

温泉熱回収用プラスチック製柵状熱交換器の開発

白土 博康, 保科 秀夫, 可児 浩
櫻庭 高光*, 井浦 奉昭*, 山田 英和*
鹿糠 幸雄**, 舟木 由衣**
高橋 徹哉***, 鈴木 隆広***, 林 圭一***, 岡 大輔***

Development of a palisaded heat exchanger combined plastic pipes for hot spring heat recovery systems

Hiroyasu SHIRATO, Hideo HOSHINA, Hiroshi KANI
Takamitsu SAKURABA*, Tomoaki IURA*, Hidekazu YAMADA*
Yukio KANUKA**, Yui FUNAKI**
Tetsuya TAKAHASHI***, Takahiro SUZUKI***, Keiichi HAYASHI***, Daisuke OKA***

抄 録

北海道は有数の温泉地であり、未利用の温泉熱を給湯や暖房に有効利用することが期待されている。温泉熱を回収するにあたって、従来の金属製プレート熱交換器を用いた場合、金属部材の腐食や目詰まりが課題であった。本研究は、新たにプラスチック製の柵状浸漬型熱交換器を開発、導入することによりこの課題を解決し、温泉、浴場施設の省エネルギー化、ランニングコストの削減に貢献することを目的としている。まず、20kWの熱交換能力を有するプラスチック製柵状熱交換器の設計・試作とその熱交換能力、圧力損失、構成材料の耐久性の評価を行い、良好な結果を得た。次に、排湯とその熱交換器を用いた給湯予熱システムを施工して、導入評価を行った。その結果、本システムは、省エネルギー性と経済性に優れたシステムであることがわかった。

キーワード：プラスチック製柵状熱交換器，温泉熱回収，排湯，洗浄

Abstract

Unutilized hot spring energy is expected as heat source for hot water supply and heating in Hokkaido because there are a lot of hot springs. However, metal plate heat exchangers cause metal corrosion and clogging when we recover energy from hot springs. This document aims to contribute energy saving and running cost reduction of hot spring facilities by developing and installing a palisaded heat exchangers combined plastic pipes. First of all, we designed and made the exchangers of 20 kW. The heat-exchange capability, pressure loss, durability of the material was evaluated and positive outcome was obtained. In the second, we installed and evaluated a water preheating system using drained hot water and the heat exchangers. As the result, it is showed that energy conservation and economic efficiency of the system is excellent.

KEY-WORDS : Palisaded heat exchanger combined plastic pipes, Hot spring heat recovery, Drained hot water, cleaning

* 株式会社テスク資材販売, * TSC Material Co., Ltd.

** 株式会社エコニクス, ** Econixe Co., Ltd.

*** (地独)北海道立総合研究機構 地質研究所, *** Hokkaido Research Organization, Geological Survey of Hokkaido

事業名：公募型研究

課題名：プラスチック製熱交換器を用いた温泉熱の有効利用に関する研究

1. はじめに

2011年に発生した未曾有の原発事故、化石燃料の枯渇に伴う原油の高騰により、エネルギーのあり方に関心が集まる今日である。札幌市は積雪寒冷地であり、大型施設・戸建て住宅を問わず、その給湯・暖房負荷が大きいことから、熱エネルギーを有効に効率的に利用することは非常に重要である。特に、未利用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になる。

北海道は源泉数2,000以上を誇る温泉地であり、古くは湯治場として、近年は観光産業の担い手として利用されている。温泉地の浴用施設で浴用に用いる温度は43~45℃程度であり、50℃以上の源泉の一部や40℃以下の排湯の熱エネルギーの多くは利用されていないと考えられる。これらの未利用エネルギーを有効利用することにより、多大な一次エネルギー削減効果、二酸化炭素排出削減効果が期待できる。

筆者らは、ポリプロピレンランダム共重合体（以下PPR）を主材料とするプラスチック管を用いた柵状放熱体（以下プラスチック製柵状ラジエータ）に熱源機で作成した冷温水を循環させる冷暖房システムについて研究開発を行い、鋼板製ラジエータの冷暖房能力に匹敵するプラスチック製柵状ラジエータの開発に成功した¹⁻³⁾。本研究は、このプラスチック製柵状ラジエータを技術シーズとして、新たにプラスチック製柵状熱交換器（ここでは、温水と冷水を熱交換する装置なのでラジエータではなく熱交換器と呼ぶ）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、温泉・浴場施設の省エネルギー化・経営改善に貢献する。本報では、まず、提案するシステムの概要と開発した熱交換器の基礎的な熱交換特性、耐久性評価を行った結果について述べる。次に、モデル温泉施設の給湯需要、排湯資源量実測、排湯成分分析結果について述べる。最後にこれらの結果を踏まえて、排湯と熱交換器を用い施工した、給湯予熱システムの導入評価と熱交換器の洗浄方法について述べる。

2. 温泉熱回収システムの概要と開発したプラスチック製柵状熱交換器の熱交換能力

2.1 温泉熱回収システムの概要

温泉施設において、プラスチック製柵状熱交換器は、ヒートポンプの一次側熱源や床暖房の循環回路等で利用可能と考えられるが、既設のヒートポンプや床暖房回路がなければ、大きなインシヤルコストを伴う。このため、本研究では温泉施設の省エネルギー化の第一段階として、既設の給湯回路にバイパス回路で容易に施工・接続が可能な熱回収システムを提案する。図1に提案する熱回収システムの模式図を示す。源泉または排湯を槽に貯め、そこにプラスチック製柵状熱

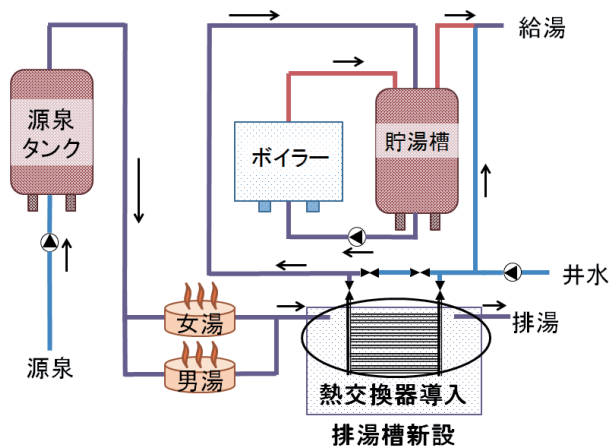


図1 提案する給湯予熱システム

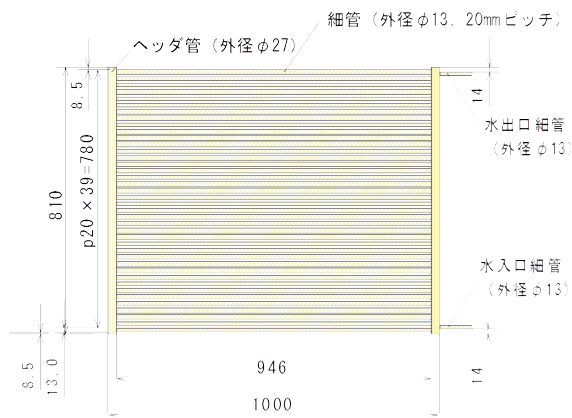


図2 プラスチック製柵状熱交換器の基本構造の模式図と外観

換器を浸漬させる。温泉施設で使用する給湯用の井水・水道水（通常10~15℃程度）をプラスチック製柵状熱交換器に通水して熱交換を行い、最後にバックアップボイラーで加温する。

2.2 温泉熱回収用熱交換器の概要

図2に試作したプラスチック製柵状熱交換器の基本構造の模式図と外観を示す。幅、高さがそれぞれ1000,810mmであり、φ27mmのヘッダー管に20mmピッチで孔を開け、そこにφ13mmの細管を40本熱融着させた構造となっている。

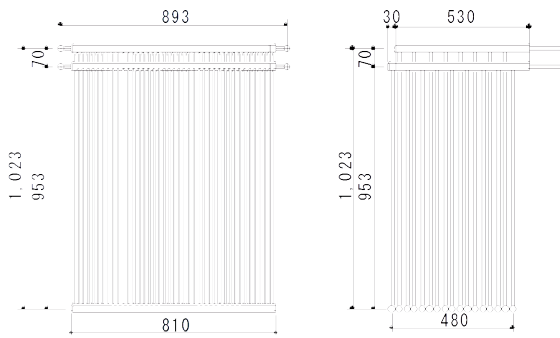


図3 プロトタイプ温泉熱回収用熱交換器の模式図と外観

使用材料は、PPRとした。図3に試作したプロトタイプ温泉熱回収用熱交換器（以下、温泉熱回収用熱交換器とする）の模式図と外観を示す。温泉熱回収用熱交換器は、プラスチック製柵状熱交換器の基本構造を90度回転させ、8枚のユニットと9枚のユニットをヘッダーで連結し、合計17枚配置したものである。上部から水を導入できるため、エア抜きが容易な構造となっている。

2.3 温泉熱回収用熱交換器の評価方法

2.3.1 熱交換能力と圧力損失の評価

図4に評価装置の模式図を示す。FRP槽またはコンクリート槽に井戸から汲み上げた温泉水を貯め、この槽から所定流量、温度で水中ポンプにより水を循環させた。FRP槽には、基本構造のプラスチック製柵状熱交換器、コンクリート槽には温泉熱回収用熱交換器が浸漬されている。次に、温泉・浴場施設で給水することを模擬して、ポリエチレン角形槽に水道水を入れ、電気ヒータ、冷凍機で15℃に制御後、水中ポンプにより基本構造のプラスチック製柵状熱交換器、温泉熱回収用熱交換器に通水、熱交換した後、排水した。表1に実験条件を示す。FRP、コンクリート槽内温度は35℃、50℃、60℃または65℃となるように制御し、その循環流量は50 L/minとした。熱交換器内の水道水の設定流量は基本構造のプラスチック製柵状熱交換器で0.5～6 L/min、温泉熱回収用熱交換器で4.3～51 L/minとした。測定は10秒間隔で行い、熱交換器の能力はほぼ定常状態と考えられる5分間の平均値によ

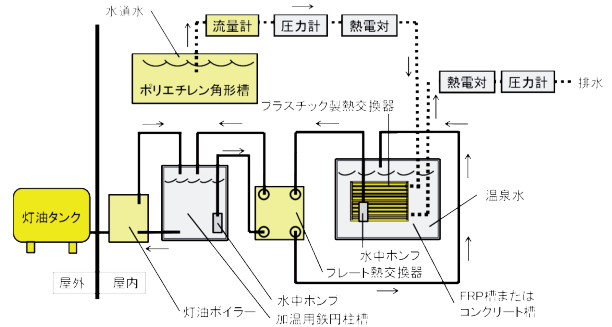


図4 評価装置の模式図

表1 実験条件

熱交換器の種類	熱交換器		FRP槽、コンクリート槽	
	入口温度	流量範囲	槽内温度	循環流量
基本構造のプラスチック製柵状熱交換器	15℃	0.5-10 L/min	35、50、65℃	50 L/min
温泉熱回収用熱交換器	15℃	4.3-51 L/min	35、50、60℃	50 L/min

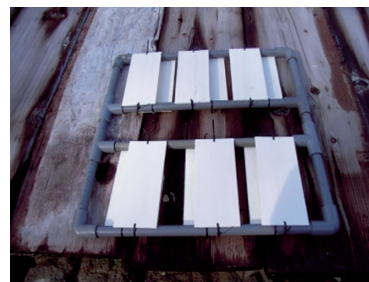


図5 柵に結束した試験片の外観

表2 試験片を浸漬した温泉水の概要

No.	場所	設置日の水温	備考
1	登別温泉	60.2	硫黄泉・強酸性泉
2	壮瞥温泉	72.5	高温泉
3	川湯温泉	58.8	硫黄泉・強酸性泉
4	定山溪温泉	51.5	
5	道総研地質研究所	32.8	

り(1)式で求めた。

$$Q = Cp \times p \times f \times (T_{out} - T_{in}) [W] \quad (1)$$

※ Q : 熱交換能力 [W], Cp : 平均水温に対する水の比熱 [J/(g・°C)],
 p : 平均水温に対する水の密度 [g/mL], f : 水の流量 [mL/s],
 T_{out} : 戻り水温 [°C], T_{in} : 行き水温 [°C]

次に、温泉熱回収用熱交換器について、差圧計を用いて圧力損失を測定した。

2.3.2 耐久性の評価

プラスチック製柵状熱交換器の材料であるPPRペレット材料を押し出し成形し、180℃に加熱したプレス機により50 kgf/cm²で10分程度溶融し、180×75mmの試験片を作成し

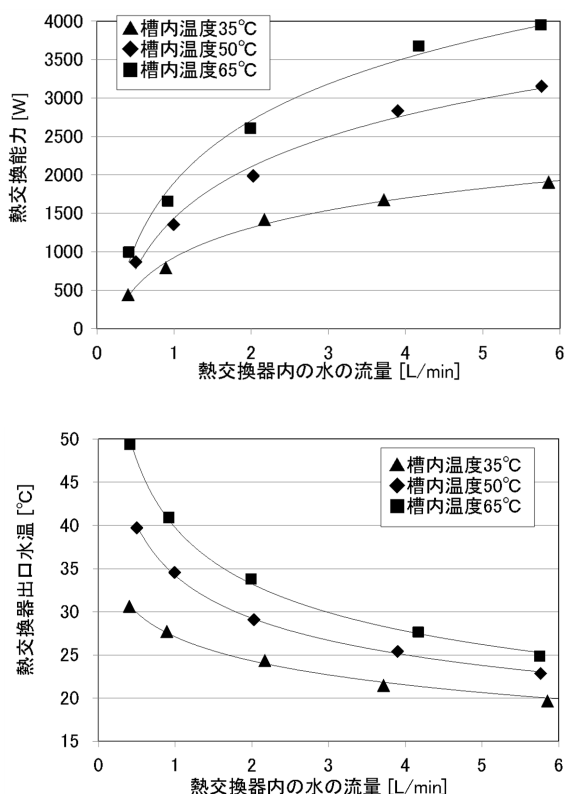


図6 熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力, 出口水温 (基本構造)

た。これをステンレスまたは塩ビ管で作製した柵に結束バンドで固定し、各温泉に浸漬させた。図5に柵に結束した試験片の外観を示す。ここで、熱交換器の細管の厚みを考慮し、試験片厚みは1.5mmとした。表2に試験片を浸漬した温泉水の概要を示す。2週間ごとに4回、合計2ヶ月に渡り、取り出し、引張試験を実施することにより、時系列的な強度変化、耐久性を推察した。なお、本試験では、人の髪、垢、シャンプー、石けんなどの影響は考慮せず、温泉成分の材料への影響について検討するものとしている。

次に、本熱交換器で用いたPPR管についてJIS K6787附属書4 水道用架橋ポリエチレン管の浸出試験方法、JIS S3200-7 水道用器具溶出試験方法に基づき溶出試験を実施した。この試験は、試験管内部に80℃の浸出液を満たして16時間静置後の溶出濃度を測定するものである。

2.4 温泉熱回収用熱交換器の評価結果

2.4.1 熱交換能力

図6に基本構造のプラスチック製柵状熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力、熱交換器出口水温を示す。熱交換器に通水する水の流量が大きくなると熱交換能力が増加し、熱交換器出口水温は低下する。熱交換器内の水の流量が2 L/minであるとき、槽内温度35、50、65℃における熱交換能力(計算値)は1,312、2,105、2,708Wであった。また、そのときの出口水温(計算値)はそれぞれ23.9、29.3、33.2℃であった。

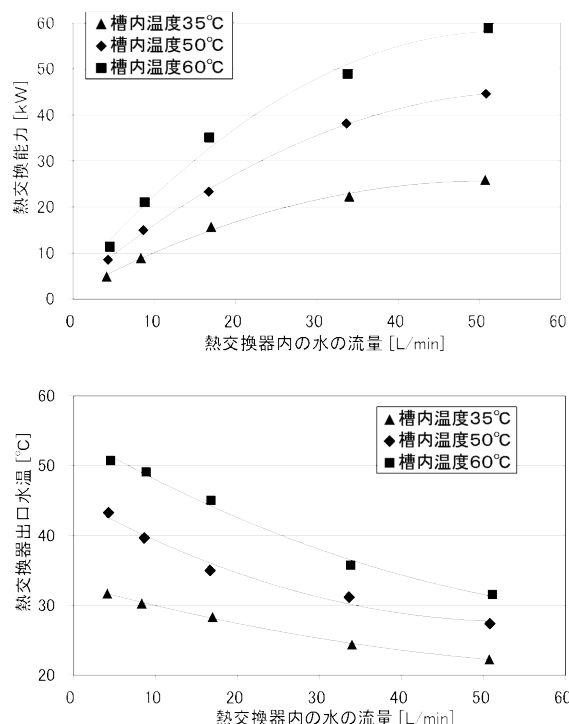


図7 熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力, 出口水温 (温泉熱回収用熱交換器)

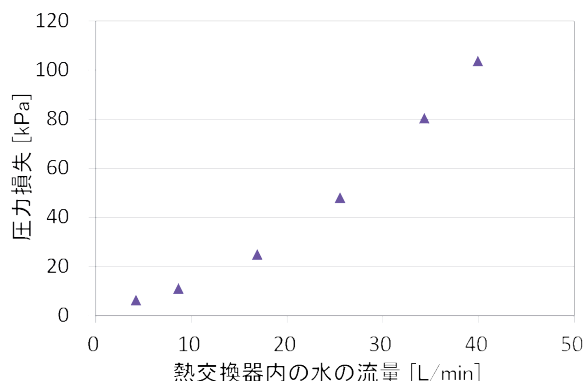


図8 温泉熱回収用熱交換器の通水流量と圧力損失

図7に温泉熱回収用熱交換器における熱交換器内の水の流量に対する熱交換能力、熱交換器出口水温を示す。熱交換器内の水の流量が34L/min(基本構造のプラスチック製柵状熱交換器1枚あたり2L/min)であるとき、槽内温度35,50,60℃における熱交換能力(計算値)は23.0、38.1、51.2kWであった。そのときの出口水温(計算値)はそれぞれ24.6、30.1、36.4℃であった。全体の伝熱面積が基本構造を17倍したものよりも温泉熱回収用熱交換器の方が1.2倍程度大きいため、能力が高くなっていると考えられる。

図8に温泉熱回収用熱交換器の通水流量と圧力損失を示す。スーパー銭湯など大型施設で大きな熱回収量が求められる場合は、ヘッダー方式で並列に連結すると良いと考えられる。

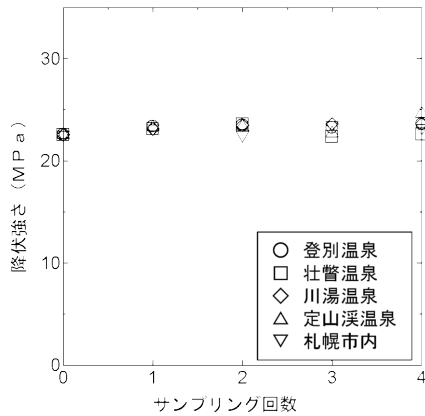


図9 PPR試験片の引張降伏強さ（2週間毎）

表3 PPR管の溶出試験結果

検査項目	結果	判定基準値
色度	<1度	5度以下
濁度	<0.1度	2度以下
味	異常なし	異常でないこと
臭気	異常なし	異常でないこと
有機物(全有機炭素)	<0.3 mg/L	3 mg/L以下

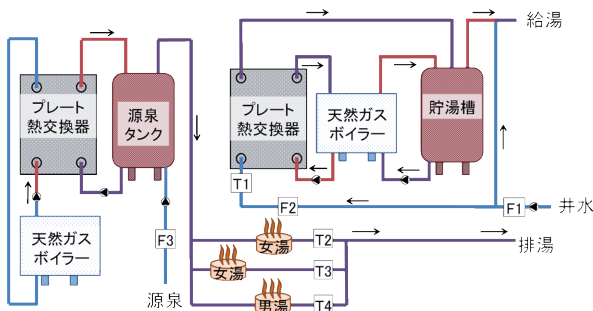


図10 モデル温泉施設の浴用温泉系統、給湯系統の概要

2.4.2 耐久性評価

図9に2週間ごとにサンプリングしたPPR試験片の引張降伏強さを示す。サンプリング回数0回は初期状態を示す。いずれの試験場所においても本試験期間中の引張試験強さの変化は見られなかった。

表3にPPR管の溶出試験結果を示す。これより、規定値を超える溶出は認められなかった。

3. モデル温泉施設におけるエネルギー需要実測・排湯分析

3.1 調査目的

プラスチック製柵状熱交換器は、従来の金属製熱交換器に比べ、低pHなどによる腐食に強いといったメリットがある。しかしながら湯の花やスケールといった熱交換器表面に固着

表4 モデル温泉施設の原湯、排湯の分析項目と分析方法

	分析項目	分析方法
基本性状	水温、pH、電気伝導度	JIS K 0102:測定器観測
	懸濁物質	JIS K 0102:ろ過重量法
汚濁指標	濁度	JIS K 0102:吸光度法(ホルマジン)
	CODMn	JIS K 0102:過マンガン酸カリウムによる酸素消費量
	有機体炭素(TOC)	上水試験法:湿式酸化法
	油分	JIS K 0102:ヘキサン抽出物質
	陰イオン界面活性剤	JIS K 0102:メチレンブルー吸光度法

する成分による熱交換性能への影響については、十分に評価できていない。

このことを踏まえ、本調査では実証実験としてプラスチック製柵状熱交換器の導入を予定したモデル施設(札幌市内のスーパー銭湯)において、給湯流量、給水水温などの実測を行うとともに、排湯成分分析、熱交換器表面付着固形物の観察およびその成分分析を行う。これらは実証試験および熱回収システムの設計に必要な基礎的なデータ収集、およびプラスチック製柵状熱交換器設置後の表面付着物による熱交換能力低下に関する知見を得ることを目的とする。

3.2 調査内容

3.2.1 給湯需要、排湯資源量調査

図10にモデル温泉施設の浴用温泉系統、給湯系統の概要を計測ポイントとともに示す。ここで、Fは流量計、Tは配管内に設置した温度センサを示している。ポンプで源泉から汲み上げられた温泉は源泉タンクに貯留され、天然ガスボイラーによりプレート熱交換器を介して加温される。加温された温泉は、浴場で使用され、排湯系統を経て、公共の下水に排出される。一方、給湯系統は、ポンプで汲み上げた井水が天然ガスボイラーにより、プレート熱交換器を経て予熱され、貯湯槽に導入される。貯湯槽の温水は、天然ガスボイラーとの間で循環され、60℃まで加温維持される。貯湯槽に貯留された温水は、井水と混合され、浴場のシャワー等に使用され、その排水は排湯系統に導入される。

流量および温度の計測ポイントは、井水流量(F1)、貯湯槽への補給水流量(F2)、温泉水流量(F3)、補給水(井水)温度(T1)、排湯温度(T2~T4、女湯用の排湯系統は2つある)とした。

3.2.2 モデル温泉施設の原湯および排湯の性状

表4にモデル温泉施設の原湯および排湯の性状を把握するために行った分析項目とその方法を示す。ここでは、水質の基本性状、浴場での利用前後の汚濁の状況、温泉主要成分の濃度推移を把握することを目的としている。分析は鉱泉分析法指針、日本工業規格、上水試験法などの公定法に従って行った。

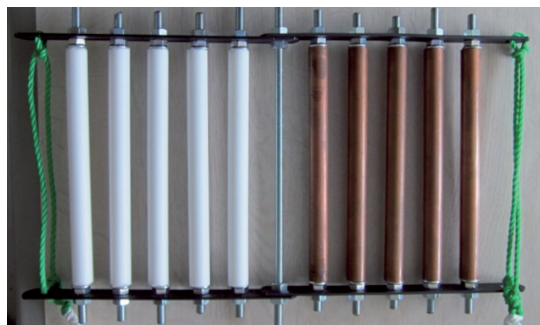


図11 排湯浸漬前のテストピースの外観
(左5ピース；PPR管，右5ピース；銅管)

表5 月別の補給水量と加温前の水温

月	水量[m ³ /日]			平均井水水温 [°C]
	平均	最小	最大	
H25/8	91	68	126	11.2
H25/9	92	67	138	11.1
H25/10	93	71	162	10.9
H25/11	96	68	148	10.9
H25/12	89	73	129	10.9

表6 月別の排湯量，平均排湯水温

月	排湯水量合計[m ³ /日]			平均排水温度 [°C]
	平均	最小	最大	
H25/8	364	327	429	35.7
H25/9	359	308	446	35.4
H25/10	353	310	454	34.8
H25/11	350	286	445	33.9
H25/12	336	308	403	33.6

3.2.3 モデル温泉施設におけるテストピース浸漬試験

排湯が集合する屋外のマンホールに熱交換器材料のテストピースを浸漬し，材料表面に付着する固形物の観察を行った。図11に排湯浸漬前のテストピースの外観を示す。テストピースはプラスチック製柵状熱交換器の材料となるPPR管と比較対象として銅管を用いた。

3.3 調査結果

3.3.1 給湯需要，排湯資源量調査

表5にモデル温泉施設における月別の給湯システムの補給水量と加温前の水温（入口水温）を，表6に月別の排湯量（排湯量は直接測定できなかったため，温泉水，井水の流量の和），平均排湯水温を示す。一日の水量は，休日・平日を平均すると約90m³/日であった。供給水（井水）の入口水温は約11°Cで休日，平日に関係なくほぼ一定であった。排湯量は平均して約350m³/日であり，休日に多くなる傾向がみられた。月ごとの排湯の水温は33～36°C前後で推移している。

表7にモデル温泉施設の原湯および排湯水質分析結果を示

表7 モデル温泉施設の原湯および排湯水質分析結果

種別	単位	源泉	排湯(平日)	排湯(休日)
		H25.8.20(火)	15:40～	H25.9.14(土)
採取日時		15:50～	15:40～	17:20～
水温	°C	41.1	33.1	36.9
pH	—	8.39	8.29	8.37
EC	mS/m	211	105	144
懸濁物質	mg/L	1未満	9	9
油分(ヘキサン抽出物質)	mg/L	1未満	21	2
濁度	mg/L	1未満	17	13
TOC	mg/L	7.3	8.5	7.8
COD	mg/L	29	30	27
陰イオン界面活性剤	mg/L	0.02	0.01	0.05



図12 排湯浸漬4ヶ月後のテストピースの外観
(左5ピース；PPR管，右5ピース；銅管)



図13 テストピースに髪の毛が絡まる様子

す。汚濁指標とした項目については，排湯で濃度上昇が見られたが，軽微なものであった。図12にモデル温泉施設の排湯に浸漬したテストピースの外観を示す。4ヶ月後においても，PPR管，銅管のいずれの材料表面にも若干の水垢が付着している以外，錆び，表面の劣化，スケール等の付着といった変化は認められなかった。ただしテストピース自体には，排湯と一緒に流れてくる髪の毛が絡みつき，数週間程度で図13のような状態となった。また，髪の毛が絡まりネット状になった部分に濁り成分（水あかや皮膚汚れ等）が留まっており，排水の流れを妨げることが観察された。このため，熱交換器設置箇所に髪の毛を留まらせない対策が必要と考えられた。

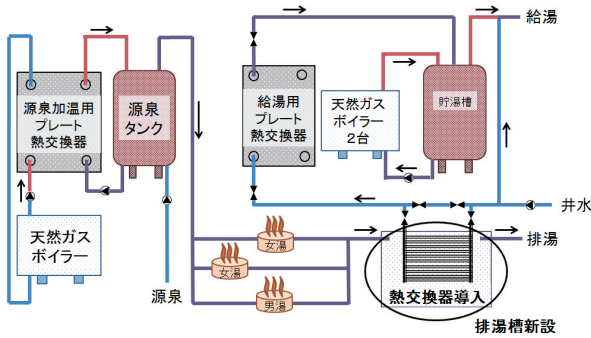


図14 モデル温泉施設の排湯熱を利用した給湯予熱システムの模式図

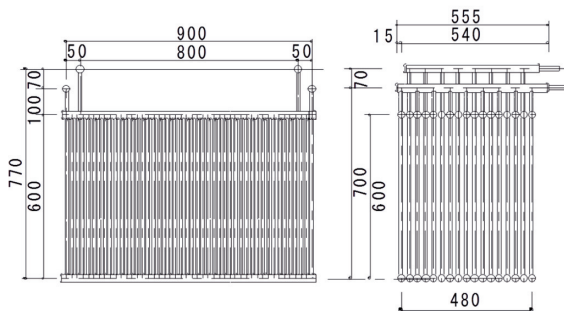


図15 モデル温泉施設に導入した熱交換器の基本構造

4. モデル温泉施設への排湯熱利用給湯予熱システムの施工

4.1 温泉施設の排湯熱利用給湯予熱システム

4.1.1 システムの概要

図14にモデル温泉施設の排湯熱を利用した給湯予熱システムの模式図を示す。本研究では、業務用としてメンテナンスが容易で、かつ現実的な年数で初期投資を回収できることを目指してシステム設計を行った。まず、図10の既設の排湯系統に新たに排湯槽を設け、そこに熱交換器を浸漬させる。次に、既設の給湯系統にバイパス回路を設け、温泉施設で使用する給湯用の井水をプラスチック製柵状熱交換器に通水して熱交換を行い、貯湯槽で貯留する。既設の給湯用熱交換器には通水するが、ボイラーで熱交換しない。貯湯槽の温水は、ボイラーとの循環系統により60℃に加熱されている。

4.1.2 導入熱交換器

図15にモデル温泉施設に導入したプラスチック製柵状熱交換器の基本構造を示す。構造としては図3と同様であるが、排湯系統が地表から深く、縦長の熱交換器を導入すると排湯槽の設置にコストがかかるため、横長の形状とした。

4.1.3 排湯槽、熱交換器、ヘアキャッチャーの設置

図16に施工後の排湯槽周辺および排湯槽内の外観を示す。

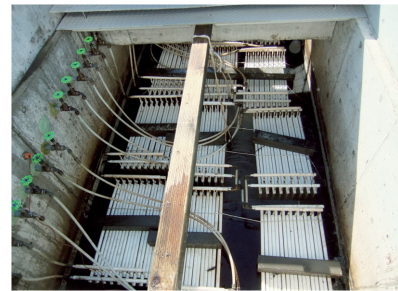


図16 施工後の排湯槽周辺および排湯槽内の外観

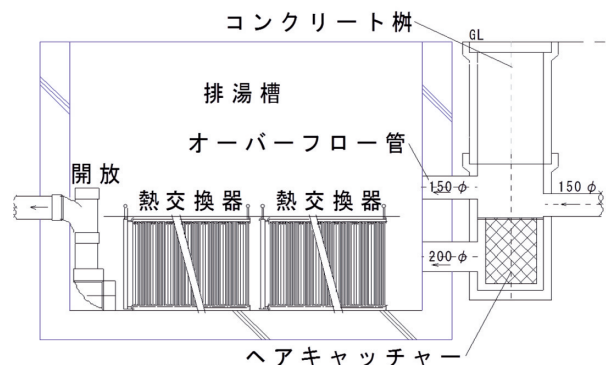


図17 排湯槽の断面図

表8 測定内容の概要

測定内容	測定箇所	測定器
熱交換器の熱交換能力	井水行き温度、熱交換器戻り温度	シースT熱電対
	貯湯槽への井水流量	電磁流量計
排湯資源量	排湯温度(排湯入口、中央、出口)	シースT熱電対
	排湯流量	超音波式流量計

排湯槽は内寸4,600×2,150×1,850(高さ)mmのコンクリート槽を現場打ちし、その中に図15のプラスチック製柵状熱交換器を12個(伝熱面積の合計は図3の6倍)導入した。貯湯槽から熱交換器までは塩ビ管で接続し、排湯槽内は架橋ポリエチレン管で接続した。給湯用の井水は既設のポンプをそのまま使い、全量熱交換器、流量調整弁を経由して貯湯槽へ導入されている。排湯槽内上部は、メンテナンスを考慮し梁を設け、プラスチックの板で覆う構造としている。排湯槽は車両の通らない場所に設置することを標準仕様とした。図17に排湯槽の断面図を示す。排湯槽内へ排湯を導入するコンクリート

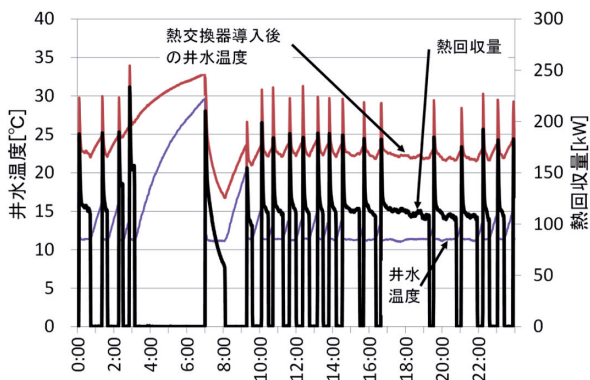


図18 井水行き戻り温度、熱回収量の経時変化（11月9日）

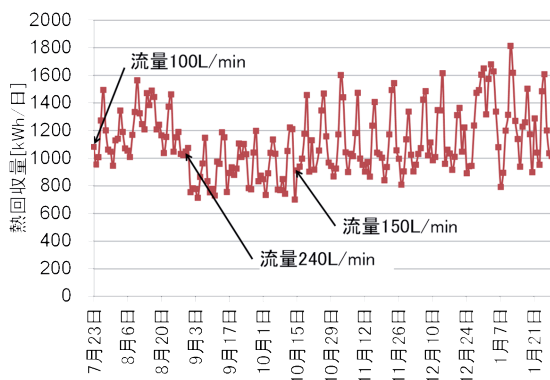


図20 システムの日別の熱回収量

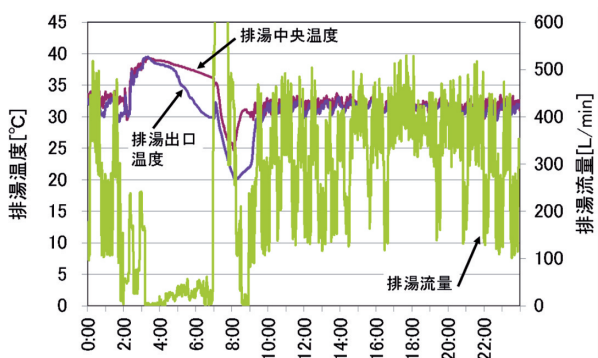


図19 排湯温度、排湯流量の経時変化（11月9日）

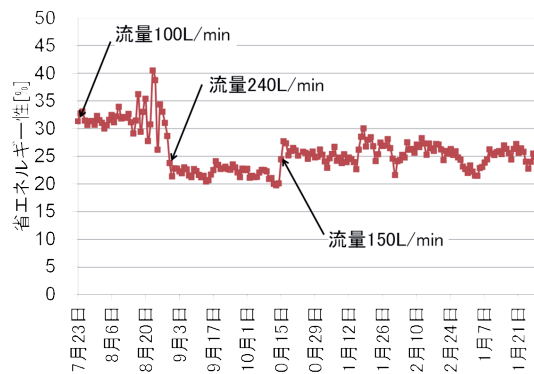


図21 システムの日別の省エネルギー性

ト樹にはゴミ除外用のヘアキャッチャーを設け、懸念される髪の毛等の繊維物や温泉由来の固形物を除去する。

4.2 排湯熱利用給湯予熱システムの導入評価方法

表8に本報告に直接関係する測定内容の概要を示す。測定は機械室内での井水行き温度、熱交換器からの戻り温度、貯湯槽への井水流量計測による熱交換器の熱交換能力、排湯槽内の温度と排湯流量の計測による熱源資源量を確認する目的で実施した。測定間隔は1分とし、7月23日から計測を開始した。なお、熱交換器の熱交換能力は前述の(1)式と同様に求めたが、ここでは12個の熱交換器合計の熱交換能力である。

4.3 評価結果

4.3.1 運転状況

図18に代表日（11月9日）の井水行き戻り温度、熱回収量の経時変化を示す。11°C程度の井水が夕方の連続通水時には22~23°C程度まで加温されている。貯湯槽への給水は水位センサにより制御されており、オンオフ制御で一定流量の予熱後の井水が導入されるため、熱交換後の井水温度は大きく変動せず、熱交換量は連続通水時で100~120kW程度であった。

図19に代表日（11月9日）の排湯温度、排湯流量の経時変化を示す。排湯流量は営業時間内で100~500 L/min程度であり、排湯出口温度は排湯中央温度よりやや低いが、熱交換

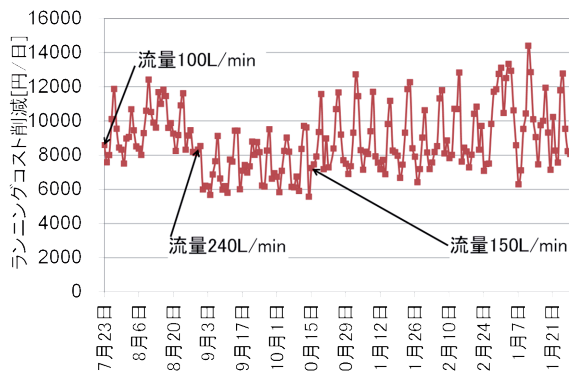


図22 日別のランニングコスト削減状況

されても大きく低下せず、常時30°C以上あり、さらなる熱回収のポテンシャルが認められた。なお、排湯入口、出口温度は排湯槽直前、直後の配管ではなく、排湯槽内で計測しているため、熱交換器による熱回収量と排湯熱の損失は見かけ上一致しない。

4.3.2 システムの熱回収量、省エネルギー性および経済性

図20にシステムの日別の熱回収量を示す。日別の熱回収量は、熱交換器内に通水する流量を変えると井水滞留時間が変わるため変化する。日別の熱回収量は、井水流量を150 L/minに設定後、平均1,169 kWh/日であった。図21にシステ

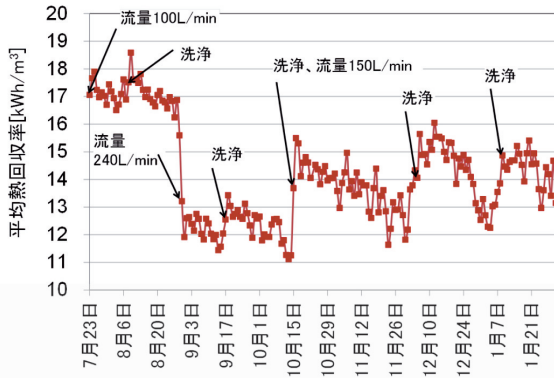


図23 日別の平均熱回収率

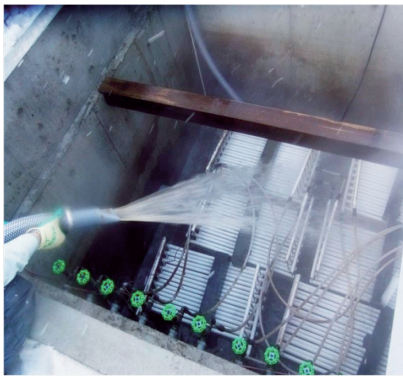


図24 熱交換器の洗浄時の様子

ムの日別の省エネルギー性を示す。ここで、省エネルギー性は(2)式で定義した。

$$\text{省エネルギー性} [\%] = Q/Q' \times 100 \quad (2)$$

※ Q : 熱交換器による熱回収量 [kWh/日], Q' : 井水を貯湯温度まで加温する熱量 [kWh/日]

ここで、施設の貯湯温度は60℃である。省エネルギー性は井水流量を150 L/minに設定後、平均24.6%であった。図22にシステムの日別のランニングコスト削減状況を示す。貯湯槽で使用するボイラーの燃焼効率を85%、熱源である天然ガスの発熱量を44.8MJ/Nm³、天然ガス料金を84円/Nm³とした。1日あたりのランニングコストは、井水流量を150L/minに設定後、平均9,284円削減となった。この結果、2年強程度で投資回収できる経済性に優れたシステムであることがわかった。

4.3.3 熱回収に及ぼす洗浄効果と熱交換器洗浄方法

図23に日別の井水流量に対する熱回収量を平均熱回収率として示す。平均熱回収率は、洗浄により熱交換器表面へ付着した汚れを取り除くと回復することが確認できる。洗浄の頻度はこの施設では1ヶ月に1回程度必要と考えられる。図24にプラスチック製柵状熱交換器の洗浄時の様子を示す。汚水用水中ポンプを用いて、排湯を熱交換器に吹きつけ浮遊物質を取り除くとともに、槽内に滞留した浮遊物質、ヘドロなど

を吸い出し、下流の公共樹へ排出することにより容易に洗浄可能である。このため、プレート熱交換器のような分解洗浄に比べ、メンテナンスが容易である。

5. まとめ

温泉熱を回収するにあたって、従来の金属製プレート熱交換器の課題であった金属部材の腐食や目詰まりを解決するために、プラスチック製柵状熱交換器を開発し、モデル温泉施設に、排湯とその熱交換器を用いた給湯予熱システムを施工して、導入評価を行った。以下に、製作した熱交換器や得られた知見についてまとめる。

- (1) 試作したプラスチック製柵状熱交換器の基本構造は、幅、高さがそれぞれ1000×810mmであり、φ27mmのヘッダー管に20mmピッチで孔を開け、そこにφ13mmの細管を40本熱融着させたものである。使用材料は、PPRとした。試作した温泉熱回収用熱交換器は、基本構造を90度回転させ、8枚のユニットと9枚のユニットをヘッダーで連結し、合計17枚配置したものである。上部から水を導入できるため、エア抜きが容易な構造となっている。
- (2) 温泉熱回収用熱交換器内の水の流量が34L/min（基本構造1枚あたり2L/min）であるとき、槽内温度35,50,60℃における熱交換能力（計算値）は23.0, 38.1, 51.2kWであった。その時の出口水温（計算値）はそれぞれ24.6, 30.1, 36.4℃であった。
- (3) スーパー銭湯など大型施設で大きな熱回収量が求められる場合は、ヘッダー方式で並列に連結するとよいと考えられる。
- (4) プラスチック製柵状熱交換器の耐久性試験用として作製し、各温泉水に浸漬したPPR試験片の引張降伏強さは2ヶ月間で変わらなかった。また、JISによる溶出試験を行った結果、規定値を超える溶出は認められなかった。
- (5) モデル温泉施設における一日の水量は、休日・平日を平均すると約90m³/日であった。供給水（地下水）の入口水温は約11℃で、休日、平日に関係なくほぼ一定であった。排湯量は平均して約350m³/日であり、月ごとの排湯の水温は33～36℃前後で推移していた。
- (6) 原湯および排湯水質を分析した結果、汚濁指標とした項目について排湯で濃度上昇が見られたが、軽微なものであった。モデル温泉施設の排湯に浸漬したテストピースは、4ヶ月後においても、PPR管、銅管のいずれの材料表面にも若干の水垢が付着している以外、錆び、表面の劣化、スケール等の付着といった変化は認められなかった。
- (7) モデル温泉施設への排湯熱利用給湯予熱システムは、まず、既設の排湯系統に新たに排湯槽を設け、そこにプラスチック製柵状熱交換器を浸漬させる。次に、既設の給湯系統にバイパス回路を設け、温泉施設で使用する給湯用の井

水をプラスチック製柵状熱交換器に通水して熱交換を行い、貯湯槽で貯留する。既設の給湯用熱交換器には通水するが、ボイラーで熱交換しない。貯湯槽は、ボイラーとの循環系統により60℃に加温されるシステムとした。

- (8) 導入熱交換器は、排湯系統が地表から深く、縦長の熱交換器を導入すると排湯槽の設置にコストがかかるため、横長の形状とした。排湯槽はコンクリート槽を現場打ちし、熱交換器を12個導入した。排湯槽内へ排湯を導入するコンクリート柵にはゴミ除外用のヘアキャッチャーを設け、懸念される髪の毛等の繊維物や温泉由来の固形物を除去する。
- (9) 11℃程度の井水が夕方の連続通水時にはプラスチック製柵状熱交換器で22～23℃程度まで加温されていることが確認された。熱交換後の井水温度は大きく変動せず、熱交換量は連続通水時で100～120kW程度であった。
- (10) 排湯流量は営業時間内で100～500L/min程度であり、排湯出口温度は排湯中央温度よりやや低いが、熱交換されても大きく低下せず、常時30℃以上あった。
- (11) システムの日別の熱回収量は、井水流量を150L/minに設定後、平均1,169kWh/日であった。また、システムの日別の省エネルギー性は、井水流量を150L/minに設定後、平均24.6%であった。
- (12) 1日あたりのランニングコストは井水流量を150L/minに設定後、平均9,284円削減となった。この結果、2年強程度で投資回収できる経済性に優れたシステムであることがわかった。
- (13) 熱回収に対する洗浄効果を示す指標となる平均熱回収率は、洗浄により熱交換器表面へ付着した汚れを取り除くと回復することが確認できた。汚水用水中ポンプを用いて、排湯を熱交換器に吹きつけ浮遊物質を取り除くとともに、槽内に滞留した浮遊物質、ヘドロなどを吸い出し、下流の公共柵へ排出することにより容易に洗浄可能であることがわかり、熱交換器の洗浄方法を確立した。

謝辞

本研究は、札幌市の25、26年度補助事業「札幌発の環境産業創出事業」により実施いたしました。ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 白土博康ほか：空気調和・衛生工学会論文集，158，(2010-5)，pp.15-21
- 2) 白土博康ほか：空気調和・衛生工学会論文集，164，(2010-11)，pp.49-54
- 3) 白土博康ほか：空気調和・衛生工学会論文集，189，(2012-12)，pp.47-54