

下水熱（管渠）利用熱交換器の課題と普及に向けた展望 Issues of heat exchangers using sewage heat in sewer and prospects for widespread use

中尾正喜（大阪市立大学 特命教授）
Masaki NAKAO, Osaka City University
nakao@osaka-cu.ac.jp

キーワード:下水熱(Sewage heat)、熱交換器(Heat exchanger)、バイオフィーム(Biofilm)、
汚れ(Fouling)、下水道(Sewage)、ヒートポンプ(Heat pump)、採熱(Heat collection)

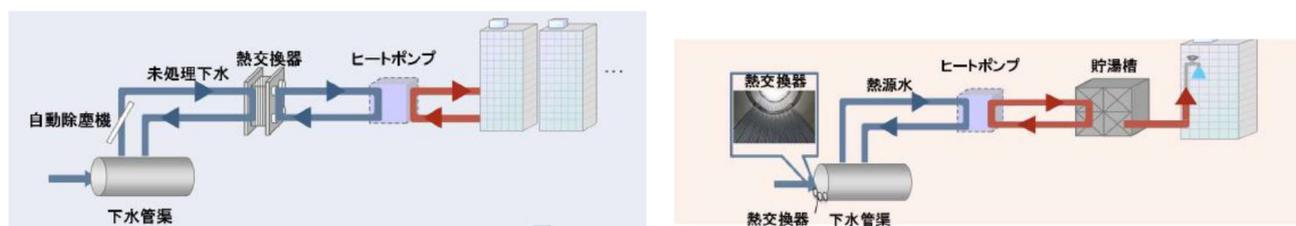
1. はじめに

下水熱利用の歴史は古く、処理場近傍の熱需要施設において、処理水を大規模な温度差エネルギー源として地域冷暖房に活用された。その後ポンプ場にて未処理水を熱源とする事例も見られたが、熱需要施設が処理場やポンプ場近くである制約条件により、広く普及するには至っていない。そこで、規制緩和により、民間事業者が下水熱利用のために未処理下水を下水管渠から取水することや、管渠内に熱交換器を設置することが可能（図1）となった。

本報告では、まず管渠における下水熱利用のわが国の導入動向と導入されている熱利用機器及びNEDO事業【NEDO次世代型ヒートポンプシステム研究開発】都市域における下水管路網を活用した下水熱利用・熱融通技術、研究開発期間：平成22年7月1日～平成26年2月28日）等で試作されたが導入に至っていない機器を紹介する。次に下水熱利用先進国の導入状況と導入機器について述べ、わが国と比較し国内の普及が進まない原因を探る。

さらに、下水用熱交換器の伝熱性能に関する既往研究を紹介し、バイオフィームの伝熱性能への影響が大きいことを説明する。

最後に、国内外の比較結果から下水熱の普及へ向けた技術課題を明らかにする。



下水管渠から未処理下水を取水して採熱

下水管渠内に設置した熱交換器により採熱

出典：国土交通省 <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/content/001313244.pdf>（2021.11アクセス）

図1 下水管渠における熱利用

2. 下水管渠における熱利用の現状

2.1. 国内の下水熱利用導入状況

表1は設備規模が明らかになっている下水熱導入施設¹⁾である。下水熱による地域熱供給箇所（2020年8月末時点）の情報²⁾に導入33箇所のリストと事業主体、熱源（処理水、未処理水）、用途が記載されている。表2に採熱源、採熱場所の区分に対する加熱量の規模別の箇所数を示す。33箇所の内処理場近傍での処理水利用は20箇所、未処理水利用は13箇所である。未処理水利用のうち、ポンプ場が2箇所、管渠における未処理水利用が11箇所である（表2）。ポンプ場における未処理水利用は後楽一丁目地区（16,019kW）と盛岡駅西口地区（1,408kW）である。管渠内に熱交換器を

設置する方式が増えているが、残念ながらその採熱能力は1事例を除き100kW未満の小規模なものである。管渠内熱交換器でこれまでに導入されたものはプラスチック製であり、腐食など耐久性で優れているが熱伝導率の低さにより、敷設長さに対する採熱能力が金属より小さい。金属製熱交換器はNEDO事業で実証試験がなされたものがあるが、実建物への導入事例はまだ無い。

表1 下水熱導入施設と設備規模（引用¹⁾）

NO	設置年	施設名称	都道府県	用途	延床・融雪面積 m ²	最大能力(kW換算)
1	1990年	幕張新都心ハイテク・ビジネス地区	千葉県	地域熱供給(空調)	947,000	55,970
2	1994年	後楽一丁目地区	東京都	地域熱供給(空調)	242,383	16,019
4	1997年	篠路駅前団地バス停(4か所)	北海道	融雪	86	
5	1997年	盛岡駅西口地区	岩手県	地域熱供給(空調)	101,500	1,408
6	1997年	横浜国際総合競技場(日産スタジアム)	神奈川県	空調	172,758	
8	1998年	久屋大通庭園「フリエ」	愛知県	空調	2,380	
9	1998年	枚方市営総合福祉会館「ラポールひらかた」	大阪府	空調	7,000	695
11	1999年	射水市営体育施設「海竜スポーツランド」	富山県	空調・給湯(プール)	3,385	
12	2007年	ソニーシティ(ソニー本社)	東京都	空調	162,888	1,891
14	2009年	新砂三丁目地区の医療福祉施設	東京都	空調	62,000	772
17	2015年	品川シーズンテラス	東京都	空調	206,025	6,948
18	2015年	新潟市役所前バスターミナル歩道部	新潟県	融雪	108	
19	2016年	市役所前バス停歩道部	青森県	融雪	12	
20	2016年	鉄砲町地区大型商業施設(イオンモール)	大阪府	給湯・空調	134,886	
23	2017年	浅間南麓こもろ医療センター	長野県	空調	21,102	14
24	2017年	市立さくら西保育園(室内空調、床暖房)※実証実験	新潟県	空調	1,108	10
25	2017年	ささしまライブ24地区(愛知大学等3施設)	愛知県	地域熱供給(空調)	280,000	28,564
26	2018年	倉敷市屋内水泳センター	岡山県	給湯(プール)	5,634	
27	2018年	社会福祉法人旭会(豊田市高齢者施設)	愛知県	給湯	7,800	
28	2018年	諏訪赤十字病院	長野県	空調	34,813	579
30	2018年	駅前地区歩道部	青森県	融雪	12	
31	2019年	長野原町役場庁舎	群馬県	空調	3,901	
32	2020年	横浜市庁舎	神奈川県	空調	185,000	
33	2020年	中野区立総合体育館(キリンレモンスポーツセンター)	東京都	空調	12,491	

表2 採熱源、採熱場所の区分に対する加熱量規模別の箇所数

下水熱利用方式		加熱量 kW					
採熱源	採熱場所	<100	<500	<1000	<5000	5000≤	未確認
処理水利用			1	2	1	3	13
未処理水利用	ポンプ場				1	1	
	管渠内	9	1				
	管渠外	1					
管渠内の多くは未確認であるため推測による							

2.2. 管渠における熱利用のための熱交換器の事例（国内）

(1) 樹脂チューブ方式

採熱能力が100kW（計画）の事例は採熱マットと呼ばれる樹脂チューブを内径2メートルの下水道管渠内に敷設し、熱交換器としたものが報告されている^{3),4)}（図2）。既設の中・大口径の継ぎ手部に環状のステンレススリーブなどを設置し耐震化を図る工法を採用しており、138本のポリエチレン製採熱パイプ（直径10ミリ）を束ねた採熱設備をステンレススリーブなどで下水道管路の底部に1.5m間隔で34カ所固定しており、設置長さは50mである。熱交換器敷設長さ当たり2kW/mの能力と計画されているが、伝熱面積、熱源水と下水の温度差などを含め実績報告は見当たらない。

老朽化した下水管の管更生工事に採熱機能を付加する方式が開発、導入されているが、熱通過率や管渠長さ当たりの採熱量などの情報は見当たらない(図3)。



図2 採熱マット (引用⁴⁾)

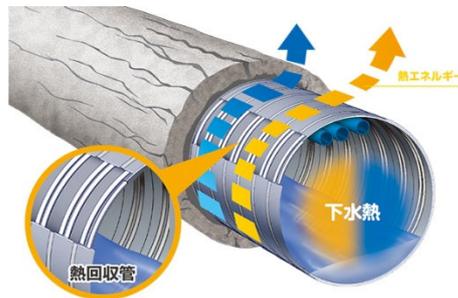


図3 管更生一体タイプ (引用：積水化学工業 HP)



(2) 金属製の管渠内設置熱交換器

融雪を目的としたB-DASHプロジェクトの予備調査⁵⁾でパイロットプラント用として試作されたものがある(図4)が、熱交換器の性能評価は報告書に見当たらない。図5は試作までであり、後述するドイツやスイスの実施例と同等の性能が期待されるが導入事例はない。



図4 金属製の管渠内設置熱交換器 (引用⁵⁾)

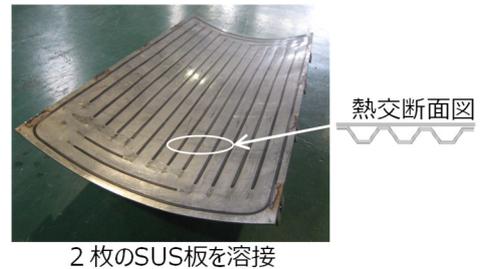


図5 SUSパネルの溶接による熱交換器 (資料提供：日本パーカラライジング)

(3) 管渠から取水して熱交換する方式

国内では倉敷市のスポーツ施設1件だけである。採用された流下液膜式熱交換器(図6)の実運用性能が学会報告として公表されている⁶⁾。採熱量は洗浄後95kW、バイオフィーム成長後は65~70kWである。熱交換器洗浄後の熱通過率値は約700~1,200W/m²Kであり、清掃後3~7日でバイオフィーム主体の汚れの付着により400~600W/m²K程度まで低下し、以降安定している。図7は導入された伝熱面とは異なるが、流下液膜式熱交換器の伝熱部の断面構成の例(円管の場合)と伝熱面の流下状況を示したものである。熱通過率が下がるとHPの熱源水温が下がり採熱量は維持できるが、COPの低下が報告されている(図8)。



右：流下液膜熱交換器
左手前：スクリーン

図6 取水後の熱利用設備 (引用⁶⁾)

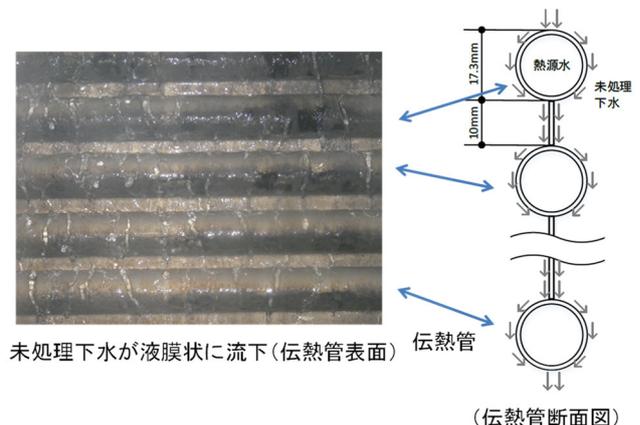


図7 流下液膜式熱交換器の伝熱面

図9は今後有望と考える、かきとり機能付きシェル&チューブ熱交換器のかきとり機能試験機であるが、下水による実証試験には至っていない。

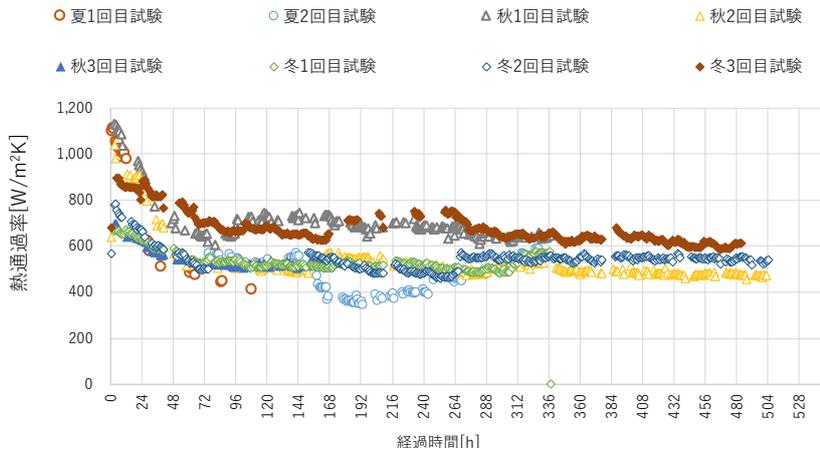


図8 熱交換器洗浄後の熱通過率の低下傾向（引用⁶⁾）



図9 かきとり機能付きシェル&チューブ熱交換器（東京電力、大阪市立大学）

2.3. スクリーンの試作・試験事例

下水道施設の夾雑物処理に用いられているスクリーンは夾雑物を分離回収する機能を持っている（後述する HUBER 社の事例）。管渠に夾雑物を残す方式であれば、分離回収機能を持つ必要が無いため低コスト化が可能である。このような方針で試作した事例を図10、図11に示す。図10は図11のスプレー洗浄式である。マンホールから見下ろした写真であり、底面は下水管渠と同じ形状のパンチングメタルスクリーン（穴径3φ）または流れに垂直方向のスリットスクリーンであり、滑らかに管渠底面と接続されている。表3においてスプレー洗浄併用多孔式と記載しており、スクリーンの裏面からスプレーノズルをトラバースしながら、処理水を常時スプレー洗浄する方式である。管底からの取水のため採水能力が高い。流れに直角方向の1.5mmのスリットスクリーンも良好な性能を示した。図11、表3における管渠底面に設けた縦型スリットスクリーンは流れ方向のスリットスクリーンに回転レーキを組み込み、夾雑物を下水の下流側に除去する方式であり、想定より取水性能が極めて高く100L/s試験設備では最大能力を計測できなかった。しかし、流れ方向の縦型スリットであるため、ビニールなどシート状の夾雑物が通過する弱点がある。図11の横レーキ式はマンホール底部側に設置し、背面側に設ける取水用のマンホールに落水させる方式である。

実証試験の結果、水位と取水量の関係を計測し、実用性が確認されたが、未だに実導入には至っていない。

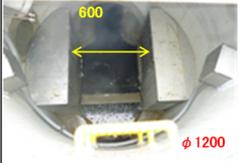
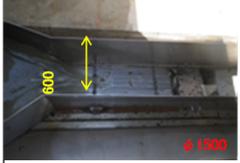
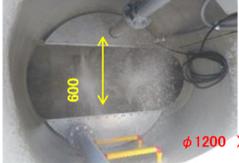


図10 マンホール底部に設けたスプレー洗浄式スクリーン



図11 試作・試験したスクリーン

表 3 スクリーンの性能比較

クリーニング方式	クランク型レーキ式	回転レーキ式	スプレー洗浄併用多孔式
スクリーン形式	横型スリット	縦型スリット	パンチングメタル
特徴	水位確保が必要	大流量通水能力	繊維状、シート状夾雑物の除去
試作通水能力	10 (L/s)	50 (L/s) ~ 100 (L/s)*	35 (L/s)
集合住宅給湯負荷	200世帯	1000~世帯	700世帯
機器外観			

* 試験設備の能力限界で未確認

2.4. 海外の導入状況

2.4.1. 普及状況

(1) 中国

中国ではハルビン工業大学が下水熱利用の拠点となっており、全国の情報を把握している。以下、2019年にハルビン工業大学へ訪問した際の見聞によるものである。

中国全土で下水熱（河川熱含む）の利用箇所は300箇所以上存在し、間もなく400箇所に到達する見込みである。全体の対象床面積は、4,000万㎡程度と膨大であり、下水熱システムの利用方法は、暖房、冷房比率が2対1程度となっている。現在中国では、大気汚染問題への対応として石炭ボイラーの撤廃を政策として進めており、寒冷地では空気熱源が効率低下することや使えない場合があるため、下水熱利用が進んでいるものと考えられる。汚水の幹線管渠より取水する方式であり、見学したプラントは分流式であった。合流式の管渠熱利用の有無は未確認である。

(2) スイス

スイスでは2014年時点で下水熱利用設備は80システムが稼働中であるとの情報⁷⁾があったが、処理水と未処理水の区分は不明である。

一方 InfraWatt 協会の2018年の資料⁸⁾によると管渠利用が7か所、処理水利用が19箇所、計画が12箇所となっている。

(3) ドイツ

ドイツでは、2014年の情報⁷⁾によると、下水熱利用設備の稼働中22箇所、計画13箇所、フィージビリティスタディ中23箇所、計58箇所である。特筆すべきはバーデン・ヴュルテンベルク州で特に普及が進んでいることであり、この州だけで稼働中9か所、計画11箇所、フィージビリティスタディ中22箇所となっている。

2.4.2. 管渠内熱交換器方式の事例

管渠における下水熱利用に先進的に取り組んでいるスイス⁹⁾、ドイツの事例を表4に示す。アパート戸数、用途、年間ヒートポンプ加熱量、ヒートポンプ加熱能力、APF、熱交換器敷設長さ、熱交換器幅、熱交換器面積、下水採熱量、熱交換器敷設長さ当たりの採熱能力、熱交換器設置面積当たりの採熱量、下水道タイプ、管渠形状、管渠サイズ、管渠下水最小流量、管渠下水温度低下について記してある。特に採熱量と熱交換器敷設長さ当たりの採熱能力を比較する。

(1) Binningen (スイス)

管渠内に 140m 敷設したステンレス製熱交換器により 260kW 採熱しており、ヒートポンプの熱出力は 380kW である。熱源水と下水温度条件が不明であるが、単位長さ当たりの採熱量は 1.86kW/m である (図 12)。

(2) Wipkingen (スイス)

管渠内に 200m 敷設したステンレス製熱交換器により 810kW 採熱しており、ヒートポンプの熱出力は 1,250kW である。熱源水と下水温度条件が不明であるが、単位長さ当たりの採熱量は 4.25kW/m であり、非常に高い性能が報告されている (図 13)。

(3) Zwingen (スイス)

小規模な事例を示す。管渠内に 10m 敷設したステンレス製熱交換器により 52kW 採熱しており、ヒートポンプの熱出力は 64kW である。熱源水と下水温度条件が不明であるが、熱交換器の敷設長さ当たりの採熱量は 5.2kW/m と、非常に高い性能となっている。

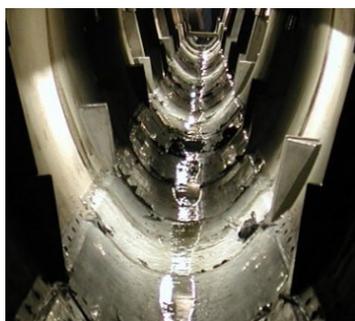


図 12 管渠内熱交換器敷設状況 (Binningen、引用⁹⁾)



図 13 管渠内熱交換器敷設状況 (Wipkingen、引用⁹⁾)

表 4 管渠内熱交換方式の事例 (スイス、ドイツ)

導入場所 (自治体)	単位	Binningen	Wipkingen	Zwingen	Baden-Württemberg
アパート戸数		300	940	31	
用途		給湯、暖房	暖房	暖房	
年間ヒートポンプ加熱量	MWh/a	2,400	3100	230	
ヒートポンプ加熱能力	kW	380	1250	64	
年間性能係数 (APF)	m	3.2	3.1	4.6	
熱交換器敷設長さ	m	140	200	10	750
熱交換器幅	m	0.8	1	1.06	
熱交換器面積	m ²	110	200	10.6	
下水採熱量	kW	260	850	52	2100
熱交換器敷設長さ当たりの採熱能力	kW/m	1.86	4.25	5.2	2.8
熱交設置面積当たりの採熱量	kW/m ²	2.4	4.2	4.9	
下水道タイプ		合流式	合流式	合流式	
管渠形状		コンクリート、卵形	コンクリート、円形	コンクリート、長方形	円形
管渠サイズ	m	1.80 × 1.20	直径 1.50	1.70 × 1.20	
管渠下水最小流量	l/s	200	105	130	200
管渠下水温度低下	℃	0.3	2	0.1	2.5

(4) Baden-Württemberg (ドイツ)

バーデン・ヴュルテンベルク州の州都であるシュトゥットガルトで、下水管渠で750mの長さのステンレス製熱交換器で2.1MWの採熱能力を持つシステムが導入¹⁰⁾されて、地域に熱供給している

(図14)。管渠の熱交換器としてスイス、ドイツを通して最長と思われる。熱交換器の敷設長さ当たりの採熱能力は2.8kW/mである。流れによる伝熱面の洗浄効果のため勾配を0.1%確保しており、さらにバイオフィルムの洗浄のためフラッシング装置¹⁰⁾を設けている(図15)。

都市再開発地区において、既設下水管路と並行して新規管渠を構築する機会に一部古い管渠と熱交換器を残置し、新設管渠は管渠一体型の熱交換器を敷設している。

晴天時流量：200 l/s、測定された下水温度6.5-22°Cであり、都市開発地域で下水は2.5K冷却され、下水処理場で0.5K低下している。対象地域の給湯・暖房は下水熱により供給されている。

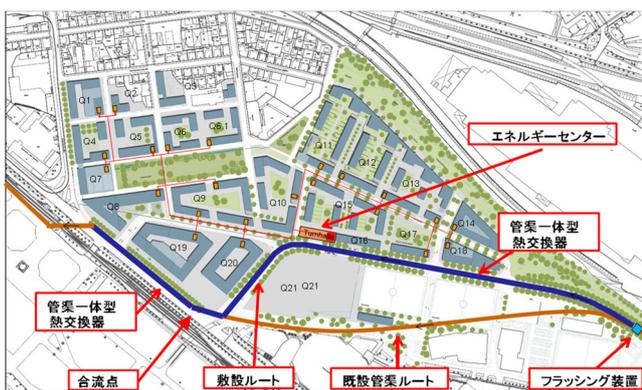


図14 管渠内熱交換器(熱交換器組み込み管渠を敷設)による地域熱供給(引用¹⁰⁾)



図15 熱交換器洗浄のためのフラッシング装置(引用¹⁰⁾)

2.4.3. 管渠取水方式の事例

(1) ハルビン市(中国)

集合住宅16棟20万m²へ熱供給するため、幹線管渠から取水した未処理水を熱源とする施設が構築・運用されている。熱源のヒートポンプ容量は1200USRT×2台(8400kW)である。

大学が設立した会社が開発・製造した分流式下水(汚水)専用の熱交換器が導入されている。下水熱交換器の熱通過率は、初期値では1500~1800W/m²Kとなり、汚れた際には60%程度に低下する。設計では、低下した状態の能力をベースに行っている。スクリーン構造は不明であるが分流式下水であるため合流式より簡素なものと推察される。ハルビン工業大学が開発し導入された熱交換器(図16(左))は伝熱面積150m²、定格熱交換能力810kW(熱源水側出口温度4-9°C、流量162m³/h、下水側温度12-7°C、流量162m³/h)であり、ターボ冷凍機のような効率の高い大容量ヒートポンプの熱源として利用されている。設備のスケールメリットが大きいことがうかがえる。

以上のように中国では地域熱供給のための下水熱利用であるため大規模であり、下水管渠内への熱交換器の設置方式は無い模様である。



図16 汚水用熱交換器(採熱能力810kW, 右: 外観、引用元, HIT KINT TECHNOLOGY CO. LTD 資料, 中: 定期洗浄後, 扉を開放した状態, 左: 熱交換器伝熱部分)

(2) Winterthur (スイス)

22,000m²の28階の高層オフィスビル(Wintower)の冷暖房に、管渠で取水しスクリーンとかきとり式熱交換器により熱利用している。かきとり機能付き熱交換器(図17、18)はバイオフィルムを常時除去し熱交換器の清浄時性能を維持するよう開発されたものである。本熱交換器は、ステンレス製の水平パイプモジュールが並列に配置されており、パイプモジュール外面をかきとり機構が水平にスライドしてバイオフィルムを除去する構成となっている。このかきとり機構によりコンパクトで高い熱交換性能を維持できる。

温度条件など不明であるが、性能は次のように公表されている。

取水量：最大 50 l/s

暖房負荷の場合：

- ・採熱能力：480kW
- ・ヒートポンプ加熱量：585kW

冷房負荷の場合(下水水温 20℃)：

- ・ヒートポンプの冷房能力：600kW
- ・放熱能力：840kW

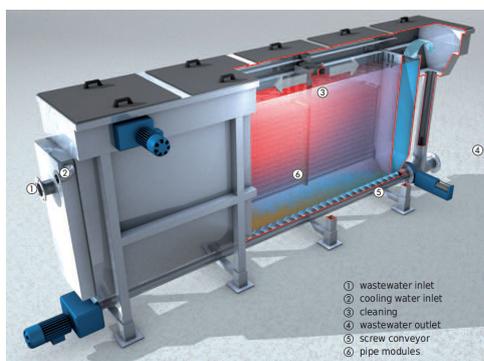


図17 かきとり機能付き熱交換器(引用¹¹⁾) 図18 かきとり機能付き熱交換器の設置状況(引用¹²⁾)

3. 下水用熱交換器の伝熱性能に関する知見

管渠内採熱する熱交換器と取水して採熱する熱交換器の性能に関する国内における知見を紹介する。

3.1. 管周壁採熱型下水熱交換器の熱通過率に関する研究¹³⁾

本既往研究は未処理下水での管周に樹脂製熱交換器を設ける方式の伝熱機構を明らかにしている(図19)。

管周に螺旋状に熱交換機能を付加させた熱交換器形式があり、この伝熱モデルが示されている。この熱交換器形式の場合、管内空気とも熱交換を行い、その中で管内空気の熱伝達には対流熱伝達だけでなく凝縮熱伝達も生じる。実験用下水管に下水を0.32 m/sで流して熱流と温度を計測している。管周に熱交換機能をもたせた場合における下水接触面の熱通過率(チューブ内熱源水と下水)がバイオフィルム成長前で伝熱面が清浄時105W/m²K、バイオフィルムの成長後伝熱面が汚れると53 W/m²Kとなること、管渠内空気接触面の熱通過率(チューブ内熱源水と管渠内空気)が24 W/m²Kであることが示されている。なお、伝熱チューブの熱抵抗は5.26×10⁻³ m²K/Wである。

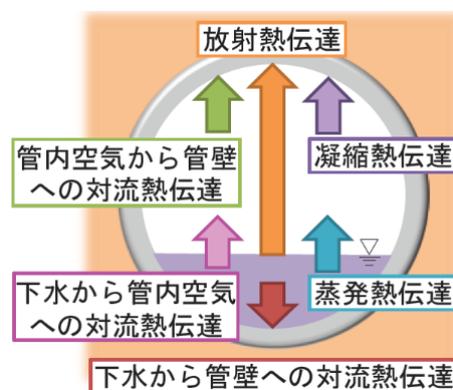


図19 管周に螺旋状に熱交換機能を付加させた熱交換器とその伝熱モデル(引用¹³⁾)

3.2. 下水熱回収熱交換器の汚れに関する研究^{14), 15)}

下水熱利用システムでは、熱交換器においてバイオフィーム（生物膜）が付着し、熱交換器性能を低下させる問題が懸念されるが、その付着特性や性能低下の程度に関する知見はまだ少ない。

下水中に暴露したテストピースへのバイオフィーム付着実験によりバイオフィーム（微生物膜）の成長モデルがバイオフィーム増殖係数をパラメータとして示されている。バイオフィーム重量の経時変化の実験例は図 17 であり、バイオフィーム量 W の最終値 C が下水流速 v (m/s) に依存していることが示されている¹⁴⁾。バイオフィームの成長は温度にも依存しており、増殖係数の温度依存の近似式が示されている。

熱交換器の汚れ係数も、バイオフィーム重量と同様の傾向を示すことが分かり、また一定流速を超えると（実験では流速 0.75m/s 以上）汚れ係数の経時的増加が起こらないことが示されている¹⁵⁾。流速を上げるとバイオフィームの成長が抑制され熱交換器の性能が向上することから、流速の高い管路において熱交換器を敷設することが推奨される。またドイツにおける事例で紹介したように下水のフラッシング装置によりバイオフィームを洗浄することは効果があるが、わが国ではフラッシングに依らなくても降雨時の雨水による洗浄効果を期待することもできよう。

本実験は大阪市内の下水処理場で行った。図20にバイオフィームの計測実験設備写真と試験用熱交換単管、テストピースの概略図を示す。テストピースの形状は平板型(80mm×50mm)であり、テストピースの裏側にマグネットシートを接着し、アングルで固定したステンレスボードに張り付けている。実験水槽内において、下水の流れと平行にテストピース(片側40枚×2列)を配置している。図21にバイオフィーム付着重量の経時変化の計測例を示す。下水管路実環境下において、熱交換器に付着するバイオフィームの成長因子と、バイオフィームの付着による熱交換器の性能低下に関する考察は文献^{14), 15)}を参照されたい。

二重管式熱交換器の構成を図22、図23に示す。内管内の下水流速を1m/sとした管内熱伝達率の計測事例は図24であり、初期の清浄状態の熱伝達率は1400W/m²Kであるのに対し、300時間経過後は400W/m²Kまで低下している。

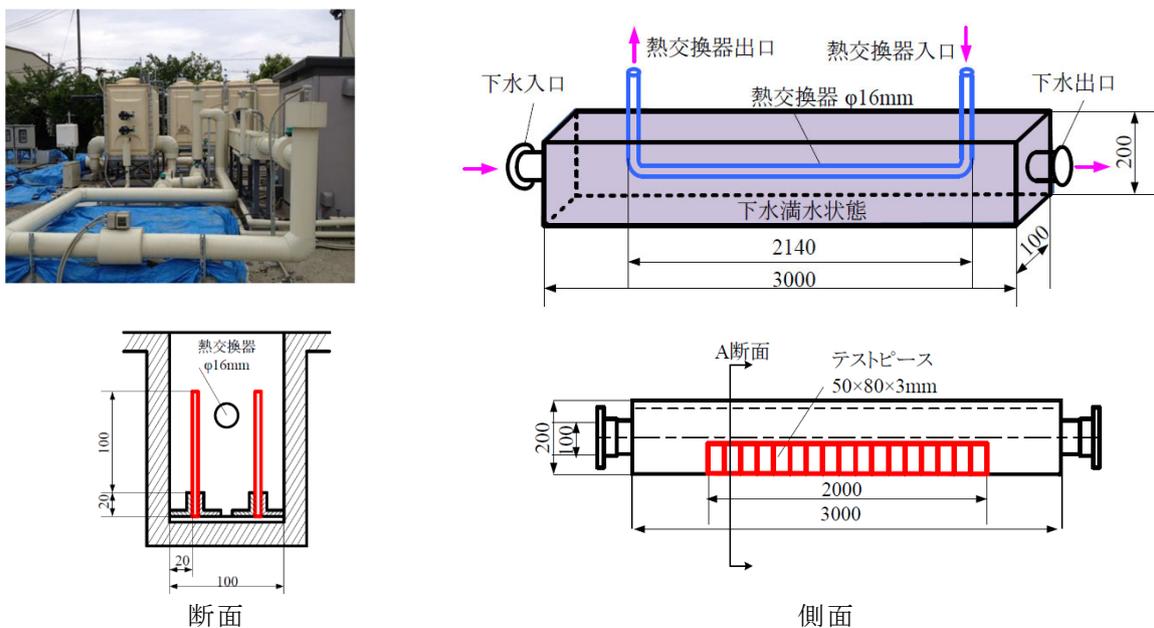


図 20 バイオフィーム計測実験装置¹⁴⁾

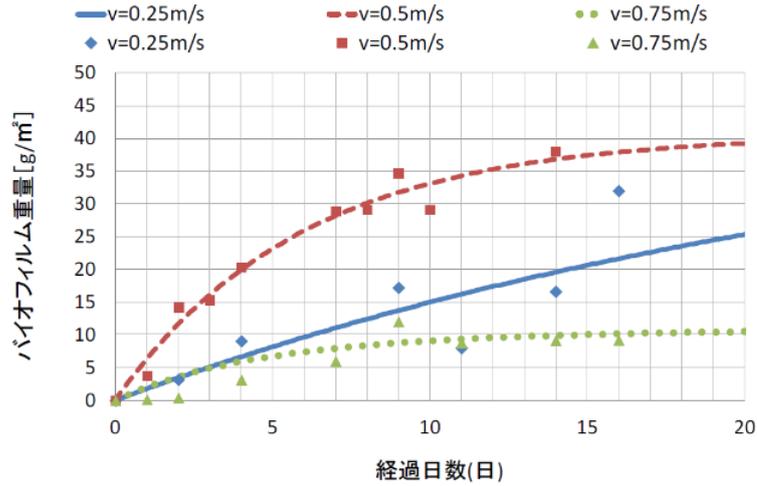


図 21 バイオフィーム重量の経時変化¹⁴⁾ (バイオフィーム付着試験)

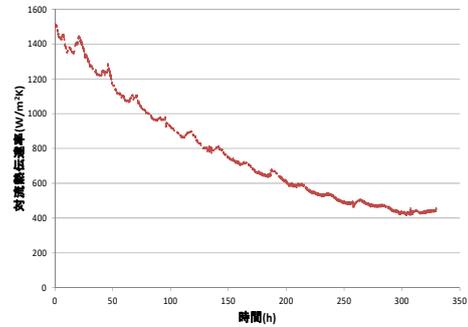
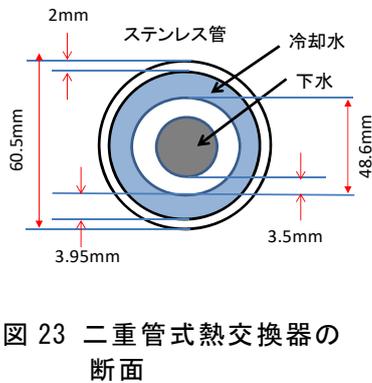


図 22 二重管式熱交換器

図 23 二重管式熱交換器の断面

図 24 二重管式熱交換器の内管内 (下水側) 熱伝達率の計測例 (流速 1m/s)

3.3. 管渠内設置金属製熱交換器の性能¹⁶⁾

未処理下水を用いて、3種類の熱交換器の性能を調べている。長方形断面の熱交換器で伝熱面積基準の熱通過率は汚れた状態で $271 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、洗浄後 $613 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、熱交換器設置面積基準の熱通過率は汚れた状態で $440 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、洗浄後 $992 \text{ W/m}^2\text{K}$ となっている。ただし下水流速は 0.3 m/s である。

3.4. 管渠外設置流下液膜熱交換器の性能

流下液膜式熱交換器は、下水を液膜状に流下させるため、他の熱交換器と比較して少量の取水下水流量で熱交換を行うことができることと、洗浄が容易であることから有望技術と期待され、未処理下水を用いた実験結果が報告されている。

試験開始時の熱通過率は $2 \text{ kW/m}^2\text{K}$ であるが 72 時間後には熱源水温度 5°C で $1.7 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 、熱源水温度 10°C で $1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ と差がある。熱源水温度が低いほうが、熱交換器表面温度が低くなり、バイオフィームが付着し難いことが観察されている (図 25)。

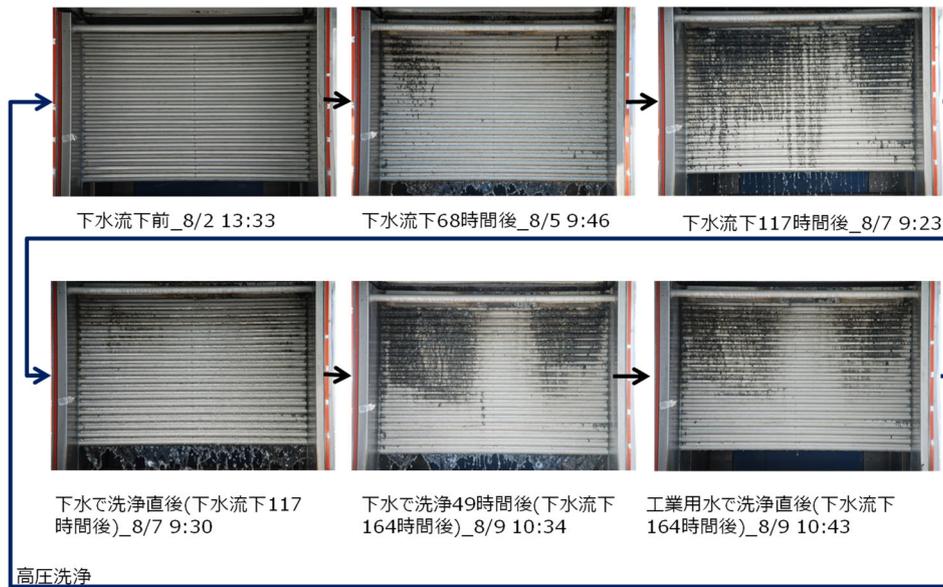
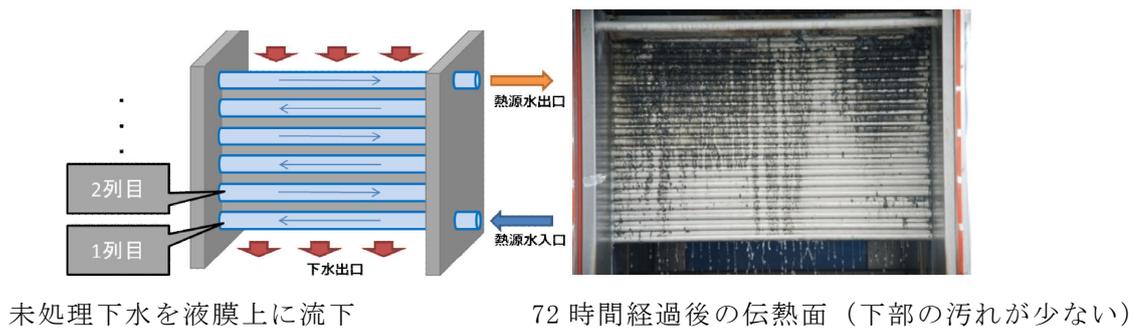


図 25 流下液膜熱交換器

4. まとめと下水管渠における熱利用普及へ向けた課題

4.1. まとめ

下水管渠の熱利用の国内外の動向について比較した。下水管渠における熱利用は国内では導入箇所が増えつつあるが熱利用規模が極めて小さく最大でも 100kW 程度である。

スイス、ドイツでは金属製の管渠内熱交換器が導入されており、採熱量が規模の小さい数 10kW から大規模な 1000kW を超えるものまでである。熱交換器敷設長さ当たり採熱能力はスイス、ドイツの事例では 1.86～5.2 kW/m である。熱交換器設置面積当たりの採熱量は 2.4～4.9 kW/m² である。国内の事例では公表情報が見当たらず比較が困難である。

管渠から取水する方式はスイスの高層オフィスビルで導入された事例があり、採熱量は 480kW であり、機械式かきとり機能を持つ熱交換器が導入されている。

中国では地域熱供給のため幹線管渠から取水した下水を利用している事例がある。集合住宅 16 棟 20 万 m² へ熱供給する未処理水を熱源とする施設が構築・運用されている。熱源のヒートポンプ容量は 1200USRT×2 台 (8400kW) である。下水熱交換器の熱通過率は、初期値では 1500～1800W/m² K となり、汚れた際には 60% 程度に低下する。

わが国では管渠から取水した方式が倉敷市に導入されており、採熱量は 65～70kW である。中国の能力 810kW の熱交換器と同等のサイズであるが、熱交換器の能力は 1/10 以下であり、普及にはより一層の高性能化が必要である。

熱交換器表面におけるバイオフィーム成長に影響する要因として下水温度、伝熱面の流速、水質、伝熱管の材質が挙げられる¹⁵⁾。本報告ではバイオフィーム対策の重要性を示すため、熱交換器の性能低下の事例を紹介した。

4.2. 普及へ向けた課題

(1) 管渠設置熱交換器の施工技術開発

海外の導入事例調査や未処理水を用いた試験により、管渠内の金属製熱交換器は熱交換性能が樹脂製の3倍程度であり優れているが、管渠内への設置するための施工技術が確立されて無いたことが普及を阻害している。金属製熱交換器の製造メーカーは管渠内の施工に関する知識が無いため、管渠の流下阻害対策など構造要件を熟知した下水道の設計コンサルタントや施工会社との協業により施工技術を開発する必要がある。

(2) 管渠外熱交換器用スクリーンの開発

処理場向けの大規模なスクリーンは存在するが、取水量50L/s程度の低コストのスクリーンが必要である。この程度の取水量があればインバーターボ等の高効率なヒートポンプで温水暖房が可能となる。

(3) 管渠外熱交換器の開発

バイオフィーム対策を施した低コストの熱交換器の開発が必要である。

特に2.3.3で紹介したような機械的なかきとり機構を持つ低コスト熱交換器の開発が待たれる。

(4) 性能指標の統一と性能の公表

これまで国内で導入された設備は殆どの事例でその性能を評価するための十分な情報が公表されていないことにより、性能向上のメカニズムが働いていない。スイスの事例で示した性能指標が参考となるが、これに熱源水温度と下水温度および下水流速の期間平均の値を追加したい。可能なら、下水の水質や熱交換器表面温度によりバイオフィームの成長が異なるため、これらの情報も付加されると望ましい。採熱量は熱源水温度と下水温度の温度差により変わるので、採熱量とセットで示す必要がある。性能表示が統一されていれば、方式や機器の費用対効果の比較が容易となり、より良いシステムの導入が進むであろう。

文献

- 1) 「2020年度成果報告書、再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減技術開発/再生可能エネルギー熱利用技術を用いた地域熱供給に係る調査」報告書、公開日2021年08月13日、NEDO成果報告書データベースシステム、https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html (2021年10月アクセス)
- 2) 下水熱による地域熱供給箇所(2020年8月末時点)、国土交通省
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001370195.pdf> (2021.10アクセス)
- 3) 下沢 岳志、諏訪湖流域下水道における下水熱利用への取組、
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000746718.pdf
- 4) 長野県諏訪市の病院でE S事業開始/下水熱回収システム導入、日刊建設工業新聞、2018年5月2日3面、<https://www.decn.co.jp/?p=99308>
- 5) 下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト予備調査)、下水熱蓄熱融雪システムの開発に関する研究報告書、国土技術政策総合研究所 委託研究、平成29年3月
- 6) 小川 剛史、管路外設置型熱回収方式による下水熱利用システムの性能検証と課題(特集 下水道の持つポテンシャル)、下水道協会誌、57(695)、16-18、2020-09
- 7) Ernst A. Müller, Nachhaltige Abwasserwärmenutzung als regenerative Energie - Modellprojekt zur Abwasserwärmenutzung in Baden-Württemberg
https://www.rvna.de/site/Regionalverband+Neckar+Alb/get/params_E551831961/10422758/Abwasserwaerme%20PA%2020141125%20E%20A%2020M%C3%BCller.pdf (2021.10アクセス)

- 8) スイス連邦エネルギー局、Heizen und Kühlen mit Abwasser Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden、EnergieSchweiz (エネルギースイス誌)、https://www.fws.ch/wp-content/uploads/2018/05/Heizen_Abwasser.pdf (2021.10 アクセス)
- 9) René Buri, Beat Kobel, WÄRMENUTZUNG AUS ABWASSER, Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen, Bundesamt für Energie, November, 2004、https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Energieeffizienz/Abwasserwaermenutzung/Leitfaden_Ratgeber/Leitfaden_Waerme_aus_Abwasser.pdf (2021.10 アクセス), 下水熱利用-排水処理プラントおよび下水道システムの所有者、運営者、計画者向けガイドライン-
- 10) Dr. Jürgen Görres, Neckarpark Stuttgart -Abwasserwärme für ein Stadtquartier, Amt für Umweltschutz, Abteilung Energiewirtschaft, <https://docplayer.org/35748153-Neckarpark-stuttgart.html> (2021.11 アクセス)
- 11) かきとり機構付き熱交換器、
https://www.huber.cn.com/fileadmin/01_products/11_energy_from_ww/11_rowin/pro_rowin_en.pdf (2021.9 アクセス)
- 12) 導入事例 (Winterthur の高層オフィスビル)、<https://www.huber.de/de/huber-report/praxisberichte/energie-aus-abwasser/drei-huber-projekte-zur-abwasserwaermenutzung-in-der-schweiz.html>
- 13) 瀬川勇輝, 三毛正仁, 澤部孝一, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 2013, 下水熱回収熱交換器の熱通過率に関する実験 (第1報) 管周壁採熱型下水熱交換器の熱通過率に関する基礎的検討. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 2013.10, 225-228.
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2013.10.0_225
- 14) 崔林日, 三毛正仁, 西岡真稔, 鍋島美奈子, F.Craig, 澤部孝一, 中尾正喜, 貫上佳則, 2013. 下水熱回収熱交換器の熱通過率に関する実験 (第2報) 下水熱回収熱交換器の汚れに関する基礎的検討. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 2013.10, 229-232.
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2013.10.0_229
- 15) 崔林日, 三毛正仁, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 2014. 都市域における下水管路網を活用した下水熱利用・熱融通システムの研究 (第11報) 未処理下水中における伝熱管の汚れに対する下水温度・流速の影響. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 2014.10, 5-8.,
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2014.10.0_5
- 16) F.Craig, 三毛正仁, 崔林日, 中尾正喜, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 三宅晴輔, 澤部孝一, 2013. 下水熱回収熱交換器の熱通過率に関する実験 (第3報) 管内設置方熱交換器性能把握について研究. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 2013.10, 233-236.
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2013.10.0_233
- 17) 澤部孝一, 中尾正喜, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 三毛正仁, 崔林日, 中村賢司, 北野宏貴, 2014. 都市域における下水管路網を活用した下水熱利用・熱融通システムの研究 (第10報) 下水環境下における流下液膜式交換器試験結果. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 2014.10, 1-4.
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2014.10.0_1