

明 細 書

発明の名称： ボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法

技術分野

[0001] 本発明は、ボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法に関する。詳しくは、本発明は、腐食環境やスケールの存在による繰り返しの応力が関連したボイラにおける蒸発管の腐食疲労を効果的に抑制する方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、低圧ボイラ市場では伝熱面積が10～40 m²のものが多く、特に管寄せと汽水分離器及び、蒸発管のみで構成されるコンパクトな多管式特殊循環ボイラ（以降、「小型貫流ボイラ」と称す。）が圧倒的なシェアを誇っている。小型貫流ボイラはボイラを複数台設置する多缶設置で運用されることが多く、蒸気の要求量によって起動及び停止を多数回繰り返して運転される。また循環比が2以下で、特に蒸発管下部に給水されるため、下部近傍はpHが低く、溶存酸素も高いことから腐食が発生し易い。この腐食環境と、ボイラの起動及び停止による温度変動で生じる繰り返し応力による腐食疲労で蒸発管に亀裂が発生し、水漏れに至るケースが散見される。

[0003] このような腐食疲労は、従来のボイラへの給水（以下、ボイラ給水ともいう）の水処理のみでは完全に防止することが困難である。このため、最短で3年程度で蒸発管に亀裂が発生して水漏れに至ることもあった。

[0004] ボイラ給水の水質管理が十分でない場合に、スケール成分がボイラ給水に混入し、ボイラ内にスケールが付着するケースもよく見られる。特にボイラの伝熱面へのスケールの付着は、伝熱阻害を引き起こし、ボイラの熱効率の低下を生じさせるため、燃料費の増加にもつながる。このため、ボイラでは、腐食疲労の防止に加えて、スケール付着の防止も求められる。

[0005] 従来、腐食を抑制する技術やスケール付着を抑制する技術については、それぞれ報告がなされていた。

[0006] 例えば、腐食の抑制には、下記（1）～（3）などが対策として挙げられ

る。

(1) ボイラの蒸気発生部内の水（以降、ボイラ水）のpHを管理基準値の上限に保持する。

(2) 脱酸素剤の濃度を管理基準値の高めに保持する。

(3) 缶底ブローは運転終了直後ではなく起動直前に行い高濃度の酸素の混入や低pH化を抑制する。

[0007] スケールの抑制には、下記(1)～(3)などが対策として挙げられる。

(1) ボイラ給水の逆浸透膜処理又は軟化処理を行う。

(2) スケールの生成を抑制するためにスケール分散剤や清缶剤を添加する（例えば特許文献1，2）。

(3) スケール成分の排除のためのボイラ水のブロー管理を行う。

先行技術文献

特許文献

[0008] 特許文献1：特開2017-74550号公報

特許文献2：特開2017-12991号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0009] ボイラの蒸発管の腐食疲労は、従来の腐食抑制方法では十分に抑制できない場合があった。

[0010] 本発明者が腐食疲労の原因を探求した結果、蒸発管のような伝熱負荷が高い部位にスケールが付着すると、蒸発管の管壁温度が上昇し、ボイラの起動及び停止に応じて蒸発管が伸縮する結果、応力が大きくなって腐食疲労によって蒸発管が破裂して、水漏れに到る場合が多いことがわかった。このことから、本発明者は、ボイラの蒸発管の腐食疲労は、腐食環境だけでなく、スケールの存在も大きく関連していることを見出した。

[0011] 本発明は、腐食環境やスケールの存在による繰り返しの応力が関連したボイラにおける蒸発管の腐食疲労を効果的に抑制する方法を提供することを目

的とする。

課題を解決するための手段

[0012] 本発明者は、ボイラ水の溶存酸素濃度を低減することによって、腐食が十分に抑制され、蒸発管の腐食疲労を効果的に抑制できることを見出した。また、本発明者らは、さらにボイラ水にイオン交換水を用いることや、ボイラ水にスケール分散剤を存在させてスケール付着をより抑制することによって、蒸発管の腐食疲労をより一層抑制できることを見出した。

[0013] 本発明は以下を要旨とする。

[0014] [1] ボイラの蒸発管の腐食疲労を抑制する方法において、該ボイラ水の溶存酸素濃度を 1.0 mg/L 以下に管理する、ボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法。

[0015] [2] 前記ボイラ水にイオン交換水を用いる、[1] に記載のボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法。

[0016] [3] 前記ボイラ水にスケール分散剤を存在させる、[1] 又は [2] に記載のボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法。

[0017] [4] 前記スケール分散剤が、重量平均分子量 $20,000 \sim 170,000$ のポリアクリル酸及びその塩、並びに、重量平均分子量 $1,000 \sim 100,000$ のポリメタクリル酸及びその塩からなる群より選ばれる少なくとも一種のポリ(メタ)アクリル酸化合物である、[3] に記載のボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法。

[0018] [5] 前記ボイラ水における前記スケール分散剤の濃度が $1 \sim 1,000 \text{ mg/L}$ である、[3] 又は [4] に記載のボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法。

[0019] [6] 前記ボイラが小型貫流ボイラである、[1] ないし [5] のいずれかに記載のボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法。

発明の効果

[0020] 本発明によれば、腐食環境やスケールの存在による繰り返しの応力によるボイラの蒸発管の腐食疲労を効果的に抑制して、ボイラ寿命の延長を図るこ

とができる。

図面の簡単な説明

[0021] [図1]図1は、試験例Ⅰ，Ⅱにおける試験対象ボイラ水系のフローを示す概略図である。

発明を実施するための形態

[0022] 以下に本発明の実施の形態を詳細に説明する。

[0023] 本実施形態に係るボイラにおける蒸発管の腐食疲労の抑制方法は、該ボイラ水、即ちボイラの蒸気発生部内の水の溶存酸素濃度を 1.0 mg/L 以下に管理することを特徴とする。

[0024] ボイラ水の溶存酸素濃度を低く抑える方法は、脱気装置による脱気処理、脱酸素剤などの薬品添加による方法のいずれでもよい。起動時のように温度が低い場合は、薬品による方法では脱酸素効果が十分に発揮され難いので、膜式脱気装置等の脱気装置の使用が望ましい。

[0025] ボイラ水の溶存酸素濃度が 1.0 mg/L を超えると蒸発管における腐食が発生し易くなり、腐食疲労に至り易い。本実施形態において、ボイラ水の溶存酸素濃度は低い程、蒸発管の腐食疲労抑制効果に優れることから、ボイラ水の溶存酸素濃度は 0.5 mg/L 以下に管理することが好ましく、 0.1 mg/L 以下に管理することがより好ましい。

[0026] ボイラ水の溶存酸素濃度は、例えば、ボイラ給水の溶存酸素濃度を、上記方法を用いて上記ボイラ水の溶存酸素濃度の上限以下に調整することで管理すればよい。

[0027] 本実施形態においては、上記のようにボイラ水の溶存酸素濃度を抑えた上で、ボイラ水にスケール分散剤を存在させて蒸発管におけるスケール付着を抑制したり、ボイラ水に腐食性の塩類が除去されたイオン交換水を用いて腐食疲労の起点となる腐食を抑制したりすることで、より一層効果的に腐食疲労を抑制することができる。

[0028] イオン交換水は、原水をイオン交換装置で脱塩処理することで製造できる。イオン交換水は、例えば、補給水としてボイラ給水系（給水ライン）の給

水タンクに供給してもよい。

- [0029] スケール分散剤は、水系システムに持ち込まれた硬度成分のスケール化を抑制したり、既に付着したスケールを除去したりするものである。スケール分散剤としては、リン酸三ナトリウムやトリポリリン酸ナトリウムなどのリン酸塩、ポリアクリル酸／又はその塩、ポリメタクリル酸及び／又はその塩、アクリル酸と2-アクリルアミド-2-メチルプロパンスルホン酸との共重合物及び／又はその塩などのポリマーが挙げられる。スケール分散剤は、好ましくは重量平均分子量が20,000～170,000のポリアクリル酸及び／又はその塩、重量平均分子量が1,000～100,000のポリメタクリル酸及び／又はその塩などのポリ（メタ）アクリル酸化合物である。ポリアクリル酸及び／又はその塩の重量平均分子量は、20,000を超え170,000以下がより好ましく、50,000万を超え120,000以下がさらに好ましい。ポリメタクリル酸及び／又はその塩の重量平均分子量は、1,000を超え100,000以下がより好ましく、5,000を超え80,000以下がさらに好ましい。
- [0030] これらのスケール分散剤は1種を単独で用いても、2種以上を併用してもよい。
- [0031] スケール分散剤を用いる場合、スケール分散剤は、ボイラ水に含まれていればよく、スケール分散剤を添加する場所は特に制限されない。スケール分散剤は、ボイラの給水系（給水ライン）、補給水系（補給水ライン）、ボイラ水、復水系（復水ライン）を含むボイラ水系の少なくとも一箇所に添加すればよい。スケール分散剤は、例えば、ボイラ給水配管、給水タンク、補給水配管、補給水タンク、復水配管、復水タンクのいずれに添加してもよく、これらの2ヶ所以上で添加してもよい。
- [0032] ボイラ水系にスケール分散剤を添加する場合、その添加量には特に制限はなく、ボイラ給水の水質（溶存酸素濃度、腐食性塩類濃度）、ボイラの運転条件によるスケール化傾向等によっても異なる。薬品コストを抑えた上で、十分なスケール抑制効果を得る観点から、例えばポリマー系のスケール分散

剤であれば、ボイラ給水中の濃度で $1 \sim 1,000 \text{ mg/L}$ 、特に $10 \sim 500 \text{ mg/L}$ となるような量で添加することが好ましい。

- [0033] ボイラ水にイオン交換水を用いる場合、イオン交換水の水質としては、電気伝導率で 1 mS/m 以下、特に 0.5 mS/m 以下、とりわけ 0.1 mS/m 以下であることが好ましい。電気伝導率が上記上限以下となるように塩類が除去されたものであれば、蒸発管における腐食をより一層確実に抑制して腐食疲労の抑制効果を高めることができる。
- [0034] ボイラ水系では、スケール抑制のために、ボイラ給水に、原水を軟化器で軟化処理した軟水が用いられる場合がある。しかし、軟化処理だけでは、カチオン成分が除去されるのみで、腐食性塩類を除去することはできず、蒸発管の腐食疲労の抑制効果は十分ではない。
- [0035] 本実施形態では、ボイラ給水の溶存酸素濃度の管理に加えて、原水を軟化処理した軟水をボイラ給水に用いてもよい。この場合、蒸発管の腐食疲労がより抑制され易い。
- [0036] 本発明が適用されるボイラは、特に制限されないが、蒸発管の腐食疲労が生じ易い観点から、蒸気圧が 4 MPa 以下のボイラが好適であり、蒸気圧が 2 MPa 以下である低圧ボイラがより好適である。低圧ボイラの代表的なものとして小型貫流ボイラが挙げられる。小型貫流ボイラの蒸気圧は、例えば 1 MPa 以下である。
- [0037] 小型貫流ボイラの種類には、丸型缶体と角型缶体がある。丸型缶体とは、中央部に燃焼室を備え、上部にバーナーを配置している缶体である。角型缶体とは、燃焼室が無く、水管側面に隣接してガスバーナーを配置している缶体である。
- [0038] 丸型缶体よりも角型缶体の方が蒸発管の腐食疲労がより発生し易い。本発明によれば、ボイラ水の溶存酸素濃度を管理することにより、更にはスケール分散剤を用いること及び／又はボイラ水にイオン交換水を用いることにより、角型の小型貫流ボイラであっても蒸発管の腐食疲労を十分に抑制することができる。

- [0039] 角型缶体で腐食疲労がより発生し易い理由は、角型缶体は、丸型缶体よりも構造上、熱負荷が不均一になるため、蒸発管の伸展が起きやすく、腐食を起点とした、腐食疲労がより発生し易いためと考えられる。

実施例

- [0040] 以下に、実験例、実施例及び比較例を挙げる。
- [0041] 以下において、塩化物イオン、硫酸イオン、シリカ濃度は、「J I S B 8 2 2 4 ボイラの給水及びボイラ水試験方法」に則って予め分析した。
- [0042] [実験例 1]

腐食疲労試験によって溶存酸素が腐食疲労に及ぼす影響を評価した。

まず用いた試験片での破断条件を求めるため、以下の準備を行った。

材質 S T B 3 4 0 の試験片を円弧状疲労試験用に加工した。具体的には、平行部と R 部（円弧部）とを有する形状に加工し、平行部及び R 部を # 8 0 0 研磨した。

この試験片を使用して大気中における引張試験を実施したところ、弾性域最大荷重に対応する応力は 2 2 0 M P a と求められた。この値を腐食疲労試験の最大応力として設定した。

- [0043] 次に、上記試験片を腐食疲労試験装置の軸に設置し、試験片が浸漬されるように固定されたビーカー内に試験液 1 L を注ぎ、試験片が完全に浸されるようにした。

試験液はイオン交換水に、特級試薬の塩化物ナトリウム、硫酸ナトリウム及び、4 8 % 苛性ソーダ、3 号ケイ酸ナトリウムを用いて、下記試験液組成及び p H となるように調整した。試験液の温度は 8 5 ° C に調整した。

- [0044] 次に、ビーカー内の溶存酸素濃度が表 1 に示される値となるように、酸素ガス又は窒素ガスを連続的にビーカー内へ供給し、循環ライン上に設置した溶存酸素計を見ながら溶存酸素濃度が一定になるようにガスの供給量をコントロールした。

溶存酸素濃度が一定になったら、試験時間 9 6 時間を目標に最大応力を 2 2 0 M P a に設定し、腐食疲労試験装置にて試験を実施した。

試験条件は以下の通りである。

[0045] <腐食疲労試験の条件>

試験片：STB340より作製した円弧状疲労試験片（ASTM E46
6－96参考）

試験片の前処理：平行部及びR部を＃800仕上げ

制御：荷重制御

波形：正弦波

最大応力：220MPa

周波数：4.0Hz

試験期間：最大96時間

試験液温度：85℃

試験液組成：塩化物イオン＝100mg/L

硫酸イオン＝100mg/L

シリカ＝100mg/L

試験液pH：11.0

試験液量：1L

[0046] <結果>

結果を表1に示す。

[0047] [表1]

試験No.	溶存酸素濃度 (mg/L)	引張回数 (万回)	試験片の 破断の有無	備考
1	8.0	68	有り	比較例
2	1.0	103	有り	本発明例
3	0.5	121	有り	
4	0.1	140	無し	

[0048] <考察>

表1より次のことが分かる。

溶存酸素濃度が低くなるにしたがって、試験片が破断に至るまでの引張回

数が上がり、溶存酸素濃度が 1.0 mg/L 以下では、試験片が破断し難いことが確認された。特に溶存酸素濃度が 0.1 mg/L 以下では破断が発生しないことが確認された。これは溶存酸素濃度が低くなるに従い、試験片の表面での腐食が発生し難くなる、あるいは微小亀裂内での腐食の進行が抑制されることによると推定された。

[0049] 引張回数結果から、溶存酸素濃度 1.0 mg/L では、溶存酸素濃度 8.0 mg/L の場合の 1.5 倍、溶存酸素濃度 0.1 mg/L では溶存酸素濃度 8.0 mg/L の場合の 2.0 倍以上の腐食疲労抑制効果が確認された。

[0050] [試験例 I]

＜実施例 I-1～6、比較例 I-1～4＞

図 1 に示すボイラ水系において、ボイラ給水の溶存酸素濃度及びスケール分散剤の添加の有無と蒸発管の腐食疲労の状況との相関を調べた。

[0051] このボイラ水系では、原水を軟化器 1 で処理した軟水が、給水タンク 2 を経由し脱気器 3 で脱気される。脱気器 3 が無い場合は、平均水温 25°C で溶存酸素濃度 8.0 mg/L であった。溶存酸素濃度は脱気器 3 の出口直後で測定した。スケール分散剤、及び苛性系の pH 調整剤をボイラ 4 の手前の給水ラインに注入した。

[0052] このボイラ水系では、溶存酸素濃度の管理を行わない場合、運転開始から 5 年以内に腐食疲労で蒸発管に亀裂が発生し、漏えいする事故が起きていた。

[0053] 対象ボイラの仕様は以下の通りである。

対象ボイラ：小型貫流ボイラ

蒸発量： $1.0 \sim 2.0 \text{ t/h}$

運転圧力： 1.0 MPa 以下

給水種類：軟水（電気伝導率： $1 \sim 50 \text{ mS/m}$ ）

ボイラ水水質：pH= $11.0 \sim 11.8$

塩化物イオン= $100 \sim 400 \text{ mg/L}$

硫酸イオン= $100 \sim 400 \text{ mg/L}$

シリカ = 100 ~ 700 mg / L

電気伝導率 = 100 ~ 400 mS / m

スケール分散剤：下記のポリアクリル酸ナトリウム (PANa)、ポリメタクリル酸ナトリウム (PMNa) 又はトリポリリン酸ナトリウム (TPPNa) を使用した。添加量はボイラ水中でポリマーは純分として 30 mg / L、トリポリリン酸ナトリウムはリン酸イオンとして 30 mg / L とした。

PANa (4,000)：重量平均分子量 4,000 のポリアクリル酸ナトリウム

PANa (10,000)：重量平均分子量 10,000 のポリアクリル酸ナトリウム

PANa (60,000)：重量平均分子量 60,000 のポリアクリル酸ナトリウム

PMNa (10,000)：重量平均分子量 10,000 のポリメタクリル酸ナトリウム

TPPNa：トリポリリン酸ナトリウム

調査対象のボイラ缶数：1, 519 缶

[0054] 実施例 1-1 ~ 6 では脱気器 3 で、ボイラ給水を表 2 に示す溶存酸素濃度となるように脱気処理した。比較例 1-1 ~ 4 では、脱気器 3 を通さず、溶存酸素濃度 8.0 mg / L のボイラ給水で行った。

実施例 1-1, 2 及び比較例 1-1 ではスケール分散剤を添加しなかった。実施例 1-3 ~ 6 及び比較例 1-2 ~ 4 では、表 2 に示すスケール分散剤を添加した。

[0055] <結果>

運転期間は 5 年間とした。5 年間の運転期間内の蒸発管の亀裂発生数と亀裂発生割合とを調べた。結果を表 2 に示す。

[0056]

[表2]

	溶存酸素濃度 (mg/L)	スケール分散剤 の添加の有無	亀裂発生 有りの 缶数	亀裂発生 無しの 缶数	亀裂発生 割合 (%)
比較例 I-1	8.0	無し	67	226	22.9
比較例 I-2	8.0	PANa (4,000)添加	21	111	15.9
比較例 I-3	8.0	PANa (10,000)添加	17	124	12.1
比較例 I-4	8.0	PANa (60,000)添加	14	119	10.5
実施例 I-1	1.0	無し	13	132	8.9
実施例 I-2	0.1	無し	9	155	5.5
実施例 I-3	1.0	TPPNa添加	4	125	3.1
実施例 I-4	1.0	PANa (4,000)添加	3	106	2.8
実施例 I-5	1.0	PANa (10,000)添加	1	120	0.8
実施例 I-6	1.0	PMNa(10,000)添加	1	151	0.7

[0057] <考察>

表2より次のことが分かる。

腐食疲労の発生（亀裂発生）は、給水の溶存酸素濃度が高く、さらにスケール分散剤が使用されない場合（比較例 I-1）が最も多かった。

[0058] スケール分散剤の添加が無い場合では、溶存酸素濃度が1.0 mg/Lと低い実施例 I-1 は、溶存酸素濃度が8.0 mg/Lと高い比較例 I-1 に比べて、腐食が抑制されたことで、引張応力が増加し難く、腐食疲労の発生が抑制されたと推測される。溶存酸素濃度が0.1 mg/Lでスケール分散剤の添加が無い実施例 I-2 はさらに腐食が抑制され、腐食疲労の発生が抑制されたと推測される。

[0059] 溶存酸素濃度が1.0 mg/L以下でスケール分散剤を使用した実施例 I-3～6 では、スケール付着がほとんど無く、亀裂の発生は少なかった。これはスケール付着による引張応力がより低く抑えられたことと、溶存酸素濃度が低いことで腐食による疲労の発生、伸展がより一層起き難い環境であったためと推測された。

[0060] 以上より、蒸発管の腐食疲労の発生を抑制するには、蒸発管の腐食を抑えるだけでなく、スケール付着の発生も抑えることでより一層の効果が見出されることが確認された。

[0061] スケール分散剤の種類のみ異なり、その他は同一条件の実施例Ⅰ－３～Ⅰ－６から、スケール分散剤としては、重量平均分子量２万を超え１７万以下のポリアクリル酸及び／又はその塩、重量平均分子量１千を超え１０万以下のポリメタクリル酸及び／又はその塩が腐食疲労抑制効果に優れることが分かる。

[0062] [試験例Ⅱ]

＜実施例Ⅱ－１～４、比較例Ⅱ－１，２＞

図１に示すボイラ水系（ただし、一部において、軟水器の代りに適宜イオン交換装置を用い、給水タンクに軟水又はイオン交換水を供給した。）において、ボイラ給水の溶存酸素、及びスケール分散剤の添加の有無、及びイオン交換処理の有無と蒸発管の腐食疲労の状況との相関を調べた。

[0063] このボイラ水系のフローは試験例Ⅰにおけるものと同様であるが、下記仕様の運転条件とすることで、溶存酸素濃度の管理を行わない場合は、運転開始から３年以内に蒸発管が腐食疲労で亀裂が発生し漏えいする事故が起きていた。

[0064] 対象ボイラの仕様は以下の通りである。

対象ボイラ：小型貫流ボイラ

蒸発量：１．０～２．０ｔ／ｈ

運転圧力：１．０ＭＰａ以下

給水種類：軟水又はイオン交換水

ボイラ水水質：

＜軟水の場合＞

pH＝１１．０～１１．８

塩化物イオン＝１５０～４００ｍｇ／Ｌ

硫酸イオン＝１５０～４００ｍｇ／Ｌ

シリカ = 150 ~ 700 mg / L

電気伝導率 = 150 ~ 400 mS / m

＜イオン交換水の場合＞

pH = 11.0 ~ 11.8

塩化物イオン = 1 ~ 10 mg / L

硫酸イオン = 1 ~ 10 mg / L

シリカ = 1 ~ 50 mg / L

電気伝導率 = 20 ~ 400 mS / m

スケール分散剤：重量平均分子量60,000のポリアクリル酸ナトリウム（PANa(60,000)）を使用し、添加量はボイラ水中でポリアクリル酸ナトリウム純分として20 mg / Lとした。

調査対象のボイラ缶数：258缶

[0065] 実施例II-1～4では脱気器3で、ボイラ給水を表3に示す溶存酸素濃度となるように脱気処理した。比較例II-1, 2では、脱気器3を通さず、溶存酸素濃度8.0 mg / Lのボイラ給水で行った。

比較例II-1, 2及び実施例II-1では軟化器3で軟化処理した軟水を用いた。実施例II-2～4では軟化器の代りにイオン交換装置を用い、電気伝導率約1 mS / mのイオン交換水を用いた。

実施例II-2及び比較例II-1ではスケール分散剤を添加しなかった。実施例II-1, 3, 4及び比較例II-2では、表3に示すスケール分散剤を添加した。

[0066] ＜結果＞

運転期間は3年間とした。3年間の運転期間内の蒸発管の亀裂発生数と亀裂発生割合とを調べた。結果を表3に示す。

[0067]

[表3]

	給水の種類	溶存酸素濃度 (mg/L)	スケール分散剤 の添加の有無	亀裂発生 有りの 缶数	亀裂発生 無しの 缶数	亀裂発生 割合 (%)
比較例Ⅱ-1	軟水	8.0	無し	15	41	26.8
比較例Ⅱ-2	軟水	8.0	有り	9	57	13.6
実施例Ⅱ-1	軟水	1.0	有り	7	71	9.0
実施例Ⅱ-2	イオン交換水	1.0	無し	0	13	0
実施例Ⅱ-3	イオン交換水	1.0	有り	0	29	0
実施例Ⅱ-4	イオン交換水	0.1	有り	0	16	0

[0068] <考察>

表3より次のことが分かる。

軟水の場合、腐食疲労による亀裂の発生が確認されたが、イオン交換水で溶存酸素濃度が1.0mg/L以下の場合、スケール分散剤の有無によらず腐食疲労の発生は確認されなかった。

これは、イオン交換水は腐食性を持つ塩類（塩化物イオンや硫酸イオン）の濃度が低いことで、起点となる腐食が発生し難く、また、疲労の伸展が起き難い環境であったためと推測された。

[0069] 以上より、蒸発管の腐食疲労の発生を抑制する上で、溶存酸素濃度を低く抑えることに加え、イオン交換水を用いることでさらに効果が上がることが確認された。

[0070] 本発明を特定の態様を用いて詳細に説明したが、本発明の意図と範囲を離れることなく様々な変更が可能であることは当業者に明らかである。

本出願は、2020年3月12日付で出願された日本特許出願2020-043294に基づいており、その全体が引用により援用される。

符号の説明

- [0071] 1 イオン交換装置又は軟化器
 2 給水タンク
 3 脱気器

4 ボイラ