

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-96631
(P2018-96631A)

(43) 公開日 平成30年6月21日(2018.6.21)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
F 2 2 B 29/06 (2006.01)	F 2 2 B 29/06	
F 2 2 B 29/08 (2006.01)	F 2 2 B 29/08	
F 2 2 B 37/40 (2006.01)	F 2 2 B 37/40	

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2016-242453 (P2016-242453)	(71) 出願人	504133110 国立大学法人電気通信大学 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1
(22) 出願日	平成28年12月14日(2016.12.14)	(74) 代理人	100083806 弁理士 三好 秀和
特許法第30条第2項適用申請有り (1) 平成28年6月22日に日本ボイラ協会「平成27年度ボイラー・圧力容器等研究助成」助成課題成果報告会において発表		(74) 代理人	100101247 弁理士 高橋 俊一
(2) 平成28年10月15日発行のボイラ研究第399号において掲載		(72) 発明者	大川 富雄 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内
		(72) 発明者	榎木 光治 東京都調布市調布ケ丘一丁目5番地1 国立大学法人電気通信大学内

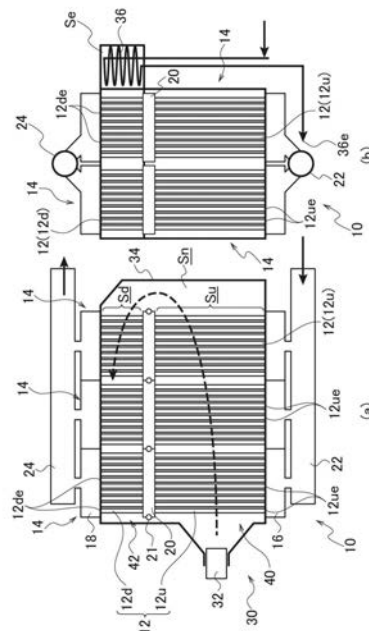
(54) 【発明の名称】 ボイラ

(57) 【要約】

【課題】構造が簡単でコンパクト化されていても高品質の過熱蒸気を得ることができ、しかもドライアウト点近傍で水管の劣化が加速される懸念がないボイラを提供することを課題とする。

【解決手段】ボイラ10は、上流側から下流側まで一本の流路で繋がっていて、上流側から給水される水管12と、水管12内を流れる環状流の蒸気中の液滴発生を抑制しつつ水管12を加熱することで、水管12の下流側から過熱蒸気を放出させる加熱機構30とを備える。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

上流側から下流側まで一本の流路で繋がっていて、上流側から給水される水管と、前記水管内を流れる環状流の蒸気中の液滴発生を抑制しつつ前記水管を加熱することで、前記水管の下流側から過熱蒸気を放出させる加熱機構とを備えることを特徴とするボイラ。

【請求項 2】

複数本の前記水管を配列して備えていることを特徴とする請求項 1 に記載のボイラ。

【請求項 3】

前記水管の外周側に設けられたスペーサを備え、前記スペーサは、前記水管のドライアウト点から前記水管の上流側へ所定距離内の位置に配置されて、前記水管の周囲の空間を燃焼ガスが流動するガス上流側空間とガス下流側空間とに区別しており、前記水管内の水を蒸発させる蒸発部が前記ガス上流側空間に形成されているとともに、前記水管内に過熱蒸気を形成する過熱部が前記ガス下流側空間に形成されていることを特徴とする請求項 2 に記載のボイラ。

10

【請求項 4】

前記水管がミニチャンネルであることを特徴とする請求項 1 ~ 3 の何れか 1 項に記載のボイラ。

【発明の詳細な説明】

20

【技術分野】

【0001】

本発明は、過熱蒸気を生成するボイラに関する。

【背景技術】

【0002】

近年、食品加工やプラスチックリサイクル等の産業分野で過熱蒸気の利用が進んでいる。この過熱蒸気を発生させるためにボイラが益々利用されてきている。

【0003】

このように利用が広まっているボイラでは、蒸気相と液相とが流れる気液二相流となる配管部分がかかなりの領域で生じている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開2004-57704号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

このような気液二相流のうち高乾き度域では、通常、蒸気相は管中央部を高速で流動し、液相は「管壁に沿う液膜」と「高速蒸気流中に分散して存在する液滴」とに分離して流動する、いわゆる環状噴霧流となる。そして、管壁からの入熱によって液膜が完全に蒸発した後でも、高速の蒸気流中では、相当量の液滴が残存している。

40

【0006】

ここで、蒸気流中では蒸気相が熱抵抗となるため、蒸気流中の液滴を完全に蒸発させることは難しい。このため、液滴を含まない高品質の過熱蒸気を得るのに工夫を要し、汽水分離器を用いる構成にする場合も少なくなく、ボイラの簡素化やコンパクト化の妨げになっている。なお、このような液滴が残存する条件では、ドライアウト点の近傍で管壁の濡れと乾きが繰り返されて高サイクル熱疲労による管材料の劣化が加速されてしまう懸念も生じる。

【0007】

本発明は上記課題に鑑みてなされたものであり、構造が簡単でコンパクト化されていて

50

も高品質の過熱蒸気を得ることができ、しかもドライアウト点近傍で水管の劣化が加速される懸念がないボイラを提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明者は、図14に示すように、上下方向に配置された一本の配管で下方側から給水するとともに配管を加熱して過熱蒸気を生成した場合、液単相流、スラグ流、チャーン流、環状噴霧流、液滴流、蒸気単相流のように順次変化していくことに着目した。ここで、環状噴霧流では擾乱波が生じ、この擾乱波の波頭で液滴DRが発生し易いことが知られている(図15、図16参照)。そこで本発明者は、ドライアウト点の近傍では、液膜表面に形成される大振幅の擾乱波や液滴の管壁付着などの影響により、管壁の濡れと乾きが繰り返され、高サイクル熱疲労が生じ易くなることにも着目した。

10

【0009】

本発明者は、このような検討を踏まえ、上記課題を解決することを鋭意検討し、実験や解析計算を行って更に検討を加え、本発明を完成するに至った。

【0010】

上記目的を達成するために、本発明に係るボイラは、上流側から下流側まで一本の流路で繋がっていて、上流側から給水される水管と、前記水管内を流れる環状流の蒸気中の液滴発生を抑制しつつ前記水管を加熱することで、前記水管の下流側から過熱蒸気を放出させる加熱機構とを備える。

【発明の効果】

20

【0011】

本発明によれば、構造が簡単でコンパクト化されていても高品質の過熱蒸気を得ることができ、しかもドライアウト点近傍で水管の劣化が加速される懸念がないボイラを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本発明の一実施形態で、(a)はボイラの構成を示す正面断面図、(b)はボイラの構成を示す側面断面図である。

【図2】本発明の一実施形態で、(a)はボイラの水管群ユニットの構成を示す正面図、(b)は水管群ユニットで使用するスペーサを示す説明図、(c)はスペーサ同士を連結することで隣り合う水管群ユニットを連結することを示す説明図である。

30

【図3】本発明の一実施形態で、ボイラの蒸発部の構成を示す平面断面図である。

【図4】本発明の一実施形態で、(a)はボイラの過熱部の構成を示す平面断面図、(b)は過熱部で生成された過熱蒸気が案内されるヘッダの構造を説明する平面断面図である。

【図5】本発明の一実施形態で、(a)はドライアウト点の近傍を説明する水管鉛直断面図、(b)は(a)の矢視U-Uの断面図である。

【図6】実験装置の構成を示す正面図である。

【図7】実験装置の試験部の構成を示す正面図である。

【図8】(a)は実験時の試験部の上流側に設けられた可視化部を示す写真図であり、(b)は実験時の試験部の下流側に設けられた可視化部を示す写真図である。

40

【図9】実験結果を示すグラフ図である。

【図10】実験結果を示すグラフ図である。

【図11】実験で得られたチャート図である。

【図12】実験で得られたチャート図である。

【図13】実験結果を示すグラフ図である。

【図14】上下方向に配置された一本の配管で液単相流から蒸気単相流が形成されるまでの流れを説明する鉛直断面図である。

【図15】(a)~(c)は、それぞれ、水管内で液膜から液滴が発生する一例を説明する模式的な鉛直断面図である。

50

【図16】(a)~(d)は、それぞれ、水管内で液膜から液滴が発生する一例を説明する模式的な鉛直断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

以下、添付図面を参照して、本発明の実施の形態について説明する。なお、以下に示す実施の形態は、この発明の技術的思想を具体化するための例示であって、構成部品の材質、形状、構造、配置等を下記のものに限定するものではない。この発明の実施の形態は、要旨を逸脱しない範囲内で種々変更して実施できる。

【0014】

[第1実施形態]

まず、第1実施形態について説明する。本実施形態では、シンプルかつコンパクト性に優れることに重点をおいたボイラの例を、図1~図5を参照しつつ説明する。

【0015】

本実施形態に係るボイラ10は、10×10程度(縦横にそれぞれ10本程度)に正方配列された多数本の水管12を有する水管群ユニット14を複数(例えば6個)備えている。ボイラ10は、定格出力に応じて水管群ユニット14の数や配列を変更することが可能である。

【0016】

水管群ユニット14は、何れも、このように正方配列されて上下方向に向けられてそれぞれ上流側から下流側まで一本の流路で繋がっている水管12と、水管12の下部に接続され水管12の上流側(本実施形態では下方側)から給水する下部ヘッダ16と、水管12の上部に接続され水管12の下流側から放出される過熱蒸気が通過する上部ヘッダ18と、各水管12の外周側に位置し各水管12を固定するとともに隣り合うユニット同士を連結するためのスペーサ20とを備えている。本実施形態では、各水管12は上流端12ue(図1では下方端)から下流端12de(図1では上方端)まで一本の流路で繋がっている。

【0017】

そしてボイラ10は、各水管群ユニット14の下部ヘッダ16に接続されている下部メインヘッダ(給水ヘッダ)22と、各水管群ユニット14の上部ヘッダ18に接続されている蒸気メインヘッダ24とを備えている。下部ヘッダ16の上流側には下部ヘッダ給水入口16uが形成されており、下部メインヘッダ22から下部ヘッダ給水入口16uに給水される構成になっている。

【0018】

更に、ボイラ10は、水管12を加熱する加熱機構30を備えている。加熱機構30は、水管内を流れる環状流F(図5参照)の蒸気FG中の液滴発生を抑制しつつ水管12を加熱することで、水管12の下流側から過熱蒸気を放出させるようになっている。

【0019】

加熱機構30はバーナ32を備えており、バーナ32は、水管12に向けて放出する燃焼ガスの対流による熱伝達と、水管12に向けた火炎による熱放射と、で水管内の水に効率良く熱が伝わる構成にされている。また、加熱機構30は、上部ヘッダ18と下部ヘッダ16との間の水管部分を覆う遮蔽部34を備えており、燃焼ガスによる熱伝達を遮蔽部34によって効率良く行う構成にされている。

【0020】

ここで、隣り合うスペーサ20はスペーサ支持棒21によって互いに連結されており、この結果、水管群ユニット14が配置されている空間では、各スペーサ20によって燃焼ガスが流動するガス上流側空間Suとガス下流側空間Sdとに区分けられている。

【0021】

そして、バーナ32の吹出し口とは反対側では、スペーサ20が配置されていないことで上下方向のガス流動が規制されない縦長状の非規制空間Snが形成されている。

【0022】

10

20

30

40

50

また、ガス下流側空間 S d では、非規制空間 S n の下流側に、エコマイザ 3 6 が配置された案内路 S e が形成されており、案内路 S e の下流端部にダクト 3 8 が接続されている。ここで、エコマイザ 3 6 の下流側は、下部メインヘッダ 2 2 の上流側に接続されており、サブクール水は、まずエコマイザ 3 6 に供給されて、燃焼ガスとの熱交換により温水にしてから下部ヘッダ 1 6 に送られるようになっている。

【 0 0 2 3 】

そして、ダクト 3 8 の下流側は、それぞれ、上部ヘッダ 1 8 に接続されている、そして、上部ヘッダ 1 8 の下流側には上部ヘッダ蒸気出口 1 4 e (図 1、図 4 参照) が形成されており、各上部ヘッダ蒸気出口 1 4 e は何れも蒸気メインヘッダ 2 4 に接続されている。

【 0 0 2 4 】

このような構成により、バーナ 3 2 から吹き出された燃焼ガスはガス上流側空間 S u に流入し、ガス上流側空間 S u に位置する水管部分 1 2 u を加熱しつつ非規制空間 S n に到達する。そして非規制空間 S n 内を上昇してガス下流側空間 S d に流入し、ガス下流側空間 S d に位置する水管部分 1 2 d を加熱しつつ案内路 S e にまで到達する。そして、案内路 S e 内のエコマイザ 3 6 の外側を通過することでエコマイザ 3 6 内の水を加熱しつつ、ダクト 3 8 から排出されるようになっている。

【 0 0 2 5 】

本実施形態では、燃焼ガスがガス上流側空間 S u の水管部分 1 2 u を加熱することによってほとんど蒸発し、燃焼ガスがガス下流側空間 S d の水管部分 1 2 d を加熱することによって水管部分 1 2 d 内が過熱蒸気となるように、ガス下流側空間 S d、ガス上流側空間 S u および非規制空間 S n の寸法、燃焼ガスの温度および流量、が予め設定されている。従って、スパーサ 2 0 の下側には水管内の水を蒸発させる蒸発部 4 0 が形成され、スパーサ 2 0 の上側では水管内を過熱蒸気にする過熱部 4 2 が形成されたボイラ構造になっている。

【 0 0 2 6 】

このようなボイラ構造にするにあたり、スパーサ 2 0 は、水管 1 2 のドライアウト点 P から水管上流側 (すなわち本実施形態では下方側) へ所定距離 d 内の位置に配置されている。なお、ドライアウト点 P は、環状流 F を形成している液膜 F L がすべて蒸発する部位である。

【 0 0 2 7 】

このような所定距離 d を決定する際には、水管 1 2 内で液滴が発生しない (液滴発生限界以下) ようにすることで、ドライアウト点 P の近傍で壁温の時間変動が許容範囲であること、ドライアウト点 P の水管下流側で管壁温度の上昇が許容範囲であること、が満たされるように、水管 1 2 の管径、水管 1 2 に給水する水の流量、バーナ 3 2 から吹き出す燃焼ガス温度や燃焼ガス流量などを決定する。その際、蒸発部 4 0 では水管内における蒸気の乾き度を 1 近くにまで上昇させることがボイラ 1 0 をコンパクトで高性能にする上で効果的である。

【 0 0 2 8 】

本実施形態によれば、このように、スパーサ 2 0 の配置位置が、水管 1 2 のドライアウト点 P から水管上流側へ上記所定距離 d 内の位置にされている。従って、1 本の水管 1 2 において上流側から水が供給され下流側では過熱蒸気として出す、構造が簡単で著しくコンパクトにされた本実施形態に係るボイラ 1 0 であっても、水管 1 2 の環状流 F の蒸気 F G 中に発生する液滴が十分に抑制された高品質の過熱蒸気を得ることができ、しかも、ドライアウト点近傍で水管 1 2 の劣化が加速される懸念がない。

【 0 0 2 9 】

また、このように蒸気 F G 中に発生する液滴が十分に抑制されているので、液膜 F L のドライアウト点 P の発生高さ位置が明確で安定している。

【 0 0 3 0 】

また、気水分離器を設置する必要がなく、しかも、水管 1 2 の複雑な引き回しを必要とせず、また、過熱部 4 2 以外に過熱器を別途に配置する必要がない。従って、ボイラ 1 0

10

20

30

40

50

の更なる簡素化、コンパクト化が実現される。

【0031】

また、スパーサ20は、水管12の固定と水管群ユニット14の連結とを行う機能に加えて、水管上流側の蒸発部40と水管下流側の過熱部42とを区切る役割も果たしており、ボイラ10の簡素化、小型化に大きく寄与している。

【0032】

また、過熱部42では、対流伝熱のみによって熱交換が行われて液膜FLのドライアウトと蒸気過熱とを行うことができる。従って、過熱部42では、放射伝熱の寄与が無視できること、および、燃焼ガスの温度が蒸発部40に比べて低下していることから、ドライアウト点近傍及びその下流の蒸気単相部における壁温上昇が緩和できる。

10

【0033】

なお、上記所定距離dを設定する際に、液膜FLの消失とともに液滴を含まない飽和蒸気が得られるように設定することが理想的である。このような理想的な設定をすることで、液膜FLのドライアウト点Pよりも下流側で加えられる熱は、すべて蒸気の温度上昇、すなわち過熱蒸気の生成に消費される。

【0034】

このことを実現させるには、水管12は、内径が2mm程度以内のミニチャンネル(ミニチャンネル水管)にされていることが好ましい。これにより、液膜FLのレイノルズ数を低減させることができ、二相流の流動様式を、擾乱波等による液膜からの液滴の発生が防止された純粋な環状流にし易い。すなわち、ドライアウト点の近傍およびその下流における熱流束を、管壁温度の上昇が許容できる程度に低く抑制することのみで、簡素でかつコンパクト性に優れたボイラにし易い。

20

【0035】

また、少量の液滴発生が生じる場合には、ドライアウト点Pよりも下流側にベンド部を設けて液滴付着を促進する対策も考えられる。

【0036】

<実験例>

本発明者はドライアウト実験を行った。実験装置の全体構成を図6に、実験装置の要部構成を図7に、実験装置の要部で可視化を図ったことを図8に、それぞれ示す。

【0037】

30

(1) 実験装置

本実験例で用いる実験装置50では、試験流体としては水を用いる。試験流体は、ポンプ52(循環用のプランジャーポンプ)を流出した後、コリオリ式流量計54(精度 $\pm 0.4\%$)と予熱器56とを経て試験部60(細径水管の一部を模擬したもの)に流入する。

【0038】

そして、試験流体は、試験部60を流出した後、上部タンク62(凝縮器)と下部タンク64(脱気槽)とを経て、二重管式熱交換器66で流体温度を十分に下げてからポンプ52に戻る。予熱器56の出入口(上流端、下流端)および試験部60の出口(下流端)に、圧力と流体温度の計測点を設けた。計測精度は、圧力は $\pm 0.75\text{kPa}$ 以内、流体温度は $\pm 0.1\text{K}$ 以内である。なお、予熱器56における流体加熱は、直流電源を用いた直接通電加熱により行った。また、上部タンク62は、凝縮用の伝熱管を内蔵しているが、蒸気の系外への流出を防ぐため、ジムロート冷却器を併用した。

40

【0039】

試験部60は、内径 $D = 1.91\text{mm}$ (外径は 2.4mm)、肉厚 $t = 0.24\text{mm}$ のSUS304製鉛直円管で構成され、試験流体は試験部60の下方側から流入する。したがって、試験流体の流動方向は鉛直上向きである。

【0040】

本実験例では、図7に示すように、銅製の電極68u、68dを試験部60に沿った長手方向距離が170mmとなる位置にそれぞれ設置するとともに、交流電力による直接通電加熱を行った。供給電力の制御には、ボルトスライダを用いた。また、流路外壁温度を計

50

測するために、試験部 60 の長手方向に沿って30mm間隔で熱電対 70 をスポット溶接した。

【0041】

ここで、熱電対 70 の計測高さ位置は5ヶ所であり、各高さ位置に2個の熱電対を設置したため、試験部外壁に設置した熱電対の総数は10である。

【0042】

また、最上流側（本実験例では最下端側）および最下流側（本実験例では最上端側）で、熱電対と電極との間隔は25mmである。従って、従って、最上流側の電極 68u を原点としたときの各熱電対 70 の高さ Z は、下方（上流側）から順に、5mm、55 mm、85 mm、115 mm、145 mmとなる。

10

【0043】

また、差圧計を用いて試験部出入口間（長手方向距離が170mm）における圧力損失を計測した。壁温計測に使用した熱電対の精度は $\pm 0.05K$ 以内、差圧計の精度は $\pm 130Pa$ 以内である。また、電気絶縁を兼ねて、試験部 60 の上流端部と下流端部にそれぞれガラス製の可視化部 60vu、60vd（図7、図8参照）を設けた。

【0044】

（2）実験手順

本実験例では、まず下部タンク 64 に蒸留水を給水するとともに、下部タンク 64 内に設置したヒータおよびジムロート冷却器を用いて、脱気を行った。この後、ポンプ出力により試験流体の質量流束Gを制御するとともに、電極 68u、68d間の電圧を増加させて、試験部 60 の熱流束qwを設定する。流量Gと熱流束qwとを既定値に設定した後、予熱器 56 への供給電力により試験部 60 の入口（上流端）における蒸気の乾き度 x_{in} を徐々に増加させる。試験部外壁に設置した熱電対 70 による温度データの急上昇によりドライアウトの発生を検知した。温度、流量等の実験データは、データロガーを用いて1秒ごとに計測した。

20

【0045】

（3）実験条件

実験条件を以下に示す。

ケース番号	G (kg/m ² s)	qw(KW/m ²)
1	15	15
2	30	30
3	50	50
4	50	70

30

【0046】

ミニチャンネルでは摩擦損失が過大になりやすいことを考慮して、Gは15, 30, 50 kg/m²sの何れかなるよう設定した。

【0047】

また、加熱部（試験部 60 のうち加熱される部分）の出入口における蒸気の乾き度の差を $x = x_{out} - x_{in}$ で表すと、Gとqwとは次の関係を満足する。

【数1】

$$\Delta x = \frac{4L_h q_w}{GD \Delta h_v}$$

40

【0048】

ここで、 h_v は蒸発潜熱を表す。ケース1~3では、 x が0.16程度となるようにqwを設定した。ケース4では、qwの影響を調べるため、Gはケース3と同じ値のままで、qwを1.4倍とした($x = 0.22$)。各ケースで、予熱器 56 の出力を調節し、 $x_{in} = 0 \sim 0.9$ の範囲で実験データを収集した。なお、圧力条件はほぼ大気圧とした。

【0049】

50

(4) 実験結果

(a) 液膜のドライアウト

熱電対70による温度データから算出された各局所熱伝達率 h ($h_1 \sim h_5$)の値を、ケース1に関して図9に、ケース2に関して図10に、それぞれ示す。ここで、局所熱伝達率 h は外壁温度の時間平均値に基づいて、管壁内における均一発熱を仮定して内壁温度 T_w を算出し、また、流体温度は飽和温度 T_{sat} に等しいとして次式より算出した。

【数2】

$$q_w = h_i(T_{W,i} - T_{sat,i})$$

10

【0050】

ここで、添え字の i は計測高さ位置を表し、上流側から下流側(本実験例では下方側から上方側)に番号を振った。なお、 h_2 が欠落しているのは、熱電対の破損により温度が計測できなかったためである。また、図9、図10の横軸は、熱電対位置における局所乾き度 x である。 x_{in} (試験部入口における蒸気の乾き度)を変化させながら計測したので、 x_{in} の設定値ごとに、 $h_1 \sim h_5$ が1組得られることになる。なお、図9、図10中に実線で示した曲線は、相関式(「榎木、宮田、森、微細流路内沸騰熱伝達の整理式の修正、日本冷凍空調学会論文集、32(3)、275-283(2015)」に記載された式)による予測値を示す。

【0051】

流路内で、液滴流量比等の熱流動状態が平衡状態にあれば、各ケースで h は x のみの関数となることが期待できる。しかし、 x が同じであっても熱電対位置によって h が異なる場合があり、予熱器出口のエルボなど、入口条件の影響が残存していることが示唆される。

20

【0052】

ドライアウト発生時の x に着目すると、 h の値が $1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 程度以下にまで顕著に低下する様子が観察されているのは、ケース4では $x = 0.5$ 以上だが、ケース2では 0.8 以上、 G がもっとも小さいケース1では 0.9 以上となっていた。この結果により、少なくとも G が十分に小さい条件では、 $x = 1$ 近くまで高熱伝達率が維持されており、効率的に液蒸発が行えることがわかった。

【0053】

ここで、環状流中で液滴発生が開始するときの液膜質量流束 G_f が次式(D. G. Owen, G. F. Hewitt, A proposed entrainment correlation, AERE-R12279 (1986)に記載された式)で与えられるとされている。

30

【数3】

$$\frac{G_f D}{\mu_l} = \exp \left[5.8504 + 0.4249 \frac{\mu_g}{\mu_l} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \right]$$

【0054】

本実験の条件を上式に代入すると、 $G < 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ であれば液滴は発生しないという結果になる。

40

【0055】

(b) 壁温変動

ケース3で、ドライアウト発生時における壁温の時間変動状況を図11、図12に示す。上述したように、本実験例では各壁温の計測高さ位置で2つの熱電対を設置したが、 $z = 25\text{mm}$ 、 85mm の高さ位置では片方の熱電対で計測できず、 $z = 55\text{mm}$ の高さ位置では両方の熱電対で計測できなかった。このため、図11では、 $z = 85\text{mm}$ の高さ位置における1つの熱電対の計測データを表示し、図12では、 $z = 115\text{mm}$ の高さ位置における2つの熱電対の計測データを表示している。

【0056】

50

zが85mm(図1 1参照)以下では、外壁温度が108 程度でほぼ一定であるのに対して、zが115mm(図1 2参照)以上では、温度変動が生じたり、外壁温度が111 程度に上昇したりしている。従って、zが85~115mmの区域で、液膜FLのドライアウトが発生していると考えられる。よって、低熱流束域でドライアウト点を発生させるボイラ構成にすることで、管壁材料の健全性を確保するためにドライアウト点近傍における温度変動を十分に低く抑えること、は充分に行い易いと考えられる。

【0057】

(c) ドライアウト後の管壁温度

ケース2で $x_{in} = 0.9$ (図1 0参照)とした場合、 $z = 85\text{mm}$ (測定点3)およびその下流で壁温上昇が観測された。このときの壁温をDittus-Boelter式による予測値と比較した結果を図1 3に示す。計測値は予測値よりやや高いが、予測値からはさほど離れてはいない。この結果により、ドライアウト点より下流の壁温は、通常の熱伝達率相関式を用いて十分に予測可能と考えられる。

10

【0058】

(d) まとめ

本実験例では、内径1.9mmのミニチャンネルを用いて液膜のドライアウト実験を実施した。この結果、少なくとも質量流束が十分に小さい実験条件では、出口での乾き度が概ね1となるまで、液膜のドライアウトは発生しないことを確認できた。また、ドライアウト発生時における壁温変動は顕著ではないことを示すとともに、ドライアウト点下流における壁温が既存の熱伝達率相関式で十分に予測可能であることを確認した。

20

【0059】

<解析計算例>

本発明者は、上記実施形態のボイラ10の性能を概略で評価するために、達成可能な蒸気量と蒸気温度とを解析計算により試算した。解析対象のボイラの構成を以下に示す。

水管内径 (mm) : 2

水管外径 (mm) : 3

水管ピッチ (mm) : 4.5

蒸発部長さ (mm) : 1000

過熱部長さ (mm) : 200

水管群ユニット数 : 1

燃料 : メタン

燃焼ガス温度 () : 1200

燃焼効率 : 0.8

空気当量比 : 1.4

30

【0060】

水管12は、内径2mm、外径3mmとし、ピッチ(水管中心間の距離)4.5mmで正方配列とした。蒸発部40の上下方向長さは1000mm、過熱部42の上下方向長さは200mmで、ユニット数は1(水管総数100本)とした。燃料はメタンガス(発熱量50MJ/kgと仮定)とし、燃焼ガスの初期温度1200、燃焼効率0.8、空気当量比1.4とした。簡単のため、水管内における水および蒸気の物性値は大気圧の飽和条件における値、燃焼ガスの物性値は1000Kにおける空気の値で代表させた。また、蒸発部40には飽和水が、過熱部42には飽和蒸気が、それぞれ流入するものとし、エコノマイザは無視した。計算手順の概略を、以下の(a)~(f)に示す。

40

【0061】

(a) 蒸発量Gと過熱蒸気温度Tvの初期推定値を設定する。

(b) 次式より、蒸発部の熱通過率Kvapを求める。

【数 4】

$$K_{\text{vap}} = \frac{1}{1/h_{c,\text{in}} + \delta_w/\lambda_w + 1/(h_{c,\text{out}} + h_{\text{rad}})}$$

【0062】

ここで、 $h_{c,\text{in}}$ は水管内での対流熱伝達率であり、一定値(10kW/m²K)とした。 δ_w 、 λ_w は、それぞれ、管壁の厚さおよび熱伝導率である。水管12の材質はステンレスとした。 $h_{c,\text{out}}$ と h_{rad} は、各々管外における対流及び熱放射に関する熱伝達率であり、次式により評価する。

10

【数 5】

$$h_{c,\text{out}} = 0.3\text{Re}_g^{0.62} \text{Pr}_g^{1/3} \frac{\lambda_g}{d_o}$$

【数 6】

$$h_{\text{rad}} = \frac{\varepsilon_w \sigma (T_g^4 - T_w^4)}{T_g - T_w}$$

20

【0063】

ここで、 Re はReynolds数、 Pr はPrandtl数、 λ は熱伝導率、 d_o は水管外径、 ε_w は放射率、 σ はStephan-Boltzmann定数、 T は温度である。また、添え字で g は燃焼ガスの場合、 w は管壁の場合を表す。

【0064】

(c) 蒸発部40における熱バランスを表す次式より蒸発量 G を算出する。

【数 7】

$$G = \frac{\pi K_{\text{vap}} (T_g - T_{\text{sat}}) l_{\text{vap}} d_i N_{\text{unit}}}{\Delta h_{\text{vap}}}$$

30

【0065】

ここで、 T_{sat} は飽和温度、 l_{vap} は蒸発部長さ、 d_i は水管内径、 N_{unit} は水管ユニット数、 Δh_{vap} は蒸発熱である。

(d) 次式より、過熱部の熱通過率 K_{sh} を求める。

【数 8】

$$K_{\text{sh}} = \frac{1}{1/h_{\text{sh},\text{in}} + \delta_w/\lambda_w + 1/h_{\text{sh},\text{out}}}$$

40

ここで、 $h_{\text{sh},\text{in}}$ と $h_{\text{sh},\text{out}}$ とは、それぞれ、過熱部水管内外での対流熱伝達率である。

【0066】

$h_{\text{sh},\text{out}}$ は【数5】、 $h_{\text{sh},\text{in}}$ は次式により評価する。

【数 9】

$$h_{\text{sh},\text{in}} = 0.023\text{Re}_v^{0.8} \text{Pr}_v^{1/3} \frac{\lambda_v}{d_i}$$

【0067】

50

ここで、添え字のvは蒸気の場合を表す。

(e) 過熱部における熱バランスを表す次式により過熱蒸気温度 T_v を算出する。

【数 1 0】

$$T_v = T_{\text{sat}} + \frac{4K_{\text{sh}}(T_g - T_{\text{sat}})l_{\text{sh}}}{Gd_i c_{p,v}}$$

【 0 0 6 8】

ここで、 T_v は蒸気温度、 l_{sh} は過熱部長さ、 $c_{p,v}$ は蒸気の定圧比熱である。

(f) G, T_v の計算結果を予測値と比較し、収束するまで(b)～(e)のステップを繰り返す。

10

【 0 0 6 9】

このようにして得られた性能計算結果を以下に示す。

蒸気量 (kg/h) : 34

過熱蒸気温度 () : 320

水管外壁最高温度 () : 154

【 0 0 7 0】

蒸気量34kg/h、過熱蒸気温度320 を達成可能、という計算結果になった。簡素な構造で比較的高温の過熱蒸気を得ることができるので、無酸素状態で焼成や乾燥等の作業が可能である。従って、例えば食品分野では、品質劣化を抑えつつ焼成、焙煎等の食品加工を効率よく実施できると期待できる。なお、解析対象のボイラの構成として示した蒸気量は1ユニット構成の場合の計算結果であり、ユニット数を増加させることで、より大量の蒸気を生成することができる。また、上記の使用条件における水管最高温度は154 と計算され、大きな問題とはならないレベルであると見積もられた。

20

【 0 0 7 1】

このように、本解析計算例では、高温の過熱蒸気を生成可能であるという計算結果になった。従って、食品分野等で有効に活用可能と考えられる。

【符号の説明】

【 0 0 7 2】

1 0 ボイラ

1 2 水管

2 0 スペーサ

3 0 加熱機構

4 0 蒸発部

4 2 過熱部

d 所定距離

F 環状流

F G 蒸気

P ドライアウト点

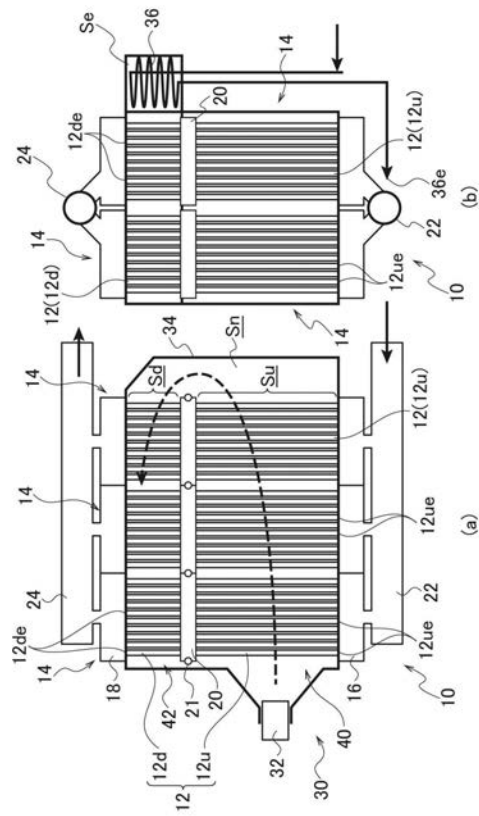
S u ガス上流側空間

S d ガス下流側空間

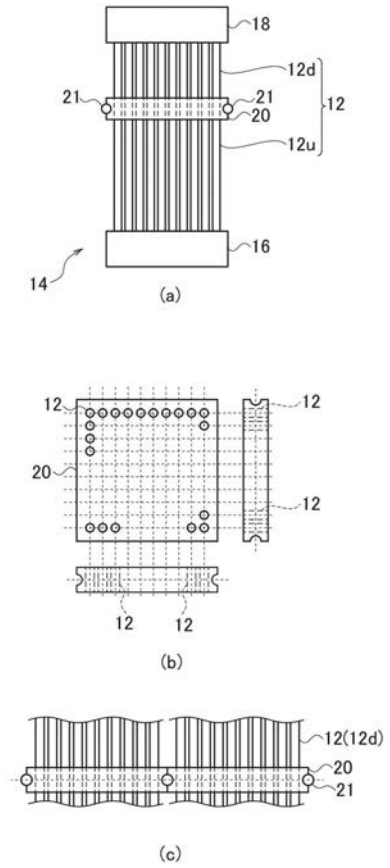
30

40

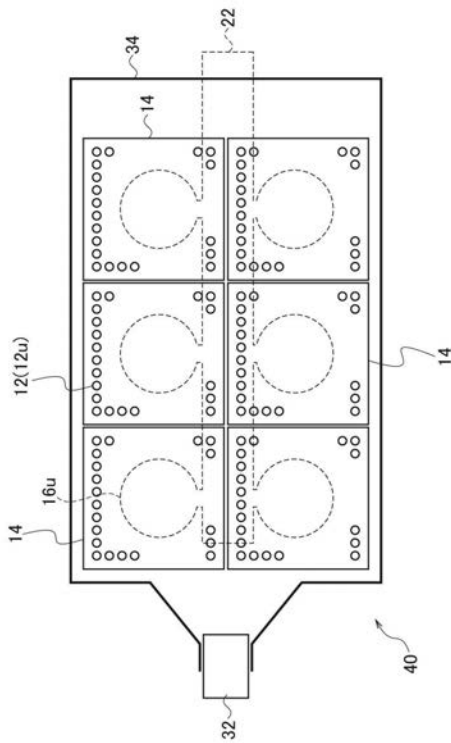
【 図 1 】



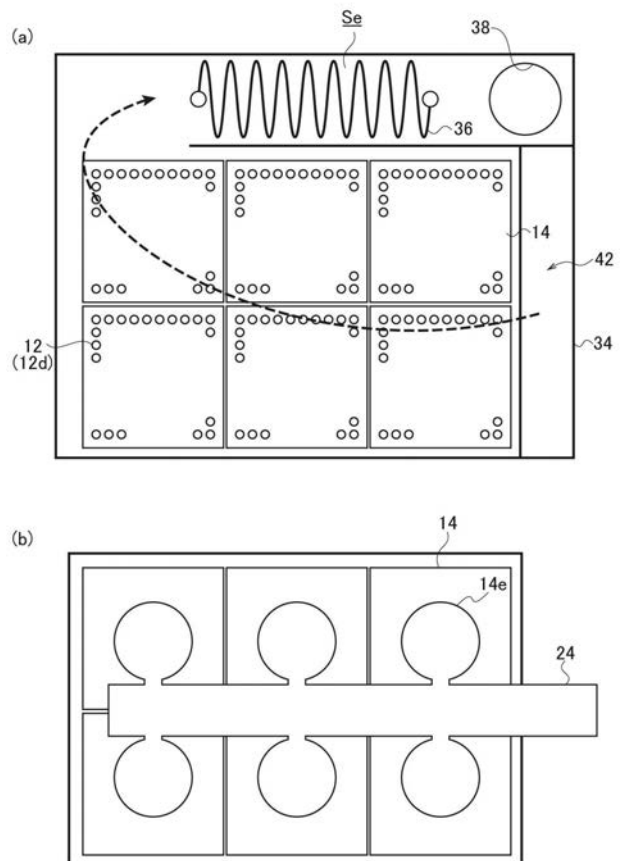
【 図 2 】



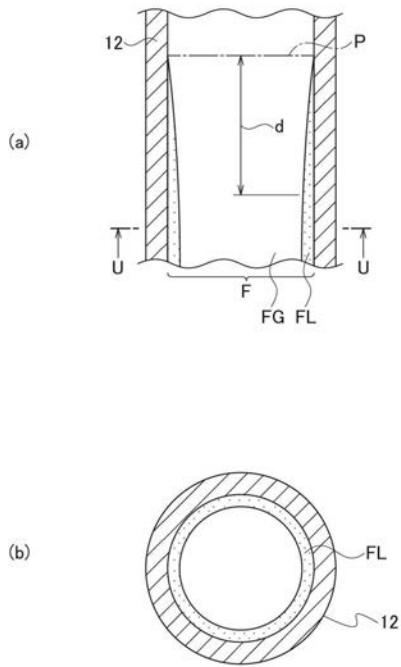
【 図 3 】



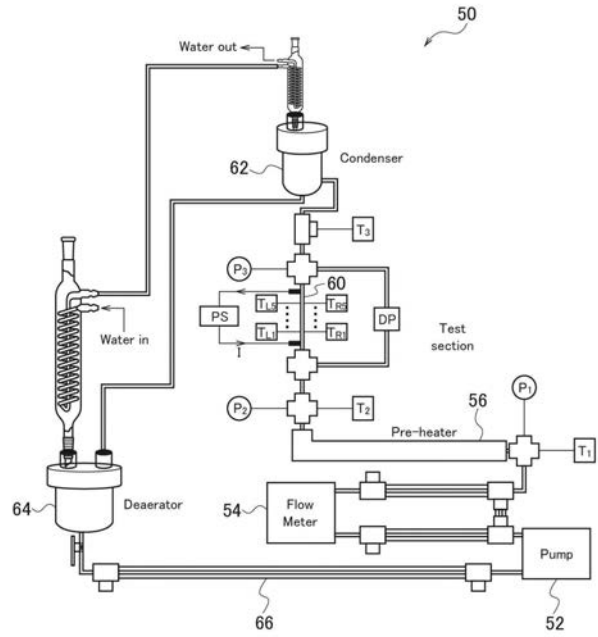
【 図 4 】



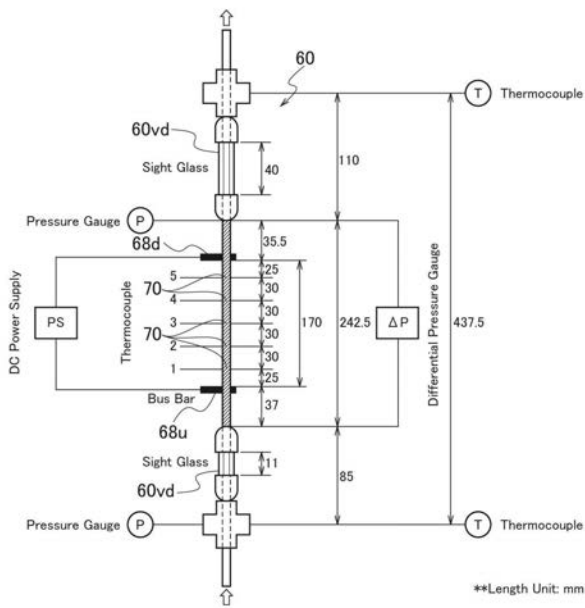
【 図 5 】



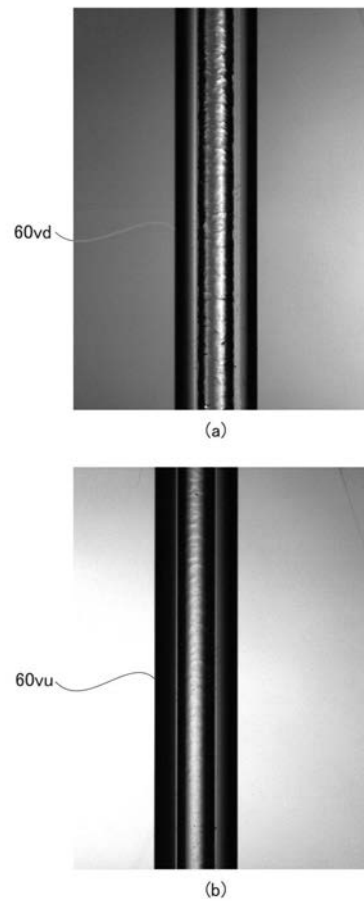
【 図 6 】



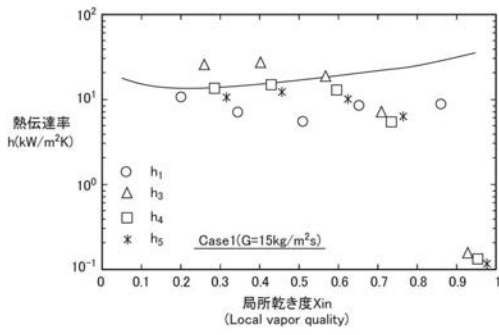
【 図 7 】



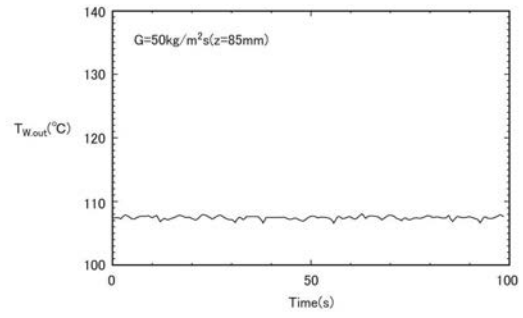
【 図 8 】



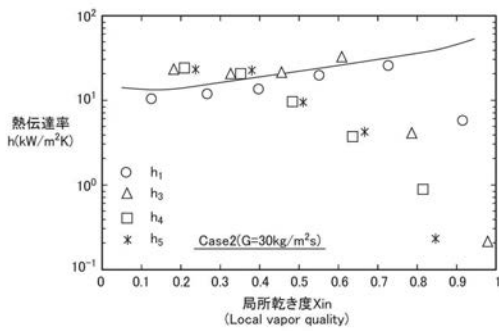
【 図 9 】



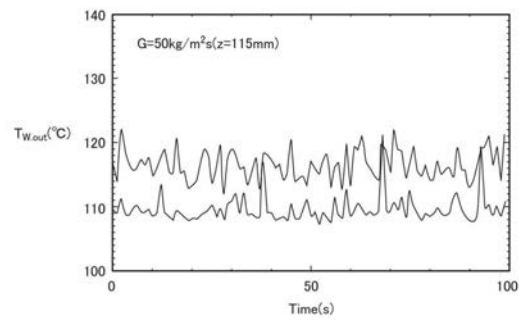
【 図 1 1 】



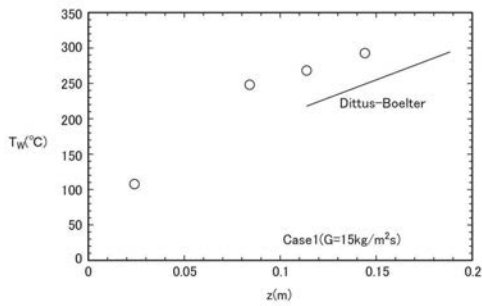
【 図 1 0 】



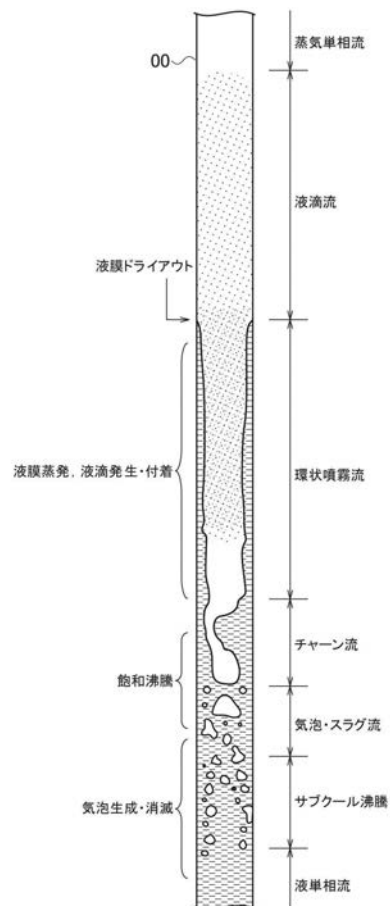
【 図 1 2 】



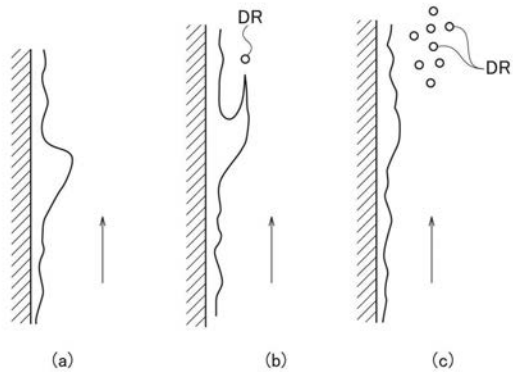
【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



【 図 1 6 】

