

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 429 166**

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: **10.08.2006 E 06118711 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.07.2013 EP 1775732**

54 Título: **Procedimiento de estimación de las propiedades de desecación en un reactor nuclear de agua ligera**

30 Prioridad:

31.08.2005 SE 0501931

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

13.11.2013

73 Titular/es:

**WESTINGHOUSE ELECTRIC SWEDEN AB
(100.0%)
721 63 Västerås, SE**

72 Inventor/es:

**HELMERSSON, STURE;
MAJED, MAHDI;
NORBÄCK, GUNILLA;
PARAMONOV, DMITRY;
EKLUND, ROLF y
ADAMSSON, CARL**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 429 166 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

Procedimiento de estimación de las propiedades de desecación en un reactor nuclear de agua ligera

- 5 La presente divulgación versa acerca de un procedimiento de estimación de cuándo puede ocurrir la desecación en un reactor nuclear de agua ligera, más precisamente en un reactor de agua en ebullición (BWR). El procedimiento puede usarse para estimar el riesgo de desecación (o el margen para la desecación) cuando el reactor nuclear está en operación, pero también para realizar una estimación del riesgo de desecación antes de que el reactor nuclear esté realmente en operación, por ejemplo para estimar las propiedades de desecación antes de que se suministre nuevo combustible nuclear a una central de energía nuclear o cuando se proyecte el diseño del núcleo para su recarga.
- 10 La invención concierne a una central de energía nuclear y a un procedimiento de operación de una central de energía nuclear.

Antecedentes técnicos y técnica anterior

- 15 En un núcleo de BWR, las varillas de combustible están agrupadas en haces con espaciadores y habitualmente también con placas terminadoras para mantener las varillas de cada haz en una geometría predeterminada. La red predeterminada de varillas puede ser regular o irregular e incluso cambiar axialmente. Los haces son rodeados entonces por canales para dirigir el flujo de refrigerante hacia arriba y dar a la disposición de combustible estabilidad mecánica y termohidráulica y facilitar la manipulación y el intercambio del combustible. El haz de varillas de combustible y el canal son denominados a menudo conjunto combustible como unidad de manipulación. Cada canal también puede contener más de un haz de varillas de combustible y seguir denominándose conjunto combustible.
- 20 Los canales pueden ser cuadrados o hexagonales y tienen estructuras y características internas, aparte de los adaptadores terminales. El haz de varillas de combustible también puede variar considerablemente en tamaño —de 22 a 144 varillas de combustible— y también puede contener varillas con fines específicos, como varillas de sujeción, varillas de agua, varillas de longitud parcial y varillas de absorbente consumible. También es común una multitud de enriquecimientos de materiales físi les tanto entre como dentro de las varillas de combustible. La presente invención es aplicable a todas estas disposiciones de combustible y a su operación en el reactor.

- Según conoce bien una persona experta en la técnica, en un BWR fluye un medio de refrigeración en forma de agua a través de los conjuntos combustibles, que contienen las varillas de combustible. El propósito del agua es enfriar las varillas de combustible y actuar como moderador neutrónico. A través del haz de varillas de combustible fluye una mezcla de vapor y agua que proporciona refrigeración para las varillas mediante transferencia térmica por convección y ebullición. A medida que aumenta la calidad de vapor (la fracción de contenido de vapor) del refrigerante, cambia el patrón de flujo. En cierto punto del haz, se forma un patrón de flujo anular. Esto implica la existencia de una película líquida delgada en la superficie de las varillas y una mezcla de vapor y gotitas en los canales entre las varillas. La existencia de esta película permite la transferencia eficiente de calor de las varillas al refrigerante. Este permite una generación efectiva de vapor y, a la vez, evita que las varillas se calienten en exceso.
- 35 La pérdida de esta película es denominada desecación.

- En un BWR debería evitarse la desecación. La desecación deteriora la transferencia de calor de las varillas de combustible al medio de refrigeración del reactor y, por lo tanto, lleva a una mayor temperatura de las paredes de las varillas de combustible. La mayor temperatura puede dañar las varillas de combustible. Así, si se opera un BWR a cierta potencia elevada, lo que ha dado en llamarse potencia crítica (PC), o por encima de la misma, puede ocurrir la desecación. Por lo tanto, para evitar la desecación, se opera el reactor a una potencia menor, de modo que exista cierto margen de seguridad, lo que se denomina margen de desecación. Una medida del margen de desecación es la relación de potencia crítica (RPC). La RPC puede definirse como la siguiente relación:

$$RPC = \left(\text{potencia crítica} \right) / \left(\text{potencia real} \right)$$

La RPC puede ser calculada localmente para un gran número de puntos en el núcleo del reactor. El menor valor de la RPC en cualquier punto se denomina mínima relación de potencia crítica MRPC.

- 45 En lo que sigue, potencia crítica, flujo de calor crítico y calidad de vapor crítico se tratan como entidades sinónimas o equivalentes, ya que existen leyes sencillas de transformación física entre ellos en una operación en estado estacionario. Conocidos el caudal de refrigerante y la entalpía de entrada, la calidad de vapor proporciona directamente la potencia de la disposición de combustible con los datos termodinámicos del vapor/agua y viceversa.

- 50 Hay dos procedimientos comunes usados para correlacionar los datos de ensayo de potencia crítica para conjuntos combustibles de BWR. Ambos se basan en dependencias funcionales observadas entre los parámetros experimentales. Uno es correlacionar los datos de potencia crítica con el flujo de calor crítico, y el otro procedimiento es correlacionar los datos de ensayo de potencia crítica con la calidad de vapor crítico y lo que ha dado en llamarse longitud en ebullición como variables principales.

La correlación del flujo de calor crítico se basa en lo que ha dado en llamarse hipótesis de condiciones locales relajadas. Este tipo de correlación se basa en la dependencia lineal bien conocida de Macbeth y Barnett entre la potencia de desecación crítica y el subenfriamiento a flujo y presión máscicos constantes. La correlación de hipótesis de condiciones locales tiene la siguiente forma:

$$\Phi_{DO,z} = f(P,D,G,X_z)$$

5 en la que

$\Phi_{DO,z}$ = flujo de calor en la desecación

P = presión del sistema

D = diámetro hidráulico del combustible

G = flujo máscico

10 X_z = calidad de vapor en la posición axial z en el núcleo del reactor

Las dependencias lineales entre los parámetros se establecen al menos por tramos mediante el uso de coeficientes de ajuste en los datos medidos. La combinación del flujo de calor de desecación local y del equilibrio térmico permite el cálculo de la potencia crítica e incluye implícitamente la influencia de la distribución axial del flujo de calor o la forma de potencia.

15 El otro procedimiento es correlacionar la calidad (potencia) de vapor crítico y capturar la dependencia de la potencia crítica con respecto al flujo máscico, a la presión, al subenfriamiento en entrada y a las distribuciones de potencia axial y radial. Los términos de una correlación de calidad crítica-longitud en ebullición son funciones de mejor ajuste que describen la dependencia de la calidad de vapor crítico con respecto al flujo máscico, la presión de salida, la longitud en ebullición, la longitud anular y el factor R basada en los datos de ensayo y tiene la siguiente forma:

$$X_{DO} = f(G,P,BL,AL,R)$$

20 en la que

X_{DO} = calidad de vapor crítico

G = flujo máscico

P = presión del sistema

BL = longitud en ebullición

25 AL = longitud de flujo anular

R = factor R. Normalmente se postula capturar la dependencia de la calidad crítica con respecto a distribuciones laterales de flujo y potencia.

Puede predecirse la potencia crítica a partir de la calidad de vapor usando el equilibrio térmico en el canal. Este es un procedimiento iterativo e incluye implícitamente la influencia de la forma axial. Se correlacionan los datos de ensayo de potencia crítica en lo que ha dado en llamarse plano de calidad crítica-longitud en ebullición, es decir, se convierten los datos de potencia crítica, flujo máscico, presión y subenfriamiento de entrada en una relación entre la calidad de vapor y la ubicación en la que ocurre la desecación y la denominada longitud en ebullición, BL. La longitud en ebullición está definida como la distancia desde el punto de inicio de la ebullición volumétrica (Blen) hasta el final de la longitud calentada, EHL. Además, se ha demostrado que una correlación calidad crítica - longitud en ebullición con la longitud anular en ebullición, AL, como parámetro de correlación adicional trata debidamente, de manera implícita, la influencia de la forma de potencia axial en la potencia crítica. AL es la distancia desde el punto de transición al flujo anular hasta el fin de la longitud calentada, EHL.

La dependencia de la desecación con respecto a la distribución de potencia local, a la geometría de la sección eficaz y a la configuración de los espaciadores de rejilla es tratada mediante el uso de lo que ha dado en llamarse factor R. Estos factores R son una medida de la sensibilidad de cada varilla a la desecación. El factor R limitante de un subhaz es el máximo de los factores R de sus varillas. En los ensayos, se ha trasegado la varilla de potencia máxima en el subhaz para investigar la sensibilidad de las posiciones de las varillas a la desecación. El gran número de distribuciones de potencia local ha permitido una deducción de constantes aditivas empíricas a los factores R calculados.

45 Los dos procedimientos comunes para correlacionar los datos de desecación con el tiempo y las crecientes demandas de precisión e intervalo de validez se han vuelto complejos. Las correlaciones son básicamente formas lineales (polinomios), pero con muchos términos y coeficientes de regresión que intentan capturar efectos en gran medida no lineales.

El documento SE-C2-509 235 describe un procedimiento de estimación del riesgo de desecación en un BWR. En este procedimiento se tienen en cuenta lo que se denomina fenómenos transitorios. Un fenómeno transitorio puede ocurrir, por ejemplo, cuando se reduce el flujo de refrigerante mientras se mantiene la potencia real del reactor. Esto

lleva a una reducción de la PC. El procedimiento incluye el uso de un analizador de fenómenos transitorios. En el analizador de fenómenos transitorios se simula el comportamiento del reactor nuclear durante un fenómeno transitorio. El analizador de fenómenos transitorios calcula la reducción de la PC durante los fenómenos transitorios.

5 El documento EP-A1-1 221 701 describe un procedimiento y un sistema para la evaluación del modelado y el rendimiento termodinámicos de un diseño de núcleo de BWR. Se usa un sistema de tratamiento de datos para ejecutar rutinas específicas de programas que simulan las características térmicas operativas de las varillas de combustible dentro del reactor durante una situación transitoria de operación. El procedimiento emplea un enfoque multidimensional para la simulación de eventos operativos postulados o de una circunstancia operativa prevista que produzca una situación transitoria en el reactor, como la que podría ser causada por un único error de operario o un fallo en la operación del equipo. En función de una tendencia genérica transitoria y de una incertidumbre en el cambio en la relación de potencia crítica, se generan histogramas de la relación de potencia crítica de las varillas de combustible. En último término, se evalúa la mínima relación de potencia crítica del límite operativo del reactor a partir de un histograma de cálculos de probabilidad que representan el número de varillas de combustible sometidas a una transición de ebullición durante la situación transitoria. El histograma puede ser mostrado fácilmente por el sistema de tratamiento de datos y ser usado para demostrar estadísticamente una conformidad de la mínima relación de potencia crítica del límite operativo del diseño del núcleo reactor con las normativas oficiales.

Las propiedades de desecación en una aplicación real en un reactor nuclear pueden estimarse en función de experimentos en una estación experimental. Esta estación experimental se fabrica para que sea similar a una parte de un núcleo real de reactor, pero en la estación experimental no tiene lugar reacción nuclear alguna. La estación experimental puede incluir una cámara experimental en la que se colocan en relación mutua varias varillas de combustible nuclear simulado (pero sin el material del combustible nuclear) de la misma manera (o de manera similar) a las varillas de combustible en un núcleo real de reactor nuclear. Sin embargo, el número de varillas de combustible en la estación experimental es habitualmente mucho menor que en un núcleo real de reactor nuclear, que puede contener entre 40000 y 80000 varillas o más. Por ejemplo, en la estación experimental pueden usarse 24 varillas de combustible. Estas varillas de combustible pueden representar un subhaz de un haz de varillas de combustible de una disposición de combustible real. Las varillas de combustible de la estación experimental están dotadas de elementos calentadores eléctricos para que puedan ser calentadas hasta al menos las mismas temperaturas que las varillas de combustible en un reactor nuclear real. La corriente eléctrica que va a los elementos calentadores puede variarse para simular diferentes niveles de potencia y distribuciones de potencia que pueden ocurrir en un núcleo real de un reactor nuclear. Además, se suministra agua a través de la cámara experimental. Pueden variarse la temperatura, el flujo másico de agua, las formas de potencia axial y radial y la presión del agua para simular las diferentes situaciones de operación y el comportamiento durante los fenómenos transitorios.

La estación experimental está dotada de diferentes medios de medición para medir el flujo másico, la presión y la temperatura en diferentes posiciones de la estación experimental. Sin embargo, el número de puntos de medición y las diferentes mediciones que pueden llevarse a cabo en un tiempo limitado son limitados. Por lo tanto, a menudo resulta difícil estimar las propiedades de desecación en un reactor nuclear real en función directa de tales experimentos.

Dado que el número de puntos de medición y el número de mediciones diferentes que se llevan a cabo son limitados, es necesario encontrar un modelo (a menudo denominado correlación) que prediga el comportamiento de una disposición del combustible nuclear entre y fuera de las situaciones que han sido medidas realmente en la estación experimental. Es un procedimiento difícil interpolar y extrapolar el resultado del experimento a una descripción general real del comportamiento de desecación con gran precisión en un reactor nuclear real.

Sumario de la invención

45 La presente divulgación proporciona un procedimiento de estimación de en qué condiciones pueden ocurrir la desecación en un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. Un objeto adicional es proporcionar tal procedimiento que, de manera relativamente simple, pueda usarse para estimar el comportamiento de desecación de un reactor nuclear real en función de experimentos en una estación experimental. Se requiere la capacidad de estimar las condiciones de desecación en un reactor de agua en ebullición para su control y su operación.

50 El procedimiento incluye el uso de una fórmula que expresa la propiedad de desecación local del reactor nuclear. Dado que la propiedad de desecación está expresada en una fórmula, resulta fácil adaptar esta fórmula a diferentes situaciones operativas reales.

Así, se ha descubierto que, usando una fórmula relativamente tan simple, las propiedades de desecación pueden expresarse con suficiente precisión mediante una sola fórmula relativamente simple.

55 El procedimiento puede usarse para estimar el margen de desecación cuando un reactor nuclear está en operación. La operación del reactor siempre tiene que garantizar que pueda ocurrir cierta clase de fenómenos transitorios en cualquier momento y también puede usarse el procedimiento para estimar el riesgo de desecación durante tales fenómenos transitorios. Alternativamente, puede usarse el procedimiento para realizar una estimación del riesgo de

deseccación antes de que el reactor nuclear esté realmente en operación; por ejemplo, para estimar las propiedades de desecación antes de que se suministre combustible nuclear nuevo a una central de energía nuclear o cuando se proyecte el diseño del núcleo para su recarga.

5 Normalmente, una expresión matemática puede ser escrita de diferentes maneras y mantener el mismo significado, o aproximadamente el mismo significado. En consecuencia, no debiera interpretarse que las reivindicaciones estén limitadas a la expresión matemática exacta definida en las reivindicaciones. Así, se pretende que las reivindicaciones cubran formulaciones alternativas que constituyan aproximaciones a la fórmula. Tales transformaciones se realizan de forma regular para evaluaciones numéricas y pueden estar adaptadas para una gran precisión en un intervalo predeterminado de aplicación. Por ejemplo, una función exponencial podría transformarse en otra expresión matemática sin cambiar el significado de la fórmula, o la fórmula podría expresarse, por ejemplo, con un polinomio o una serie truncada de potencias que se aproxime a la fórmula.

Asimismo, se han dado por sentadas unidades métricas o del SI en los ejemplos numéricos. La invención también funcionará con otras unidades si los parámetros y los coeficientes se ajustan en consonancia.

15 También se deberá hacer notar que el concepto de "entidad" usando en conexión con la fórmula se refiere a cualquier entidad de la fórmula, por ejemplo un término o un factor que forme parte de un término.

Además, cuando se usa un símbolo en las reivindicaciones, por ejemplo G, ello no significa, por supuesto, que la fórmula esté limitada a usar este símbolo particular. Naturalmente, puede usarse cualquier otro símbolo para simbolizar la cantidad en cuestión.

20 También se debería mencionar que la propiedad de desecación puede expresarse de maneras diferentes. Puede calcularse la propiedad de desecación para una posición arbitraria en cualquier lugar de la disposición del combustible nuclear, o puede calcularse para una posición específica, por ejemplo cuando el medio de refrigeración sale de la parte activa de la disposición del combustible nuclear. Sin embargo, en función de tales cálculos, pueden calcularse para todo el reactor nuclear las propiedades de desecación en diferentes puntos, por ejemplo el margen de desecación, o la mínima relación de potencia crítica (MRPC). Dado que la forma de calcular, por ejemplo, la MRPC en función del conocimiento de las propiedades de desecación en diferentes ubicaciones de la disposición del combustible nuclear, resulta conocida para una persona experta en la técnica, ello no será descrito en este documento. Lo importante para la presente invención es proporcionar un procedimiento en el que se use una fórmula, en función de la cual pueda calcularse de manera simple, por ejemplo, la MRPC sin pérdida de precisión. La propiedad de desecación mencionada en la reivindicación 1 constituye así una propiedad de desecación local que puede ser usada fácilmente, por ejemplo, para determinar la MRPC.

35 Dicha fórmula también incluye una tercera función, que es un factor, describiendo la tercera función cómo depende la propiedad de desecación del factor R de la disposición del combustible nuclear, siendo el factor R la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas de combustible nuclear, describiendo la tercera función dicha dependencia con respecto al factor R independientemente de dicha dependencia con respecto al flujo y de dicha dependencia con respecto al perfil de potencia axial. Usando una tercera función que describe independientemente la dependencia con respecto al factor R, se obtiene una fórmula más simplificada.

40 Dicha fórmula también incluye una cuarta función, que es un factor, describiendo la cuarta función cómo la propiedad de desecación depende de la presión del medio de refrigeración en la disposición del combustible nuclear, describiendo la cuarta función dicha dependencia con respecto a la presión independientemente de dicha dependencia con respecto al flujo, de dicha dependencia con respecto al perfil de potencia axial y de dicha dependencia con respecto al factor R. Usando una cuarta función que describe independientemente la dependencia con respecto a la presión, se obtiene una fórmula más simplificada.

45 La cuarta función incluye una entidad h_{fg} , siendo h_{fg} el calor latente para la evaporación del medio de refrigeración. Además, la cuarta función incluye una entidad proporcional a la densidad del vapor del medio de refrigeración a la presión real. De esta manera, la dependencia con respecto a la presión puede ser expresada con precisión de una manera simple.

La fórmula es tal que incluye una función exponencial, que, en el exponente, incluye otra función exponencial. Las diferentes funciones, que forman factores en la fórmula, pueden ser fácilmente expresadas en tal función exponencial.

50 La fórmula incluye varias variables, varias consonantes, varios coeficientes de ajuste, determinándose dichos coeficientes de ajuste para la disposición específica usada del combustible nuclear, de modo que dichos coeficientes de ajuste, al menos dentro de ciertas variaciones limitadas de las condiciones de operación para el reactor nuclear, con un resultado aceptable de la estimación, puedan ser considerados constantes para la disposición usada del combustible nuclear. La fórmula es tal que solo los coeficientes de ajuste tienen que ser ajustados para que la fórmula sea aplicable a una disposición particular del combustible nuclear. Además, según un aspecto ventajoso, todos los coeficientes de ajuste o, al menos algunos de los coeficientes de ajuste son coeficientes significativos de

ajuste que desempeñan un papel importante para que la fórmula exprese la propiedad de desecación con suficiente precisión, y siendo el número de coeficientes significativos de ajuste en dicha fórmula inferior a 10.

5 El concepto de “coeficientes de ajuste” está relacionado con los coeficientes usados en la fórmula para hacer que la fórmula represente correctamente cierta disposición del combustible nuclear y reproducir con precisión óptima los datos de desecación medidos. Esto implica que cuando la fórmula se usa para otro tipo de disposición de combustible, solo hay que adaptar los coeficientes de ajuste a la nueva disposición de combustible. Con “coeficiente significativo de ajuste” se quiere decir un coeficiente de ajuste que desempeña un papel importante para que la fórmula exprese la propiedad de desecación del reactor nuclear con suficiente precisión. La importancia estadística de un coeficiente particular se determina mediante procedimientos estadísticos estándar. Además de los coeficientes significativos de ajuste, podrían incluir en la fórmula, por supuesto, coeficientes menos significativos de ajuste. Dado que el número de coeficientes menos significativos de ajuste, según una realización de la invención, es inferior a 10, resulta muy fácil adaptar la fórmula a una situación particular en función de un número limitado de experimentos.

15 En las descripciones de la técnica anterior de las propiedades de desecación, el número de los coeficientes de ajuste requeridos ha sido muy alto. Cuando esos conceptos fueron desarrollados por vez primera, eran simples y con pocos coeficientes. Con el tiempo, los requisitos de precisión y de intervalo de validez han aumentado. Esos requisitos han sido satisfechos añadiendo cada vez más coeficientes. Dado que el número de coeficientes que tiene que ajustarse se ha vuelto muy grande, ha resultado difícil anteriormente encontrar los valores de estos coeficientes en función de conjuntos pequeños de datos experimentales. Además, el gran número de coeficientes de regresión da como resultado un comportamiento de extrapolación deficiente en las correlaciones de la técnica anterior. Es decir, cuando se usa una correlación para extrapolar fuera de la base de datos experimental en la que se basan, las predicciones de la correlación podrían ser significativamente diferentes de lo que se espera en función del conocimiento físico disponible a partir de experimentos independientes o de sofisticados análisis numéricos basados en primeros principios.

25 Estos problemas se resuelven por medio de la presente invención, dado que, según un aspecto ventajoso de la presente invención, el número de coeficientes significativos de ajuste es pequeño.

Normalmente, los coeficientes de ajuste usados en las fórmulas del presente documento se obtienen matemáticamente por medio de técnicas de regresión. Por lo tanto, en la descripción que sigue se usa a menudo el concepto de “coeficiente de regresión”. Los mencionados coeficientes de regresión son, así, coeficientes de ajuste.

30 Según un aspecto ventajoso adicional de la invención, dicha segunda función comprende una única transformación matemática al perfil de potencia axial que incluye al menos una variable relacionada con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible. Es un aspecto ventajoso de la invención que la mencionada segunda función pueda expresarse de una manera tan simple.

Según un aspecto adicional de la invención, la transformación es de la siguiente forma:

$$I_2 = \frac{1}{x(Z_{DO})} \int_{ZX0}^{Z_{DO}} x(z) dz$$

35 en la que $x(z)$ es el perfil de la calidad de vapor a lo largo del haz de varillas de combustible, z es una variable espacial local relacionada con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible, y en la que la integración se extiende desde el inicio de la ebullición neta, $ZX0$, y la integración termina en Z_{DO} , que se define como la posición axial para la desecación.

40 Según un aspecto adicional de la invención, la transformación tiene en cuenta fenómenos transitorios y tiene la siguiente forma:

$$I_2(t_{DO}) = \frac{1}{x(Z_{DO}(t_{DO}))} \int_{ZX0(t_{in})}^{Z_{DO}(t_{DO})} x(t(t_{in}, z), z) dz$$

45 en la que z es una variable espacial local relacionada con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible,

t es el tiempo durante el fenómeno transitorio,

t_{in} es el tiempo durante el fenómeno transitorio en que la partícula que experimenta la desecación en t_{DO} entró en el haz de varillas de combustible,

t_{DO} es el tiempo en que una partícula de fluido experimenta la desecación,

$Z_{DO}(t_{DO})$ es la posición axial, dependiente del tiempo, para la desecación para esta partícula de fluido, y $ZX0(t_n)$ es el punto en el que esta partícula de fluido alcanza el punto de ebullición neta.

Así, con la presente invención, también pueden tenerse en cuenta fenómenos transitorios de manera simple.

5 La mencionada transformación forma parte del exponente de la primera función exponencial mencionada. Por ello, la transformación puede estar incluida en la fórmula de una manera simple.

Dicha primera función incluye una entidad G , siendo G el flujo másico del medio de refrigeración a través de la disposición del combustible nuclear por área y tiempo, siendo G constante en un estado estacionario de operación del reactor nuclear. Dado que G es una entidad usada normalmente, resulta ventajoso que esta entidad se use en el procedimiento según la invención.

10 La entidad G aparece en la función exponencial que aparece en el exponente de la primera función exponencial mencionada.

La fórmula tiene exactamente, o al menos sustancialmente, la siguiente forma:

$$X_{DO} = e^{\left(\frac{1}{1 + e^{(\alpha_1 + \alpha_2 G)}} + \frac{\alpha_3}{I_2 + f(Ace)} + \alpha_4 R \right)} \rho_{rel}^{\alpha_5} h_{fg}^{\alpha_6}$$

en la que X_{DO} es la calidad prevista del vapor local en la desecación,

15 G es el flujo másico del medio de refrigeración a través de la disposición del combustible nuclear por área y tiempo, I_2 es la transformación de la distribución de potencia axial, $f(Ace)$ es una función de un término de la aceleración del flujo, función que describe efectos transitorios capturados a través del término de la aceleración del flujo, R es la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas de combustible nuclear, ρ_{rel} es la densidad relativa del vapor, h_{fg} es el calor latente para la evaporación del medio de refrigeración, α_1 a α_6 son coeficientes de ajuste específicos para la distribución específica de combustible usada.

Esta fórmula constituye, así, una fórmula general simple que puede ser usada en el procedimiento según la invención y que describe de manera simple una propiedad de desecación local de la disposición del combustible nuclear y también tiene en cuenta fenómenos transitorios.

25 Según un aspecto adicional de la invención,

$$f(Ace) = \alpha_7 Ace^2$$

definiéndose el término de aceleración Ace como

$$Ace = \int_0^{Z_{DO}} \frac{1}{u_f^2(t, z)} \frac{\partial u_f}{\partial t} dz$$

siendo u_f la velocidad axial de la película líquida sobre las varillas de combustible nuclear o su aproximación,

30 t es el tiempo durante el fenómeno transitorio, z es una variable espacial local relacionada con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible, Z_{DO} se define como la posición axial, dependiente del tiempo, para la desecación y α_7 es un coeficiente de ajuste específico para la disposición específica de combustible usada.

Con tal término de aceleración, pueden tenerse en cuenta de manera simple los fenómenos transitorios.

35 La invención también versa acerca de una central de energía nuclear con un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. Por ello, un objeto es dotar a tal central de energía nuclear de posibilidades mejoradas de estimación de las condiciones de desecación, tales como el margen de desecación, durante su operación.

40 Este objeto se logra por medio de una central de energía nuclear según la reivindicación 1. 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 según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes. Dado que la unidad de control está dispuesta para llevar a cabo el mencionado procedimiento, la central tiene medios para obtener información, de manera relativamente simple, relativa a las propiedades de desecación durante la operación de la central de energía nuclear.

La central de energía nuclear incluye detectores de parámetros, dispuestos para detectar los parámetros de operación del reactor nuclear durante su operación, estando dispuesta la unidad de control para recibir información relativa a dichos parámetros de operación procedente de los detectores y para usar estos parámetros de operación cuando se lleva a cabo el procedimiento. Así, la central usa la información recibida procedente de los detectores para calcular, por ejemplo, el margen de desecación para diferentes partes del núcleo del reactor nuclear.

La unidad de control comprende salidas de control dispuestas para controlar el operación del reactor nuclear en dependencia de dicho procedimiento llevado a cabo por la unidad de control. Así, la unidad de control puede controlar automáticamente la operación de la central de energía nuclear, por ejemplo para garantizar que siempre se mantenga cierto margen de desecación.

La invención también proporciona un procedimiento de operación de una central de energía nuclear que comprende un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición, según la reivindicación 4. Este procedimiento incluye las siguientes etapas:

proporcionar información relativa a parámetros de operación del nuclear reactor, usar esta información en un procedimiento de estimación de cuándo puede ocurrir la desecación, según se reivindica, y controlar la operación del reactor nuclear en dependencia de la anterior etapa del procedimiento.

Con tal procedimiento se logran ventajas correspondientes a las descritas en lo que antecede en conexión con el procedimiento y la central de energía nuclear según la invención.

Breve descripción del dibujo

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

Descripción de realizaciones de la invención

Así, la invención está relacionada con un procedimiento de estimación de cuándo puede ocurrir la desecación en dicho reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. El reactor incluye una disposición del combustible nuclear. Para realizar esta estimación, el procedimiento según la invención incluye el uso de una fórmula que expresa la propiedad de desecación local del reactor nuclear.

Según una manera de llevar a cabo el procedimiento, la fórmula usada incluye cuatro factores diferentes. El primer factor es una primera función que describe cómo depende la propiedad de desecación del flujo del medio de refrigeración a través de la disposición del combustible nuclear. El segundo factor es una segunda función que describe cómo la propiedad de desecación depende del perfil de potencia axial de la disposición del combustible nuclear. El tercer factor es una tercera función que describe cómo depende la propiedad de desecación del factor R de la disposición del combustible nuclear. El factor R es la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas de combustible nuclear. El cuarto factor es una cuarta función que describe cómo la propiedad de desecación depende de la presión del medio de refrigeración en la disposición del combustible nuclear. Las funciones primera a cuarta describen, de forma independiente entre sí, dicha dependencia con respecto al flujo, dicha dependencia con respecto al perfil de potencia axial, dicha dependencia con respecto al factor R y dicha dependencia con respecto a la presión, respectivamente.

Ahora se explicarán diferentes características de la fórmula usada en una manera de llevar a cabo el procedimiento según la invención. Para mejorar la comprensión de la invención, también se incluyen algunas observaciones explicativas referentes a la técnica anterior.

La fórmula usada describe la dependencia (correlación) entre las condiciones de operación del reactor y las condiciones de desecación durante la operación en estado estacionario y en situaciones transitorias de un reactor de agua ligera.

1. Transformación matemática para describir la forma del perfil de potencia axial durante la operación del reactor en estado estacionario

En la técnica anterior, el efecto de la distribución axial del perfil de potencia en las propiedades de desecación se capturaba:

- introduciendo parámetros que capturaban el historial del flujo corriente arriba, BL y AL. Sin embargo estos parámetros no permiten capturar las variaciones locales en potencia axial,
- introduciendo parámetros que capturar efectos locales mediante la correlación del flujo de calor, $\Phi_{DO,z}$, en la desecación. Tales correlaciones capturan únicamente el efecto de la variación local en la potencia axial, o
- correlacionando X_{DO} con ambos tipos de parámetros, es decir, BL, AL y $\Phi_{DO,z}$, en un intento por capturar tanto el historial corriente arriba como el efecto local.

El procedimiento inventado se vale de una sola transformación al perfil de potencia axial durante la operación del reactor en el estado estacionario. Se pretende capturar los efectos de memoria, capturados experimentalmente, de la formación de la película y de gotitas de agua a lo largo del conjunto combustible, lo que es equivalente a capturar tanto el historial corriente arriba como la variación de potencia local a lo largo de un haz de varillas de combustible. En la realización preferente, la transformación del perfil de potencia axial, I_2 , se define como:

$$I_2 = \frac{1}{x(Z_{DO})} \int_{ZX0}^{Z_{DO}} x(z) dz \quad (1)$$

siendo $x(z)$ el perfil de la calidad del vapor a lo largo del haz de varillas de combustible. Esta operación de estado estacionario también es equivalente a:

$$I_2 = \int_{ZX0}^{Z_{DO}} \int_{ZX0}^z q(z1) dz1 dz \quad (2)$$

La fórmula incluye una función $q(z1)$, en la que q es la potencia local normalizada a lo largo del perfil de potencia experimentada. z y $z1$ son variables espaciales locales relacionadas con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible. La integración se extiende desde el inicio de la ebullición neta, $ZX0$. El inicio de la ebullición neta se define como la entalpía media del refrigerante que alcanza saturación o, equivalentemente, una calidad de vapor igual a cero. La integración termina en Z_{DO} , que se define como la posición axial para la desecación y está situada en el final de la longitud calentada, EHL, o por debajo.

2. Forma de correlación no lineal que establece la relación entre la situación de desecación en el estado estacionario y las variables independientes

La forma de correlación no lineal inventada se describe como sigue.

2.1 La calidad de vapor crítico se expresa por medio de un producto matemático de funciones que describen la dependencia con respecto al flujo, del perfil de potencia axial, del factor R y de la presión. Algunas de estas funciones también pueden ser aditivas. La o las funciones que describen la dependencia con respecto al factor R y a la presión pueden ser aditivas, multiplicativas o ambas. La forma general y básica de la correlación de la desecación en el estado estacionario es:

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

en la que:

- X_{DO} es la calidad del vapor local en la desecación
- $f_1(G)$ es una función que describe la dependencia con respecto al flujo,
- $f_2(I_2)$ es una función que describe la dependencia con respecto al perfil de potencia axial,
- $f_3(R)$ es una función que describe la dependencia con respecto al factor R , y
- $f_4(P)$ es una función que describe la dependencia con respecto a la presión.

Los términos opcionales constituyen correcciones secundarias menos significativas que pueden añadirse para adaptar la correlación al caso particular.

2.2 La dependencia con respecto al flujo se describe por medio de una función exponencial que, en el exponente, incluye otra función exponencial. En la realización preferente,

$$f_1(G) = e^{\left(\frac{1}{1+e^{(\alpha_1+\alpha_2 G)}}\right)}$$

en la que $\alpha_1 (<0)$ y $\alpha_2 (>0)$ son coeficientes de regresión, y G es el flujo másico o el caudal del refrigerante, por ejemplo en kg/m^2 .

2.3 La dependencia con respecto al perfil de potencia axial se describe por medio de una función exponencial de la transformación matemática para describir la forma del perfil de potencia axial. En una realización no cubierta por la presente invención,

$$f_2(I_2) = e^{\left(\frac{\alpha_3}{I_2}\right)}$$

en el que α_3 (<0) es un coeficiente de regresión, e I_2 es la transformación del perfil de potencia axial descrita en lo que antecede.

2.4 La dependencia con respecto al factor R se describe como una función exponencial del factor R o un término aditivo. Es el factor

$$f_3(R) = e^{(\alpha_4 R)}$$

5 en el que α_4 es un coeficiente de regresión que, preferentemente, es <-1 , y R es el factor R, que es la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas. En la técnica anterior son conocidos esquemas de ponderación de este tipo.

10 **2.5** La dependencia con respecto a la presión se describe como un producto de propiedades refrigerantes del reactor elevado a ciertas potencias. Las propiedades se seleccionan de tal modo que el producto se extrapole a aproximadamente cero, tanto a presión igual a cero como a presión crítica (aproximadamente 22 MPa) y tenga un único máximo a presiones intermedias, según se desea por resultados teóricos y experimentales.

$$f_4(P) = \rho_{rel}^{\alpha_5} h_{fg}^{\alpha_6}$$

15 en la que P es la presión del refrigerante, α_5 (<1) y α_6 (>1) son coeficientes de regresión, ρ_{rel} es la densidad relativa del vapor, definida como ρ_v/ρ_{vnom} , siendo ρ_v la densidad del medio refrigerante evaporado a la presión real y siendo ρ_{vnom} la densidad del vapor a la presión nominal del sistema (normalmente 7 MPa), y h_{fg} es el calor latente para la evaporación del medio de refrigeración.

20 **3. Tratamiento explícito de los efectos que los fenómenos transitorios de operación del reactor tienen en las condiciones de desecación en un haz de varillas de combustible**

El enfoque de la técnica anterior ha sido dar por sentado que todos los cambios en el tiempo durante el fenómeno transitorio son tan lentos que las derivadas de tiempo pueden aproximarse a cero; es decir, se da por sentado un estado casi estacionario. Se demuestra entonces que este enfoque es a veces conservador modificando los coeficientes de ajuste. Sin embargo, en general esta premisa es inválida: a) en muchos tipos de fenómenos transitorios, el flujo másico total en la salida puede ser significativamente diferente del flujo másico en la entrada, lo que contradice la premisa del estado casi estacionario; y b) la escala temporal de muchos fenómenos transitorios es también del mismo orden de magnitud, o más corto, que el tiempo de transporte a través de un haz de varillas de combustible. Un tiempo normal de transporte para el refrigerante a través del haz de varillas de combustible es de unos segundos.

30 En el procedimiento inventado para el control y la operación de un BWR se tratan explícitamente ciertos aspectos del fenómeno transitorio. Dado que se define que la desecación ocurre cuando ya no hay presente una película líquida en las superficies de las varillas (o su espesor está por debajo de cierto valor), el tratamiento se basa en la noción de una partícula de fluido que viaja a lo largo del haz de varillas de combustible. Esto permite desarrollar transformaciones matemáticas para el perfil de potencia axial transitoria, dependiente del tiempo (véase 3.1 más abajo), para la condición de flujo transitorio (véase 3.2 más abajo) y para la gravedad del fenómeno transitorio con el que se correlacionan los resultados del ensayo experimental del fenómeno transitorio (véase 3.3 más abajo).

40 **3.1** La transformación matemática que describe el perfil de potencia axial, dependiente del tiempo, se basa en el hecho de que, desplazándose en el tiempo y el espacio, una partícula de fluido experimentará un perfil de potencia diferente de un perfil instantáneo. Así, un sistema de referencia para la transformación del perfil de potencia axial debería seguir el recorrido de la partícula de fluido en el tiempo. En la realización preferente, la transformación al perfil axial transitorio, I_2 , se define como:

$$I_2 = \frac{1}{x_{particula}(Z_{DO})} \int_{ZZ0}^{Z_{DO}} x_{particula}(z) dz \quad (3)$$

en la que $x_{particula}$ es el perfil de la calidad de vapor, dependiente del tiempo, experimentado por la partícula de fluido que se mueve a lo largo del haz de varillas de combustible, Z_{DO} es la posición axial, dependiente del tiempo, para la desecación, z es una variable espacial relacionada con una dirección longitudinal de la

disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible, y en la que la integración se extiende desde el inicio de la ebullición neta, ZX0, según se define en lo que antecede, hasta Z_{DO}. La dependencia con respecto al tiempo es inherente en la anterior fórmula (3). Sin embargo, el tiempo puede indicarse explícitamente en la fórmula cuando la integración se lleva a cabo a lo largo del recorrido de una partícula en el sistema de coordenadas que sigue el recorrido de la partícula. Si se hace esto, la fórmula (3) puede reescribirse como la siguiente fórmula:

$$I_2(t_{DO}) = \frac{1}{x(Z_{DO}(t_{DO}))} \int_{ZX0(t_{in})}^{Z_{DO}(t_{DO})} x(t(t_{in}, z), z) dz \quad (4)$$

en la que *t* el tiempo durante el fenómeno transitorio,

t_{in} es el tiempo durante el fenómeno transitorio en que la partícula que experimenta la desecación en *t_{DO}* entró en el haz de varillas de combustible,

z es una variable espacial relacionada con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible,

t_{DO} es el tiempo en que una partícula de fluido experimenta la desecación,

Z_{DO}(t_{DO}) es la posición axial, dependiente del tiempo, para la desecación para esta partícula de fluido, y

ZX0(t_{in}) es el punto en el que esta partícula de fluido alcanza el punto de ebullición neta.

Así, las Fórmulas (3) y (4) corresponden a la anterior Fórmula (1) (que describe el estado estacionario), pero han sido enmendadas para tener en cuenta los fenómenos transitorios.

3.2 El flujo másico de refrigerante puede expresarse como un producto de la densidad y la velocidad, que se propagan por el haz de varillas de combustible en diferentes escalas temporales. Esto requiere una transformación matemática que describe la condición de flujo, dependiente del tiempo. En la realización preferente, se correlacionan los datos de desecación transitoria con el flujo másico de entrada al haz, cuando la partícula de fluido entra en el haz.

3.3 La gravedad de los efectos transitorios se captura mediante la introducción de un término de la aceleración del flujo. En la realización preferente, el término de aceleración *Ace* se define como:

$$Ace = \int_0^{Z_{DO}} \frac{1}{u_f^2(t, z)} \frac{\partial u_f}{\partial t} dz$$

siendo *u_f* la velocidad axial de la película líquida o su aproximación, y siendo las demás expresiones según se ha definido en lo que antecede. Se añade un polinomio de segundo orden (*α₇ Acc²*) del término de aceleración a la transformación del perfil de potencia axial cuando se correlacionan datos de ensayo transitorios, de modo que se obtiene lo siguiente: *l₂ + α₇ Acc²*, siendo *α₇* un coeficiente de ajuste específico a la disposición específica de combustible usada.

Una fórmula combinada que se usa en el procedimiento según la invención es como sigue:

$$X_{DO} = e^{\left(\frac{1}{1 + e^{(\alpha_1 + \alpha_2 G)}} + \frac{\alpha_3}{l_2 + f(Ace) + \alpha_4 R} \right)} \rho_{rel}^{\alpha_5} h_{fg}^{\alpha_6}$$

siendo los parámetros según se ha definido anteriormente en la aplicación, ya sea en el estado estacionario o en el transitorio.

Puede hacerse notar que, según el ejemplo anterior, solo se usan 7 coeficientes significativos de ajuste. Por lo tanto, la fórmula puede adaptarse fácilmente a una disposición particular de combustible nuclear usada.

Esta fórmula describe, así, la calidad de vapor local en la desecación. En función de esta información, pueden calcularse para todo el reactor nuclear las propiedades de desecación en diferentes puntos, por ejemplo el margen de desecación o la mínima relación de potencia crítica (MRPC).

Así, en función de una gran base de datos (varios miles de puntos de datos de desecación) procedente de experimentos, los inventores de la presente invención han sido capaces de detectar relaciones y dependencias anteriormente desconocidas entre las principales variables. Por ello, los inventores han dado con la idea sorprendente de que las variables de dependencia con respecto al flujo, a la distribución de potencia axial, al factor *R* y a la presión pueden ser cubiertas por factores separados en una fórmula que describa las propiedades de

deseccación. En particular, es una ventaja fundamental de la presente invención que el flujo y la distribución de potencia axial puedan ser descritos como factores separados.

5 La Fig. 1 muestra muy esquemáticamente una central de energía nuclear según la invención. 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 de reactor en la que está situado el núcleo 5 del reactor. Se suministra agua a la vasija 3 de reactor por medio de una entrada 7 de agua con ayuda de una bomba 9. El vapor generado deja la vasija 3 a través de una salida 11. Las varillas 13 de control pueden ser movidas con respecto al núcleo 5 con ayuda de unidades 15 de accionamiento de varillas de control.

10 La central de energía nuclear tiene una unidad 17 de control que, oportunamente, incluye un ordenador. Esta unidad 17 de control está dispuesta para llevar a cabo un procedimiento según una cualquiera de las realizaciones precedentes. Así, la unidad 17 de control puede, por ejemplo, disponerse para que calcule el margen de deseccación para diferentes partes del núcleo 5 del reactor nuclear.

15 La unidad 17 de control está conectada a detectores 19 de parámetros de operación, dispuestos para detectar parámetros de operación del reactor nuclear durante el operación. Los detectores 19 pueden detectar directa o indirectamente parámetros de operación tales como el flujo másico del medio refrigerante (el agua), la presión del medio refrigerante, la posición de las varillas 13 de control en el núcleo 5 del reactor y el flujo de neutrones en diferentes partes del núcleo 5. Una persona experta en la técnica sabe detectar tales parámetros de operación de un reactor nuclear.

20 Así, la unidad 17 de control está dispuesta para recibir información relativa a dichos parámetros de operación procedente de los detectores 19 y para usar estos parámetros de operación cuando lleva a cabo el mencionado procedimiento, por ejemplo para determinar el margen de deseccación en diferentes partes del núcleo 5 del reactor.

En función del margen de deseccación calculado, una persona responsable del operación de la central de energía nuclear puede aumentar o disminuir la potencia con la que opera el reactor nuclear.

25 Alternativamente, la unidad 17 de control puede tener salidas 21 de control dispuestas para controlar automáticamente la operación del reactor nuclear en dependencia de dicho procedimiento llevado a cabo por la unidad 17 de control. Debería hacerse notar que, según se usa en el presente documento, el concepto de "unidad de control" incluye, así, dos posibilidades: o bien la unidad 17 de control constituye una unidad de supervisión que suministra información a una persona (el operario), que entonces puede controlar manualmente la operación de la central de energía nuclear (un bucle abierto), o la unidad 17 de control puede incluir medios para controlar automáticamente la central de energía nuclear (un bucle cerrado). Sin embargo, en ambos casos la unidad de control incluye preferentemente medios (por ejemplo, un ordenador) dispuestos para llevar a cabo automáticamente un procedimiento según se ha descrito en lo que antecede, para proporcionar información relativa a las propiedades de deseccación del reactor nuclear.

35 La persona experta en la técnica conoce cómo controlar la potencia de un reactor nuclear. Por ejemplo, esto puede realizarse cambiando el flujo másico del medio refrigerante, con ayuda de la bomba 9, o cambiando la posición de las varillas 13 de control, con ayuda de la unidad 15 de accionamiento de varillas de control. Las salidas 21 de la unidad 17 de control pueden, así, estar dispuestas para cambiar, por ejemplo, el flujo másico del medio refrigerante o la posición de las varillas 13 de control.

40 Por último, un procedimiento según la invención es un procedimiento de operación de una central de energía nuclear que comprende un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición. El procedimiento está definido por la reivindicación 4 e incluye las etapas siguientes:

Proporcionar información relativa a parámetros de operación del nuclear reactor. Esta información puede ser suministrada, por ejemplo, con la ayuda de los detectores 19 de parámetros descritos en lo que antecede.

Usar esta información según la invención según se ha descrito en lo que antecede.

45 Controlar la operación del reactor nuclear en dependencia de la anterior etapa del procedimiento. La operación del reactor nuclear puede ser controlado por una persona responsable del operación o, de forma alternativa, automáticamente, por ejemplo por medio de una unidad 17 de control, según se ha descrito en lo que antecede.

La invención no está limitada a las realizaciones dadas a conocer, sino que puede ser modificada dentro del alcance de las reivindicaciones.

50

REIVINDICACIONES

1. 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 (17) de control dispuesta para llevar a cabo un procedimiento de estimación de cuándo puede ocurrir la desecación en dicho reactor nuclear de agua ligera, reactor que incluye una disposición del combustible nuclear, procedimiento que incluye el cálculo de la propiedad de desecación en forma de la calidad de vapor local en la desecación usando una fórmula que expresa la calidad de vapor local en la desecación del reactor nuclear, incluyendo dicha fórmula factores primero y segundo, siendo el primer factor una primera función que describe cómo depende la propiedad de desecación del flujo del medio de refrigeración a través de la disposición del combustible nuclear y siendo el segundo factor una segunda función que describe cómo la propiedad de desecación depende del perfil de potencia axial de la disposición del combustible nuclear, incluyendo también dicha fórmula una tercera función, que es un factor en la fórmula, describiendo la tercera función cómo depende la propiedad de desecación del factor R de la disposición del combustible nuclear, siendo el factor R la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas de combustible nuclear, incluyendo también dicha fórmula una cuarta función, que es un factor en la fórmula, describiendo la cuarta función cómo la propiedad de desecación depende de la presión del medio de refrigeración en la disposición del combustible nuclear, describiendo las funciones primera, segunda, tercera y cuarta, de forma independiente entre sí, dicha dependencia del flujo, dicha dependencia con respecto al perfil de potencia axial, dicha dependencia con respecto al factor R y dicha dependencia con respecto a la presión, respectivamente, expresándose la fórmula por medio de la siguiente expresión:

$$X_{DO} = e^{\left(\frac{1}{1+e^{(\alpha_1+\alpha_2 G)}} + \frac{\alpha_3}{I_2 + f(Ace)^{\alpha_4} R} \right)} \rho_{rel}^{\alpha_5} h_{fg}^{\alpha_6}$$

en la que X_{DO} es la calidad prevista del vapor local en la desecación,
 G es el flujo másico del medio de refrigeración a través de la disposición del combustible nuclear por área y tiempo,
 I_2 es la transformación de la distribución de potencia axial,
 $f(Ace)$ es una función de un término de la aceleración del flujo, función que describe efectos transitorios capturados a través del término de la aceleración del flujo,
 R es la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas de combustible nuclear,
 ρ_{rel} es la densidad relativa del vapor,
 h_{fg} es el calor latente para la evaporación del medio de refrigeración,
 α_1 a α_6 son coeficientes de ajuste específicos para la distribución específica de combustible usada, incluyendo la central de energía nuclear detectores (19) de parámetros, dispuestos para detectar los parámetros de operación del reactor nuclear durante su operación, estando dispuesta la unidad (17) de control para recibir información relativa a dichos parámetros de operación procedente de los detectores (19) y para usar estos parámetros de operación cuando se lleva a cabo el procedimiento, y comprendiendo la unidad (17) de control salidas (21) de control dispuestas para controlar el operación del reactor nuclear en dependencia de dicho procedimiento llevado a cabo por la unidad (17) de control.

2. Una central de energía nuclear según la reivindicación 1, en la que la transformación (I_2) es de la siguiente forma:

$$I_2 = \frac{1}{x(Z_{DO})} \int_{ZX0}^{Z_{DO}} x(z) dz$$

en la que $x(z)$ es el perfil de la calidad del vapor a lo largo del haz de varillas de combustible,
 z es una variable espacial local relacionada con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible, y
en la que la integración se extiende desde el inicio de la ebullición neta, $ZX0$, y la integración termina en Z_{DO} , que se define como la posición axial para la desecación.

3. Una central de energía nuclear según la reivindicación 1, en la que la transformación (I_2) tiene en cuenta fenómenos transitorios y tiene la siguiente forma:

$$I_2(t_{DO}) = \frac{1}{x(Z_{DO}(t_{DO}))} \int_{ZX0(t_{in})}^{Z_{DO}(t_{DO})} x(t(t_{in}, z), z) dz$$

en la que z es una variable espacial local relacionada con una dirección longitudinal de la disposición del combustible nuclear, paralela a la dirección en la que se extiende una varilla de combustible en la disposición del combustible,

t es el tiempo durante el fenómeno transitorio,

5 t_{in} es el tiempo durante el fenómeno transitorio en que la partícula que experimenta la desecación en t_{DO} entró en el haz de varillas de combustible,

t_{DO} es el tiempo en que una partícula de fluido experimenta la desecación,

$Z_{DO}(t_{DO})$ es la posición axial, dependiente del tiempo, para la desecación para esta partícula de fluido, y

$ZX0(t_{in})$ es el punto en el que esta partícula de fluido alcanza el punto de ebullición neta.

10 4. Un procedimiento de operación de una central de energía nuclear que comprende un reactor nuclear de agua ligera del tipo de reactor de agua en ebullición, incluyendo dicho procedimiento las siguientes etapas:

proporcionar información relativa a parámetros de operación del nuclear reactor,

usar esta información en un procedimiento de estimación de cuándo puede ocurrir la desecación en dicho

15 reactor nuclear de agua ligera, reactor que incluye una disposición del combustible nuclear, procedimiento que incluye el cálculo de la propiedad de desecación en forma de la calidad de vapor local en la desecación

usando una fórmula que expresa la calidad de vapor local en la desecación del reactor nuclear, incluyendo

dicha fórmula factores primero y segundo, siendo el primer factor una primera función que describe cómo

depende la propiedad de desecación del flujo del medio de refrigeración a través de la disposición del

20 combustible nuclear y siendo el segundo factor una segunda función que describe cómo la propiedad de desecación depende del perfil de potencia axial de la disposición del combustible nuclear, incluyendo

también dicha fórmula una tercera función, que es un factor en la fórmula, describiendo la tercera función

cómo depende la propiedad de desecación del factor R de la disposición del combustible nuclear, siendo el

factor R la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas de combustible nuclear,

25 incluyendo también dicha fórmula una cuarta función, que es un factor en la fórmula, describiendo la cuarta

función cómo la propiedad de desecación depende de la presión del medio de refrigeración en la

disposición del combustible nuclear, describiendo las funciones primera, segunda, tercera y cuarta, de

forma independiente entre sí, dicha dependencia con respecto al flujo, dicha dependencia con respecto al

perfil de potencia axial, dicha dependencia del factor R y dicha dependencia con respecto a la presión,

respectivamente, expresándose la fórmula por medio de la siguiente expresión:

$$X_{DO} = e^{\left(\frac{1}{1 + e^{(\alpha_1 + \alpha_2 G)}} + \frac{\alpha_3}{I_2 + f(Ace)} + \alpha_4 R \right)} \rho_{rel}^{\alpha_5} h_{fg}^{\alpha_6}$$

30 en la que X_{DO} es la calidad prevista del vapor local en la desecación,

G es el flujo másico del medio de refrigeración a través de la disposición del combustible nuclear por área y tiempo,

I_2 es la transformación de la distribución de potencia axial,

35 $f(Ace)$ es una función de un término de la aceleración del flujo, función que describe efectos transitorios capturados a través del término de la aceleración del flujo,

R es la influencia de la potencia local ponderada de las varillas contiguas de combustible nuclear,

ρ_{rel} es la densidad relativa del vapor,

h_{fg} es el calor latente para la evaporación del medio de refrigeración,

40 α_1 a α_6 son coeficientes de ajuste específicos para la distribución específica de combustible usada, y

controlar la operación del reactor nuclear en dependencia de la anterior etapa del procedimiento.

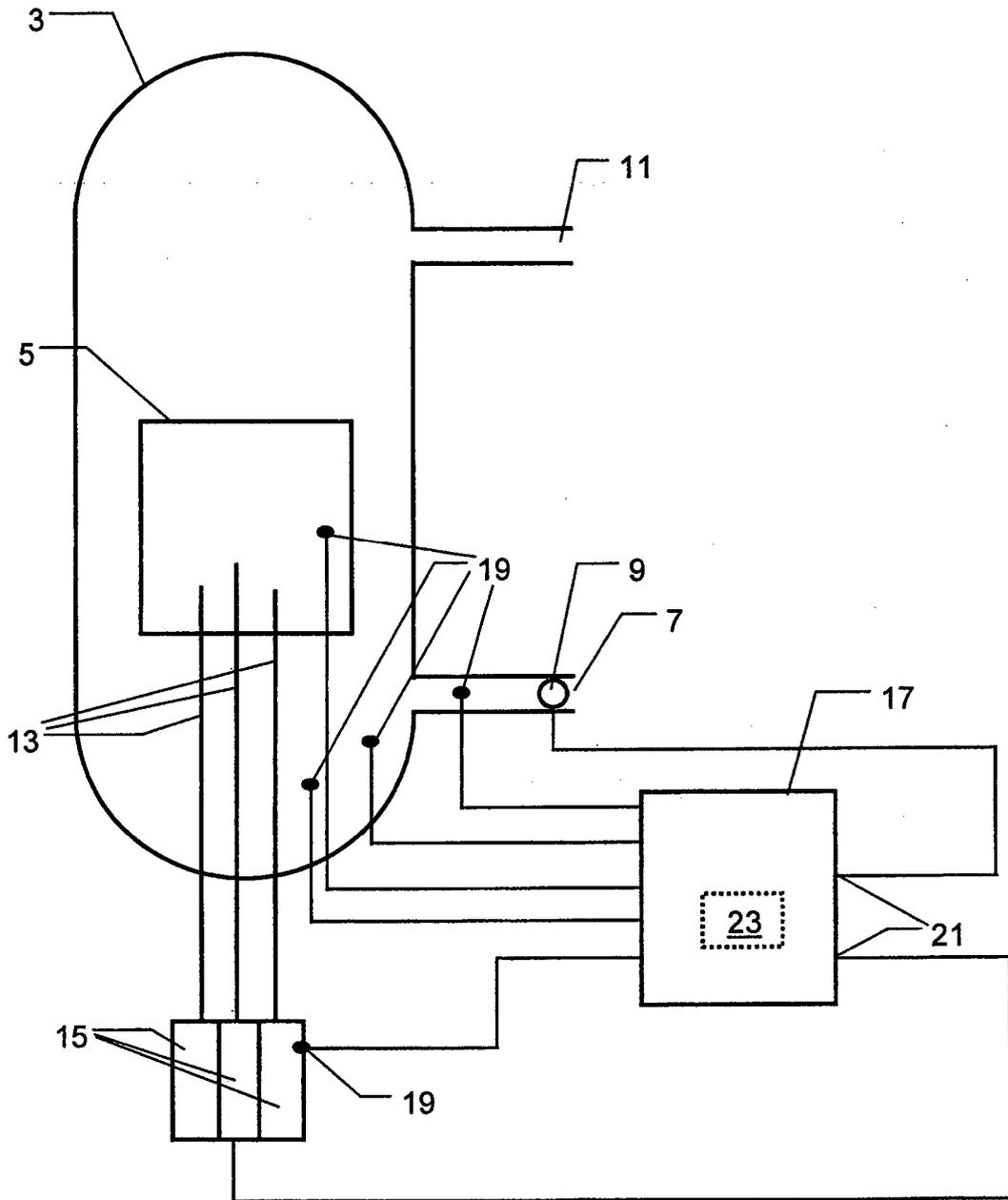


FIG 1