

再エネ熱利用と衛生分野について

都市の足元にある再エネ熱資源として、帯水層および下水管路網がある。うめきた2期においては帯水層蓄熱と共に、下水熱利用も導入されている。

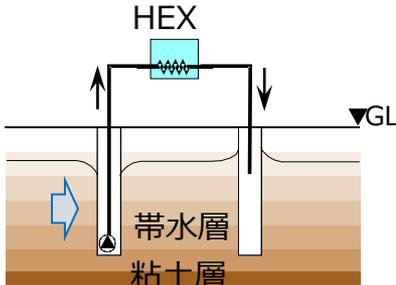
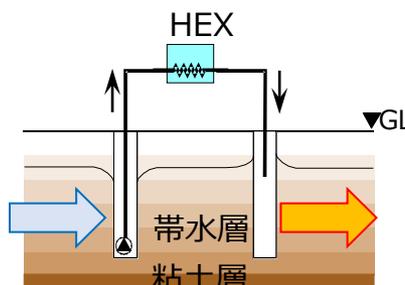
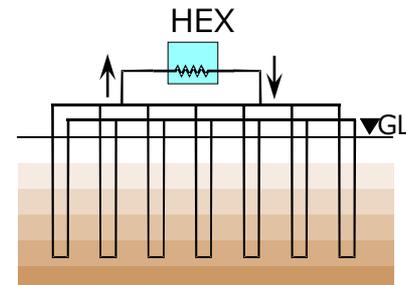
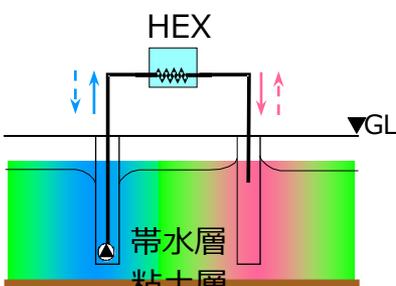
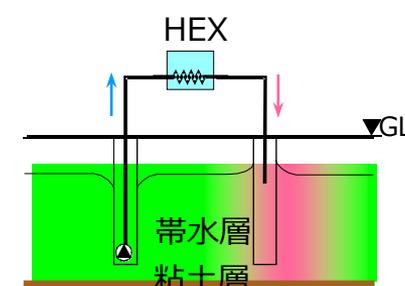
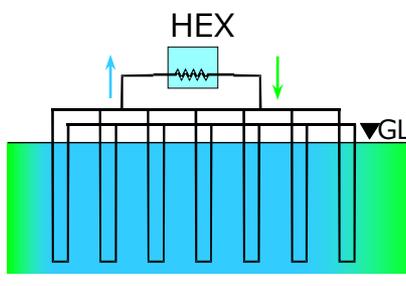
本講演ではこの二つの熱資源の魅力である熱利用ポテンシャルに加えて採熱設備における高性能化と性能維持のための課題について解説する。

帯水層、下水管路網の熱利用には地下水および未処理下水を熱媒体として用いるが、地下水および未処理下水は何れも浄化されていないため、採熱には各々の性状に則した工夫が必要である。

この高性能化と性能維持に関する技術動向と課題を説明し、給排水衛生分野が課題解決に取り組まれることを期待したい。

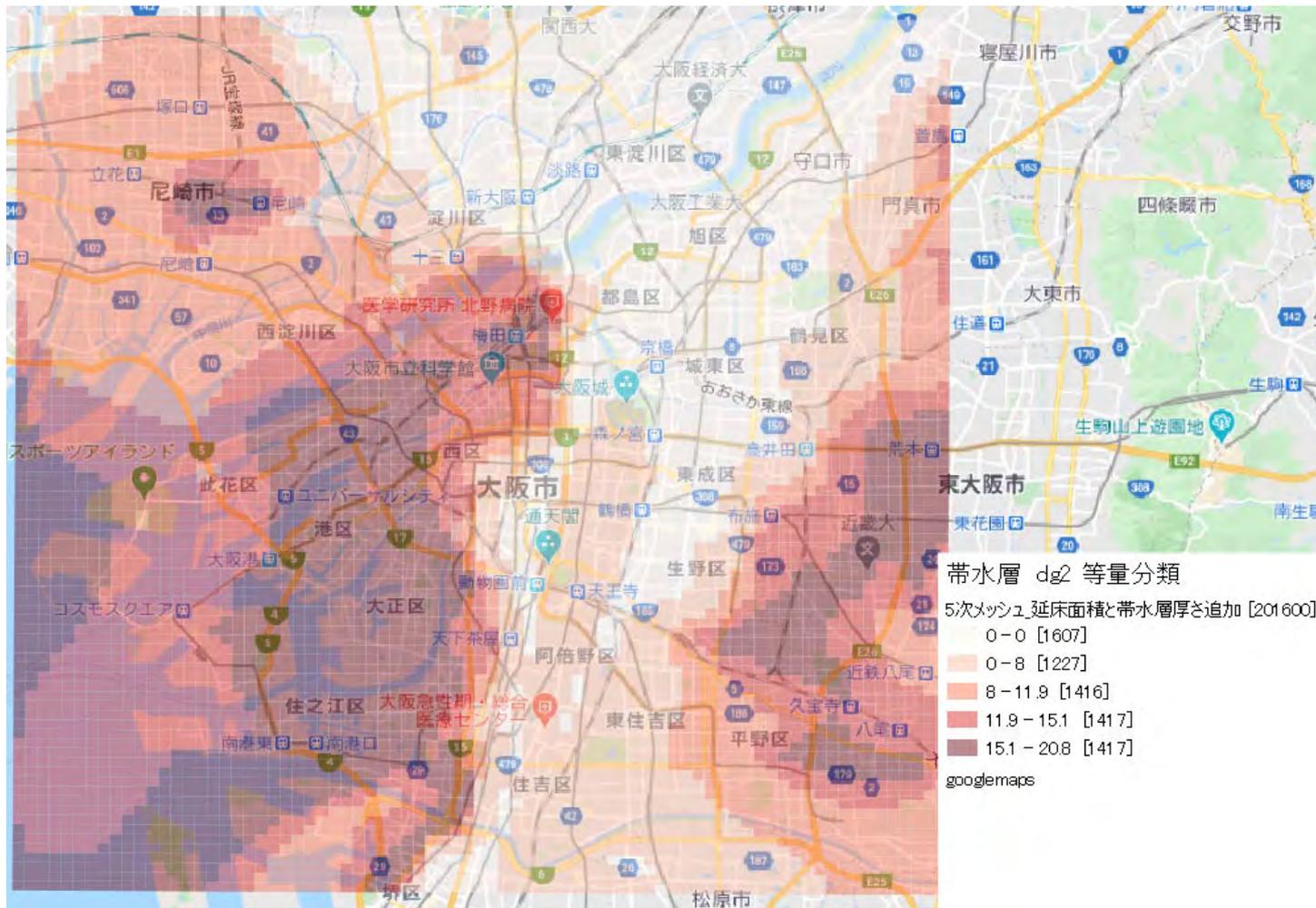
報告者：中尾 正喜

大阪公立大学 特任教授（大阪市立大学名誉教授）

システムの種類	帯水層蓄熱 (オープンループ方式)	熱源水利用 (オープンループ方式)	土壌蓄熱 (クローズドループ方式)
システム概念図	 <p>自然条件下、または止水壁などにより地下水流速が遅い場合、地下水を介して蓄熱する。</p>	 <p>地下水流れの上流から揚水し熱源水として利用する。排熱は下流から還水する。</p>	 <p>地中に熱交換パイプを埋設し、熱伝導により蓄熱する。地下水流れが速いと蓄熱効果は少なくなる。</p>
夏季 (冬季)	<p>冷熱取出し + 温熱蓄熱 (冷熱蓄熱 + 温熱取出し)</p> 	<p>地下水熱取出し + 温熱放熱 (地下水熱取出し + 冷熱放熱)</p> 	<p>冷熱取出し (温熱取出し)</p> 
取り出し可能な熱量	<p> $Q[\text{kW}] = 4.19[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \cdot F[\text{kg}/\text{s}] \cdot \Delta t[\text{K}] = 4.19 F \Delta t[\text{kJ}/\text{s}]$ 例えば100[t/h]の揚水を5℃差で使えば、700[kW] </p>	<p> $Q[\text{kW}] = n \cdot 0.08[\text{kW}/\text{m}] \cdot L[\text{m}]$ 100[m]の井戸10本で、80[kW] </p>	

大阪市域で利用可能なエリア

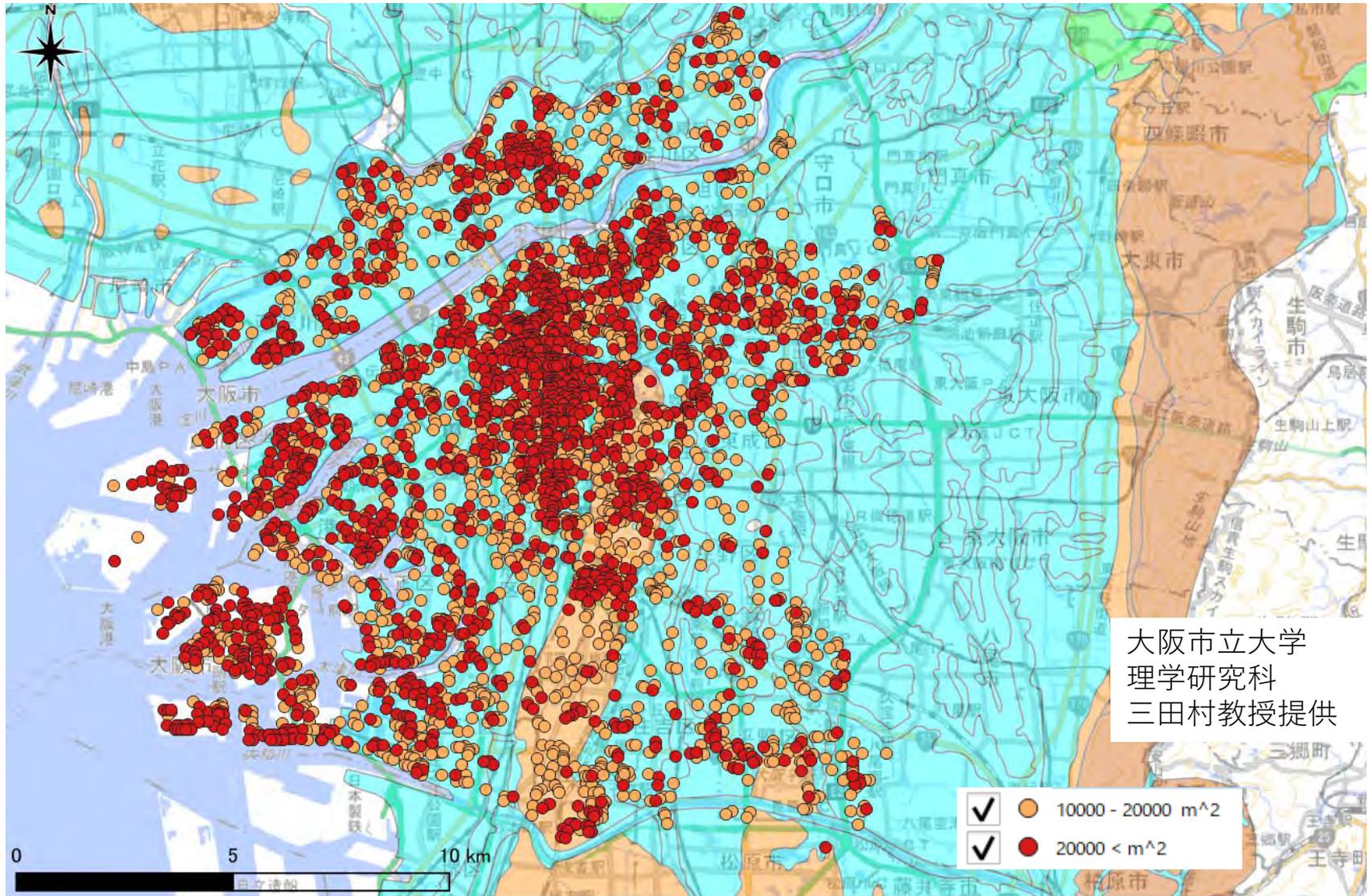
帯水層蓄熱のポテンシャルマップが大阪市により公表されている。



帯水層Dg2の厚さ分布 m

大阪市立大学
理学研究科
三田村教授提供

熱需要施設の分布

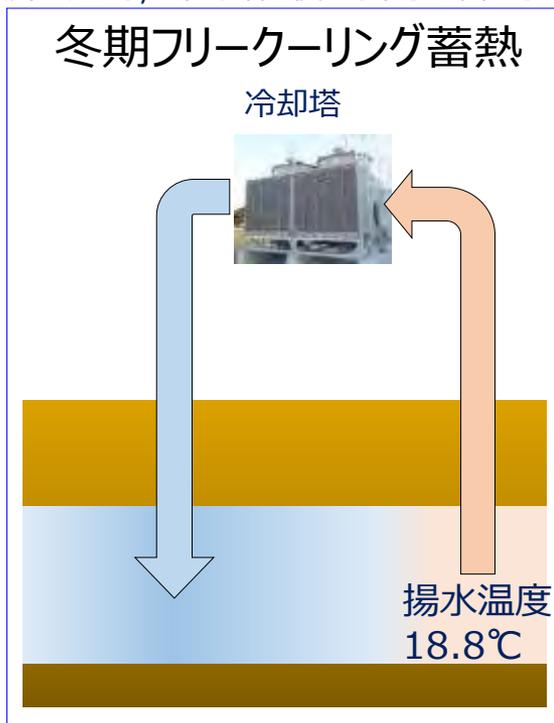


大阪市域の1万m²以上の延床面積の施設

大阪万博は**2025年4月13日から10月13日に開催**される。そのため、地中の大規模な蓄熱機能を活用して、2024年12月から2025年3月までの**冬期***に、**低温外気により地中の帯水層を冷やしておき、開催期間に万博地域熱供給設備用熱源として活用**する。なお、熱源水として活用した後で、屋外空間のクールスポットを実現するための冷熱源としてとして活用することも可能である。

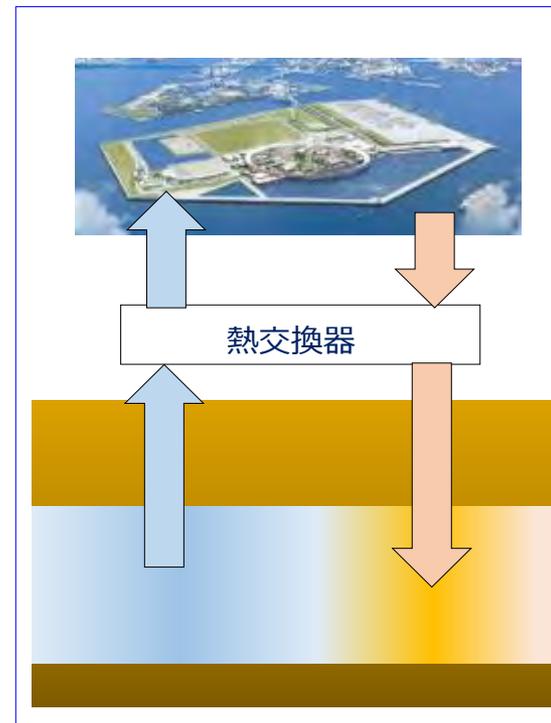
舞洲の地層データにより、2つの帯水層個々に冬期冷却し、万博開催中に活用する場合の揚水温度シミュレーション結果と人工排熱低減効果を示す。

低外気温時、冷却塔を使って冷水を蓄える

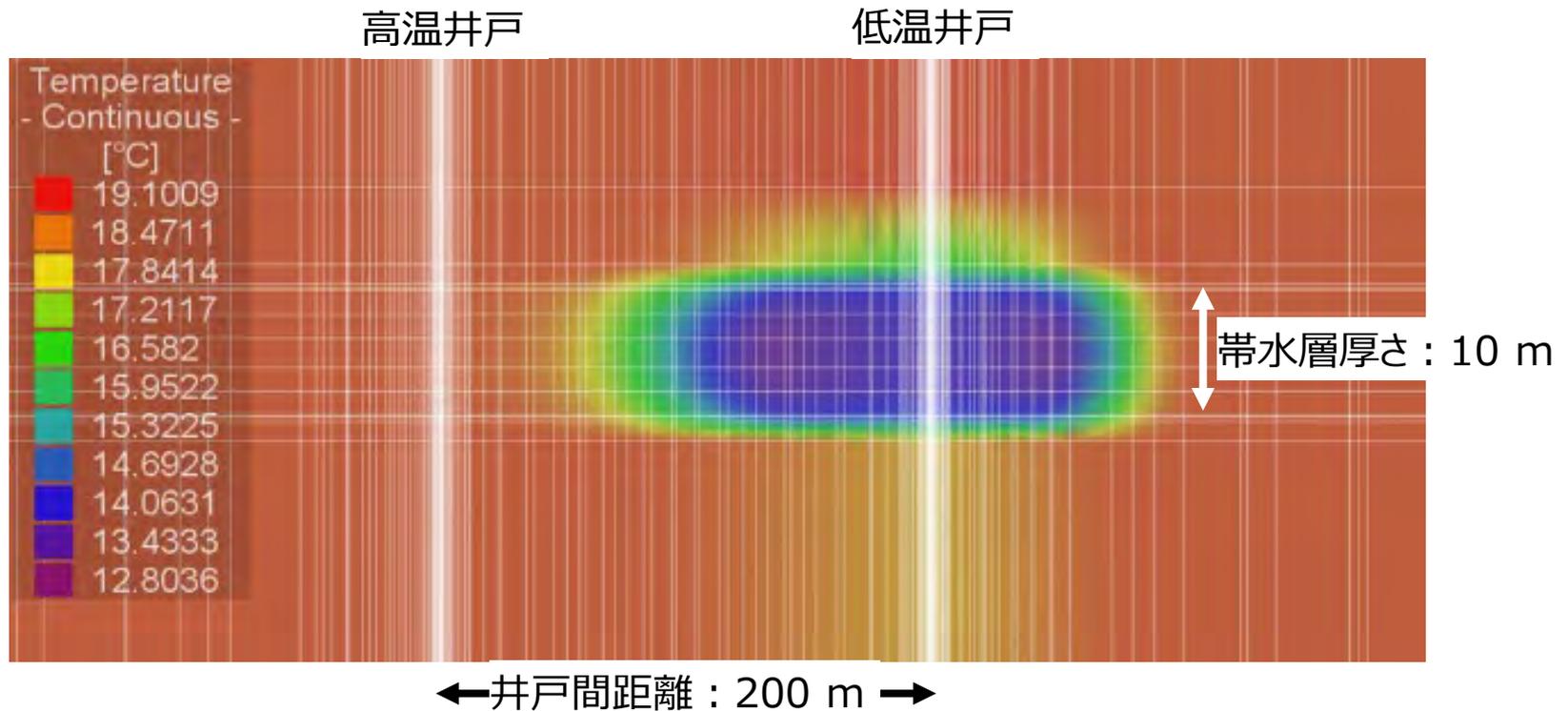


2024年12月から2025年3月

逆方向に揚水・還水し、万博施設で利用



2025年4月13日から2025年10月13日



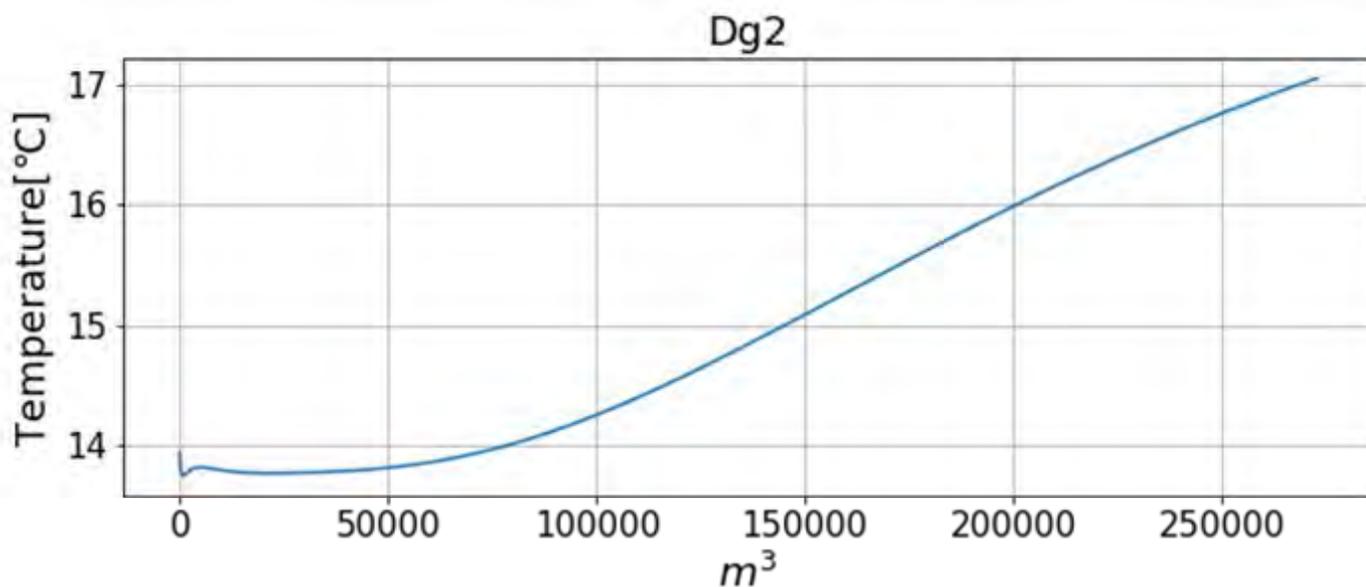
冬期低温井戸への蓄熱終了時の地中断面温度分布

還水体積 : 273,270 m³
 還流半径 : 167 m
 蓄熱半径 : 100 m
 平均還水温度 : 13.1 °C

(1) 低温井戸の揚水温度と揚水体積

冷房期間の揚水可能量は冬期の還水量と等しい273,000 m³であり、流量100m³/hで揚水すると、2,730時間熱源水として利用可能である。

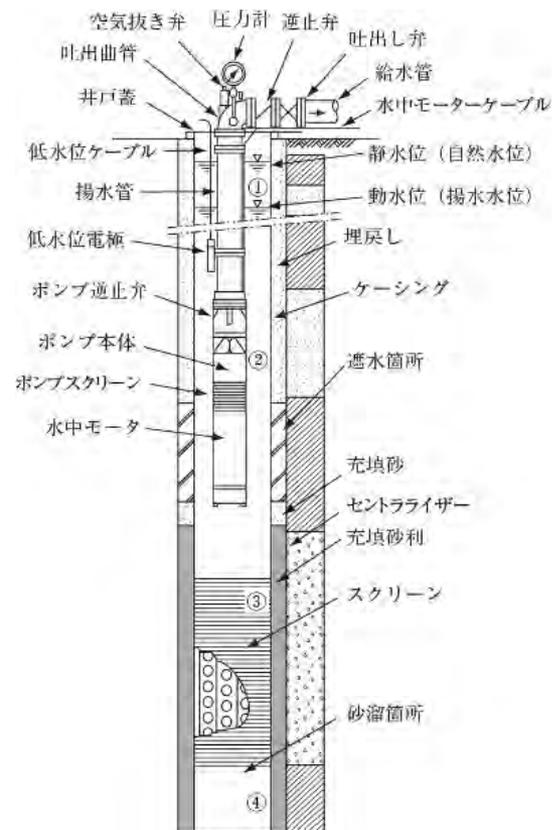
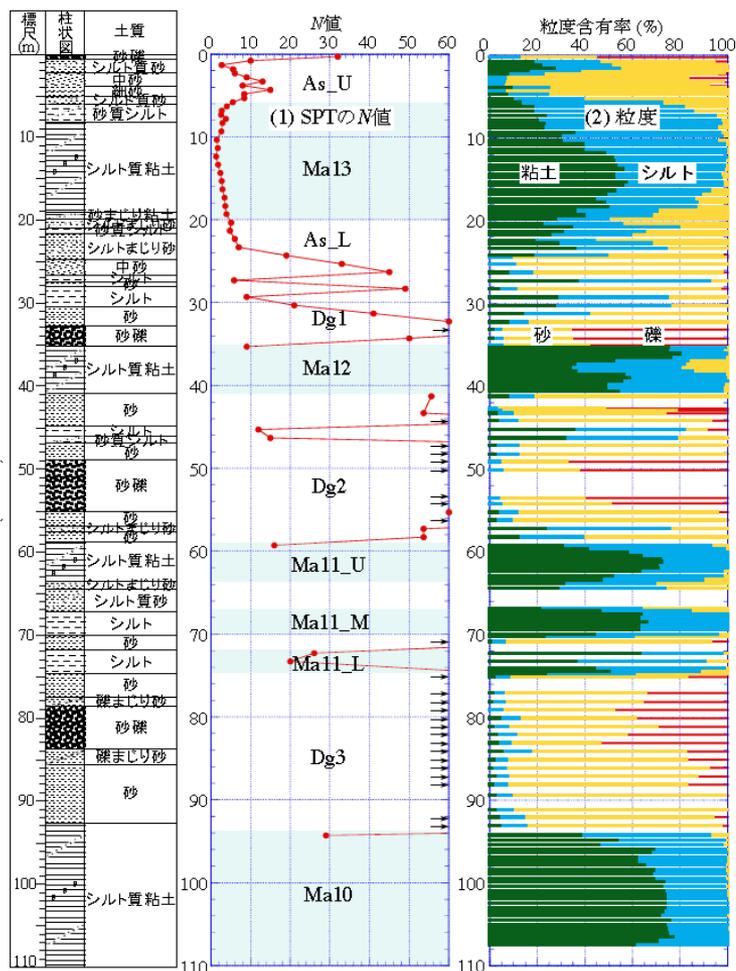
揚水を開始してからの温度上昇変動を示す。平均揚水温度は15.0℃である。



(2) 人工排熱低減効果

低温井戸揚水時の高温井戸還水温度を22.6℃とすると、開催期間中に帯水層へ排出する熱は8,668GJ (2,408MWh) となる。

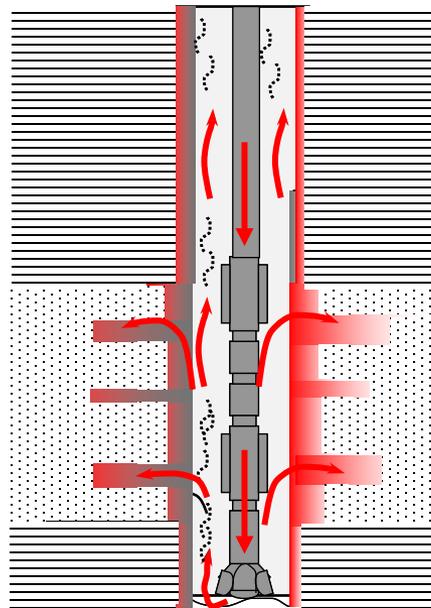
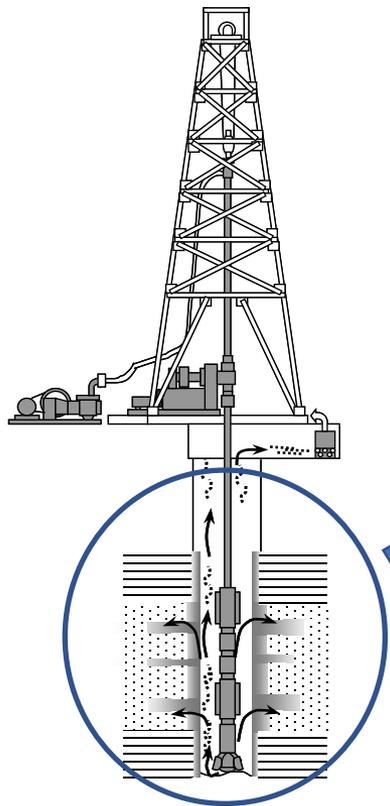
基本的構造は、上水道用と同じ



水道施設設計指針
(厚生労働省2012)

追加事項

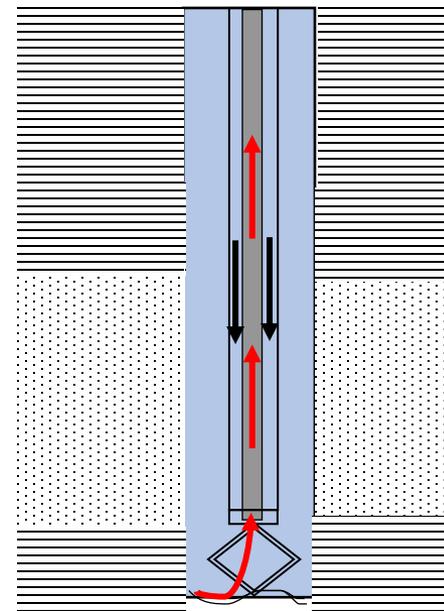
- 掘削径600mmΦ、孔壁での地下水流速を抑制
- フィルタサイズは、排砂のため平均粒径1mm
- フィルタ層の厚さは偏流抑制のため125～150mm
- 加圧システム



掘屑を含んだ泥水が掘さく孔に壁を形成し、目詰まりの原因となる。

地上に揚がってくる掘屑はタイムラグがある。

一般的な（ロータリー）工法



掘屑を含んだ泥水はロッド内部を通じ排出されるため、孔壁に壁を形成されにくい。

掘さくした掘屑は時差なく地上に揚げられるため、地質の確認が容易である。

リバースサーキュレーション工法

森川鑿泉資料、大阪市立大学、第84回 オープン・ラボラトリー、令和3年4月23日

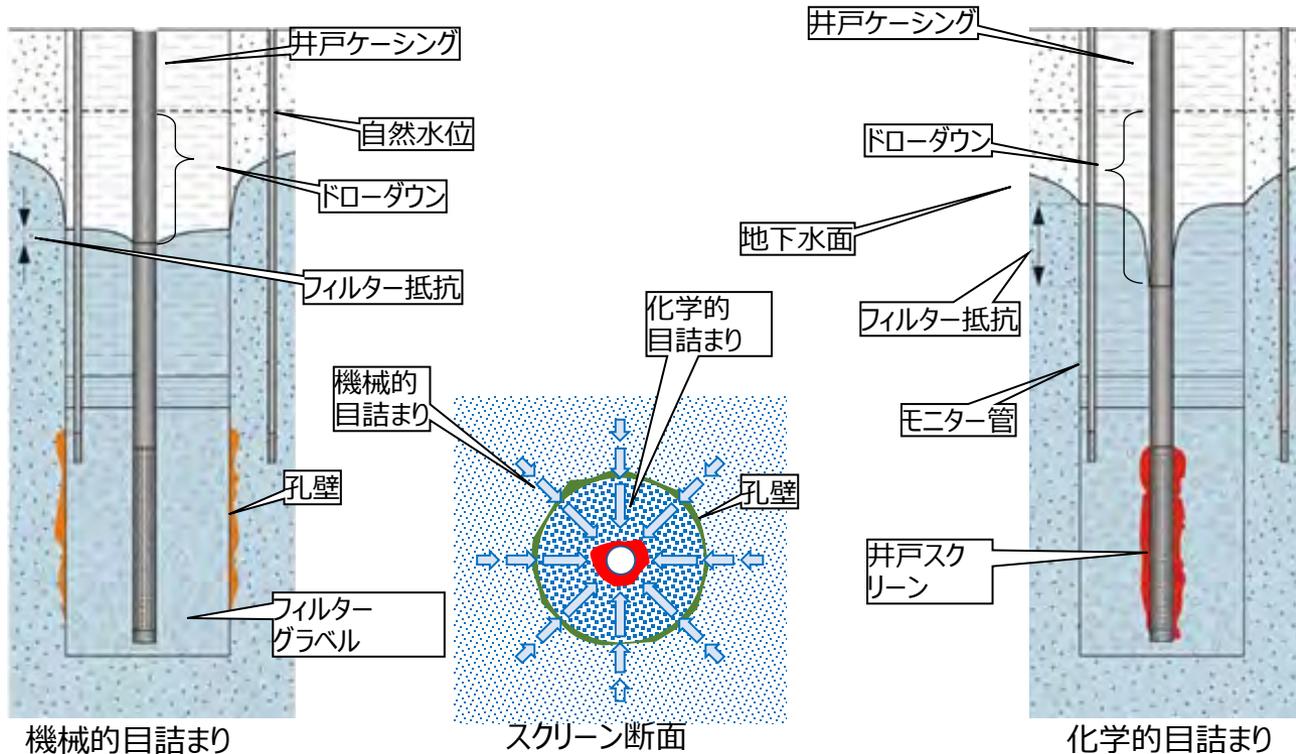
<揚水井・還水井とも>

(a) 機械的目詰まり

- i. 掘削中の掘削泥による帯水層の閉塞
- ii. 残存する掘削泥やコンタミ等による孔壁周辺の被膜形成帯水層中の細粒の移動による閉塞
 - ・洗浄で取り切れなかった細粒の移動による閉塞
 - ・洗浄プロセス時を超える揚水実施による細粒の移動

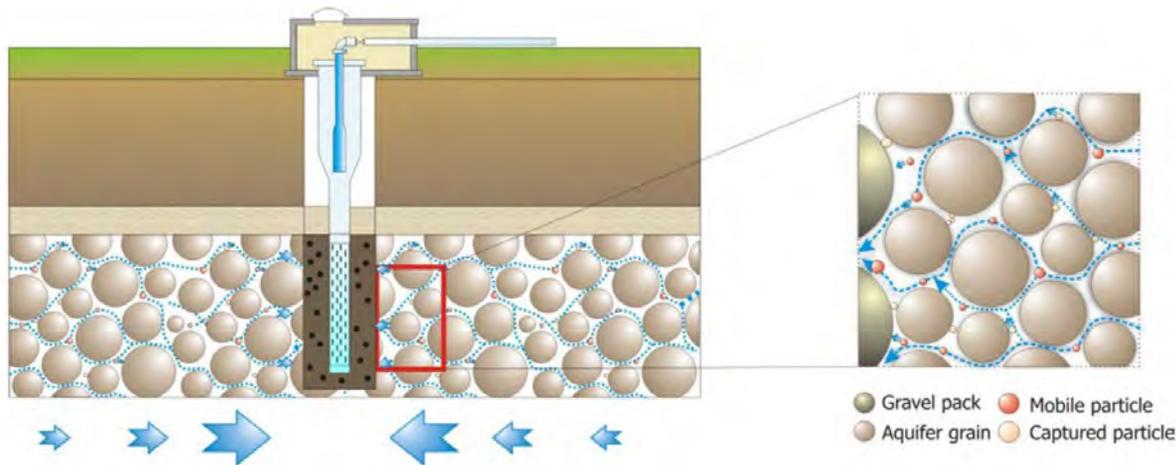
<還水井で顕著>

- (b) 化学的目詰まり -- 地下水の化学変化を誘引
 - ・ただし、井戸のシール(ケーシング内外)が不完全だと揚水井でも発生の可能性あり。
- (c) 生物学的目詰まり -- 微生物の育成環境を構築
- (d) 気泡発生による閉塞 -- 圧力開放による気泡の発生



機械的目詰まりは、帯水層のフィルターグラベル境界部に位置する。

化学的目詰まりは主にスクリーンの近くで起こり、その結果、フィルターグラベル部で高い侵入抵抗が生じる。



機械的目詰まりの説明図



化学的目詰まりの例（スクリーン内部の写真）

井戸の詰まりの第一段階は、生産井の掘削および建設中に発生

・井戸は掘削泥を使用して掘削

掘削泥は、水に細粒の膨潤性粘土（ベントナイト）または水溶性ポリマーを混合したものであり、泥は帯水層の最初の数センチメートルに浸透し透水性を阻害

運用開始後の目詰まり進行

・帯水層内の泥の残留物が井戸の構築時および洗浄中に除去されないと、孔壁での圧力損失が大きくなり、揚水量が低下する。さらに、井戸に向かって運ばれた粒子は通過できず、その結果、泥の残骸に堆積する。それらの蓄積により、透水性はさらに低下する。

本ページは次の文献からの引用である。

Albert Hendrik de Zwart, Investigation of Clogging Processes in Unconsolidated

Aquifers near Water Supply Wells, Hydrology and Ecology

Section and the Petroleum Engineering Section in the Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2007

化学的目詰まり

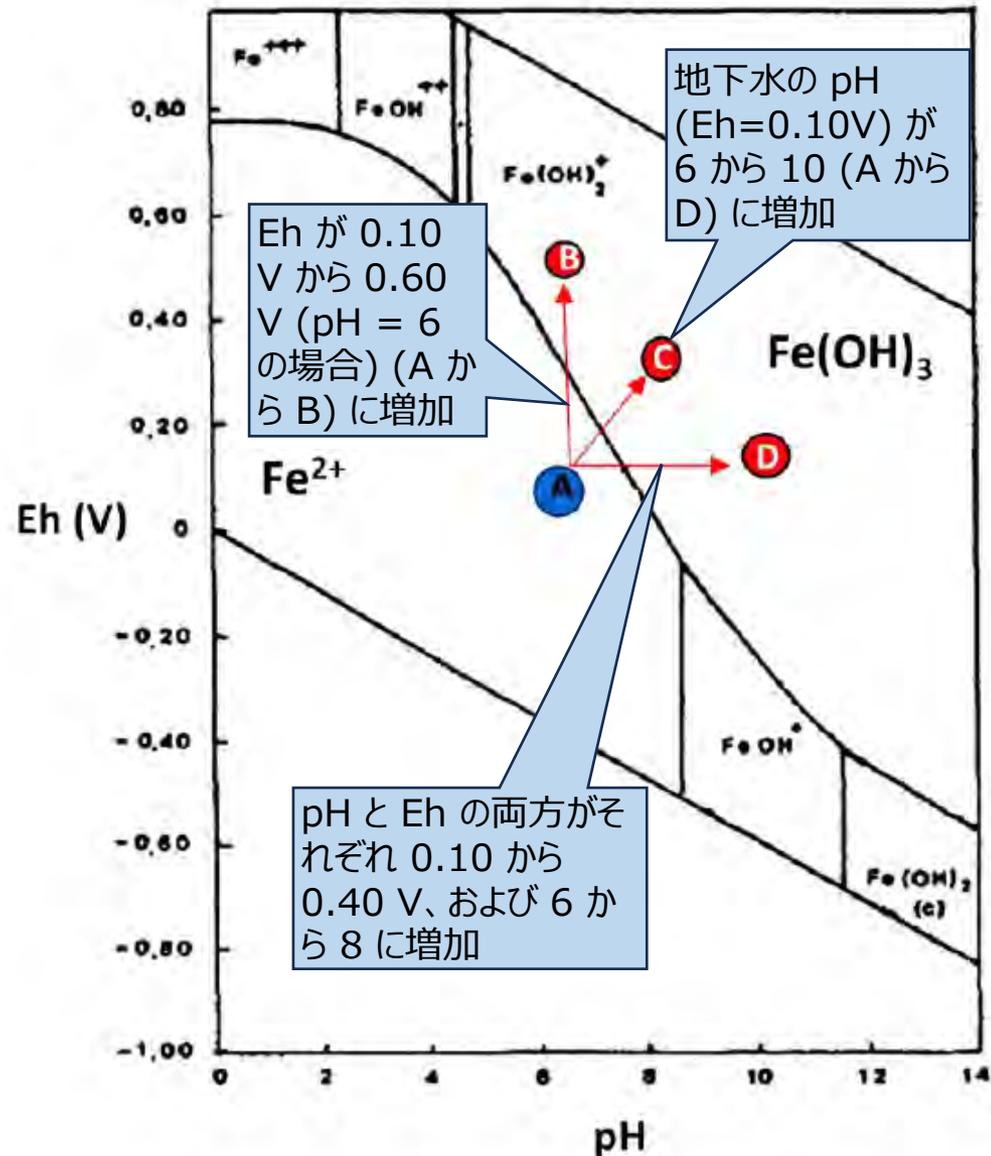
・地下水中の鉄は、ATES 井戸スクリーンを詰まらせ、その性能を低下させる原因となる化学元素

・地下水中の鉄は、主に第一鉄 (Fe^{2+})

・水酸化鉄としてのその沈殿は、酸化還元電位と水の pH 条件に強く影響される。

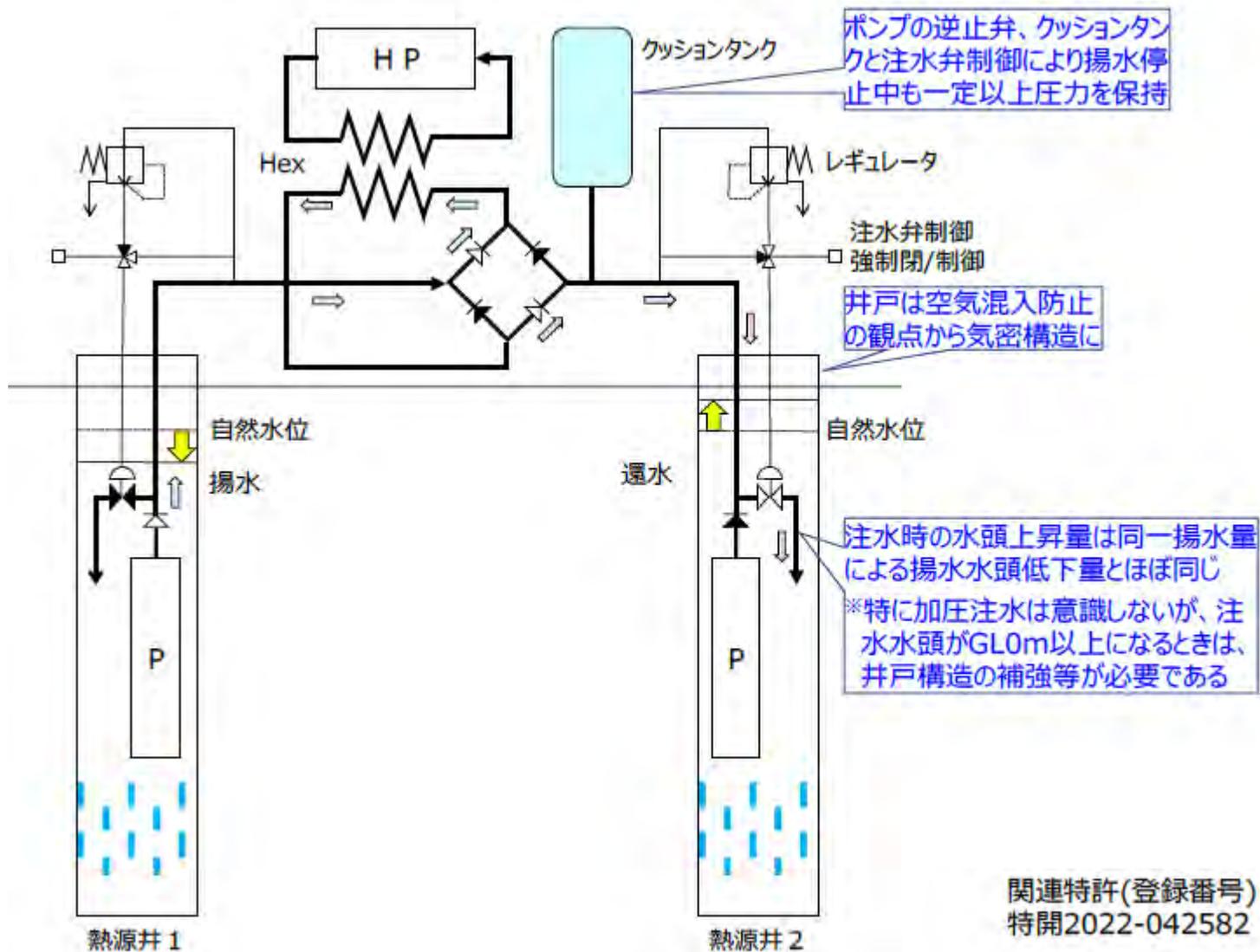
Fe^{2+} の酸化が起こる環境条件：

- ①還元された地下水が大気に触れると、溶存酸素が Fe^{2+} の酸化を促進し、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の沈殿物が形成
- ②酸化鉄水酸化物の形成は、同様の酸素化条件を有するが pH が異なる水中で促進される可能性がある。
- ③異なる pH を持つ還元水と酸化水の混合により、不溶性の沈殿物が形成される。



Dr. Thesis Andrea Bigoni、Kinetics of Fe-hydroxides clogging in ATES wells、March 2016

酸化還元電位 Eh - pH



提供：大阪公立大学中曾康壽氏



ボーリングロッドとドリルビット



井戸のケーシング・スクリーン



泥水循環配管の接続



マッドポンプとストーンキャッチャー



ボーリングマシンの整備



外周ケーシングとボーリングマシン

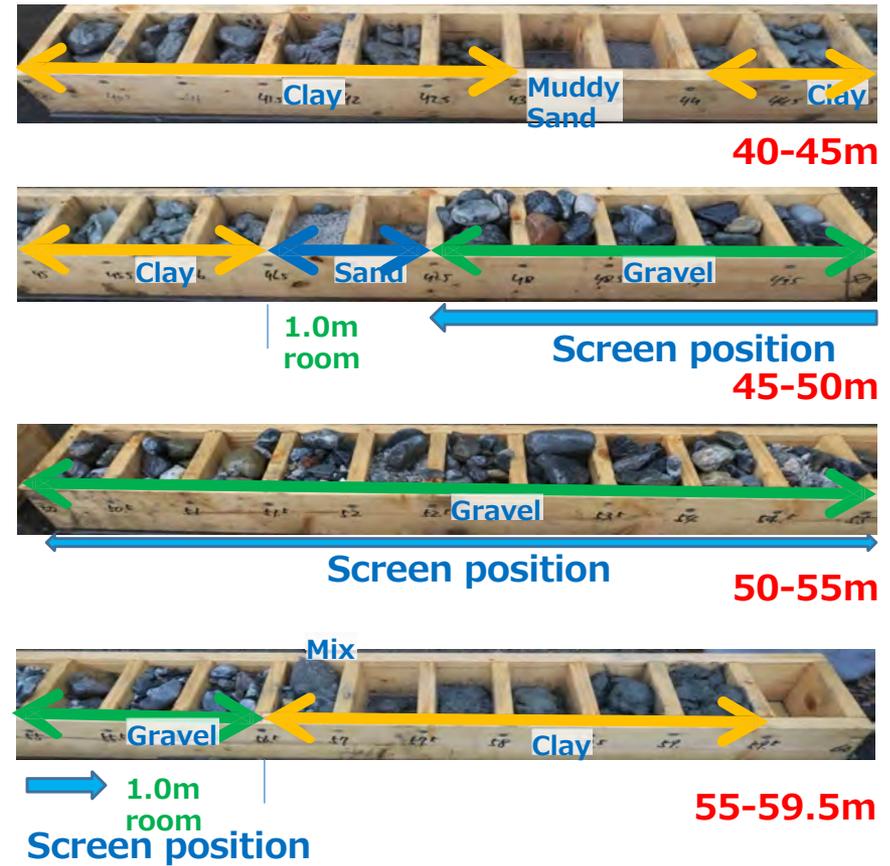
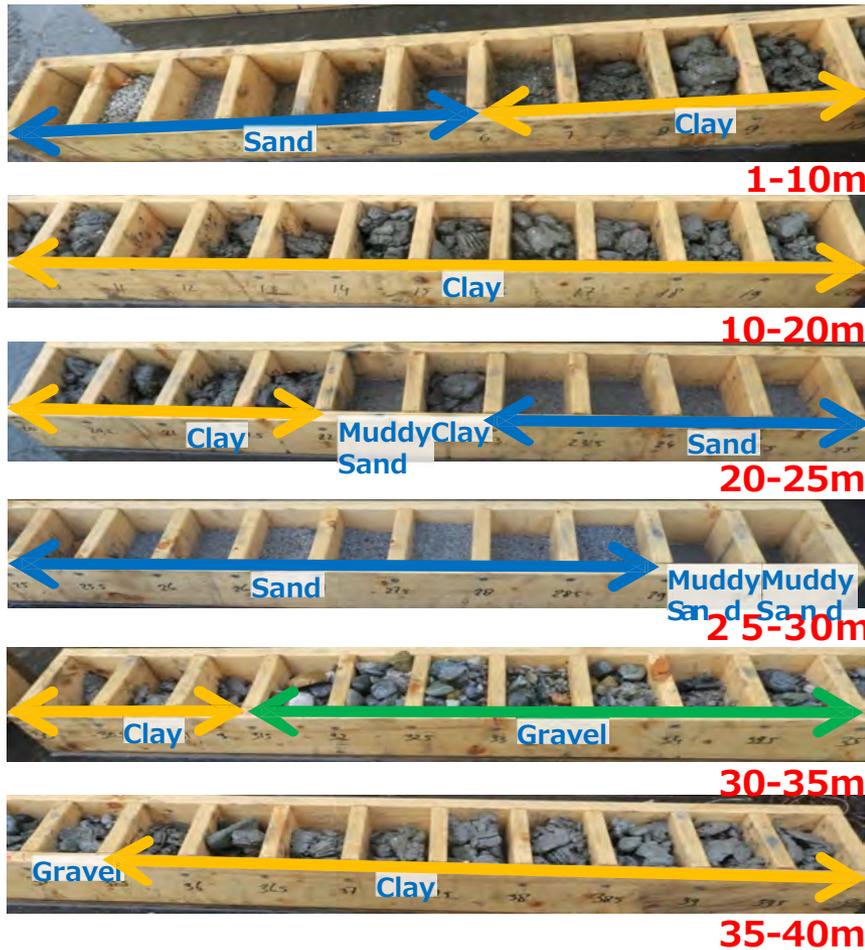


掘さく土のサンプリング



深度毎にサンプリング→スクリーン位置の決定

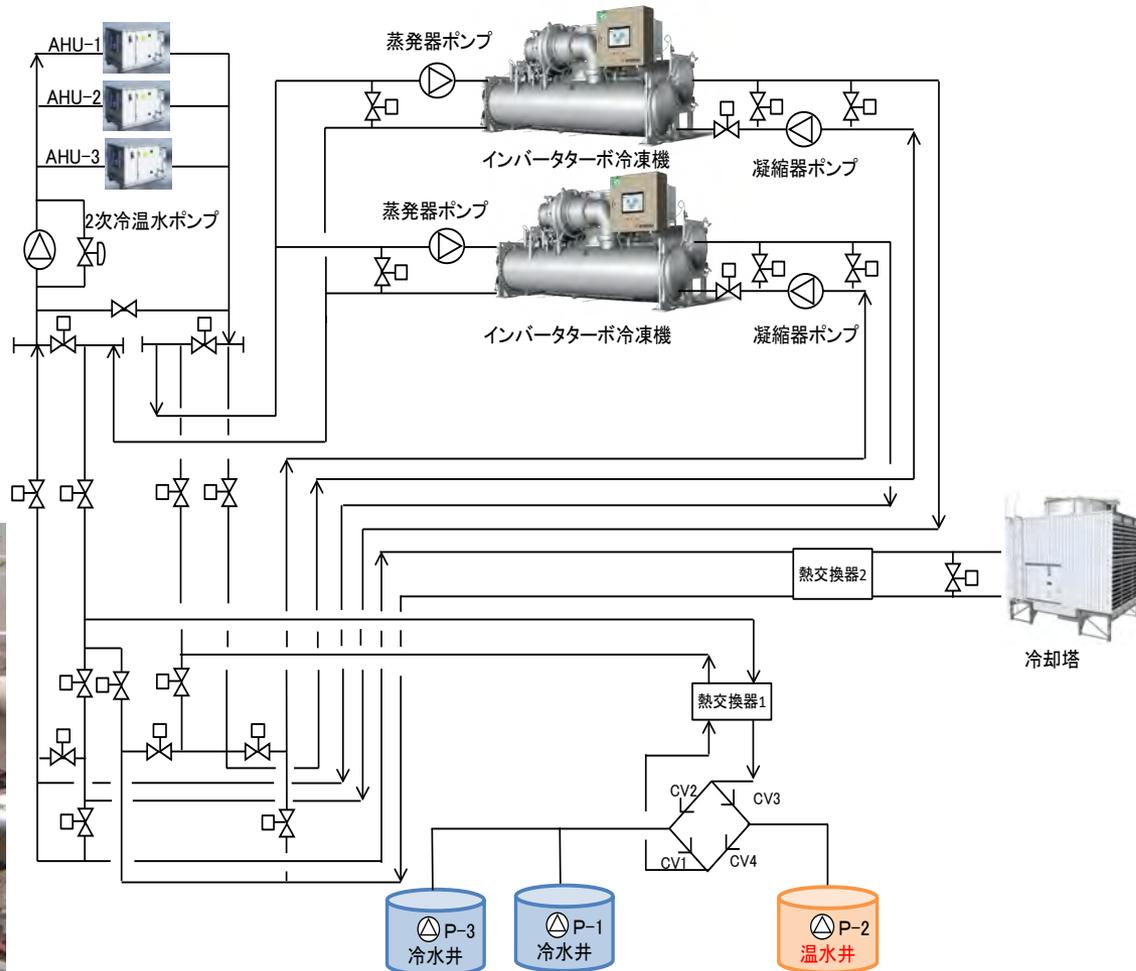
提供：大阪公立大学中曾康壽氏



提供：大阪公立大学中曾康壽氏

三菱重工神戸造船所に導入されたATESシステムの運用状況を紹介する。

- インバーターボ冷凍機：2台
- 空調機（AHU）：3台
- 井戸ポンプ：3台
- 冷温水ポンプ：2台
- 熱源水ポンプ：2台
- 冷却水ポンプ：1台
- 2次送水ポンプ：1台
- 冷却塔：1台
- 熱交換器：2台
- 動力盤・制御盤



提供：三菱重工サーマルシステムズ



制御盤



ターボヒートポンプ



空調機



機械室



井戸1-1・1-2



排熱配管



熱交換器

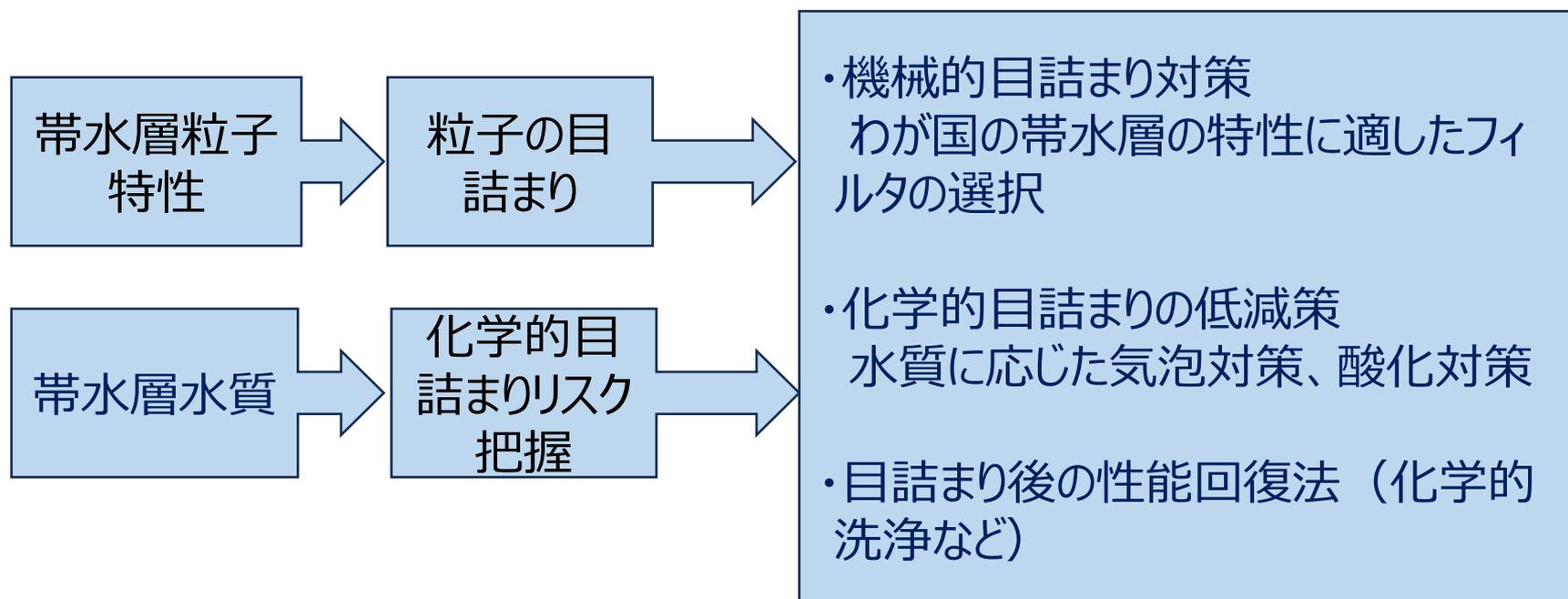


井戸2

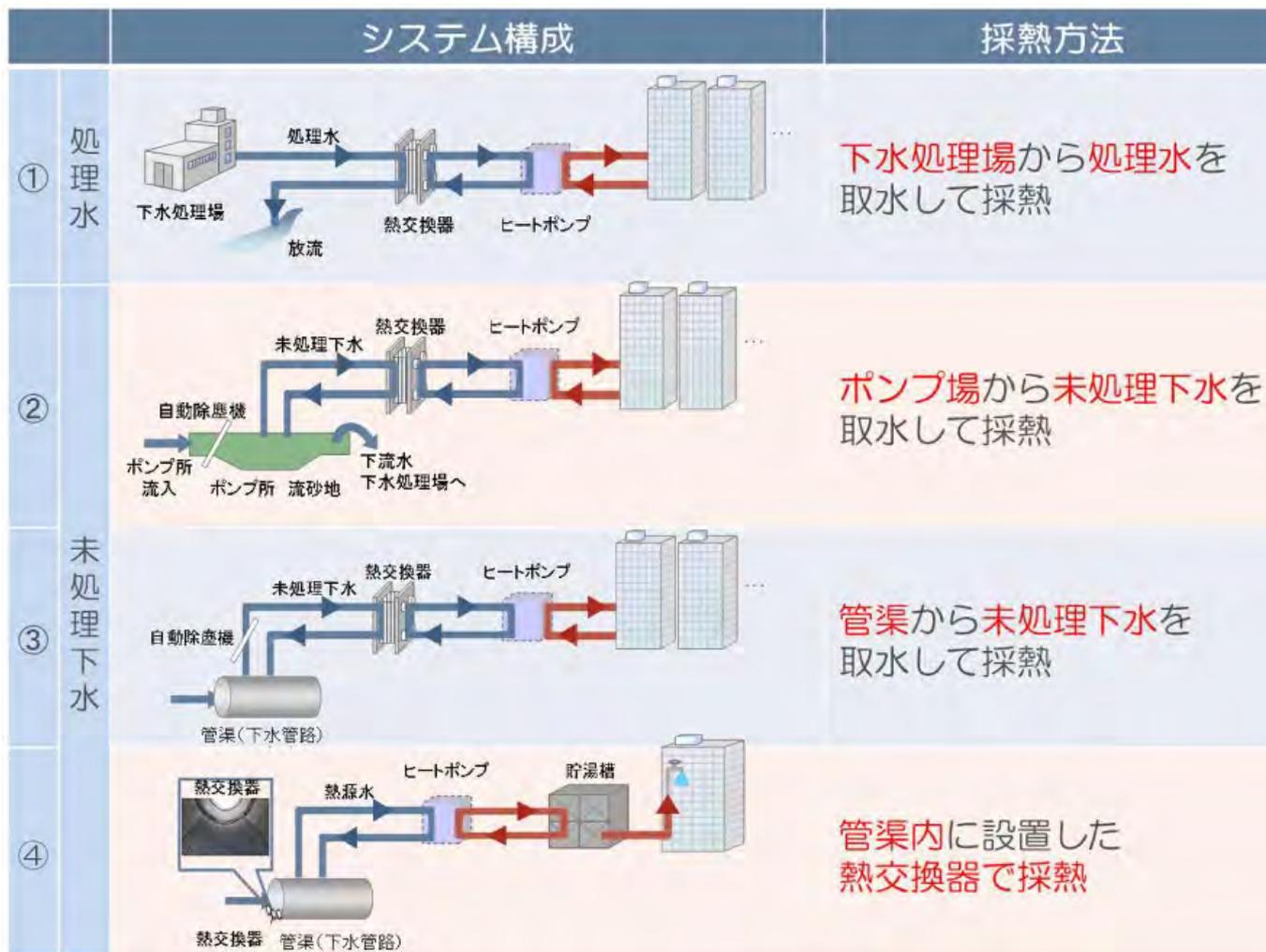
提供：三菱重工サーマルシステムズ

帯水層蓄熱の普及のため、高性能化、低コスト化、維持管理費の低減が必要である。今後、給排水衛生分野の取り組みを期待したい。

我国各地域の土質および地下水に応じた研究開発



下水熱利用システムの構成は、利用する下水（処理水及び未処理下水）、下水熱供給元（下水処理場、ポンプ場、管渠（下水管路）内外等）に応じて、4タイプに大別される。



遠い
熱需要施設と採熱場所との距離
近い

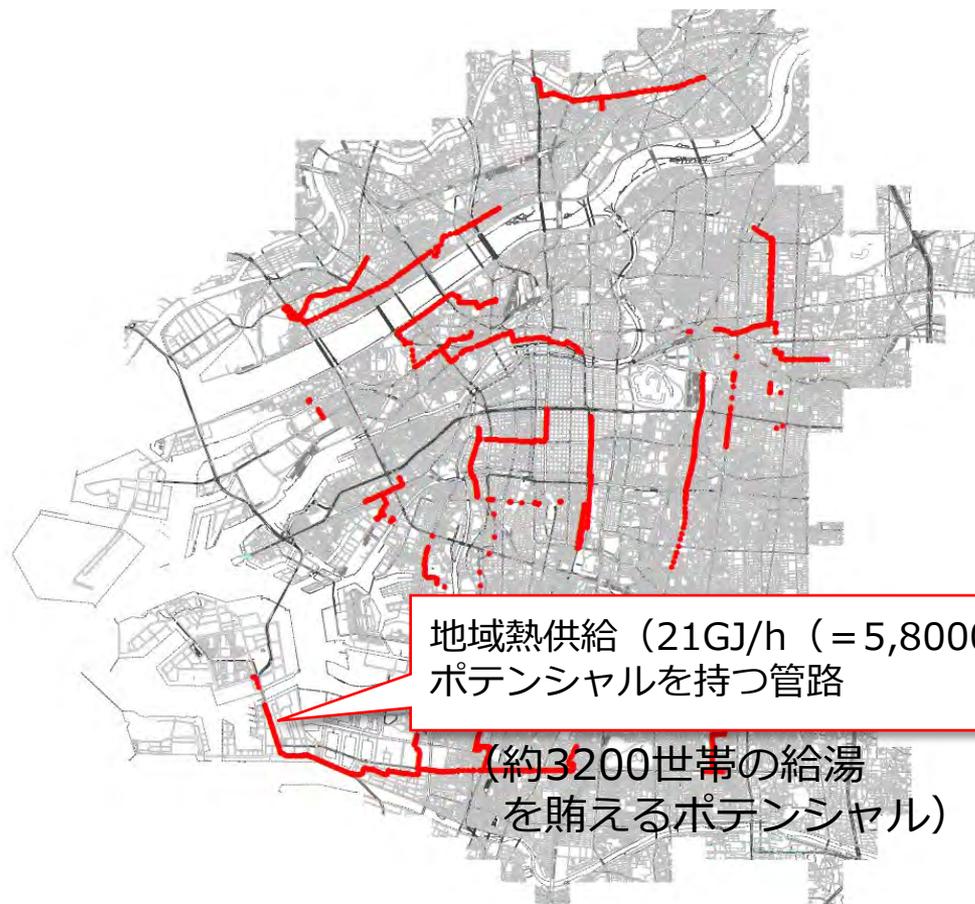
引用：下水熱利用マニュアル（案），国土交通省，水管理・国土保全局，下水道部，令和3年4月

下水管路ネットワーク

下水熱の魅力は下水管のネットワーク、下水温度にある。下水管ネットワークは都市内に張り巡らせられており、熱需要施設の近くにあることがメリットである。特に流量の大きな幹線に注目すべきである。

→ 今後の普及へ向けて

- ① 下水処理施設・ポンプ場近傍における熱需要発掘
- ② 下水管路およびスケールメリットを狙った下水幹線近傍の熱需要発掘
- ③ 農業、水産業も含めて都市部から処理場までの農業、水産業域における熱需要発掘



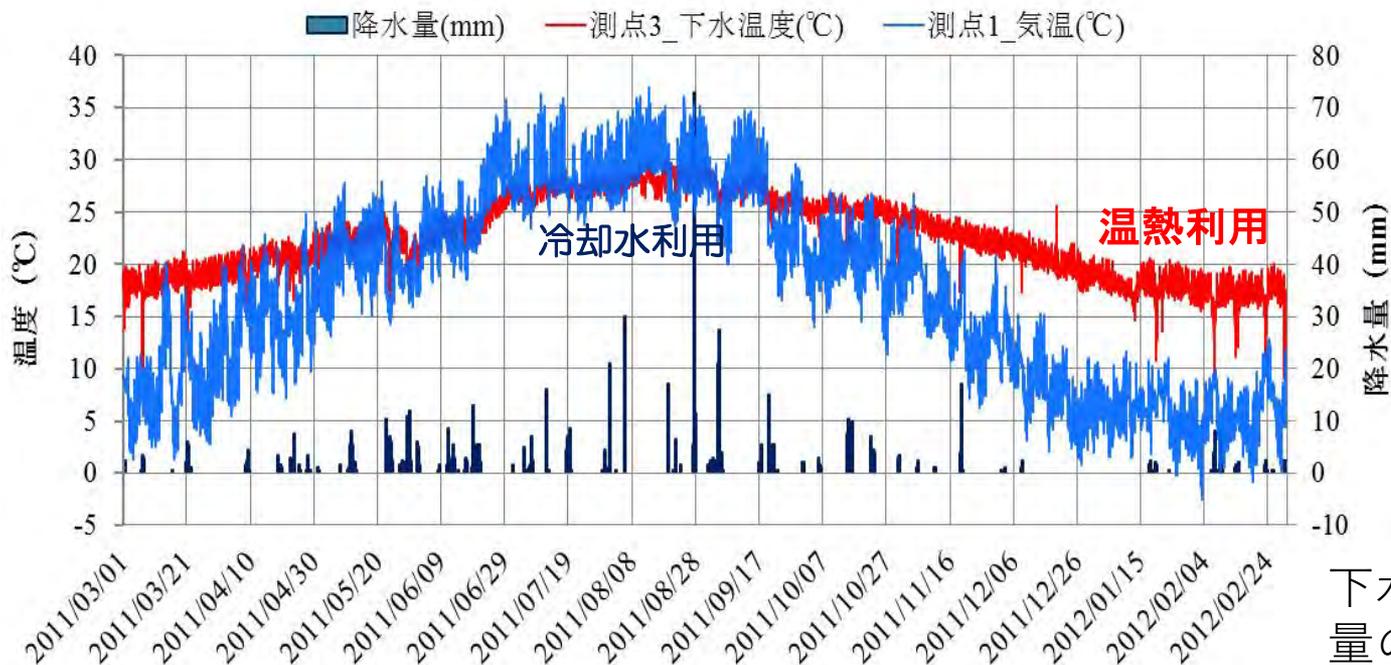
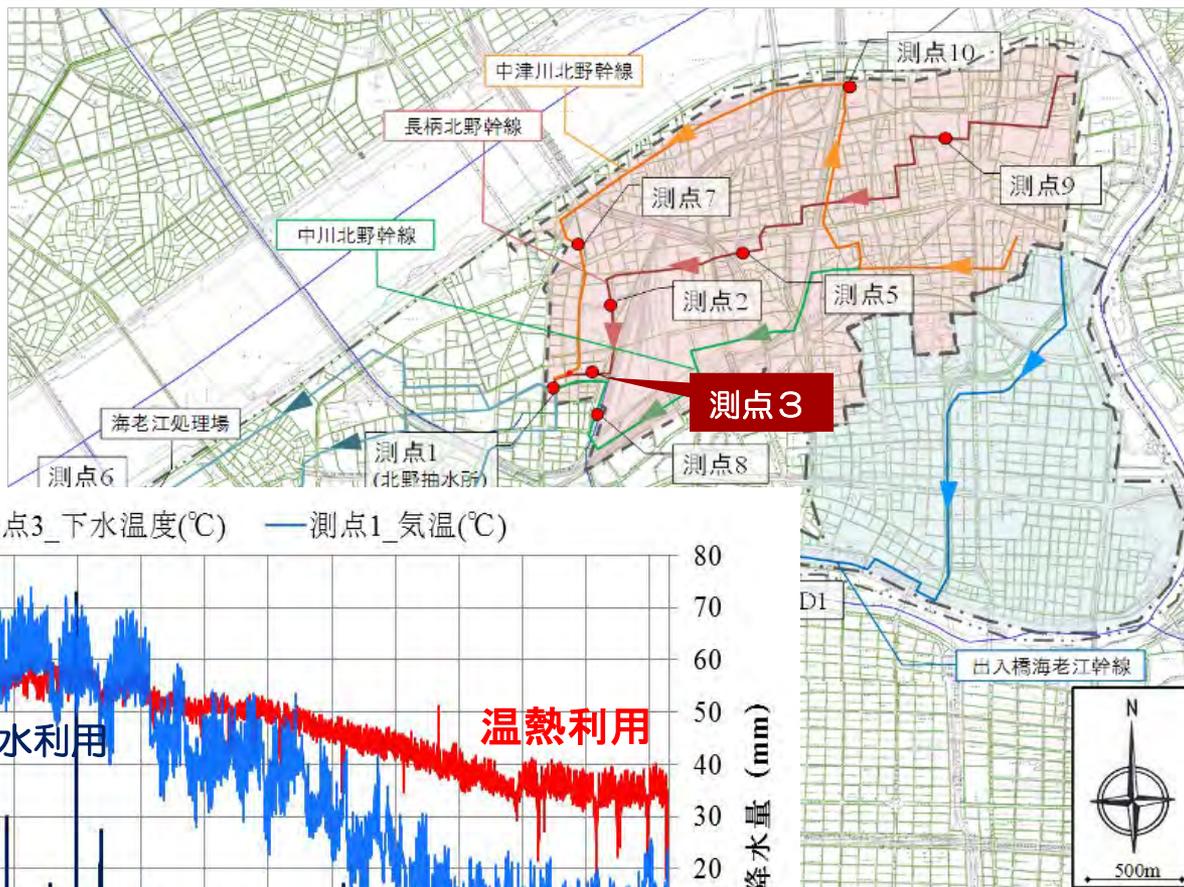
検討イメージを示すための試算例であり、実際の導入検討に使用するものではない

下水温度の特徴

合流式の下水温度測定例

(右図、大阪市海老江処理区内管路
測点3)

- ・夏期，気温より低く，空調用冷却水として有利
- ・冬期，気温より高く空調や給湯の熱源として有利



下水温度，気温，降水量の年間変動測定例

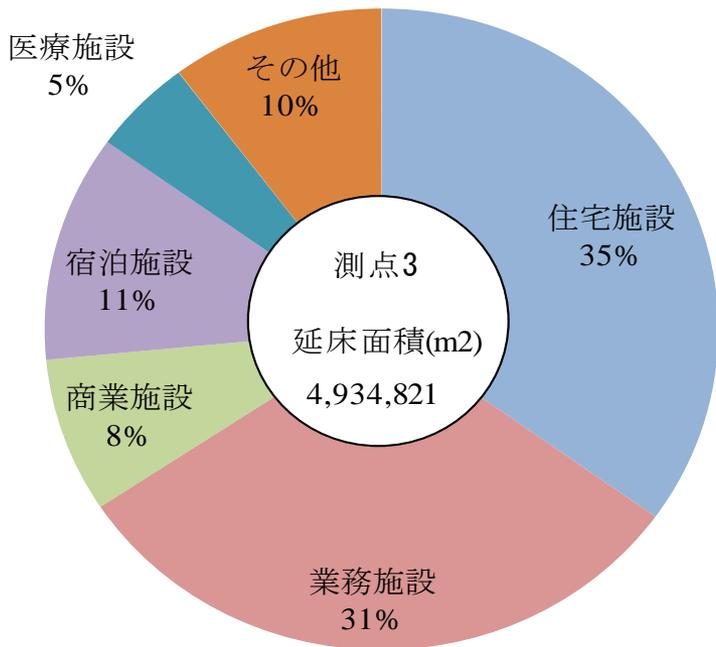
下水熱利用のための下水管路における晴天日下水流量推定法の提案，
下水管路における流量・温度推定のための下水流量・温度の実測，

空気調和・衛生工学会 論文集 39 (204), 47-55, 2014

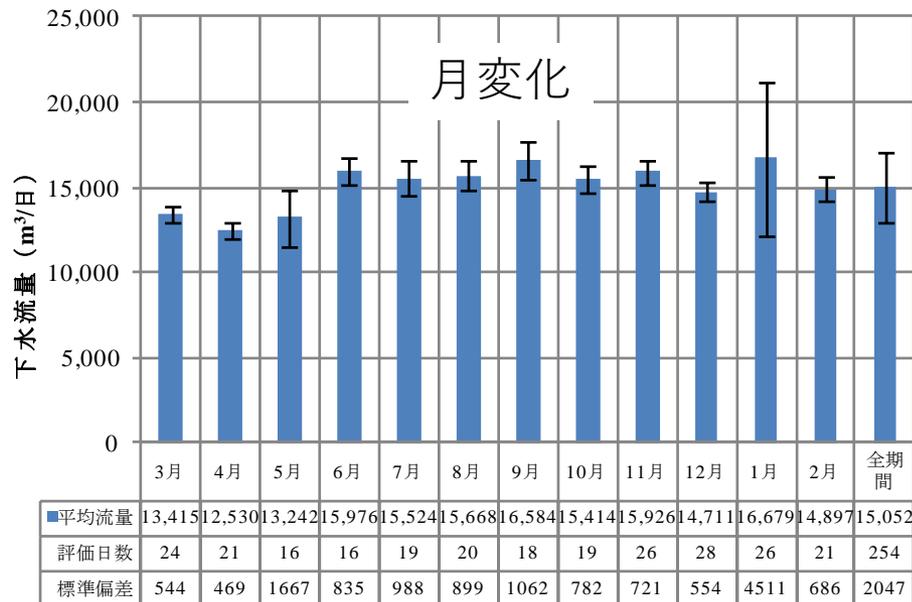
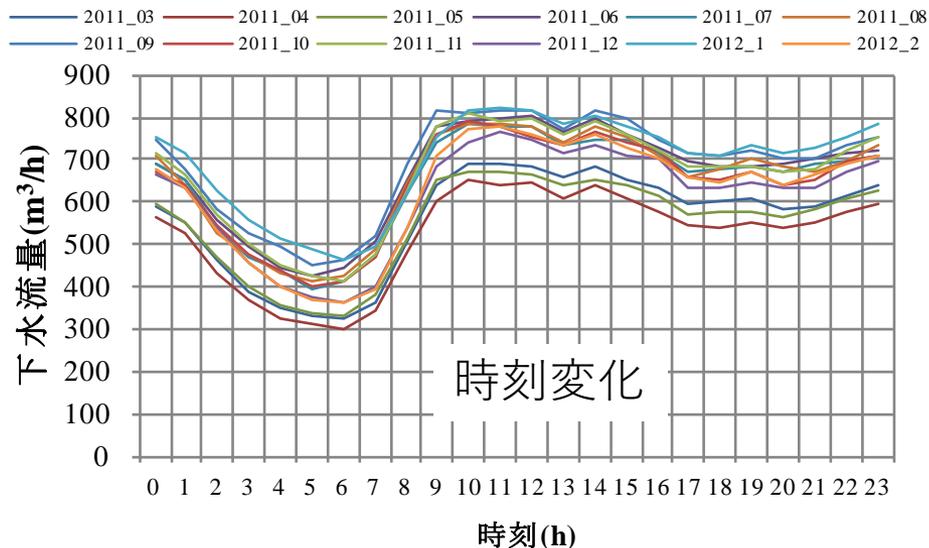
空気調和・衛生工学会 論文集 39 (202), 11-21, 2014

下水流量の特徴

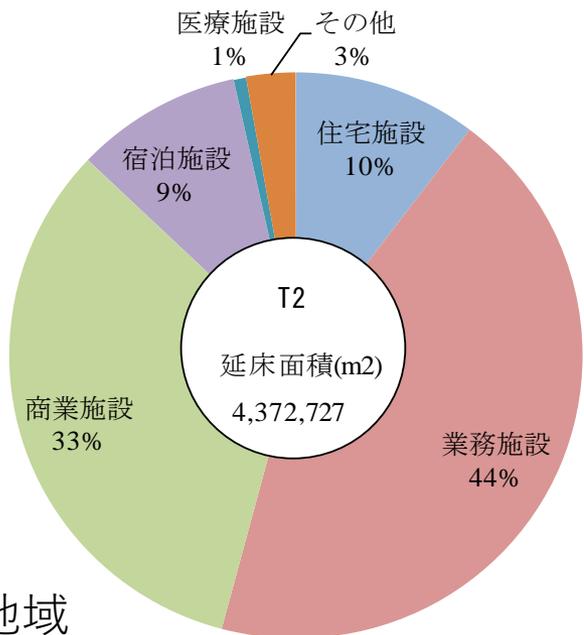
合流式の下水流量測定例（測点3）
 早朝最低となり、昼間と夜間ピークがある。



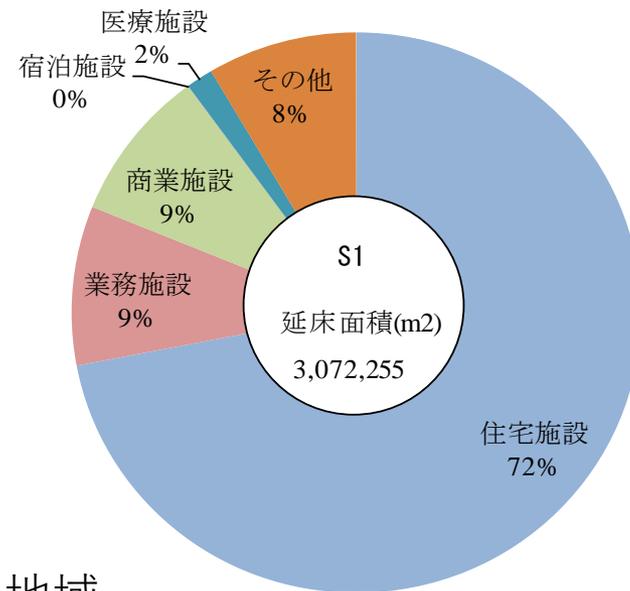
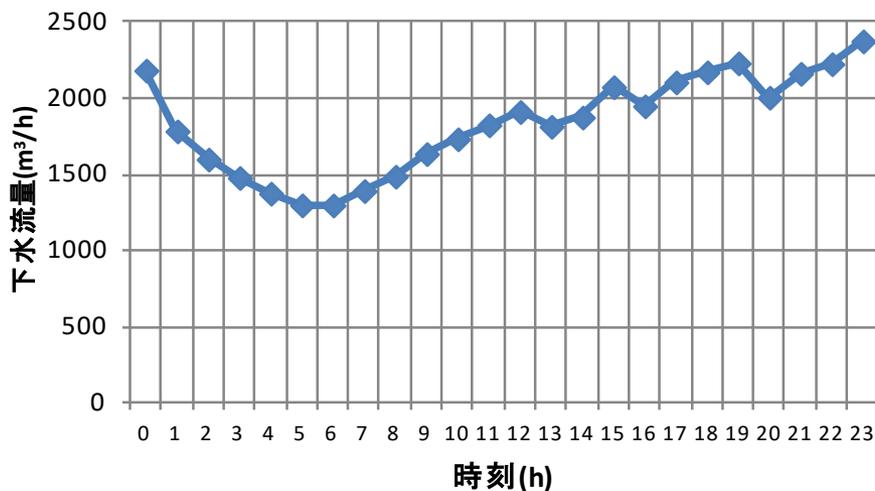
測点3に流入する集水域
 の施設別延床面積



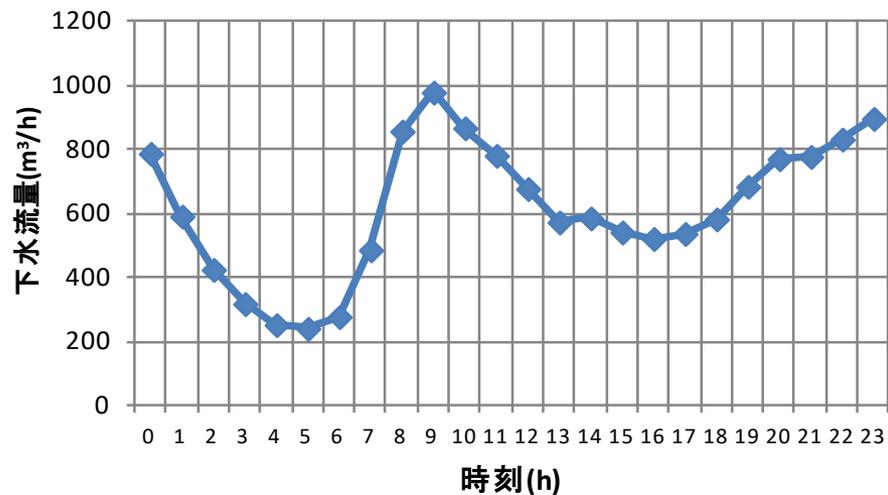
集水域の地域性（建物用途別比率）と下水管流量



業務・商業地域



住居地域

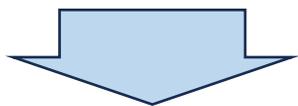


うめきたにおける下水熱利用とスイスにおける導入事例との性能比較

参考値（想定値）：日建設計提供
情報

①全体の採熱量：41.3kW

②敷設長さ：約30m



熱交換器敷設長さ当たり採熱能力
= 41.3kW/30m = 1.38 kW/m

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 x 1.20	直径 1.50	1.70 x 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

海外の導入事例との比較

管渠内熱交換器方式の事例

(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。熱源水と下水の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(下左図)。

(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。熱源水と下水の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(下右図)。



管渠内熱交換器敷設状況
(Binningen、スイス)

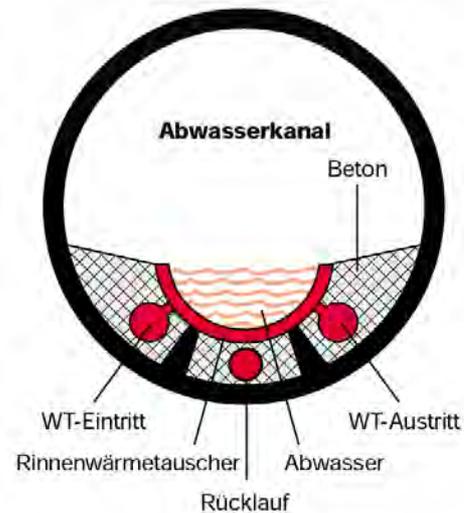
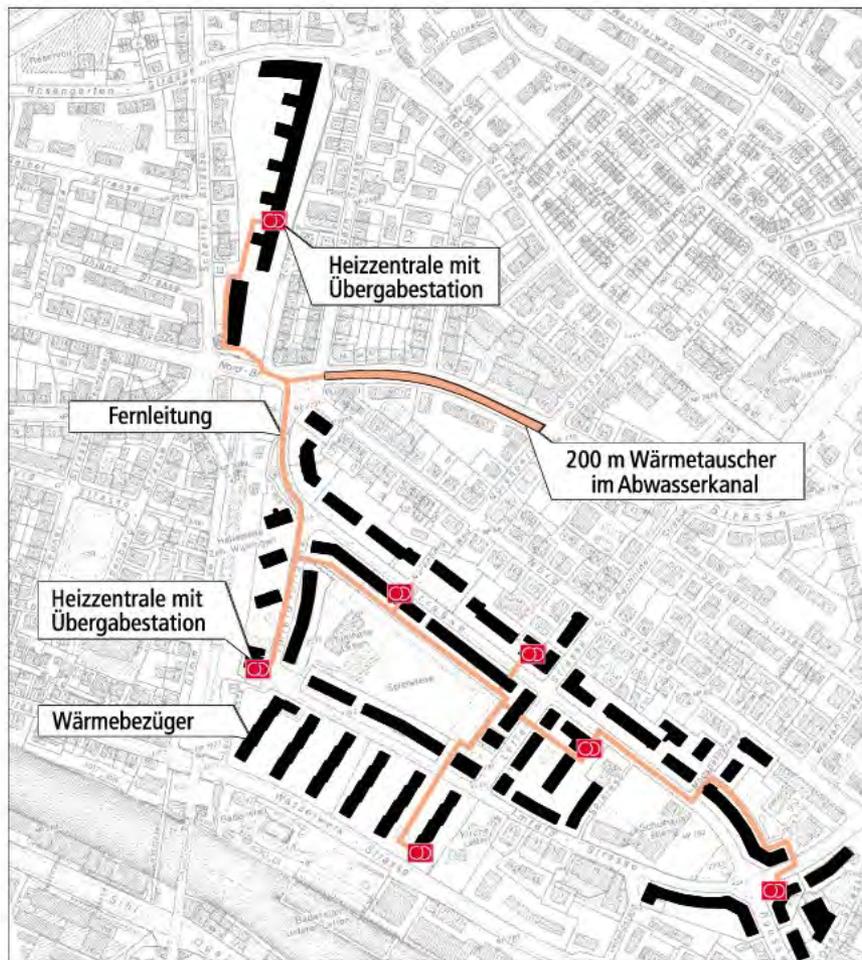


管渠内熱交換器敷設状況
(Wipkingen、スイス)

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/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Energieeffizienz/Abwasserwaermenutzung/Leitfaden_Ratgeber/Leitfaden_Waerme_aus_Abwasser.pdf (2021.10アクセス)

管渠内熱交換器方式の事例

- 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、地域熱供給

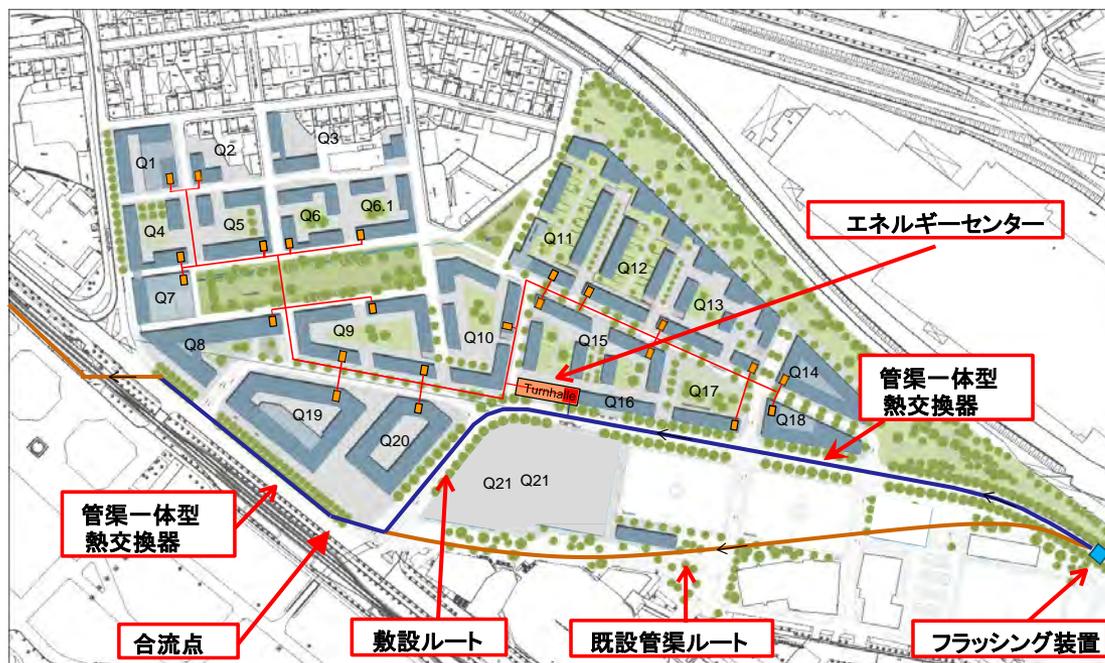


引用 : Wärmeverbund Wipkingen. Saubere Luft dank Wärme aus Abwasser.

https://www.kasag.com/fileadmin/user_upload/Erneuerbare%20Energien/3.0/DE_2000_W%C3%A4rmeverbund_Wipkingen_PDF_1537KB.pdf

管渠内熱交換器方式の事例 (Baden-Württemberg (ドイツ))

- ・下水管渠で750m
- ・ステンレス製熱交換器で2100 kWの採熱能力を持つシステムを導入
- ・地域熱供給 (左下図)
- ・管渠の熱交換器としてスイス、ドイツを通して最長
- ・熱交換器の敷設長さ当たりの採熱能力は2.8kW/m
- ・流れによる伝熱面の洗浄効果のため勾配を0.1%確保
- ・バイオフィルムの洗浄のためフラッシング装置¹⁰⁾を設置 (右下図)



熱交換器洗浄のためのフラッシング装置 (引用¹¹⁾)

Baden-Württemberg (ドイツ)

引用 : 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)

金属製の管渠内設置熱交換器



熱交断面図



2枚のSUS板を溶接

SUSパネルの溶接による熱交換器
(資料提供：日本パーカライジング)

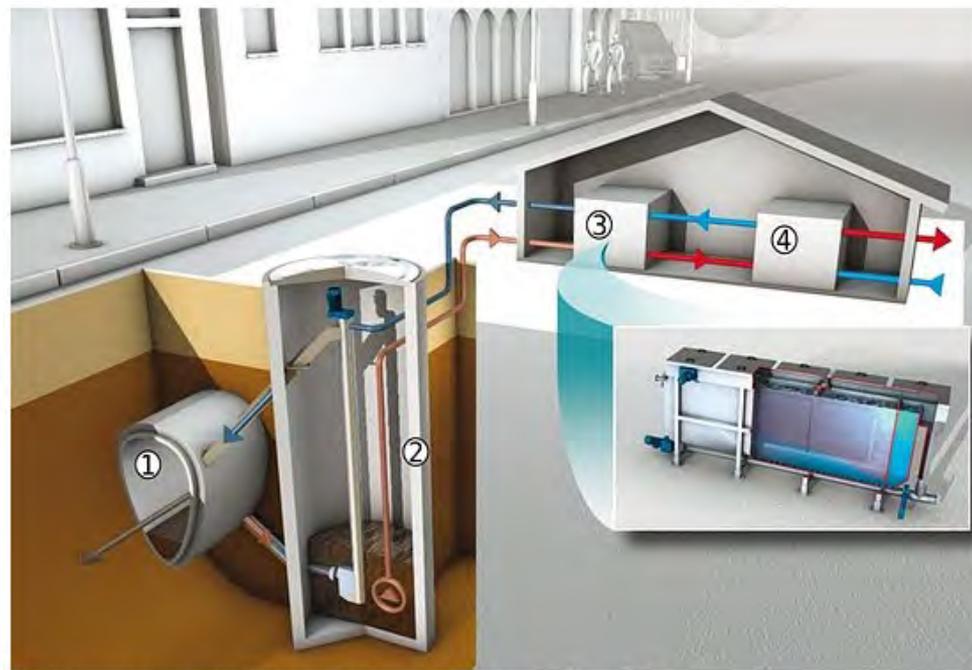
試作までであり、後述するドイツやスイスの実施例と同等の性能が期待されるが導入事例はない。

金属製の管渠内設置熱交換器（引用⁵⁾）

NEDO：次世代型ヒートポンプシステム研究開発プロジェクト

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採熱
- 取水量：最大50 l/s



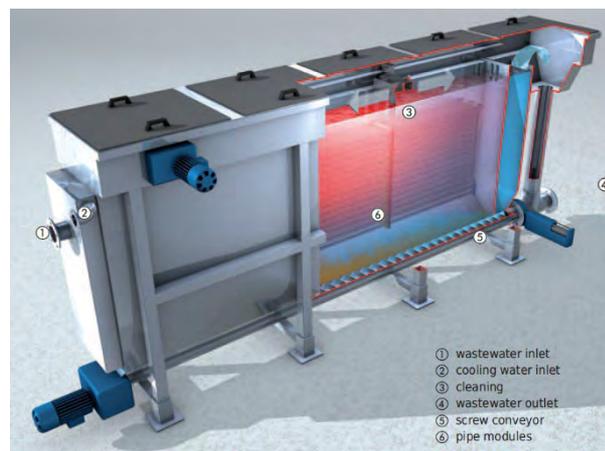
① Abwasserkanal; ② Abwasserschacht mit Siebanlage und Förderpumpe;
③ HUBER Abwasserwärmetauscher RoWin; ④ Wärmepumpe

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
- 放熱量：840kW



① wastewater inlet
② cooling water inlet
③ cleaning
④ wastewater outlet
⑤ screw conveyor
⑥ pipe modules



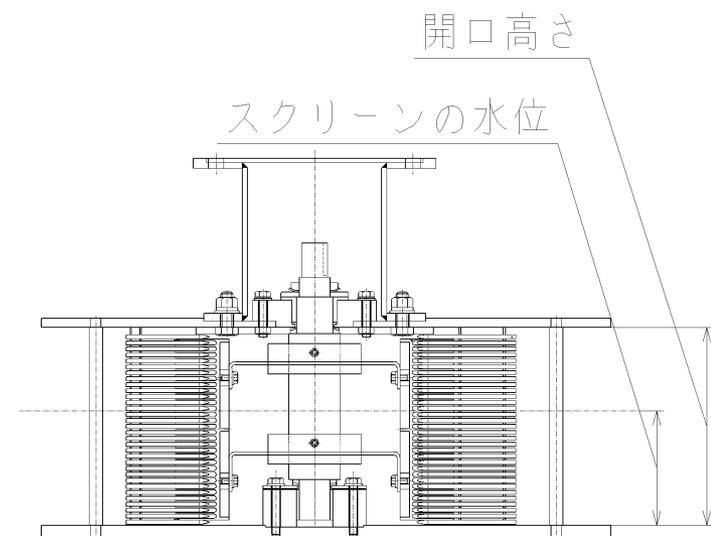
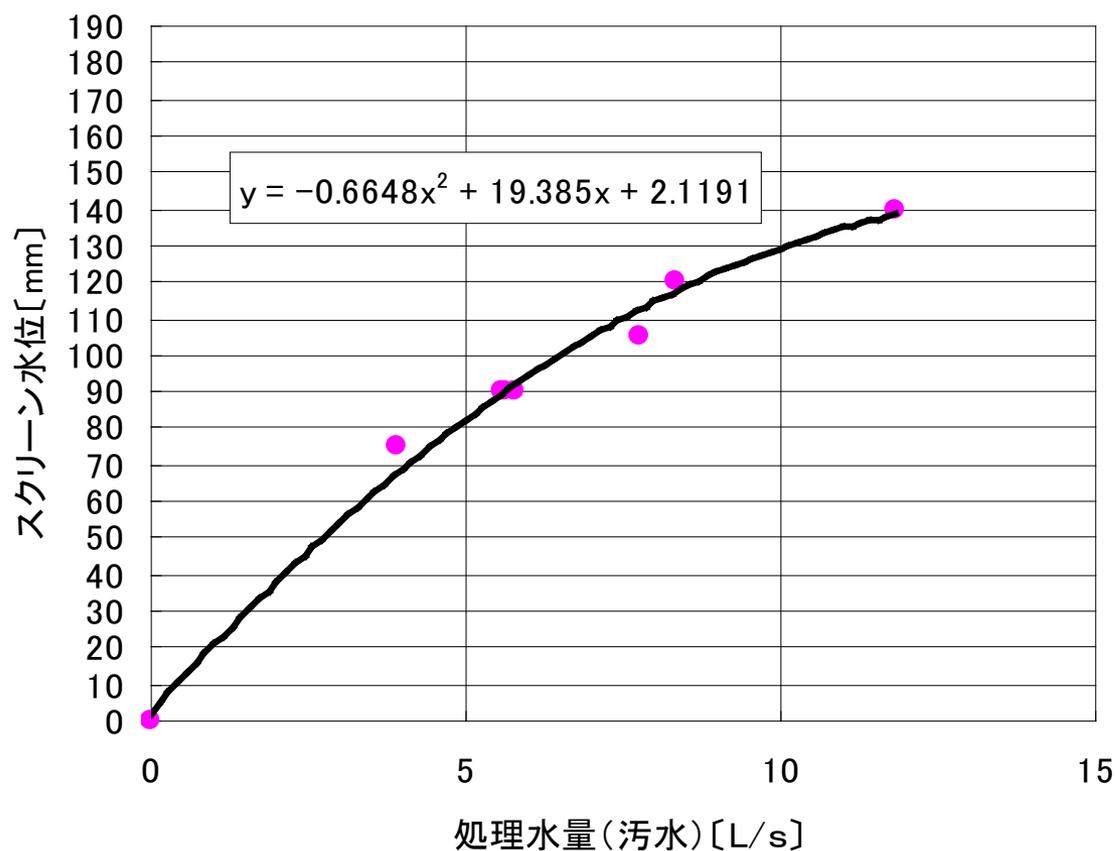
マンホール底面に設けたスクリーン



NEDO：次世代型ヒートポンプシステム研究開発プロジェクト

スクリーンの性能測定例（横レーキ式）

スクリーン水位に対する処理水量の測定以外に、通過した夾雑物の調査なども評価している。

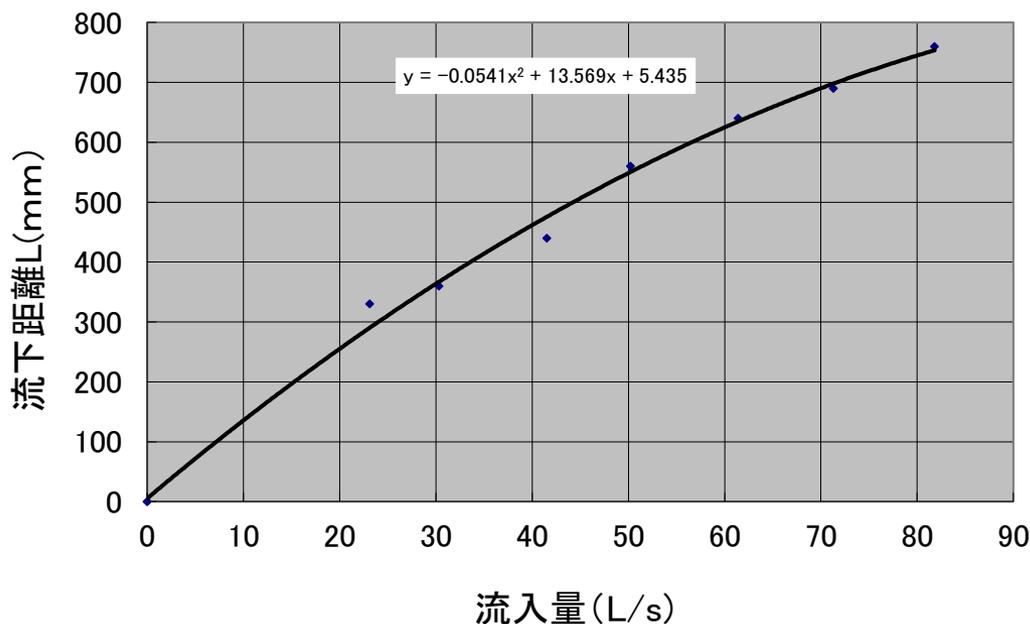


NEDO：次世代型ヒートポンプシステム研究開発プロジェクト

大容量の管底設置スクリーンの性能

流入量81.8L/sの時の汚水の通過状況（右下図）から、スクリーン長の途中76cmで全量落水していることから、試験設備の最大流量の制約により未確認であるが、100L/s以上の取水能力があると予測される。

スクリーン部の寸法：長さ890×幅227



NEDO：次世代型ヒートポンプシステム研究開発プロジェクト



スクリーン部の寸法：長さ890×幅227

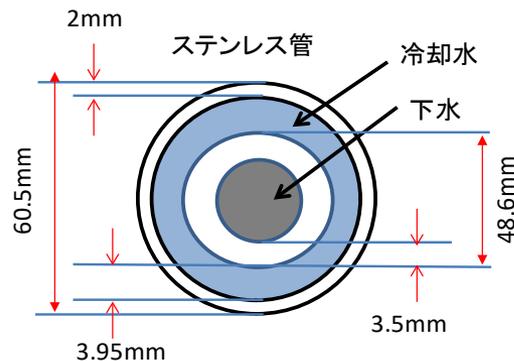


流入量81.8L/sの時の汚水の通過状況
（スクリーンの途中で全量落水）

二重管式熱交換器の汚れの影響

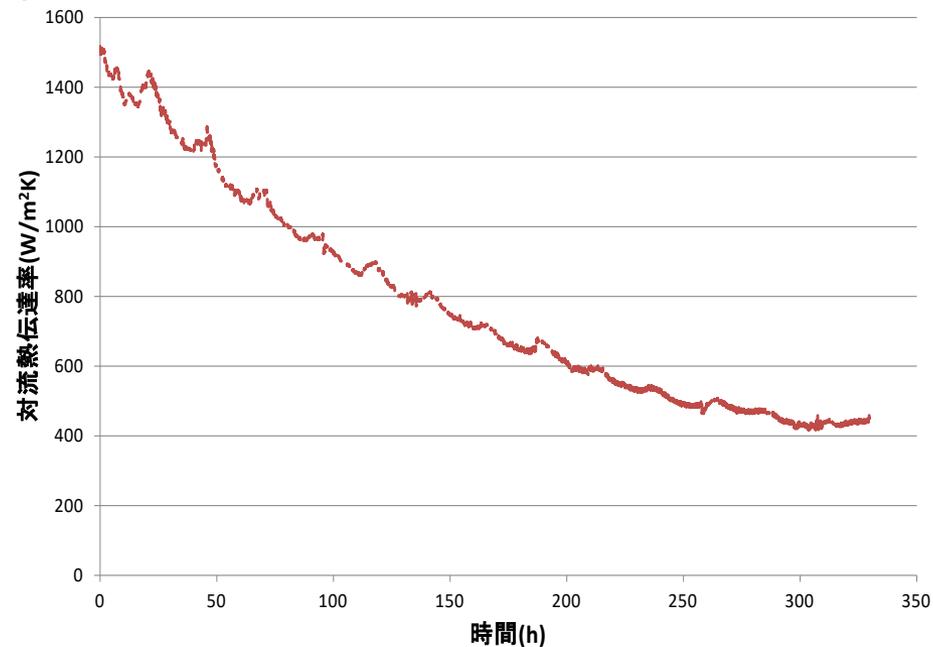


二重管式熱交換器



二重管式熱交換器の断面

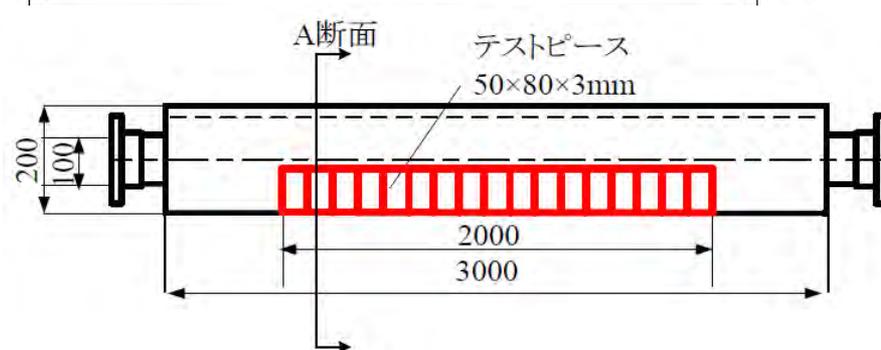
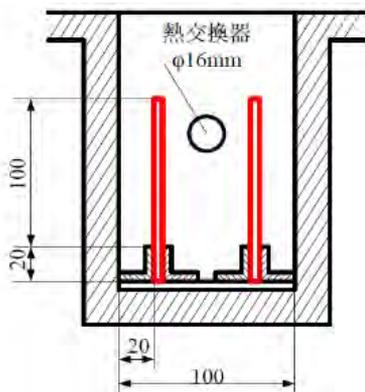
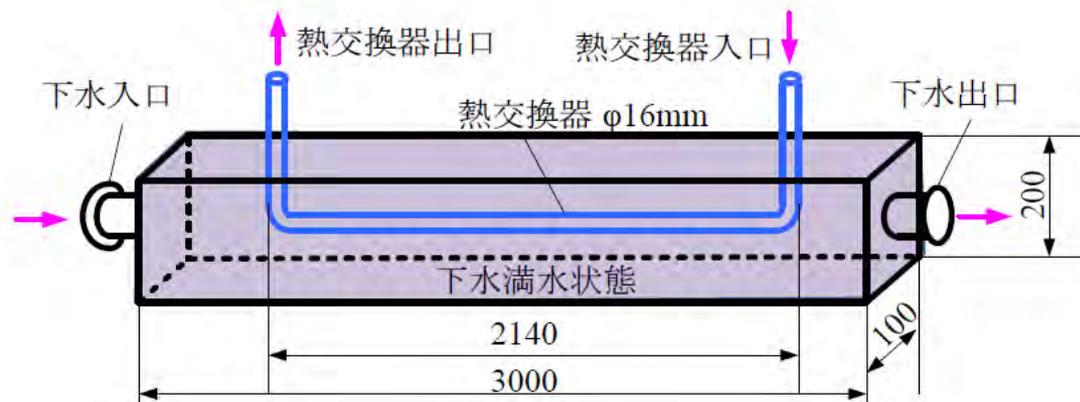
内管内の下水流速を1m/sとした管内熱伝達率の計測事例は下図であり、初期の清浄状態の熱伝達率は1400W/m²Kであるのに対し、300時間経過後は400W/m²Kまで低下している。



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）

NEDO：次世代型ヒートポンプシステム研究開発プロジェクト

下水熱回収熱交換器の汚れに関する研究の紹介



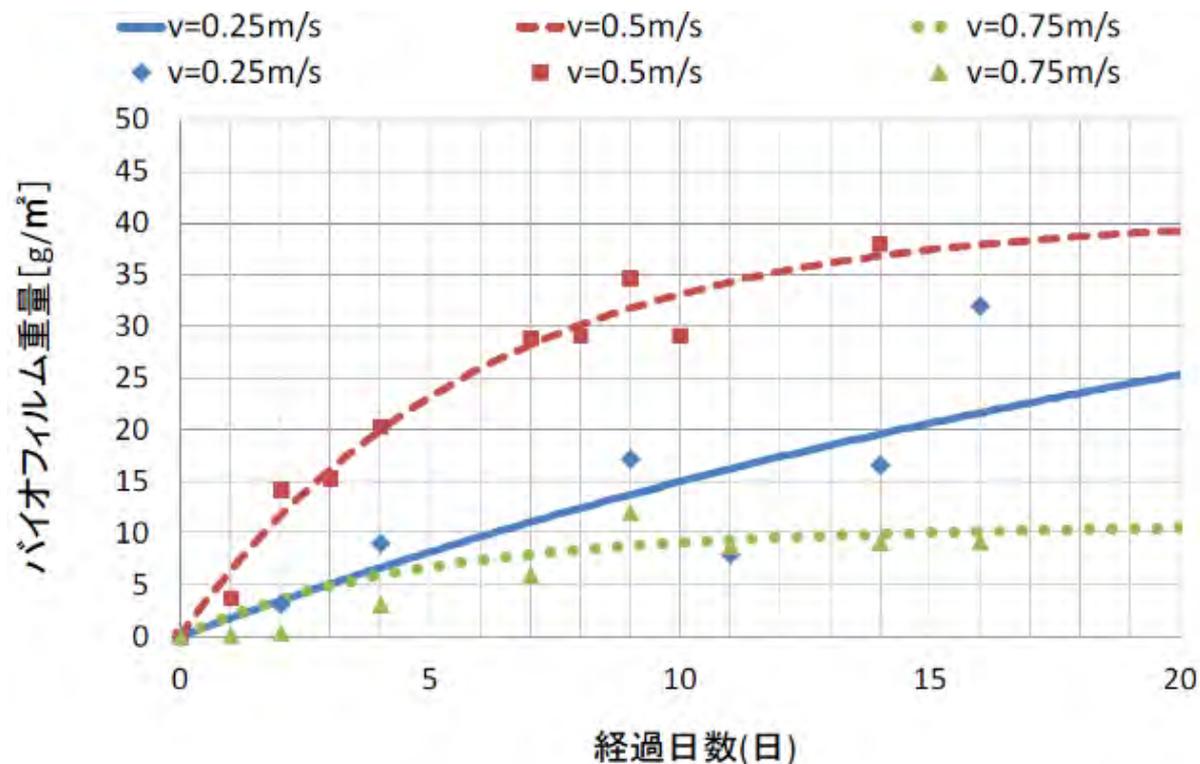
バイオフィルム計測実験装置

NEDO：次世代型ヒートポンプシステム研究開発プロジェクト

下水熱回収熱交換器の汚れに関する研究の一端を紹介

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を示す。

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。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。

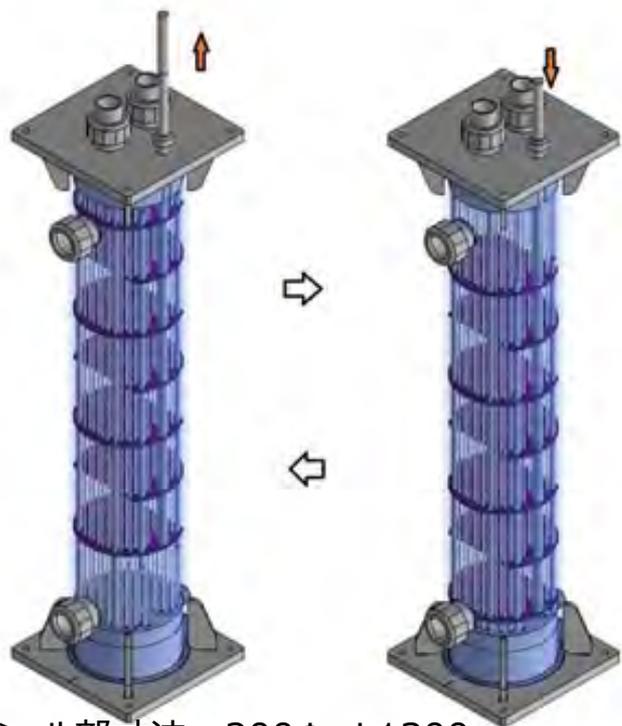


バイオフィーム重量の経時変化 (バイオフィーム付着試験)

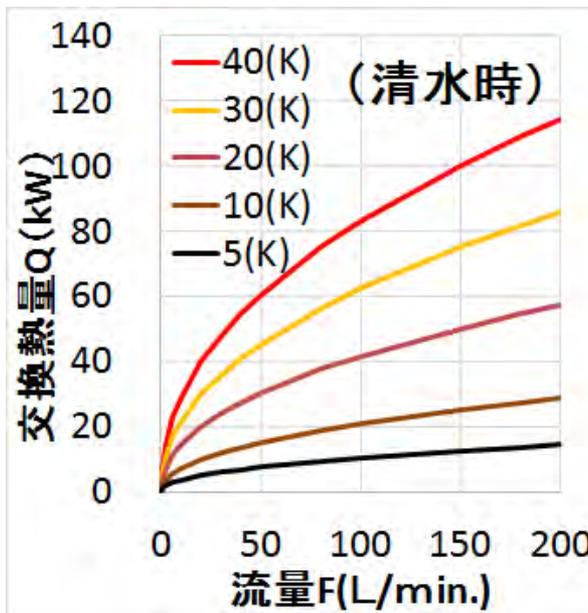
NEDO : 次世代型ヒートポンプシステム研究開発プロジェクト

シェル&チューブ熱交換器のシェル側伝熱面の洗浄（機械的掻き取り）機構

下水を用いた実証試験が必要



シェル部寸法：200Φ×L1300
伝熱管はポリプロピレン



かきとり機能付きシェル&チューブ熱交換器（東京電力ホールディングス）

提供：矢畷（東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所）

下水熱利用の普及のため、高性能化、低コスト化、維持管理費の低減が必要である。今後、給排水衛生分野の取り組みを期待したい。

研究開発テーマ

・管渠内熱交換器

バイオフィルム生成メカニズム解明：下水水質、温度、混濁物

バイオフィルム対策：下水によるフラッシング効果

・管渠外熱交換方式

スクリーン：夾雑物対策

熱交換器：バイオフィルム対策