

未利用エネルギーを用いた低 GWP ターボヒートポンプの 帯水層蓄熱システム

Aquifer Heat Storage System of Low GWP Turbo Heat Pump Using Unused Energy



崔 林日*¹
Cui Linri

坂井 正頌*²
Masanobu Sakai

二階堂 智*³
Satoshi Nikaido

山口 徹*³
Toru Yamaguchi

上田 憲治*⁴
Kenji Ueda

私たちの足元に眠る豊富な地下水は、砂礫などから構成される帯水層と呼ばれる地層にあり、外気温度に比べると、冬は温かく、夏は冷たく熱源としての価値が高い未利用の温度差エネルギーである。この帯水層を巨大な蓄熱層に見立てて、ターボヒートポンプを使って冷房時の温排熱、暖房時の冷排熱を貯め、温排熱を暖房に、冷排熱を冷房に、季節をまたいで有効利用する空調システムは帯水層蓄熱システムと呼ばれている。三菱重工サーマルシステムズ株式会社(以下、当社)は、帯水層蓄熱システムに適切な高効率ターボヒートポンプを用いた冷暖房システムとエネルギー管理最適制御システムを開発した。

1. はじめに

エネルギーの需要密度の高い大都市域は、その大部分が沖積平野に位置している。その足元に眠る帯水層は熱的な利用価値が高いものの、地下水揚水には地盤沈下リスクを伴うため、揚水規制が敷かれている地域が多く利用されてない。帯水層蓄熱システムは地下水を汲み上げ全量熱源利用したのち直ちに地中に戻す機構であるため、地盤沈下リスクを最小限に抑えることができる技術である。帯水層を巨大な蓄熱槽に見立てて冷房時の温排熱、暖房時の冷排熱を貯め、温排熱を暖房に、冷排熱を冷房に季節をまたいで利用することで、より効率よく熱を利用できるため、省エネルギー、CO₂排出量削減、ヒートアイランド緩和、地球温暖化防止が期待できる。

オランダ⁽¹⁾では 2000 年以降、急速に帯水層蓄熱が普及しており、現在 2000 件を超えるプラントが稼働している。近年、中国⁽²⁾においても帯水層蓄熱システムが注目され、普及し始めている。しかし、日本では帯水層蓄熱システムが知られていないこともあり普及していない。

本報では、帯水層蓄熱システムの定義・構成・メリット及び基本的な運用パターンを整理し、当社がこれまで構築した帯水層蓄熱システムと最適制御システムを紹介する。

2. 帯水層蓄熱システムとは

2.1 帯水層の定義

帯水層とは、地下水が蓄えられている地層のことである。通常は粘土などの不透水層(水が流れにくい地層)に挟まれた、砂や礫からなる多孔質の地層を指す。この地層では、透水性がよく井戸の揚水量が確保でき、地下水の流速が遅い領域では、蓄熱層として利用できる。

*1 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 大型冷凍機技術部

*2 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 営業部

*3 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 大型冷凍機技術部 グループ長

*4 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 大型冷凍機技術部 部長 工学博士

2.2 帯水層蓄熱システム構成

帯水層蓄熱システムとは図1に示すように、建物の空調利用等を目的として、帯水層に蓄えられた地下水を熱源として利用するシステムであり、ターボヒートポンプ、冷温水ポンプ、冷却水ポンプ(熱源水ポンプ)、井戸ポンプ、冷却塔水ポンプ、1組の熱源井と接続配管、熱交換器、膨張タンク、及び付属の計器類と制御機器から構成されている。

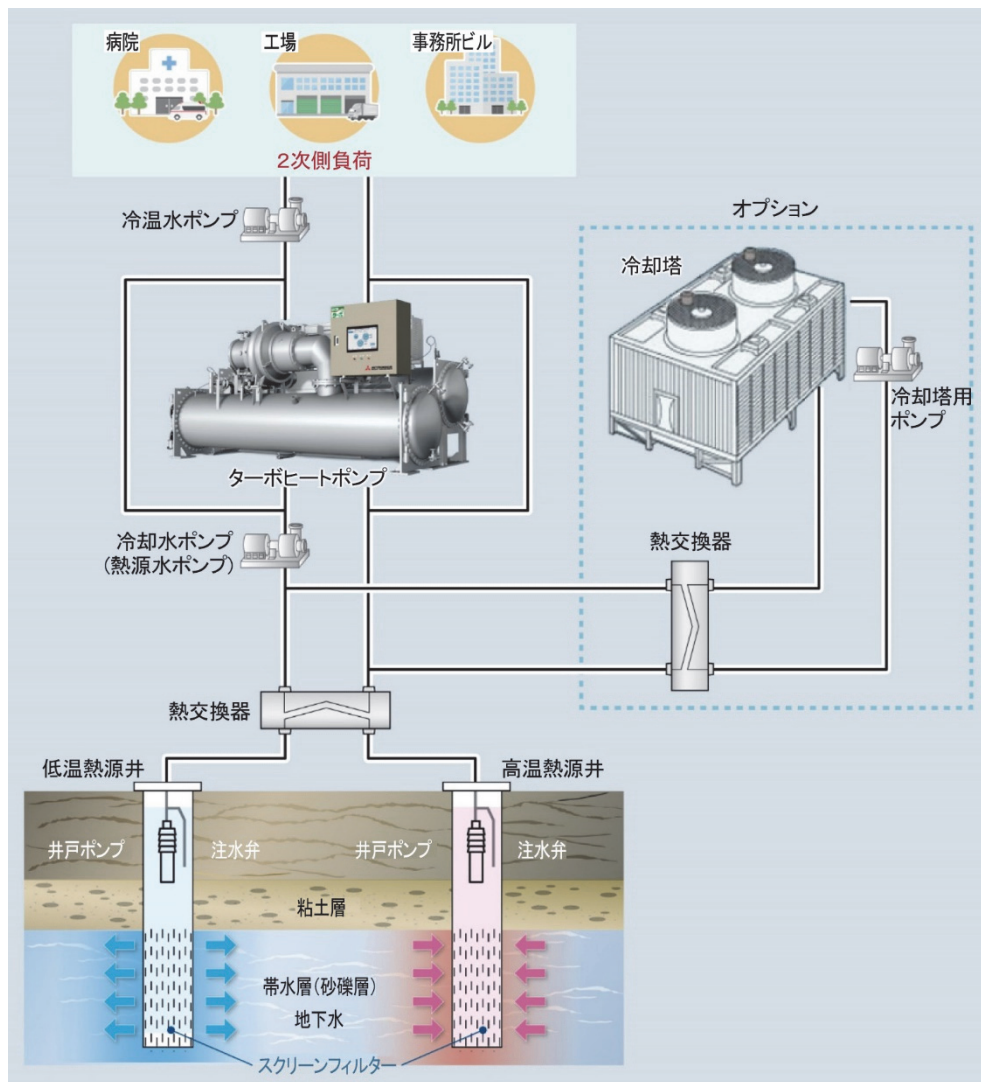


図1 帯水層蓄熱システム構成図

2.3 帯水層蓄熱システムのメリット

帯水層蓄熱システムのメリットは以下のとおりである。

(1) 安定した地下水温度

地上から15~20mより深いところでは、地下水は外気温の影響を受けにくく、年間を通じて安定しているため、熱源水利用として適切であることが分かる(図2⁽³⁾)。

(2) 省エネルギー

冷房時には温熱、暖房時には冷熱を帯水層に蓄熱することにより、冷房・暖房時の利用温度差が小さくなり、年間を通して大幅な省エネルギー効果を実現することができる。図3に帯水層蓄熱システムを利用した場合の消費動力のイメージ図を示す。

(3) 熱の有効利用(季節間での蓄熱, 利用)

地下水を汲み上げるポンプを冬期と夏期に切り替えることができ、冬期の暖房時の冷排熱を次シーズンの夏期の冷房に利用し、夏期の冷房時の温排熱を次シーズンの冬期の暖房に利用することができるようになり、更なる熱の有効利用が可能である(図4)。

(4) ランニングコストの低減

従来の空冷ヒートポンプ空調システムに対して、約38%の電力量とCO₂排出量の削減を図ることができる。図5に帯水層蓄熱システムを利用した場合の年間ランニングコスト⁽⁴⁾の比較を示す。

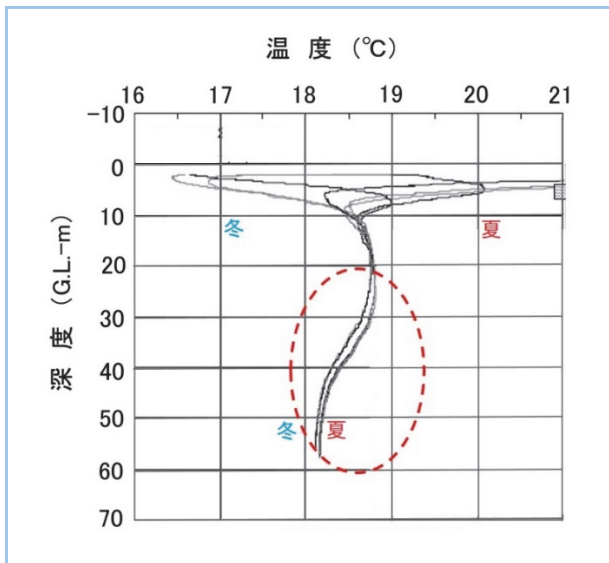


図2 地下水温度分布の経時的変化

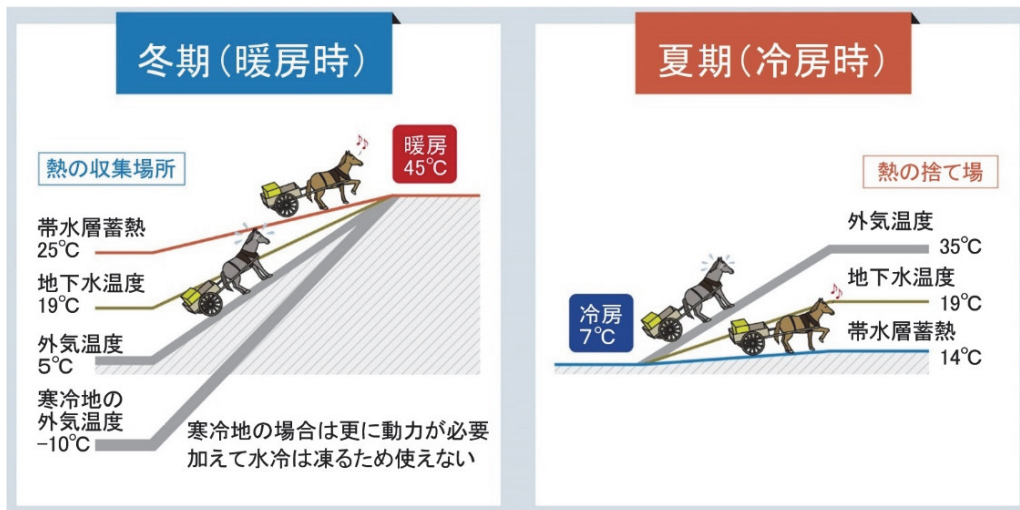


図3 帯水層蓄熱システムを利用した場合の消費動力イメージ

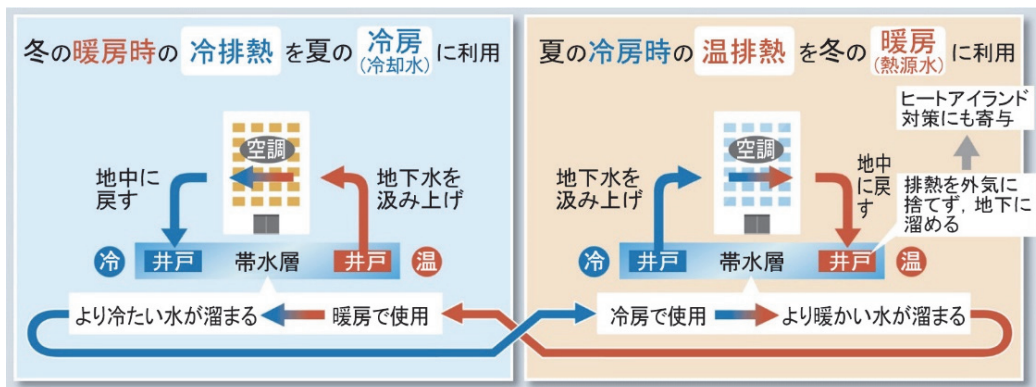


図4 季節間蓄熱利用イメージ図

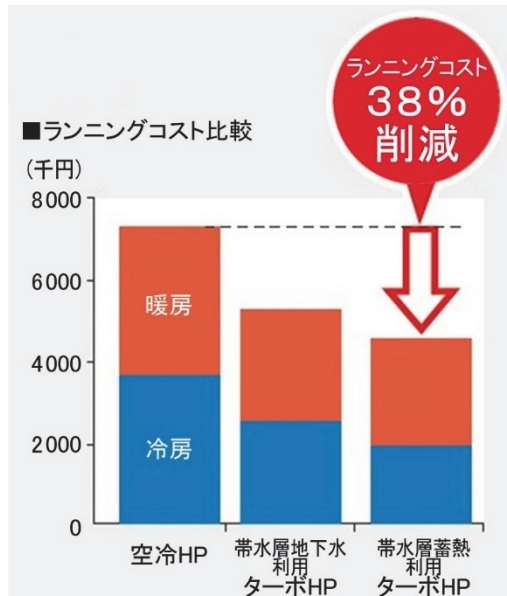


図5 年間ランニングコスト比較

3. 帯水層蓄熱システムの基本運用方式

図6に示した利用方法を夏期と冬期の空調負荷(熱量)の違いを考慮せず単純に地中熱利用を行うだけでは、冷水負荷・温水負荷の熱量アンバランスにより、冷排熱あるいは温排熱の蓄熱塊が拡大し続けるため、持続可能な地中熱利用はできない。そこで、図6に示した帯水層蓄熱システム向け運用方式を適用し、独自開発した帯水層蓄熱システム専用のエネルギー管理最適制御システムにより、自動でシステムフローの組合せを行うことで夏期・冬期の空調熱量及び利用水量アンバランスを解消し、持続可能な地中熱利用を実現する。

No.1: 冬期暖房+冷水蓄冷運転

高温熱源井の地下水をターボヒートポンプの熱源水として利用し、ヒートポンプの排熱を暖房用温熱として利用する運転モード。冬期の暖房を行いつつ、低温熱源井に一定温度の冷水を注水するように自動制御し、夏期の冷房利用に備えて蓄冷する。

No.2: 冬期冷却塔冷却蓄冷運転

冷却塔により、冷水を低温熱源井に蓄冷する運転モード。外気温度が十分に低く、冷却塔によりシステムの低温要求温度以下の冷水が得られる場合、冷却塔冷水を利用した蓄冷運転を自動運転で実施し、夏期の冷房利用に備えて蓄冷する。

No.3: 冬期ターボヒートポンプ蓄冷運転

ターボヒートポンプにより低温熱源井へ蓄冷する運転モード。夏期の冷房利用に備えて蓄冷し、ヒートポンプの排熱は冷却塔へ放熱する。インバータターボヒートポンプが外気温の低いときには大幅に性能向上する特性を積極的に利用する運転モードである。

No.2・No.3 の運転モードは、夏期・冬期の熱負荷(熱量)のアンバランス解消を目的とした蓄冷運転モードであり、外気温度・湿度の条件に応じて各モードの消費電力比較を行い、消費電力が低いモードを自動選択して運転する。

No.4: 夏期冷房+温水蓄熱運転

低温熱源井の地下水をターボヒートポンプの冷却水として利用し、夏期の冷房を行う運転モード。高温熱源井に一定温度の温水を注水するように自動制御し、冬期の暖房利用に備えて蓄熱する。

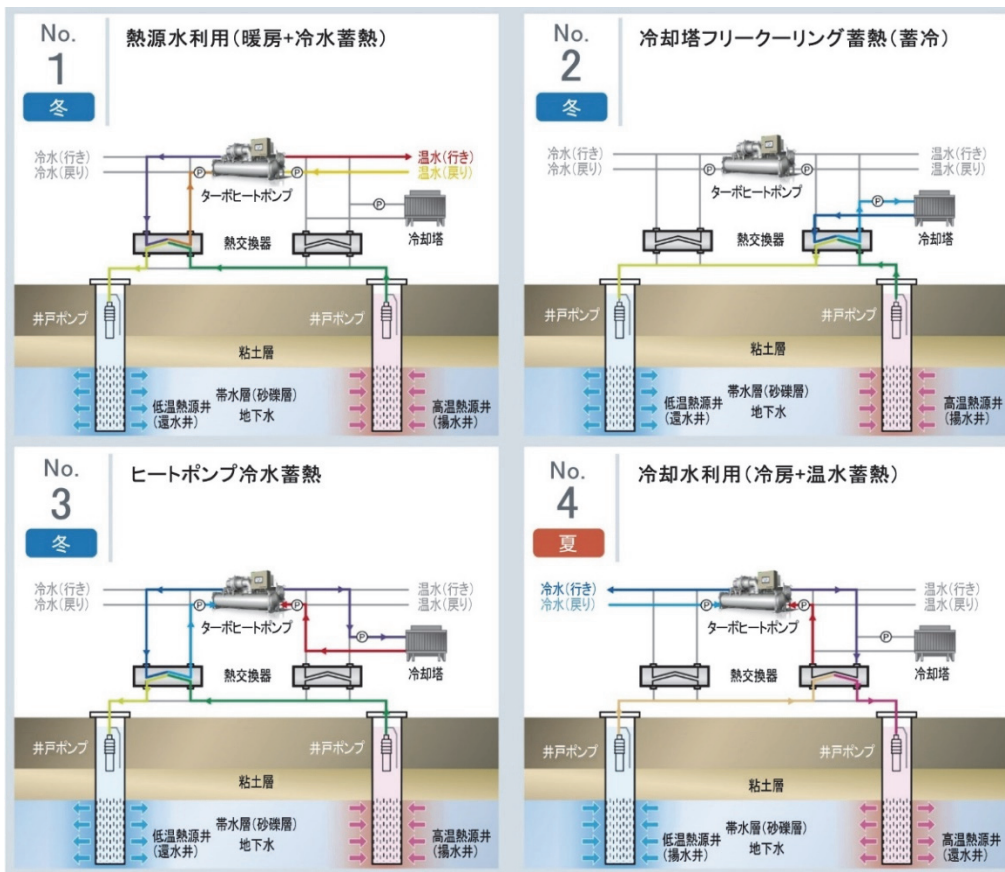


図6 帯水層蓄熱システム基本運用方式

4. 帯水層蓄熱システム事例紹介

当社は、これまで4件の帯水層蓄熱システムを構築した。実証試験、地盤調査、そして補助事業として常用している空調設備への導入をしてきた。本章では導入された空調設備で得られた技術的な知見を含め、事例を紹介する。

4.1 三菱重工業株式会社 高砂製作所

(a) 概要

日本初のターボヒートポンプを熱源とした大規模な帯水層蓄熱システムを、2016年に三菱重工業株式会社高砂製作所内に構築し、熱源井掘削工事から最終冷暖房実証試験まで約2年間で実証試験を行い、建物面積4000m²の工場に冷暖房供給を行った。図7には全体配置イメージ図、図8に全体設備フロー図を示す。本システムでは熱源水ポンプを用いて空調負荷側に冷温水を供給する一次ポンプ方式を採用している。



図7 全体配置図イメージ図

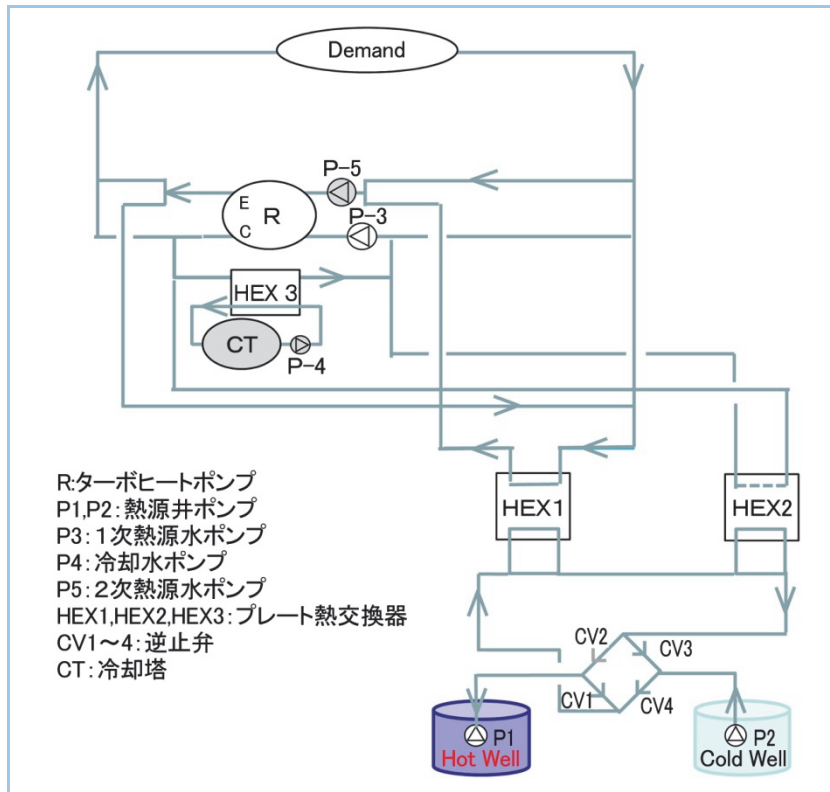


図8 全体設備フロー図

(b) 熱源井構築

本実証試験では地下水塩分や鉄分濃度が高い地域で、新規に開発したリバースリターンエアリフト^{※1}の掘削工法より、108m³/hの揚水・注水を可能とする帯水層蓄熱システムの熱源井を構築した。

熱源井掘削後初期状態では、熱源井1と2の水位低下は揚水量 60m³/hにおいて、それぞれ 5.0m, 1.6mであった。運用開始から1年間経過後の熱源井1と熱源井2の水位低下は、揚水量 60m³/hにおいて、それぞれ 5.3m, 1.2mになり、目詰まりが発生せず、熱源井性能を維持することができた。

※1:リバースリターンエアリフト:ボアホールの掘削工法の一つで、掘削ビットを回転させて地盤を掘削し、孔内水とともに土砂を吸い上げて排出し、水の静水圧で孔壁を保護するノーケーシングの掘削工法である。

(c) その他

本実証試験構築時には掘削工法で苦勞したが、最終的には掘削工法の見直しを行い、掘削した井戸で1年間運用することができた。

(d) 設備全体性能評価

表1に年間実績データの性能結果を示す。

1. 冬期暖房+冷水蓄冷運転期間中の年間ターボヒートポンプ単体平均 COP は 3.8, 年間暖房平均システム COP は 3.3 を示した。
2. 暖房時に同時に製造した冷水を蓄冷し、冷房期間中に直接冷房に用いた場合(ターボヒートポンプは運転せず)の年間冷房平均システム COP は 48.3 を示した。
3. 夏期冷房+温水蓄熱運転期間中に熱源水利用したときのターボヒートポンプ単体の年間平均 COP は 9.4, 年間冷房平均システム COP は 6.1 を示した。
4. 通年の冷房・暖房平均システム COP は 3.8 となった。各運転モードを適切な時期に、適切な温度・流量で運用した場合は、更なる効率向上が期待できる。

表1 年間実績データ性能結果

項目	冬期暖房+冷水蓄冷	夏期直接利用	夏期冷房+温水蓄熱
運転期間	2月2日～3月9日	6月7日～7月20日	7月27日～9月22日
実運転日数	25日	36日	41日
平均揚水温度[°C]	17.8	9.1	14.9
平均注水温度[°C]	6.5	17.6	22.7
年間工場負荷[MWh]	122.0	87.1	184.7
年間冷水蓄熱量[MWh]	90.7	-	-
年間温水蓄熱量[MWh]	-	98.4	207.1
年間冷凍機消費動力[MWh]	31.7	-	19.7
年間設備総合動力[MWh]	36.7	1.8	30.1
年間ターボヒートポンプ単体平均 COP	3.8	-	9.4
年間冷房平均システム COP	-	48.3	6.1
年間暖房平均システム COP	3.3	-	-
冷房・暖房年間平均システム COP	3.8		

4.2 大阪うめきた地区

(a) 概要

大阪うめきた地区はビル揚水法の利用規制地域で、建物向けの熱源水利用はできないため、帯水層蓄熱システムの地盤沈下抑制効果・目詰まり評価等の有効性を検証するため、2年間実証試験を行った。

(b) 熱源井構築

熱源井構築に関しては4.1で述べた掘削方法経験を活かし、100m³/hの揚水・注水を可能とする熱源井を構築・運用して、大阪市内(沖積平野)の帯水層は問題なく帯水層蓄熱システムに活用できることを証明した。

(c) 熱源井性能評価

大阪うめきた地区で、最大 100m³/h にて、最長4か月弱連続の各種揚水・還水運転を行い、井戸の目詰まりの進行状況を確認するとともに回復対策を検討し、水位変化に伴う地盤高の変動観測により、その影響評価を行った。

地盤沈下については4か月間の運転期間すべてにおいて地下水の変動に伴う粘土層への影響が弾性変化の範囲内にとどまっていることが実績データから証明され、周辺地盤環境への影響を検証した結果、十分に加圧された密な地盤においては、地盤沈下が生じないことが確認された。

帯水層蓄熱システムにとって目詰まりは死活問題と考えられる。実証試験での約4か月間の連続運転において、目詰まりの兆候は徐々に現れ始め、実証試験中の2018年(平成30年)6月18日に発生した震度6弱の北摂地震と相まって、その目詰まりが一層進行した。このため、井戸性能の指標である揚水量に対する水位低下量の比が、当初の7割程度に下がった時点で、当社が構築した洗浄プロセスにより井戸洗浄を実施し初期の井戸性能まで回復することができた。また、発生した地震による井戸構造の不具合は見られず、その後の運用にも支障は出なかったことから井戸構造は地震に対しても堅牢であったと実証できた。

4.3 三菱重工業株式会社 神戸造船所

(a) 概要

神戸造船所の当社のターボ冷凍機製作工場に、2018年に環境省より平成30年度二酸化炭素排出抑制対策事業費などの補助金を利用した帯水層蓄熱システムを導入し、建物面積4000m²の工場冷暖房を行っている。

(b) 熱源井構築

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。その対策として図9に示す熱源井3本で新たな帯

水層蓄熱システムを構築し、揚水量と注水量として工場冷暖房を行う水量が確保できるようになった。原因としては、本設備を構築した神戸和田岬地区は、大阪湾断層の分岐した断層構造が通過しており、断層の影響により一定の標高に水平に帯水層が分布していなかったことなどが考えられる。

(c) 熱源井性能評価

設備運用開始から2年経過しているが、現在まで順調に稼働しており、地盤沈下・目詰まり等の影響は確認されていない。

本帯水層蓄熱システムでは、常用冷暖房空調設備として長期間運用での熱源性能の評価、維持方法等の検証を行い、井戸側のノウハウ蓄積も継続していく。

(d) その他

地盤が複雑な地域で帯水層システムを構築する際には、十分に地盤調査を行い、慎重に計画する必要がある。

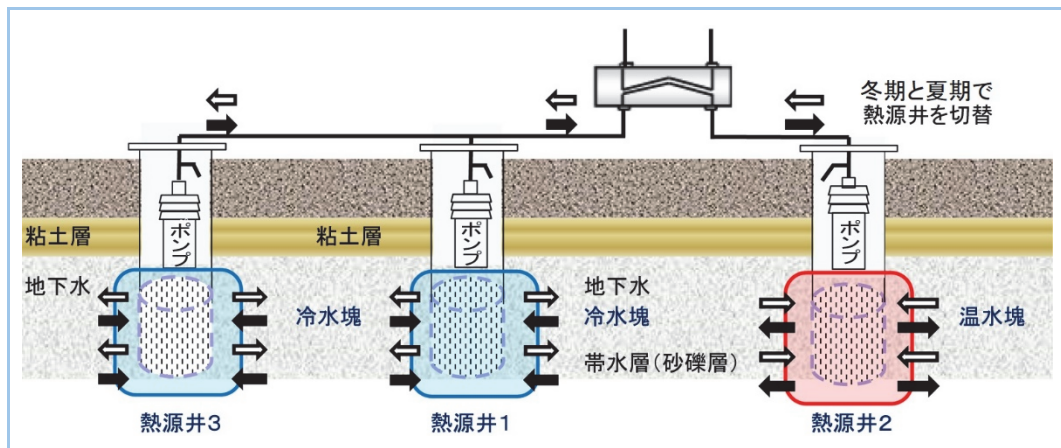


図9 井戸3本構築イメージ図

4.4 アミティ舞洲

(a) 概要

大阪市舞洲の大阪市舞洲障がい者スポーツセンター(アミティ舞洲)に平成30年度CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の委託事業にて、帯水層蓄熱システムを導入した。2021年3月まで実証試験を実施し、2021年4月から実運用を行っていく。

(b) 熱源井構築

舞洲は埋立地であったため井戸構築時に鉋さいが出て急遽工法の変更が発生したが、世界で初めて1本の熱源井で上下2層の帯水層を使用し、それぞれ100m³/h揚水・注水可能とする熱源井を構築した。

実績データに関して、現在検証中である。

(c) 熱源井性能評価

実績データに関して、現在検証中である。

(d) その他

大阪市域は、帯水層蓄熱冷暖房ができるポテンシャルが高く、大阪市ホームページ^{※2}には、そのポテンシャルマップを公開しており、今後、大阪市は、うめきた・舞洲での実証成果を、市域での導入拡大につなげていくとしている。

※2:ポテンシャルマップ <https://www.mapnavi.city.osaka.lg.jp/osakacity/Portal>

5. まとめ

当社は、4件の帯水層蓄熱システムの事例から、多くの設計・施工・運用ノウハウを学びデータを蓄積した。さらに、実用化に向けて帯水層蓄熱システムの最適自動制御システム開発を行う

た。今後、日本全国の帯水層ポテンシャルマップを作成し、日本全国の適用可能地域に働きかけ本事業の拡大を図っていく。

また、当社内に構築した帯水層蓄熱システムを多くの方に見学していただき、帯水層蓄熱システムの優位性をアピールしていく。さらに、長期間運用していくことで適切な井戸管理についての継続検討を行い、得られた知見をもとに、安心して帯水層蓄熱システムを使っただけできるよう、今後も努力していく。

参考文献

- (1) 中曾 康壽, 黒沼 覚ら: 帯水層蓄熱研究の概要と帯水層蓄熱先進国オランダの現況, 日本地下水学会, 2013 年秋季講演会(秋田大会), 2013 年 10 月
- (2) 鵠小波, 中国帯水層蓄熱技術及び発展 エネルギー研究と情報 1999 年
- (3) 有本 弘孝, 北岡 豪一ら: 大阪都心部における地下温暖化の実態, 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム, 2019 年 11 月
- (4) 三菱重工業株式会社 平成 25 年度再生可能エネルギー熱利用高度複合システム実証事業, 再生可能エネルギー熱利用高度複合システム案件形成調査事業, 帯水層蓄熱システム案件形成調査, 成果報告書, 2014 年 2 月