

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 545 179**

51 Int. Cl.:

G21C 17/02 (2006.01)

G21D 3/04 (2006.01)

G21D 3/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.10.2007 E 07118186 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.05.2015 EP 2048670**

54 Título: **Procedimientos y dispositivos relativos a un reactor nuclear de agua ligera del tipo de agua en ebullición**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
09.09.2015

73 Titular/es:
**WESTINGHOUSE ELECTRIC SWEDEN AB
(100.0%)
721 63 Västerås, SE**

72 Inventor/es:
**NORBÄCK, GUNILLA y
ADAMSSON, CARL**

74 Agente/Representante:
ARIAS SANZ, Juan

ES 2 545 179 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

Procedimientos y dispositivos relativos a un reactor nuclear de agua ligera del tipo de agua en ebullición

5 La presente invención se refiere a la determinación de las propiedades de desecación en reactores nucleares de agua ligera, más concretamente en un reactor de agua en ebullición (BWR). La invención se refiere en concreto a un procedimiento para determinar el denominado factor R, que se utiliza cuando se determinan las propiedades de desecación de un reactor nuclear de agua en ebullición. El (los) factor(es) R es un concepto conocido por un experto en la técnica y que tiene en cuenta la influencia de la potencia local ponderada sobre una barra de combustible nuclear, incluyendo contribuciones de las barras de combustible próximas.

La invención se refiere asimismo a un procesador configurado para determinar automáticamente el factor R.

10 Las barras de combustible en el núcleo de un BWR se agrupan en paquetes con separadores y habitualmente también placas terminales para mantener las barras de combustible en cada paquete con una geometría predeterminada. La red de barras predeterminada puede ser regular o irregular e incluso variar axialmente. Los paquetes se encierran a continuación mediante canales para dirigir el flujo de refrigerante hacia arriba y otorgar al conjunto de combustible una estabilidad mecánica y termohidráulica y facilitar el manejo y cambio del combustible. Un conjunto de combustible puede
15 comprender varios (por ejemplo 4) paquetes (denominados a veces también como subpaquetes) de barras de combustible. En otras construcciones, cada conjunto de combustible incluye solo un paquete de barras de combustible.

El paquete de combustible puede variar considerablemente de tamaño en lo que concierne al número de barras de combustible y puede contener asimismo barras de propósito especial tales como tirantes, barras de agua y barras de absorción que se pueden quemar. El paquete puede comprender tanto barras de longitud completa como las denominadas barras de longitud parcial, que son esencialmente más cortas que las barras de longitud completa. El enriquecimiento del material fisible puede variar dentro de la barra de combustible y puede variar igualmente de barra de combustible a barra de combustible. La presente invención es aplicable a todas estas disposiciones de combustible y a su funcionamiento en el reactor.

20 Como es bien conocido por un experto en la técnica, en un BWR un medio de refrigeración en forma de agua fluye a través de los conjuntos de combustible, que contienen las barras de combustible. El propósito del agua es refrigerar las barras de combustible y actuar como un moderador de neutrones. Una mezcla de vapor y agua fluye a través del paquete de combustible, proporcionando refrigeración para las barras por transferencia térmica por convección y ebullición. A medida que aumenta la calidad del vapor (la fracción de contenido de vapor) del refrigerante, el patrón de flujo cambia. En un cierto punto en el paquete se forma un patrón de flujo anular. Esto implica la existencia de una película de líquido delgada sobre la superficie de las barras y una mezcla de vapor y gotitas en los canales entre las barras. La existencia de esta película permite una eficiente transferencia de calor de las barras al refrigerante. Esto permite tanto una generación efectiva de vapor como evitar que las barras se sobrecalienten. La pérdida de esta película se denomina como desecación.

30 En un BWR, se debe evitar la desecación. La desecación deteriora la transferencia de calor de las barras de combustible al medio de refrigeración del reactor y por lo tanto conduce a un aumento en la temperatura de las paredes de las barras de combustible. El aumento de temperatura puede dañar las barras de combustible. Si un BWR funciona a, o por encima de, una cierta alta potencia, la denominada potencia crítica (CP), puede ocurrir la desecación. Con el fin de evitar la desecación, el reactor funciona por lo tanto a menor potencia, de tal modo que exista un cierto margen de seguridad, el denominado margen de desecación. Una medida del margen de desecación es el cociente de potencia crítica (CPR). El CPR se puede definir como el siguiente cociente

$$\text{CPR} = (\text{potencia crítica})/(\text{potencia real})$$

El CPR se puede calcular localmente para un gran número de puntos en el núcleo del reactor. El valor mínimo del CPR en cualquier punto se denomina cociente de potencia crítica mínimo MCPR.

45 En lo que sigue, potencia crítica y flujo de calor crítico y calidad del vapor crítica se tratan como sinónimos o entidades equivalentes ya que existen leyes de transformación física directa entre ellos en el funcionamiento en estado estacionario. Conociendo el flujo de refrigerante y la entalpía de entrada, la calidad del vapor proporciona directamente la potencia del conjunto de combustible con datos termodinámicos del vapor/agua y viceversa.

50 En el estado de la técnica anterior se conocen diferentes procedimientos de determinar la potencia crítica. El documento EP 1 775 732 A1 y la solicitud de patente estadounidense correspondiente 11/512.938, describen uno de tales procedimientos. Independientemente de con qué procedimiento se determina la potencia crítica, es necesario habitualmente tomar en consideración el factor R anteriormente mencionado. El factor R se menciona igualmente en el

documento EP 1 775 732 A1 anteriormente citado (y en la correspondiente solicitud estadounidense de patente).

De acuerdo con el estado de la técnica anterior, el factor R para una cierta barra de combustible en un paquete de barras de combustible se determina normalmente tomando en consideración el efecto de barras de combustible próximas y utilizando una función de ponderación predeterminada para la variación axial del factor R. Esta función de ponderación es normalmente tal que los niveles superiores del paquete de combustible tienen un mayor peso que los niveles inferiores. La función de ponderación es común para todas las barras de combustible en el paquete. Además, los niveles por encima de barras de longitud parcial están compensados normalmente por el uso de constantes aditivas muy altas. De este modo, de acuerdo con el estado de la técnica anterior, es posible determinar un factor R para cada barra de combustible en el paquete de barras de combustible. El factor R máximo para las diferentes barras de combustible en el paquete de combustible se toma como el factor R para el paquete en su conjunto. Este factor R se utiliza al determinar el cociente de potencia crítica para el paquete de combustible en cuestión.

Resumen de la invención

Un objeto de la presente invención es proporcionar un procedimiento mejorado para determinar el (los) factor(es) en un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. Un objeto adicional es proporcionar un procedimiento tal que toma mejor en consideración las propiedades de las barras de combustible individuales que de acuerdo con el estado de la técnica anterior. Otro objeto es proporcionar un procedimiento tal que da como resultado un factor R más preciso o factores R más precisos para un paquete de combustible que incluye barras de combustible de longitud parcial. Estos objetos se consiguen mediante un procesador como se define en la reivindicación 1.

De acuerdo con la invención, se determina así un factor R local ($R_i(z)$) para cada barra de combustible (i) en dicho paquete y para cada uno de una pluralidad de niveles (z) en la dirección axial. Además, el perfil axial de generación de calor individual para una cierta barra de combustible (i) se toma en consideración al determinar los factores R locales ($R_i(z)$) para dicha barra de combustible (i). Con este procedimiento, se pueden determinar con mayor precisión los factores R y por lo tanto las propiedades de desecación que con procedimientos anteriores.

Con la presente invención no es necesario por tanto utilizar la función de ponderación predeterminada anteriormente descrita para la variación axial del factor R. Tal función de ponderación predeterminada podría no estar optimizada para cada nivel de cada barra de combustible. Sin embargo, con la presente invención, los factores R locales se pueden determinar con precisión ya que se utilizan los perfiles axiales de generación de calor individuales para las barras de combustible al determinar los factores R locales. Además, con la presente invención se pueden determinar con precisión igualmente los factores R locales para barras de combustible más cortas (denominadas barras de longitud parcial), ya que se utiliza el perfil axial de generación de calor individual para las barras de combustible al determinar los factores R locales. Con la presente invención no es necesario por lo tanto compensar para las barras de combustible más cortas mediante el uso de las constantes aditivas muy altas anteriormente mencionadas.

De acuerdo con una implementación preferida de la invención, dicho número de niveles es por lo menos igual a 10. Utilizando por lo menos 10 niveles, el perfil del factor R se determina con una precisión aceptable.

Aunque los factores R locales se podrían determinar para un número infinito de niveles (continuamente en la dirección axial), es preferible determinar los factores R locales para un número limitado de niveles en la dirección axial, con el fin de facilitar la determinación. El número de niveles podría estar, por ejemplo, entre 15 y 50, preferiblemente entre 20 y 30, por ejemplo 25.

Preferiblemente, dicho paquete de barras de combustible nuclear incluye por lo menos 15 barras de combustible. El paquete puede ser un denominado subpaquete y el número de barras de combustible en este paquete puede ser por ejemplo de 24. Alternativamente, el paquete puede incluir un mayor número de barras de combustible, por ejemplo todas las barras de combustible de un conjunto de combustible.

De acuerdo con un modo preferido de llevar a cabo la invención, el procesador determina un factor R total (R_z) para cada uno de dichos niveles (z) para el paquete de barras de combustible en su conjunto, en el que dicho factor R total (R_z) en un nivel (z) se determina como el máximo de dichos factores R locales ($R_i(z)$) en dicho nivel (z) en dicho paquete de barras de combustible nuclear. Tal factor R total se utiliza convenientemente al determinar las propiedades de desecación del conjunto de combustible o del subpaquete.

De acuerdo con la invención, la determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) a nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la velocidad de generación de calor doblemente integrada de dicha barra de combustible (i) hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor doblemente integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z). Tal determinación se ha identificado que proporciona un modo ventajoso de determinar los factores R locales.

Se debe observar que el concepto “integrada” no significa necesariamente en este documento que la integración es continua. Antes bien, de acuerdo con un modo de realización preferido, la “integración” se realiza para niveles discretos. Por lo tanto el símbolo integral en las fórmulas mostradas se puede entender en su lugar como un símbolo de sumatorio en lo que se refiere a tales niveles discretos.

5 Preferiblemente, dicha determinación incluye asimismo una normalización por medio de la velocidad de generación de calor integrada de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z), en donde la determinación normalizada de la velocidad de generación de calor doblemente integrada de dicha barra de combustible (i) hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor doblemente integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) se lleva a cabo determinando:

$$15 \left[\frac{\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} \bar{q}(z'') dz'' dz'}{\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} q_i(z'') dz'' dz'} \right]^a$$

o una expresión matemática equivalente, donde

z = posición axial

z' = variable de integración que representa la posición axial

20 z'' = variable de integración que representa la posición axial

$q_i(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra i en el nivel z

$\bar{q}(z)$ = velocidad lineal promedio de generación de calor de todas las barras en el paquete en el nivel z

z_0 = la posición axial de la frontera de ebullición del volumen (límite de calidad del vapor cero) en dicho paquete

a = una constante, $0 < a < 1$

25 Tal normalización facilita la determinación de la influencia del factor R en las propiedades de desecación.

De acuerdo con la invención, la determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) a un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la suma de las velocidades de generación de calor integradas de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) y una fracción de las velocidades de generación de calor integradas de las barras de combustible próximas a dicha barra de combustible hasta el nivel (z), con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z). Una determinación tal mejora la precisión de la determinación de los factores R locales.

35 La mencionada determinación de la suma de la velocidad de generación de calor integrada de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) y una fracción de las velocidades de generación de calor integradas de las barras de combustible próximas a dicha barra de combustible hasta el nivel (z), con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) se lleva a cabo preferiblemente determinando:

$$40 \frac{\left(\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \right)^b + c \sum_{j \in S_i} \left(\int_{z_0}^z q_j(z') dz' \right)^b + d \sum_{k \in D_i} \left(\int_{z_0}^z q_k(z') dz' \right)^b}{\left(1 + cN_{S_i} + dN_{D_i} \right) \left(\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \right)^b}$$

o una expresión matemática equivalente, donde los símbolos son como se explicó anteriormente y donde

$q_j(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima lateral j en el nivel z

$q_k(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima en diagonal k en el nivel z

S_i = el conjunto de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

D_i = el conjunto de barras de combustible próximas en diagonal para la barra de combustible i

5 N_{S_i} = el número de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

N_{D_i} = el número de barras de combustible vecinas en diagonal para la barra de combustible i

b = una constante, $0 < b < 1$

c = una constante, $0 < c < 1$

d = una constante, $0 < d < c$.

10 Esto ha demostrado ser un modo preciso y eficiente de realizar la determinación.

Preferiblemente, la determinación de dicho factor R local a un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) se lleva a cabo determinando:

15

$$R_i(z) = (1 + e_i) \frac{\left[\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \int_{z_0}^z \bar{q}(z'') dz'' dz' \right]^a}{\left[\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \int_{z_0}^z q_i(z'') dz'' dz' \right]^a} \frac{\left(\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \right)^b + c \sum_{j \in S_i} \left(\int_{z_0}^z q_j(z') dz' \right)^b + d \sum_{k \in D_i} \left(\int_{z_0}^z q_k(z') dz' \right)^b}{(1 + cN_{S_i} + dN_{D_i}) \left(\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \right)^b}$$

20 o una expresión matemática equivalente, donde los símbolos son como se explicó en los modos de realización anteriores y donde

e_i = la constante de sensibilidad al desecado para la barra de combustible i (denominada igualmente "constante de la barra").

25 La invención proporciona un procesador configurado para determinar automáticamente el factor R para un paquete de barras de combustible nuclear en un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. El reactor comprende una pluralidad de paquetes de barras de combustible nuclear, en los que las barras de combustible en el paquete se disponen lado con lado, por lo menos sustancialmente paralelas entre sí y se extienden esencialmente en una dirección axial. El factor R es un factor que tiene en cuenta la influencia de la potencia local ponderada sobre una barra de combustible, incluyendo contribuciones de las barras de combustible próximas. De acuerdo con la invención, el procesador se configura con una entrada de recepción de datos relativos a la velocidad lineal de generación de calor ($q_i(z)$) de las diferentes barras de combustible (i) en los diferentes niveles (z) en dicho paquete y para determinar el factor R de acuerdo con cualquiera de los modos de realización anteriores.

30

Con un procesador tal, se consiguen las ventajas descritas anteriormente en conexión con el procedimiento.

35 El procesador de la invención determina la potencia crítica para un paquete de barras de combustible nuclear en un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición, de acuerdo con uno cualquiera de los procedimientos precedentes.

Tales procedimientos prevén asimismo la determinación de la potencia crítica por medio de la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) para un paquete de barras de combustible nuclear en un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. Este procedimiento comprende lo siguiente:

40 determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) del flujo del medio de refrigeración a través del paquete de combustible nuclear ($f_i(G)$),

determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) del perfil de potencia axial del paquete de

combustible nuclear ($f_2(I_2)$),

determinar cómo depende de la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) del factor R del conjunto de combustible nuclear ($f_3(R)$),

5 determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) de la presión del medio de refrigeración en el conjunto de combustible nuclear ($f_4(P)$) y

determinar la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) basándose en las determinaciones anteriores. Este procedimiento se caracteriza porque la dependencia con el factor R se determina utilizando el procedimiento de cualquiera de los modos de realización del procedimiento descrito anteriormente para determinar el factor R.

10 La invención proporciona asimismo una central de energía nuclear que comprende un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. La central comprende una unidad de control dispuesta para llevar a cabo un procedimiento de acuerdo con cualquiera de los dos párrafos anteriores.

15 De acuerdo con un modo de realización de la central de energía nuclear, esta incluye detectores de parámetros de funcionamiento, dispuestos para detectar parámetros de funcionamiento del reactor nuclear durante su funcionamiento, en la que la unidad de control se dispone para recibir información relativa a dichos parámetros de funcionamiento procedente de los detectores y utilizar estos parámetros de funcionamiento al llevar a cabo el procedimiento.

De acuerdo con un modo de realización, la unidad de control comprende salidas de control dispuestas para controlar el funcionamiento del reactor nuclear dependiendo de dicho procedimiento llevado a cabo por la unidad de control.

Todos estos diferentes aspectos de la invención tienen ventajas en correspondencia con lo descrito anteriormente.

Breve descripción de los dibujos

20 La Fig. 1 muestra esquemáticamente una central de energía nuclear.

La Fig. 2 es un diagrama de flujo esquemático de un ejemplo de un procedimiento de control de un reactor.

La Fig. 3 es una vista esquemática de una sección transversal de un paquete de barras de combustible.

Descripción de modos de realización de la invención

25 Los diferentes aspectos de la invención se pueden utilizar en una central de energía nuclear en funcionamiento. Sin embargo, la invención como se define en las reivindicaciones 1-17 se puede utilizar igualmente antes de que la central de energía nuclear esté en funcionamiento, por ejemplo con el fin de determinar las propiedades de desecación de la central de energía nuclear antes de que esté realmente en funcionamiento. De este modo se puede garantizar el margen de desecación correcto antes de que la central esté realmente en funcionamiento.

30 La Fig. 1 muestra esquemáticamente una central de energía nuclear, que constituye un modo de realización de la presente invención.

35 La central de energía nuclear comprende un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. El reactor nuclear tiene una vasija 3 del reactor en la que se sitúa el núcleo 5 del reactor. Como es conocido por un experto en la técnica, el núcleo 5 del reactor comprende una pluralidad de paquetes de combustible nuclear, en el que las barras de combustible en el paquete se disponen lado con lado, por lo menos sustancialmente paralelas entre sí y se extienden esencialmente en una dirección axial. Se suministra agua a la vasija 3 del reactor a través de una entrada de agua 7 con la ayuda de una bomba 9. El vapor generado abandona la vasija 3 a través de una salida 11. Barras de control 13 se pueden mover con relación al núcleo 5 con la ayuda de unas unidades de actuación 15 de las barras de control.

40 La central de energía nuclear tiene una unidad de control 17, que incluye adecuadamente un ordenador. Esta unidad de control 17 se dispone para llevar a cabo la invención. La unidad de control 17 puede disponerse así para por ejemplo calcular el margen de desecación para diferentes partes del núcleo 5 del reactor nuclear al disponerse (programarse) para llevar a cabo un procedimiento por ejemplo para determinar la potencia crítica y para determinar así el factor R para un paquete de barras de combustible nuclear.

45 La unidad de control 17 se puede conectar a detectores de parámetros de funcionamiento 19 dispuestos para detectar parámetros de funcionamiento del reactor nuclear durante su funcionamiento. Los detectores 19 pueden detectar directa o indirectamente parámetros de funcionamiento tales como el flujo másico de medio de refrigeración (el agua), la presión del medio de refrigeración, la posición de las barras de control 13 en el núcleo 5 del reactor y el flujo de neutrones en

distintas partes del núcleo 5. Es conocido por el experto en la técnica cómo detectar tales parámetros de funcionamiento de un reactor nuclear.

5 La unidad de control 17 se dispone así para recibir información relativa a dichos parámetros de funcionamiento procedente de los detectores 19 y para utilizar estos parámetros de funcionamiento al llevar a cabo el mencionado procedimiento, por ejemplo para determinar un margen de desecación en diferentes partes del núcleo 5 del reactor.

Basándose en el margen de desecación calculado, un responsable del funcionamiento de la central de energía nuclear puede aumentar o disminuir la potencia con la que funciona el reactor nuclear.

10 Alternativamente, la unidad de control 17 puede tener salidas de control 21 dispuestas para controlar automáticamente el funcionamiento del reactor nuclear dependiendo de dicho procedimiento llevado a cabo por la unidad de control 17. Se debe observar que el concepto "unidad de control" como se utiliza en el presente documento incluye por tanto dos posibilidades: bien la unidad de control 17 constituye una unidad de supervisión que suministra información a una persona (el operario), que puede entonces controlar manualmente el funcionamiento de la central de energía nuclear (un bucle abierto), o bien la unidad de control 17 puede incluir medios para controlar automáticamente la central de energía nuclear (un bucle cerrado). No obstante, en ambos casos la unidad de control incluye preferiblemente medios (por ejemplo, un ordenador) dispuestos para llevar a cabo automáticamente un procedimiento de acuerdo con la invención, con el fin de proporcionar información relativa a las propiedades de desecación del reactor nuclear.

20 El experto en la técnica sabe cómo controlar la potencia de un reactor nuclear. Esto se puede llevar a cabo por ejemplo cambiando el flujo másico del medio de refrigeración, con la ayuda de la bomba 9, o cambiando la posición de las barras de control 13, con la ayuda de la unidad de actuación 15 de las barras de control. Las salidas 21 de la unidad de control 17 se pueden disponer así para variar por ejemplo el flujo másico del medio de refrigeración o la posición de las barras de control 13.

25 El procedimiento de determinación se puede proporcionar como un producto de programa de ordenador 23 que se puede cargar directamente en la memoria interna de un ordenador que puede formar parte de la unidad de control 17. El producto de programa de ordenador 23 comprende un programa de ordenador configurado para llevar a cabo un procedimiento para determinar el factor R y/o la potencia crítica para un paquete de barras de combustible nuclear en el reactor nuclear.

30 23 se puede referir asimismo a un procesador configurado para determinar automáticamente el factor R para un paquete de barras de combustible nuclear en el reactor nuclear de agua ligera. Como ya se mencionó, el factor R es un factor que tiene en cuenta la influencia ponderada de la potencia local sobre una barra de combustible, incluyendo contribuciones de barras de combustible próximas. El procesador se configura con una entrada de recepción de datos relativos a la velocidad lineal de generación de calor ($qz(z)$) de las distintas barras de combustible (i) en los distintos niveles (z) en dicho paquete y para determinar el factor R de acuerdo con la invención.

Con referencia a la Fig. 2, se describirá a continuación un ejemplo de un procedimiento de funcionamiento de una central de energía nuclear. El reactor nuclear de agua ligera es del tipo de reactor de agua en ebullición.

35 Se proporciona información relativa a los parámetros de funcionamiento del reactor nuclear como se describió anteriormente.

Esta información se utiliza en un procedimiento para determinar la potencia crítica para un paquete de barras de combustible nuclear en el reactor nuclear.

40 La potencia crítica se puede determinar de diferentes modos, por ejemplo como se describió en el documento EP 1 775 732 A1 anteriormente mencionado y la correspondiente solicitud estadounidense de patente 11/512.938. La potencia crítica se puede determinar así por medio de la calidad del vapor local en desecación (X_{Do}) para un paquete de barras de combustible nuclear mediante:

determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{Do}) del flujo del medio de refrigeración a través del paquete de combustible nuclear ($f_1(G)$),

45 determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{Do}) del perfil de potencia axial del paquete de combustible nuclear ($f_2(I_2)$),

determinar cómo depende de la calidad del vapor local en desecación (X_{Do}) del factor R del conjunto de combustible nuclear ($f_3(R)$)

determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{Do}) de la presión del medio de refrigeración en el

conjunto de combustible nuclear ($f_i(P)$) y

determinar la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) basándose en las determinaciones anteriores.. Como se explicó en los documentos anteriormente citados, la calidad del vapor local en desecación X_{DO} se puede describir por tanto como una función

5 $X_{DO} = f_1(G).f_2(I_2).f_3(R).f_4(P) + \text{términos opcionales}$

Cuando X_{DO} u otra medida adecuada de la propiedad de desecación se ha determinado, el funcionamiento del reactor nuclear se puede controlar dependiendo de la propiedad determinada, de tal modo que el reactor nuclear se opera con un margen de seguridad suficiente.

Al determinar la dependencia del factor R, el factor R se determina utilizando el procedimiento descrito a continuación.

10 El factor R se determina así para un paquete de barras de combustible nuclear en un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición, reactor que comprende una pluralidad de paquetes de barras de combustible. Las barras de combustible en el paquete se disponen lado con lado, por lo menos sustancialmente en paralelo entre sí y se extienden esencialmente en una dirección axial. El paquete de barras de combustible nuclear puede incluir, por ejemplo 24 barras de combustible. Para determinar el factor R para un paquete, en primer lugar se determina un factor R local ($R_i(z)$) para cada barra de combustible (i) en dicho paquete y para cada uno de una pluralidad de niveles (z) en dicha dirección axial. El número de niveles puede ser por ejemplo 25. El perfil de generación de calor axial individual para una cierta barra de combustible (i) se toma en consideración al determinar los factores R locales ($R_i(z)$) para dicha barra de combustible (i).

20 Un factor R total (R_z) para cada uno de dichos niveles (z) para el paquete de barras de combustible en su conjunto se puede determinar así, donde dicho factor R total (R_z) en un nivel (z) se determina como el máximo de dichos factores R locales ($R_i(z)$) en dicho nivel (z) en dicho paquete de barras de combustible nuclear.

25 La determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) en un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la velocidad de generación de calor doblemente integrada de dicha barra de combustible (i) hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor doblemente integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z). La determinación incluye asimismo una normalización por medio de la velocidad de generación de calor integrada de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z).

30 Además, la determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) en un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la suma de las velocidades de generación de calor integradas de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) y una fracción de las velocidades de generación de calor integradas de las barras de combustible próximas a dicha barra de combustible hasta el nivel (z), con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z).

La determinación de dicho factor R local en un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) puede llevarse a cabo así determinando:

35
$$R_i(z) = (1 + e_i) \frac{\left[\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \int_{z_0}^{z'} \bar{q}(z'') dz'' dz' \right]^a}{\left[\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \int_{z_0}^{z'} q_i(z'') dz'' dz' \right]^a} \frac{\left(\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \right)^b + c \sum_{j \in S_i} \left(\int_{z_0}^z q_j(z') dz' \right)^b + d \sum_{k \in D_i} \left(\int_{z_0}^z q_k(z') dz' \right)^b}{\left(1 + cN_{S_i} + dN_{D_i} \right) \left(\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \right)^b}$$

40 o una expresión matemática equivalente, donde

z = posición axial

z' = variable de integración que representa la posición axial

z'' = variable de integración que representa la posición axial

$q_i(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra i en el nivel z

\bar{q}

$\bar{v}(z)$ = velocidad lineal promedio de generación de calor de todas las barras en el paquete en el nivel z

z_0 = la posición axial de la frontera de ebullición del volumen (límite de calidad del vapor cero) en dicho paquete

$q_j(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima lateral j en el nivel z

$q_k(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima en diagonal k en el nivel z

5 S_i = el conjunto de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

D_i = el conjunto de barras de combustible próximas en diagonal para la barra de combustible i

N_{S_i} = el número de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

N_{D_i} = el número de barras de combustible vecinas en diagonal para la barra de combustible i

a = una constante, $0 < a < 1$

10 b = una constante, $0 < b < 1$

c = una constante, $0 < c < 1$

d = una constante, $0 < d < c$

e_i = la constante de sensibilidad al desecado para la barra de combustible i (denominada igualmente "constante de la barra").

15 Los conceptos utilizados son conocidos por el experto en la técnica. No obstante, con referencia a la Fig. 3, se explicará a continuación lo que significa "barras de combustible próximas laterales" y "barras de combustible próximas en diagonal". La Fig. 3 muestra esquemáticamente una sección transversal de un paquete de 24 barras de combustible. Cuatro de tales paquetes pueden formar conjuntamente un conjunto de combustible. Como ejemplo para explicar barras de combustible próximas laterales y en diagonal, se puede considerar la barra de combustible marcada como 31. Esta barra de
20 combustible tiene tres barras de combustible próximas laterales, es decir, las barras de combustible 32, 33 y 34 y dos barras de combustible próximas en diagonal, es decir, las barras de combustible 35 y 36.

La presente invención prevé así determinar el factor R y las propiedades de desecación de manera ventajosa. Así pues es posible predecir y controlar el funcionamiento de una central de energía nuclear con una mayor precisión y por lo tanto operar la central con una elevada eficiencia, a la vez que se garantiza que el margen de desecación es suficiente.

25 La invención no se limita a los modos de realización descritos, sino que puede ser variada dentro del ámbito de las reivindicaciones. Se debe observar asimismo que una expresión matemática se puede escribir normalmente de diferentes maneras y tener aun así el mismo significado. Consecuentemente, las reivindicaciones no se deben ver como limitadas a la expresión matemática exacta definida en algunas de las reivindicaciones. Así pues, las reivindicaciones pretenden cubrir expresiones equivalentes de las fórmulas. Tales transformaciones se realizan regularmente para evaluaciones
30 numéricas y se pueden diseñar a medida para una elevada precisión sobre un intervalo de aplicación predeterminado.

REIVINDICACIONES

1. Un procesador configurado para determinar automáticamente el factor R para un paquete de barras de combustible nuclear en un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición, reactor que comprende una pluralidad de paquetes de barras de combustible nuclear, en el que las barras de combustible en el paquete se disponen lado con lado, por lo menos sustancialmente paralelas entre sí y se extienden esencialmente en una dirección axial, en el que dicho factor R es un factor que tiene en cuenta la influencia de la potencia local ponderada sobre una barra de combustible, incluyendo contribuciones de las barras de combustible próximas, en el que el procesador se configura con una entrada de recepción de datos relativos a la velocidad lineal de generación de calor ($q_i(z)$) de las diferentes barras de combustible (i) en diferentes niveles (z) en dicho paquete y para determinar el factor R, caracterizado por que el procesador se configura de tal modo que se determina un factor R local ($R_i(z)$) para cada barra de combustible (i) en dicho paquete y para cada uno de una pluralidad de niveles (z) en dicha dirección axial, en el que el perfil axial de generación de calor individual para una cierta barra de combustible (i) se toma en consideración al determinar los factores R locales ($R_i(z)$) para dicha barra de combustible (i), en el que la determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) a un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la velocidad de generación de calor doblemente integrada de dicha barra de combustible (i) hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor doblemente integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) y en el que la determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) a un nivel (z) para cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la suma de las velocidades de generación de calor integradas de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) y una fracción de las velocidades de generación de calor integradas de las barras de combustible próximas a dicha barra de combustible hasta el nivel (z), con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z).
2. Un procesador de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el número de dichos niveles es por lo menos igual a 10.
3. Un procesador de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que dicho paquete de barras de combustible nuclear incluye por lo menos 15 barras de combustible.
4. Un procesador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende la determinación de un factor R total (R_z) para cada uno de dichos niveles (z) para el paquete de barras de combustible en su conjunto, en el que dicho factor R total (R_z) en un nivel (z) se determina como el máximo de dichos factores R locales ($R_i(z)$) en dicho nivel (z) en dicho paquete de barras de combustible nuclear.
5. Un procesador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha determinación incluye asimismo una normalización por medio de la velocidad de generación de calor integrada de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z), en donde la determinación normalizada de la velocidad de generación de calor doblemente integrada de dicha barra de combustible (i) hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor doblemente integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) se lleva a cabo determinando:

$$\left[\frac{\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} \bar{q}(z'') dz'' dz'}{\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} q_i(z'') dz'' dz'} \right]^a$$

o una expresión matemática equivalente, donde

z = posición axial

z' = variable de integración que representa la posición axial

z'' = variable de integración que representa la posición axial

$q_i(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra i en el nivel z

$\bar{q}(z)$ = velocidad lineal promedio de generación de calor de todas las barras en el paquete en el nivel z

z_0 = la posición axial de la frontera de ebullición del volumen (límite de calidad del vapor cero) en dicho paquete

a = una constante, $0 < a < 1$.

- 5 6. Un procesador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha determinación de la suma de la velocidad de generación de calor integrada de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) y una fracción de las velocidades de generación de calor integradas de las barras de combustible próximas a dicha barra de combustible hasta el nivel (z), con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) se lleva a cabo determinando:

$$10 \frac{\left(\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \right)^b + c \sum_{j \in S_i} \left(\int_{z_0}^z q_j(z') dz' \right)^b + d \sum_{k \in D_i} \left(\int_{z_0}^z q_k(z') dz' \right)^b}{\left(1 + cN_{S_i} + dN_{D_i} \right) \left(\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \right)^b}$$

o una expresión matemática equivalente, donde los símbolos son como se explicó en la reivindicación 5 y donde

- 15 $q_j(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima lateral j en el nivel z

$q_k(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima en diagonal k en el nivel z

S_i = el conjunto de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

D_i = el conjunto de barras de combustible próximas en diagonal para la barra de combustible i

N_{S_i} = el número de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

- 20 N_{D_i} = el número de barras de combustible vecinas en diagonal para la barra de combustible i

b = una constante, $0 < b < 1$

c = una constante, $0 < c < 1$

d = una constante, $0 < d < c$.

- 25 7. Un procesador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la determinación de dicho factor R local en un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) se lleva a cabo así determinando:

$$30 R_i(z) = (1 + e_i) \frac{\left[\frac{\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \int_{z_0}^z \bar{q}(z'') dz''}{\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \int_{z_0}^z q_i(z'') dz''} \right]^a \left(\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \right)^b + c \sum_{j \in S_i} \left(\int_{z_0}^z q_j(z') dz' \right)^b + d \sum_{k \in D_i} \left(\int_{z_0}^z q_k(z') dz' \right)^b}{\left(1 + cN_{S_i} + dN_{D_i} \right) \left(\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \right)^b}$$

o una expresión matemática equivalente, donde los símbolos son como se explicó en las reivindicaciones 5 y 6 y donde

e_i = la constante de sensibilidad al desecado para la barra de combustible i (denominada igualmente "constante de la barra").

- 35 8. Una central de energía nuclear que comprende un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición, central que comprende una unidad de control dispuesta para llevar a cabo un procedimiento de determinación de la potencia crítica para un paquete de barras de combustible nuclear en dicho reactor nuclear, en el que dicho procedimiento incluye la determinación de un factor R para dicho paquete de barras de combustible nuclear en dicho reactor nuclear, reactor que comprende una pluralidad de paquetes de barras de combustible nuclear, en la que las barras

de combustible en el paquete se disponen lado con lado, por lo menos sustancialmente paralelas entre sí y se extienden esencialmente en una dirección axial, en el que dicho factor R es un factor que tiene en cuenta la influencia de la potencia local ponderada sobre una barra de combustible, incluyendo contribuciones de las barras de combustible próximas, estando caracterizado el procedimiento por el hecho de que se determina un factor R local ($R_i(z)$) para cada barra de combustible (i) en dicho paquete y para cada uno de una pluralidad de niveles (z) en dicha dirección axial, en el que el perfil axial de generación de calor individual para una cierta barra de combustible (i) se toma en consideración al determinar los factores R locales ($R_i(z)$) para dicha barra de combustible (i), en el que la determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) a un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la velocidad de generación de calor doblemente integrada de dicha barra de combustible (i) hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor doblemente integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) y en el que la determinación de dicho factor R local ($R_i(z)$) a un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) incluye la determinación de la suma de las velocidades de generación de calor integradas de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) y una fracción de las velocidades de generación de calor integradas de las barras de combustible próximas a dicha barra de combustible hasta el nivel (z), con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z).

9. Una central de energía nuclear de acuerdo con la reivindicación 8, en la que la potencia crítica se determina por medio de la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) para dicho paquete de barras de combustible nuclear, en el que dicho procedimiento comprende:

determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) del flujo del medio de refrigeración a través del paquete de combustible nuclear ($f_1(G)$),

determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) del perfil de potencia axial del paquete de combustible nuclear ($f_2(I_2)$),

determinar cómo depende de la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) del factor R del conjunto de combustible nuclear ($f_3(R)$)

determinar cómo depende la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) de la presión del medio de refrigeración en el conjunto de combustible nuclear ($f_4(P)$) y

determinar la calidad del vapor local en desecación (X_{DO}) basándose en las determinaciones anteriores.

10. Una central de energía nuclear de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, que incluye detectores de parámetros de funcionamiento, dispuestos para detectar parámetros de funcionamiento del reactor nuclear durante su funcionamiento, en la que la unidad de control se dispone para recibir información relativa a dichos parámetros de funcionamiento procedente de los detectores y para utilizar estos parámetros de funcionamiento al llevar a cabo el procedimiento.

11. Una central de energía nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8-10, en la que la unidad de control comprende salidas de control dispuestas para controlar el funcionamiento del reactor nuclear dependiendo de dicho procedimiento llevado a cabo por la unidad de control.

12. Una central de energía nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8-11, en la que el número de dichos niveles es por lo menos igual a 10.

13. Una central de energía nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8-12, en la que dicho paquete de barras de combustible nuclear incluye por lo menos 15 barras de combustible.

14. Una central de energía nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8-13, que comprende la determinación de un factor R total (R_z) para cada uno de dichos niveles (z) para el paquete de barras de combustible en su conjunto, en el que dicho factor R total (R_z) en un nivel (z) se determina como el máximo de dichos factores R locales ($R_i(z)$) en dicho nivel (z) en dicho paquete de barras de combustible nuclear.

15. Una central de energía nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8-14, en la que dicha determinación incluye asimismo una normalización por medio de la velocidad de generación de calor integrada de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z), en la que la determinación normalizada de la velocidad de generación de calor doblemente integrada de dicha barra de combustible (i) hasta el nivel (z) con relación a la velocidad promedio de generación de calor doblemente integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) se lleva a cabo determinando:

50

$$5 \quad \left[\frac{\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} \bar{q}(z'') dz'' dz'}{\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} q_i(z'') dz'' dz'} \right]^a$$

o una expresión matemática equivalente, donde

z = posición axial

z' = variable de integración que representa la posición axial

10 z'' = variable de integración que representa la posición axial

$q_i(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra i en el nivel z

$\bar{q}(z)$ = velocidad lineal promedio de generación de calor de todas las barras en el paquete en el nivel z

z_0 = la posición axial de la frontera de ebullición del volumen (límite de calidad del vapor cero) en dicho paquete

a = una constante, $0 < a < 1$.

15 16. Una central de energía nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8-15, en la que dicha determinación de la suma de la velocidad de generación de calor integrada de dicha barra de combustible hasta el nivel (z) y una fracción de las velocidades de generación de calor integradas de las barras de combustible próximas a dicha barra de combustible hasta el nivel (z), con relación a la velocidad promedio de generación de calor integrada de todas las barras de combustible en el paquete hasta el nivel (z) se lleva a cabo determinando:

$$20 \quad \frac{\left(\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \right)^b + c \sum_{j \in S_i} \left(\int_{z_0}^z q_j(z') dz' \right)^b + d \sum_{k \in D_i} \left(\int_{z_0}^z q_k(z') dz' \right)^b}{\left(1 + cN_{S_i} + dN_{D_i} \right) \left(\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \right)^b}$$

25 o una expresión matemática equivalente, donde los símbolos son como se explicó anteriormente en la reivindicación 15 y donde

$q_j(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima lateral j en el nivel z

$q_k(z)$ = velocidad lineal de generación de calor de la barra de combustible próxima en diagonal k en el nivel z

S_i = el conjunto de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

30 D_i = el conjunto de barras de combustible próximas en diagonal para la barra de combustible i

N_{S_i} = el número de barras de combustible próximas laterales para la barra de combustible i

N_{D_i} = el número de barras de combustible vecinas en diagonal para la barra de combustible i

b = una constante, $0 < b < 1$

c = una constante, $0 < c < 1$

35 d = una constante, $0 < d < c$.

17. Una central de energía nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8-16, en la que la determinación de dicho factor R local en un nivel (z) para una cierta barra de combustible (i) se lleva a cabo determinando:

$$R_i(z) = (1 + e_i) \left[\frac{\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} \bar{q}(z'') dz'' dz'}{\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \int_{z_0}^z \int_{z_0}^{z'} q_i(z'') dz'' dz'} \right]^a \frac{\left(\int_{z_0}^z q_i(z') dz' \right)^b + c \sum_{j \in S_i} \left(\int_{z_0}^z q_j(z') dz' \right)^b + d \sum_{k \in D_i} \left(\int_{z_0}^z q_k(z') dz' \right)^b}{\left(1 + cN_{S_i} + dN_{D_i} \right) \left(\int_{z_0}^z \bar{q}(z') dz' \right)^b}$$

5

o una expresión matemática equivalente, donde los símbolos son como se explicó en las reivindicaciones 15 y 16 y donde

e_i = la constante de sensibilidad al desecado para la barra de combustible i (denominada igualmente "constante de la barra").

10

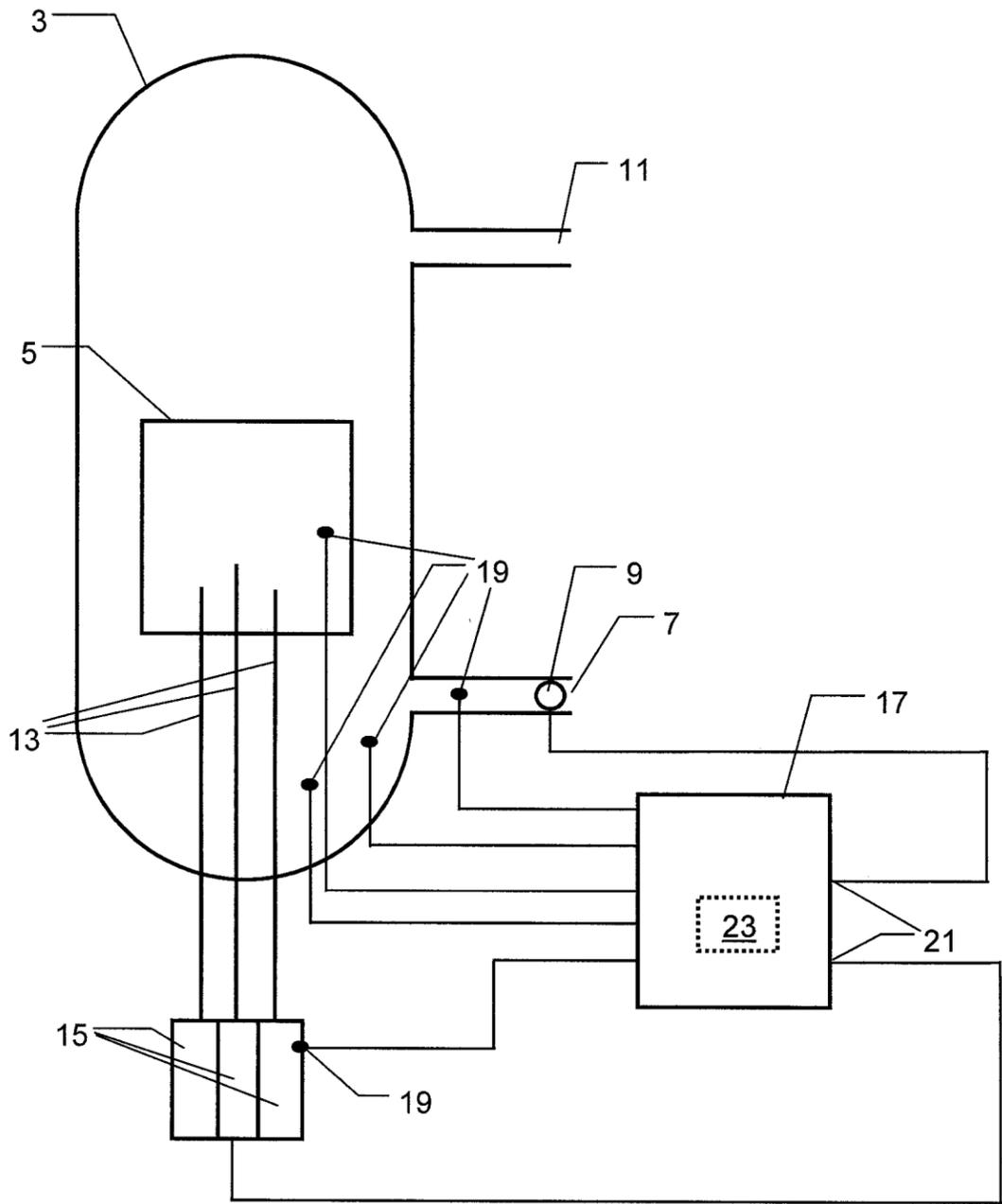


FIG. 1

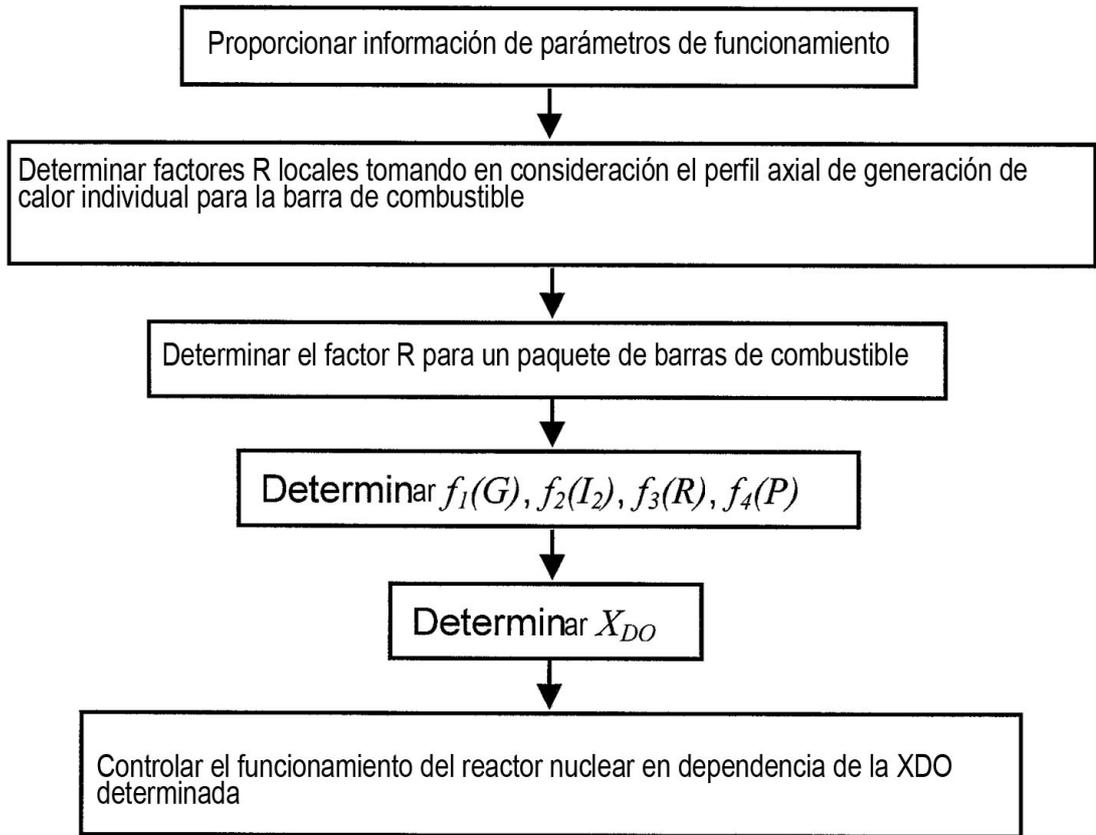


FIG. 2

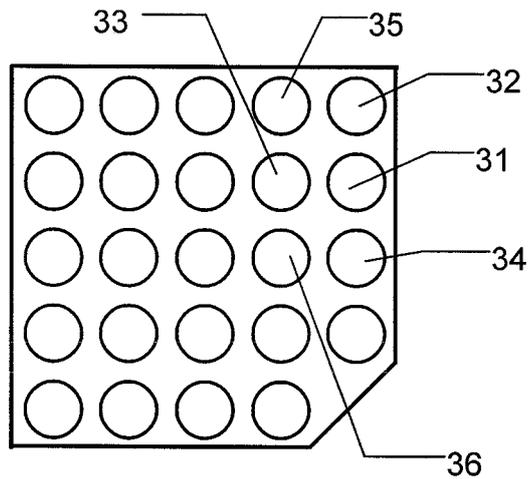


FIG. 3