都市排熱“下水熱”を利用した高効率ヒートポンプシステム

Advanced Heat Pump Systems Using Waste Heat “Sewage Heat” in the Urban Area

栂野 良枝*1 Yoshie Togano
上田 憲治*2 Kenji Ueda
長谷川 泰士*3 Yasushi Hasegawa
宮本 潤*1 Jun Miyamoto
山口 徹*4 Toru Yamaguchi
澁谷 誠司*5 Seiji Shibutani

給湯や暖房システムへヒートポンプを適用することにより，建物全体のエネルギー消費の多くを占める給湯・暖房用途のエネルギー消費低減が期待されている。この低減効果は，都市排熱のひとつである”下水熱”を利用することにより飛躍的に向上する。しかしこれまで，民間事業者が広く下水熱を利用するための十分な技術・基礎データがあるとは言い難い状況であった。そこで都市の下水熱ポテンシャル評価手法から未処理下水を用いた実機スケールでの検証まで，下水熱の特徴を理解し下水熱利用のための主要技術の開発と合わせて実証した。その技術を適用した下水熱利用システムはボイラを主機とする従来システムと比較して，宿泊施設の給湯システムで年間エネルギー消費を29%削減，ランニングコストを69%削減を実現した。従来システムとのイニシャルコストの差額償却年数は4年程度となり，経済的メリットの大きいシステムになっている。本報は，これら開発と実証から得られた成果を体系的に整理し，下水熱利用の導入に必要な技術情報を提供するものである。

1. はじめに

わが国の最終エネルギー消費の内，給湯・暖房用の消費量は大きく，業務部門での割合は34%，家庭部門での割合は 55%を占めている(1)。さらに暖房や給湯の一般的なシステムは，ボイラなど化石燃料を利用した機器が多く，ヒートポンプ導入による省エネルギー効果が見込める。

ヒートポンプは，外気や排熱から熱をくみ取り，冷媒サイクルで昇温して温水を供給する。熱源温度が高いほど供給温度との差が小さく高効率となるため，熱源の選択が重要である。都市部では，炊事，洗濯，入浴など膨大な生活排熱の 30%～40%が下水に流入しており(2)，冬季でも18℃程度とヒートポンプの熱源として好適である。しかし，未処理下水の熱利用の事例は国内でも数件程度で，効果的に利用するための技術が確立されているとは言い難い。

下水熱利用開始までに技術面で必要な流れを図1に示す。これらの開発・実証は，各分野に精通している大学・企業と共同で行った。2011 年の独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業からスタートし，2014 年の委託事業終了まで，そして現在も普及に向けて活動を続けている。本報の各章に，主たる開発を行った大学・企業名を記載している。

*1 機械・設備システムドメイン冷熱事業部大型冷凍機技術部
*2 機械・設備システムドメイン冷熱事業部大型冷凍機技術部 次長 工博
*3 機械・設備システムドメイン冷熱事業部大型冷凍機技術部 技術士
*4 機械・設備システムドメイン冷熱事業部空調機技術部 主席技師
*5 機械・設備システムドメイン冷熱事業部営業部 主席技師

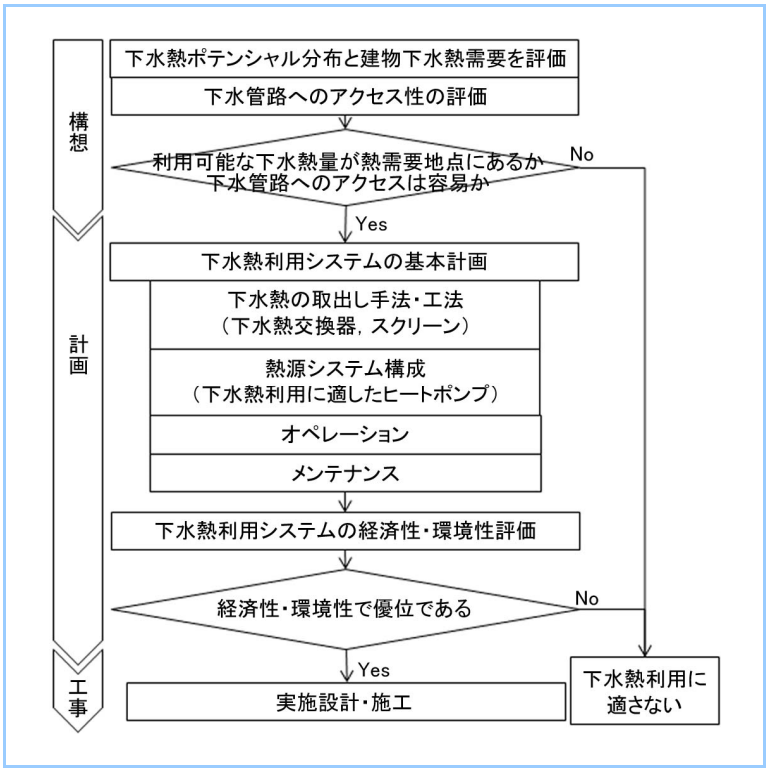


図1　下水熱利用開始までのフロー

2. 都市排熱”下水熱”の特徴

大阪市内の業務地域，住宅地域での下水流量の実測結果を図2に示す[3]。図中では，1日の積算下水流量を100%とした場合の各時刻を中心とした1時間の積算下水流量の比率を下水流量比率として表している。住宅地域（住宅が全面積の 72%を占める地域），業務地域（住宅が全面積の24%を占める地域）ともに真夜中にピークがあり，早朝はその半分程度と著しく低下する。

大阪市内の下水温度の実測結果を図3に示す[3]。下水温度，外気温ともに月間の全時間平均値である。下水温度は年間で 18℃（冬季）～30℃（夏季）の間を推移し，0℃（冬季）～30℃（夏季）まで変動する外気温と比べると安定している。特に冬季の下水温度は18℃と外気温より10℃以上高いため，ヒートポンプの熱源として有利である。

［（大）大阪市立大学，（株）総合設備コンサルタント］

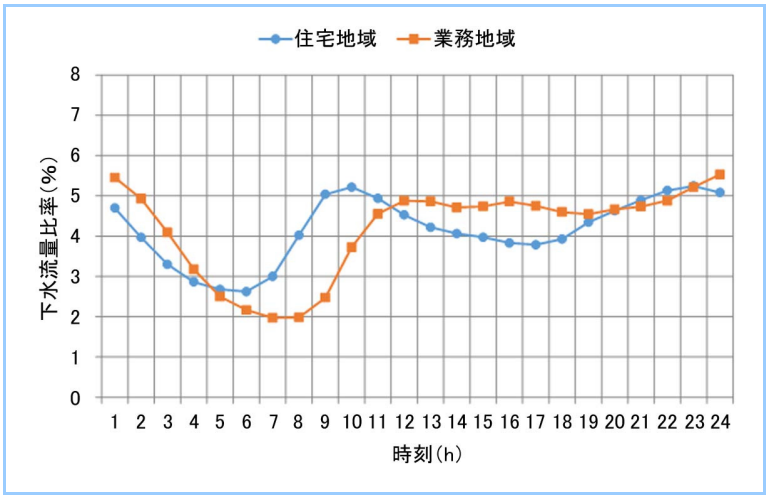


図2　下水流量測定結果(大阪市)

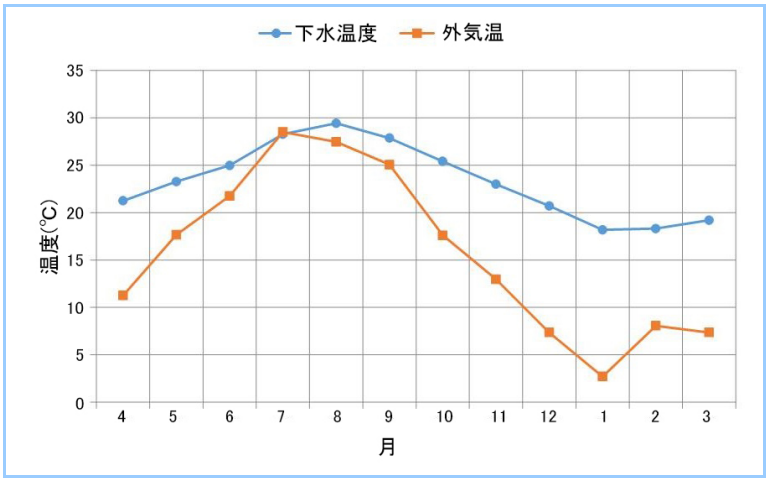


図3　下水温度測定結果(大阪市)

3. 下水熱を効果的に利用するための主要技術

下水熱を効果的に利用するためには，下水熱の分布を把握し，熱を効率良く安定して取り出し，その熱を用いて高効率に温水を供給することが必要である。本章では，大阪市内で実証したそれら主要技術を紹介する。

3.1　下水熱の分布・賦存量の推定技術（ポテンシャルマップ）

下水熱利用は，時々刻々と変化する下水熱の供給ポテンシャルと，建物の下水熱需要量との熱需給バランスがとれてはじめて成立する。しかし現状は，事業者がこのような検討を行う際に必要となる情報を整備し提供するための技術が確立しているとは言い難い。そこで，下水流量・温度の推定手法から下水熱ポテンシャルを算出し，建物の下水熱需要量の地理情報と照らし合わせ，下水熱利用の適用可能性を定量化できる手法を開発した（図4，5）。

本手法の一部を用いて，国土交通省と環境省は，平成 25 年度より6つの地域（仙台市，浦安市，豊田市，茨木市，神戸市，福岡市）で下水熱ポテンシャルマップを作成し，“下水熱ポテンシャルマップ作成の手引き”[4]を公開している。

[(大)大阪市立大学，(株)総合設備コンサルタント]

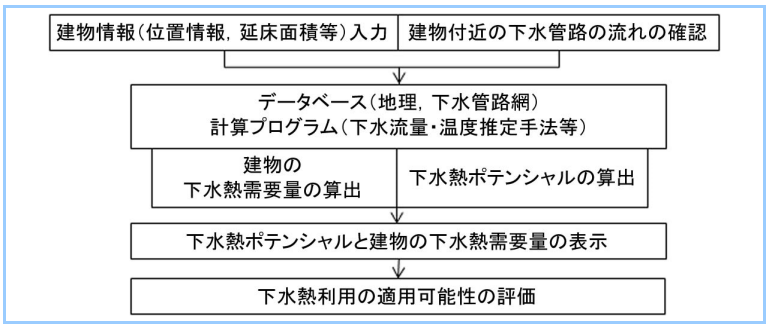


図4　下水熱利用の適用可能性評価の流れ

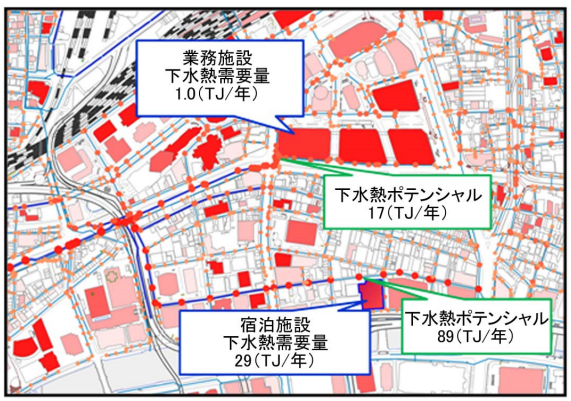


図5　熱需給バランスの比較検討例

3.2 下水熱を取出す技術(下水熱交換器, スクリーン)

下水熱を取出す熱交換器には, 下水管路内に設置する管路内設置型と, 下水管路からスクリーンを通して取水した下水を利用する管路外に設けられる管路外設置型があり, 下水流量や, 人孔(マンホール)構造・管路断面寸法などが選定の指標となる(図6)。

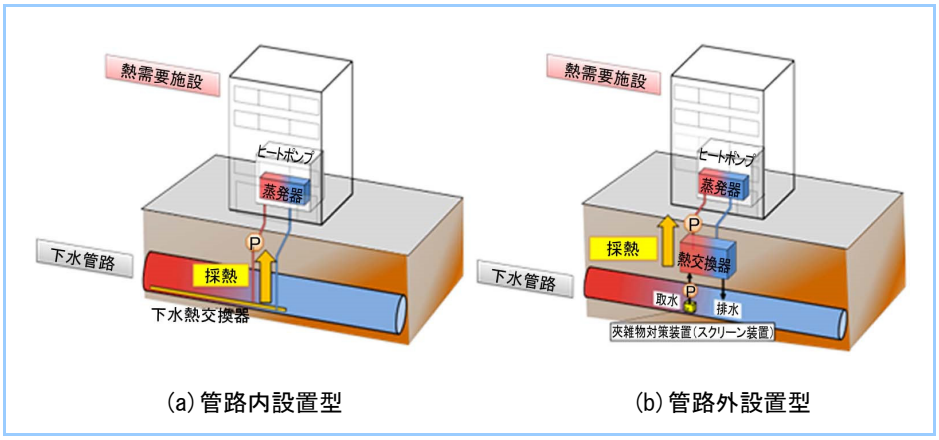


図6 下水熱の取出し方法

(1) 下水熱交換器

夾雑物やバイオフィルムなどが含まれる下水から, どの程度効率よく熱を採り出せるかをバイオフィルムが付着した実機スケールで実測・検証し, その効果を確認した(表1)。

表1 下水熱交換器

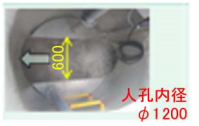
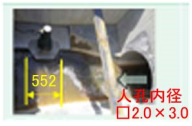
分類		管路外設置型			管路内設置型		
熱交換器方式		樹脂+アルミ	流下液膜式	二重管式	管路底部設置型 並列型	管路底部設置型 直列型	管路一体型 (樹脂)
外観写真							
流速 (m/s)	熱源水	0.25	2.70	0.75	0.30		0.24
	下水	0.10	0.52kg/(m・s)	1.00	2.80	1.40	0.13
熱通過率 (W/m²・K)	初期	180	2000	800	850	800	120
	生物膜成長後	120	1300 (120h 経過時)	350 (120h 経過時)	350	280	100
	洗浄後	180	1700	650	600	400	—
洗浄	用水	工業用水	下水	工業用水	下水		洗浄しない
	方法	配管単位長さあたり 0.52(L/min・m)の流量で散水	1.0kg/(m・s)の流量で散水	1.5m/s で通水	0.9m/s で通水		
	時間	120 分	3分間	5分間	1分間		
熱通過率用伝熱面積の定義		熱交換コイル外径基準 (下水との接触面)	熱源水伝熱管外径基準 (下水との接触面)	下水管内径基準 (下水との接触面)	熱交換器と下水との接触面 (外径の上半分)		熱源水が流れているリブ部分の下水接触面
下水熱回収への適性		△	◎	○	◎		△

(2) スクリーン

管路外設置型熱交換器を用いる場合, 下水取水時に夾雑物をスクリーンで捕捉する必要がある。各々の自動洗浄機能も評価し, 移動式スプレー方式がレーキ掻き取り方式より有効であることを確認した(表2)。

[(大)大阪市立大学, 中央復建コンサルタンツ(株)]

表2 下水取水時の夾雑物捕捉用スクリーン

スクリーン		底部 φ3mm パンチングメタル	底部 2.5mm 縦型 水流平行スリット	側部 2.5mm 横型 水流平行スリット	側部 2.5mm 横型 水流平行スリット
外観					
取水	能力 (L/s)	14	50	14	10
1台あたりの供給可能世帯（給湯負荷換算）		500 世帯	1300 世帯	500 世帯	350 世帯
洗浄	方式	油圧駆動 移動式スプレー	電動モータ 回転レーキ掻き取り	電動モータ 回転レーキ掻き取り	電動モータ 回転レーキ掻き取り
	詳細	管軸方向に移動するノズルから出るスプレー洗浄水で目穴の夾雑物を吹上げ，下水で排出。	なし	なし	なし
施工	方法	ドライ化施工	ドライ化施工	ドライ化施工（人孔構造，流量によっては片側通水施工可能）	ドライ化施工（人孔構造，流量によっては片側通水施工可能）
	設置日数	1日	1日	1日	1日
維持管理		・常時水没している油圧シリンダーの耐食，短命化リスクがある。 ・人孔内で点検を行う際は，洗浄スプレーを停止する必要がある。	・レーキの真上を流体が通過するので歯やスリットの損傷リスクが大きい。	・捕捉夾雑物が乾燥すると回転レーキ損傷の原因になる。	・掻き出された夾雑物が堆積し，歯の移動障害や変形の原因になる。
下水熱回収への適性		○	△	△	×

3.3 下水熱を利用し熱を供給する技術（水熱源ヒートポンプ）

ヒートポンプの性能は温水と熱源水との温度差が小さいほど効率がよい。熱源として下水[18℃（冬季）～30℃（夏季）]が利用できれば，従来の外気[0℃（冬季）～30℃以上（夏季）]を利用するヒートポンプより，特に気温が低い冬季には飛躍的な効率向上が期待できる。また温水についても，上述の通り熱源水との温度差が小さいほど効率がよいため，暖房用途は暖房負荷により温水温度を変化させることを想定し，温水 35℃仕様とした。

ヒートポンプの仕様を表3に，外観を図7に示す。宿泊施設や集合住宅用途を想定し，能力は1モジュール 30kW，1台で給湯，暖房運転が可能とした。性能は，給湯で 6.91，暖房で 4.01 と，ともにトップクラスの性能を有する。

［三菱重工業(株)］

表3 ヒートポンプ仕様

項目	仕様	
	空調 暖房	給湯
能力	30kW	30kW
温水温度	入口 30，出口 35℃	入口9℃，出口 65℃
熱源水温度	入口 15℃	入口 15℃
下水温度（想定）	18℃	
COP 注1)	6.91	4.01
冷媒	R410A	
L×W×H	0.784m×1.05m×1.55m	
本体質量	450kg	

注1）Coefficient of Performance（成績係数）。
値が大きいほど省エネルギー性に優れる。

図7 ヒートポンプ外観

4. 下水熱ヒートポンプシステムの環境性・経済性

4.1 下水熱ヒートポンプシステムの設計・運用の考え方

下水熱を効果的に利用するには，従来と比較してシステム設計・運用に工夫が必要である。

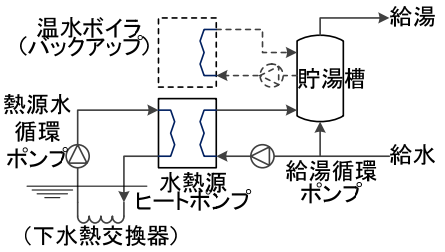
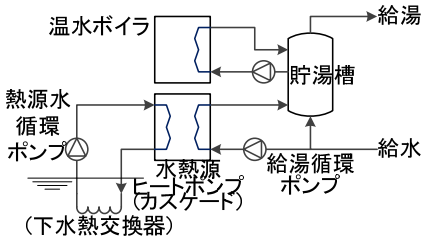
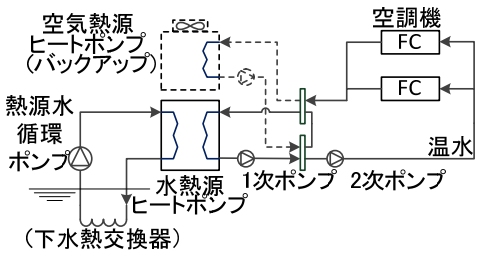
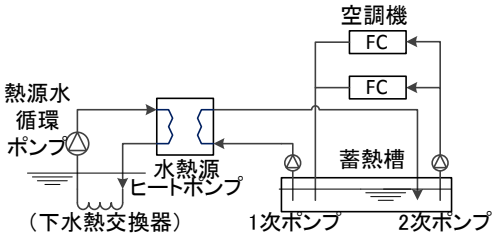
① 下水温度・流量の季節・時間毎変動を考慮し，安定かつ需要に見合った熱利用を可能とすること。変動を見越した蓄熱・貯湯やバックアップの計画が必要である。

② ヒートポンプの二次側まで含めた高効率利用ができるよう，躯体蓄熱や輻射暖房など供給温水温度が低く設定できる手法を選択すること。下水温度は冬季で気温より約 10℃以上高く，ヒートポンプの温水温度を適切に低くできればより高効率利用が見込める。

4.2 給湯・暖房における効果的な下水熱ヒートポンプシステム

給湯・暖房需要の大きい宿泊施設(90 室)，集合住宅(60 戸)を対象とし，上述のヒートポンプや設計・運用の工夫をもとに下水熱を利用した給湯・暖房システムを計画した(**表4**)。そして，比較的温暖な地域(大阪相当)で，一般的な給湯・暖房方式と季節毎レベルで環境性・経済性を比較しながら効果的な構成を抽出した。その結果，環境性・経済性(ランニングコスト)は，下水熱利用の場合は，何れの方式を採用しても従来方式に対し高い効果を得ることができた。

表4 下水熱を利用した給湯・暖房システムの概要

給湯	従来	ボイラ	—
	下水熱	①水熱源ヒートポンプ＋ボイラ(バックアップ) 下水流量が小さい時など下水熱が減少した際に，バックアップのボイラを稼働する。	
		②水熱源ヒートポンプ＋ボイラ(カスケード) 水熱源ヒートポンプで給水→40℃，ボイラで 40℃→65℃に昇温する。 水熱源ヒートポンプの温水出口温度を低くし高効率を狙う。	
暖房	従来	空気熱源ヒートポンプ	—
	下水熱	③水熱源ヒートポンプ＋空気熱源ヒートポンプ(バックアップ) 下水流量が小さい時など下水熱が減少した際に，バックアップの空気熱源ヒートポンプを稼働する。	
		④水熱源ヒートポンプ(蓄熱) 下水熱の変動を蓄熱槽で吸収する。	
		⑤水熱源ヒートポンプ(蓄熱＋変温) 蓄熱槽に加え，暖房負荷が小さい時，温水出口温度を低くし高効率を狙う。	

① 給湯

(a) 水熱源ヒートポンプを優先的に運転し，水熱源ヒートポンプの能力が不足する場合にボイラを利用する[水熱源ヒートポンプ＋ボイラ(バックアップ)方式](表-4-①)が最も有望であった。宿泊施設では，ランニングコスト 69%削減，エネルギー消費量 29%削減。集合住宅では，ランニングコスト 69%削減，エネルギー消費量 28%削減となる。

(b) 給湯負荷は通年で存在するため水熱源ヒートポンプの年間稼働率が高く，償却年数は4年程度と経済的なメリットが大きい。

② 暖房

(a) 蓄熱槽を備えかつ供給温水温度を月毎の負荷に合わせて変化させる[水熱源ヒートポンプ(蓄熱＋変温)方式](表-4-⑤)が最も有望であった。宿泊施設では，ランニングコスト 41%削減，エネルギー消費量 33%削減。集合住宅では，ランニングコスト 23%削減となる。

(b) 暖房時にはランニングコストを40%程度削減可能であるが，暖房が必要な期間は限られており，水熱源ヒートポンプの年間稼働率が給湯より低い(試算では年間 150 日)ため償却年数が長い。宿泊施設では 10 年以上，集合住宅では 30 年以上となる。

[関西電力(株)，三菱重工業(株)]

5. まとめ

都市部の下水は，ヒートポンプシステムの熱源として利用することで大幅な省エネルギーが実現することが期待されながらも，利用に至っているとは言えない。本研究では，開発した下水熱利用に必要な機器を大阪市内の下水処理場で実証した。これにより，下水熱交換器やスクリーンの洗浄技術，夾雑物やバイオフィルムの付着後・洗浄後の性能など，各機器の特性を把握し，ヒートポンプシステムの実施設計に必要なデータを取得できた成果は非常に大きい。これら詳細は，共同研究先の技報[5][6]や学会発表[7]にて報告している。またあわせて国土交通省の“下水熱利用マニュアル(案)[8]”にも多くのデータを提供している。

今後，本技術を普及させていくには，下水道事業を担う行政と連携・支援を図りつつ，有効な下水熱ポテンシャルがあり，かつ需要とマッチする地区において，小規模であっても先進的な適用事例を積み重ねることが非常に重要になってきている。

本報を纏めるにあたり，(大)大阪市立大学，関西電力(株)，中央復建コンサルタンツ(株)，(株)総合設備コンサルタント，に多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

(1) エネルギー白書，資源エネルギー庁，(2014)
(2) 宇梶正明ほか，生活排水を熱源としたヒートポンプ給湯システムの実用化に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集 No.51 (1993-2) p.79
(3) 三毛正仁ほか，下水管路における流量・温度推定のための下水流量・温度実測，空気調和・衛生工学会論文集 No.202 (2014-1) p.11
(4) 下水熱ポテンシャルマップ作成の手引き，国土交通省，(2014)
(5) 総合設備コンサルタント技術年報 Vol.39 (2014-10)
(6) 中央復建 C.技報 No.45 (2015-1)
(7) 中尾正喜ほか，下水管路における下水熱利用技術の開発，第 51 回下水道研究発表会講演集 (2014) p.526～552
(8) 下水熱利用マニュアル(案)，国土交通省，(2015)