

熱交換器にスケールの固着が生じる源泉からの熱回収

白土 博康, 藤澤 拓己, 保科 秀夫

Heat Recovery from a Hot Spring where Scale can Easily Stick to a Palisaded Heat Exchanger Combined with Plastic Pipes

Hiroyasu SHIRATO, Takumi FUJISAWA, Hideo HOSHINA

抄 録

樹脂製熱交換器を用い、熱交換器にスケールを固着させる源泉から熱回収し、給湯を予熱するシステムを導入した。熱交換器の熱交換量は、熱交換器に固着したスケール厚みに相関があると考えられ、定期的な除去が必要であることが明らかになった。スケール除去方法として、濃塩酸1時間浸漬、排水を数回繰り返して、スケールを溶解処理する手法を確立した。給湯エネルギーに対する熱交換システムの日別の寄与率は概ね40%以上であり、省エネルギー性の高いシステムとなった。

キーワード：樹脂製熱交換器、温泉熱、熱交換量、スケール、濃塩酸処理

報告する。

1. はじめに

北海道は積雪寒冷地であり、全国と比較してその給湯、暖房負荷が大きく、熱エネルギーを効率的に利用することは非常に重要である。特に、現在未利用なエネルギーを活用することができれば、環境に対する負荷を大きく軽減することが可能となる。

この未利用エネルギーの一つとして温泉施設の源泉や排湯熱がある。本研究は、温泉水を熱交換するにあたって、強酸性の温泉水でも腐食せず、付着物質を容易に洗浄可能な樹脂製柵状浸漬形熱交換器（以下、樹脂製熱交換器）を開発するとともに、温泉、浴場施設の源泉または排湯熱を回収する熱交換システムについて提案し、施設の省エネルギー化、経営改善に貢献することを目的としている¹⁻⁶⁾。汚れを有する排湯を用いた熱回収については、既に実用化しており、既報^{2-4,6)}で報告済みである。現在その次の取組として、本樹脂製熱交換器のさらなる活用を目指して、特に熱回収が困難と考えられる熱交換器にスケールを固着させる源泉からの熱回収を試みている。本報では、システムの概要や熱交換器へのスケール固着、熱交換器の熱交換量・熱通過率に対するスケール固着の影響、スケール除去方法、システムの熱交換量について

2. 熱回収する源泉の概要

実験フィールドは自治体が管理するA温泉施設とした。当該温泉の源泉は海水の1.3倍の塩分濃度である国内でも珍しい泉質であり、源泉の温度は約60℃、揚水量は180L/min程度である。この源泉を入浴に適した温度とするために、熱交換器を用いて、温度を低下させるとともにその熱を回収して給湯・暖房に利用する手法が考えられるが、本源泉中に含まれる豊富な二酸化炭素とカルシウムイオンが結晶化し、炭酸カルシウムの堆積物（以下スケールと呼ぶ）となって熱交換器表面に厚く析出する課題がある（図1）。一般的に使用されるプレート熱交換器（図2）はプレート同士を圧着して使用するので、熱回収の際に頻りに流路の閉塞を引き起こすことから、これまで熱回収は行われていなかった。そのため、浴用に利用するために、樋での空冷や、差し水等により、源泉水を冷却、調温していた。



図1 配管・温泉槽の壁へ固着したスケールの外観

事業名：短期実用化研究開発

課題名：温泉施設における樹脂製熱交換器を用いた給湯予熱システムの施工と評価、評価と維持管理

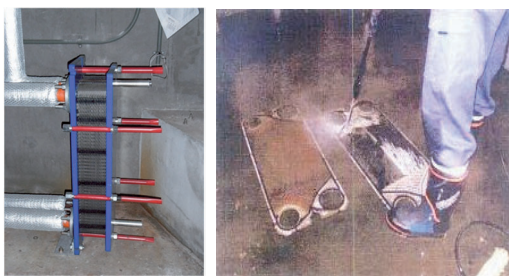


図2 プレート熱交換器の外観（左）と
プレートの解体洗浄の様子

3. 熱交換システムの概要

3.1 システムの概要

図3に新たに導入した熱交換システムの模式図を示す。熱交換器を利用して源泉を冷却するとともに、その熱を井水の予熱に活用して給湯に用いるシステムである。

一般に温泉の源泉は、エアを含んでいることも多く、源泉汲み上げ用ポンプの空回りを防ぐことが必要である。また、汲み上げシステムの凍結を防止する必要もあり、源泉は浴場の営業時間外でも汲み上げられている。本施設では熱交換器への大量のスケールの固着と熱交換器の腐食防止の観点から、これまで報告した樹脂製熱交換器を採用している。給湯需要がない時でも、樹脂製熱交換器、金属製のプレート熱交換器（以下プレート熱交換器と呼ぶ）、及びそれらを繋ぐ配管内部の熱媒（不凍液）と、蓄熱槽、プレート熱交換器、及びそれらを繋ぐ配管内部の熱媒（井水）を常時循環させ、蓄熱槽に蓄熱するシステム（間接熱交換型）³⁾を採用した。給湯需要があると井水が蓄熱槽、貯湯槽を経て、浴場で使用される。井水は貯湯槽でバックアップボイラーにより60℃以上に加温される。

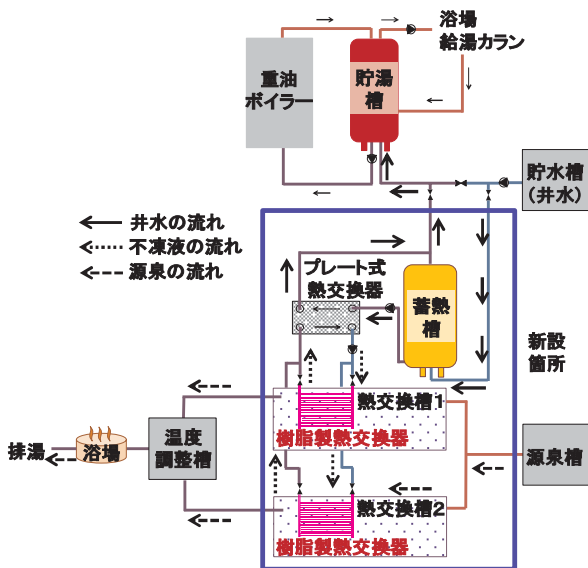


図3 熱交換システムの模式図

3.2 導入した樹脂製柵状熱交換器

図4に導入した樹脂製熱交換器の概要図を示す。熱交換器の材質はポリプロピレンである。φ27 mmの上下のヘッダ管に20mmピッチで孔を開け、そこにφ13mmの細管を50本熱融着させ、柵状のユニットとした。これを9枚または8枚上部のヘッダ管（連通管と呼ぶ）で連結したものを組み合わせ、合計17枚配置した構造とした。源泉を2つに分岐した2つの槽のそれぞれにこの熱交換器を一つずつ導入した。

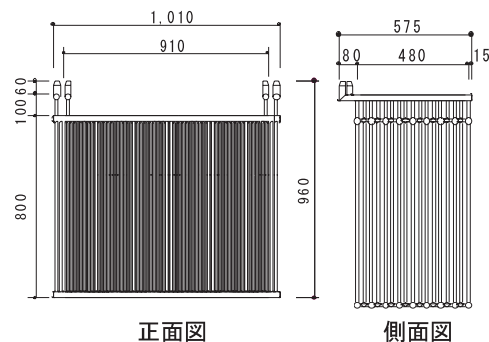


図4 樹脂製熱交換器の概要図

3.3 熱交換槽、熱交換器の設置

図5に熱交換槽に熱交換器を導入した状況を、図6に熱交換槽に源泉を導入した状況を示す。熱交換槽として内寸2,510×680×1,160（高さ）mmのFRP製水槽を2つ作製し、その中に図4の熱交換器を一つずつ導入した。樹脂製熱交換器とプレート熱交換器間の配管、蓄熱槽とプレート熱交換器間の配管は塩化ビニル管で接続し、塩化ビニル管と樹脂製熱交換器はテーパネジ留めとしており、継手も含めて熱交換器はすべて樹脂製である。本施設では2018年度当初から試験的に熱交換を行い、11月6日に熱交換器を新設して本格的に運用した。

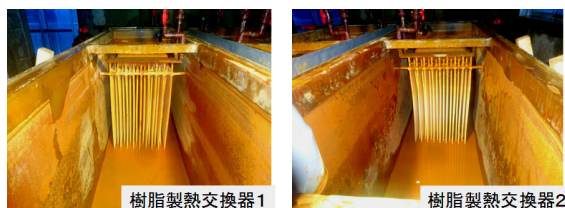


図5 熱交換槽に熱交換器を導入した状況
（導入1ヶ月後）

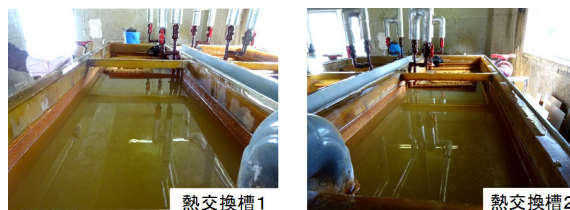


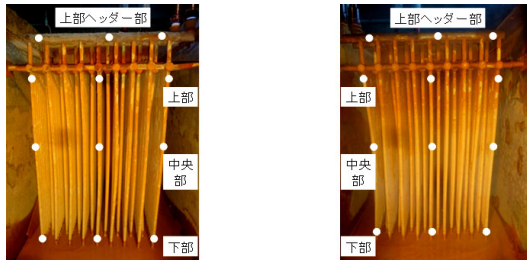
図6 熱交換槽に源泉を導入した状況

4. 源泉熱利用給湯予熱システムの導入評価

4.1 評価方法

4.1.1 熱交換器へのスケールの固着

樹脂製熱交換器へのスケールの固着については、2～5週間毎に熱交換器の源泉槽側の側面部のヘッダ管、細管の厚みをノギスで測定することにより、スケール厚みの経時変化を求めた。計測箇所を図7に示す(白丸印)。



樹脂製熱交換器1 樹脂製熱交換器2
図7 スケール厚みの計測箇所

4.1.2 熱交換器の熱交換量、熱通過率

表1に樹脂製熱交換器の熱交換量、熱通過率に関する測定の概要を示す。測定間隔は1分とした。樹脂製熱交換器の熱交換量、熱通過率はそれぞれ式(1), (2), (3)で求めた。

$$q_{ex} = C_{p_{anti}} \times \rho_{anti} \times f_{anti} \times (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

$$q_{ex} = K \times A \times \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta T = (\Delta T_{inlet} - \Delta T_{outlet}) / \ln (\Delta T_{inlet} / \Delta T_{outlet}) \quad (3)$$

4.1.3 熱交換温度、熱交換システムの熱交換量

表2にプレート熱交換器の一次側出入口不凍液温度、二次側出入口水温、熱交換システムの熱交換量に関する測定の概要を示す。測定間隔は1分とした。また、時間別の熱交換システムの熱交換量 $q_{hour\ system}$ を(4)式で定義して評価した。

$$q_{hour\ system} = \sum_{n=1}^{60} \{ C_{p_w} \times \rho_w \times f_{w\ system} \times (T_{w\ system} - T_{w\ tank}) \} / 60 \quad (4)$$

表1 樹脂製熱交換器の熱交換量、熱通過率に関する測定の概要

測定箇所	測定器
樹脂製熱交換器入口不凍液温度	シースT熱電対
樹脂製熱交換器出口不凍液温度	シースT熱電対
樹脂製熱交換器-金属製プレート熱交換器間の不凍液の循環流量	超音波流量計
熱交換槽入口源泉温度	シースT熱電対
熱交換槽出口源泉温度	シースT熱電対

表2 プレート熱交換器出入口不凍液・水温度、熱交換システムの熱交換量に関する測定の概要

測定箇所	測定器
プレート熱交換器一次側入口不凍液温度	シースT熱電対
プレート熱交換器一次側出口不凍液温度	シースT熱電対
プレート熱交換器二次側入口水温	シースT熱電対
プレート熱交換器二次側出口水温	シースT熱電対
源泉温度(熱交換槽入口、出口)	シースT熱電対
貯水槽の井水水温	シースT熱電対
貯水槽から熱交換され蓄熱槽を経て貯湯槽へ導入される井水水温	シースT熱電対
貯水槽から蓄熱槽を経て貯湯槽へ導入される井水の通水流量	電磁流量計

4.1.4 日別の熱交換システムの熱交換量、寄与率

表3に日別の熱交換システムの熱交換量、寄与率に関する測定の概要を示す(表2と重複する箇所あり)。測定間隔は1分とした。蓄熱槽から熱交換され貯湯槽へ導入される井水、浴場へ導入される給湯水の日別の平均温度をそれぞれ $T_{day\ ave\ w\ tank}$, $T_{day\ ave\ w\ system}$ として(5), (5)'式で定義して評価した。また、日別の熱交換システムの熱交換量 $Q_{day\ sum\ system}$ 、ボイラーによる日別の熱供給量 $Q_{day\ sum\ boiler}$ をそれぞれ(6), (6)'式で、日別の施設の給湯熱供給量 $Q_{day\ sum\ hot\ water}$ を(7)式で、施設の給湯熱供給量に対する熱交換システムの寄与率を(8)式で定義して評価した。

$$T_{day\ ave\ w\ tank} = \sum_{n=1}^{1440} (f_{w\ system} \times T_{w\ tank}) / \sum_{n=1}^{1440} f_{w\ system} \quad (5)$$

$$T_{day\ ave\ w\ system} = \sum_{n=1}^{1440} (f_{w\ system} \times T_{w\ system}) / \sum_{n=1}^{1440} f_{w\ system} \quad (5)'$$

$$Q_{day\ sum\ system} = \sum_{n=1}^{1440} \{ C_{p_w} \times \rho_w \times f_{w\ system} \times (T_{w\ system} - T_{w\ tank}) \times 60 / 1000 \} \quad (6)$$

$$Q_{day\ sum\ boiler} = \sum_{n=1}^{1440} \{ C_{p_w} \times \rho_w \times f_{w\ boiler} \times (T_{w\ boiler\ outlet} - T_{w\ boiler\ inlet}) \times 60 / 1000 \} \quad (6)'$$

$$Q_{day\ sum\ hot\ water} = Q_{day\ sum\ system} + Q_{day\ sum\ boiler} \quad (7)$$

$$\text{熱交換システムの寄与率[\%]} = Q_{day\ sum\ system} / Q_{day\ sum\ hot\ water} \times 100 \quad (8)$$

表3 日別の熱交換システムの熱交換量、寄与率に関する測定の概要

測定箇所	測定器
貯水槽の井水水温	シースT熱電対
貯水槽から熱交換され蓄熱槽を経て貯湯槽へ導入される井水水温	シースT熱電対
貯水槽から蓄熱槽を経て貯湯槽へ導入される井水の通水流量	電磁流量計
ボイラーから出湯される、またはボイラーに戻る井水水温	シースT熱電対
ボイラーで加温される井水の循環流量	超音波流量計
浴場へ導入される給湯水温	シースT熱電対

4.2 評価結果と考察

4.2.1 熱交換器へのスケールの固着

図8に熱交換器を新設した11月6日以降の熱交換器に固着したスケール厚みを示す。樹脂製熱交換器1,2ともに上部ヘッダ部、上部細管部には時間経過とともに厚いスケールが固着する傾向にあるが、中央部、下部ではスケールは薄い。本熱交換器を導入した他の施設では熱交換槽の下部に温泉水を吹き出し、熱交換後上部から排出する構造としている(図

9)が、本施設では熱交換槽に源泉を導入する配管にもスケールが厚く固着する傾向にあるため、脱着を容易とするように熱交換槽の上部へ吹き出す構造としている(図10)。このため、源泉流れが上部中心になっていると考えられる。なお、スケール厚みが前回の測定時よりもやや低下する場合もあるが、熱交換槽から源泉を抜き、スケール厚みを測定する際に、熱交換器表面が冷却され、スケールの一部が剥がれることが原因と考えられる。

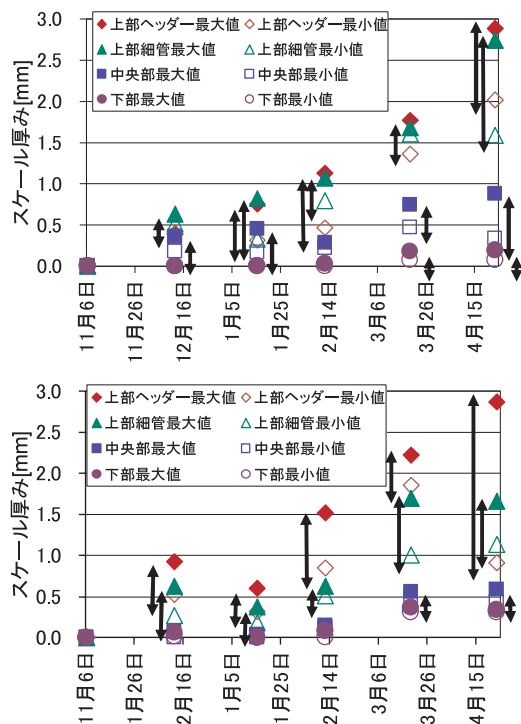


図8 スケール厚みの経時変化
(上：樹脂製熱交換器1, 下：樹脂製熱交換器2)

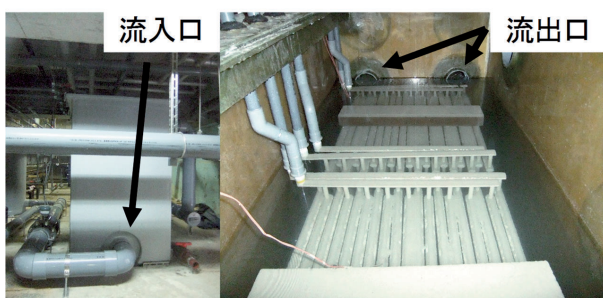


図9 他の温泉施設における温泉水の熱交換槽への流入・熱交換槽からの流出



図10 本施設における温泉水の熱交換槽への流入

4.2.2 熱交換器の熱交換量, 熱通過率

図11に樹脂製熱交換器1の11月6日以降の熱交換量を、図12に熱通過率を代表して示す。それぞれ分かりやすいように1日の平均値で示した。また、4月23日にスケール除去を行い、後述するように完全にスケール除去できたことから、図11、図12では5月末までのデータを掲載した。1日平均の熱交換量, 熱通過率は3月中旬から大きく低下傾向にある。その原因は図8との比較から、熱交換器に固着したスケール厚みの相違にあると考えられる。本熱交換器の熱通過率は3月中旬以前においても、基礎データ取得時(65~73W/m・K)⁴⁻⁶⁾と比較してやや低い、4.2.1項で記載したように源泉流れの影響があると推察される。

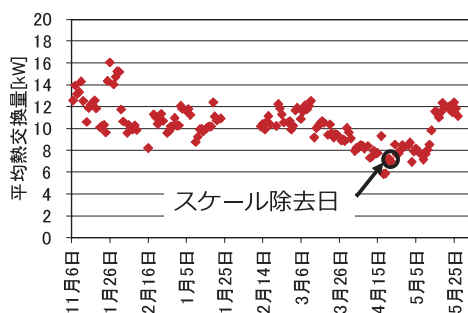


図11 樹脂製熱交換器1の一日平均の熱交換量

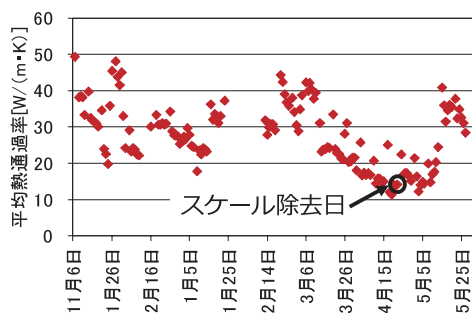


図12 樹脂製熱交換器1の一日平均の熱通過率

4.2.3 熱交換温度, 熱交換システムの熱交換量

図13に例として12月23日におけるプレート熱交換器の一次側出入口不凍液温度, 二次側出入口水温, 熱交換槽出入口源泉温度を、図14に貯水槽の井水, 蓄熱槽で熱交換され貯湯槽へ導入される井水水温, 熱交換システムの熱交換量を示す。給湯需要がない4時頃までは、プレート熱交換器一次側, 二次側ともに温度が上昇した。プレート熱交換器二次側入口には蓄熱槽の下部からの水が循環・流入していることから、蓄熱槽の水は4時頃までに47℃程度まで昇温された。5時過ぎに大きな給湯需要があると蓄熱槽下部の温度が下がり、プレート熱交換器二次側温度が大きく低下した。それとともにプレート熱交換器周りの他の温度は低下した。浴場の営業時間である10時から21時にかけては、プレート熱交換器二次側温度入口・出口温度から、蓄熱槽下部の水が35~36℃まで加温され

ていた。営業時間後は給湯需要がないことから、再びプレート熱交換器一次側、二次側ともに温度が上昇し、蓄熱槽内の水の温度が回復(加温)されるのが確認できた。貯湯槽導入温度は、6時までは高いが、それ以降は蓄熱槽内の水温が低下するのに伴い、徐々に低下した。営業時間内(10:00~21:00)は熱交換量と給湯需要がバランスされ、33~36℃程度となっていた。時間別の熱交換量は大きく変動しているが、給湯需要が大きく変動することが主な理由と考えられる。この日の1日の平均の熱交換量は28kW、2400MJ/日の熱を源泉から取得できた。

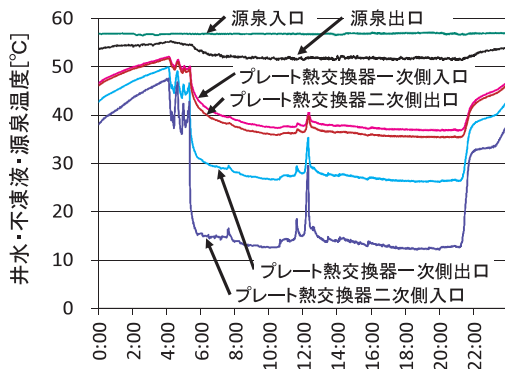


図13 代表日における各温度

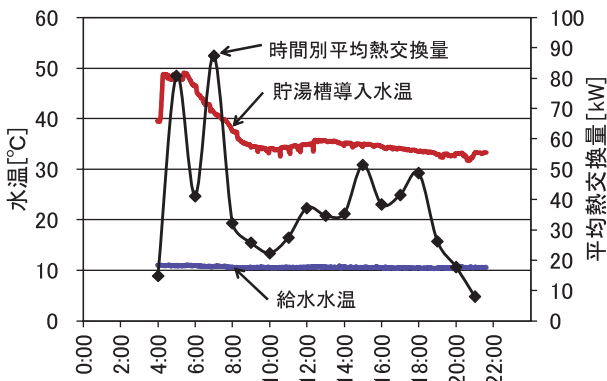


図14 代表日の井水水温、熱交換システムの熱交換量

4.2.4 日別の熱交換システムの熱交換量、寄与率

図15に日別の給湯量(ここでは、貯水槽から熱交換され貯湯槽へ導入される井水の量を指す)、日平均の各水温(貯水槽井水水温、貯水槽から熱交換され貯湯槽へ導入される井水水温、ボイラーからの出湯水温)を、図16に日別の熱交換システムの熱交換量、施設の給湯熱供給量に対する熱交換システムの寄与率を示す。いずれも施設の工事等でシステムが通常運転していない12月11日から18日までを除いている。貯水槽から熱交換され貯湯槽へ導入される井水水温は、休館日である火曜日に40℃以上となり、水曜日以降温度が低下して再び火曜日に回復する。この原因は蓄熱槽の容量が設置スペースの関係で小さく、夜中に蓄熱した熱量が日中に枯渇し、回復していないことが原因と考えられる。また、3月中旬以降、図11の平均熱交換量の低下に伴い、貯湯槽へ導入される井水

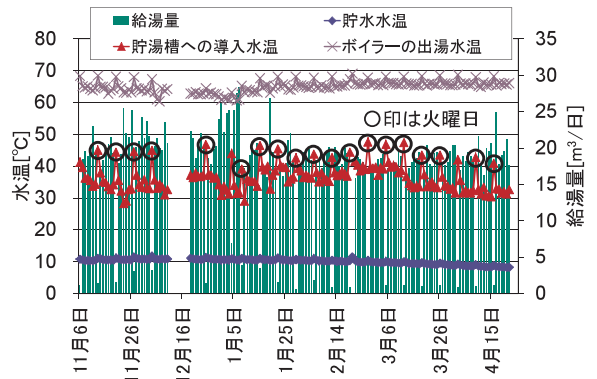


図15 日別の給湯量、日平均の各水温

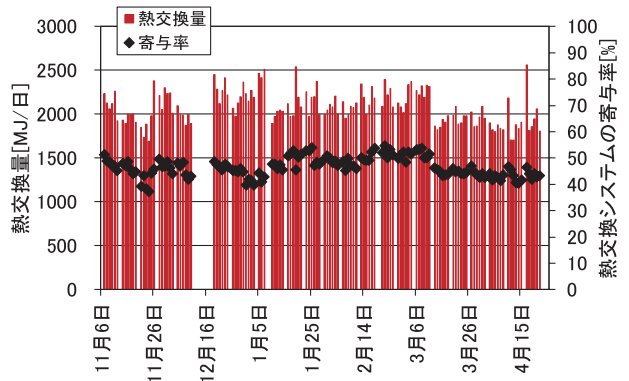


図16 日別の熱交換システムの熱交換量、寄与率

水温の低下が見られた。施設の給湯熱供給量に対する熱交換システムの寄与率は、多くの日で40%を超え、50%以上の日も見られるなど省エネルギー性の高いシステムとなった。

5. 熱交換器に固着したスケールの溶解処理

熱交換器に固着したスケールを除去する方法を種々検討した結果、20 vol% の濃塩酸に最大1時間浸漬し(図17)、排水することを数回繰り返す手法を確立し、スケール除去マニュアルにまとめた。図18に4月23日に実施した(5ヶ月半使用)濃塩酸処理前後の樹脂製熱交換器1の写真を示す。処理を数回繰り返す理由は、濃塩酸浸漬直後は反応速度が速いことが、大量の二酸化炭素の発生により確認できるが、時間経過とともにその発生量は低下し、反応速度が遅くなることによる。



図17 濃塩酸に浸漬した熱交換器



図18 濃塩酸水によるスケールの溶解

(左：濃塩酸水処理前(5ヶ月半使用)，右：処理後)

以降，図11の平均熱交換量の低下程度を鑑み，本施設では半年に1回濃塩酸処理を行うこととした。

6. おわりに

樹脂製熱交換器を用い，熱交換器にスケールを固着させる源泉からの熱回収，給湯を予熱するシステムを導入した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 熱交換器の熱交換量は，熱交換器に固着したスケール厚みに相関があると考えられ，定期的な除去が必要である。
- (2) 濃塩酸1時間浸漬，排水を数回繰り返して，スケールを溶解処理する手法を確立した。
- (3) 給湯における熱交換システムの日別の寄与率は概ね40%以上であり，省エネルギー性の高いシステムとなった。

参考文献

- 1) 白土博康他：空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，vol.2, pp.141-144, (2014)
- 2) 白土博康他：空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，vol.2, pp.157-160, (2015)
- 3) 白土博康他：空気調和・衛生工学会学術講演会論文集，vol.2, pp.233-236, (2016)
- 4) 白土博康他：北海道立総合研究機構工業試験場報告，vol.315, pp.43-56, (2016)
- 5) 白土博康他：空気調和・衛生工学会論文集，vol.2, pp.21-31, (2016)
- 6) Hiroyasu Shirato et al.: Proceedings of GRAND RENEWABLE ENERGY2018, O-He-3-1,(2018)

記号

q	：(瞬時の)熱交換量	[kW]
q_{ex}	：樹脂熱交換器の熱交換量	[kW]
$q_{hour\ system}$	：時間別の熱交換システムの熱交換量	[kW]
C_p	：熱媒の比熱	[kJ/(g・K)]
ρ	：熱媒の密度	[kg/L]
f	：熱媒の循環または通水流量	[L/s]

T	：温度	[K]
K	：樹脂製熱交換器の熱通過率	[W/(m ² ・K)]
A	：樹脂製熱交換器の内表面積	[m ²]
ΔT	：対数温度差	[K]
n	：時間	[min]
Q	：日別の熱交換量	[MJ/日]
Q_{system}	：日別の熱交換システムの熱交換量	[MJ/日]
Q_{boiler}	：日別のボイラーによる熱供給量	[MJ/日]
$Q_{hot\ water}$	：日別の施設の給湯熱供給量	[MJ/日]

添え字

ex	：樹脂製熱交換器
anti	：不凍液
out	：樹脂製熱交換器から流出する不凍液
in	：樹脂製熱交換器へ流入する不凍液
inlet	：熱交換槽へ流入する源泉と樹脂製熱交換器へ流入する不凍液
outlet	：熱交換槽から流出する源泉と樹脂製熱交換器から流出する不凍液
hour	：1時間平均
system	：熱交換システム(給湯予熱システム)
w	：給湯用井水
w tank	：貯水槽内の井水
w system	：貯水槽から熱交換され貯湯槽へ導入される井水
day	：日
ave	：平均
day sum	：日別(積算)
boiler	：ボイラー
hot water	：浴場への給湯水
w boiler	：ボイラーで加温される井水
w boiler outlet	：ボイラーから出湯される井水
w boiler inlet	：ボイラーに戻る井水