

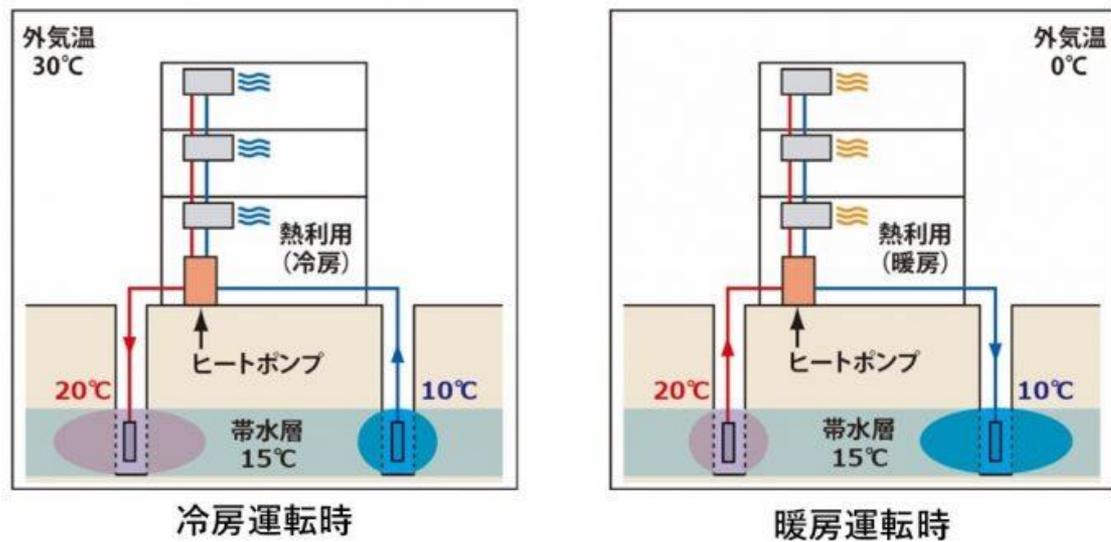
大容量帯水層蓄熱システムの実用化と実システムの運用実績

1. 帯水層蓄熱（ATES）とは
 2. 実用化のポイント（熱源井戸構築技術）
 3. 実システムの運用実績と帯水層への冷房排熱排出量
 4. 万博提案システムにおける帯水層への冷房排熱排出量
-

大阪公立大学

都市科学・防災研究センター 中尾正喜

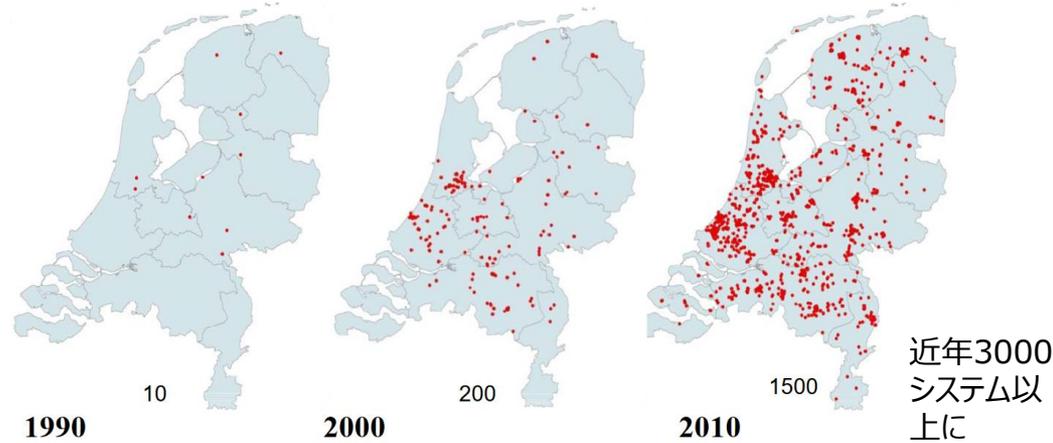
1. 帯水層蓄熱とは (環境省委託事業により開発)



出典：環境省ホームページ
https://www.env.go.jp/water/jiban/pdf/ATES_pamphlet_202003.pdf
 帯水層蓄熱とは



井戸外観図(三菱重工神戸造船所内ATES用井戸、
 写真提供：三菱重工サーマルシステムズ)



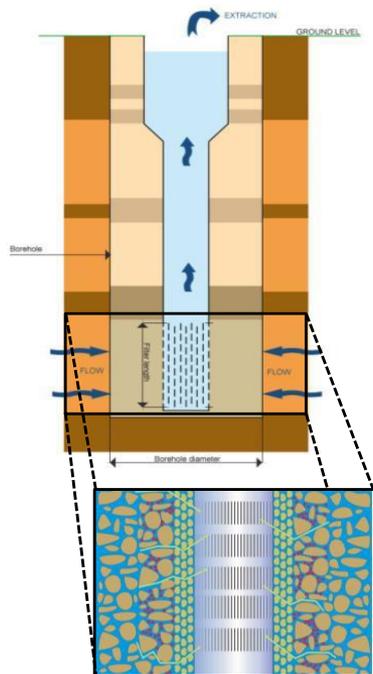
オランダの普及状況

2. 技術のポイント

調査技術

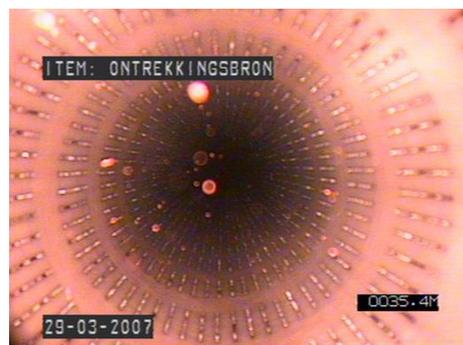
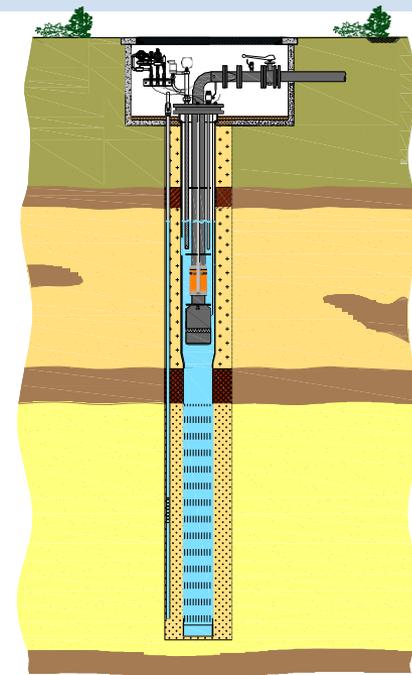
地層の順序
不透水層（粘土層の力学特性）
各層の粒度分布、層の均質性
帯水層の色、厚さ、透水性
地下水の流れ、速度、方向
地下水組成(鉄、NO₃、Cl)、温度
溶存ガス、汚染物質

熱源井戸の構築技術



設計は帯水層の特性と地下水の組成に依存。
フィルター（グラベル、スクリーン）の慎重な設計。

- ・気密および加圧システム。
- ・地下水の組成に基づく材料選択。



健全なスクリーン



目詰まりしたスクリーン

熱利用技術

井戸間隔設計、地下水流の影響、熱・物質収支制御、施設熱需要条件と気象条件による運用制御

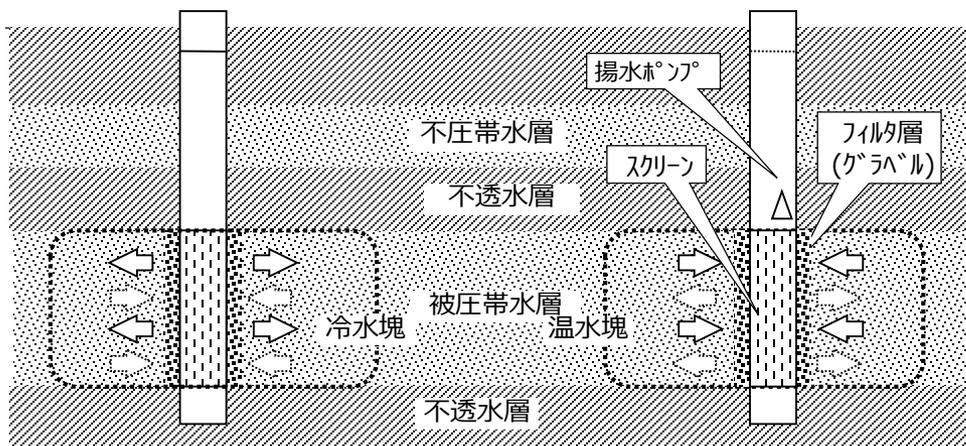
図の引用元: Critical success factors for the implementation of ATEs, Godschalk Bas、オランダ IfTechnology 社資料

帯水層とは

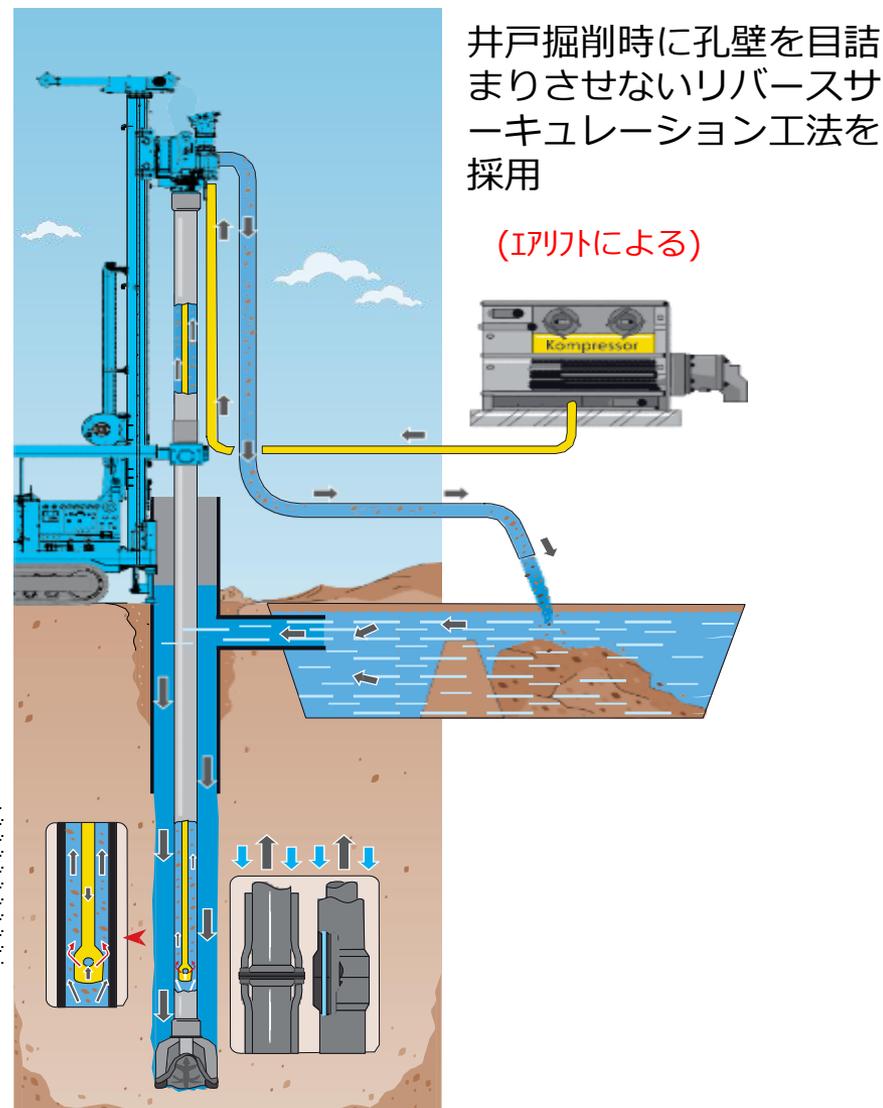
地下水が蓄えられている地層。通常は粘土などの不透水層（水が流れにくい地層）にはさまれた砂や礫からなる多孔質浸透性の地層を指す。この地層では、透水性が良く井戸の揚水量が確保でき、地下水流速が遅い領域では、蓄熱利用が可能

構築技術のポイント：

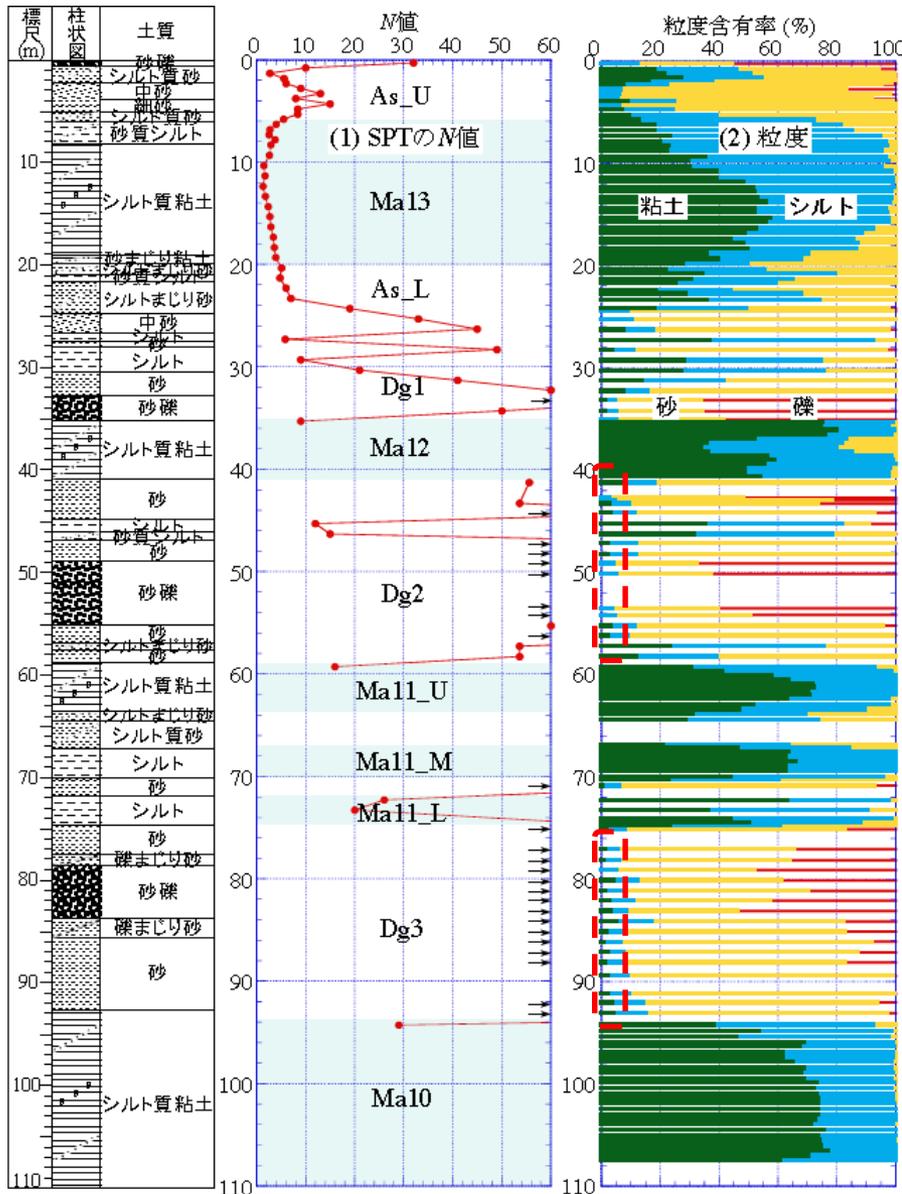
- ・ リバースサーキュレーション工法
- ・ フィルター（グラベル、スクリーン）の設計
- ・ 気密および加圧システム



大容量揚水・還水切替型熱源井戸の構築 (株)森川鑿泉工業所

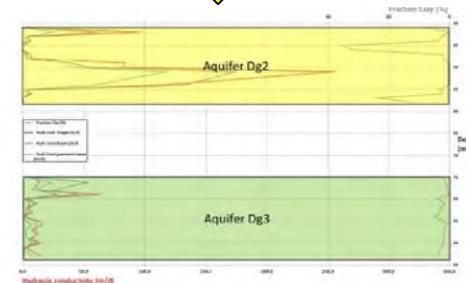


利用帯水層の粒度分析結果から、複数の透水係数の推定式を使い、揚水量を推定する。



粒度分布より透水量係数を推定

kD[m ² /d]	Dg2	Dg3
Kurger	666	211
Beyer	486	224
幾何平均	260	110
上記平均	483	181



各位置での透水性・粘土含有量の確認



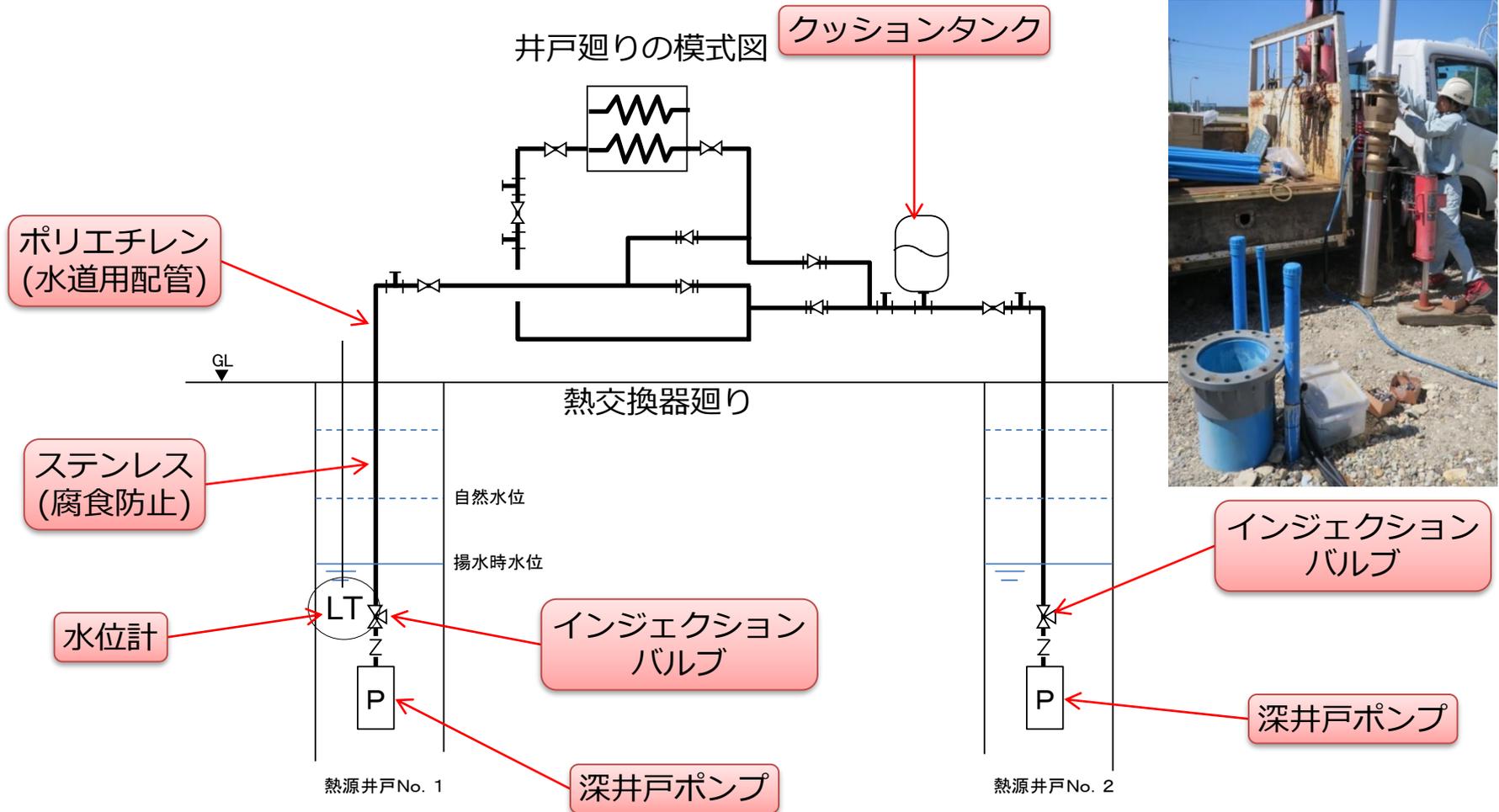
採水量の確認

	Dg2		Dg3	
	透水量係数 [m ² /day]	最大流量 [m ³ /h]	透水量係数 [m ² /day]	最大流量 [m ³ /h]
最小	296	50-60	110	15-25
平均	483	75-85	181	30-40
最大	666	90-100	224	40-50

粘土の含有量
10%以上の部分
にはスクリーン
は切らない

熱源井戸を常時加圧するシステム

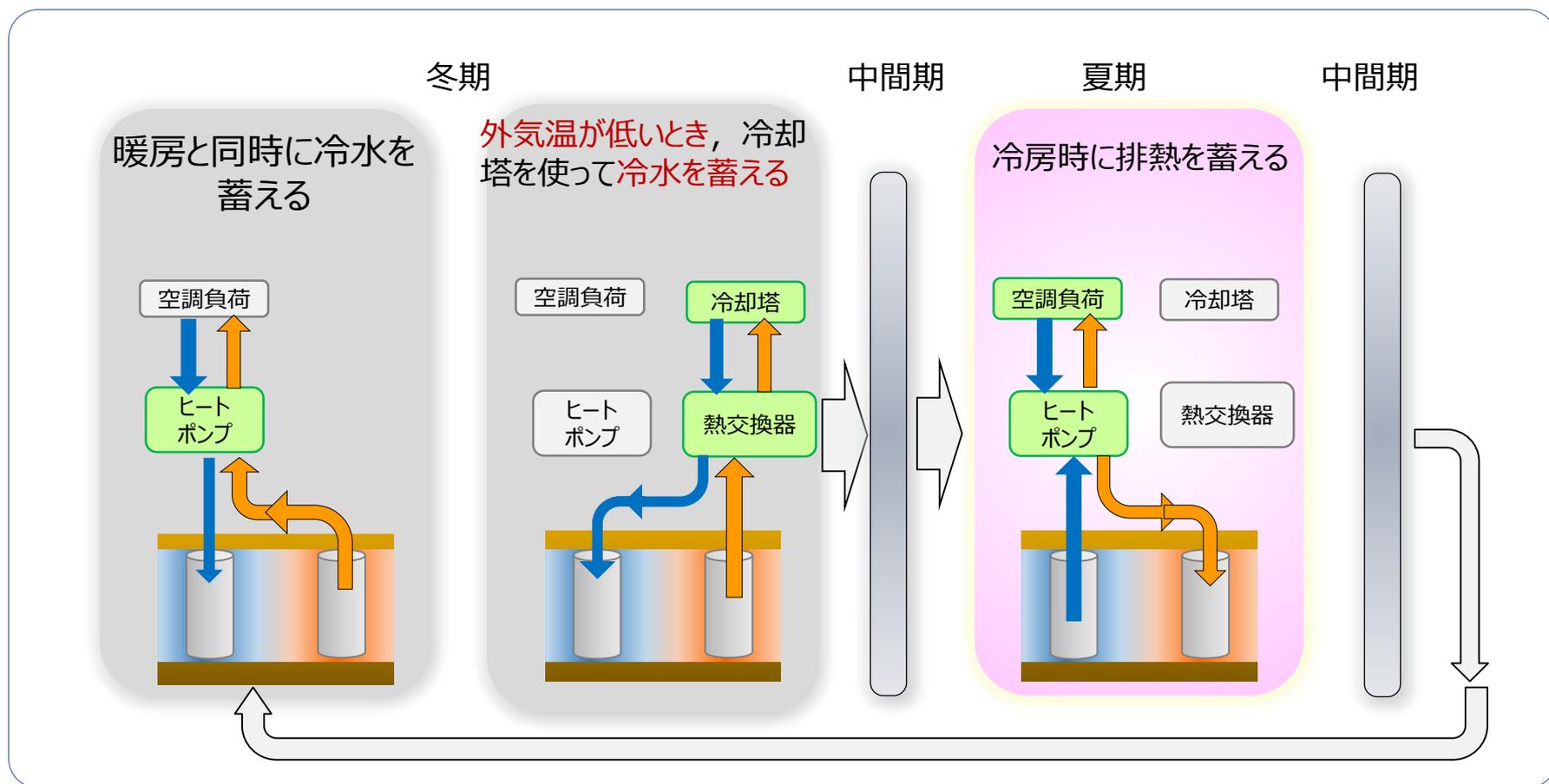
井戸廻りの模式図



インジェクションバルブ

深井戸ポンプ

- 地下水流速の小さな地層を選択し、適正な井戸間隔の下で、気象データと施設熱需要に応じた運用制御を行う。

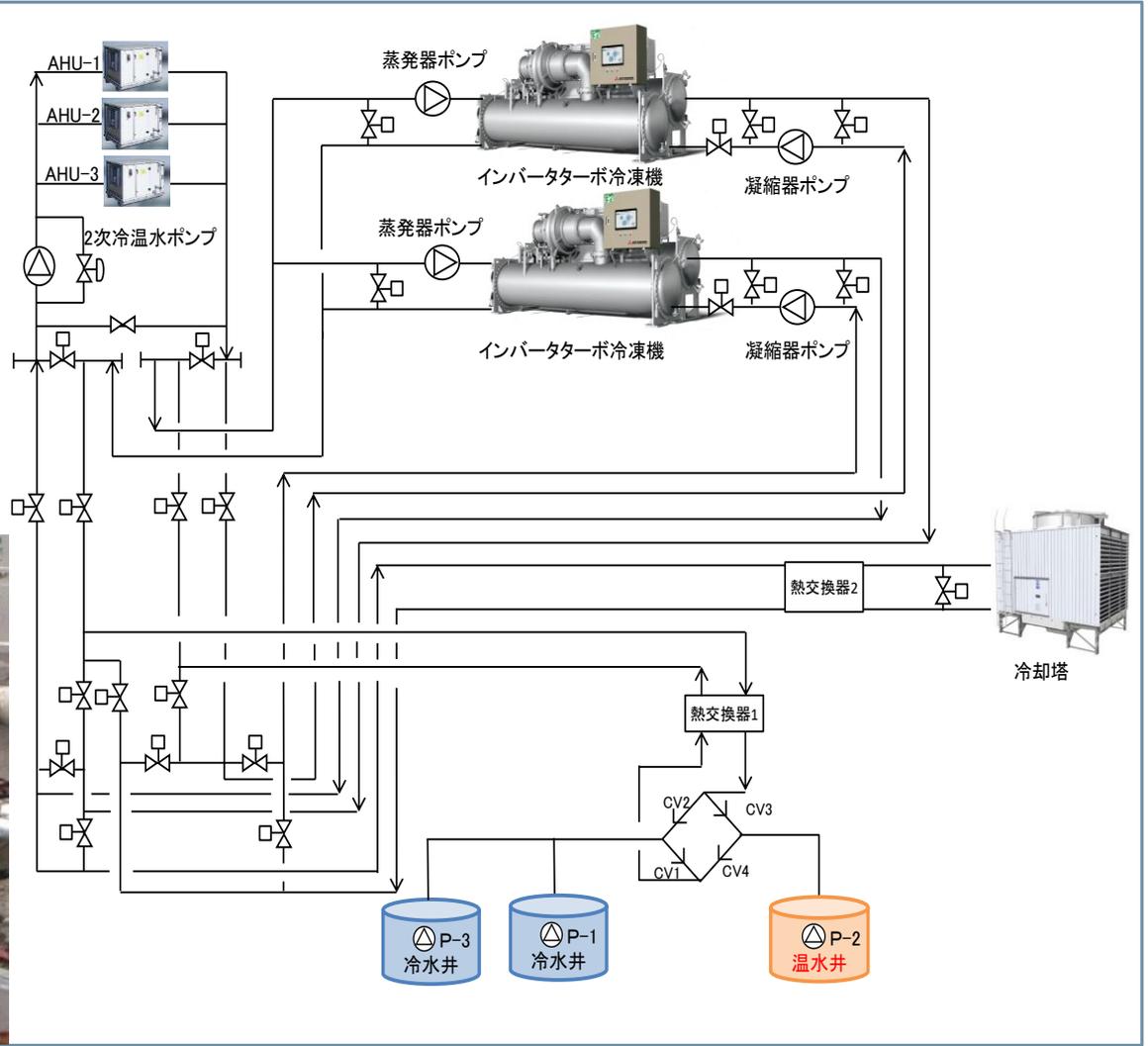


3. 実システムの運用実績と人工排熱削減量

三菱重工神戸造船所に導入されたATESシステムを2022年度大阪HITECのシンポジウム*1において紹介した。この運用状況とヒートアイランド対策としての効果を説明する。

*1：大阪地域のヒートアイランド・暑熱環境対策シンポジウム、大阪から世界へ、ヒートアイランド対策の推進、～2025年大阪・関西万博に向けて～、2022年4月28日（木）

- インバータターボ冷凍機：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



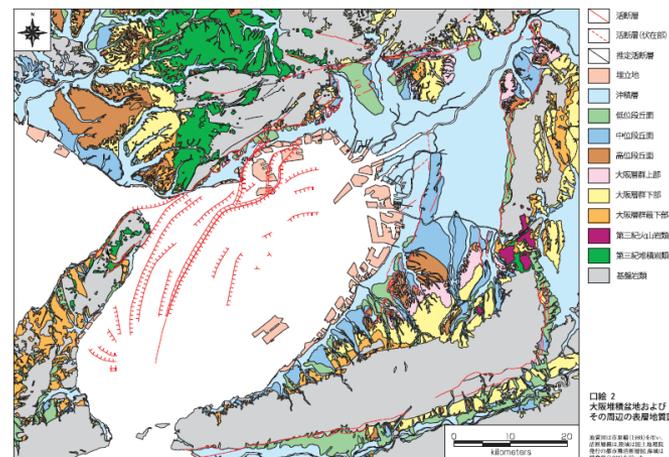
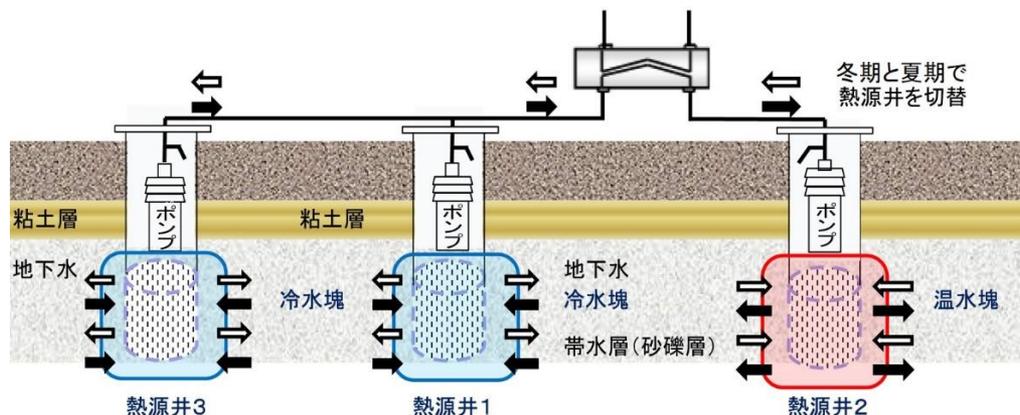
地盤状況

本システムは導入前にボーリング調査を行い60m³/h揚水可能な地下水を計画したが、片方の熱源井は計画揚水量の約半分となった。熱源井3本で工場冷暖房を行う水量が確保できるようになった。

原因：

本設備を構築した神戸和田岬の地質の問題と結論付けた。神戸和田岬は沿岸域でありながら山地が近く、沖積扇状地性デルタの堆積環境下で地層形成していることから、側方連続性の悪い礫質部分・砂質部分・泥質分が幾度も繰り返し堆積し、1~2m程度までの厚さの互層が形成され、上下を海成粘土で挟まれて、透水性がそれほど高くなく不安定な帯水層を形成していた。さらに、神戸和田岬周辺は、大阪湾西部の淡路島沖から北東に延びる大阪湾断層の分岐した断層構造が通過し、断層の活動による地層の変形を被っており、地層傾斜が他の地域に比べて大きく、一定の標高に水平に帯水層が分布していなかった。

地盤が複雑な地域で帯水層システムを構築する際には、十分地盤調査注を行い、慎重に計画する必要がある。運転開始して2年間経過しているが地盤沈下・目詰まりなどの影響は確認されていない。



大阪湾周辺の断層分布図
(出典：新関西地盤 関西圏地盤研究会,2007.11)

注：地盤調査とは候補地付近の地形・地質概要・地質構造・ボーリング調査によりサンプリング分析・粒子径分布より透水係数推定・地盤沈下影響分析・揚水量評価・地層構造図などを分析し、帯水層蓄熱システム適応性の可否を検討する作業を指す。

運転モード切替機能：

外気条件、熱負荷、揚水温度に応じて、4つの標準モード切替えている。

No.1 熱源水利用 (暖房+冷水蓄熱)

冬季の暖房を行いつつ、低温冷水を蓄熱するモード

No.2 冷却塔フリークーリング蓄熱 (蓄冷)

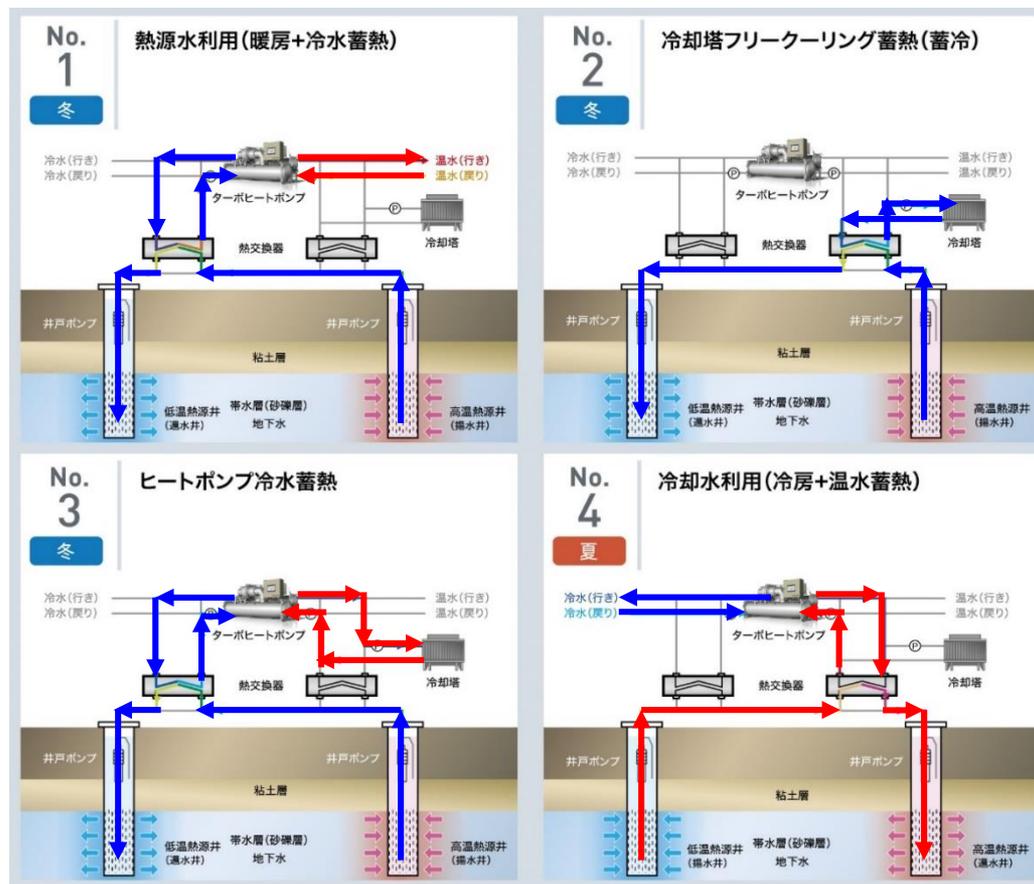
外気温度が低い時に夏季の冷房利用に備えて低温冷水を蓄熱するモード

No.3 ヒートポンプ冷水蓄熱

外気温度が低い時にヒートポンプが大幅に性能向上する特性を利用し、冷房利用に備えて低温冷水を蓄熱するモード

No.4 冷却水利用 (冷房+温水蓄熱)

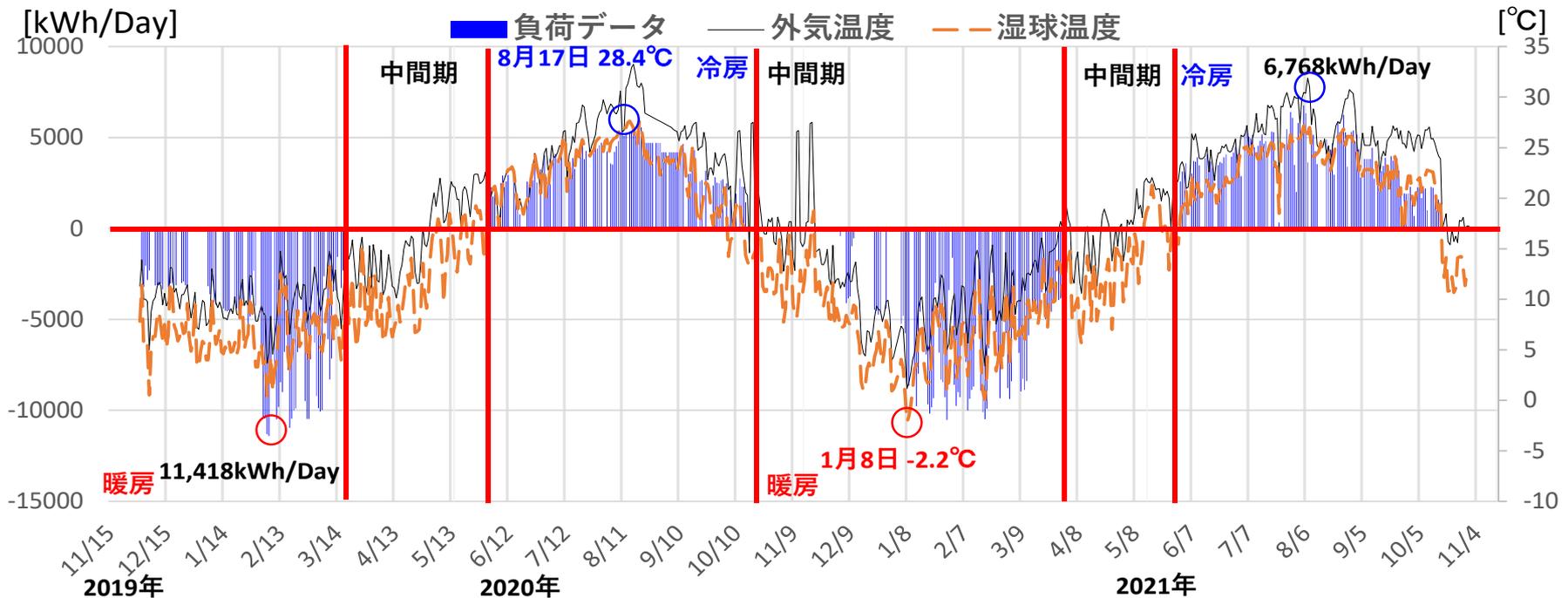
夏季の冷房を行いつつ、高温温水を蓄熱するモード



青：蓄冷運転 赤：蓄熱運転

2019年12月～2021年10月までの実証設備の1分間隔で採取したデータを用いた性能評価を実施

冷房時の日熱負荷処理量の最大値は6,768kWh/day, 暖房時は11,418kWh/dayで暖房時の日積算熱量の最大値は冷房時より多い。これは、冬期に21時間連続の暖房運転を実施したためである。

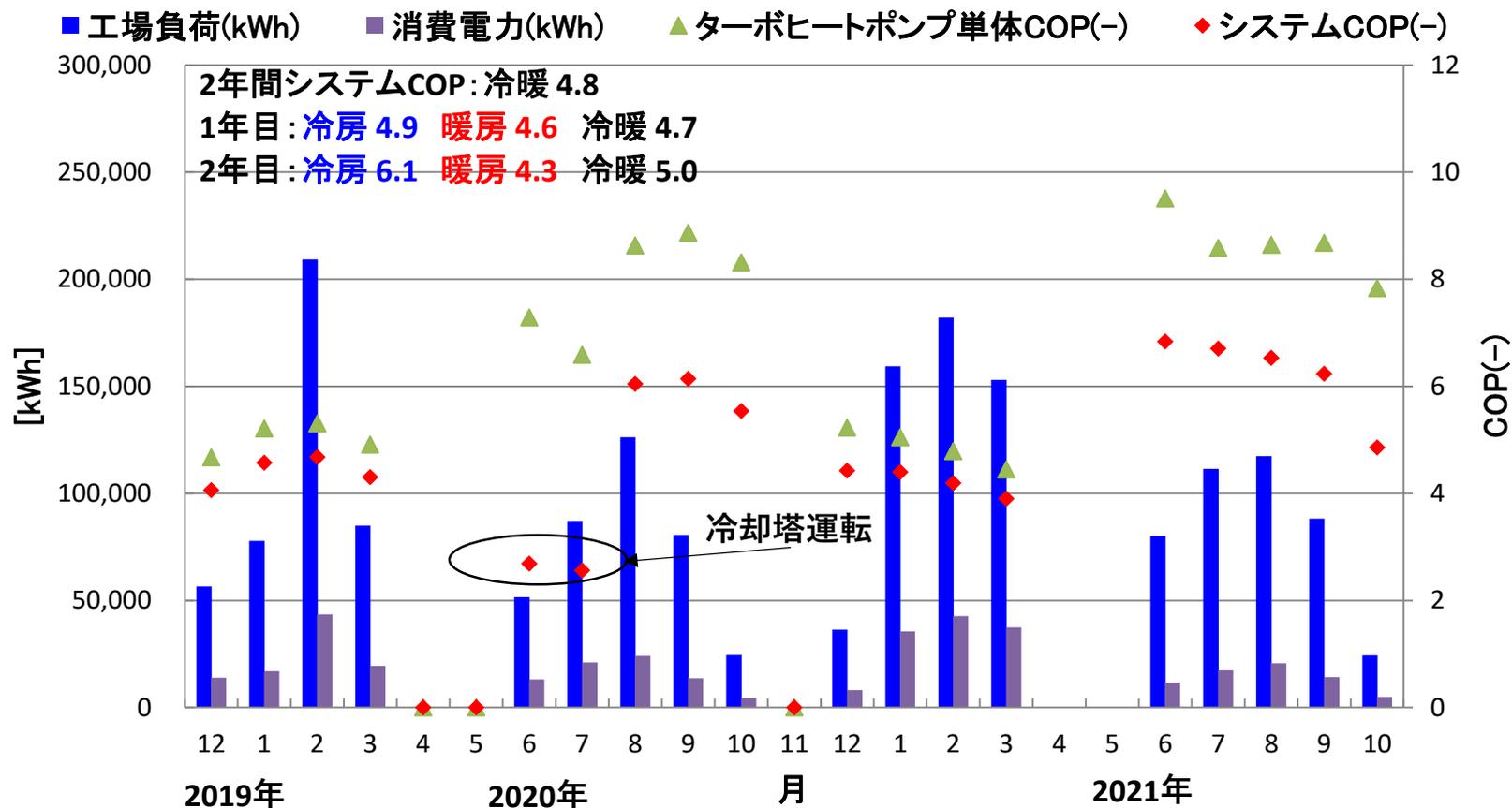


運用実績 (冷房と暖房の日熱負荷処理量、外気温と湿球温度)

出典：崔林日・西岡真稔・中尾正喜・三田村宗樹・上田憲治、帯水層蓄熱を利用した空調システムの研究-実性能評価と運用方法の検討、地盤工学会関西支部・Kansai Geo-Symposium 2023 182 - 187 2022年11月

帯水層蓄熱システム性能

月別の帯水層蓄熱システムの設備の消費電力と期間のCOPの推移を示す。COP（成績係数）とは消費電力に対する熱量の比率であり、数値が大きいほどエネルギー消費効率が高いことを表す。

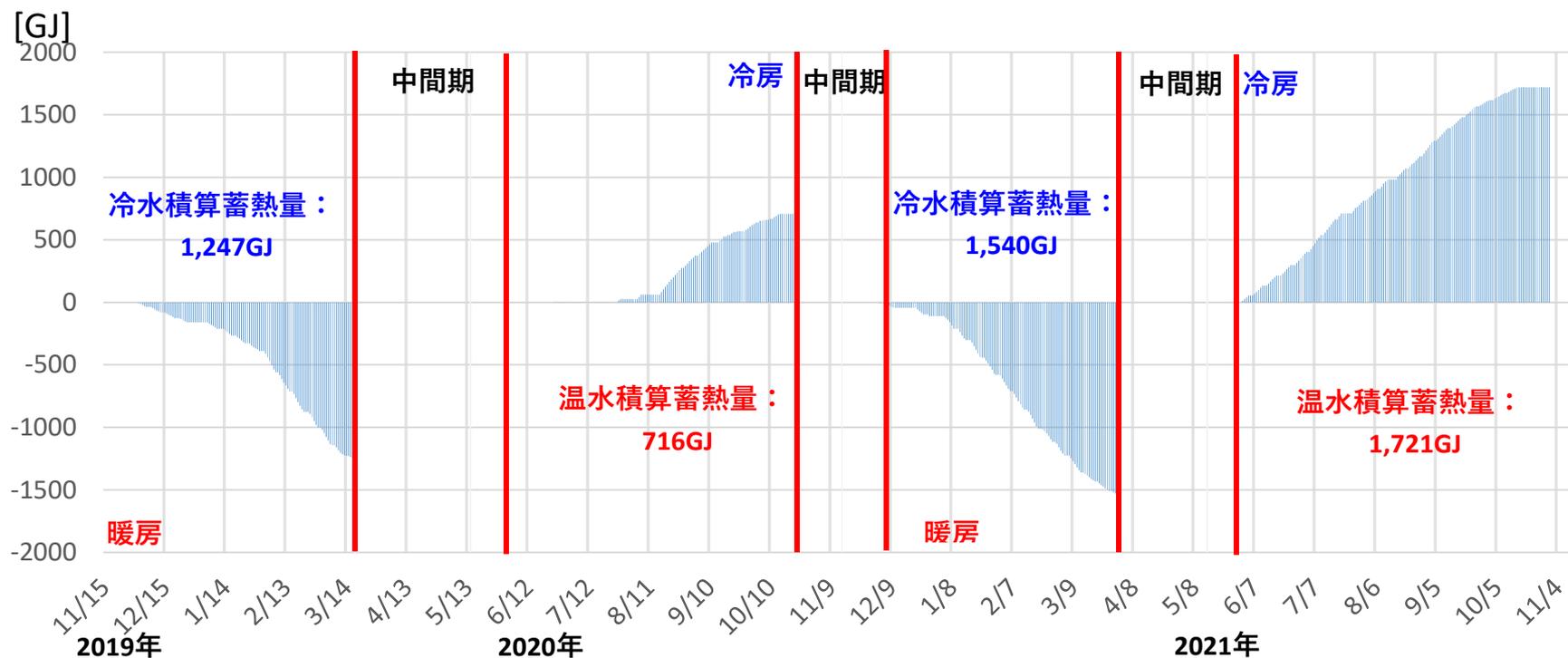


工場負荷に対するSCOP=工場負荷/設備全体動力 蓄熱量に対するSCOP=蓄熱量/設備全体動力
 設備全体動力=ターボヒートポンプ圧縮機動力+各種ポンプ動力+冷却塔ファン動力

施設（工場）の熱負荷、消費電力、ターボヒートポンプCOP、システムCOP

出典：崔林日・西岡真稔・中尾正喜・三田村宗樹・上田憲治、帯水層蓄熱を利用した空調システムの研究-実性能評価と運用方法の検討、地盤工学会関西支部・Kansai Geo-Symposium 2023 182 - 187 2022年11月

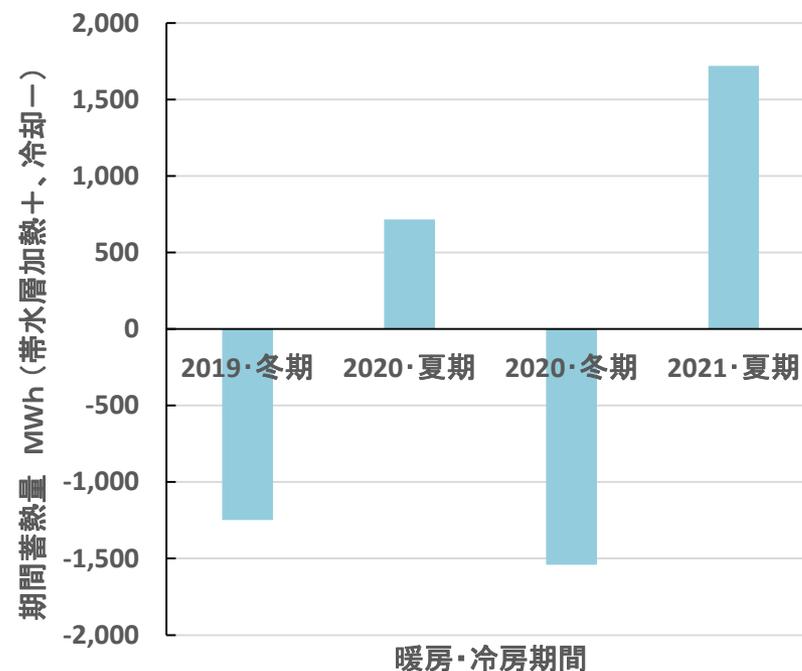
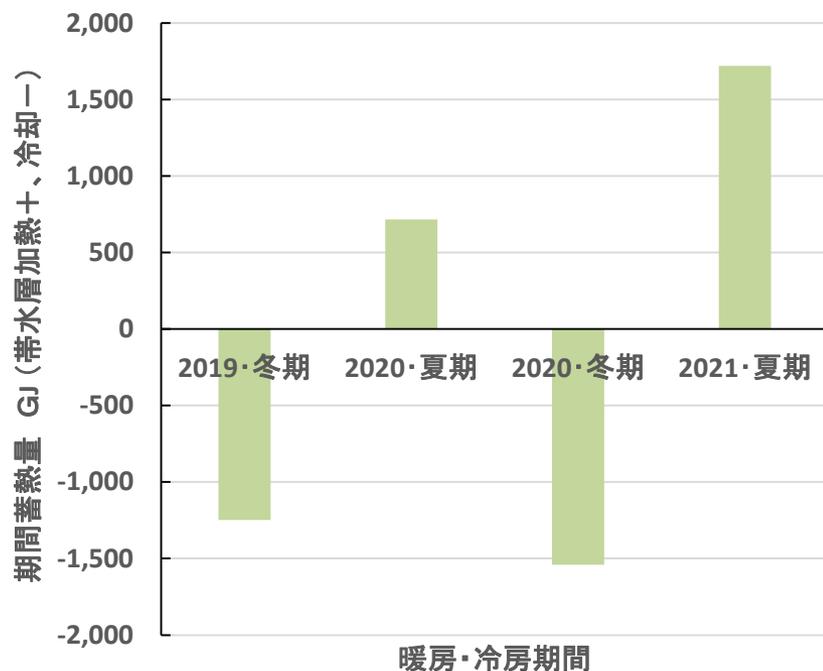
年間積算蓄熱量の推移を示す。1年目は暖房時の冷水積算蓄熱量が冷房時の温水積算蓄熱量より大幅に上回り、熱量バランスが崩れている。2年目以降は改善されつつある。



積算蓄熱量の推移

出典：崔林日・西岡真稔・中尾正喜・三田村宗樹・上田憲治、帯水層蓄熱を利用した空調システムの研究-実性能評価と運用方法の検討、地盤工学会関西支部・Kansai Geo-Symposium 2023 182 - 187 2022年11月

期間蓄熱量・蓄熱積算量・SCOP



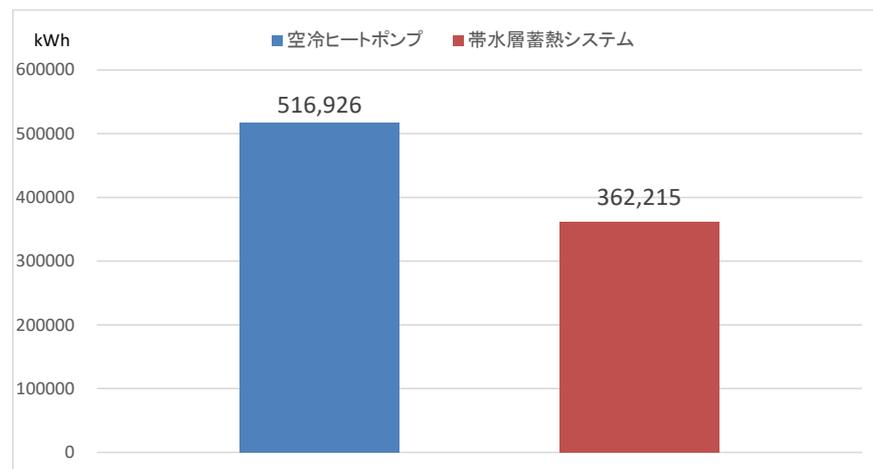
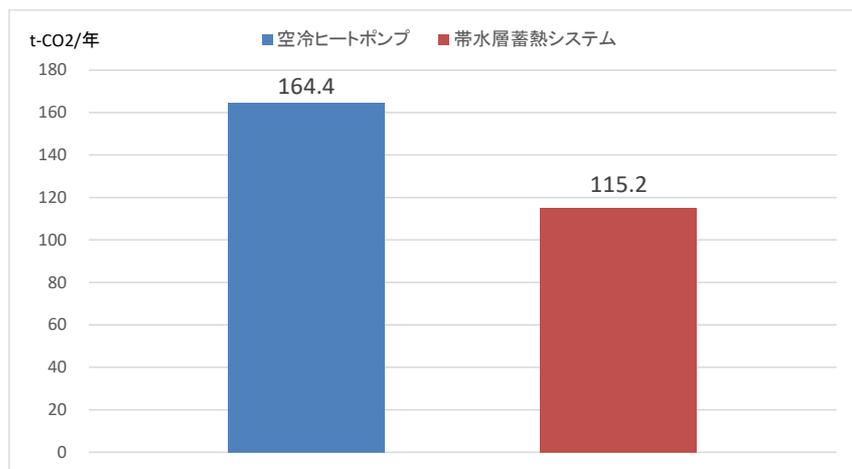
サイクル	年・季節	期間蓄熱量 (加熱十、冷却ー)		蓄熱積算量 GJ	シーズン別 消費電力 GJ/シーズン	シーズン別 SCOP
		GJ/シーズン	MWh/シーズン			
1	2019・冬期	-1,247	-346	-1,247	271	4.6
	2020・夏期	716	199			
2	2020・冬期	-1,540	-428	-2,071	358	4.3
	2021・夏期	1,721	478			

出典：崔林日・西岡真稔・中尾正喜・三田村宗樹・上田憲治、帯水層蓄熱を利用した空調システムの研究-実性能評価と運用方法の検討、地盤工学会関西支部・Kansai Geo-Symposium 2023 182 - 187 2022年11月

空冷ヒートポンプシステムとの比較

年間消費電力とCO2削減量は、同規模の空冷ヒートポンプ対比で**29.9%削減**した。

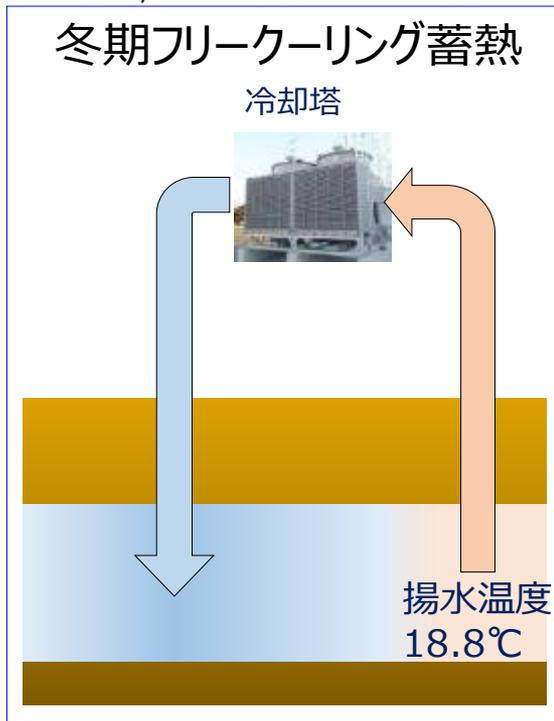
項目	従来システム 空冷ヒートポンプ	本システム 帯水層蓄熱
冷房負荷(kWh)	786,831.2	786,831.2
暖房負荷(kWh)	959,410.7	959,410.7
消費電力(kWh)	516,926	362,215
削減率	100.0%	29.9%
システムCOP(-)	3.4	4.8
電気CO ₂ 削減量(t-CO ₂ /年)	164.4	115.2
CO2削減量(t-CO₂/年)	-	49.2
削減率	100.0%	29.9%



3. 万博提案システムにおける帯水層への冷房排熱排出量

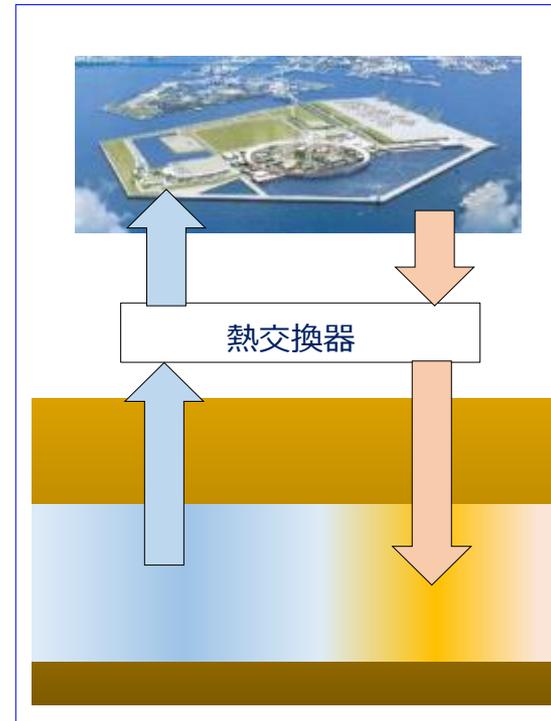
大阪万博は**2025年4月から10月に開催**される。そのため、地中の大規模な蓄熱機能を活用して、2024年12月から2025年3月までの**冬期に、低温外気により地中の帯水層を冷やしておき、開催期間に万博地域熱供給設備用熱源として活用**する。なお、熱源水として活用した後で、屋外空間のクールスポットを実現するための冷熱源としてとして活用することも可能である。

低外気温時、冷却塔を使って冷水を蓄える

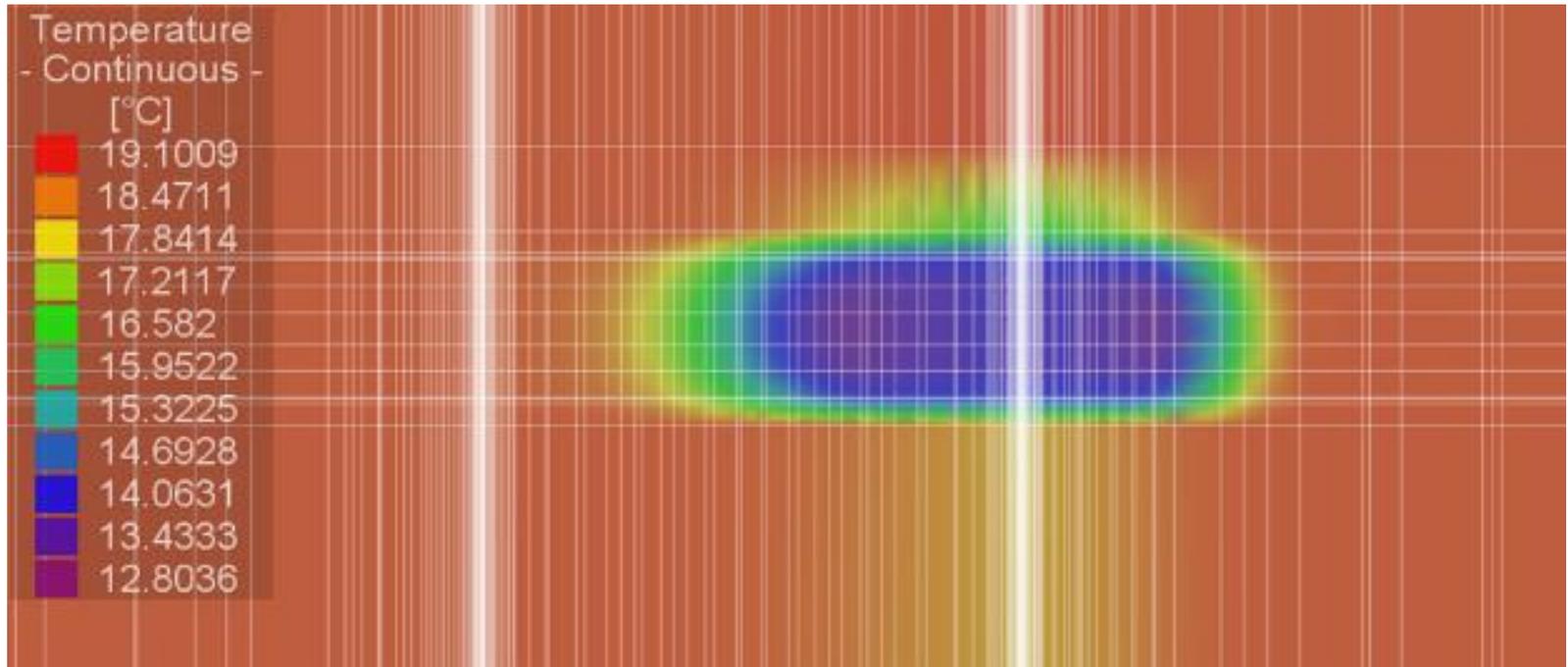


2024年12月から2025年3月

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



還水終了時の地中断面温度分布

帯水層厚さ : 10 m
井戸間距離 : 200 m

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

システムCOPとATESへの期間冷房排熱排出量（シミュレーション結果）

（1）低温井戸の揚水温度

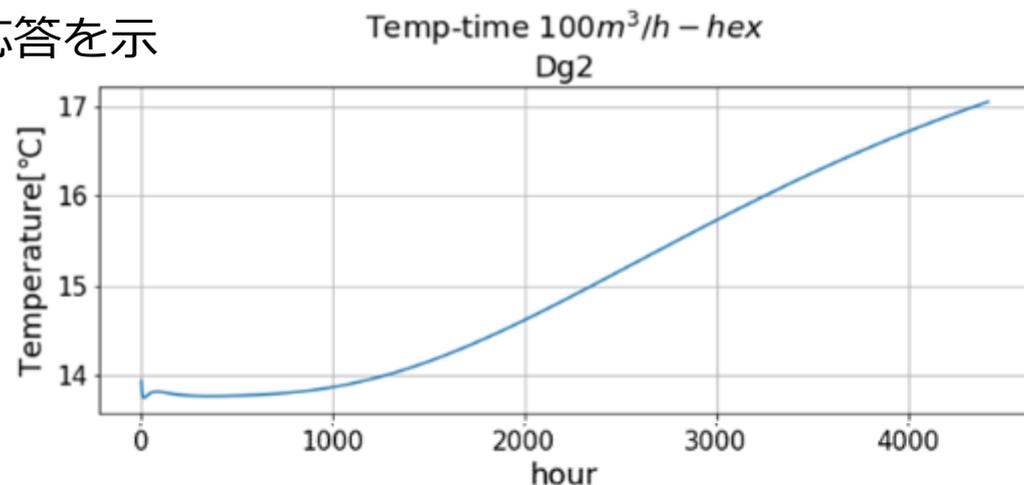
右図に一定流量条件での揚水温度応答を示す。
平均揚水温度は**15.0°C**である。

（2）システムCOP

初年度のサイクルで冬期と夏期のポンプ等(揚水ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔ファン) 消費電力128MWhにより1,911MWh冷却できる（消費電力の15倍の熱を冷却できる）

（3）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°Cとすると、**揚水体積273,270 m³**であるので、**開催期間中に**帯水層へ排出する熱は8,668GJ（2,408MWh）となる。



縦軸；揚水温度、横軸：時間
冷房期間の揚水温度応答

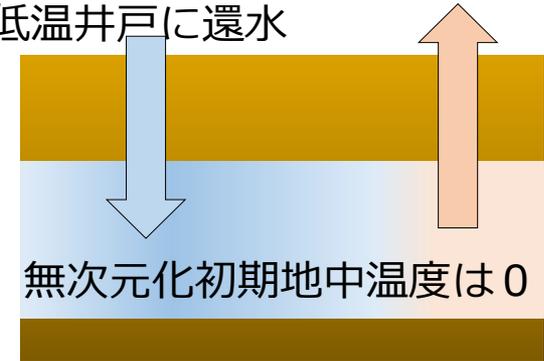


万博協会にアイデア提案したATESシステムの期間冷房排熱排出量はATES 1システムで1,000kWの排熱2,408時間分に相当

計画段階で、ATESが夏期の人工排熱を受け入れる能力を求める方法

- (1) 冷暖房期間毎の平均還水温度と平均揚水温度の温度差、 $\Delta\theta$ [°C]
- (2) 期間揚水・還水体積、 V [m³]
- (3) 熱回収率（または無次元化平均揚水温度） η
- (4) 初期地中温度 T_0 （無次元化初期地中温度は0）

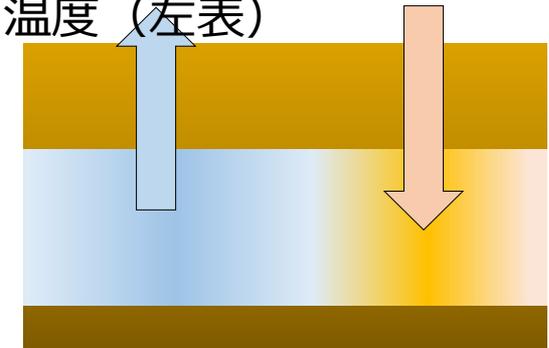
無次元化温度-1 で
低温井戸に還水



期間揚水体積の場合の無次元化平均揚水温度

		井戸間隔 m			
		50	75	100	200
帯水層 厚さ m	5	-0.05	-0.24	-0.44	-0.67
	10	-0.19	-0.51	-0.68	-0.76
	15	-0.36	-0.66	-0.76	-0.79
	20	-0.48	-0.73	-0.79	-0.80

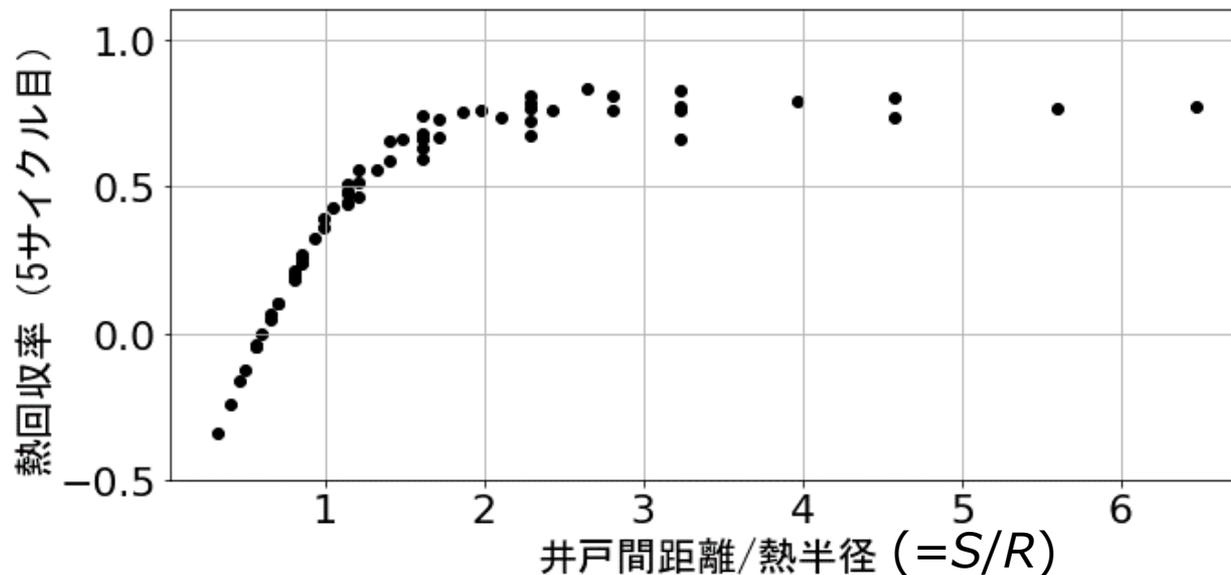
揚水は無次元化
温度（左表）



参考文献

- 1) 中尾 正喜、西岡 真稔、仲西 琴音、徳田 隆秀、帯水層蓄熱システム企画のための揚水温度予測手法（第1報）既往研究の無次元化アプローチと課題、空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 2020.9、169-172
- 2) Christine Doughty, Goran Hellstrom, Chin Fu Tsang,, A Dimensionless Parameter Approach to the Thermal Behavior of an Aquifer Thermal Energy Storage System, Water Resources Reserch, VOL. 18, NO. 3, Pages 571-587, June 1982
- 3)中尾 正喜、吉信 椋太、徳田 隆秀、辻 裕伸、帯水層蓄熱システム企画のための揚水温度予測手法（第2報）井戸間の熱干渉を考慮したモデル、空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集、2022.9、49-52
- 4)中尾 正喜、吉信椋太、西岡 真稔、間宮尚、帯水層蓄熱システム企画のための揚水温度予測方法（第3報）熱回収率に対する流速の影響、空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集、2023.9(掲載予定)

- ・ 高温側井戸：5サイクル目の無次元化平均揚水温度
- ・ 熱半径に対して井戸間距離が大きいほど、揚水温度平均が高くなる傾向
- ・ 井戸間隔が熱半径の2倍以上の範囲では熱回収率の変化が小さく



※注水温度が一定なので、高温側井戸の無次元化平均揚水温度 = 熱回収率

※熱半径 $R = \sqrt{\frac{V_w C_w}{C_a \pi H}}$, V_w : 揚水還水体積, H : 帯水層厚さ, S : 井戸間距離,
 C_a : 帯水層等価容積比熱, C_w : 水の容積比熱