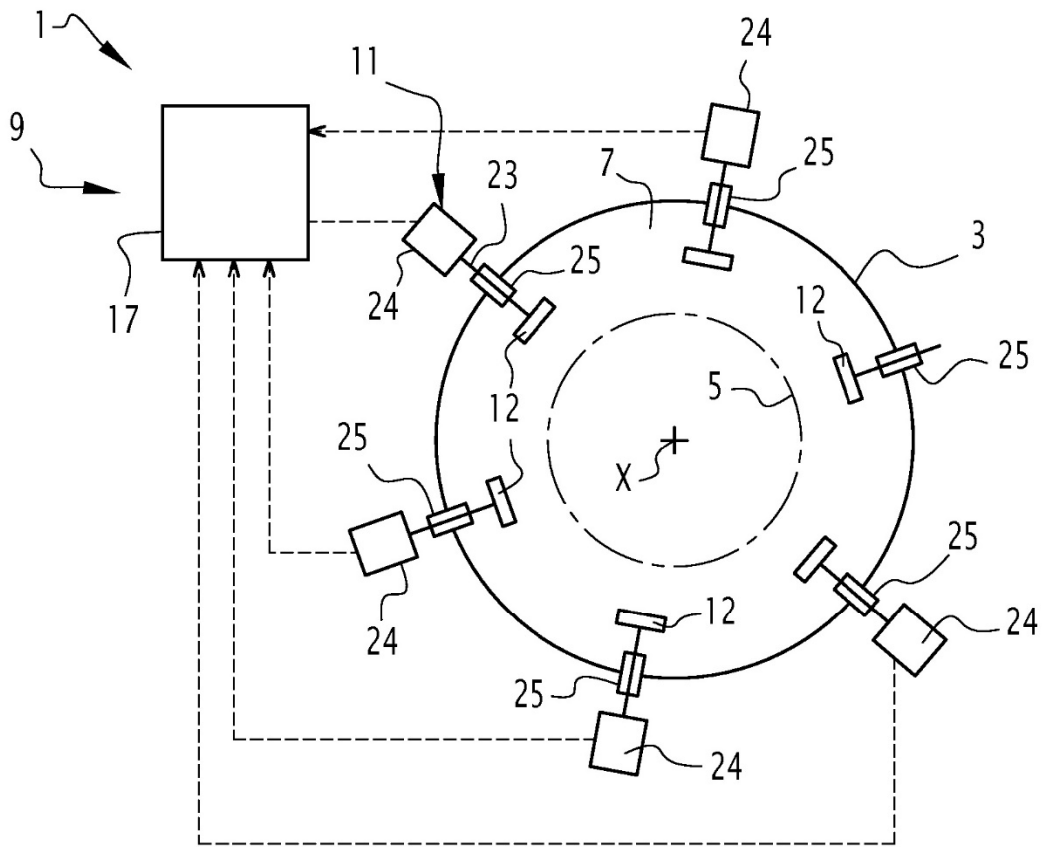


FIG. 1

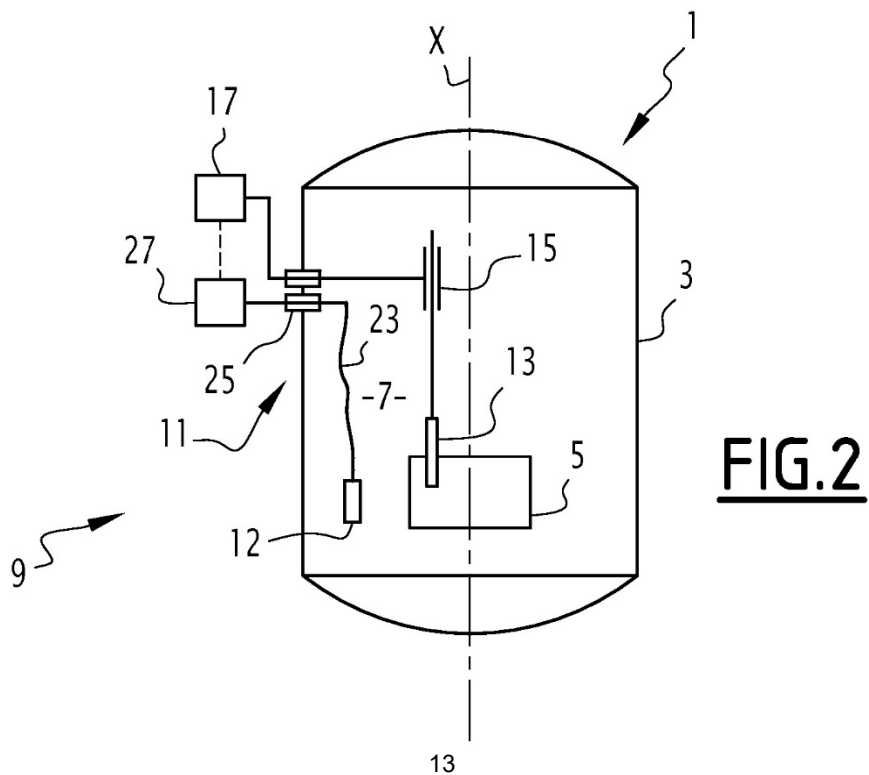


FIG. 2

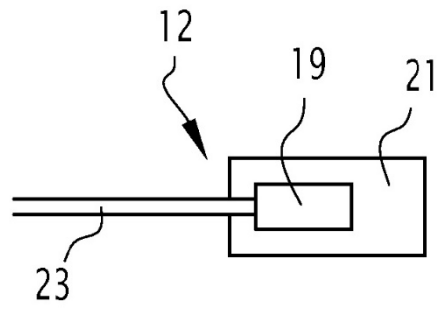


FIG. 3

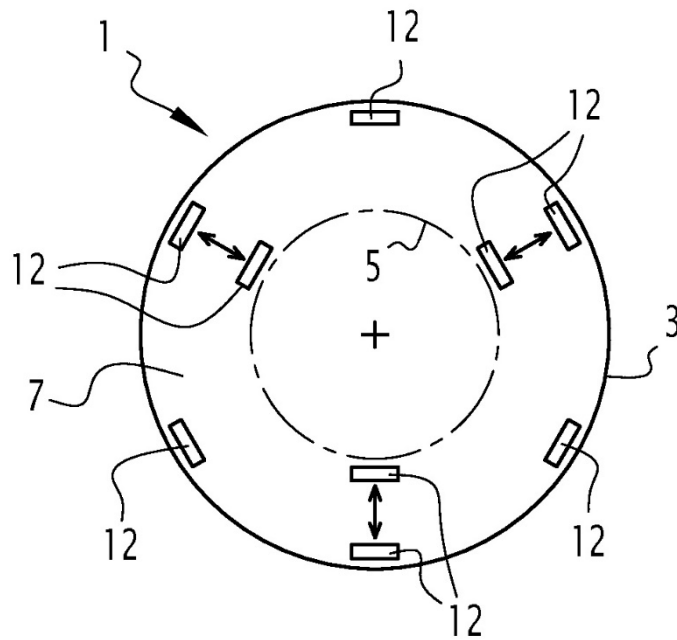


FIG. 4

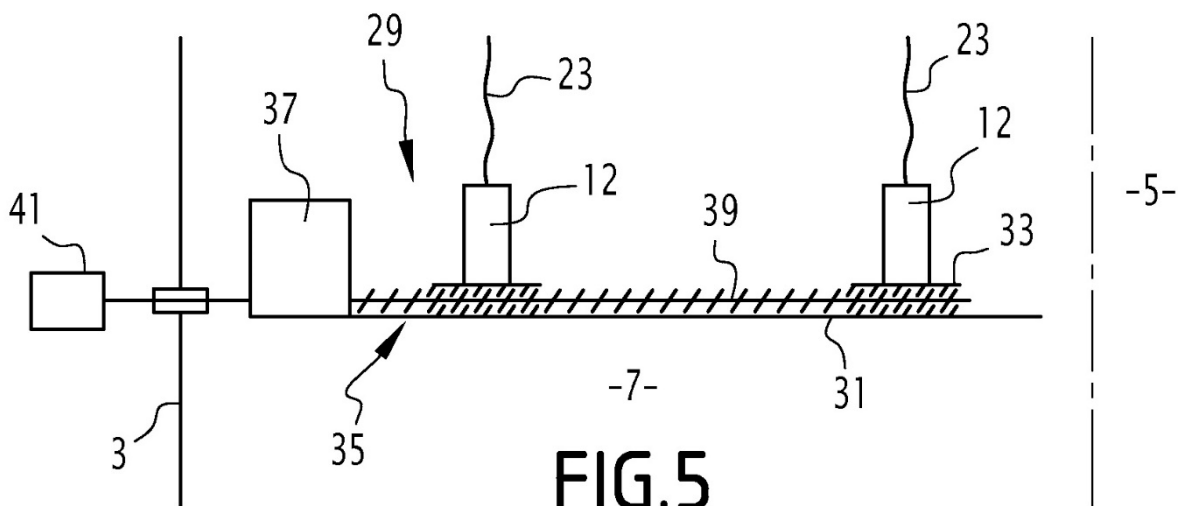


FIG. 5

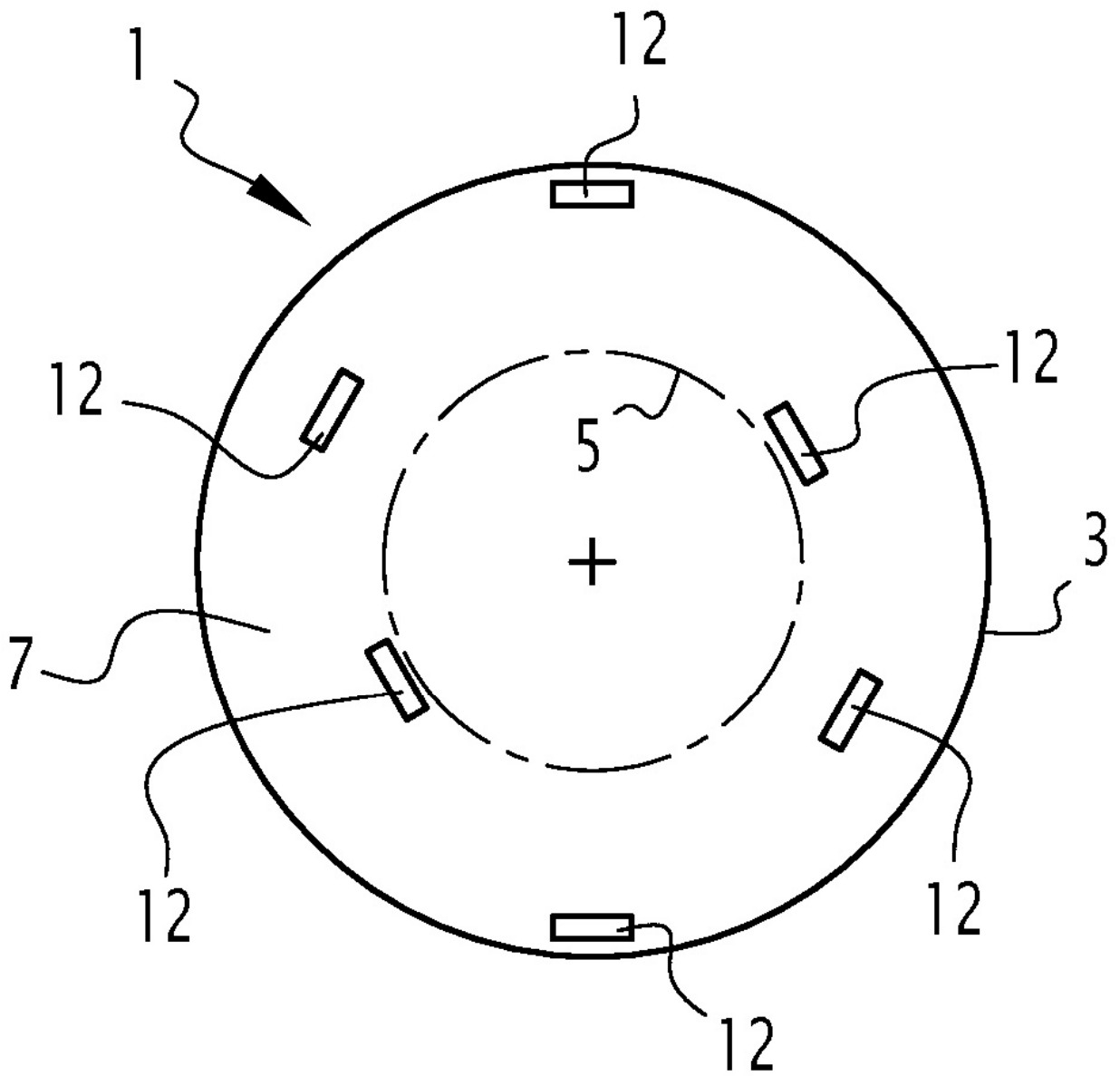


FIG. 6