

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 699 327**

51 Int. Cl.:

<b>F22B 37/12</b>	(2006.01)
<b>F22B 1/18</b>	(2006.01)
<b>F28F 1/40</b>	(2006.01)
<b>F01K 7/32</b>	(2006.01)
<b>F22B 29/06</b>	(2006.01)
<b>F22B 37/10</b>	(2006.01)
<b>F28B 1/00</b>	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.12.2014 PCT/JP2014/084238**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **02.07.2015 WO15099009**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.12.2014 E 14874082 (2)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.09.2018 EP 3098507**

54 Título: **Tubo de transferencia de calor, caldera y dispositivo de turbina de vapor**

30 Prioridad:

**27.12.2013 JP 2013272804**  
**11.04.2014 JP 2014082139**  
**07.11.2014 JP 2014227415**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**08.02.2019**

73 Titular/es:

**MITSUBISHI HITACHI POWER SYSTEMS, LTD.**  
**(100.0%)**  
**3-1, Minatomirai 3-chome Nishi-ku**  
**Yokohama-shi, Kanagawa 220-8401, JP**

72 Inventor/es:

**NAKAHARAI, HIROYUKI;**  
**KANEMAKI, YUICHI;**  
**DOMOTO, KAZUHIRO y**  
**YAMASAKI, YOSHINORI**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

ES 2 699 327 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

Tubo de transferencia de calor, caldera y dispositivo de turbina de vapor

### 5 **Campo**

La presente invención se refiere a un tubo de transferencia de calor a través del que un medio de calentamiento, tal como agua fluye en su interior, una caldera, un dispositivo de turbina de vapor y un método de funcionamiento de la caldera.

10

### **Antecedentes**

Convencionalmente, como un tubo de transferencia de calor a través del que un medio de calentamiento, tal como agua fluye, un tubo con una aleta superficial interior equipada con una aleta para la formación de múltiples tornillos en una superficie interior se ha conocido (por ejemplo, véase la Bibliografía de Patente 1 o la Bibliografía de Patente 3). El interior del tubo con la aleta superficial interior tiene una presión subcrítica. En algunos casos, el agua que fluye a través del interior del tubo con la aleta superficial interior que tiene la presión subcrítica se somete a ebullición en película calentando el tubo de transferencia de calor. Cuando se produce la ebullición en película, puesto que la transferencia de calor disminuye por una película de vapor formada en la superficie interior del tubo, la temperatura del tubo aumenta. Por lo tanto, en el tubo con la aleta superficial interior, la aleta tiene una forma predeterminada con el fin de suprimir el aumento de temperatura del tubo debido a la ebullición en película. Específicamente, el tubo con la aleta superficial interior se configura de manera que una derivación de la aleta es 0,9 veces la raíz cuadrada de un diámetro interior promedio del tubo a un nivel máximo o la altura radial de la aleta es 0,04 veces el diámetro interior promedio del tubo en un nivel mínimo.

25

Además, tal como un tubo de transferencia de calor utilizado en un generador de vapor de tipo de paso directo de un tipo de funcionamiento de presión variable de presión supercrítica, un tubo de la pared de agua (tubo de ánima rayada) de un grupo de pared de tubo refrigerada por agua se ha conocido (por ejemplo, véase la Bibliografía de Patente 2). El tubo de ánima rayada está provisto de una proyección en espiral en su superficie interior. El generador de vapor de tipo paso directo realiza un funcionamiento de presión subcrítica en un funcionamiento de carga parcial, y proporcionando la proyección en espiral en la superficie interior del tubo de ánima rayada, la temperatura de la pared del tubo del tubo de ánima rayada se mantiene por debajo de una temperatura permitida al momento de funcionamiento a presión subcrítica.

### 35 **Lista de citas**

#### **Bibliografía de Patente**

Bibliografía de Patente 1: Publicación de Patente Japonesa Abierta a Inspección Pública nº. 5-118507

40 Bibliografía de Patente 2: Publicación de Patente Japonesa Abierta a Inspección Pública nº. 6-137501

Bibliografía de Patente 3: Publicación de Patente Francesa nº. 1 288 755 A

#### **Sumario**

### 45 **Problema técnico**

De esta manera, cuando el interior del tubo de transferencia de calor tal como el tubo con la aleta superficial interior descrito en la Bibliografía de Patente 1 está en un estado de presión subcrítica, con el fin de suprimir el aumento de temperatura del tubo debido a la ebullición en película, la aleta tiene una forma predeterminada. Del mismo modo, con el fin de mantener la temperatura de la pared del tubo del tubo de ánima rayada por debajo de una temperatura permitida al momento del funcionamiento de presión subcrítica, el tubo de ánima rayada descrito en la Bibliografía de Patente 2 está provisto de una proyección en espiral en la superficie interior.

50

Mientras tanto, en algunos casos, el tubo de transferencia de calor hace fluir el agua como un medio de calentamiento, en un estado en el que su interior tiene la presión supercrítica. El agua que fluye a la presión supercrítica no se hierve incluso si se calienta (no entrar en un estado bifásico gas-líquido), y fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor en un estado monofásico. Aquí, cuando el agua fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor que tiene la presión supercrítica tiene una velocidad de masa baja (una velocidad de flujo baja) o un flujo de transferencia de calor alto se aplica al agua al momento de calentar el tubo de transferencia de calor, se produce un fenómeno de degradación por transferencia de calor en el que un coeficiente de transferencia de calor disminuye en algunos casos. Cuando se produce el fenómeno de degradación por transferencia de calor, puesto que la transferencia de calor del tubo de transferencia de calor al agua disminuye, la temperatura del tubo de transferencia de calor puede aumentar.

60

Además, en el tubo de transferencia de calor que tiene la presión interior supercrítica, cuando el coeficiente de transferencia de calor es bajo, puesto que el coeficiente de transferencia de calor del tubo de transferencia de calor

65

al agua disminuye, la temperatura del tubo de transferencia de calor puede aumentar. Aquí, en la Bibliografía de Patente 1, una aleta tiene una forma basada en la premisa de que el interior del tubo de transferencia de calor está en un estado de presión subcrítica, es decir, que el interior del tubo de transferencia de calor está en el estado bifásico gas-líquido. Por esta razón, puesto que la forma de la aleta no se basa en la premisa de que el interior del tubo de transferencia de calor está en el estado monofásico, es difícil de suprimir el aumento de la temperatura del tubo de transferencia de calor, incluso mediante la aplicación de la invención de la Bibliografía de Patente 1.

Por lo tanto, un objetivo de la presente invención es proporcionar un tubo de transferencia de calor, una caldera y un dispositivo de turbina de vapor capaz de suprimir un aumento en la temperatura del tubo, mediante la supresión de una aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor durante la presión supercrítica.

Además, otro objetivo de la presente invención es proporcionar un tubo de transferencia de calor, una caldera y un dispositivo de turbina de vapor capaz de suprimir un aumento en la temperatura del tubo, mejorando el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime una aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor durante presión supercrítica.

### Solución al problema

De acuerdo con un aspecto de la presente invención, un tubo de transferencia de calor de acuerdo con la reivindicación independiente 1 se proporciona.

De acuerdo con esta configuración, cuando el interior se convierte en una presión supercrítica, satisfaciendo  $(Pr \cdot Nr)/Hr > 1,25 L + 55$ , es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor. Por esta razón, puesto que la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor se puede suprimir durante presión supercrítica, es posible suprimir un aumento en la temperatura del tubo.

Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, cuando la caldera funciona a una potencia nominal, una velocidad de masa promedio del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor que forma la pared del horno es igual o inferior a  $1500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

De acuerdo con esta configuración, incluso cuando se baja la velocidad de masa del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor, es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, en una sección transversal tomada a lo largo de la dirección del eje de tubo, cuando la anchura [mm] de la porción de ranura en la dirección del eje de tubo se define como  $Wg$ , y un diámetro exterior del tubo [mm] se define como  $D$ , la anchura  $Wg$  [mm] de la porción de ranura, la altura  $Hr$  [mm] de la porción de nervadura, y el diámetro exterior del tubo  $D$  [mm] satisfacen " $Wg/(Hr \cdot D) > 0,40$ ".

De acuerdo con esta configuración, cuando el interior se convierte en una presión supercrítica, al satisfacer  $Wg/(Hr \cdot D) > 0,40$ , es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor. Por esta razón, puesto que la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor se puede suprimir durante presión supercrítica, es posible suprimir un aumento en la temperatura del tubo.

Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, cuando la caldera funciona a una potencia nominal, una velocidad de masa promedio del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor que forma la pared del horno será de  $1000$  a  $2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

De acuerdo con esta configuración, incluso si el medio de calentamiento tal como agua que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor tiene una velocidad de masa baja, o un flujo de transferencia de calor alto se aplica al medio de calentamiento, es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, el diámetro exterior  $D$  del tubo [mm] es " $25 \text{ mm} \leq D \leq 40 \text{ mm}$ ".

De acuerdo con esta configuración, si el diámetro exterior del tubo es de  $25 \text{ mm}$  a  $40 \text{ mm}$ , el efecto es más notable.

De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, se proporciona un tubo de transferencia de calor de acuerdo con la reivindicación independiente 4.

De acuerdo con esta configuración, cuando el interior se convierte en una presión supercrítica, es posible mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor. Por esta razón, mediante la mejora del coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor durante la presión supercrítica, es posible suprimir un aumento en la temperatura del tubo.

Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, cuando la caldera funciona a una potencia nominal, una velocidad de masa promedio del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor que forma la pared del horno será de 1000 a 2000 kg/m<sup>2</sup>s.

5 De acuerdo con esta configuración, incluso cuando el medio de calentamiento tal como agua que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor con una velocidad de masa baja, o un flujo de transferencia de calor alto se aplica al medio de calentamiento, es posible mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

10 Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, cuando la caldera funciona a la potencia nominal, la velocidad de masa promedio del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor que forma la pared del horno es igual o inferior a 1500 kg/m<sup>2</sup>s.

15 De acuerdo con esta configuración, incluso cuando se baja la velocidad de masa del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor, es posible mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, el diámetro exterior D [mm] del tubo es " $25 \text{ mm} \leq D \leq 35 \text{ mm}$ ".

20 De acuerdo con esta configuración, si el diámetro exterior del tubo es de 25 mm a 35 mm, la velocidad de flujo másico del medio de calentamiento se puede ajustar en al menos uno cualquiera del intervalo descrito anteriormente, y la velocidad de flujo másico del medio de calentamiento se puede fijar a la velocidad de flujo másico adecuada. Aquí, en el caso de aplicar el tubo de transferencia de calor para una caldera, la velocidad de flujo másico del medio de calentamiento que fluye a través del interior se ajusta a una velocidad de flujo másico predeterminada.

25 En este caso, en lo que respecta a una velocidad de flujo másico definida, cuando el diámetro exterior del tubo disminuye, la velocidad de flujo másico aumenta, y mientras tanto, cuando el diámetro exterior del tubo aumenta, la velocidad de flujo másico disminuye. Por esta razón, a fin de lograr la velocidad de flujo másico adecuada para la forma del tubo de transferencia de calor que satisfaga la Fórmula anteriormente descrita, al establecer el diámetro exterior del tubo en el intervalo de 25 mm a 35 mm, se puede lograr la velocidad de flujo másico definida, y es posible optimizar el rendimiento del coeficiente de transferencia de calor.

30 Ventajosamente, en el tubo de transferencia de calor, la altura Hr [mm] de la porción de nervadura, el intervalo Pr [mm] de la porción de nervadura, la anchura Wr [mm] de la porción de nervadura, el número Nr de la nervadura porción y la longitud de perímetro mojado L [mm] satisfacen " $(Pr \cdot Nr)/(Hr \cdot Wr) < 0,40L + 80$ ".

35 De acuerdo con esta configuración, en la Fórmula de " $(Pr \cdot Nr)/(Hr \cdot Wr) > 0,40L + 9,0$ ", cuando la Fórmula del lado izquierdo aumenta extremadamente, un intervalo Pr de la porción de nervadura se ensancha, el número Nr de la porción de nervadura aumenta, la altura Hr de la porción de nervadura se vuelve cero, y una anchura Wr de la porción de nervadura en una dirección circunferencial se vuelve cero. En consecuencia, no es fácil mantener la forma del tubo de transferencia de calor. Por esta razón, al satisfacer la Fórmula " $(Pr \cdot Nr)/(Hr \cdot Wr) < 0,40L + 80$ ", es posible mantener fácilmente el tubo de transferencia de calor en una forma adecuada.

40 De acuerdo con todavía otro aspecto de la presente invención, una caldera incluye el tubo de transferencia de calor de acuerdo con una cualquiera de los anteriores que se utiliza como el tubo de la pared del horno que forma una pared del horno de la caldera que funciona a una presión supercrítica, cuando funciona a una salida nominal.

45 De acuerdo con esta configuración, el tubo de transferencia de calor se puede aplicar como un tubo de la pared del horno que forma una pared del horno de la caldera. Además, un tubo de tal pared del horno puede también denominarse tubo de ánima rayada.

50 De acuerdo con todavía otro aspecto de la presente invención, una caldera que calienta el medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor, calentando el tubo de transferencia de calor de acuerdo con una cualquiera de los anteriores por la radiación de llama o gas a alta temperatura.

55 De acuerdo con esta configuración, es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor del tubo de transferencia de calor durante la presión supercrítica, o mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor del tubo de transferencia de calor. Por esta razón, es posible mantener adecuadamente la transferencia de calor del tubo de transferencia de calor al agua como medio de calentamiento, y es posible generar vapor de agua de forma estable.

60 Además, por ejemplo, el gas a alta temperatura puede ser un gas de combustión que se genera por la combustión del combustible, y puede ser un gas de escape descargado desde un dispositivo tal como una turbina de gas. En otras palabras, como una caldera que utiliza un tubo de transferencia de calor en el que el interior se convierte en una presión supercrítica se puede aplicar, por ejemplo, una caldera de funcionamiento a presión variable de presión supercrítica, una caldera de funcionamiento a presión constante de presión supercrítica o similares que calienta el tubo de transferencia de calor por radiación de llama o gas de combustión. En este caso, el tubo de transferencia de calor se configura como la pared del horno de un horno provisto en la caldera, mediante la disposición de una

pluralidad de los tubos de transferencia de calor en la dirección radial. Además, como otra caldera que utiliza el tubo de transferencia de calor en el que el interior se convierte en una presión supercrítica se puede aplicar, por ejemplo, una caldera de recuperación del calor de escape que calienta el tubo de transferencia de calor por gas de escape. En este caso, el tubo de transferencia de calor se configura como la pluralidad de grupos de tubos de transferencia de calor dispuestos en la dirección radial, y se aloja en un recipiente a través del que fluye el gas de escape. De este modo, el tubo de transferencia de calor puede aplicarse a cualquier caldera, siempre que el interior de la caldera se convierta en una presión supercrítica.

De acuerdo con todavía otro aspecto de la presente invención, un dispositivo de turbina de vapor incluye: la caldera de acuerdo con una cualquiera de las anteriores; y una turbina de vapor que funciona con el vapor generado por el calentamiento del agua como medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor dispuesto en la caldera.

De acuerdo con esta configuración, es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor del tubo de transferencia de calor durante la presión supercrítica, o mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor del tubo de transferencia de calor. Por esta razón, es posible mantener adecuadamente la transferencia de calor del tubo de transferencia de calor al agua, y el vapor se puede generar de forma estable. Por esta razón, puesto que es posible suministrar de forma estable el vapor a la turbina de vapor, también es posible hacer funcionar de forma estable la turbina de vapor.

### Breve descripción de los dibujos

la Figura 1 es un diagrama esquemático que ilustra una central térmica de acuerdo con la primera realización.

la Figura 2 es una vista en sección transversal de un tubo de la pared del horno cuando se toma a lo largo de una dirección del eje de tubo del tubo de la pared del horno.

la Figura 3 es una vista en sección transversal del tubo de la pared del horno cuando se toma por un plano perpendicular a la dirección del eje de tubo del tubo de la pared del horno.

la Figura 4 es un gráfico de un ejemplo de una temperatura superficial de pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía.

la Figura 5 es un gráfico de un ejemplo de la temperatura superficial de pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía.

la Figura 6 es una vista parcial en sección transversal cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de una forma de una porción de nervadura del tubo de la pared del horno.

la Figura 7 es una vista en sección transversal parcial cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de la forma de la porción de nervadura del tubo de la pared del horno.

la Figura 8 es una vista en sección transversal parcial cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de la forma de la porción de nervadura del tubo de la pared del horno.

la Figura 9 es una vista en sección transversal parcial cuando se toma a lo largo de un plano perpendicular a la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de la forma de la porción de nervadura del tubo de la pared del horno.

la Figura 10 es una vista explicativa que ilustra una relación entre un flujo (flujo retorno) al momento de superar un escalón y un coeficiente de transferencia de calor.

la Figura 11 es un gráfico de un ejemplo de la temperatura superficial de pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía.

la Figura 12 es un gráfico de un ejemplo de la temperatura superficial de pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía.

la Figura 13 es un gráfico que ilustra una relación entre una altura de nervadura  $H_r$ , un intervalo de nervadura  $P_r$ , una anchura de nervadura  $W_r$  y un número de nervadura  $N_r$ , que varía en función de una longitud de perímetro mojado  $L$ , en lo que se refiere a un tubo de la pared del horno de una segunda realización.

la Figura 14 es un gráfico que ilustra una relación entre una altura de nervadura  $H_r$ , un intervalo de nervadura  $P_r$ , una anchura de nervadura  $W_r$  y un número de nervadura  $N_r$ , que varía en función de una longitud de perímetro mojado  $L$  en lo que se refiere a un tubo de la pared del horno de una tercera realización.

la Figura 15 es un gráfico que ilustra una relación entre la altura de nervadura  $H_r$ , el intervalo de nervadura  $P_r$ , la anchura de nervadura  $W_r$  y el número de nervadura  $N_r$ , que varía en función de la longitud de perímetro mojado  $L$  en lo que se refiere a un tubo de la pared del horno de una cuarta realización.

### Descripción de las realizaciones

A continuación se describirán en detalle las realizaciones de acuerdo con la presente invención basándose en los dibujos.

#### [Primera realización]

La Figura 1 es un diagrama esquemático que ilustra una central térmica de acuerdo con la primera realización. La Figura 2 es una vista en sección transversal de un tubo de la pared del horno cuando se toma a lo largo de la

dirección del eje de tubo del tubo de la pared del horno. La Figura 3 es una vista en sección transversal de un tubo de la pared del horno cuando se toma por un plano perpendicular a la dirección del eje de tubo del tubo de la pared del horno.

5 La central térmica de la primera realización utiliza carbón pulverizado obtenido por trituración de carbón (tal como carbón bituminoso y subbituminoso) como combustible pulverizado (combustible sólido). La central térmica quema el carbón pulverizado para generar vapor por el calor generado por la combustión, y acciona un generador conectado a la turbina de vapor para generar energía eléctrica, mediante el giro de la turbina de vapor por el vapor generado.

10 Como se ilustra en la Figura 1, una central térmica 1 está equipada con una caldera 10, una turbina de vapor 11, un condensador 12, un calentador de agua de alimentación a alta presión 13 y un calentador de agua de alimentación a baja presión 14, un desaireador 15, una bomba de agua de alimentación 16 y un generador 17. La central térmica 1 tiene una forma de una planta de turbina de vapor equipada con la turbina de vapor 11.

15 La caldera 10 se utiliza como una caldera convencional, y es una caldera de carbón pulverizado que es capaz de quemar el carbón pulverizado por un quemador de combustión 41 de recuperar el calor generado por la combustión mediante el uso de un tubo 35 de la pared del horno que funciona como un tubo de transferencia de calor. Además, la caldera 10 es una caldera de funcionamiento a presión variable de presión supercrítica en el que el interior del tubo 35 de la pared del horno se ajusta a una presión supercrítica o una presión subcrítica. La caldera 10 está  
20 equipada con un horno 21, una cámara de combustión 22, un separador de vapor 23, un sobrecalentador 24 y un recalentador 25.

El horno 21 tiene paredes 31 del horno que rodean los cuatro lados, y se forma en una forma tubular cuadrada por las paredes 31 del horno de los cuatro lados. Por otra parte, en el horno 21 que tiene la forma tubular cuadrada, su  
25 dirección de extensión longitudinal se convierte en una dirección vertical y se convierte en perpendicular a una superficie de instalación de la caldera 10. La pared 31 del horno se forma utilizando una pluralidad de tubos 35 de la pared del horno, y la pluralidad de los tubos 35 de la pared del horno se dispone uno al lado del otro en la dirección radial a fin de formar las superficies de pared de las paredes 31 del horno.

30 Cada tubo 35 de la pared del horno se forma en una forma cilíndrica, y su dirección del eje de tubo se convierte en la dirección vertical y se vuelve perpendicular a la superficie de instalación de la caldera 10. Además, los tubos 35 de la pared del horno se denominan tubos de ánima rayada en los que ranuras en espiral se forman en su interior. El agua como medio de transferencia de calor fluye a través del interior de los tubos 35 de la pared del horno. La presión interior de los tubos 35 de la pared del horno se convierte en una presión supercrítica o una presión subcrítica, en  
35 función del funcionamiento de la caldera 10. Los tubos 35 de la pared del horno se configuran de modo que el lado inferior en la dirección vertical es un lado de entrada, y el lado superior en la dirección vertical es un lado de salida. De este modo, el horno 21 de la caldera 10 de la presente realización es un tipo de horno tubular vertical en el que los tubos 35 de la pared del horno son perpendiculares. Los detalles de los tubos 35 de la pared del horno se describirán a continuación.

40 La cámara de combustión 22 tiene una pluralidad de quemadores de combustión 41 montados en la pared 31 del horno. Además, en la Figura 1, solo se ilustra un quemador de combustión 41. La pluralidad de quemadores de combustión 41 quema el carbón pulverizado como combustible para formar la llama en el horno 21. En este momento, la pluralidad de quemadores de combustión 41 quema el carbón pulverizado de modo que la llama formada se convierte en un flujo de giro. Por otra parte, la pluralidad de quemadores de combustión 41 calienta los  
45 tubos 35 de la pared del horno, por el gas de combustión a alta temperatura generado por la combustión de combustible (gas a alta temperatura). En lo que se refiere a la pluralidad de quemadores de combustión 41, por ejemplo, la pluralidad de quemadores de combustión dispuestos en un intervalo predeterminado a lo largo de la circunferencia del horno 21 se supone que son un conjunto, y un conjunto de quemadores de combustión 41 se dispone en una pluralidad de etapas en un intervalo predeterminado en la dirección vertical (dirección longitudinal del horno 21).

El sobrecalentador 24 se proporciona dentro del horno 21 para sobrecalentar el vapor suministrado desde los tubos 35 de la pared del horno del horno 21 a través del separador de vapor 23. El vapor de agua sobrecalentado en el  
55 sobrecalentador 24 se suministra a la turbina de vapor 11 a través de una tubería de vapor principal 46.

El recalentador 25 se proporciona dentro del horno 21 para calentar el vapor utilizado en (una turbina a alta presión 51) la turbina de vapor 11. El vapor que fluye hacia el recalentador 25 a partir de (la turbina 51 a alta presión) la  
60 turbina de vapor 11 a través de una tubería de vapor de recalentamiento a baja temperatura 47 se calienta por el recalentador 25 y el vapor calentado fluye en (una turbina 52 a presión intermedia) de la turbina de vapor 11 desde el recalentador 25 de nuevo a través de una tubería de vapor de recalentamiento a alta temperatura 48.

La turbina de vapor 11 tiene la turbina a alta presión 51, la turbina a presión intermedia 52, y una turbina a baja presión 53. Estas turbinas 51, 52 y 53 se conectan por un rotor 54 tal como un eje de giro de forma integralmente  
65 giratoria. La tubería de vapor principal 46 se conecta al lado de entrada de la turbina a alta presión 51, y la tubería de vapor de recalentamiento a baja temperatura 47 se conecta al lado de salida del mismo. La turbina a alta presión

51 gira por el vapor suministrado desde la tubería de vapor principal 46, y descarga el vapor de agua después del uso de la tubería de vapor de recalentamiento a baja temperatura 47. La tubería de vapor de recalentamiento a alta temperatura 48 se conecta al lado de entrada de la turbina a presión intermedia 52, y la turbina a baja presión 53 se conecta al lado de salida de la misma. La turbina a presión intermedia 52 gira por el vapor suministrado y recalentado desde la tubería de vapor de recalentamiento a alta temperatura 48, y descarga el vapor de agua después de su uso hacia la turbina a baja presión 53. La turbina a presión intermedia 52 se conecta al lado de entrada de la turbina a baja presión 53, y el condensador 12 se conecta al lado de salida de la misma. La turbina a baja presión 53 gira por el vapor suministrado desde la turbina a presión intermedia 52, y descarga el vapor de agua después de su uso hacia el condensador 12. El rotor 54 se conecta al generador 17, y acciona en giro el generador 17 por el giro de la turbina a alta presión 51, la turbina a presión intermedia 52 y la turbina a baja presión 53.

El condensador 12 flocula el vapor descargado de la turbina a baja presión 53 por una línea de refrigeración 56 dispuesta en su interior para retornar el vapor (condensado) al agua. El agua floclada se suministra hacia el calentador de agua de alimentación a baja presión 14 desde el condensador 12. La alimentación del calentador de agua a baja presión 14 calienta el agua floclada por el condensador 12 en un estado a baja presión. El agua calentada se suministra hacia el desaireador 15 desde el calentador de agua de alimentación a baja presión 14. El desaireador 15 desairea el agua suministrada del calentador de agua de alimentación a baja presión 14. El agua desaireada se suministra hacia el calentador de agua de alimentación de alta presión 13 desde el desaireador 15. El calentador de agua de alimentación a alta presión 13 calienta el agua desaireada por el desaireador 15 en un estado de alta presión. El agua calentada se suministra hacia los tubos 35 de la pared del horno de la caldera 10 desde el calentador de agua de alimentación a alta presión 13. Además, entre el desaireador 15 y el calentador de agua de alimentación a alta presión 13, se proporciona una bomba de agua de alimentación 16 para suministrar agua hacia el calentador de agua de alimentación a alta presión 13 desde el desaireador 15.

El generador 17 se conecta al rotor 54 de la turbina de vapor 11, y genera potencia al accionarse en giro por el rotor 54.

Además, aunque no se ilustra, la central térmica 1 está provista de un dispositivo desnitrificación, un precipitador electrostático, un soplador de inducido, y un dispositivo de desulfuración, y se proporciona una pila en una porción de extremo aguas abajo.

En la central térmica 1 configurada de este modo, el agua que fluye a través del interior de los tubos 35 de la pared del horno de la caldera 10 se calienta por la cámara de combustión 22 de la caldera 10. El agua calentada por la cámara de combustión 22 se convierte en vapor hasta que fluye al sobrecalentador 24 a través del separador de vapor 23, y el vapor pasa a través del sobrecalentador 24 y de la tubería de vapor principal 46 en este orden y se suministra a la turbina de vapor 11. El vapor suministrado a la turbina de vapor 11 pasa a través de la turbina a alta presión 51, la tubería de vapor de recalentamiento a baja temperatura 47, el recalentador 25, la tubería de vapor de recalentamiento a alta temperatura 48, la turbina a presión intermedia 52, y la turbina a baja presión 53 en este orden, y desemboca en el condensador 12. En este momento, la turbina de vapor 11 gira por la corriente de vapor, accionando así en giro el generador 17 a través del rotor 54 para generar potencia en el generador 17. El vapor que fluye al condensador 12 se devuelve al agua mediante la floclación mediante la línea de refrigeración 56. El agua floclada en el condensador 12 pasa a través del calentador de agua de alimentación a baja presión 14, el desaireador 15, la bomba de agua de alimentación 16 y el calentador de agua de alimentación a alta presión 13 en este orden, y se suministra de nuevo a los tubos 35 de la pared del horno. De esta manera, la caldera 10 de esta realización se convierte en una caldera de paso directo.

A continuación, se describirá el tubo 35 de la pared del horno haciendo referencia a las Figuras 2 y 3. Como se ilustra en las Figuras 2 y 3, el tubo 35 de la pared del horno se forma en una forma cilíndrica alrededor de una línea central I. Como se ha descrito anteriormente, se proporciona el tubo 35 de la pared del horno de manera que su dirección del eje de tubo se convierte en una dirección vertical, y el agua fluye en su interior hacia el lado superior desde el lado inferior en la dirección vertical. Además, en una superficie circunferencial interior P1 del tubo 35 de la pared del horno configurado como un tubo de ánima rayada, una porción de ranura 36 que tiene una forma en espiral hacia la dirección del eje de tubo se forma. Además, en el tubo 35 de la pared del horno, una porción de nervadura 37 que se proyecta radialmente hacia el interior se forma para tener una forma en espiral hacia la dirección del eje de tubo por la porción de ranura en espiral 36. En este caso, un diámetro exterior del tubo del tubo 35 de la pared del horno, que es un diámetro que pasa por la línea central I en la superficie circunferencial exterior P3 se ajusta en un diámetro exterior del tubo D. Además, el diámetro exterior D del tubo tiene una longitud del orden de varias decenas de milímetros. Por lo tanto, la unidad del diámetro exterior D del tubo se ajusta en [mm].

Una pluralidad de porciones de ranura 36 se forma en la dirección circunferencial de la superficie circunferencial interior P1 a un intervalo predeterminado, en una sección transversal ilustrada en la Figura 3 que se toma a lo largo de un plano perpendicular a la dirección del eje de tubo. En la primera realización, seis porciones de ranura 36 se forman en la sección transversal ilustrada en la Figura 3. Por tanto, seis porciones de nervadura 37 se forman también en la sección transversal ilustrada en la Figura 3. En la primera realización, aunque el número de porciones de ranura 36 formadas en el tubo 35 de la pared del horno es seis, la pluralidad de porciones de ranura 36 puede formarse, y el número no está particularmente limitado.

Además, puesto que cada porción de ranura 36 se forma para hundirse hacia el exterior en la dirección radial, la superficie inferior (es decir, el plano exterior en la dirección radial de la porción de ranura 36) de cada porción de ranura 36 es una superficie circunferencial interior P2 que se encuentra fuera en la dirección radial desde la superficie circunferencial interior P1. La superficie circunferencial interior P2 tiene una forma circular alrededor de la línea central I en la sección transversal ilustrada en la Figura 3. Es decir, la superficie circunferencial interior P1 y la superficie circunferencial interior P2 se forman en un círculo concéntrico, la superficie circunferencial interior P1 se sitúa dentro en la dirección radial, y la superficie circunferencial interior P2 se sitúa fuera en la dirección radial. Aquí, el diámetro interior de la superficie circunferencial interior interna P1 del tubo 35 de la pared del horno se establece en un pequeño diámetro d1, y el diámetro de la superficie circunferencial interior exterior P2 del tubo 35 de la pared del horno se establece en un diámetro interior grande d2.

También, puesto que cada una de las porciones de ranura 36 se forma en forma de espiral hacia la dirección del eje de tubo, una pluralidad de porciones de ranura 36 se forma en la dirección del eje de tubo de la superficie circunferencial interior P1 a un intervalo predeterminado, en la sección transversal ilustrada en la Figura 2 que se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo.

La pluralidad de porciones de nervadura 37 se forma en la dirección circunferencial de la superficie circunferencial interior P1 a un intervalo predeterminado, en la sección transversal ilustrada en la Figura 3 que se toma a lo largo de un plano perpendicular a la dirección del eje de tubo. En la primera realización, puesto que se forman las seis porciones de ranura 36, las seis porciones de nervadura 37 se forman entre las porciones de ranura 36. En la primera realización, aunque el número de las porciones de nervadura 37 formado en el tubo 35 de la pared del horno es de seis, como en las porciones de ranura 36, la pluralidad de porciones de nervadura 37 se puede formar, y el número de las mismas no está particularmente limitado.

Por otra parte, cada una de las porciones de nervadura 37 se forma para sobresalir hacia dentro en la dirección radial desde la superficie inferior (es decir, la superficie circunferencial interior P2) de las porciones de ranura respectivas 36. Además, puesto que se forman las porciones de nervadura 37 en forma de espiral hacia la dirección del eje de tubo, la pluralidad de porciones de nervadura 37 se forma en la superficie circunferencial interior P2 en la dirección del eje de tubo a un intervalo predeterminado, en la sección transversal ilustrada en la Figura 2 que se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo.

Aquí, como se ilustra en la Figura 2, la altura en la dirección radial de la porción de nervadura 37 se establece en una altura de nervadura Hr. Específicamente, la altura de nervadura Hr es una altura desde la superficie circunferencial interior P2 en una ubicación (es decir, parte superior) en la que la porción de nervadura 37 se sitúa en el lado radialmente más interior. Además, en la sección transversal ilustrada en la Figura 3, la anchura en la dirección circunferencial de la porción de nervadura 37 se establece en una anchura de nervadura Wr. Específicamente, la anchura de nervadura Wr es una anchura de entre un límite entre la superficie circunferencial interior P2 en un lado en la dirección circunferencial de la porción de nervadura 37 y un límite entre la superficie circunferencial interior P2 en el otro lado en la dirección circunferencial de la porción de nervadura 37.

También, en la sección transversal ilustrada en la Figura 2, la anchura en la dirección del eje de tubo de la porción de ranura 36 se ajusta en una anchura de ranura Wg, y el intervalo de las porciones de nervadura 37 adyacentes entre sí en la dirección del eje de tubo se ajusta en un intervalo de nervadura Pr. Específicamente, la anchura de ranura Wg es una anchura entre un límite entre la superficie circunferencial interior P2 y la porción de nervadura 37 en un lado en la dirección del eje de tubo de la porción de ranura 36, y un límite entre la superficie circunferencial interior P2 y la porción de nervadura 37 en el otro lado en la dirección del eje de tubo de la porción de ranura 36. Además, el intervalo Pr es una distancia entre los centros en la dirección del eje de tubo de las porciones de nervadura 37.

Además, en la sección transversal ilustrada en la Figura 3, la longitud de contacto del tubo 35 de la pared del horno con el agua que fluye a través del interior se ajusta a una longitud de perímetro mojado L, y el número de porciones de nervadura 37 se ajusta a un número de nervadura Nr. En la Figura 3, la longitud de perímetro mojado L es vista como una circunferencia por conveniencia de la ilustración, pero es una longitud total de la superficie de la pared en contacto con el fluido en una sección transversal de paso de flujo como se ha descrito anteriormente. En este momento, el diámetro exterior D del tubo tiene longitud del orden de varias centenas de milímetros. Por lo tanto, la altura de nervadura Hr se convierte en una altura del orden de milímetros. Del mismo modo, la anchura de nervadura Wr, la anchura de ranura Wg, el intervalo de nervadura Pr y la longitud de perímetro mojado L también tienen una longitud del orden de milímetros. Por lo tanto, las unidades de altura de nervadura Hr, anchura de nervadura anchura Wr, la anchura de ranura Wg, el intervalo de ranura Pr y la longitud de perímetro mojado L son [mm].

A continuación, se describirá la forma del tubo 35 de la pared del horno. Como se ha descrito anteriormente, el agua fluye a través del tubo 35 de la pared del horno en un estado en el que su interior tiene una presión supercrítica. En este caso, en el tubo 35 de la pared del horno calentado por la cámara de combustión 22, en algunos casos, el fenómeno de degradación por transferencia de calor en el que se reduce el coeficiente de transferencia de calor se produce. Por lo tanto, el tubo 35 de la pared del horno se forma en una forma en la que el diámetro interior pequeño



d1, el diámetro interior grande d2, el diámetro exterior D del tubo, la anchura de ranura Wg, la anchura de nervadura Wr, el intervalo de nervadura Pr, el número de nervadura Nr, la altura de nervadura Hr, y la longitud de perímetro mojado L satisfacen la Fórmula relacional que se describe a continuación.

5 En el tubo 35 de la pared del horno, la anchura de ranura Wg, la altura de nervadura Hr y el diámetro exterior D del tubo satisfacen la Fórmula relacional " $Wg/(Hr \cdot D) > 0,40$ ". Aquí, en el caso de " $Wg/(Hr \cdot D) = F$ ", se obtiene la relación " $F > 0,40$ ". En este momento, la Altura de nervadura Hr es " $Hr > 0$ ", la porción de nervadura 37 se configura para sobresalir radialmente hacia el interior. Por otra parte, la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, el número de nervadura Nr y la longitud de perímetro mojado L satisfacen la Fórmula relacional de " $(Pr \cdot Nr)/Hr > 1,25L + 55$ ". Aunque los detalles se describirán más adelante, mediante el establecimiento de la forma del tubo 35 de la pared del horno para satisfacer la Fórmula relacional anteriormente descrita, es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor. En este momento, si el diámetro exterior D del tubo es " $25 \text{ mm} \leq D \leq 40 \text{ mm}$ ", se logra un efecto más notable.

15 Un ángulo de avance de la porción de nervadura 37 que tiene la forma de espiral se convierte en un ángulo que satisface la Fórmula relacional anteriormente mencionada. Además, el ángulo de avance es un ángulo con respecto a la dirección del eje de tubo. Si el ángulo de avance de la porción de nervadura 37 es de  $0^\circ$ , se convierte en una dirección a lo largo de la dirección del eje de tubo, y si el ángulo de avance de la porción de nervadura 37 es de  $90^\circ$ , se convierte en una dirección a lo largo de la dirección circunferencial. Aquí, el ángulo de avance de la porción de nervadura 37 se cambia también apropiadamente en función del número de porciones de nervadura 37. En otras palabras, si hay un gran número de porciones de nervadura 37, el ángulo de avance de la porción de nervadura 37 se convierte en un ángulo suave (se aproxima a  $0^\circ$ ), y por el otro lado, si hay un pequeño número de porciones de nervadura 37, el ángulo de avance de la porción de nervadura 37 se convierte en un ángulo pronunciado (se aproxima a  $90^\circ$ ).

25 A continuación, los cambios en la temperatura superficial de la pared del tubo de la pared del horno que varían en función de la entalpía se describirán con referencia a las Figuras 4 y 5. Las Figuras 4 y 5 son gráficos de un ejemplo de la temperatura superficial de la pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía. Aquí, en las Figuras 4 y 5, los ejes horizontales son la entalpía dada a la pared del horno (tubo 35 de la pared del horno) 31, y los ejes verticales de los mismos son la temperatura superficial de la pared del tubo (la temperatura del tubo 35 de la pared del horno).

35 Como se ilustra en las Figuras 4 y 5,  $F_1$  es un gráfico que ilustra un cambio en la temperatura superficial de la pared del tubo al momento de " $F = 0,35$ ", y tiene una forma del tubo 35 de la pared del horno convencional que no satisface la Fórmula relacional de esta realización. Además,  $F_2$  es un gráfico que ilustra un cambio en la temperatura superficial de la pared del tubo al momento de " $F > 0,40$ ", y tiene una forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula relacional de esta realización. Además,  $F_3$  es un gráfico que ilustra un cambio en la temperatura superficial de la pared del tubo cuando satisface la Fórmula relacional " $(Pr \cdot Nr)/Hr > 1,25L + 55$ ", y tiene otra forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula relacional de esta realización. Además,  $T_w$  es un gráfico que ilustra un cambio en la temperatura (temperatura del fluido) de agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno, y  $T_{\text{max}}$  es una temperatura crítica del tubo que es aceptable para el tubo 35 de la pared del horno.

45 Aquí, en la Figura 4, la velocidad de masa de agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno se convierte en una velocidad de masa baja a la que la estabilidad de flujo de agua dentro del tubo 35 de la pared del horno puede asegurarse, y el interior del tubo 35 de la pared del horno tiene una presión supercrítica. Específicamente, la velocidad de masa baja difiere en función de los tamaños del diámetro exterior D del tubo, el diámetro interior pequeño d1 y el diámetro interior grande d2, pero por ejemplo, cuando la caldera 10 funciona a la salida nominal, la velocidad de masa promedio del tubo 35 de la pared del horno está en un intervalo de 1.000 ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) o más y 2.000 ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) o menos. Además, siempre que la velocidad de flujo másico a la que la estabilidad del flujo de agua se consigue dentro del tubo 35 de la pared del horno se puede garantizar que la velocidad de flujo másico no se limita al intervalo descrito anteriormente. En esta realización, la potencia nominal tiene una salida eléctrica nominal en el generador de la central térmica 1.

55 Como se ilustra en la Figura 4, en el caso de  $F_1$ , se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la temperatura superficial de pared del tubo aumenta transitoriamente. Es decir, en el caso de  $F_1$ , se ha comprobado que cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, se produce el fenómeno de degradación por transferencia de calor en el que el coeficiente de transferencia de calor disminuye durante la presión supercrítica.

60 Mientras tanto, como se ilustra en la Figura 4, en el caso de  $F_2$  y  $F_3$ , se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor emitido al tubo 35 de la pared del horno aumenta, en comparación con el caso de  $F_1$ , la temperatura superficial de la pared del tubo aumenta gradualmente. Es decir, en el caso de  $F_2$  y  $F_3$ , se ha comprobado que incluso cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, una disminución en el coeficiente de transferencia de calor durante la presión supercrítica se suprime, y es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor en el tubo 35 de la pared del horno.

A continuación, en la Figura 5, la velocidad de masa de agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno se hace más lenta que el caso de la Figura 4, y se convierte en una velocidad de masa mínima (límite inferior) en la que la caldera 10 puede hacerse funcionar. Además, similar a la Figura 4, el interior del tubo 35 de la pared del horno tiene una presión supercrítica. Específicamente, la velocidad de masa mínima difiere en función de los tamaños del diámetro exterior D del tubo, el diámetro interior pequeño d1 y el diámetro interior grande d2, pero por ejemplo, cuando la caldera 10 funciona a la salida nominal, la velocidad de masa promedio del tubo 35 de la pared del horno está en el intervalo de 1,500 (kg/m<sup>2</sup>s) o menos. Además, si hay una velocidad de masa mínima que permite el funcionamiento de la caldera 10, no se limita al intervalo descrito anteriormente, sino que el límite inferior es, por lo general, de aproximadamente 700 kg/m<sup>2</sup>s.

Como se ilustra en la Figura 5, en el caso de F<sub>1</sub>, se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la temperatura superficial de pared del tubo aumenta transitoriamente. Es decir, en el caso de F<sub>1</sub>, se ha comprobado que el medio de calentamiento fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno a la velocidad de masa mínima, y cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, se produce el fenómeno de degradación por transferencia de calor en el que el coeficiente de transferencia de calor disminuye durante la presión supercrítica.

Mientras tanto, como se ilustra en la Figura 5, en el caso de F<sub>2</sub>, se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor emitido al tubo 35 de la pared del horno aumenta, en comparación con el caso de F<sub>1</sub>, la temperatura superficial de la pared del tubo aumenta gradualmente pero excede la temperatura crítica T<sub>max</sub> del tubo. Por el contrario, en el caso de F<sub>3</sub>, cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, en comparación con el caso de F<sub>2</sub>, la temperatura superficial de la pared del tubo aumenta gradualmente. Es decir, se ha comprobado que, en el caso de F<sub>3</sub>, en otras palabras, cuando la forma del tubo 35 de la pared del horno satisface la Fórmula relacional "(Pr · Nr)/Hr > 1,25L + 55", el medio de calentamiento fluye a través del interior de los tubos 35 de la pared del horno a una velocidad de masa mínima, incluso cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la disminución en el coeficiente de transferencia de calor durante la presión supercrítica se suprime, y es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor en los tubos 35 de la pared del horno.

Como se ha descrito anteriormente, de acuerdo con la configuración de la primera realización, en los tubos 35 de la pared del horno en los que el interior se convierte en una presión supercrítica, incluso si el agua fluye a través del interior de los tubos 35 de la pared del horno tiene una velocidad de masa baja o el flujo de transferencia de calor alto se aplica a la misma, al satisfacer la relación de  $Wg/(Hr \cdot D) > 0,40$ , como se ilustra en la Figura 4, es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor. Por lo tanto, puesto que la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor se puede suprimir durante la presión supercrítica, es posible suprimir un aumento en la temperatura del tubo en el tubo 35 de la pared del horno (temperatura superficial de la pared del tubo de la pared 31 del horno).

También, de acuerdo con la configuración de la primera realización, incluso si el agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno tiene la menor velocidad límite, al satisfacer la Fórmula relacional  $(Pr \cdot Nr)/Hr > 1,25L + 55$ , como se ilustra en la Figura 5, es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor. Por esta razón, incluso si el agua fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno a la velocidad de masa límite inferior durante la presión supercrítica, la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor se puede suprimir, y por lo tanto, es posible suprimir un aumento de la temperatura del tubo en el tubo 35 de la pared del horno (temperatura superficial de la pared del tubo de la pared 31 del horno).

También, de acuerdo con la configuración de la primera realización, el tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula relacional antes mencionada se puede aplicar a una caldera de funcionamiento a presión variable de presión supercrítica de un tipo de horno tubular vertical. Por lo tanto, puesto que es posible suprimir la aparición de la degradación de transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno durante la presión supercrítica, es posible mantener adecuadamente la transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno al agua y de generar de forma estable el vapor.

También, de acuerdo con la configuración de la primera realización, la caldera 10 que tiene el tubo 35 de la pared del horno se puede aplicar a la central térmica 1 que utiliza la turbina de vapor 11. Por esta razón, puesto que el vapor se puede generar de forma estable en la caldera 10, es posible suministrar de manera estable el vapor hacia la turbina de vapor 11, y por lo tanto, es posible hacer funcionar de forma estable la turbina de vapor 11.

En la primera realización, el tubo 35 de la pared del horno que funciona como el tubo de transferencia de calor se aplica a la caldera convencional, y la caldera convencional se aplica a la central térmica 1, pero la presente invención no se limita a esta configuración. Por ejemplo, el tubo de transferencia de calor que satisface la Fórmula relacional antes mencionada se puede aplicar a una caldera de recuperación de calor agotado, y la caldera de recuperación de calor agotado se puede aplicar a un ciclo combinado de la planta de gasificación de carbón integrado (IGCC). Es decir, siempre que se adopte una caldera de paso directo en la que el interior del tubo de transferencia de calor tiene una presión supercrítica, se puede aplicar a cualquier caldera.

Además, en la primera realización, aunque  $F_2$  tiene la forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula relacional de " $F > 0,40$ ", y  $F_3$  tiene la forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula relacional de " $(Pr \cdot Nr)/Hr > 1,25L + 55$ ", la forma del tubo 35 de la pared del horno no se limita a la forma de  $F_2$  o  $F_3$ . Es decir, la forma del tubo 35 de la pared del horno puede ser una forma obtenida mediante la combinación de la forma de  $F_2$  y la forma de  $F_3$ .

En la primera realización, aunque la forma de la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno no se limita particularmente, por ejemplo, puede ser una forma ilustrada en la Figura 6. La Figura 6 es una vista parcial en sección transversal cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de la forma de la porción de nervadura del tubo de la pared del horno.

Como se ilustra en la Figura 6, en la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno, la forma de sección transversal cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo se forma en una forma trapezoidal en la que una superficie circunferencial interior P2 es una superficie inferior (base inferior) y una superficie circunferencial interior P1 es una superficie superior (base superior). Además, en este caso, como en la primera realización, la altura de nervadura Hr de la porción de nervadura 37 es una altura desde la superficie circunferencial interior P2 hasta una ubicación en la que la porción de nervadura 37 se sitúa en el lado radialmente más interior (es decir, la superficie circunferencial interior P1). Además, la anchura de ranura Wg es una anchura entre una ubicación curvada como un límite entre la superficie circunferencial interior P2 y la porción de nervadura 37 en un lado en la dirección del eje de tubo de la porción de ranura 36, y una ubicación curvada como un límite entre la superficie circunferencial interior P2 y la porción de nervadura 37 al otro lado en la dirección del eje de tubo de la porción de ranura 36.

Como se ilustra en la Figura 6, la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno puede ser una forma que tiene una porción curvada que tiene un ángulo predeterminado con respecto a la superficie circunferencial interior P1 y la superficie circunferencial interior P2. Además, en la Figura 6, la porción de nervadura 37 se forma en una forma trapezoidal, pero puede ser una forma rectangular o una forma triangular y no está particularmente limitada.

Además, la forma de la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno puede ser una forma ilustrada en la Figura 7. La Figura 7 es una vista en sección transversal parcial cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de la forma de la porción de nervadura del tubo de la pared del horno.

Como se ilustra en la Figura 7, la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno se configura de modo que la forma de sección transversal cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo se forma en una forma curvada que continúa con la superficie circunferencial interior P2 y es radialmente convexa hacia el interior. Además, en este caso, como en la primera realización, la altura de nervadura Hr de la porción de nervadura 37 es una altura de la superficie circunferencial interior P2 a una ubicación (es decir, superior) en la que la porción de nervadura 37 se sitúa en el lado radialmente más interior. Además, la anchura de ranura Wg es una anchura entre un límite entre la superficie circunferencial interior plana P2 y la porción de nervadura curvada 37 en un lado en la dirección del eje de tubo de la porción de ranura 36.

Como se ilustra en la Figura 7, la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno puede tener una forma que tiene una superficie curva continua que tiene un radio de curvatura predeterminado con respecto a la superficie circunferencial interior P1 y la superficie circunferencial interior P2. En la Figura 7, la porción de nervadura 37 tiene una forma curvada que es radialmente convexa hacia el interior, pero la parte superior radialmente interior de la porción de nervadura 37 puede ser una superficie plana, y siempre que sea una superficie curva continua con respecto a la superficie circunferencial interior P1 y la superficie circunferencial interior P2, no está particularmente limitada.

Además, la forma de la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno puede ser una forma ilustrada en las Figuras 8 y 9. La Figura 8 es una vista en sección transversal parcial cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de la forma de la porción de nervadura del tubo de la pared del horno, y la Figura 9 es una vista en sección transversal parcial cuando se toma a lo largo del plano perpendicular a la dirección del eje de tubo que ilustra un ejemplo de la forma de la porción de nervadura del tubo de la pared del horno.

Como se ilustra en la Figura 8, en la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno, una forma de sección transversal cuando se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo se forma en una forma triangular en la que la superficie circunferencial interior P2 es una superficie inferior. En este momento, un ángulo formado entre la porción de nervadura 37 y la superficie circunferencial interior P2 difiere en el lado aguas arriba y en el lado aguas abajo en la dirección del flujo de agua. Es decir, el ángulo formado entre la porción de nervadura 37 y la superficie circunferencial interior P2 en el lado aguas arriba en la dirección de flujo tiene un pequeño ángulo, en comparación con un ángulo formado entre la porción de nervadura 37 y la superficie circunferencial interior P2 en el lado aguas abajo de la dirección del flujo. Es decir, en la porción de nervadura 37, con respecto a la dirección del flujo de agua, el gradiente de la ubicación del lado de aguas arriba es empinado, mientras que el gradiente de la ubicación del lado aguas abajo es suave.

Además, como se ilustra en la Figura 9, la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno se configura de modo que la forma de sección transversal cuando se toma a lo largo de un plano perpendicular a la dirección del eje de tubo se forma en una forma triangular en la que la superficie circunferencial interior P2 es una superficie inferior. En este momento, el ángulo formado entre la porción de nervadura 37 y la superficie circunferencial interior P2 difiere en el lado aguas arriba y el lado aguas abajo en una dirección de giro del agua. Es decir, el ángulo formado entre la porción de nervadura 37 y la superficie circunferencial interior P2 en el lado aguas arriba en el sentido de giro tiene un ángulo pequeño, en comparación con el ángulo formado entre la porción de nervadura 37 y la superficie circunferencial interior P2 en el lado aguas abajo en la dirección de giro. Es decir, en la porción de nervadura 37, con respecto a la dirección de giro del agua, el gradiente de la ubicación del lado de aguas arriba es empinado, mientras que el gradiente de la ubicación del lado de aguas abajo es suave.

**[Segunda realización]**

A continuación, se describirá un tubo 35 de la pared del horno de acuerdo con una segunda realización haciendo referencia a las Figuras 10 a 13. La Figura 10 es una vista explicativa que ilustra una relación entre el flujo al momento de superar el escalón (flujo retorno) y el coeficiente de transferencia de calor. La Figura 11 es un gráfico de un ejemplo de la temperatura superficial de la pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía. La Figura 12 es un gráfico de un ejemplo de la temperatura superficial de la pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía. La Figura 13 es un gráfico que ilustra una relación entre la altura de nervaduras Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr y el número de nervadura Nr que varía en función de una longitud de perímetro mojado L en lo que se refiere a un tubo de la pared del horno de la segunda realización. Además, en la segunda realización, con el fin de evitar la descripción repetida, solo se describirán las partes diferentes de las de la primera realización, y las partes de igual configuración a las de la primera realización se designan con los mismos números de referencia. La forma del tubo 35 de la pared del horno de acuerdo con la segunda realización se describirá a continuación.

El interior del tubo 35 de la pared del horno entra en un estado de presión supercrítica, y el agua fluye en este estado. En este momento, el tubo 35 de la pared del horno de la segunda realización calentada por la cámara de combustión 22 tiene una forma con alto coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime el fenómeno de degradación por transferencia de calor.

Por cierto, puesto que el interior del tubo 35 de la pared del horno tiene una presión supercrítica, el agua fluye en un estado de monofásico. También, puesto que el agua fluye en la dirección del eje de tubo, el agua se convierte en el flujo que supera la porción de nervadura 37, mientras que se le da una fuerza de giro por la porción de nervadura 37. En este momento, el flujo que supera sobre la porción de nervadura 37 es una denominado flujo retorno. La relación entre el flujo retorno y el coeficiente de transferencia de calor se describirá con referencia a la Figura 10.

La Figura 10 es una vista explicativa que ilustra una relación entre el flujo (flujo retorno) al momento de conseguir superar el escalón y el coeficiente de transferencia de calor. Un paso de flujo 100 a través del que fluye el fluido que se ilustran en la Figura 10 es un paso de flujo en el que una porción escalonada 101 se proyecta desde la superficie inferior P4. Además, una ubicación, en la que se forma la superficie inferior P4, es una porción de ranura 102. Aquí, el paso de flujo 100 se corresponde con el paso de flujo interior del tubo 35 de la pared del horno. Además, la porción escalonada 101 corresponde a la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno. Además, la porción de ranura 102 corresponde a la porción de ranura 36 del tubo 35 de la pared del horno. Además, el fluido que fluye a través del paso de flujo 100 corresponde con el agua como medio de calentamiento. Una dirección de flujo predeterminada del flujo de fluido corresponde a la dirección del flujo del agua en el eje del tubo.

Aquí, cuando el fluido circula en una dirección de flujo predeterminada en el paso de flujo 100, el fluido fluye sobre la porción escalonada 101 y luego se separa en la parte de la esquina de la parte escalonada 101. El fluido separado se vuelve a conectar a la superficie inferior P4 de la porción de ranura 102 en el punto O. Después, el agua que se vuelve a conectar a la superficie inferior P4 de la porción de ranura 102 fluye hacia el lado de aguas abajo a lo largo de la superficie inferior P4.

En este momento, el coeficiente de transferencia de calor de la superficie inferior P4 en la dirección de flujo predeterminada es tal como se ilustra en la Figura 10, el coeficiente de transferencia de calor es más alto en el punto de reconexión O, y el coeficiente de transferencia de calor baja, a medida que se aleja del punto reconexión O al lado aguas arriba y lado aguas abajo. Por esta razón, a fin de mejorar el coeficiente de transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno, es necesario ajustar adecuadamente la posición del punto de reconexión O.

Aquí, la posición del punto de reconexión O se puede ajustar variando la altura de nervadura Hr y la anchura de nervadura Wr. Es decir, es posible ajustar la posición del punto de reconexión O en una posición en la que el coeficiente de transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno es alta, configurando la altura de nervadura Hr y la anchura de nervadura Wr en una forma óptima.

Por esta razón, el tubo 35 de la pared del horno se forma en una forma en la que el diámetro interior pequeño d1, el diámetro interior grande d2, el diámetro exterior D del tubo, la anchura de ranura Wg, la anchura de nervadura Wr, el

intervalo  $Pr$ , el número de nevadura  $Nr$ , la altura de nevadura  $Hr$  y la longitud de perímetro mojado  $L$  satisfacen la Fórmula relacional descrita a continuación.

En el tubo 35 de la pared del horno, la anchura de ranura  $Wg$ , la altura de nevadura  $Hr$  y el diámetro exterior  $D$  del tubo satisfacen la Fórmula relacional " $Wg/(Hr \cdot D) > 0,40$ " (en adelante, referida como la Fórmula (1)). Aquí, cuando " $Wg/(Hr \cdot D) = F$ ", la relación es " $F > 0,40$ ". En este momento, la altura de nevadura  $Hr$  es " $Hr > 0$ ", y la porción de nevadura 37 se configura para sobresalir radialmente hacia el interior. Además, la altura de nevadura  $Hr$ , el intervalo de nevadura  $Pr$ , la anchura de nevadura  $Wr$ , el número de nevadura  $Nr$ , y la longitud de perímetro mojado  $L$  satisfacen la Fórmula relacional " $(Pr \cdot Nr)/(Hr \cdot Wr) > 0,40L + 9,0$ " (en adelante, referida como la Fórmula (2)). Aunque los detalles se describirán a continuación, mediante el establecimiento de la forma del tubo 35 de la pared del horno a una forma que satisfaga las dos fórmulas relacionales descritas anteriormente, es posible mejorar el coeficiente de transferencia de calor, al tiempo que se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

El ángulo de avance de la porción de nevadura 37 que tiene una forma en espiral se convierte en un ángulo que satisface la Fórmula relacional antes mencionada. Además, el ángulo de avance es un ángulo con respecto a la dirección del eje de tubo, si el ángulo de avance de la porción de nevadura 37 es de  $0^\circ$ , se convierte en una dirección a lo largo de la dirección del eje de tubo, y si el ángulo de avance de la porción de nevadura 37 es de  $90^\circ$ , se convierte en una dirección a lo largo de la dirección circunferencial. Aquí, el ángulo de avance de la porción de nevadura 37 cambia también apropiadamente en función del número de las porciones de nevadura 37. Es decir, si el número de las porciones de nevadura 37 es grande, el ángulo de avance de la porción de nevadura 37 se convierte en un ángulo suave (se acerca a  $0^\circ$ ), y mientras tanto, si el número de las porciones de nevadura 37 es pequeña, el ángulo de avance de la porción de nevadura 37 se convierte en un ángulo pronunciado (acercándose a  $90^\circ$ ).

A continuación, los cambios en la temperatura superficial de la pared del tubo de la pared del horno, que varían en función de la entalpía se describirán con referencia a las Figuras 11 y 12. Las Figuras 11 y 12 son gráficos de un ejemplo de la temperatura superficial de la pared del tubo de la pared del horno que varía en función de la entalpía. En este caso, los ejes horizontales de las Figuras 11 y 12 son la entalpía que se le da a la pared del horno (tubo 35 de la pared del horno) 31, y los ejes verticales de los mismos son la temperatura superficial de la pared del tubo (temperatura del tubo 35 de la pared del horno).

Como se ilustra en las Figuras 11 y 12,  $F_1$  es un gráfico que ilustra los cambios en la temperatura superficial de pared del tubo al momento de " $F = 0,35$ ", y tiene una forma del tubo 35 de la pared del horno convencional que no satisface la Fórmula relacional de la primera realización. Además,  $F_2$  es un gráfico que ilustra los cambios en la temperatura superficial de la pared del tubo al momento de " $F > 0,40$ ", y tiene una forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula (1) de la segunda realización. Además,  $F_4$  es un gráfico que ilustra los cambios en la temperatura superficial de la pared del tubo al momento de satisfacer las dos fórmulas relacionales de " $F > 0,40$ " y " $(Pr \cdot NR)/(Hr \cdot Wr) > 040L + 9,0$ ", y tiene una forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface las dos fórmulas relacionales de la segunda realización. Además,  $T_w$  es un gráfico que ilustra los cambios en la temperatura (temperatura del fluido) del agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno, y  $T_{max}$  es una temperatura crítica del tubo que es aceptable para el tubo 35 de la pared del horno.

Aquí, en la Figura 11, la velocidad de masa de agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno se convierte en una velocidad de masa baja a la que la estabilidad de flujo del agua dentro de la pared del horno de tubo 35 puede garantizarse, y el interior del tubo 35 de la pared del horno tiene una presión supercrítica. Específicamente, aunque la velocidad de masa baja difiere en función de los tamaños del diámetro exterior  $D$  del tubo, el diámetro interior pequeño  $d1$  y el diámetro interior grande  $d2$ , por ejemplo, cuando la caldera 10 funciona a la salida nominal, la velocidad de masa promedio del tubo 35 de la pared del horno está en el intervalo de 1000 ( $kg/m^2s$ ) o más y 2.000 ( $kg/m^2s$ ) o menos. Además, siempre que la velocidad de masa se consigue en el que la estabilidad del flujo de agua dentro del tubo 35 de la pared del horno puede garantizarse, no se limita al intervalo descrito anteriormente. Además, en la segunda realización, la potencia nominal se convierte en una potencia eléctrica nominal en el generador de la central térmica 1.

Como se ilustra en la Figura 11, en el caso de  $F_1$ , se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la temperatura superficial de la pared del tubo aumenta transitoriamente. Es decir, en el caso de  $F_1$ , se ha comprobado que cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, se produce el fenómeno de degradación por transferencia de calor en el que el coeficiente de transferencia de calor disminuye durante la presión supercrítica.

Mientras tanto, como se ilustra en la Figura 11, en el caso de  $F_2$ , se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la temperatura superficial de pared del tubo aumenta gradualmente en comparación con el caso de  $F_1$ . Es decir, en el caso de  $F_2$ , se ha comprobado que incluso cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la disminución en el coeficiente de transferencia de calor durante la presión supercrítica se suprime, y es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor en el tubo 35 de la pared del horno. Es decir, se

ha comprobado que la forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula (1) puede suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

Además, como se ilustra en la Figura 11, en el caso de  $F_4$ , se reconoce que la temperatura superficial de la pared del tubo disminuye en comparación con el caso de  $F_2$  de poca entalpía a mucha entalpía. Es decir, en el caso de  $F_4$ , se ha comprobado que el coeficiente de transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno se mejoró en comparación con el caso de  $F_2$  independientemente de la magnitud de la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno, e incluso cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la disminución en el coeficiente de transferencia de calor durante la presión supercrítica se vio también suprimida, y es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor en el tubo 35 de la pared del horno. Es decir, se ha comprobado que la forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface las Fórmulas (1) y (2) puede mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

A continuación, en la Figura 12, la velocidad de masa del agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno se hace más lenta que el caso de la Figura 11, y se convierte en una velocidad de masa mínima (límite inferior) a la que la caldera 10 puede hacerse funcionar. Además, como en la Figura 11, el interior del tubo 35 de la pared del horno tiene una presión supercrítica. Específicamente, aunque la velocidad de masa mínima difiere en función de los tamaños del diámetro exterior  $D$  del tubo, el diámetro interior pequeño  $d1$  y el diámetro interior grande  $d2$ , por ejemplo, cuando la caldera 10 funciona a la salida nominal, la velocidad de masa promedio del tubo 35 de la pared del horno está en el intervalo de  $1.500 \text{ (kg/m}^2\text{s)}$  o menos. Además, siempre que se establezca la velocidad de masa mínima a la que la caldera 10 puede hacerse funcionar, no se limita al intervalo descrita anteriormente, y el límite inferior general es de aproximadamente  $700 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Como se ilustra en la Figura 12, en el caso de  $F_1$ , se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la temperatura superficial de la pared del tubo aumenta transitoriamente. Es decir, en el caso de  $F_1$ , se ha comprobado que cuando el medio de calentamiento fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno a la velocidad de masa mínima y la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, se produce el fenómeno de degradación por transferencia de calor en el que el coeficiente de transferencia de calor disminuye durante la presión supercrítica.

Mientras tanto, como se ilustra en la Figura 12, en el caso de  $F_2$ , se reconoce que cuando aumenta la entalpía, es decir, cuando la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno aumenta, la temperatura superficial de pared del tubo aumenta gradualmente en comparación con el caso de  $F_1$  pero excede la temperatura crítica  $T_{\text{max}}$  del tubo.

En contraste, como se ilustra en la Figura 12, en el caso de  $F_4$ , se ha comprobado que la temperatura superficial de la pared del tubo disminuye de poca entalpía a mucha entalpía en comparación con el caso de  $F_2$ . Es decir, en el caso de  $F_4$ , se ha comprobado que el coeficiente de transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno se ha mejorado en comparación con el caso de  $F_2$ , independientemente de la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno. Además, se ha comprobado que aun cuando el medio de calentamiento fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno a la velocidad de masa mínima y la cantidad de calor dada al tubo 35 de la pared del horno es grande, la disminución en el coeficiente de transferencia de calor durante la presión supercrítica se suprime, y es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor en el tubo 35 de la pared del horno. Es decir, se ha comprobado que la forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface las Fórmulas (1) y (2) puede mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

A continuación, una relación entre un gráfico que ilustra la relación entre la altura de las nervaduras  $H_r$ , el intervalo de nervadura  $Pr$ , la anchura de nervadura  $Wr$  y el número de nervadura  $Nr$ , y la ubicación de acuerdo con  $F_4$ , que varía en función de la longitud de perímetro mojado  $L$ , se describirá con referencia a la Figura 13. La Figura 13 es un gráfico que ilustra una relación entre la altura de nervadura  $H_r$ , el intervalo de nervadura  $Pr$ , la anchura de nervadura  $Wr$  y el número de nervadura  $Nr$ , que varía en función de la longitud de perímetro mojado  $L$  con respecto al tubo de la pared del horno de la segunda realización. En el gráfico de la Figura 13, el eje horizontal es una longitud de perímetro mojado  $L$ , y un eje vertical es " $(Pr \cdot Nr)/(H_r \cdot Wr)$ ".

$S1$  ilustra en la Figura 13 una línea de " $(Pr \cdot Nr)/(H_r \cdot Wr) = 0,40L + 9,0$ ", y una región de acuerdo con  $F_4$  se convierte en una región en la que el valor de  $(Pr \cdot Nr)/(H_r \cdot Wr)$  se convierte en un valor mayor que  $S1$ . Es decir, el tubo 35 de la pared del horno de la segunda realización puede tener una forma que puede mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor, mediante el establecimiento de la altura de nervadura  $H_r$ , el intervalo de nervadura  $Pr$ , la anchura de nervadura  $Wr$ , el número de nervadura  $Nr$  y la longitud de perímetro mojado  $L$  a las formas que caen dentro de la región de  $F_4$ .

Como se ha descrito anteriormente, de acuerdo con la configuración de la segunda realización, en el tubo 35 de la pared del horno en el que el interior tiene una presión supercrítica, al satisfacer " $Wg/(H_r \cdot D) > 0,40$ " y " $(Pr \cdot Nr)/(H_r \cdot Wr) > 0,40L + 9,0$ ", es posible mejorar el coeficiente de transferencia de calor, mientras se suprime la aparición del

fenómeno de degradación por transferencia de calor. Por esta razón, mediante la mejora el coeficiente de transferencia de calor durante la presión supercrítica, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor, es posible suprimir el aumento de la temperatura del tubo (temperatura superficial del tubo de la pared de la pared 31 del horno), sobre la magnitud de la entropía.

5 Además, de acuerdo con la configuración de la segunda realización, incluso cuando el agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno tiene una velocidad de masa baja (velocidad de masa promedio es de 1000 a 2000 kg/m<sup>2</sup>s), el flujo de transferencia de calor alto se aplica a la misma, o se baja la velocidad de masa de agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno (velocidad media de masa es igual o inferior a 1500 kg/m<sup>2</sup>s), es posible mejorar el coeficiente de transferencia de calor durante la presión supercrítica, mientras se suprime la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor.

15 Además, de acuerdo con la configuración de la segunda realización, el tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula relacional antes mencionada se puede aplicar a una caldera de funcionamiento a presión variable de presión supercrítica de un tipo de horno tubular vertical. Por esta razón, puesto que es posible suprimir la aparición del fenómeno de degradación por transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno durante la presión supercrítica, es posible mantener adecuadamente la transferencia de calor del tubo 35 de la pared del horno al agua, y se puede generar vapor de forma estable.

20 Además, de acuerdo con la configuración de la segunda realización, la caldera 10 que tiene el tubo 35 de la pared del horno se puede aplicar a la central térmica 1 que utiliza la turbina de vapor 11. Por lo tanto, puesto que el vapor se puede generar de forma estable en la caldera 10, es posible suministrar de manera estable vapor a la turbina de vapor 11, y por lo tanto, la turbina de vapor 11 puede funcionar también de forma estable.

25 En la segunda realización, aunque el tubo 35 de la pared del horno que sirve como un tubo de transferencia de calor se aplica a una caldera convencional y la caldera convencional se aplica a la central térmica 1, la presente invención no se limita a esta configuración. Por ejemplo, el tubo de transferencia de calor que satisface la Fórmula relacional antes mencionada se puede aplicar a una caldera de recuperación de calor agotado, y la caldera de recuperación de calor agotado se puede aplicar a un dispositivo de ciclo combinado de gasificación de carbón integrado (IGCC). Es decir, siempre que se adopte una caldera de paso directo en la que el interior del tubo de transferencia de calor tenga una presión supercrítica, el tubo de transferencia de calor se puede aplicar a cualquier caldera.

30 Además, aunque la forma de la porción de nervadura 37 del tubo 35 de la pared del horno no está particularmente limitada en la segunda realización, por ejemplo, como en la primera realización, puede tener la forma como se ilustra en las Figuras 6 a 9.

### [Tercera realización]

40 A continuación, se describirá el tubo 35 de la pared del horno de acuerdo con una tercera realización con referencia a la Figura 14. La Figura 14 es un gráfico que ilustra una relación entre la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr y el número de nervadura Nr, que varía en función de la longitud de perímetro mojado L de acuerdo con el tubo de la pared del horno de la tercera realización. Además, incluso en la tercera realización, con el fin de evitar la descripción repetida, solamente las partes diferentes de las de la primera y segunda realizaciones se describirán, y partes de igual configuración a las de la primera y segunda realizaciones se indican con los mismos números de referencia. Aunque el diámetro exterior D del tubo no se menciona en particular en la segunda realización, el diámetro exterior D del tubo del tubo 35 de la pared del horno se forma para ser "25 mm ≤ D ≤ 35 mm" en la tercera realización. El tubo 35 de la pared del horno de acuerdo con la tercera realización se describirá a continuación.

50 Como se describe en la segunda realización, la velocidad de masa promedio del agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno está en el intervalo de 1.000 (kg/m<sup>2</sup>s) o más y 2.000 (kg/m<sup>2</sup>s) o menos, o es 1.500 (kg/m<sup>2</sup>s) o menos e igual o mayor que la velocidad de masa mínima a la que la caldera 10 puede hacerse funcionar. De esta manera, la velocidad de masa del agua que fluye a través del interior del tubo 35 de la pared del horno se convierte en una velocidad de masa preestablecida. La razón es que, con el fin de alcanzar un coeficiente de transferencia de calor óptimo del tubo 35 de la pared del horno que satisfaga la Fórmula (1) y la Fórmula (2), mediante el establecimiento de la velocidad de masa dentro del intervalo descrito anteriormente, la posición del punto de reinserción O ilustrado en la Figura 10 se ajusta en la posición óptima. En este momento, cuando el diámetro exterior D del tubo del tubo 35 de la pared del horno disminuye, la aumenta de velocidad de flujo másico, y mientras tanto, cuando el diámetro exterior D del tubo aumenta, la velocidad de flujo másico disminuye. Aquí, cuando el tamaño del diámetro exterior D del tubo del tubo 35 de la pared del horno es demasiado grande o demasiado pequeño, la velocidad de flujo másico se aleja del intervalo descrito anteriormente, por lo que la posición del punto de reinserción O ilustrado en la Figura 10 puede cambiar de la posición óptima. Por esta razón, a fin de lograr la velocidad de flujo másico que sea adecuada para la forma del tubo 35 de la pared del horno que satisfaga la Fórmula (1) y la Fórmula (2), el diámetro exterior D del tubo del tubo 35 de la pared del horno se convierte en un intervalo que se describe a continuación.

En la tercera realización, el diámetro exterior D del tubo del tubo 35 de la pared del horno se forma para ser "25 mm  $\leq$  D  $\leq$  35 mm". Aquí, como se ilustra en la Figura 14, la región definida por el diámetro exterior D del tubo en el intervalo de "25 mm  $\leq$  D  $\leq$  35 mm" es una región que está interpuesta por dos líneas S2. Es decir, la longitud de perímetro mojado L se define por una función del diámetro exterior D del tubo como un factor, cuando el diámetro exterior D del tubo aumenta, la longitud de perímetro mojado L aumenta, y cuando el diámetro exterior D del tubo disminuye, la longitud de perímetro mojado L disminuye. Además, en las dos líneas S2, la línea izquierda S2 de la Figura 14 es una línea del diámetro exterior del tubo "D = 25 mm" y una línea derecha S2 de la Figura 14 es una línea del diámetro exterior del tubo "D = 35 mm". Además, el tubo 35 de la pared del horno de la tercera realización tiene una forma en la que la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr, el número de nervadura Nr y la longitud de perímetro mojado L caen dentro de una región solapada en la que la región de F<sub>4</sub> definida por la línea S1 y la región interpuesta por las dos líneas S2 se superponen entre sí.

Como se ha descrito anteriormente, de acuerdo con la configuración de la tercera realización, al establecer el diámetro exterior D del tubo en "25 mm  $\leq$  D  $\leq$  35 mm", la velocidad de flujo másico de agua se puede ajustar en el intervalo descrito anteriormente, y la velocidad de flujo másico de agua se puede ajustar a una velocidad de flujo másico adecuada. Por lo tanto, puesto que es posible alcanzar la velocidad de flujo másico que es adecuada para la forma del tubo 35 de la pared del horno que satisface la Fórmula (1) y la Fórmula (2), la posición del punto de reconexión O se puede ajustar en una posición óptima, y el rendimiento óptimo del coeficiente de transferencia de calor se puede lograr.

**[Cuarta realización]**

A continuación, se describirá un tubo 35 de la pared del horno de acuerdo con una cuarta realización con referencia a la Figura 15. La Figura 15 es un gráfico que ilustra una relación entre la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr y el número de nervadura Nr, que varían en función de la longitud de perímetro mojado L, en relación con el tubo de la pared del horno de la cuarta realización. Además, incluso en la cuarta realización, con el fin de evitar la descripción repetida, se describirán las partes diferentes de las de la primera a tercera realizaciones, y partes de igual configuración a las de la primera a tercera realizaciones se denotan con los mismos números de referencia. En la cuarta realización, se proporciona un valor límite superior en la Fórmula (2). El tubo 35 de la pared del horno de acuerdo con la cuarta realización se describirá a continuación.

En el tubo 35 de la pared del horno de la cuarta realización, la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr, el número de nervadura Nr y la longitud de perímetro mojado L satisfacen la Fórmula relacional de "(Pr · Nr)/(Hr · Wr) < 0,40L + 80" (en adelante, referida como la Fórmula (3)), además de la Fórmula (1) y la Fórmula (2). Es decir, el tubo 35 de la pared del horno de la tercera realización estará en el intervalo de "0,40L + 9,0 < (Pr · Nr)/(Hr · Wr) < 0,40L + 80" cuando la Fórmula (2) y la Fórmula (3) se combinan entre sí.

Aquí, en la Fórmula (2), es decir, en la Fórmula de "(Pr · Nr)/(Hr · Wr) > 0,40L + 9,0", puesto que el límite superior de "(Pr · Nr)/(Hr · Wr)" no está establecido, cuando la Fórmula del lado izquierdo aumenta extremadamente, se obtiene una dirección en la que se ensancha el intervalo de nervadura Pr, el número de nervadura Nr aumenta, la altura de nervadura Hr se convierte en cero, y la anchura de nervadura Wr se convierte en cero. En este caso, no es fácil mantener la forma del tubo 35 de la pared del horno.

Por lo tanto, en la cuarta realización 4, un valor de límite superior se establece en la Fórmula (3). Aquí, como se ilustra en la Figura 15, una línea S3 es "(Pr · Nr)/(Hr · Wr) = 0,40L + 80". Por otra parte, el tubo 35 de la pared del horno de la cuarta realización tiene una forma en la que la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr, el número de nervadura Nr y la longitud de perímetro mojado L caen dentro de la región superpuesta en la que la región de <sub>4</sub> definida por la línea S1, la región interpuesta por las dos líneas S2, y una región más pequeña que la línea S3 se superponen entre sí. Es decir, el tubo 35 de la pared del horno de la cuarta realización tiene la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr, el número de nervadura Nr, y la longitud de perímetro mojado L en la región rodeada por la línea S1, las dos líneas S2 y la línea S3.

Como se ha descrito anteriormente, de acuerdo con la configuración de la cuarta realización, definiendo el valor límite superior por la Fórmula (3), es posible mantener fácilmente el tubo 35 de la pared del horno en una forma adecuada sin divergir de la altura de nervadura Hr, el intervalo de nervadura Pr, la anchura de nervadura Wr, el número de nervadura Nr, y la longitud de perímetro mojado L.

En la primera a cuarta realizaciones, aunque la dirección de giro de la porción de ranura 36 y la porción de nervadura 37 que tiene la forma de espiral no está particularmente limitada, a dirección de giro puede ser una dirección en sentido horario, puede ser una dirección en sentido antihorario, y es no está particularmente limitada.

**Lista de signos de referencia**

- 1 CENTRAL TÉRMICA
- 10 CALDERA



## ES 2 699 327 T3

	11	TURBINA DE VAPOR
	21	HORNO
	22	CÁMARA DE COMBUSTIÓN
	31	PARED DEL HORNO
5	35	TUBO DE LA PARED DEL HORNO
	36	PORCIÓN DE RANURA
	37	PORCIÓN DE NERVADURA
	100	PASO DE FLUJO
	101	PORCIÓN ESCALONADA
10	102	PORCIÓN DE RANURA
	D	DIÁMETRO EXTERIOR DEL TUBO
	d1	DIÁMETRO INTERIOR PEQUEÑO
	d2	DIÁMETRO INTERIOR GRANDE
	Wg	ANCHURA DE RANURA
15	Wr	ANCHURA DE NERVADURA
	Hr	ALTURA DE NERVADURA
	P1	SUPERFICIE CIRCUNFERENCIAL INTERIOR
	P2	SUPERFICIE CIRCUNFERENCIAL INTERIOR
	P3	SUPERFICIE CIRCUNFERENCIAL EXTERIOR
20	P4	SUPERFICIE INFERIOR
	L	LONGITUD DE PERÍMETRO MOJADO
	O	PUNTO DE RECONEXIÓN

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Un tubo de transferencia de calor que está destinado a ser provisto en una caldera (10), en el que, durante el funcionamiento, un interior del tubo de transferencia de calor puede tener una presión supercrítica y un medio de calentamiento puede fluir a través del interior, comprendiendo el tubo de transferencia de calor:
- una porción de ranura (36) que está formada en una superficie circunferencial interior y tiene una forma en espiral hacia una dirección del eje de tubo; y  
 10 una porción de nervadura (37) que está formada para sobresalir hacia el interior en una dirección radial por la porción de ranura (36) de la forma en espiral,  
**caracterizado por que:**
- 15 cuando una altura [mm] de la porción de nervadura (37) en la dirección radial se define como Hr, un intervalo [mm] de la porción de nervadura (37) en la dirección del eje de tubo se define como Pr, el número de la porción de nervadura (37) en la sección transversal que se toma perpendicularmente a la dirección del eje de tubo se define como Nr, y una longitud de perímetro mojado [mm] de la sección transversal que se toma perpendicularmente a la dirección del eje de tubo se define como L,  
 20 la altura Hr [mm] de la porción de nervadura (37), el intervalo Pr [mm] de la porción de nervadura (37), el número Nr de la porción de nervadura (37) y la longitud de perímetro mojado L [mm] satisfacen " $(Pr \cdot Nr)/Hr > 1,25L + 55$ ".
2. El tubo de transferencia de calor de acuerdo con la reivindicación 1,  
 25 en el que, en una sección transversal tomada a lo largo de la dirección del eje de tubo, cuando la anchura [mm] de la porción de ranura (36) en la dirección del eje de tubo se define como Wg, y un diámetro interior [mm] del tubo se define como D,  
 la anchura Wg [mm] de la porción de ranura (36), la altura Hr [mm] de la porción de nervadura (37) y el diámetro exterior D [mm] del tubo satisfacen " $Wg/(Hr \cdot D) > 0,40$ ".
3. El tubo de transferencia de calor de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2,  
 30 en el que el diámetro exterior D [mm] del tubo es " $25 \text{ mm} \leq D \leq 40 \text{ mm}$ ".
4. Un tubo de transferencia de calor que está destinado a ser provisto en una caldera (10) donde, durante el funcionamiento, un interior del tubo de transferencia de calor puede tener una presión supercrítica y un medio de calentamiento puede fluir a través del interior, comprendiendo el tubo de transferencia de calor:
- 35 una porción de ranura (36) que está formada en una superficie circunferencial interior y tiene una forma en espiral hacia una dirección del eje de tubo; y  
 una porción de nervadura (37) que está formada para sobresalir hacia el interior en una dirección radial por la porción de ranura (36) de la forma de espiral,  
 40 en el que, cuando una altura [mm] de la porción de nervadura (37) en la dirección radial se define como Hr, una anchura [mm] de la porción de ranura (36) en la dirección del eje de tubo de la sección transversal que se toma a lo largo de la dirección del eje de tubo se define como Wg y un diámetro exterior [mm] del tubo se define como D,  
 la anchura Wg [mm] de la porción de ranura (36), la altura Hr [mm] de la porción de nervadura (37) y el diámetro exterior D [mm] del tubo satisfacen " $Wg/(Hr \cdot D) > 0,40$ ",  
 45 **caracterizado por que:**
- 50 cuando un intervalo [mm] de la porción de nervadura (37) en la dirección del eje de tubo se define como Pr, una anchura [mm] de la porción de nervadura (37) en una dirección circunferencial de la superficie circunferencial interior se define como Wr, el número de la porción de nervadura (37) en la sección transversal que se toma perpendicularmente a la dirección del eje de tubo se define como Nr, una longitud de perímetro mojado [mm] de la sección transversal que se toma perpendicularmente a la dirección del eje de tubo se define como L,  
 55 la altura Hr [mm] de la porción de nervadura (37), el intervalo Pr [mm] de la porción de nervadura (37), la anchura Wr [mm] de la porción de nervadura (37), el número Nr de la porción de nervadura (37) y la longitud de perímetro mojado L [mm] satisfacen " $(Pr \cdot Nr)/(Hr \cdot Wr) > 0,40L + 9,0$ ".
5. El tubo de transferencia de calor de acuerdo con la reivindicación 4,  
 en el que el diámetro exterior D [mm] del tubo es " $25 \text{ mm} \leq D \leq 35 \text{ mm}$ ".
- 60 6. El tubo de transferencia de calor de acuerdo con las reivindicaciones 4 o 5,  
 en el que la altura Hr [mm] de la porción de nervadura (37), el intervalo Pr [mm] de la porción de nervadura (37), la anchura Wr [mm] de la porción de nervadura (37), el número Nr de la porción de nervadura (37) y la longitud de perímetro mojado L [mm] satisfacen " $(Pr \cdot Nr)/(Hr \cdot Wr) < 0,40L + 80$ ".
- 65 7. Una caldera de presión supercrítica (10) que comprende el tubo de transferencia de calor de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 que se utiliza como un tubo de la pared del horno que forma una pared del

horno de la caldera (10).

5 8. Una caldera (10) que comprende el tubo de transferencia de calor de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde la caldera (10) está configurada para calentar un medio de calentamiento, que, durante el funcionamiento, fluye a través de un interior del tubo de transferencia de calor, calentando el tubo de transferencia de calor por radiación de llama o gas a alta temperatura.

9. Un dispositivo de turbina de vapor que comprende:

10 la caldera (10) de acuerdo con las reivindicaciones 7 u 8; y  
una turbina de vapor que está dispuesta para que funcione con el vapor generado por el calentamiento del agua como un medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor proporcionado en la caldera (10).

15 10. Método de funcionamiento de una caldera (10) de acuerdo con las reivindicaciones 7 u 8 a una salida nominal, en el que una velocidad de masa promedio del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor que forma una pared del horno será de 1000-2000 kg/m<sup>2</sup>s.

20 11. Método de funcionamiento de una caldera (10) de acuerdo con las reivindicaciones 7 u 8 a una salida nominal, en el que una velocidad de masa promedio del medio de calentamiento que fluye a través del interior del tubo de transferencia de calor que forma una pared del horno es igual o menor de 1500 kg/m<sup>2</sup>s.

FIG.1

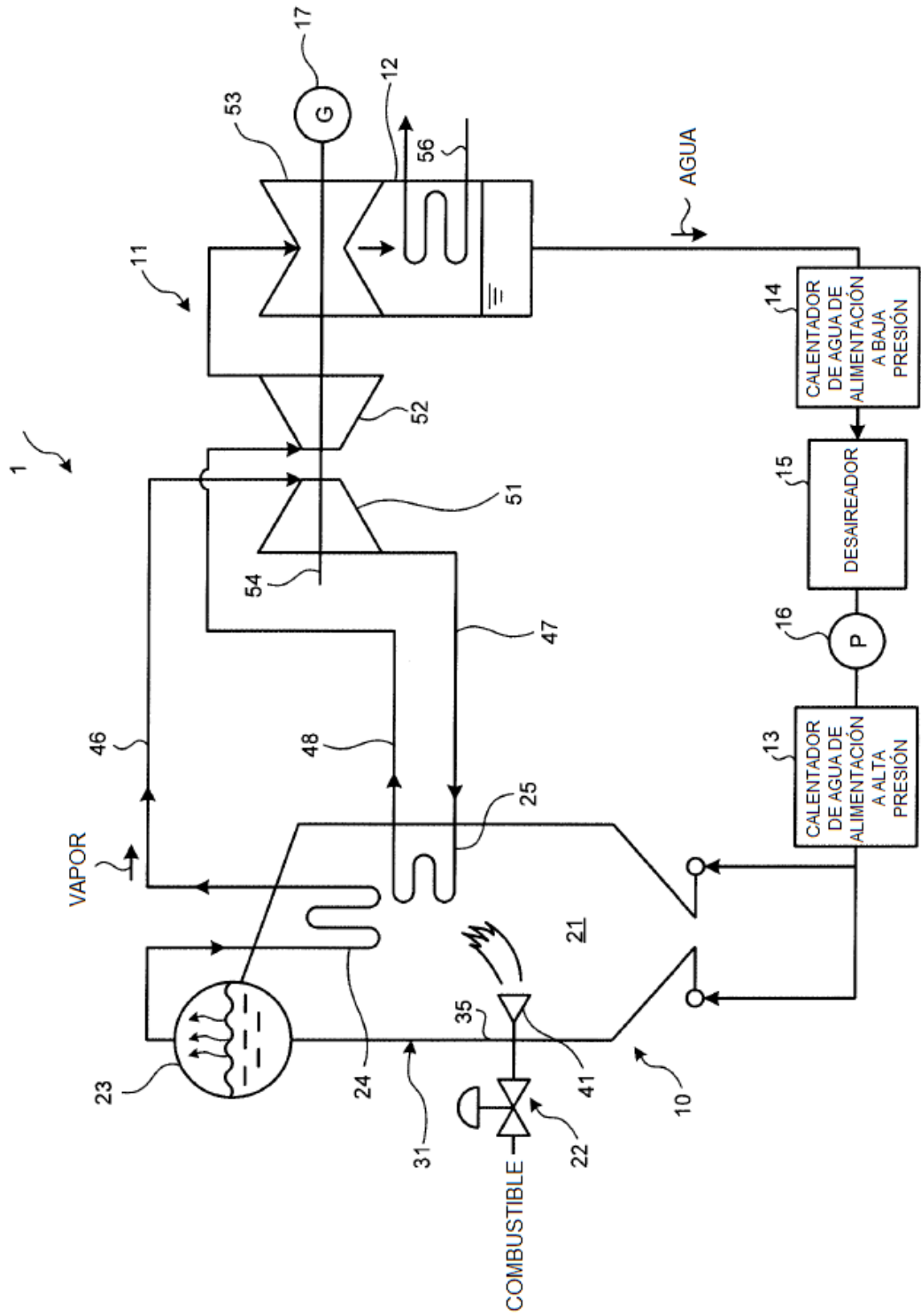


FIG.2

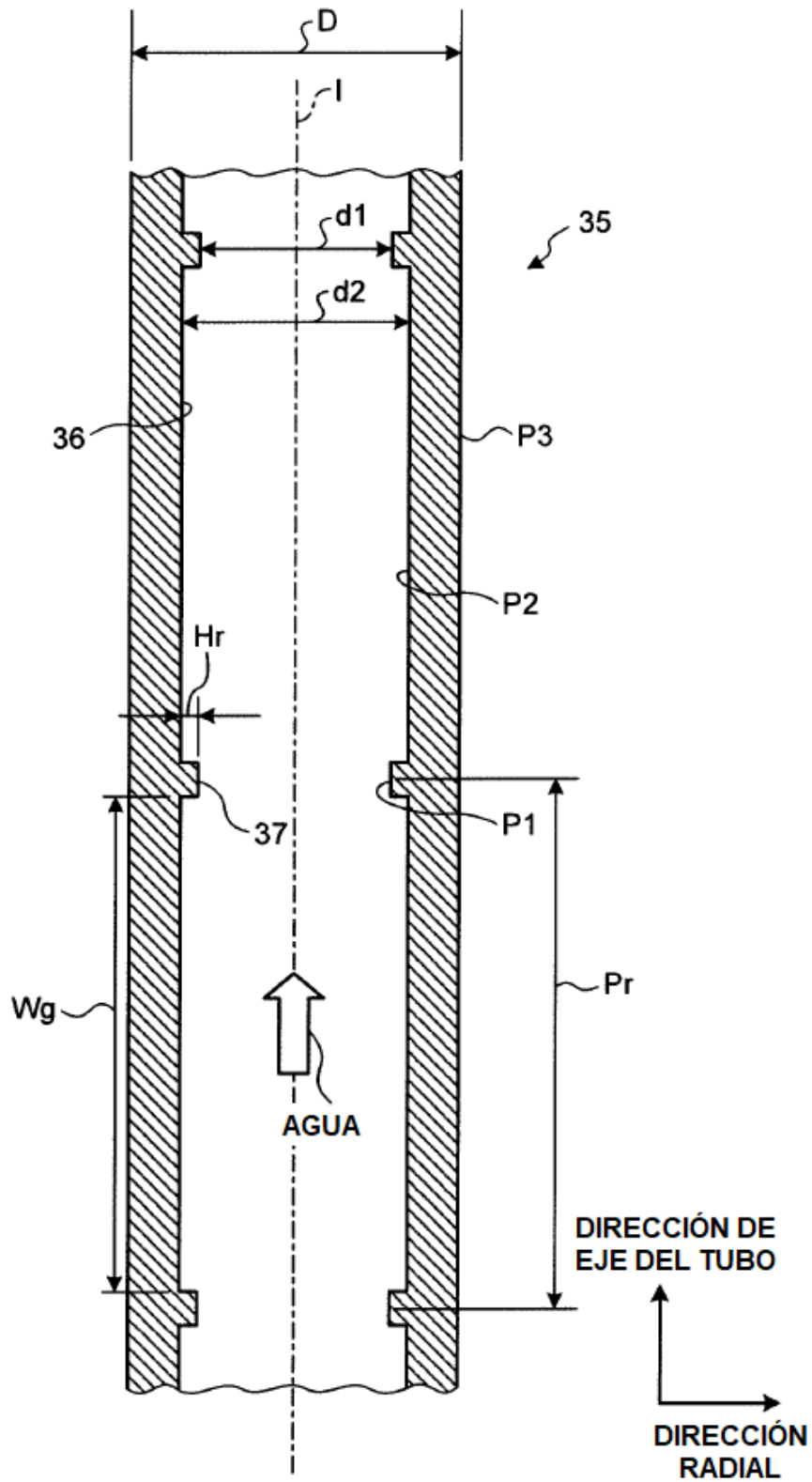


FIG.3

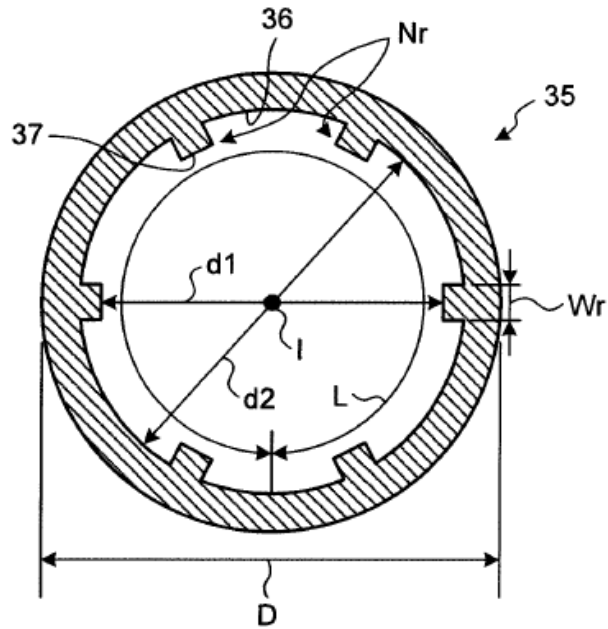


FIG.4

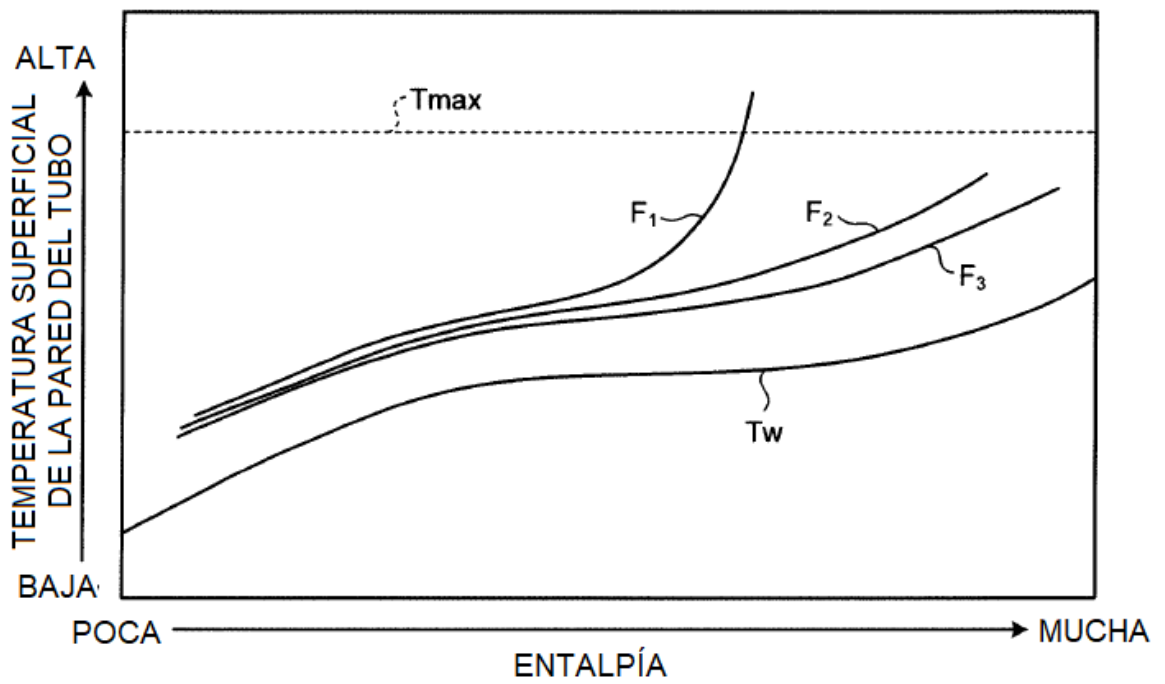


FIG.5

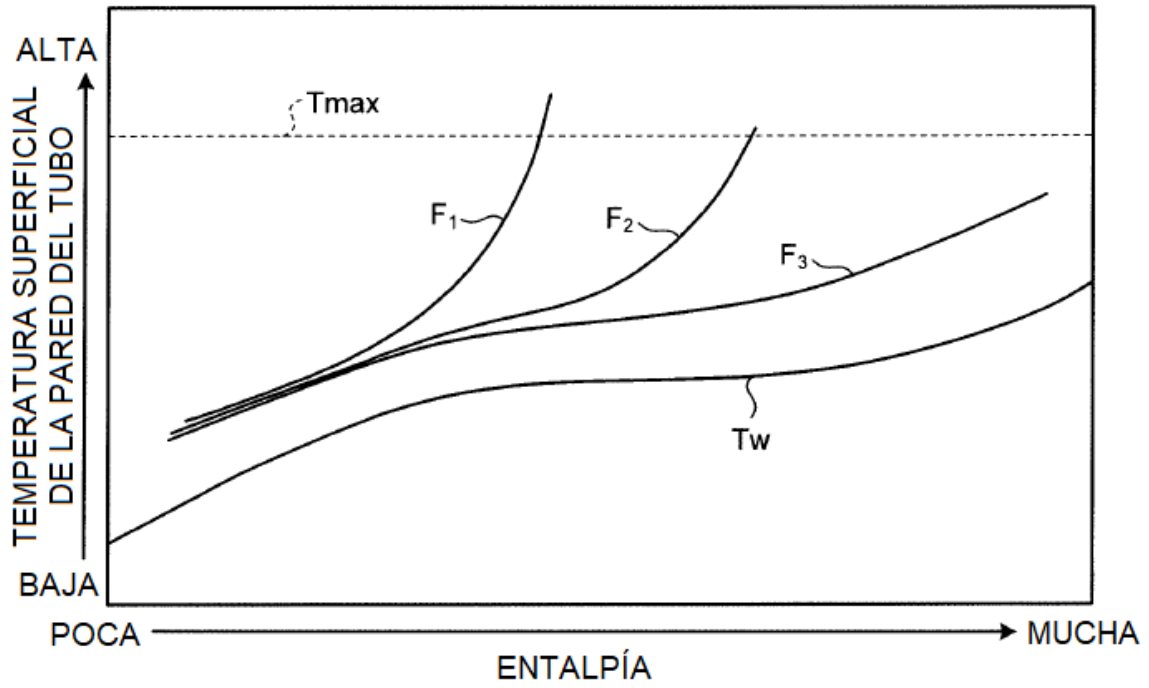


FIG.6

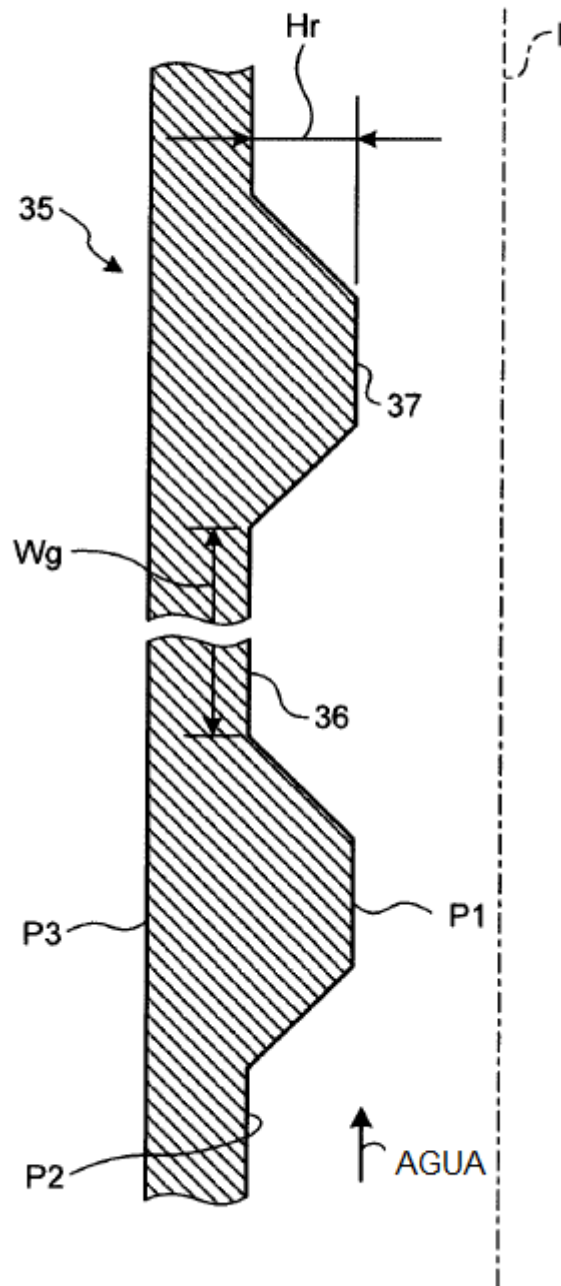




FIG.7

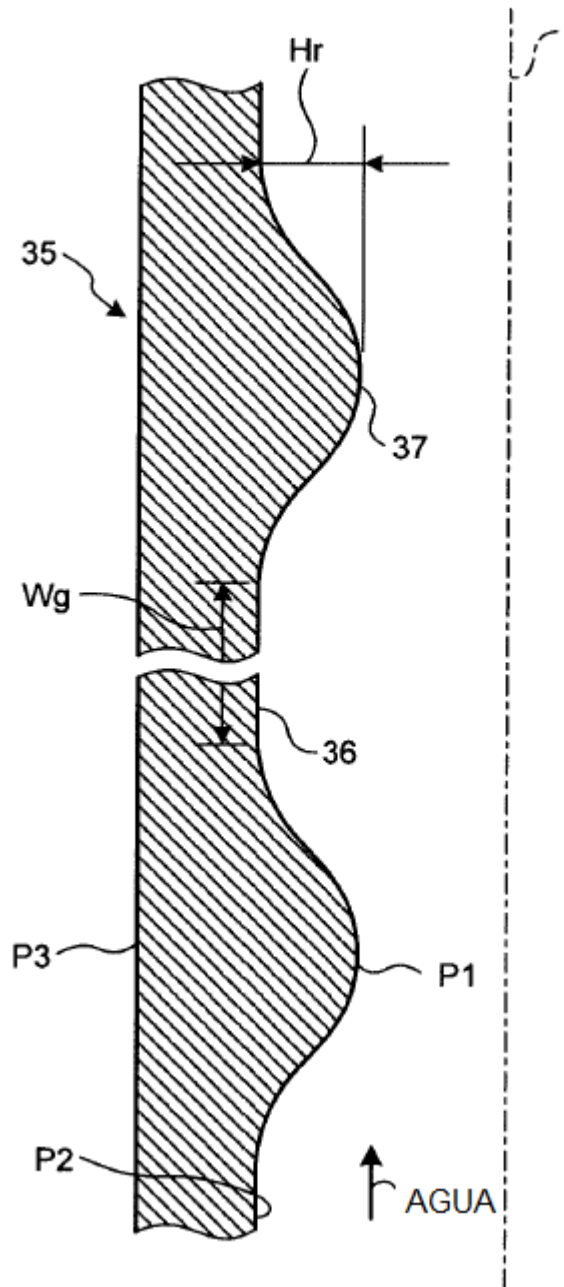


FIG.8

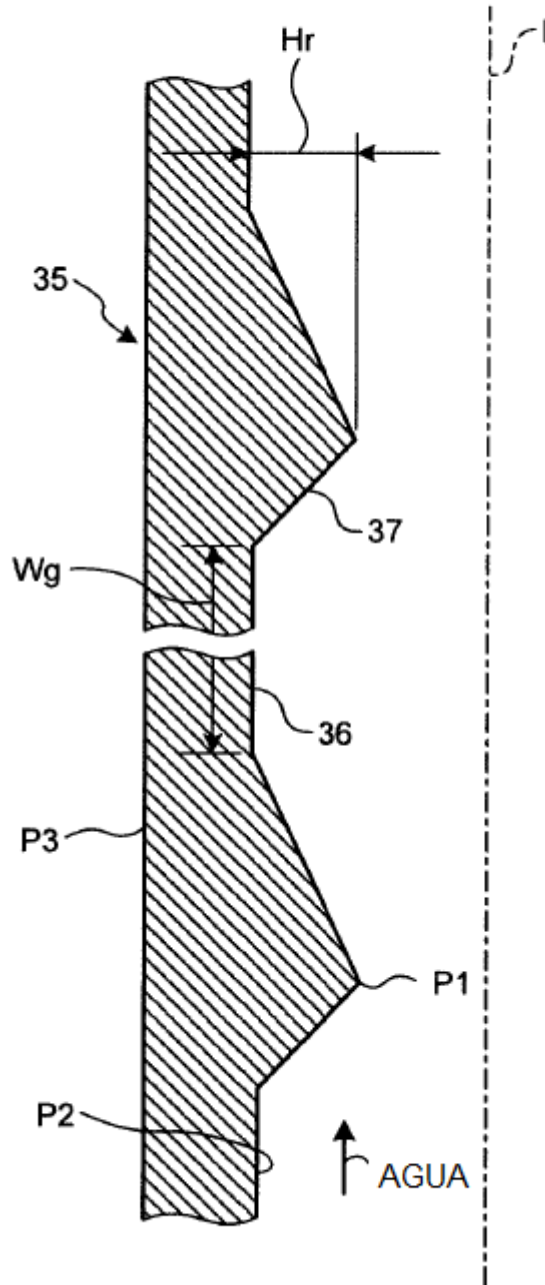


FIG.9

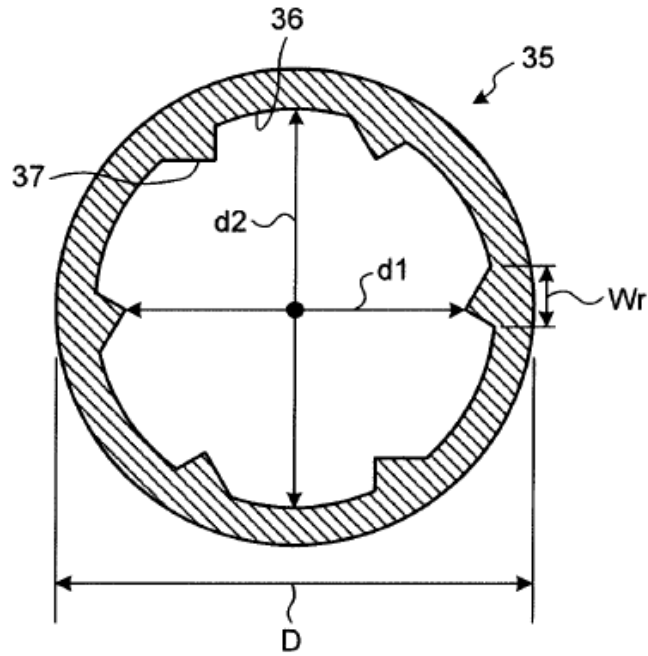


FIG.10

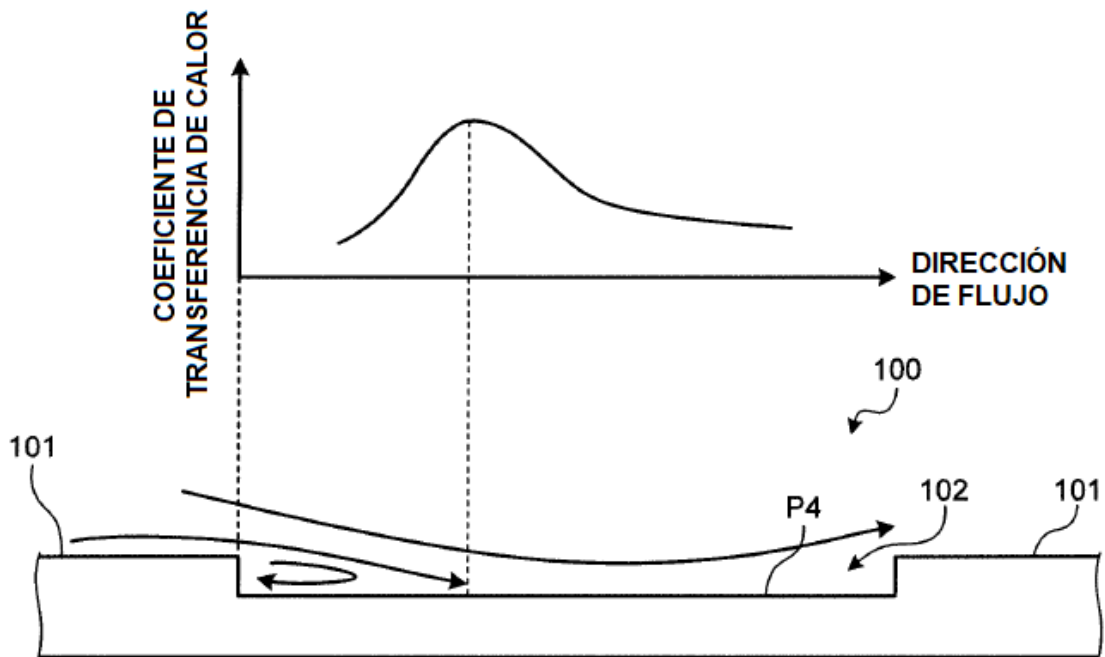


FIG.11

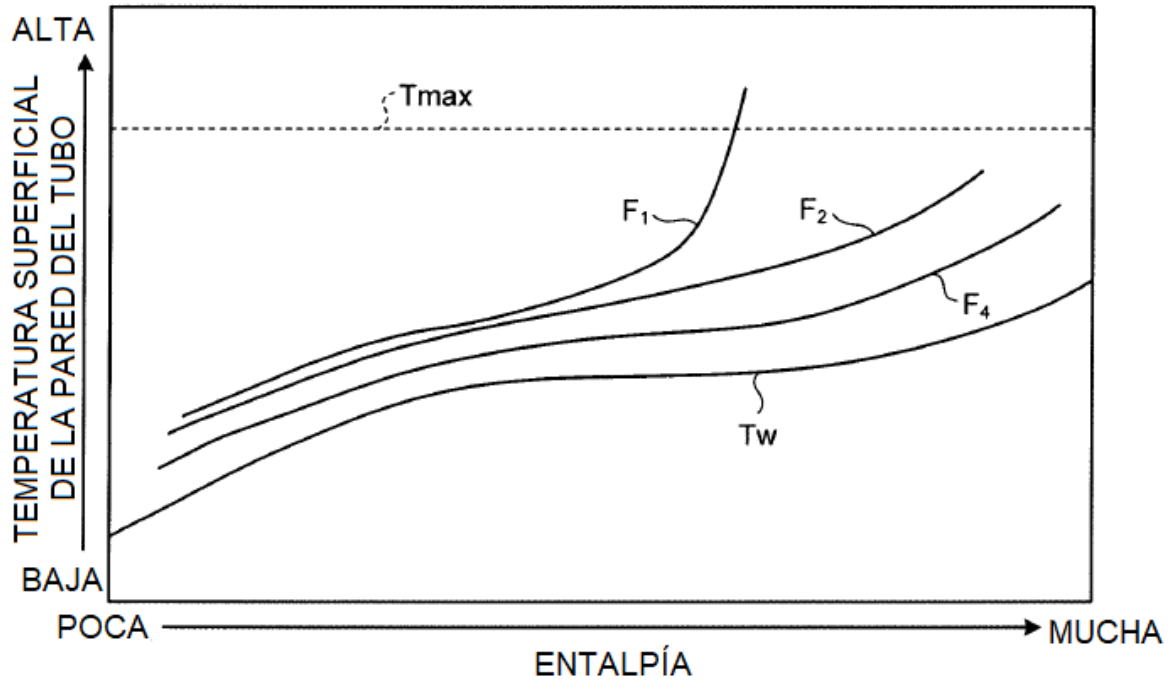


FIG.12

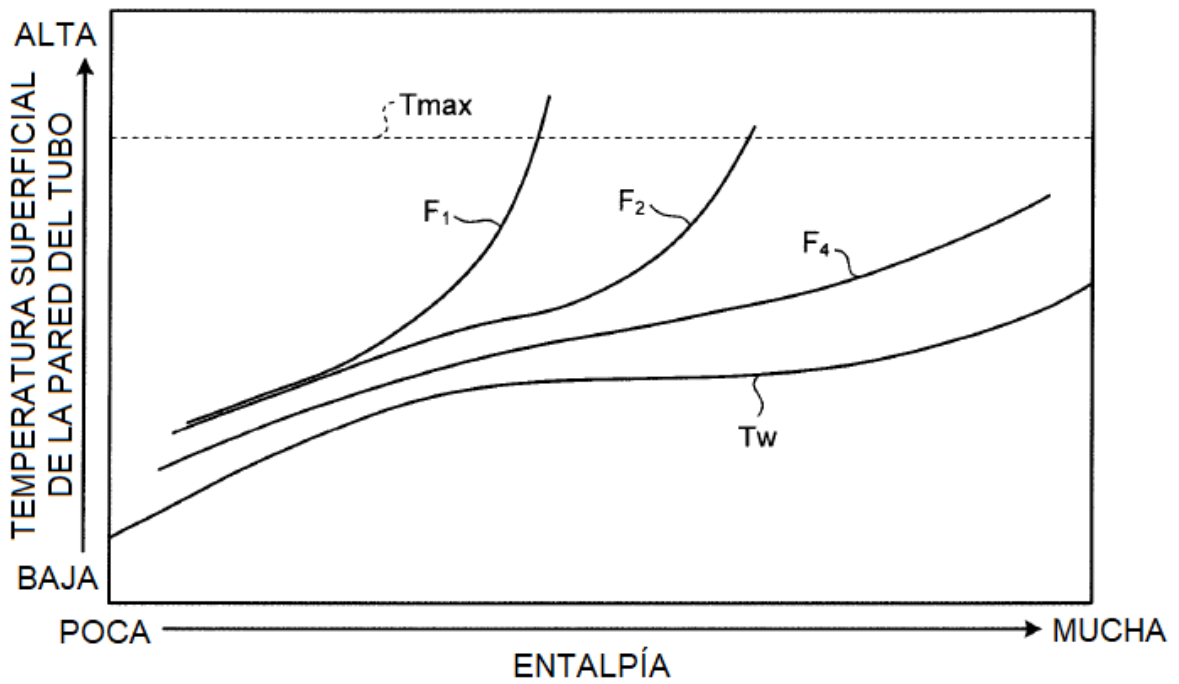


FIG.13

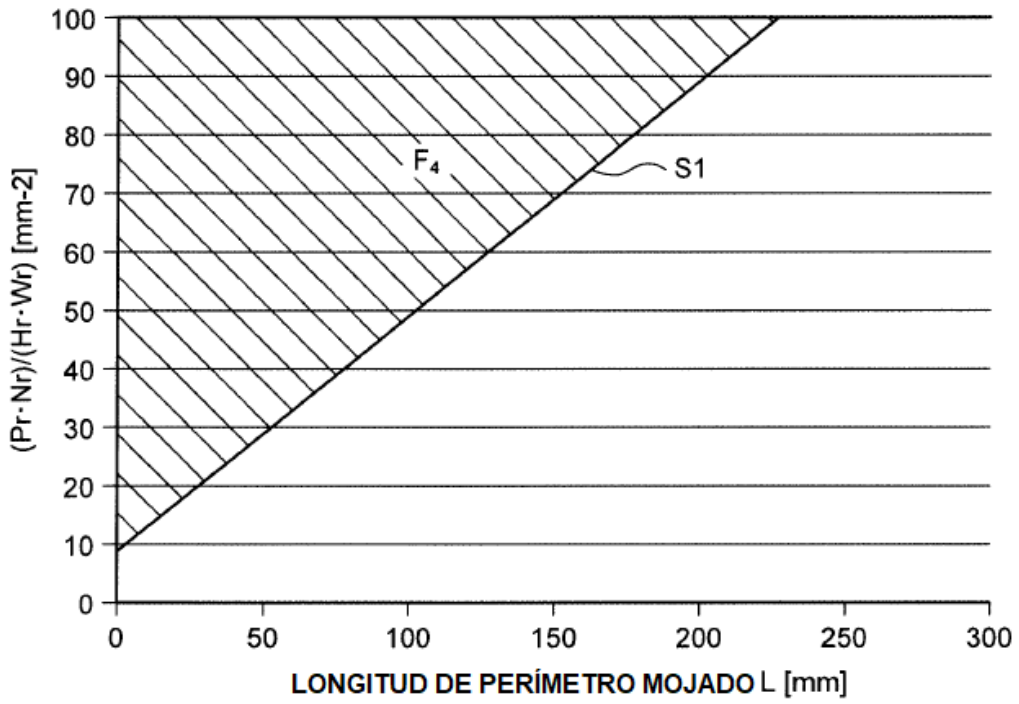


FIG.14

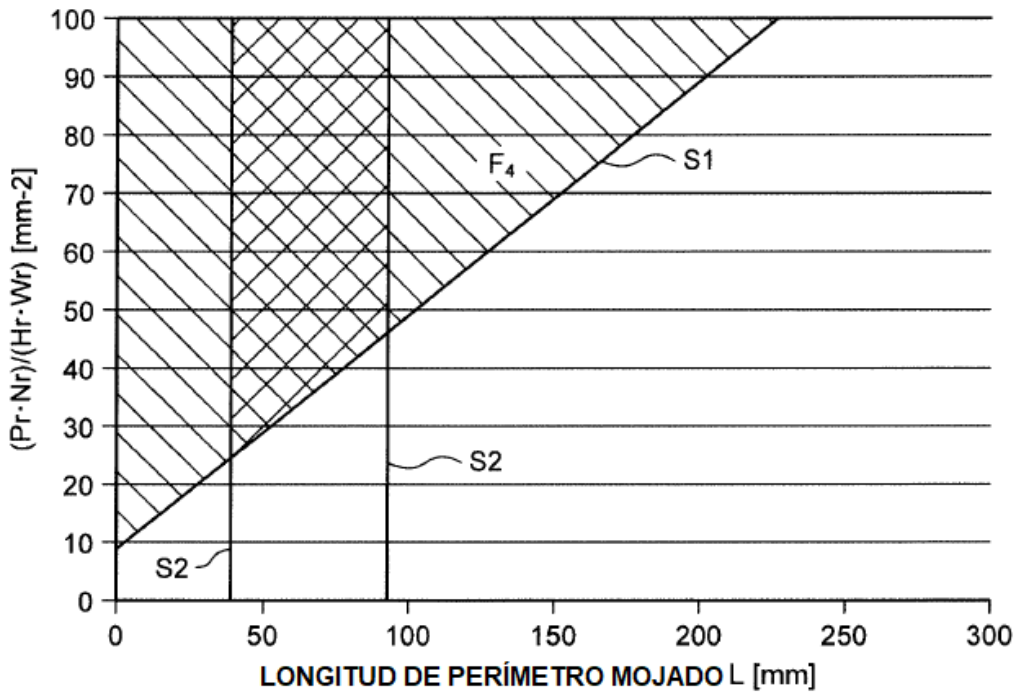


FIG.15

