

# 中小口径を対象とした高効率の薄肉型下水熱利用システムの開発

三小田 憲 司 原 嶋 寛  
住 吉 栄 作

## Development of High-Efficiency Sewage Heat Utilization System for Medium- and Small-Diameter Sewage Pipes

Kenji Mikoda Hiroshi Harashima  
Eisaku Sumiyoshi

### Abstract

The authors have developed a system for laying a sewage heat collection tube inside a sewage pipe while simultaneously rehabilitating the sewage pipe, using a light curing method. This is a sewage pipe rehabilitation technique for medium- and small-diameter (not more than 900 mm) sewage pipes. First, a test model device comprising a 10-m long pipe is manufactured at a point 1.8 m underground. Furthermore, a quantitative evaluation experiment of the sewage heat collection performance is conducted for a conventional heat collection tube with a wall thickness of 1.5 mm. Next, to improve the heat collection efficiency, a thin-walled heat collection tube with thickness of 1.0 mm is manufactured and installed in parallel to the conventional heat collection tube in the same sewage pipe. Comparative verification experiments of the heat collection performances of both the tubes are conducted, and the improvement effect of the heat collection by the thin-walled sewage collection tube is verified.

### 概 要

近年、下水管の更生工事に併せて採熱管を敷設するシステムが注目を集めている。我が国では900mm以下の中小口径の下水管が90%以上を占めている。筆者らは、市場規模の大きい900mm以下の中小口径を対象とした下水管更生技術である光硬化工法を用いて、下水管の更生と同時に下水採熱管を敷設する高効率の下水熱利用システムの開発を行った。まず、下水管長さ10mのモデル装置を地下1.8m地点に製作した。そして、内径10mm、肉厚1.5mmの従来型の下水採熱性能の定量的な評価実験を行い、245W/mの採熱性能を確認した。次に、採熱効率の向上を図るため、肉厚1.0mmの薄肉型下水採熱管を独自に製作した。そして、従来型下水採熱管とモデル装置の管底に併設して、両者の採熱性能の比較検証実験を行い、薄肉型下水採熱管の採熱性能の向上効果を検証した。その結果、熱回収温度が1.2~1.7°C上昇し、システム成績係数が6.8~10.7%上昇することを確認した。

### 1. はじめに

我が国の下水熱利用可能熱量は1500万世帯分の年間冷暖房熱源に相当する<sup>1)</sup>と言われ、未利用エネルギーとしてポテンシャルは非常に大きい。Fig. 1に首都圏の下水と外気の温度を比較した。都市排熱の下水熱は、冬期の温熱ポテンシャルが大きいのが特徴である。我が国の下水道管路の総延長は47万km(2016年時点)に達しているが、50年以上の老朽化した下水管が今後急増すると予想され、腐食による劣化が懸念されている。そこで、下水管の更生工事に併せて、採熱管を敷設するシステムが近年注目を集めているが、下水熱利用技術の採熱能力に関して、定量的評価を行った事例は、見当たらない。

我が国の下水管は900mm以下の中小口径が90%以上を占めており<sup>2)</sup>、筆者らは、市場規模の大きな900mm以下の口径を対象とした下水管更生技術である光硬化工法を用いて、下水管の更生と同時に下水採熱管を管路に敷設する下水熱利用技術の開発を行っている<sup>3),4)</sup>。Fig. 2に下水熱利用の概念図を示す。下水管底に採熱管を設置し、

マンホール経由で地上のヒートポンプに接続し、建物の暖房・給湯や融雪に利用する技術である。光硬化工法は、既設下水管内にシームレスライナー(耐酸性ガラス繊維と光硬化性の不飽和ポリエステルで構成)を引き込み、空気圧によって拡張して下水管内面に密着させ、紫外線を内側から照射して樹脂を硬化させる形成工法である。

独自技術の開発に先立ち、大林組技研所内(東京都清瀬市)の屋外実験ヤードにおいて、2017年1月に内径300mm、長さ10mの1/2縮小モデル実験装置(以下、実験装置)を地下1.8m地点に製作した。2017年2~3月に下水採熱性能の定量的な評価実験を行い、基本的な下水採熱能力を検証した。次に、下水採熱管材の架橋ポリエチレンは、熱抵抗が大きく、下水から採熱を図るうえで阻害要因となっている。そこで、内径10mm、肉厚1.0mmの薄肉型下水採熱管を独自に製作した。肉厚1.5mmの従来型下水採熱管と肉厚1.0mmの薄肉型下水採熱管を実験装置の管底に併設し、両者の採熱性能について2019年2~3月に比較検証実験を行い、薄肉型下水採熱管の採熱性能の向上効果を検証した。

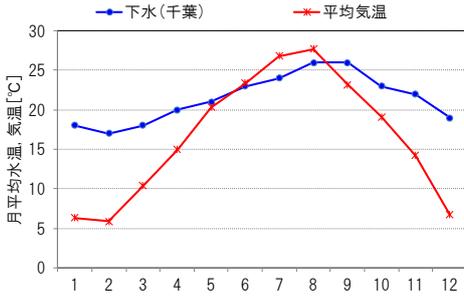


Fig. 1 首都圏の下水と外気の温度比較  
Temperature Comparison between Sewage and Outdoor Air in the Capital Area

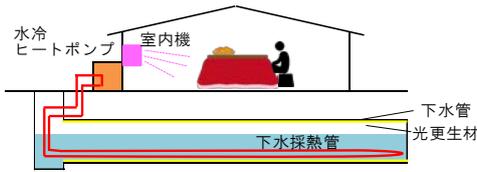


Fig. 2 下水熱利用の概念図  
Sewage Heat Utilization Concept Diagram

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置の概要

Fig. 3に実験装置の断面および測定項目を示す。深さ1.8mの掘削工事を行い、Photo 1(a)の通り内径300mm、長さ10mのヒューム管を勾配3/1000で埋設し、両端にマンホールを設置した。ヒューム管内の底面には、Photo 1(b)の通り内径10mm(厚さ1.5mm)のポリエチレン管を11本敷設した。Fig. 3左側マンホールからエチレングリコール(40%水溶液)を循環させて、Fig. 3右側マンホール手前で折り返し、Fig. 3左側マンホールに戻ってくる形で計22列に敷設した。採熱管の敷設後は、Photo 2(a)に示す厚さ3mmの光更生材を、Photo 2(b)に示す紫外線照射装置を用いて、Photo 3(a)の通り管壁に固着させた。実際の下水管更生工事では、老朽化した下水管に厚さ9mmの光更生材を固着させた後で、下水採熱管を敷設し、更に凸凹で下水を流れる汚物等の流れに障害が生じないように、厚さ3mmの光更生材をその上から固着させている。この実験装置では下水からの採熱性能には影響が無いことから、下水採熱管外側の厚さ9mmの光更生材の固着工事は省略した。Photo 3(b)の通り、下水採熱管流路には開閉弁を設定して、運転する採熱管の列数を変えられるようにした。下水管内の水を一定水温で通過させる熱源として、地上に空気熱源ヒートポンプ(6.7kW、以下ASHPという)を設置し、右側マンホールの底に設置したスパイラルヒーターを暖めて、1°C単位で発停を制御できる温度調節器と連動して、空気熱源ヒートポンプの運転を調節して一定水温に制御した。両端マンホールは、50A地上配管で接続し、循環ポンプで右側マンホールから左側マンホールに水を循環させた。地上には水熱源ヒートポンプ(6kW、以下WSHPという)を設置し、採熱側は下水採熱

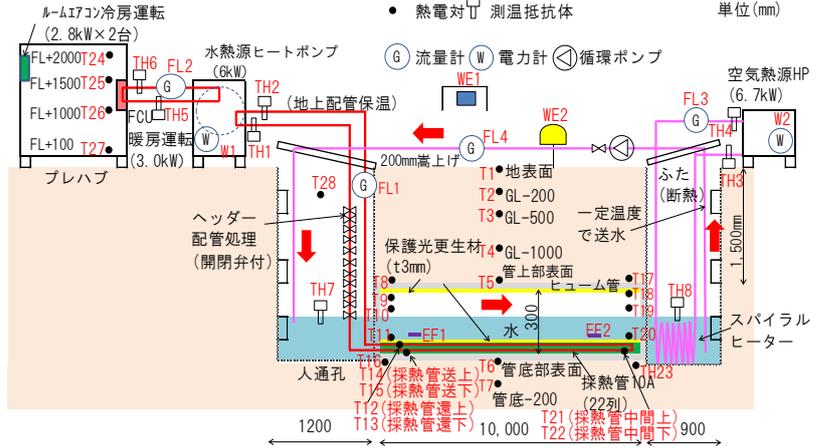


Fig. 3 実験装置断面図及び測定項目  
Experimental Device Section and Measurement Items



(a) 下水管とマンホール (b) 下水採熱管  
Photo 1 下水熱実験装置の設置状況  
Installation Situation of Sewage Heat Experiment Equipment



(a) 光更生材の投入 (b) 紫外線照射作業の様子  
Photo 2 光更生材の設置状況  
Installation Situation of Light Curing Materials



(a) 光更生材の固着 (b) 下水採熱管の開閉弁  
Photo 3 光更生材と採熱管の固定状況  
Fixation Situation of Light Curing Materials and Heat Collection Tube

管と接続し、放熱側はプレハブ室内のファンコイルユニットと接続した。プレハブ室内の暖房負荷確保のため、冷却装置としてルームエアコンを設置した。実験装置は、ヒートポンプ機器配管および計測機器の設置後、土を埋め戻した。

## 2.2 基本採熱性能評価実験での採熱管設置方法

2017年に実施した基本採熱性能評価実験では、下水採熱管は、Fig. 4の通りヒューム管底面に、折り返し方式で11本22列埋設し、その上から厚さ3mmの光更生材を紫外線照射により固着して、下水管内面の凸凹を減らした。下水採熱管の仕様は、内径10mm、肉厚1.5mmの市販のポリエチレン管である。

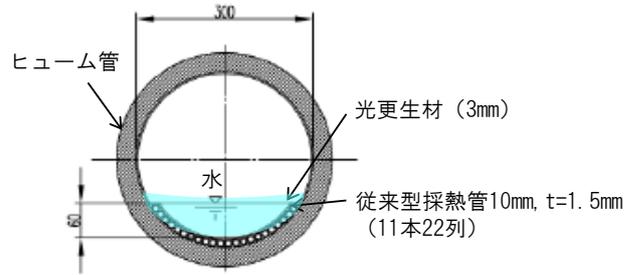


Fig. 4 基本採熱実験時の下水管断面  
Cross Section of Sewage Pipe at Basic Heat Collection Experiment

## 2.3 薄肉型下水採熱管性能評価実験での採熱管設置方法

2019年に実施した薄肉型下水採熱管の性能評価実験では、2017年に設置した下水採熱管と光更生材を切削し、除去した。その後で、新たにFig. 5の通りヒューム管底の左側には、独自に試作した内径10mm(厚さ1.0mm)の薄肉型下水採熱管を折り返し方式で6本12列埋設し、右側には内径10mm(厚さ1.5mm)の従来型採熱管を6本12列埋設した。更にも上から厚さ3mmの光更生材を紫外線照射により固着して、下水管内面の凸凹を減らした。運転する採熱管は、Photo3 (b)の開閉弁を用いて自由に変更できるので、薄肉型採熱管と従来型採熱管を切り替えて、両方の性能比較実験を行った。

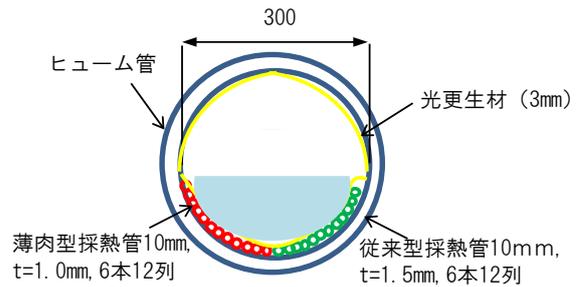


Fig. 5 比較評価実験時の下水管断面  
Cross Section of Sewage Pipe at Evaluation Experiment of High Efficiency Sewage Pipe

## 2.4 計測システム

計測項目と計測方法は、Table 1の通りである。ヒートポンプの行き・還り水温とマンホール内の水温計8点を測温抵抗体で計測し、地盤、下水管、マンホール、プレハブ室内の温度計28点をT型熱電対(1mm)で計測した。下水管内底面の熱流は、地中埋設タイプの熱流板で測定した。ヒートポンプの循環流量は、クランプオン式超音波流量計で計測し、循環ポンプの流量は、電磁流量計で計測した。ヒートポンプの消費電力は、クランプオン式電力量計で計測した。外界気象データについては、外気温湿度と水平面全天日射量を計測した。記録間隔は全て1分間とした。

Table 1 計測項目一覧  
List of Measurement Items

番号	測定項目	計測器
TH1~TH6	ヒートポンプ水温	測温抵抗体
TH7~TH8	マンホール水温	測温抵抗体
EF1~EF2	下水管底面熱流	熱流板(地中埋設用)
T1~T7	地盤温度	T型熱電対(2mm)
T8~T23	下水管・採熱管温度	T型熱電対(2mm)
T24~T27	プレハブ室内温度	T型熱電対(2mm)
T28	マンホール内温度	T型熱電対(2mm)
FL1~FL3	ヒートポンプ流量	超音波流量計
FL4	接続管の循環流量	電磁流量計
W1~W2	消費電力量	電力量計
WE1	外気温湿度	サーミスタ温度湿度計
WE2	水平面全天日射量	全天日射計(2nd Class)

## 3. 従来型採熱性能評価実験

### 3.1 実験条件

Table 2に実験条件を示す。冬期基本実験、流量比較実験、採熱管比較実験の3種類の目的別実験を行った。冬期基本実験は、冬期の下水から採熱能力を把握する目的で実施した。流量比較実験は、下水の流量が下水採熱能力に及ぼす影響を検証する目的で行った。採熱管比較実験は、採熱管の列数の変化が下水採熱能力に及ぼす影響を検証する目的で行った。

Table 2 基本採熱性能評価実験の条件  
The Condition of Basic Heat Collection Performance Evaluation Experiment

種別	日	採熱管 [列]	下水流量 [L/min]	下水 [°C]
冬期基本	2/6~10	22	250	17
流量比較	2/13~24	22	200~340	17
採熱管比較	2/27~3/10	10~18	250	17

### 3.2 実験方法

実験は1日単位で行い、実験は9:30~16:30の7時間/日とした。実験開始時までに空気熱源ヒートポンプを稼働して、下水温度を設定温度まで暖めておいてから実験を開始した。ファンコイルユニットの暖房設定温度は、WSHP運転時のハンチング現象を回避して、安定的な運

転を行うために30℃に設定した。模擬暖房負荷としてのルームエアコンは、設定最低温度の16℃で運転した。

### 3.3 実験結果

**3.3.1 冬期基本実験** 冬期基本実験は、首都圏の冬期下水環境を想定し<sup>5)</sup>、2017年2月6～10日に下水設定温度17℃、下水流量250L/min(管内流速0.4m/s)、採熱管は設置した全22列の実験条件で実施した。Table 3には、冬期基本実験におけるWSHP採熱側の運転実績を示す。ここで、下水採熱率は下水管1m当たりの下水採熱量を表す。採熱側流量の平均値は、19.9L/minであった。安定した運転が行えた採熱側の還り温度(下水熱回収温度)は10.4℃で、外気温度よりも2.6℃高く、下水熱利用システムの有効性が確認できた。下水採熱率は245W/mで、ポアホール型地中熱の40W/mに対して<sup>6)</sup>、5～6倍程度の高効率での採熱が期待できることが判明した。

冬期基本実験代表日として、最も寒冷な2月9日を選定し、Fig. 6には代表日のWSHP採熱側の運転実績と外気温度を示す。WSHP採熱側の下水からの熱回収温度は10.1℃で、外気温度よりも8℃程度高く、循環流量は19.9L/minで、1日を通して安定した運転が行われた。常に上流側から一定温度の下水が流れているので、運転継続に伴い、採熱管の周囲に熱溜まりは発生せず、外界気象の影響も受けないので、採熱率の低下現象は生じない。

Fig. 7(左)には、外気温度と下水採熱率の関係を示す。外気温度が低い日ほど室内暖房負荷が大きく、放熱量も大きいので、採熱側での下水採熱率も大きくなる傾向が見られた。Fig. 7(右)には、外気温度と下水熱回収温度の関係を示すが、下水熱回収温度は外気温度の影響はほとんど受けないことが明らかになった。下水熱回収温度より外気温度の方が高い日は1日だけで、他の日は下水熱回収温度の方が高く、ASHPに対する下水熱利用システムの有効性が示された。

Table 4には、冬期基本実験におけるWSHP放熱側の運転実績を示す。WSHP放熱側の温度は、行き39.8℃、還り34.2℃で、流量も11.0L/minで、安定した状態で運転された。SCOP(システム成績係数)は、WSHP放熱側の放熱量をヒートポンプ本体と循環ポンプの消費電力で除した値で、WSHP運転の効率を表す指標で平均2.51だったが、暖房設定温度が一般的な20～22℃の暖房温度であれば、更に高い性能が期待できると予想される。

Fig. 8には、冬期基本実験代表日のWSHP放熱側の運転実績を示す。WSHP放熱側の温度は、送り40℃、還り35℃で、流量も11.0L/minで、外界条件や時間帯に関係なく安定した状態で運転された。10～14時頃までは、プレハブ室内への雪の降り込みを懸念して、窓を閉鎖していたが、窓を開放した14時以降は、室内暖房負荷が増えた関係で、14:30以降は放熱側の放熱量が4.1kW程度から4.8kW程度まで増加した。下水温度の時間変動は小さい<sup>7)</sup>ので、運転時間が経過しても、放熱量が減少しないのが下水熱利用システムの特徴である。

Table 3 WSHP採熱側の結果(冬期基本実験)  
Heat Collection Side of Water Source Heat Pump Result  
(Winter Basic Experiment)

※表中の値は、水冷ヒートポンプ稼働時の平均値を表す

日付	下水温 (TH7) [°C]	流量 (FL1) [L/min]	行き温 (TH1) [°C]	還り温 (TH2) [°C]	外気温 (WE1) [°C]	採熱率 (計算値) [W/m]
2月6日	16.5	19.9	8.8	10.5	12.5	225
2月7日	16.4	19.9	8.4	10.3	8.6	245
2月8日	16.5	20.0	9.0	10.8	9.2	232
2月9日	16.1	19.9	8.1	10.1	2.1	261
2月10日	16.4	19.9	8.4	10.4	6.6	262
平均評価	16.4	19.9	8.5	10.4	7.8	245

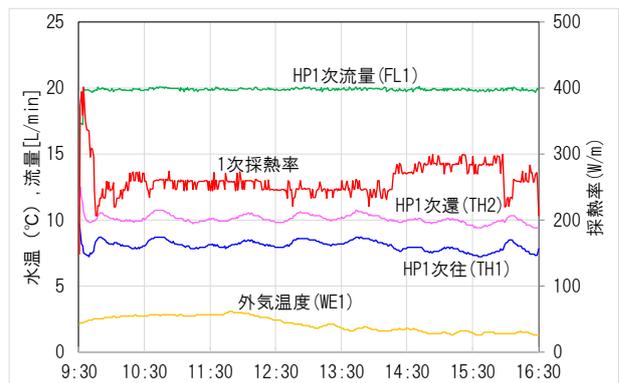


Fig. 6 WSHP採熱側の運転結果(2017年2月9日)  
Operation Result of Heat Collection Side of Water Source Heat Pump (February 9, 2017)

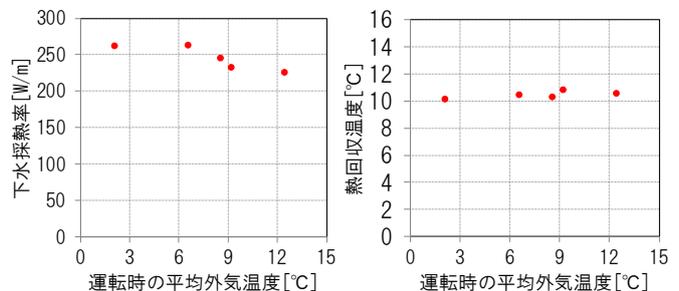


Fig. 7 外気温度と下水採熱率や熱回収温度との関係  
(冬期基本実験)  
Relationship Between Outdoor Temperature and Sewage Heat Collection Rate and Heat Recovery Temperature  
(Winter Basic Experiment)

Table 4 WSHP放熱側の結果(冬期基本実験)  
Heat Dissipation Side of Water Source Heat Pump Result  
(Winter Basic Experiment)

日付	流量 (FL2) [L/min]	行き温 (TH5) [°C]	還り温 (TH6) [°C]	放熱量 (計算値) [kW]	電力 (W1) [kW]	SCOP (計算値)
2月6日	11.0	39.5	34.4	3.68	1.45	2.54
2月7日	11.0	39.9	34.4	3.99	1.57	2.54
2月8日	11.0	39.4	34.2	3.75	1.46	2.57
2月9日	11.0	40.0	34.1	4.22	1.73	2.45
2月10日	10.3	40.0	33.9	4.33	1.66	2.46
平均評価	10.9	39.8	34.2	3.99	1.57	2.51

Fig. 9には、下水管廻りの熱収支推定結果を示す。図中の熱流は、材料の熱伝導率に該当区間の温度差を乗じて推定した。下水採熱管の取得熱量のうち、上流の送り管側では24%、下流の折り返し地点側では16%が下水管下部の土壌からの熱取得で、部分的には下水だけではなく、下部の土壌からも採熱していることが明らかになった。また、下水管から上部土壌には、わずかに熱損失しているが、その影響は極めて小さいことが分かった。

**3.3.2 流量比較実験** 流量比較実験は、下水流量が下水採熱能力に及ぼす影響を検証する目的で、2017年2月12～24日に下水流量を変数として、200～340L/minの範囲で行った。下水設定温度は17℃で、採熱管は設置した全22列で実施した。

Table 5に、WSHP採熱側の実験結果を示す。WSHP採熱側の循環流量は20L/min程度で、安定した状態で運転された。期間平均の下水温度は16.7℃に制御された。下水採熱率やWSHP採熱側還り温度(熱回収温度)は、下水流量との間に明確な因果関係は認められなかった。下水採熱率は209～261W/mで、ボアホール型地中熱よりも大きな結果が得られた。WSHP採熱側還り温度も季節外れの温暖日であった2月20日、2月23日を除いて外気温度よりも高く、ASHPよりも有利であった。

Table 6には、流量比較実験におけるWSHP2次側の運転実績を示す。WSHP2次側の温度は、行き39.0～40.3℃、還り33.8～34.3℃で、流量も10.7～11.0L/minで、安定した状態で運転された。SCOPは2.48～2.61だったが、暖房設定温度が一般的な暖房温度程度であれば、更に高い性能が期待できると予想される。それでも、空冷HPの標準的なCOP2.1～2.2より高いことが分かった<sup>8)</sup>。

Fig. 10(左)には、流量実験における下水流量と下水採熱率の関係を示す。下水流量と下水採熱率との間には相関性が認められなかった。下水採熱率は室内熱負荷によって決まるWSHP放熱側の放熱量によって決まり、下水管周囲の熱環境の影響は小さいと考えられる。Fig. 10(右)には、流量比較実験における下水流量と熱回収温度の関係を示す。下水流量が多い日には熱回収温度がやや高くなる傾向が見られた。下水流量が多い方がより高い温度が得られ、効率の良いWSHP運転が期待できると考えられる。以上流量比較実験を行った結果、下水流量が増えなくても下水採熱率は上がらないが、熱回収温度はやや高くなり、WSHPの運転効率はやや上昇することが分かった。

**3.3.3 採熱管比較実験** 採熱管比較実験は、採熱管列数が下水採熱能力に及ぼす影響を評価する目的で、Table 7の通り2017年2月27～3月10日に採熱管列数を変数として、10～18列で実験を行った。下水設定温度17℃、下水流量250L/minを設定条件とした。採熱側の循環流量は採熱管の列数によって異なり、採熱管10列では平均循環流量15.6L/min、14列では平均循環流量は18.2L/min、18列では平均循環流量は19.2L/minで、列数が多いほど流量も多くなった。下水採熱率と採熱管の列数との間には、特に関連性は見受けられないが、WSHP採熱側の還り温

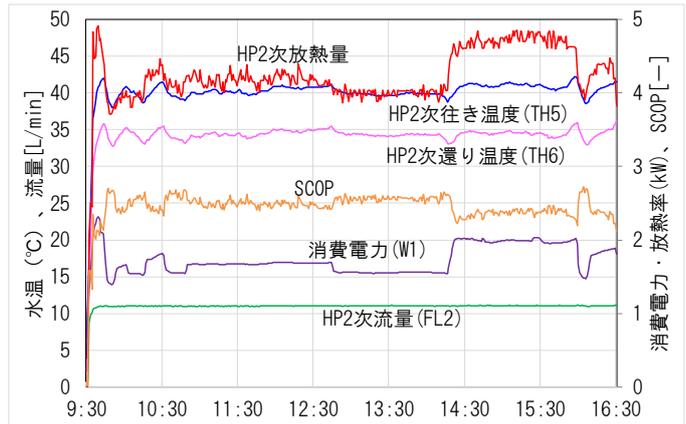


Fig. 8 WSHP放熱側の運転結果(2017年2月9日)  
Operation Result of Heat Collection Side of Water Source Heat Pump Results (February 9, 2017)

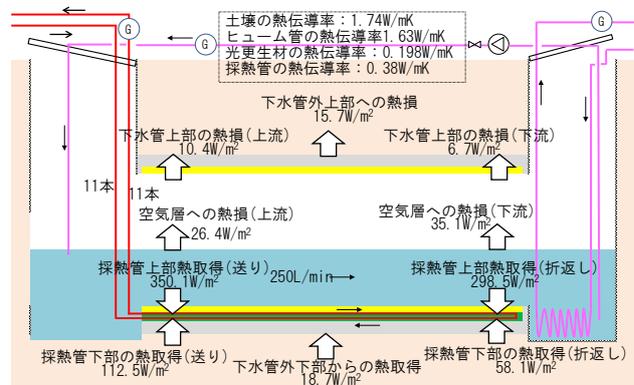


Fig. 9 下水管廻りの熱収支推定結果(冬期基本実験)  
Heat Balance Estimation Result Around the Sewage Pipe (Flow Comparison Experiment)

Table 5 WSHP採熱側の結果(流量比較実験)  
Heat Collection Side of Water Source Heat Pump Result (Flow Comparison Experiment)

日付	下水流量 (FL4) [L/min]	流量 (FL1) [L/min]	行き温 (TH1) [°C]	還り温 (TH2) [°C]	外気温 (WE1) [°C]	採熱率 (計算値) [W/m]
2月24日	198	19.8	8.2	10.1	9.4	242
2月20日	250	20.0	9.5	11.1	12.6	261
2月21日	249	19.8	7.4	9.4	8.0	217
2月12日	286	20.0	9.4	11.3	9.2	255
2月13日	300	20.1	9.8	11.7	9.6	239
2月22日	297	19.9	8.3	10.2	9.0	244
2月14日	339	20.2	9.9	11.7	9.6	235
2月23日	343	20.1	10.1	11.7	12.4	209

Table 6 水熱源ヒートポンプ2次側の結果(流量比較実験)  
Heat Dissipation Side of Water Source Heat Pump Result (Flow Comparison Experiment)

日付	流量 (FL2) [L/min]	行き温 (TH5) [°C]	還り温 (TH6) [°C]	放熱量 (計算値) [kW]	電力 (W1) [kW]	SCOP (計算値)
2月24日	11.0	39.8	34.3	3.97	1.6	2.48
2月20日	11.0	39.0	24.2	3.45	1.34	2.57
2月21日	11.0	40.3	24.1	4.40	1.81	2.48
2月12日	10.9	29.5	33.8	4.10	1.61	2.55
2月13日	10.9	29.4	34.0	3.84	1.47	2.61
2月22日	11.0	39.9	34.3	4.01	1.62	2.52
2月14日	10.7	39.5	34.2	3.75	1.5	2.50
2月23日	11.0	39.0	34.2	3.42	1.31	2.61

度(下水熱回収温度)は、採熱管列数が多いほど高くなり、18列では外気温度より高い温度で運転されたが、14列以下では外気温度より低くなった。

Table 8には、採熱管比較実験におけるWSHP放熱側の運転実績を示す。WSHP放熱側の温度は往き39.2~39.8℃、還り33.9~34.3℃で、流量も10.8~11.0L/minで、安定した状態で運転された。SCOPは2.20~2.51だったが、採熱管の列数が多いほど高く、比例関係が認められた。Fig. 11(左)には、採熱管列数と下水採熱率の相関関係を示す。下水からの採熱量は室内熱負荷の依存度が高く、WSHP放熱側の放熱量が大きい場合に、下水採熱率も大きくなる傾向があるので、採熱管の列数と下水採熱率との間には特に関係性は認められなかった。Fig. 11(右)には、採熱管列数と熱回収温度の相関関係を示す。1本当たりの循環流量は10列の場合 3.12L/(min・本)、14列の場合 2.60L/(min・本)、18列の場合2.14L/(min・本)で、採熱管の列数が増えると1本当たりの循環流量は小さくなるので、結果的に採熱管の列数が多いほど熱回収温度はかなり高くなり、効率的なWSHP運転につながった。

#### 4. 薄肉型下水採熱管性能評価実験

##### 4.1 実験条件

Table 9に実験条件を示す。下水の水深が採熱管の埋設高さぎりぎりのラインの水深15%で行った下水小水量実験と、下水の水深が30%の大流量で行った下水大水量実験の2種類の目的別実験を行った。

##### 4.2 実験方法

薄肉型下水採熱管の性能評価実験の実験時間は、9:00~17:10の約8時間とした。実験開始時までには下水を17℃まで暖めておいて、6本12列の従来型下水採熱管(肉厚1.5mm)を用いて9:00~13:00に運転し、13:00~13:10に独自に製作した6本12列の薄肉型下水採熱管(肉厚1.0mm)に切り替えて、13:10~17:10に運転を継続し、各々4時間の運転時間帯で評価を行った。

##### 4.3 実験結果

4.3.1 下水小水量実験 下水小水量実験は、下水水深15%の水量で、2019年2月6~15日に下水温度17℃、下水流量290L/minの条件で行った。Fig. 12に実験代表日(2019年2月15日)のWSHPの各部温度と流量を示す。採熱側流量は従来型17.8L/min、薄肉型18.0L/minでほぼ同程度の条件で運転され、13時頃に従来型から薄肉型に運転を切り替えた直後に、採熱側還り温度が2℃程度上昇し、以後も従来型よりも高い熱回収温度が得られていることから、薄肉管の方が高効率であることが示された。当日、午前10時頃に原因不明の理由で、WSHPの強制停止モードが作動して運転が止まったが、その他の時間帯は順調に運転された。

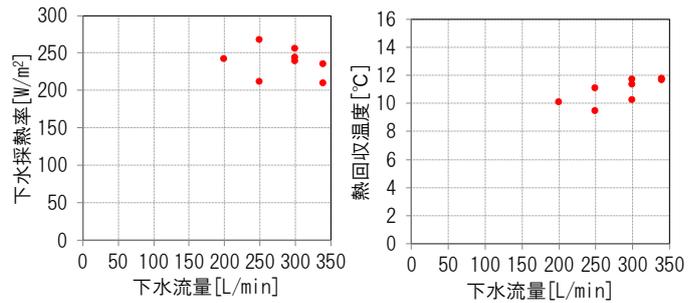


Fig. 10 下水流量と下水採熱率または熱回収温度との関係 (流量比較実験)

Relationship Between Sewage Flow Rate and Sewage Heat Collection Ratio or Heat Recovery Temperature (Flow Comparison Experiment)

Table 7 WSHP採熱側の結果(採熱管比較実験)  
Heat Collection Side of Water Source Heat Pump Result (Heat Collection Tube Comparison Experiment)

日付	採熱管 [列]	流量 (FL1) [L/min]	往き温 (TH1) [°C]	還り温 (TH2) [°C]	外気温 (WE1) [°C]	採熱率 (計算値) [W/m]
2月27日	10	15.4	4.1	6.4	8.2	238
3月10日	10	15.8	5.1	7.2	12.2	216
2月28日	14	17.9	6.5	8.5	8.2	235
3月8日	14	18.2	6.9	8.8	9.6	225
3月9日	14	18.4	7.4	9.1	11.9	212
3月1日	18	19.2	8.3	10.0	8.5	222
3月2日	18	18.9	8.8	10.4	7.1	214
3月7日	18	19.4	8.2	10.0	8.3	230

Table 8 WSHP放熱側の結果(採熱管比較実験)  
Heat Dissipation Side of Water Source Heat Pump Result (Heat Collection Tube Comparison Experiment)

日付	流量 (FL2) [L/min]	往き温 (TH5) [°C]	還り温 (TH6) [°C]	放熱量 (計算値) [W/m]	電力 (W1) [kW]	SCOP (計算値)
2月27日	10.9	39.4	34.1	381	1.73	2.20
3月10日	10.8	39.8	33.9	354	1.54	2.30
2月28日	10.9	39.4	34.0	386	1.63	2.38
3月8日	10.9	39.2	34.1	365	1.51	2.48
3月9日	10.9	39.0	34.2	344	1.40	2.46
3月1日	10.9	39.2	34.1	367	1.46	2.51
3月2日	10.8	39.2	34.3	376	1.40	2.47
3月7日	11.0	39.6	34.3	374	1.38	2.50

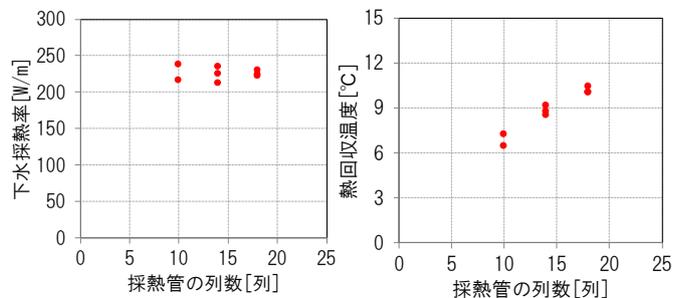


Fig. 11 採熱管列数と下水採熱率及び熱回収温度との関係 (採熱管比較実験)

Relationship Between the Number of Heat Collection Tube Rows and Sewage Heat Collection Rate or Heat Recovery Temperature (Heat Collection Tube Comparison Experiment)

Table 10には、下水小流量実験のWSHP採熱側の運転実績を示す。下水からの熱回収温度は従来型の平均5.2℃に対して、薄肉型は平均6.4℃で、薄肉型の方が従来型より1.2℃高く、有利な温度で利用できた。従来型の下水採熱率は平均324W/mで、薄肉型の下水採熱率は、平均331W/mであった。

Table 11には、下水小流量実験のWSHP放熱側の運転実績及び消費電力量、SCOPを示す。WSHP放熱側の流量は、薄肉型運転時の方が従来型運転時よりもやや多く、温度もやや高い状態で運転されたが、ほぼ同程度の条件で運転されている。その条件下で放熱量は薄肉型の方が1.4%多く、消費電力は逆に薄肉型の方が従来型よりも4.3%少ない結果となった。その結果、SCOPは従来型の2.78に対して、薄肉型は2.97で6.8%上昇した。本実験は暖房設定温度30℃での結果であり、暖房設定温度が一般的な暖房温度の場合には、SCOPはもっと高い性能が期待できると予想される。

4.3.2 下水大水量実験 下水大水量実験は下水水深30%の水量で、2019年2月28～3月6日に下水温度17℃、下水流量290L/minで行った。Fig. 13に下水大水量実験の代表日(2019年2月28日)におけるWSHP各部の温度と流量を示す。採熱側の流量は、従来型17.5L/min、薄肉型17.8L/minではほぼ同程度の流量条件で運転されたが、13時頃に従来型から薄肉型に運転を切り替えた直後に、採熱側還り温度(熱源水温度)が2℃程度上昇し、以後も従来型よりも高い熱回収温度が得られており、下水小流量実験と同様薄肉型の方が有利な温度で運用できることが示された。

Table 12には、下水大水量実験のWSHP採熱側の実測結果を示す。5日間の実測の結果、下水熱回収温度は従来型4.8℃に対して、薄肉型は6.5℃で、薄肉型の方が平均1.7℃高く、有利な温度で運転できた。薄肉型の下水採熱率は、平均294W/mであった。Table 13には、下水大水量実験のWSHP放熱側の運転実績及び消費電力量、SCOPを示す。WSHP放熱側流量は薄肉型運転時の方が従来型の運転時よりもやや多かったが、温度はほぼ同程度で運転されている。その条件下で放熱量は薄肉型の方が1.8%多く、消費電力は逆に薄肉型の方が従来型よりも9.4%少ない結果となった。その結果、SCOPは従来型の2.72に対して、薄肉型は3.01で、SCOPは10.7%上昇した。本実験は暖房設定温度30℃での結果で、暖房設定温度が一般的な暖房温度の場合、SCOPはもっと高い性能が期待できると予想される。

## 5. まとめ

光硬化工法を用いて、深さ1.8m地点に内径300mm、長さ10mの下水熱利用システムの実験装置を製作し、下水採熱管を下水管底に敷設した。その上で2017年と2019年の2回にわたって性能評価実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 冬期基本実験を行った結果、下水採熱率は245W/mとボアホール型地中熱の5～6倍の採熱性能を有し、

Table 9 薄肉型採熱管性能評価実験の条件  
The Conditions of Thin-Walled Heat Collection Tube Performance Evaluation Experiment

種別	日	採熱管 [列]	下水水深 [%]	下水温 [℃]
下水小流量	2019/2/6～15	12	15	17
下水大流量	2019/2/28～3/6	12	30	17

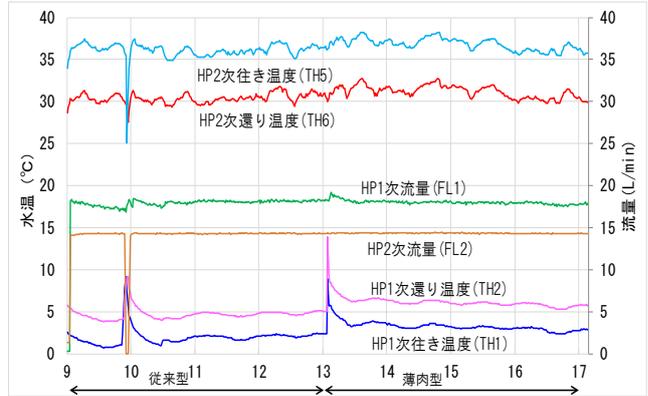


Fig. 12 WSHP各部温度と流量  
Water Source Heat Pump Parts Temperature and Flow Rate  
(February 15, 2019)

Table 10 WSHP採熱側の結果(下水小流量実験)  
Heat Collection Side of Water Source Heat Pump Result  
(Sewage Small Flow Rate Experiment)

日	採熱管	下水温 (TH7) [℃]	流量 (FL1) [L/min]	行き温 (TH1) [℃]	還り温 (TH2) [℃]	採熱率 (計算値) [W/m]
2月6日	従来管	-	17.9	2.7	5.5	324
	薄肉管	-	17.8	3.9	6.7	330
2月8日	従来管	16.0	18.2	2.7	5.5	336
	薄肉管	16.0	18.0	3.4	6.3	343
2月12日	従来管	16.1	17.8	2.9	5.6	316
	薄肉管	16.0	17.4	3.8	6.7	322
2月13日	従来管	16.0	17.9	2.1	4.8	326
	薄肉管	16.0	18.1	3.8	6.6	324
2月14日	従来管	16.0	17.9	2.4	5.2	318
	薄肉管	16.1	17.8	3.1	6.1	338
2月15日	従来管	16.1	17.8	2.0	4.8	324
	薄肉管	16.0	18.0	3.3	6.1	330
平均評価	従来管	16.0	17.9	2.5	5.2	324
	薄肉管	16.0	17.9	3.6	6.4	331

Table 11 WSHP放熱側の結果(下水小流量実験)  
Heat Dissipation Side of Water Source Heat Pump Result  
(Sewage Small Flow Rate Experiment)

日	採熱管	流量 (FL2) [L/min]	送り温 (TH5) [℃]	還り温 (TH6) [℃]	放熱量 (計算値) [W/m]	消費電力 [kW]	SCOP (計算値)
2月6日	従来管	13.8	36.9	31.1	5.07	1.86	2.63
	薄肉管	14.2	38.9	33.4	5.05	1.75	2.88
2月8日	従来管	13.7	35.9	30.2	5.14	1.83	2.78
	薄肉管	14.0	36.1	30.4	5.25	1.76	2.98
2月12日	従来管	14.0	36.5	31.1	4.96	1.73	2.84
	薄肉管	14.4	37.9	32.5	5.09	1.69	3.01
2月13日	従来管	14.0	36.4	30.6	5.27	1.87	2.79
	薄肉管	14.4	38.6	33.1	5.18	1.77	2.94
2月14日	従来管	14.0	35.7	30.1	5.01	1.79	2.86
	薄肉管	14.3	36.2	30.5	5.26	1.76	3.01
2月15日	従来管	13.9	36.1	30.4	5.21	1.87	2.77
	薄肉管	14.4	36.8	31.2	5.27	1.76	3.00
平均評価	従来管	13.9	36.3	30.6	5.11	1.83	2.78
	薄肉管	14.3	37.4	31.9	5.18	1.75	2.97

外気温度よりも2.6℃高い熱回収温度が得られ、ASHPシステムに対する優秀性が示された。また、採熱量のうち、下水管下部の土壌からの熱取得が20%程度であることが分かった。

- 2) 流量比較実験を行い、下水流量と下水採熱性能の関係について検討し、下水流量が増えても下水採熱率は上がらないが、熱回収温度はやや高くなり、WSHPの運転効率はやや上昇することが分かった。
- 3) 採熱管比較実験を行い、採熱管の列数と下水からの採熱性能の関係について検討した。その結果、採熱管の列数が増えても下水採熱率は上がらないが、熱回収温度は非常に大きくなり、WSHPの運転効率はかなり上昇することが分かった。
- 4) 内径10mm(厚さ1.0mm)の薄肉型下水採熱管と内径10mm(厚さ1.5mm)の従来型下水採熱管の性能比較試験を行った結果、薄肉型の方が従来型よりも下水熱回収温度は1.2~1.7℃高く、高効率化が図れることが明らかとなった。
- 5) 薄肉型下水採熱管と従来型下水採熱管の性能比較試験を行い、薄肉型の方が従来型よりもSCOPは6.8~10.7%高く、省エネ効果が認められた。

本技術は工場の排水熱利用にも適用可能であり、今後某ビール工場での未利用排水の空調利用に本技術を適用した実証実験を計画している。また、ホテル、病院、寒冷地施設等を対象に、本技術の受注を目指していく。

### 謝辞

下水熱実験装置の製作に当たって、東亜グラウト工業株式会社のご指導・ご協力を賜りました。記して、感謝の意を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 国土交通省：下水熱でスマートなエネルギー利用を，国土交通省，pp. 2, 2016
- 2) 日本下水道協会：平成24年度版下水道統計，日本下水道協会，pp. 63-64, 2014
- 3) 三小田憲司，他：中小口径下水管を対象とした下水熱利用システムの実験的評価(その1~2)，空気調和衛生工学会学術講演論文集，pp. 29-36, 2018.9
- 4) 三小田憲司，他：中小口径下水管を対象とした下水熱利用システムの評価(その3)，空気調和衛生工学会学術講演論文集，2019.9，pp. 73-76
- 5) 日本地域開発センター：下水熱利用システム計画マニュアル，日本地域開発センター，p. 2-005, 1998
- 6) 国土交通省：官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案)，p. 12, 2013.10

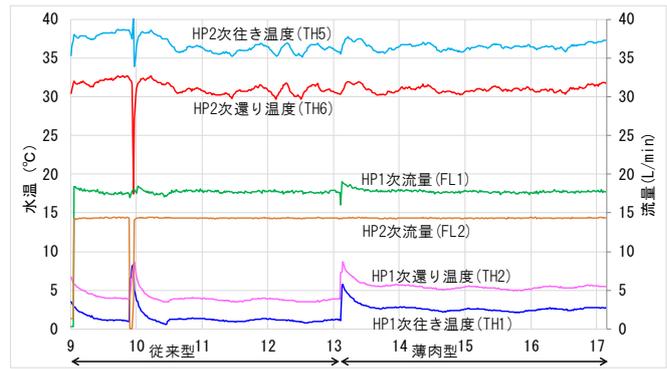


Fig. 13 WSHP各部温度と流量(2019年2月28日)  
Water Source Heat Pump Parts Temperature and Flow Rate  
(February 28, 2019)

Table 12 WSHP採熱側の結果(下水大流量実験)  
Heat Collection Side of Water Source Heat Pump Result  
(Sewage Large Flow Rate Experiment)

日	採熱管	下水温 (TH7) [°C]	流量 (FL1) [L/min]	行き温 (TH1) [°C]	還り温 (TH2) [°C]	採熱率 (計算値) [W/m]
2月28日	従来管	15.9	17.5	1.5	4.1	299
	薄肉管	15.9	17.8	2.7	5.5	326
3月1日	従来管	16.4	17.5	2.6	5.1	278
	薄肉管	16.5	18.2	3.9	6.5	312
3月4日	従来管	16.4	18.3	2.6	5.1	272
	薄肉管	16.5	18.5	3.9	6.5	280
3月5日	従来管	15.9	18.1	2.6	4.9	274
	薄肉管	15.9	18.2	4.3	6.6	281
3月6日	従来管	16.3	18.2	2.5	4.9	275
	薄肉管	16.6	18.8	5.1	7.3	271
平均評価	従来管	16.2	17.9	2.4	4.8	280
	薄肉管	16.3	18.3	4.0	6.5	294

Table 13 WSHP放熱側の結果(下水大流量実験)  
Heat Dissipation Side of Water Source Heat Pump Result  
(Sewage Large Flow Rate Experiment)

日	採熱管	流量 (FL2) [L/min]	送り温 (TH5) [°C]	還り温 (TH6) [°C]	放熱量 (計算値) [kW]	消費電力 [kW]	SCOP (計算値)
2月28日	従来管	14.0	36.8	31.1	5.07	1.86	2.73
	薄肉管	14.3	36.5	31.0	5.15	1.75	2.94
3月1日	従来管	14.0	39.1	33.7	4.71	1.82	2.68
	薄肉管	14.4	39.0	33.6	5.11	1.75	2.93
3月4日	従来管	14.1	38.9	34.0	4.49	1.63	2.75
	薄肉管	14.4	38.4	33.6	4.51	1.51	2.98
3月5日	従来管	14.1	38.8	33.9	4.58	1.64	2.86
	薄肉管	14.4	38.0	33.2	4.59	1.45	3.12
3月6日	従来管	14.2	36.9	32.0	4.52	1.77	2.58
	薄肉管	14.4	38.3	33.9	4.44	1.44	3.09
平均評価	従来管	14.1	38.1	32.9	4.67	1.74	2.72
	薄肉管	14.4	38.0	33.1	4.76	1.58	3.01

- 7) 河合弘樹，他：都市域における下水管路網を活用した熱利用・熱融通システムの研究(第1報)，空気調和衛生工学会学術講演論文集，pp. 841-844, 2012
- 8) 中部電力，他：次世代型ビル用マルチヒートポンプシステムの革新的省エネ制御技術の研究開発，NEDO省エネルギー技術フォーラム2013，2013