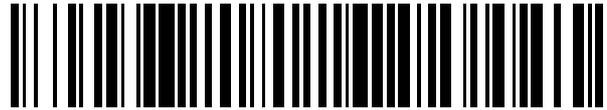


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 817 025**

51 Int. Cl.:

G21C 17/022 (2006.01)

C23F 11/08 (2006.01)

C23F 11/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.11.2016 PCT/EP2016/078434**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.06.2017 WO17093079**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.11.2016 E 16800934 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.07.2020 EP 3384500**

54 Título: **Planta de energía nuclear y procedimiento de funcionamiento de una planta de energía nuclear**

30 Prioridad:

30.11.2015 DE 102015120722

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

06.04.2021

73 Titular/es:

**FRAMATOME GMBH (100.0%)
Paul-Gossen-Strasse 100
91052 Erlangen, DE**

72 Inventor/es:

**STELLWAG, BERNHARD y
FANDRICH, JÖRG**

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 817 025 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

Planta de energía nuclear y procedimiento de funcionamiento de una planta de energía nuclear

5

[0001] La invención se refiere a una planta de energía nuclear que comprende un circuito de refrigerante primario y un circuito de vapor-agua separado del circuito de refrigerante primario. Más específicamente, la invención se refiere a un procedimiento para operar dicha planta de energía nuclear.

10 **[0002]** Se conocen plantas de energía nuclear que comprenden un circuito de refrigerante primario y un circuito de vapor-agua separado del circuito de refrigerante primario. Estos funcionan, en particular, mediante reactores de agua a presión o reactores de agua pesada. Debido a su construcción y a los materiales utilizados, los generadores de vapor de las plantas de energía nuclear tienen que funcionar en condiciones reductoras. Incluso durante el tiempo de inactividad de la planta, se requiere proteger los materiales en el lado secundario de los generadores de vapor de la corrosión mediante el uso de condiciones reductoras. Esto también se conoce como preservación del tiempo de inactividad. Para ambas tareas, la hidracina se utiliza como agente reductor.

15 **[0003]** Durante el funcionamiento eléctrico de las plantas de energía nuclear, la hidracina provoca las siguientes reacciones en el circuito de vapor-agua de las plantas de energía nuclear:

20

- Unión al oxígeno por la reacción $N_2H_4 + O_2 \div N_2 + 2 H_2O$. La eliminación del oxidante O_2 y, si corresponde, de otros oxidantes tales como iones de cobre, facilita el establecimiento de condiciones reductoras.

25

- Condiciones reductoras mediante la oxidación electroquímica adicional de hidracina en las superficies de las piezas según la reacción $N_2H_4 + 4 OH^- \div N_2 + 4 H_2O + 4 e^-$. En condiciones estándar, el potencial del electrodo de equilibrio de esta reacción es de -330 mV contra el electrodo de hidrógeno.

30 **[0004]** Las reacciones con hidracina se activan térmicamente, causando una transición gradual de oxidación a condiciones reductoras ya existentes en el sistema de condensado y agua de alimentación de reactores de agua ligera y agua pesada. Cuando el agua de alimentación entra en los generadores de vapor y en el agua circulante en el lado secundario de los generadores de vapor, la hidracina reacciona con una velocidad tan alta que se aseguran condiciones reductoras.

35 **[0005]** En las plantas eléctricas operadas con fuentes de energía convencionales se establecen condiciones de oxidación específicas en el sistema de condensado y agua de alimentación utilizando pequeñas cantidades de oxígeno. Al hacerlo, se reduce la descarga de hierro de los componentes y, por lo tanto, también la introducción de productos de corrosión en la caldera de vapor. Por esta razón, la norma VGB relativa a la calidad del agua de alimentación, agua de caldera y vapor en plantas eléctricas industriales (VGB-S-010-T-00; 2011-12.DE) solo recomienda el modo operativo AVT(O), entre los modos operativos AVT especificados (AVT = tratamiento todo volátil), en el que el acondicionamiento se realiza solo con amoníaco, sin añadir ningún agente reductor. Según esta norma, los modos operativos AVT(R) en los que se añade un agente reductor volátil adicional como aglutinante de oxígeno deben utilizarse solo en casos excepcionales.

40

45 **[0006]** La hidracina es un muy buen aglutinante de oxígeno. El funcionamiento conocido del circuito secundario de vapor-agua de los reactores de agua a presión mediante la adición de hidracina como agente reductor corresponde así a un modo operativo AVT(R). En los medios que contienen hidracina, no es posible el ajuste exacto del contenido de oxígeno en los sistemas de circuito y, por lo tanto, un acondicionamiento AVT(O) de los sistemas de circuito de vapor-agua de los reactores de agua ligera y agua pesada. Además, la hidracina, como un fuerte agente reductor, puede reforzar la corrosión por erosión en los sistemas de circuitos.

50

[0007] Algunas plantas evitan el uso de hidracina mediante el uso de carbohidrazida. La carbohidrazida exhibe propiedades similares a la hidracina y también es un agente reductor fuerte.

55 **[0008]** A partir del documento EP 2 193 524 B1 se conoce una planta de energía nuclear que comprende un reactor de agua hirviendo en cuyo sistema de enfriamiento del reactor, aparte de hidracina, se utiliza un alcohol como agente reductor. La inyección de alcohol se realiza en el circuito de refrigerante primario que pasa también a través del núcleo del reactor.

60 **[0009]** El documento DE 100 30 726 B4 muestra un procedimiento para suprimir la corrosión en las partes del reactor en las que se utiliza una sustancia fotocatalítica que se deposita en la superficie de las partes del reactor protegiéndolas de la corrosión. Se puede inyectar hidrógeno o metanol en el agua del reactor del circuito de refrigerante primario a través de un sistema de agua de alimentación.

[0010] Ambos son procedimientos para tratar el agua de enfriamiento en reactores de agua hirviendo que se caracterizan porque prevalece un campo de radiación gamma alto en todo el circuito de refrigerante primario. Por lo

tanto, los reactores de agua hirviendo difieren fundamentalmente de los reactores de agua a presión o reactores de agua pesada que comprenden un circuito de vapor-agua separado del circuito de refrigerante primario y un generador de vapor conectado al circuito de refrigerante primario y al circuito de vapor-agua para transferir calor del circuito de refrigerante primario al circuito de vapor-agua.

5

[0011] El documento WO 00/46423 A se refiere a una composición detergente y procedimientos para la eliminación de depósitos de generadores de vapor de plantas de energía nuclear operadas por reactores de agua a presión. La composición acuosa contiene ácido 1-hidroxietiliden-1,1-difosfónico y al menos un mercaptano etoxilado o mercaptano etoxilado oxidado. Junto con la composición detergente, se pueden introducir productos químicos adicionales en el circuito secundario del reactor de agua a presión, por ejemplo, agentes reductores tales como ácido ascórbico, hidroquinona, sulfito de sodio, dietilhidroxiamina, hidracina, ácido isoascórbico o carbohidrazida.

10

[0012] Un objeto de la invención es proporcionar una protección eficaz y fácil de usar contra la corrosión en el circuito secundario de vapor-agua de una planta de energía nuclear, en particular de un reactor de agua a presión o reactor de agua pesada, sin recurrir a agentes reductores tóxicos tales como hidracina.

15

[0013] Para resolver el objeto, se proporciona una planta de energía nuclear que comprende un circuito de refrigerante primario con un circuito de vapor-agua separado del circuito de refrigerante primario y un generador de vapor conectado al circuito de refrigerante primario y al circuito de vapor-agua para transferir calor del circuito de refrigerante primario al circuito de vapor-agua. El circuito de vapor-agua tiene al menos un punto de medición para introducir un agente reductor en el circuito de vapor-agua, siendo el agente reductor un compuesto orgánico que consiste en carbono, hidrógeno y oxígeno, y medios para controlar la concentración del agente reductor que se utiliza para establecer una concentración de oxígeno predeterminada en el circuito de vapor-agua, mientras que prevalecen condiciones reductoras dentro del generador de vapor (18).

20

25

[0014] Los inventores han reconocido que los agentes reductores alternativos primero tienen que ser capaces de permitir el ajuste exacto de pequeñas cantidades de oxígeno en los sistemas de circuito para garantizar una operación AVT(O) recomendada para las plantas eléctricas industriales en las instalaciones del circuito de vapor-agua fuera del generador de vapor. En segundo lugar, deben garantizar condiciones reductoras en el agua circulante de los generadores de vapor nuclear, ya que los materiales utilizados en el generador de vapor, en particular las aleaciones de níquel, pueden corroerse mediante una operación AVT(O). En general, los agentes reductores alternativos, si es posible, deben tener las siguientes propiedades químicas:

30

- Ninguna unión de O₂ en los sistemas de circuitos de vapor-agua, sino en el sistema de circulación de agua de los generadores de vapor nucleares;

35

- Ningún efecto electroquímico reductor fuerte en los sistemas de circuitos de vapor-agua, excepto en los generadores de vapor nucleares;

40

- Ninguna deformación y agotamiento prematuro de la capacidad de las resinas de intercambio aniónico y catiónico en la instalación de purificación de condensados y la instalación de desmineralización por soplado del generador de vapor; y

- Ausencia de propiedades carcinógenas, tóxicas u otras propiedades químicas que pudieran perjudicar gravemente la manipulación del agente reductor en la planta de energía nuclear.

45

[0015] En lugar de hidracina u otros aglutinantes de oxígeno fuertes y agentes reductores, se miden compuestos C, H, O libres de nitrógeno y de bajo peso molecular en el circuito secundario de vapor-agua del reactor de agua ligera o agua pesada. Peso molecular bajo significa aquí un peso molecular menor de 800 g/mol, preferentemente menor de 400 g/mol. El campo de radiación presente en el interior del generador de vapor nuclear en el lado secundario es suficiente para inducir las siguientes reacciones químicas en el agua circulante:

50

- Unión al oxígeno: por ejemplo, en el caso del metanol, mediante la reacción $\text{CH}_3\text{OH} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$;

55

- Alto efecto reductor: En condiciones estándar, el potencial celular para la oxidación electroquímica del metanol para formar CO₂ según la reacción $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6 \text{H}^+ + 6 \text{e}^-$ es +20 mV contra el electrodo de hidrógeno.

[0016] Por lo tanto, los compuestos de bajo peso molecular C, H, O también causan fuertes condiciones reductoras dentro del generador de vapor nuclear. Como resultado, el uso de compuestos C, H, O libres de nitrógeno y de bajo peso molecular permite el establecimiento dirigido de condiciones reductoras en el generador de vapor nuclear, lo que hace que el uso de hidracina ya no sea necesario. En el sistema de circuito secundario de vapor-agua fuera del generador de vapor nuclear, los compuestos C, H, O están en gran medida inactivos hacia el oxígeno, lo que permite el establecimiento de condiciones oxidativas.

65

- [0017]** Según una realización ventajosa, el agente reductor bajo la influencia de la radiación gamma actúa como un depurador de oxígeno. Como las reacciones reductoras solo son inducidas por la radiación gamma presente en el generador de vapor, el contenido de oxígeno en el circuito de vapor-agua se puede ajustar exactamente, permitiendo así que se use un modo operativo AVT(O) en el circuito de vapor-agua del reactor de agua ligera o agua pesada. A su vez, como resultado del modo operativo AVT(O) en la planta, la alcalinización con amoníaco u otras aminas orgánicas es suficiente para garantizar una baja descarga de hierro y suficiente resistencia a la corrosión por erosión en el sistema de circuitos. Preferentemente, el acondicionamiento del sistema de circuito vapor-agua se puede realizar utilizando solo amoníaco, sin añadir aminas orgánicas.
- 10 **[0018]** Según otra realización ventajosa, el agente reductor se selecciona del grupo que consiste en alcoholes C1-C6, aldehídos y cetonas o mezclas de los mismos. La ventaja de estos compuestos volátiles de bajo peso molecular C, H, O es que no se eliminan en las instalaciones de purificación de agua, por ejemplo, en la instalación de purificación de condensados o la instalación de desmineralización por soplado, como es el caso de los agentes reductores convencionales tales como hidracina. Por lo tanto, también se pueden introducir en el sistema aguas arriba de las instalaciones de purificación de agua, aumentando la cantidad de posibles puntos de medición en la planta.
- 15 **[0019]** En una realización particularmente ventajosa, el agente reductor es un alcohol C1-C6, preferentemente propanol, etanol o metanol, particularmente preferentemente metanol. Los alcoholes tienen la ventaja, en comparación con muchos otros agentes reductores, de que no son peligrosos para el medio ambiente, lo que permite una manipulación segura con poco esfuerzo. Se pueden enviar, almacenar y manipular fácilmente.
- 20 **[0020]** En otra realización ventajosa, el circuito de vapor-agua tiene un condensador y una bomba de condensado principal. Además, el punto de medición está situado entre el condensador y la bomba principal de condensado. El condensador sirve para devolver el vapor de agua condensada al circuito de vapor-agua, reduciendo así el consumo de agua de la planta. La ubicación del punto de medición aguas abajo del condensador permite verificar la calidad del condensado antes de la adición del agente reductor.
- 25 **[0021]** Según una realización preferida de la invención, el circuito de vapor-agua tiene un recipiente de agua de alimentación. Además, el punto de medición se encuentra aguas abajo del recipiente de agua de alimentación. El recipiente de agua de alimentación mantiene el agua de alimentación utilizada para suministrar el generador de vapor y para compensar el agua retirada del sistema. Como parte del agente reductor se retira nuevamente en el recipiente de agua de alimentación mediante desgasificación, es ventajoso introducir el agente reductor en el circuito de vapor-agua entre el recipiente de agua de alimentación y las bombas de agua de alimentación. Además, la ubicación del punto de medición aguas abajo del recipiente de agua de alimentación permite verificar la calidad del agua de alimentación antes de la adición del agente reductor. Como alternativa al recipiente de agua de alimentación, se puede conectar un dispositivo de introducción de agua de alimentación al circuito de vapor-agua.
- 30 **[0022]** Según otra realización preferida de la invención, se proporciona al menos un dispositivo para medir la concentración del agente reductor y/o del potencial redox en el circuito de vapor-agua. Las mediciones sirven para monitorear la calidad del agua en el circuito de vapor-agua y para ajustar las condiciones deseadas, es decir, el ajuste de un bajo contenido de oxígeno predeterminado en el sistema del circuito y garantizar condiciones reductoras en el agua circulante del generador de vapor.
- 35 **[0023]** Condiciones reductoras significa que, en condiciones estándar (potencial de semicélula de reducción), el potencial redox del medio respectivo, aquí del agua circulante a la temperatura de funcionamiento, contra el electrodo de hidrógeno es menor que 0 V, preferentemente menor que -10 mV.
- 40 **[0024]** Otro objeto de la invención es un procedimiento para operar una planta de energía nuclear que comprende un circuito de refrigerante primario, un circuito de vapor-agua separado del circuito de refrigerante primario y un generador de vapor conectado al circuito de refrigerante primario y al circuito de vapor-agua para transferir calor del circuito de refrigerante primario al circuito de vapor-agua. Se introduce un agente reductor orgánico que consiste en carbono, hidrógeno y oxígeno en el circuito de vapor-agua, controlándose la concentración del agente reductor de modo que en el circuito de vapor-agua se establezca una concentración de oxígeno predeterminada de preferentemente no más de 0,1 mg/kg, mientras prevalecen las condiciones reductoras dentro del generador de vapor.
- 45 **[0025]** Limitar la concentración de oxígeno en el circuito de vapor-agua permite el modo operativo AVT(O) del circuito de vapor-agua y, por lo tanto, asegura suficiente resistencia a la corrosión por erosión en el circuito de vapor-agua. Por ejemplo, las capas protectoras de hematita se forman en superficies de acero, y las capas protectoras de óxido de cobre (I) se forman en superficies que contienen cobre, reduciendo la tasa de corrosión de estos materiales. Al mismo tiempo, la radiación gamma presente en el generador de vapor permite que se aplique allí un modo operativo AVT(R) que garantiza la resistencia a la corrosión necesaria de las piezas en el generador de vapor.
- 50 **[0026]** Según una realización ventajosa, se establece un pH de más de 7, particularmente preferentemente de más de 8,5 en el circuito de vapor-agua. Además, a medida que se reduce la solubilidad de los óxidos de hierro a un pH alto, las superficies de acero en el circuito de vapor-agua están protegidas de la corrosión por este procedimiento.
- 55
- 60
- 65

[0027] Según otra realización ventajosa, la concentración del agente reductor se mide continuamente, lo que permite un monitoreo y control del procedimiento muy preciso que conduce a ahorros de costos.

5 **[0028]** En una realización preferida de la invención, el consumo del agente reductor en el generador de vapor se determina continuamente. Al hacerlo, se pueden extraer conclusiones con respecto a las condiciones en el circuito de vapor-agua, lo que permite un monitoreo seguro del sistema.

10 **[0029]** En otra realización preferida de la invención, el circuito de vapor-agua comprende una porción de agua de alimentación y una porción de condensado principal, analizándose y utilizándose el contenido de oxígeno en el condensado principal y/o en el agua de alimentación como una variable de control para la concentración del agente reductor. De esta manera, se monitorea la calidad del agua y se garantizan condiciones constantes en el circuito de vapor-agua. La concentración del agente reductor en el agua de alimentación se encuentra preferentemente en el intervalo de $10E-6$ mol/kg a $10E-3$ mol/kg. Cuando se utiliza metanol como agente reductor, estas concentraciones
15 corresponden a un intervalo de aproximadamente $10 \mu\text{g/kg}$ a 35mg/kg .

[0030] Según una realización preferida de la invención, el generador de vapor tiene un espacio de circulación en el que circula agua circulante para absorber el calor del circuito de refrigerante primario. El espacio de circulación comprende el espacio formado por la carcasa del generador de vapor y la vaina que rodea las instalaciones de
20 transferencia de calor. La concentración del agente reductor en el agua circulante se encuentra preferentemente en el intervalo de $10E-7$ mol/kg a $10E-3$ mol/kg, preferentemente de $3 \times 10E-7$ mol/kg a $3 \times 10E-4$ mol/kg. Cuando se utiliza metanol, estos valores corresponden a un intervalo de aproximadamente $1 \mu\text{g/kg}$ a 35mg/kg o de 3 a 10 mg/kg. Debido al ajuste de la concentración del agente reductor se garantiza que, durante el funcionamiento de la planta, siempre habrá condiciones reductoras en el generador de vapor.

25 **[0031]** Según una realización preferida de la invención, el circuito de vapor-agua tiene una porción de agua de alimentación con una entrada de agua de alimentación y el generador de vapor comprende un espacio de circulación en el que circula agua circulante para absorber el calor del circuito refrigerante primario, determinándose la concentración del agente reductor en el agua de alimentación o adicional o alternativamente en el agua circulante
30 mediante caudalímetros TOC (TOC = carbono orgánico total). Al determinar la concentración del agente reductor se puede ajustar la medición del agente reductor y es posible un monitoreo continuo del sistema.

[0032] En una realización ventajosa, el circuito de vapor-agua comprende un espacio de circulación, midiéndose el potencial de redox y/o corrosión en el agua circulante del generador de vapor por medio de un sensor
35 de potencial. El potencial de corrosión se define como el potencial de electrodo del material en contacto con el medio circundante contra un electrodo de referencia disponible en el mercado, por ejemplo, un electrodo Ag/AgCl. Al monitorear la calidad del agua en el agua circulante, se pueden establecer y mantener específicamente condiciones reductoras en el agua circulante del generador de vapor.

40 **[0033]** En otra realización ventajosa, el circuito de vapor-agua comprende un espacio de circulación, midiéndose el potencial redox en el agua circulante continuamente y se utiliza como una variable de control para la medición del agente reductor. Al hacerlo, se pueden compensar específicamente las fluctuaciones relacionadas con el funcionamiento en la concentración del agente reductor, asegurando así condiciones definidas.

45 **[0034]** Según una realización preferida de la invención, el potencial de redox y/o corrosión para ajustar las condiciones de oxidación en el circuito de vapor-agua y, al mismo tiempo, el potencial de redox y/o corrosión en el agua circulante del generador de vapor se miden para ajustar y garantizar condiciones reductoras en el generador de vapor. Condiciones de oxidación significa que el potencial redox del medio respectivo a la temperatura de funcionamiento es más de 0 V, preferentemente más de 10 mV, medido contra el electrodo de hidrógeno en
50 condiciones estándar, con una concentración de oxígeno predeterminada de preferentemente 0,1 mg/kg en el medio que no se permite que se exceda. De esta manera, el funcionamiento simultáneo del generador de vapor en condiciones AVT(R) y del circuito de vapor-agua en condiciones AVT(O) se puede monitorear y controlar en el mismo circuito utilizando el mismo refrigerante.

55 **[0035]** Otro objeto de la invención es el uso del procedimiento descrito para la preservación del tiempo de inactividad del generador de vapor, siendo la concentración del agente reductor en el lado secundario de $5 \times 10E-6$ a $5 \times 10E-2$ mol/kg, correspondiente a aproximadamente $30 \mu\text{g/kg}$ a 1000mg/kg de metanol. Incluso durante el tiempo de inactividad del reactor, los generadores de vapor nuclear exhiben altos campos de radiación. Por lo tanto, los compuestos C, H, O de bajo peso molecular ($M < 800 \text{g/mol}$) también son adecuados para la preservación del tiempo
60 de inactividad, ya que los rayos gamma necesarios están presentes en una cantidad suficiente para que los compuestos C, H, O en el lado secundario de los generadores de vapor nuclear puedan actuar como depuradores de oxígeno.

[0036] Otras ventajas y características se pueden ver en la siguiente descripción junto con el dibujo adjunto
65 que, sin embargo, no se debe entender como limitante. La única figura muestra:

- una vista esquemática de un circuito de vapor-agua simplificado en una planta de energía nuclear de la presente invención.

- 5 **[0037]** En la única figura se muestra una planta de energía nuclear 10 que comprende un circuito de refrigerante primario 12 y un circuito de vapor-agua 14 separado de este que comprende un reactor 16 a través del cual fluye el circuito de refrigerante primario 12, y un generador de vapor 18, un condensador 20 y un recipiente de agua de alimentación 22 en el circuito de vapor-agua 14.
- 10 **[0038]** Preferentemente, el reactor 16 es un reactor de agua a presión. El calor generado en el reactor 16 se transporta a través del circuito de refrigerante primario 12 al generador de vapor 18 donde se transfiere al circuito de vapor-agua 14. En una primera turbina de alta presión 24 y en una segunda turbina de baja presión 26, la energía térmica del vapor de agua caliente se convierte en energía cinética que finalmente se utiliza para accionar generadores (no mostrados) y, por lo tanto, para generar energía eléctrica.
- 15 **[0039]** En el condensador 20, el vapor de agua enfriado se transfiere a su fase líquida formando el condensado principal. Con este fin, el condensador 20 se enfría mediante una línea de suministro de agua de enfriamiento 28 y los gases residuales calientes se descargan a través de una bomba de gas residual 30. Las pérdidas se compensan mediante una línea de suministro de agua de equilibrio 32.
- 20 **[0040]** El condensado principal se transporta desde la porción de condensado principal 34 que conduce desde el condensador 20 al recipiente de agua de alimentación 22 a través de una bomba de condensado principal 36 hacia el recipiente de agua de alimentación 22. En el recipiente de agua de alimentación 22, el condensado principal, así como el agua de un separador de agua 38, ubicado entre la turbina de alta presión 24 y la turbina de baja presión 26, se recogen y mantienen para su suministro al generador de vapor como agua de alimentación.
- 25 **[0041]** En la porción de agua de alimentación 40 que conduce desde el recipiente de agua de alimentación 22 a una alimentación de agua de alimentación 54 en el generador de vapor, el agua de alimentación, por medio de una bomba de agua de alimentación 42, se bombea nuevamente hacia el generador de vapor 18 donde se reutiliza para absorber calor y el circuito secundario de vapor-agua 14 se cierra. En la porción de agua de alimentación 40, entre el recipiente de agua de alimentación 22 y la bomba de agua de alimentación 42, se ubica un punto de medición 44 donde se introduce un agente reductor que consiste en carbono, hidrógeno y oxígeno, preferentemente metanol, en el circuito de vapor-agua 14 por medio de un dispositivo de medición 46.
- 30 **[0042]** En el generador de vapor 18, el agente reductor está expuesto a radiación gamma y actúa como depurador de oxígeno. Se proporciona un dispositivo 50 para medir continuamente la concentración del agente reductor y el potencial redox en el espacio de circulación 48 del generador de vapor. Con este fin, el dispositivo 50 comprende una sonda de medición de potencial 58.
- 35 **[0043]** Como alternativa o, además, la concentración del agente reductor en el agua circulante se puede medir continuamente mediante un caudalímetro de TOC 56 en una línea de muestreo 60 que sale del generador de vapor 18. Dado que no hay campo de radiación en la línea de muestreo 60, la concentración de agentes reductores, en particular alcoholes, en la línea de muestreo 60 no cambia.
- 40 **[0044]** Además, la alimentación de agua de alimentación 54 puede proporcionarse adicionalmente con una línea de muestreo 61 aguas arriba del generador de vapor 18 para realizar mediciones por medio de un caudalímetro de TOC 56 y/o una sonda de medición de potencial 58.
- 45 **[0045]** Los calentadores intermedios 52 están ubicados entre el separador de agua 28 y la turbina de baja presión 26, así como en la porción de condensado principal 34 y la porción de agua de alimentación 40 que se utilizan para devolver la energía térmica liberada nuevamente al circuito de vapor-agua 14.
- 50 **[0046]** A continuación, el procedimiento para operar la planta de energía nuclear 10 se describe mediante el ejemplo de una planta de 1000 MW que utiliza metanol como agente reductor.
- 55 **[0047]** Para la puesta en marcha y el funcionamiento eléctrico del reactor 16, se establece una concentración de metanol de 3 µg/kg a 10 mg/kg en el agua circulante del generador de vapor. La concentración de metanol establecida para el agua de alimentación es de 2 a 3 veces mayor para compensar las pérdidas causadas por la evaporación más fácil del metanol y la desgasificación.
- 60 **[0048]** Para la preservación del tiempo de inactividad, se proporciona una concentración de metanol de 30 µg/kg a 1000 mg/kg en el generador de vapor en el lado secundario.
- 65 **[0049]** La cantidad diaria de metanol que debe suministrarse durante el funcionamiento eléctrico para obtener una concentración correspondiente depende de la producción de la planta y se encuentra aquí en el intervalo de 16

kg/d a 41 kg/d. Por lo tanto, en el caso de un tanque de agente reductor convencional que tiene un volumen de tanque de 1500 l, un llenado de tanque es suficiente para transportar metanol al circuito de vapor-agua 14 durante varias semanas antes de que el tanque tenga que rellenarse. Debido a los mayores flujos de agua de alimentación, las cantidades de metanol para una planta de 1300 MW se elevan en aproximadamente un 25 por ciento.

- 5
- [0050]** La inyección de metanol en el circuito de vapor-agua permite ajustar las condiciones oxidativas en el circuito de vapor-agua 14 fuera del generador de vapor 18 (modo operativo AVT(O)), manteniéndose la concentración de oxígeno en el circuito de vapor-agua 14 a menos de 0,1 mg/kg según la norma VGB.
- 10 **[0051]** Además, se establece un pH superior a 9,5 en el circuito de vapor-agua 14. El pH alcalino se establece preferentemente mediante el uso de compuestos de nitrógeno volátiles tales como amoníaco y otras aminas orgánicas, particularmente preferentemente amoníaco.
- [0052]** Preferentemente, el metanol se introduce en el circuito de vapor-agua 14 aguas abajo del recipiente de agua de alimentación 22 en el punto de medición 44 por medio del dispositivo de medición 46 a medida que parte del metanol se pierde al desgasificarse en el recipiente de agua de alimentación 22, permitiendo así que el metanol utilizado se utilice de manera más eficiente.
- 15
- [0053]** En una realización (no mostrada) de una planta de energía nuclear 10 sin un recipiente de agua de alimentación 22 puede ser ventajoso elegir, en lugar del punto de medición 44, un punto de medición alternativo, por ejemplo, directamente aguas arriba del generador de vapor 18 o directamente aguas abajo del separador de agua 38. También es posible que se proporcionen varios puntos de medición 44 en el circuito de vapor-agua 14. Por regla general, el punto de medición 44 más adecuado para la planta respectiva debe determinarse junto con el operador.
- 20
- [0054]** El metanol y otros compuestos orgánicos de bajo peso molecular solubles en agua que consisten en carbono, hidrógeno y oxígeno no se eliminan en las instalaciones de purificación de agua (no mostradas) y, por lo tanto, también se pueden introducir en el circuito de vapor-agua 14 aguas arriba de las instalaciones de purificación de agua. Esto ofrece una ventaja a medida que se amplía la cantidad de posibles puntos de medición 44 en la planta eléctrica 10.
- 25
- [0055]** Especialmente, en las plantas de energía nuclear 10, los puntos de medición existentes 44 utilizados para la medición de agentes reductores tales como hidracina también se pueden usar para introducir metanol. Cuando se usan compuestos C, H, O, se puede omitir la adición de las llamadas aminas alternativas tales como etanolamina (ETA), dimetilamina (DMA), metoxipropilamina (MPA) o morfolina. Por lo tanto, incluso se pueden usar aquellos dispositivos de medición posiblemente existentes 46 que son generalmente adecuados para la medición de metanol.
- 30
- [0056]** Para medir y ajustar la concentración de metanol en el circuito de vapor-agua 14 se monitorea el contenido de oxígeno en el condensado principal de la porción de condensado principal 34 y en el agua de alimentación de la porción de agua de alimentación 40. Con este fin, se realizan mediciones continuas utilizando sensores disponibles en el mercado con una precisión de medición en el intervalo de ppb ($\mu\text{g}/\text{kg}$). Como este procedimiento de medición es continuo, las señales medidas se pueden usar como una variable de entrada para el control del procedimiento.
- 35
- [0057]** En comparación con eso, cuando se usa hidracina como agente reductor según los procedimientos más avanzados, la concentración de hidracina en el circuito de vapor-agua 14 se determina mediante mediciones fotométricas. Se trata de un procedimiento de medición discontinua cuya frecuencia de análisis es mayoritariamente de una semana. Para la operación de arranque, la concentración de hidracina del agua circulante se especifica como la cantidad medida. Para el funcionamiento eléctrico, el contenido de hidracina del agua de alimentación se especifica como variable de monitoreo. La hidracina debe medirse en el agua de alimentación durante el funcionamiento eléctrico, ya que la descomposición térmica de hidracina según la reacción $3 \text{N}_2\text{H}_4 \div 4 \text{NH}_3 + \text{N}_2$ en el agua circulante se lleva a cabo a una velocidad muy alta, de modo que las mediciones en el agua circulante no producen ningún resultado evaluable. Incluso durante la medición de la concentración de hidracina en el agua de alimentación se producen fluctuaciones sustanciales de los valores medidos debido a la descomposición térmica de la hidracina que tiene lugar entre el muestreo y la medición.
- 40
- [0058]** Por las razones mencionadas, no es posible el monitoreo continuo del procedimiento y, en su caso, el control de la concentración del agente reductor en el agua de alimentación cuando se utiliza hidracina. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, se establecen concentraciones de hidracina lo suficientemente altas como para garantizar condiciones reductoras en el generador de vapor 18 incluso cuando el contenido de oxígeno en el circuito de vapor-agua 14 aumenta por razones operativas. Esto provoca un consumo innecesariamente alto de hidracina y aumenta los costos de funcionamiento de la planta. En particular en el caso de la hidracina, esto se ve agravado por el hecho de que la manipulación y el uso de productos químicos han sido estrictamente limitados por los requisitos legales. Por esta razón, la concentración de soluciones de hidracina que se permiten almacenar y manipular en plantas de energía nuclear 10, por ejemplo, no es en parte superior al 15 %.
- 45
- 50
- 55
- 60
- 65

[0059] La concentración de metanol y otros compuestos C, H, O de bajo peso molecular, sin embargo, se mide continuamente en el agua de alimentación y en el agua circulante que circula en el espacio de circulación 48 del generador de vapor 18 mediante caudalímetros de TOC 56 disponibles en el mercado a través de líneas de muestreo 60, 61.

5

[0060] Preferentemente, estas mediciones continuas se pueden complementar con procedimientos analíticos discontinuos adicionales que, por ejemplo, se pueden usar para diferenciar entre diversos compuestos orgánicos.

[0061] Los dispositivos analíticos y procedimientos analíticos disponibles en el mercado también permiten la medición continua de la concentración de metanol y otros compuestos C, H, O que tienen un efecto reductor bajo la influencia de la radiación gamma tanto en el agua circulante como en el agua de alimentación.

[0062] La experiencia con plantas industriales muestra que, en calderas de vapor convencionales, el metanol es térmicamente estable incluso a temperaturas de hasta 530 °C y presiones de 270 bar. Sin embargo, si los oxidantes también están presentes en las calderas de vapor convencionales, se produce una descomposición oxidativa del metanol. La descomposición puramente térmica del metanol en el agua circulante de los generadores de vapor 18, sin embargo, es insignificamente pequeña, lo que permite ajustar y controlar la concentración del agente reductor en el agua de alimentación necesaria para el respectivo estado de funcionamiento de la planta en función del consumo actual de metanol en el generador de vapor.

20

[0063] Por lo tanto, el consumo actual de metanol en el generador de vapor 18 a través de la unión al oxígeno y otras reacciones radicales se determina preferentemente mediante mediciones continuas que tienen lugar en el agua circulante y el agua de alimentación. El recambio total de metanol en el generador de vapor 18 se compone básicamente de dos componentes:

25

(1) descomposición radiolítica por la radiación gamma que actúa en el lado secundario del generador de vapor 18 (tasa metabólica);

30

(2) descomposición oxidativa de metanol inducida por radiación por oxígeno u otras sustancias oxidantes en el generador de vapor 18, tales como iones de cobre y óxidos de cobre u óxidos e hidróxidos de hierro trivalentes.

[0064] La introducción de oxígeno en el generador de vapor 18 se conoce a partir de la medición continua del contenido de oxígeno en el condensado principal y en el agua de alimentación. Al evaluar las fases operativas con un contenido de oxígeno elevado o al aumentar específicamente el contenido de oxígeno en el agua de alimentación, el consumo de metanol por oxidación inducida por radiación puede determinarse y ajustarse exactamente de manera que las condiciones reductoras en los generadores de vapor 18 siempre estén garantizadas. Esto permite ajustar las condiciones oxidativas en el circuito de vapor-agua 14 fuera de los generadores de vapor 18 (operación AVT(O)) y garantizar simultáneamente condiciones reductoras en los generadores de vapor 18 (operación AVT(R)).

40

[0065] Si, por ejemplo, se registra un aumento rápido y significativo en la concentración de oxígeno en el condensado principal y en el agua de alimentación, la concentración del agente reductor en el agua de alimentación y, por lo tanto, el recambio de metanol en el generador de vapor se puede aumentar inmediatamente mediante este ajuste.

45

[0066] El control y la regulación de señales también se pueden integrar en la tecnología de control de plantas.

[0067] Por lo tanto, el uso de compuestos C, H, O de bajo peso molecular como agentes reductores permite, entre otras cosas, el monitoreo y control de procedimientos optimizados para necesidades muy precisos.

REIVINDICACIONES

1. Planta de energía nuclear (10) que tiene un circuito de refrigerante primario (12), un circuito de vapor-agua (14) separado del circuito de refrigerante primario (12) y un generador de vapor (18) conectado al circuito de refrigerante primario (12) y al circuito de vapor-agua (14) para la transferencia de calor del circuito de refrigerante primario (12) al circuito de vapor-agua (14), donde el circuito de vapor-agua (14) tiene al menos un punto de medición (44) para la introducción de un agente reductor en el circuito de vapor-agua (14), donde el agente reductor es un compuesto orgánico que consiste en carbono, hidrógeno y oxígeno, **caracterizada porque** el circuito de vapor-agua (14) tiene medios (50, 56, 58) para controlar la concentración del agente reductor, mediante el cual se establece una concentración de oxígeno predeterminada en el circuito de vapor-agua (14), mientras que prevalecen condiciones reductoras dentro del generador de vapor (18).
2. La planta de energía nuclear según la reivindicación 1, **caracterizada porque** el agente reductor actúa como depurador de oxígeno bajo la influencia de la radiación gamma.
3. La planta de energía nuclear según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** el agente reductor se selecciona del grupo que consiste en alcoholes C1-C6, aldehídos y cetonas o mezclas de los mismos.
4. La planta de energía nuclear según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** el agente reductor es un alcohol C1-C6, preferentemente metanol.
5. La planta de energía nuclear según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** el circuito de vapor-agua (14) comprende un condensador (20) y una bomba de condensado principal (36), y el punto de medición (44) está dispuesto entre el condensador (20) y la bomba de condensado principal (36).
6. La planta de energía nuclear según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** el circuito de vapor-agua (14) comprende un recipiente de agua de alimentación (22), y el punto de medición (44) está dispuesto aguas abajo del recipiente de agua de alimentación (22).
7. La planta de energía nuclear según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada porque** al menos un dispositivo (50) para medir la concentración del agente reductor y/o el potencial redox se proporciona en el circuito de vapor-agua (14).
8. Procedimiento de funcionamiento de una planta de energía nuclear (10) según la reivindicación 1, donde la planta de energía nuclear (10) comprende un circuito de refrigerante primario (12), un circuito de vapor-agua (14) separado del circuito de refrigerante primario (12) y un generador de vapor (18) conectado al circuito de refrigerante primario (12) y el circuito de vapor-agua (14) para la transferencia de calor del circuito de refrigerante primario (12) al circuito de vapor-agua (14), donde un agente reductor orgánico que consiste en carbono, hidrógeno y oxígeno se introduce en el circuito de vapor-agua (14), **caracterizado porque** la concentración del agente reductor se controla de modo que se establece una concentración de oxígeno predeterminada de preferentemente como máximo 0,1 mg/kg en el circuito de vapor-agua (14) mientras que prevalecen las condiciones reductoras dentro del generador de vapor (18).
9. El procedimiento según la reivindicación 8, **caracterizado porque** se establece un valor de pH superior a 7 en el circuito de vapor-agua (14).
10. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 o 9, **caracterizado porque** se realiza una medición continua de la concentración del agente reductor.
11. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, **caracterizado porque** el consumo del agente reductor en el generador de vapor (18) se determina continuamente.
12. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, **caracterizado porque** el circuito de vapor-agua (14) comprende una sección de agua de alimentación (40) y una sección de condensado principal (34), donde se analiza el contenido de oxígeno en el condensado principal y/o en el agua de alimentación y se utiliza como una variable de control para la concentración del agente reductor.
13. El procedimiento según la reivindicación 8 o 12, **caracterizado porque** el generador de vapor (18) tiene un espacio de circulación (48), en el que circula agua circulante para recibir calor del circuito de refrigerante primario (12), donde la concentración del agente reductor en el agua circulante está en un intervalo de $10E-7$ mol/kg a $10E-3$ mol/kg, preferentemente de $3x10E-7$ a $3x10E-4$ mol/kg.
14. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 13, **caracterizado porque** el circuito de vapor-agua (14) tiene una sección de agua de alimentación (40) con una alimentación de agua de alimentación

(54), y porque el generador de vapor (18) comprende un espacio de circulación (48), en el que circula agua circulante para recibir calor del circuito de refrigerante primario (12), donde la concentración del agente reductor en el agua de alimentación y/o en el agua circulante se determina mediante el uso de caudalímetros TOC (56).

- 5 15. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 14, **caracterizado porque** el circuito de vapor-agua (14) comprende un espacio de circulación (48), donde el potencial de redox y/o corrosión en el agua circulante del generador de vapor (18) se mide mediante una sonda de medición de potencial (58).
16. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 15, **caracterizado porque** el circuito de vapor-agua (14) comprende un espacio de circulación (48), donde el potencial redox en el agua circulante se mide continuamente y se utiliza como una variable de control para la medición del agente reductor.
17. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 16, **caracterizado porque** se mide el potencial de redox y/o corrosión para regular las condiciones de oxidación en el circuito de vapor-agua (14) y, al mismo tiempo, se mide el potencial de redox y/o corrosión en el agua circulante del generador de vapor (18) para regular las condiciones reductoras.
- 15 18. Uso del procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 17 para la preservación en reposo del generador de vapor (18), **caracterizado porque** la concentración del agente reductor en el agua del generador de vapor está en un intervalo de 5×10^{-6} mol/kg a 5×10^{-2} mol/kg.
- 20

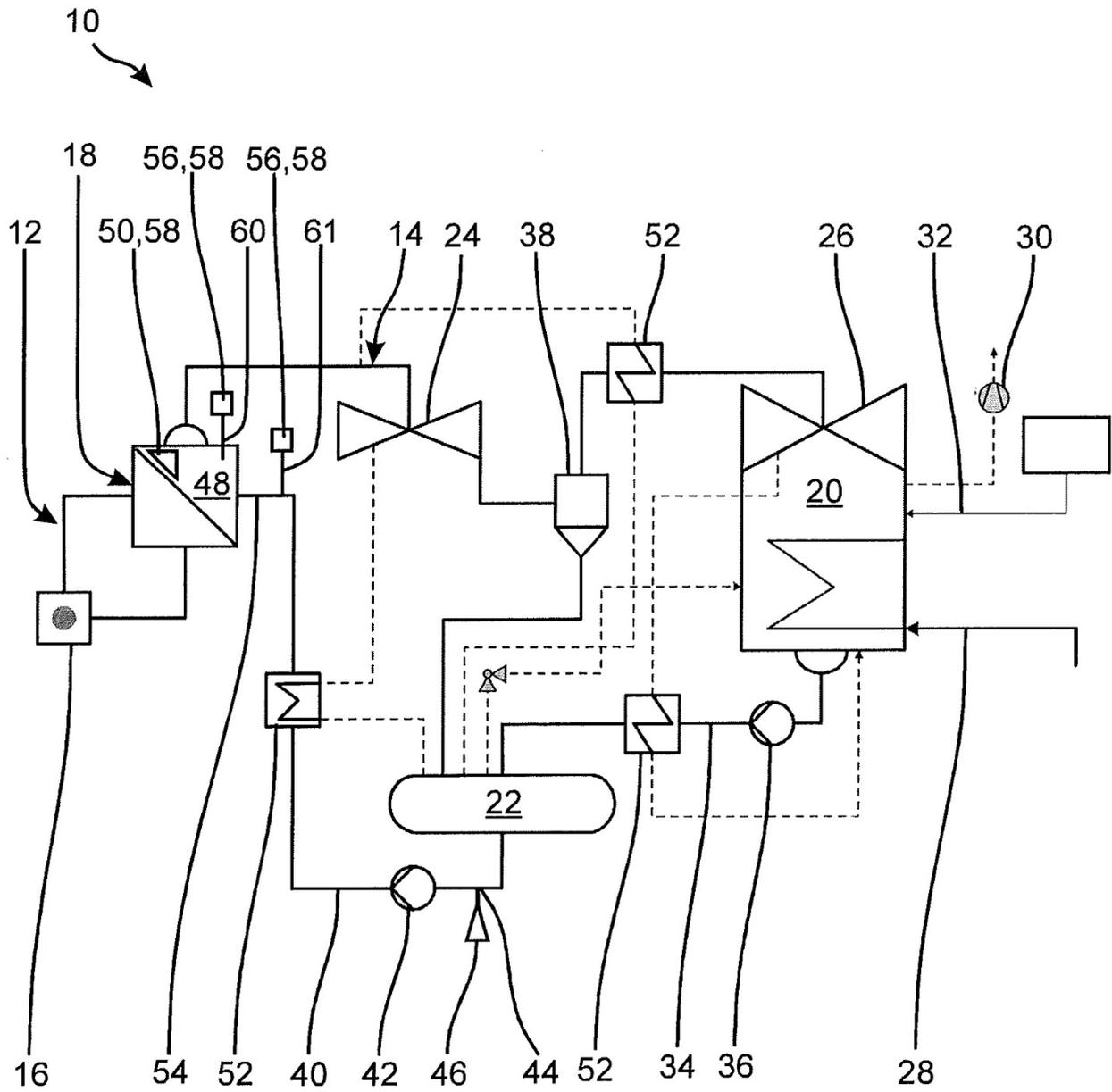


Fig. 1