# 帯水層蓄熱システム
# 熱源井構築ガイドライン

令和６年３月

大阪市

1．ガイドラインの目的 ..... 1
2．帯水層蓄熱システムの概要 ..... 2
(1)エネルギー消費と建物空調 ..... 2
(2)建物空調の実際 ..... 2
(3)地中熱利用とヒートポンプ ..... 3
(4)地中熱利用の各種方式 ..... 4
(5)導入事例 ..... 5
(6)省エネ効果 ..... 8
3．帯水層蓄熱システムの導入計画 ..... 10
(1)揚水・還水流量、温度差、熱源容量の関係 ..... 10
(2)井戸間距離･熱半径と熱回収率の関係 ..... 11
(3)蓄熱バランスの維持 ..... 12
(4)帯水層蓄熱システムの導入モデルケース ..... 13
4．帯水層蓄熱システム導入の条件 ..... 14
4-1.計画地周辺の地下水、地盤の状況 ..... 14
(1)地盤情報（ボーリング柱状図、土質試験結果） ..... 14
(2)地下水情報 ..... 15
(3)ポテンシャルマップ ..... 17
(4)地下水採取規制 ..... 17
4-2.利用可能な帯水層並びに揚水・還水可能流量及びこれによる地下水・地盤環境への影響等 ..... 21
(1)利用可能な帯水層 ..... 21
(2)揚水可能流量 ..... 22
(3)地下水位低下量 ..... 22
(4)粘土層の圧密（圧密降伏応力）状況 ..... 23
(5)地盤変動量など地下環境への影響 ..... 27
5．熱源井の構築 ..... 29
(1)熱源井の構造 ..... 31
(2)井戸間接続機構 ..... 34
6．熱源井の施工 ..... 35
(1)掘削工法 ..... 35
(2)孔壁保護 ..... 37
(3)井戸洗浄 ..... 37
7．維持管理 ..... 40
7-1.モニタリング ..... 40
(1)モニタリングの観点 ..... 40
(2)モニタリング項目 ..... 40
(3)モニタリング頻度 ..... 43
7-2.井戸洗浄 ..... 44
(1)定期洗浄 ..... 44
(2)井戸洗浄 ..... 44

## 1．ガイドラインの目的

本ガイドラインは、地中熱利用の中でも特に省エネルギー効果に優れる帯水層蓄熱技術（Aquifer Thermal Energy Storage：ATES）の普及に資することを目的として、本市らが共同実施した技術開発・実証事業の成果等を基に、大容量の全量還水（同時同量）を実現する熱源井の構築等の手法についてとりまとめたものである。

- 「帯水層蓄熱システム」（以下「ATES」という。）は、地中熱利用の一つで、冷暖房の熱源となる冷温水を、地下水を熱媒にして帯水層に貯蔵し、その熱を利用する技術であり、省エネルギーで $CO_2$ の排出量を削減できること、空気熱利用と異なり大気中へ排熱しないことなどのメリットを有し、地球温暖化対策やヒートアイランド現象の緩和としての効果が期待されている。
- 大都市では、戦後の復興期に地下水の過剰揚水による激甚な地盤沈下を防止する目的で、地下水の採取が規制された。その後 50 年超の間に地下水位は回復し、現在では、健全な地下水の保全と利用が期待されている。
- こうした地域においては、地下水の利用を涵養量の範囲内に留めることが重要であり、ATES の導入に際し最も留意すべき点は、全量還水を可能とする熱源井の構築である。しかし、我が国では未だ導入事例が少なく、その技術的な基準が整備されていない。
- 本市では、温室効果ガス排出量の多い業務部門のうち、延床面積 1 万 $m^2$ 以上の規模の建物への適用を想定し、産学官連携の下、本市うめきた 2 期地区及び舞洲地区において同時揚水･還水量 100 $m^3/h$ を目標に、大孔径熱源井の技術開発・実証事業[1]に取り組んできた。
- 技術開発では、ATES の導入で先行するオランダの標準的技術やシステム規模を参考にしつつ、砂層や泥層を主としたオランダの地質とは異なる我が国の地質条件に適用できる技術、すなわち、多くの大都市が位置する鉄分が多く塩分も含む水質条件の悪い沖積平野の臨海部においても適用できる技術を確立することができた。
- 本ガイドラインは、ATES 向け熱源井の構築と運用に関し、これまでに行った技術開発･実証事業の成果を学識者等による助言・指導を経てまとめたものであり、今後も新たな知見や情報等に基づき、適宜、更新、改訂していく。

参考文献

・中曽、中尾、西岡他、高性能大容量帯水層蓄熱システムの開発（その1）揚水･還水切換型熱源井の開発意義と運用実績 日本地下水学会2022年秋季大会講演会

・中曽、中尾、西岡他、高性能大容量帯水層蓄熱システムの開発（その2）ATES用熱源井の目詰まり対策の研究日本地下水学会2023年秋季大会講演会

[1] 環境省 CO2 排出削減強化誘導型技術開発･実証事業，「帯水層蓄熱のための低コスト高性能熱源井とヒートポンプのシステム化に関する技術開発」及び「複数帯水層を活用した密集市街地における業務用ビル空調向け新型熱源井の技術開発」

## 2 . 帯水層蓄熱システムの概要

「帯水層蓄熱システム（ATES)」では、比熱が大きい水（地下水）を熱媒とするため、大容量の熱源システムを比較的コンパクトな構成で実現できる。季節間で冷房と暖房が入れ替わることを活かし、2 本の井戸を設けて、季節を跨いだ蓄熱を行うことで省エネルギーが実現できる。

### (1) エネルギー消費と建物空調

- 我が国の最終エネルギー消費に占める業務他部門の割合は、16.7% (2021 年度時点)であり(エネルギー白書 2023_第 212-2-1_最終エネルギー消費の構成比 (2021 年度))、業務他部門の用途別エネルギー消費原単位は、冷房用 18%、暖房用 13%、給湯用 13%、厨房用 7%、動力･照明用 45%である。いわゆる建物等の空調需要に該当する冷暖房は 31%であり、空調と給湯の両需要に対応するエネルギー供給システムの場合、そのエネルギー消費は 44%を占める (同_第 212-1-9_業務他部門用途別エネルギー消費原単位の推移)。
- これらのエネルギー消費を抑えるためには、建物の省エネ性能の向上(断熱性能の向上、換気ロスの低減、自然換気･自然光の利用等)とともに、空調システムの効率化(空調熱源の効率向上、搬送動力の低減等)等を進める必要がある。

### (2) 建物空調の実際

- 建物の冷暖房には、室内設定温度より冷たい又は暖かい温度の熱供給が必要となる。特に夏季については冷却除湿 (水蒸気の結露による除湿) を行うために 7℃ ～ 10℃の冷熱が必要になる。
- 一般に、家庭や小規模の業務用ビルでは、ルームエアコンやビルマルチエアコンなどのいわゆる個別分散空調システムが、延床面積 1 万 $m^2$ を超える建物では、集中式空調システムが用いられるが、設計や運用の手軽さなどもあって、ビルマルチエアコンが 10 万 $m^2$ 程度の建物まで適用される事例もある。
- これらのシステムでは、一般に外気を熱源とするため、室内との温度差が大きくなると、ヒートポンプの効率が低下する。特に夏季の都市部では、ヒートアイランド現象により外気温度が著しく上昇するため、この効率は更に低下する。

ヒートポンプ

・ヒートポンプは、空調の熱源機となるもので、電気やガスを動力に冷媒を介して室外環境から冷熱や温熱を高効率に取り出し、室内空調に利用するもので、家庭用エアコンのような小さなものから、地域熱供給に使われるターボ冷凍機やガス/蒸気吸収式冷温水器等の大きなものまで、幅広く用いられている。

・熱源機の性能は機器構成等にも左右されるが、熱源と熱供給先の温度差が小さくなれば効率が向上するという特性がある。図-2.1 に大型熱源機の一例として冷水製造におけるターボ冷凍機の性能特性イメージを示すが、冷却水入口温度が低くなると COP が大幅に向上(暖房時も同様)し、近年導入が進むインバータ機では特に中間負荷で高効率となるものもある。

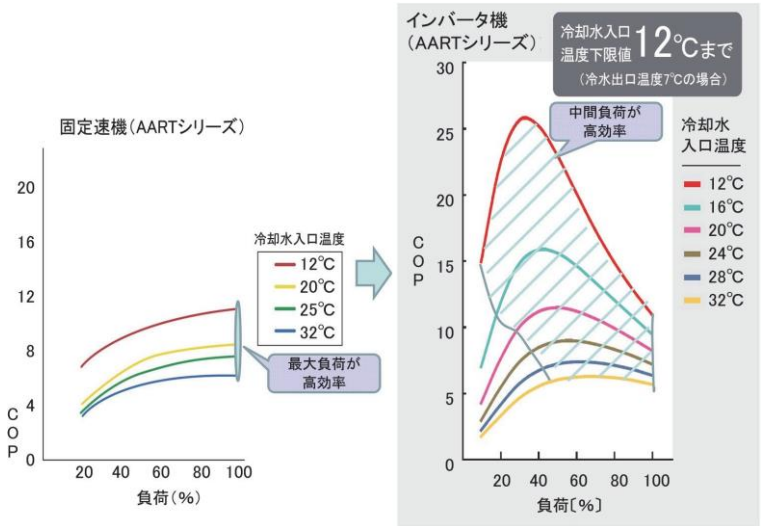



図-2.1 ヒートポンプの部分負荷特性[2]

(3) 地中熱利用とヒートポンプ

- 地中熱利用システムは、断熱性が高く年間を通じて温度が一定となる 10 m～15 m 以深の地盤や地下水を熱源とした空調システムで、大気を熱源とするものに比べ、冷房で必要とする 7℃、暖房で必要とされる 45℃に対してより小さな温度差で高効率な熱の供給が可能となることから、前述のヒートポンプの特徴と相まって空調のエネルギー消費や $CO_2$ 排出量の低減に貢献する(図-2.2)。

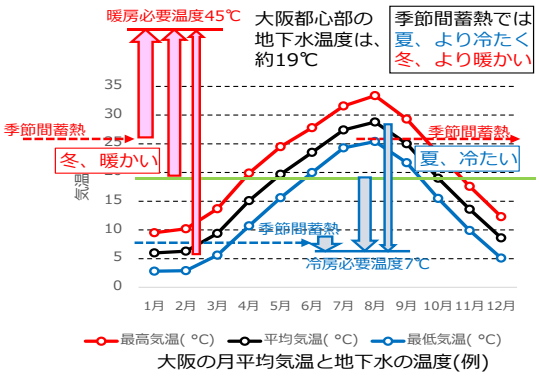



図-2.2 冷暖房の熱供給温度と熱源の関係[3]

[2] 山添耕平・坂井正頌・谷智・飛田善徳, 低 GWP 冷媒採用の超低負荷対応インバータターボ冷凍機を用いた食品用プロセス冷却の最適化, 三菱重工技報 Vol.56 No.4, 2019.

[3] 環境省平成 30 年度 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業「帯水層蓄熱のための低コスト高性能熱源井とヒートポンプのシステム化に関する技術開発」, 2018.

### (4) 地中熱利用の各種方式

- 地中熱利用の方法は、大きくオープンループ方式とクローズドループ方式に大別される(図-2.3)。クローズドループ方式は、専ら樹脂製の熱交換器を地中に埋設し、地下水を直接採水しないため、必ずしも帯水層を必要としない。冷房時は温排熱を地中に蓄え、暖房時はこの温排熱を熱源として暖房を行いながら冷排熱を地中に蓄え、夏季の冷房時期に再利用する。しかし、熱搬送は専ら伝熱に依存するため、熱源井 1 本あたりの能力が約 10 kW（おおよそ住宅 1 軒分）と小さく、容量を大きくするためには、本数を増やす必要がある。
- オープンループ方式は、比熱の大きな地下水を熱媒とするため、大容量の熱源システムを比較的コンパクトな構成で実現できる地中熱利用の 1 方式である。オープンループ方式のうち、熱源水利用は、比較的地下水質が良好（井戸の目詰まりにつながる鉄分などが少ない）で、地下水流速の早い扇状地などで数多く利用されている。熱利用の方法は、流れの上流になる揚水井から採水し、下流の還水井から放流するが、雨水系統や河川放流されている事例もある。

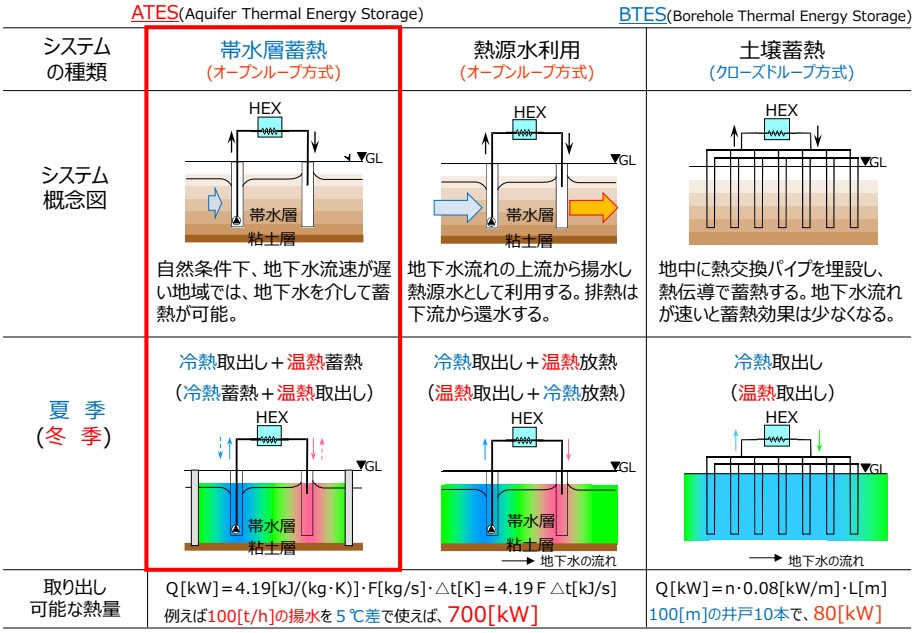



図-2.3 ATES の適用可能な冷暖房規模[4]

- 一方、多くの大都市が位置する沖積平野の臨海部では地下水流速が遅いため、蓄熱利用が可能となる。オープンループ方式のうち、ATES は、2 本の井戸を設け、揚水井と還水井を夏冬で季節毎に入れ換えて利用する。空調需要が季節間で冷暖入れ替わることを活かし、季節を跨いだ蓄熱を行うことで省エネルギーが実現できるが、地下水資源の健全な循環や地盤環境の保全のためには、熱利用した地下水の安定的な全量還水が求められる。しかし、このような地域では、水質が ATES に不向きである（鉄分が多く塩分も含まれる）ことが多く、井戸の目詰まりのため安定した運用が難しく、国内での ATES の導入は一般的ではなかった。

[4] 中曽康壽・中尾正喜・西岡真稔・益田晴恵・森川俊英・矢吹綾，高性能大容量帯水層蓄熱システムの開発(その 1)揚水･還水切換型熱源井の開発意義と運用実績，日本地下水学会 2022 年秋季講演会，2022.

(5) 導入事例

(a)世界における ATES の技術開発経緯と導入状況

- 図-2.4 に世界における ATES の進展状況[5]を示す。ATES の黎明期として 1960 年代半ばに中国上海の工場群で大規模システムが多数導入されるが、技術的課題のため短期間で運用中止になった。
- 続く 1980 年代半ばから IEA(国際エネルギー機関)において技術課題の解決に向けた取組みが開始され、2000 年代からオランダで先進的な技術開発が進展した。同国では 2007 年に ATES 導入に関する大規模な研究プロジェクト[6]が開始され、2008 年、同国では国策として ATES の普及促進を決定[7]、以降、技術基準や法規制を含む枠組みの整備が進んでいる。
- 以降、海外では熱の再生可能エネルギー技術として公共･商業ビル、地域熱供給、産業目的など大規模アプリケーションに冷暖房を提供できる ATES に注目が集まっている。2018 年現在、世界中で 2,800 を超える ATES が稼働[5]しており、その 85%はオランダ、残りの 10%はスウェーデン、デンマーク、ベルギーとなっている。

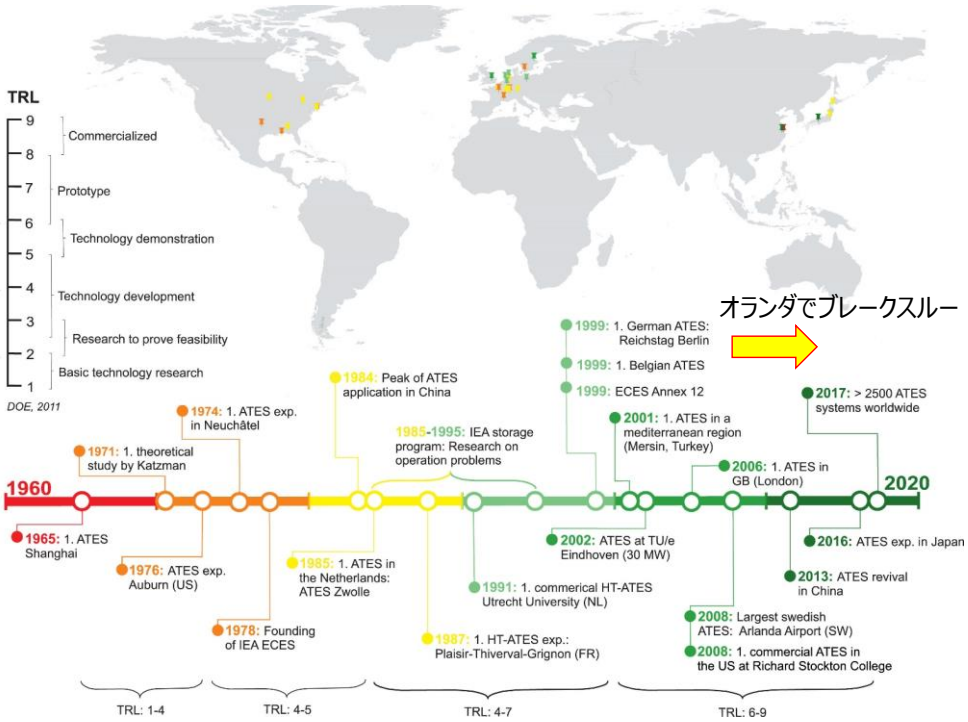



図-2.4 世界における帯水層蓄熱技術の進展状況[5]

- オランダでは､企業庁が WKO ツール(図-2.5)と呼ばれる ATES の導入支援ツールを公開しており、既に導入済みの ATES の情報や規制区域などの情報開示に留まらず、ATES の一次導入スクリーニング(簡易設計と投資回収年)などが可能となっている。

[5] Paul Fleuchaus, Bas Godschalk, Ingrid Stober, Philipp Blum(2018) "Worldwide application of aquifer thermal energy storage - A review", In: Aoife M. Foley (ed) Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 94, Pages 861-876, ELSEVIER October 2018.

[6] Sanne de Boer, Inez Dinkla, Benno Drijver, Niels Hartog, Marc Koenders(2012), Hetty Mathijssen, "Cahier Meer Met Bodemenergie", skb April 2012.

[7] VROM Advies Taskforce WKO(2009) "Groen licht voor Bodemenergie" 23 maart 2009.

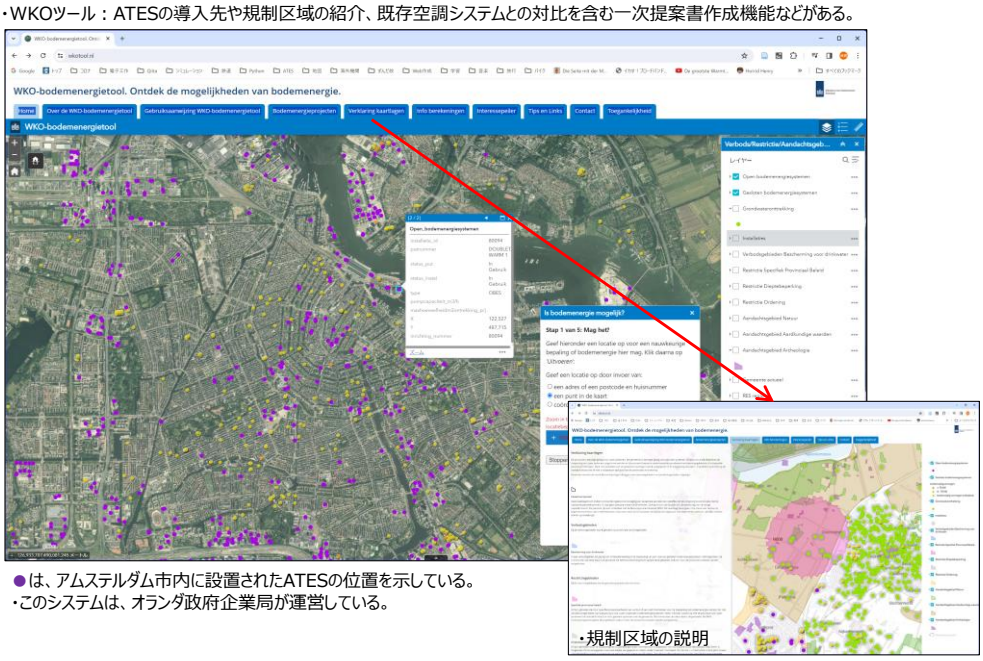



図-2.5 オランダの帯水層蓄熱システム導入支援ツール[8]

### (b)国内の導入経緯と導入状況

- 国内でも地下水の涵養や地盤沈下対策等を目的として、表-2.1 に示すように幾つかの還水実験が行われたが、特に沖積平野の臨海部では還水井の目詰まりにより、短期間で実証試験は終了している。
- 熱源井の仕様がわかる公開資料は少ないが、関西電力京都支社のように 1937 年から現在まで全館地下水を熱源とした冷暖房が行われている事例もある。

表-2.1 日本国内での地下水人工涵養の主要事例[9]

| 実施年 | 実施者 | 実施場所 | 目的 |
|---|---|---|---|
| 1951年 | 尼崎市水道局 | 武庫川河川敷 | 地盤沈下防止 |
| 1952年 | N紡績工場 | 名古屋市 | 地盤沈下防止 |
| 1953年 | 東洋レーヨン | 瀬田工場 | 地下水量増強 |
| 1954年 | 武田薬品工業 | 大阪工場 | 地下水量増強 |
| 1955年 | 尼崎市水道局 | 神崎浄水場 | 還流実験 |
| 1957年 | ラジオ東京 | 赤坂付近 | 地盤沈下防止 |
| 1960年 | 東洋レーヨン | 徳島工場 | 塩水化防止 |
| 1962年 | 地質調査所 | 新潟市臨港 | 地盤沈下防止実験 |
| 1966年 | 農林水産省 | 京都府神足 | 地下水量増強 |
| 1967年 | 佐賀県 | 有明干拓地 | 涵養実験 |
| 1967年 | 地質調査所 | 埼玉県妻沼 | 涵養実験 |

- 環境省の「地中熱利用システム 2023 年版」によると、オープンループ方式の導入件数は 514 件となっているが、還水井を設けていることが確認できたのは 6 事例にとどまる。
- このうち ATES は 4 事例で、うち 3 事例（当時）は本市らが環境省の委託・補助を受けたものである（高砂市、神戸市、大阪市）。図-2.6、表-2.2 にその要約を示す。

[8] Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, WKO-bodemenergietool, (https://wkotool.nl), (参照 2024.3.19).
[9] 小西康次郎，人工地下水と沖縄への想い，地下水技術，第 42 巻，第 12 号, pp.32-43, 2000.

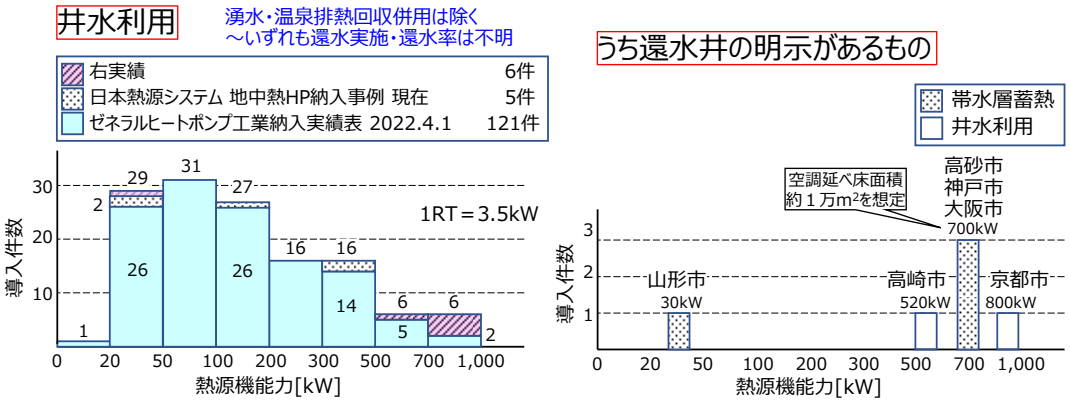



図-2.6 日本国内における井水利用の事例 [4]

表-2.2 井水利用･帯水層蓄熱で熱源機容量や井戸の仕様が開示されている導入事例 [4]

| 利用区分 | 地区/事業者 | 熱源容量(冷房) | 井戸本数 | 井戸の仕様 深度 | 揚水･還水量/還水率 | 運用期間 | 出典/(関連事業) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 熱源利用 | 京都市/関西電力㈱ 京都支店 | 800kW (400kW×2) | 3 | 1号 130m←常用<br>2号 150m<br>還水 74m<br>井戸径:Φ250mm<br>スクリーン長:記載なし | 1号 115.7m³/h<br>2号 100.6m³/h<br>受水槽利用<br>/還水率100% | 1937～<br>2009改修 | 空気調和･衛生工学<br>86巻642-643 2012.07 |
| | 群馬県高崎市/東京都市サービス㈱ 高崎熱供給センター | 520kW | 2 | 120m×2<br>井戸径:Φ400mm<br>スクリーン長:45m | 60m³/h<br>(1台,ポンプ定格)<br>/還水率記載なし | 1993.12～ | 日本エレクトロヒートセンター<br>ヒートポンプとその応用<br>No.44 1997.11 |
| 帯水層蓄熱 | 山形市/日本地下水開発㈱ | 30kW | 4 | 1～4号 72m<br>井戸径:Φ150mm<br>スクリーン長:28m | 9→18m³/h(加圧注水)<br>/還水率100% | 2016.10～<br>以前も実績あり | 同社情報誌<br>No.159 2019.10<br>(NEDO) |
| | 兵庫県高砂市「高砂地区」/三菱重工㈱ | 700kW | 2 | 72m×2<br>井戸径:Φ315mm<br>スクリーン長:19/17m | 108m³/h<br>/還水率100% | 2018.2～2018.12<br>(実証完了後除却) | 環境省技術開発実証事業<br>(委託事業) |
| | 大阪市北区[うめきた地区]/関西電力他 | 揚水･還水実験のみ | 2 | 59m×2<br>井戸径:Φ315mm<br>スクリーン長:8.0/8.5m | 100m³/h<br>/還水率100% | 2018.6～2019.10<br>(実証完了後除却) | 〃 〃<br>(委託事業) |
| | 神戸市/三菱重工㈱ 神戸造船所 | 700kW | 3 | 記載なし | 30-60m³/h<br>/還水率100% | 2018～ | 三菱重工技報<br>Vol.58 No.2 2021<br>(環境省補助事業) |
| | 大阪市此花区[舞洲地区]/大阪市 アミティ舞洲 | 700kW | 2 | 123m×2スクリーン<br>井戸径:Φ400mm<br>スクリーン長:<br>Dg2層 8.5/9.5m<br>Dg3層 9.5/9.5m | 200m³/h<br>(各層独立100m³/h) | 2020.5～ | 〃 〃<br>(委託事業･補助事業) |

- 環境省の技術開発・実証事業 [1] の採択を受け、2015 年～2016 年に兵庫県の三菱重工高砂製作所、2016 年～2018 年に大阪市のうめきた 2 期地区において、各々最大揚水流量 100 m³/h の熱源井 1 組を構築し、還水率 100%の運用を行った。うめきた 2 期地区では、実証期間中、4.5 シーズンの空調運用に相当する約 57 万 m³ の揚水･還水を行い、これによる地盤沈下が認められなかったことを確認している。この熱源井の揚水量は、熱源機能力 200RT(700kW)、対象延床面積 1 万 m² に相当する。
- その後、大阪市は、地盤沈下についてより条件の厳しい地域として、臨海部の埋立地である舞洲地区において環境省の採択を受け技術開発・実証事業を行い、ATES の有効性や地盤沈下等の周辺環境影響の評価等を経て、2022 年からは実用運転に切り替えている。
- また、大阪市の提案により、国家戦略特区制度において建築物用地下水の採取の規制に関する法律の規制緩和が図られ、現在、うめきた 2 期地区において、2 件の ATES の導入が進んでいる。

- さらに、2025 年日本国際博覧会では、会場の空調設備の一部に ATES を導入し、冬期の寒冷な大気で地下水を冷却し、夏期の冷房に活用する計画である。

### (6) 省エネ効果

#### (a)大阪市域における導入事例（ガス吸収式冷温水器との比較）

- 前述の本市舞洲地区に導入した大阪市障がい者スポーツセンター アミティ舞洲における実証の結果を次に示す。（熱源機：ターボ冷凍機 200RT(700kW)、熱源井：100 $m^3$/h×2（1 組））
- システム COP は 4.5（冷房時 5.4、暖房時 5.5）であり、従来システムに比べて 47.1%の省エネルギー、61.5%の $CO_2$ 削減（冷房時 55.4%の省エネ、65.6%の $CO_2$ 削減効果、暖房時は 40.8%の省エネ、58.7%の $CO_2$ 削減効果、ガスの排出原単位は 2.29 t-$CO_2$/$m^3$、電気の排出原単位は 0.418 t-$CO_2$/MWh）が図られている（表-2.3）。

表-2.3 アミティ舞洲での運用結果[10]

| 項目 | 従来システム | 本システム |
|---|---|---|
| | ガス吸収冷冷温水器 | 帯水層蓄熱システム |
| 冷房負荷(MJ/年) | 878,620.1 | 878,620.1 |
| 暖房負荷(MJ/年) | 1,130,663.4 | 1,130,663.4 |
| 冷房消費ｶﾞｽ量(GJ/年) | 675.9 | – |
| 暖房消費ｶﾞｽ量(GJ/年) | 1,299.6 | 11.7 |
| 冷房消費電力量(GJ/年) | 340.3 | 453.5 |
| 暖房消費電力量(GJ/年) | 41.9 | 794.7 |
| 冷房合計消費量(GJ/年) | 1,016.2 | 453.5 |
| 暖房合計消費量(GJ/年) | 1,341.5 | 794.7 |
| 冷暖房合計消費量(GJ/年) | 2,357.6 | 1,248.3 |
| 冷房消費量削減量(GJ/年) | – | 562.7 |
| 暖房消費量削減量(GJ/年) | – | 546.7 |
| 冷暖房合計消費量削減量(GJ/年) | – | 1,109.4 |
| 冷房省ｴﾈ率(–) | 100.0% | 55.4% |
| 暖房省ｴﾈ率(–) | 100.0% | 40.8% |
| 冷暖房合計省ｴﾈ率(–) | 100.0% | 47.1% |
| 冷房合計$CO_2$排出量(t–$CO_2$/年) | 46.3 | 15.9 |
| 暖房合計$CO_2$排出量(t–$CO_2$/年) | 67.6 | 27.9 |
| 冷暖房合計$CO_2$排出量(t–$CO_2$/年) | 114.0 | 43.8 |
| 冷房合計$CO_2$削減量(t–$CO_2$/年) | – | 30.4 |
| 暖房合計$CO_2$削減量(t–$CO_2$/年) | – | 39.7 |
| 冷暖房合計CO2削減量(t–$CO_2$/年) | – | 70.1 |
| 冷房合計CO2削減率(–) | 100.0% | 65.6% |
| 暖房合計CO2削減率(–) | 100.0% | 58.7% |
| 冷暖房合計削減率(–) | 100.0% | 61.5% |

#### (b)神戸市域における導入事例（空冷ヒートポンプ(シミュレーション)との比較）

- 環境省技術開発・実証事業の成果と同省補助金により導入された三菱重工神戸造船所における運用結果を次に示す。（熱源機：ターボ冷凍機 200RT(700kW) 熱源井：100 $m^3$/h×2（1 組））
- 本事例は、通年運用で図-2.7 のとおり、2 年目のシステム COP は、冷房時で 6.1、暖房時で 4.3、冷暖房をあわせた平均システム COP は 5.0 となった。なお、初年度の冷房では冷却塔運転を行っているため、この期間の COP は低めとなっている。

[10] 令和 5 年度電気需要最適化・省エネルギー社会実現セミナー（東京）「大阪市における 700kW 大規模帯水層蓄熱冷暖房システム導入事例について（アミティ舞洲）」のプレゼン資料, 2023.

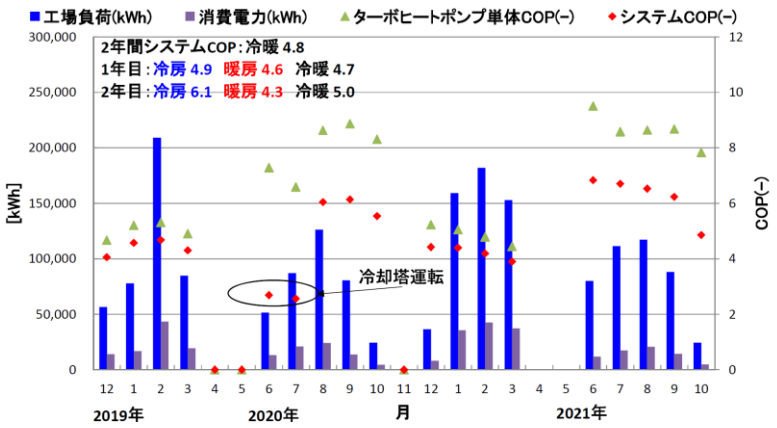



図-2.7 三菱重工神戸造船所の帯水層蓄熱システムの消費電力と COP(成績係数)[11]

- 上記 ATES の実績と一般的な空冷ヒートポンプのシミュレーション値(単体定格は COP3.3)との性能比較した結果を表-2.4 に示す。2 年間の消費電力は 362,215 kWh で、空冷ヒートポンプの 516,926 kWh と比較すると、年間消費電力量及び $CO_2$ 排出量の削減率は 29.9%となっている。

表-2.4 三菱重工神戸造船所での運用結果[12]

| 項目 | 従来システム | 本システム |
|---|---|---|
| | 空冷ヒートポンプ | ATES |
| 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)** | **516,926.0** | **362,215.4** |
| **削減率** | **－** | **29.9%** |
| **システムCOP(－)** | **3.4** | **4.8** |
| 電気$CO_2$排出量(t-$CO_2$) | 164.4 | 115.2 |
| **$CO_2$削減量(t-$CO_2$)** | **－** | **49.2** |
| **削減率** | **－** | **29.9%** |

11 崔林日・西岡真稔・中尾正喜・三田村宗樹・上田憲治:帯水層蓄熱システム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,kansai Geo-Symposium2022, p.209-212, 2022.

12 崔林日・坂井正頌・上田憲治:700kW 規模の帯水層蓄熱システムによる工場空調システムの省エネ革新, 2022 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, E212, 2022.

## 3 . 帯水層蓄熱システムの導入計画

技術開発により、熱源井１組で約200RT(700kW)、業務ビル１万m²相当の空調熱負荷を担うシステムの技術が確立され、温度差や熱源井の組数により、熱源容量の拡大が可能となった。

ATESの導入にあたっては、実際に適用される建物の空調負荷と敷地の大きさから、熱源井の組数や配置、利用温度差を検討し、冷房･暖房の負荷分担を計画する。

### (1) 揚水・還水流量、温度差、熱源容量の関係

- 技術開発・実証事業により、100 m³/h で揚水・還水する熱源井を構築し、地下水を温度差 5 ℃で、200RT(700 kW)の水冷ヒートポンプの熱源水として利用できることを確認した。温度差を 10 ℃とすることで、熱源容量を上げたり、熱源容量を変えずに揚水・還水流量を下げたりすることが可能となる。
- 表-3.1～表-3.4 に示すとおり、一般的な業務用ビルの最大熱負荷原単位を約 100 W/m²（冷房）、レンタブル比（延床面積に対する空調面積）を 70%とした場合、延床面積約 1 万 m² の必要熱供給能力は 700 kW、すなわち熱源井 1 組の ATES に相当する。さらに熱源容量を大きくするためは、熱源井の組数を増やして対応する。その際、帯水層を 2 層利用すれば、同一帯水層内の熱干渉（後述(2)）のみを考慮すればよくなるので、同じ敷地で組数を 2 倍とすることが可能となる。

表-3.1 建物用途毎の最大熱負荷原単位の設定例[13]

| 種別 | 単位 | 住宅 | 事務所 | 店舗 | ホテル | 病院 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 冷房 | W/m² | 46.5 | 104.7 | 139.5 | 87.2 | 104.7 |
| 暖房 | W/m² | 34.9 | 58.1 | 93.0 | 77.9 | 95.3 |
| 給湯 | W/m² | 18.6 | 16.3 | 23.3 | 116.3 | 46.5 |

表-3.2 建物用途毎の年間熱負荷原単位の設定例 [13]

| 種別 | 単位 | 住宅 | 事務所 | 店舗 | ホテル | 病院 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 冷房 | kWh/年･m² | 9.3 | 81.4 | 145.3 | 116.3 | 93.0 |
| 暖房 | kWh/年･m² | 23.3 | 36.0 | 40.7 | 93.0 | 86.0 |
| 給湯 | kWh/年･m² | 34.9 | 2.6 | 26.7 | 93.0 | 93.0 |

表-3.3 最大熱負荷地域補正係数[14]

| 地域 | 冷房 | 暖房 |
|---|---|---|
| 北海道 | 0.8 | 1.5 |
| 東北 | 0.9 | 1.3 |
| 北陸 | 1.0 | 1.1 |
| 関東 | | 1.0 |
| 東海 | | |
| 近畿 | | |
| 中国 | | |
| 四国 | | |
| 九州 | | |
| 沖縄 | 1.1 | 0.5 |

表-3.4 年間熱負荷地域補正係数 [14]

| 地域 | 冷房 | 暖房 |
|---|---|---|
| 北海道 | 0.5 | 2.4 |
| 東北 | 0.7 | 1.4 |
| 北陸 | 0.9 | |
| 関東 | 1.0 | 1.0 |
| 東海 | 1.1 | 0.9 |
| 近畿 | | |
| 中国 | | |
| 四国 | | |
| 九州 | 1.2 | 0.7 |
| 沖縄 | 1.5 | 0.07 |

[13] 一般社団法人日本エネルギー学会編・柏木孝夫監修, 天然ガスコージェネレーション計画･設計マニュアル, 2008.

[14] 国土交通省, 低炭素まちづくり実践ハンドブック, 2013.12.

### (2) 井戸間距離･熱半径と熱回収率の関係

- ATES では、敷地内に 2 本 1 組の熱源井において揚水・還水を行うことで、帯水層内に冷温熱塊を形成して蓄熱を行うが、帯水層の厚さや敷地の広さ（井戸間距離）によっては、冷熱塊と温熱塊が互いに干渉（熱干渉）し、熱回収率が低下する。
- 帯水層での蓄熱では、砂礫へ熱が移動するため、蓄熱塊の半径（蓄熱半径）は注水半径とは異なり、以下のとおり定義される。

$$R_{th} = \sqrt{\frac{C_w \cdot Q}{\pi \cdot C_a \cdot H}} \qquad \text{(式 3-1)}$$

$$C_a = nC_w + (1-n)C_s \qquad \text{(式 3-2)}$$

ここに、

$R_{th}$ ：蓄えられた冷熱または温熱の蓄熱半径(m)

$Q$ ：季節ごとに揚水または注入される水量($m^3$)

$H$ ：スクリーンの長さ(m)

$C_w$ ：水の容積比熱(MJ/($m^3$K))

$C_a$ ：帯水層の等価容積比熱(MJ/($m^3$K))

$C_s$ ：土粒子(砂礫)の容積比熱(MJ/($m^3$K))

$n$ ：空隙率(-)

である。

- この蓄熱半径･井戸間距離と熱回収率の関係について、中尾らの研究[15]による近似式を図-3.1 に示す（近似式を求めるにあたり使用した地盤条件及びパラメーターは、表-3.5 及び表-3.6 を参照）。熱回収率は蓄熱半径の約 2 倍～3 倍で 7 割～8 程度となる。

$$\hat{\varepsilon} = 0.802\left(1 - \exp\left(-\frac{S/R_{th} - 0.593}{0.624}\right)\right) \qquad \text{(式 3-3)}$$

ここに、

$\hat{\varepsilon}$ ：熱回収率(-)（5 サイクル目：ほぼ安定状態）の効率

$S$ ：井戸間距離(m)

である。

[15] 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方法(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論文集, 2022.9.14-16 (神戸), 第 2 巻, 2022.

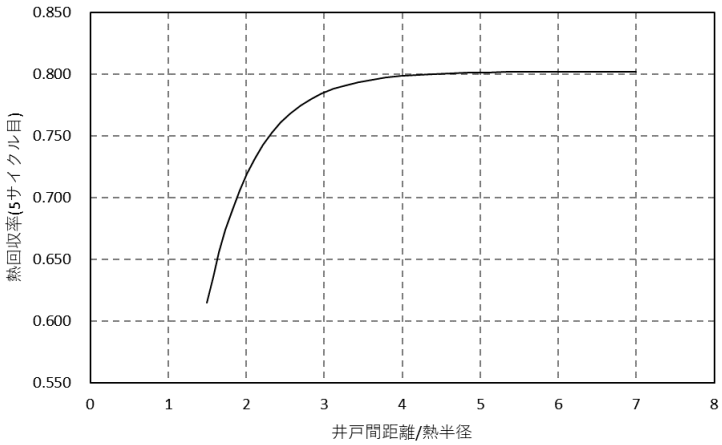



図-3.1 井戸間距離/蓄熱半径（S/$R_{th}$ 比）と熱回収率の関係

表-3.5 物性値などの地盤条件 [15]

| パラメータ | | 数値 | 単位 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 共通 | 間隙率 φ | 0.3 | - | 環境地下水学、(2010)，p.59，共立出版株式会社 |
| | 縦分散長$d_{\parallel}$ | 2.5 | m | 文献3) |
| | 初期地中温 $T_0$ | 18 | ℃ | ― |
| | ダルシー流速 v | 0 | m/year | ― |
| | 初期地下水位 | 0 | m | ― |
| 帯水層（砂礫層） | 等価容積比熱$C_a$ | 3.48 | MJ/(m³·K) | 『伝熱工学資料　改訂第5版』，V. 物性編、容積比を砂利：砂=0.7：0.3、空隙率を0.3として算出 |
| | 容積比熱(砂礫) $C_s$ | 3.184 | | 『伝熱工学資料　改訂第5版』 砂利 |
| | 容積比熱(流体) $C_w$ | 4.177 | | 『伝熱工学資料　改訂第5版』 水 |
| | 等価熱伝導率$\lambda_a$ | 2.07 | J/(m·s·K) | 文献4) |
| | 熱伝導率(固体) $\lambda_s$ | 2.7002 | | 0.5995×0.3+2.7002×0.7=2.07 |
| | 熱伝導率(流体) $\lambda_w$ | 0.5995 | | 『伝熱工学資料　改訂第5版』水 |
| | 透水係数 k | $1.73\times10^{-3}$ | m/s | 文献4) |
| 不透水層（粘土層） | 等価容積比熱$C_c$ | 3.398 | MJ/(m³·K) | 間隙率0.3 |
| | 容積比熱(固体) $C_c'$ | 3.06 | | 『伝熱工学資料　改訂第5版』，V. 物性編、粘土 |
| | 容積比熱(流体) $C_w$ | 4.177 | | 『伝熱工学資料　改訂第5版』 水 |
| | 等価熱伝導率$\lambda_c$ | 1.01985 | J/(m·s·K) | 1.2×0.7+0.5995×0.3 |
| | 熱伝導率(固体) $\lambda_c$ | 1.2 | | 『伝熱工学資料　改訂第5版』粘土 |
| | 熱伝導率(流体)$\lambda_w$ | 0.5995 | | 『伝熱工学資料　改訂第5版』水 |
| | 透水係数k | $1.0\times10^{-8}$ | m/s | DHI-WASY Software FEFLOW Reference Manual |

表-3.6 使用したパラメーター[15]

| パラメータ | 数値 | 単位 |
|---|---|---|
| 帯水層厚さ H | 5, 10, 15, 20 | m |
| 井戸間隔　S | 50, 75, 100, 200 | m |
| 揚水注水体積 Vw | 5,10, 20, 30 | 万 m³ |

### (3) 蓄熱バランスの維持

- 東京、名古屋、大阪、福岡などの地域では、一般的な事務所ビルで冷房負荷が 70% ～ 80%、暖房負荷が 20% ～ 30%と言われ、クローズドループ方式等と同様に、ATES の運用が冷房過多になると年々温熱塊が拡大し、いずれ熱干渉が生じるため、年間を通じて熱量バランスを維持する必要がある。
- ATES の熱源容量が建物の暖房負荷の一部を分担する計画であれば、ATES の温熱塊は使い切られ、併用される他の熱源によって負荷対応するため、蓄熱バランスの維持は容易となる。
- ATES の熱源容量のみで建物の暖房負荷を賄うときは、暖房で使い切れない余剰温熱を他の冷房熱源の冷却塔を用いて大気に放熱し、さらに冬期の外気温を用いて冷蓄熱を行い、拡大された冷熱塊を冷房用に利用するなどにより効率的に蓄熱バランスを維持することができる。
- これら蓄熱塊の推定はシミュレーションによるが、熱バランス自体は、揚水･還水温度、揚水・還水流量から蓄熱量を求め、運用開始時より積算して評価する。

### (4) 帯水層蓄熱システムの導入モデルケース

- 大阪市内の建物容積率の高いエリアを対象として、敷地（井戸間距離）の大小 2 ケースを想定し(1), (2)から、揚水還水流量（熱源井の組数）と温度差等による熱源容量と、敷地の形状による井戸間距離と熱回収率の違いによる ATES の導入モデルケースを示す。
- 熱源井 1 組を井戸間距離が 60 m で配置可能な敷地では、建物容積率 800%の想定最大空調負荷の約 4 割を分担でき、年間空調期間の相当分を賄うことができる。
- 井戸間距離が 100 m で設置可能な敷地では、ATES の熱源容量が大きくなるが、延床面積も大きくなる。モデルケースでは、利用温度差の拡大で最大空調負荷の約 3 割を分担できるが、帯水層を複層利用することで、更に分担率を高められることを示している。

図-3.2 空調負荷の年間ﾃﾞｭﾚｰｼｮﾝｶｰﾌﾞと分担割合のｲﾒｰｼﾞ

表-3.7 大阪市内を想定した ATES 導入モデルケース

| 井戸間距離:S(m) | | | 60 | | 100 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 利用温度差(℃) | | | 5 | 10 | 5 | 10 |
| 敷地面積($m^2$)（D×W）(m) | | | 2,000(40×50) | ← | 5,600(70×80) | ← |
| 容積率(%) | | | 800 | ← | 1000 | ← |
| 延床面積($m^2$) | | | 16,000 | ← | 56,000 | ← |
| 空調床面積($m^2$) (ﾚﾝﾀﾌﾞﾙ比:70%) | | | 11,200 | ← | 39,200 | ← |
| 最大空調負荷(kW)(100 W/$m^2$) | | | 1,120 | ← | 3,920 | ← |
| 単層利用 | Dg2 (層厚10m) | 蓄熱半径:$R_{th}$(m) | 62 | ← | ← | ← |
| | | S/$R_{th}$比 | - | - | 1.6 | ← |
| | | 回収率*(%) | - | - | 64.2 | |
| | | 回収温度(℃) | - | - | ±3.21 | ±6.42 |
| | | 熱源容量(kW) | - | - | 449 | 899 |
| | | 分担割合(%) | - | - | 11.5 | 22.9 |
| | Dg3 (層厚20m) | 蓄熱半径:$R_{th}$(m) | 44 | ← | ← | ← |
| | | S/$R_{th}$比 | 1.4 | ← | 2.3 | ← |
| | | 回収率*(%) | 58.2 | ← | 75.0 | ← |
| | | 回収温度(℃) | ±2.91 | ±5.82 | ±3.75 | ±7.50 |
| | | 熱源容量(kW) | 407 | 815 | 525 | 1,050 |
| | | 分担割合(%) | 36.4 | 72.7 | 13.4 | 26.8 |
| 複層利用 | | 熱源容量(kW) | - | - | 1,050 | 2,100 |
| | | 分担割合(%) | - | - | 24.9 | 49.7 |

熱源井の最大揚水還水流量:100 $m^3$/h、シーズン運転時間：1,000 h、熱源機容量：700 kW@5℃、1,400 kW@10℃

＊図-3.1においてS/$R_{th}$比に相当する回収率

## 4 . 帯水層蓄熱システム導入の条件

ATES の導入では、計画地における帯水層と粘土層の深度や層厚等の状態、揚水（還水）可能流量、さらに地下水採取許可の要件などの諸条件の確認が必要である。

### 4-1. 計画地周辺の地下水、地盤の状況

ATESの導入計画地周辺における帯水層や粘土層の有無、深度、層厚、また粘土層の圧密特性やこれまでの地下水位、地盤変動の履歴などは、既存資料から概略を把握することができ、ATES導入計画の参考とすることができる。

【既存資料の例】

(1)地盤情報（ボーリング柱状図、土質試験結果）

(2)地下水情報（地域の地下水流動特性、周辺の井戸情報、地下水位・地盤変動量観測記録）

(3)ポテンシャルマップ

(4)地下水採取規制の指定区域

#### (1) 地盤情報（ボーリング柱状図、土質試験結果）

- 表-4.1 に示す地盤情報データベースなどを参考に、計画地周辺の地盤情報を把握することができ、計画地周辺にデータがある場合は、参考となる。

ボーリング柱状図　　：帯水層や粘土層の深度・層厚等が確認できる。

土質試験結果　　：粘土層の圧密降伏応力 $p_c$、圧縮指数 $C_c$ 等の圧密特性が確認できる。

表-4.1 ボーリングデータ資料の例（大阪市域）

| データベース名 | 所有者 | データ内容 | 地域 | 公開の有無（公開場所） |
|---|---|---|---|---|
| 関西圏地盤情報データベース | 関西圏地盤情報協議会 | ボーリング柱状図、土質試験結果等 | 近畿地方 | 会員限定 |
| 国土地盤情報データベース | 国土地盤情報センター | ボーリング柱状図、土質試験結果一覧表 等 | 全国 | https://ngic.or.jp/ |
| 国土地盤情報検索サイト Kunijiban | 国土交通省、国立研究開発法人 土木研究所、国立研究開発法人港湾空港技術研究所 | ボーリング柱状図、土質試験結果一覧表 等 | 全国 | http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/ |

### (2) 地下水情報

#### (a)地域の地下水流動特性

- 大阪平野の広域モデルシミュレーションに基づく地下水位コンター図と平面的な流速分布図を図-4.1、図-4.2 にそれぞれ示す。大阪平野では、揚水に起因する局所的な地下水位の低下が認められるものの、大阪市域の地下水位は概ね一定で T.P.±0 m 前後であり、地下水は豊富であるとともに、地下水流速は比較的小さいと考えられる。

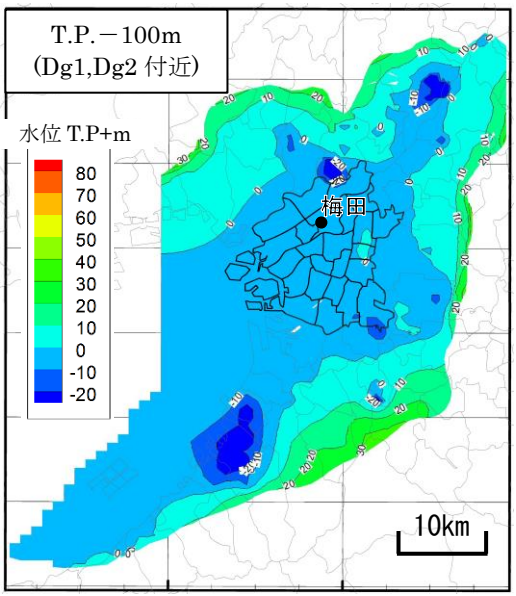



図-4.1 広域モデルシミュレーションに基づく水位コンター図[16]

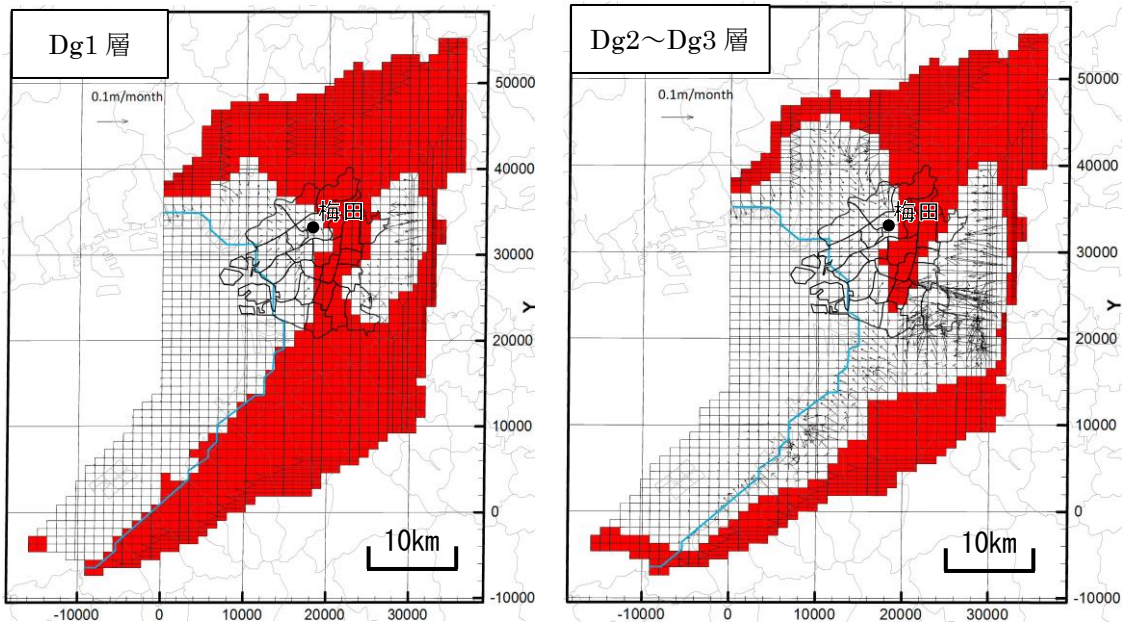



図-4.2 広域モデルシミュレーションに基づく平面的な流速分布図[16]

[16] 株式会社ニュージェック，平成 27 年度 大阪市 地中熱等導入促進事業調査業務委託 その２（ポテンシャル調査等）報告書, 2016.

(b)周辺の井戸情報

- 全国地下水資料台帳調査（国土交通省）[17]では、井戸の概略位置や揚水量、スクリーンの設置位置などの情報が確認できる(図-4.3)。その他、地元のさく井業者への確認も有効である。

全国地下水資料台帳データ

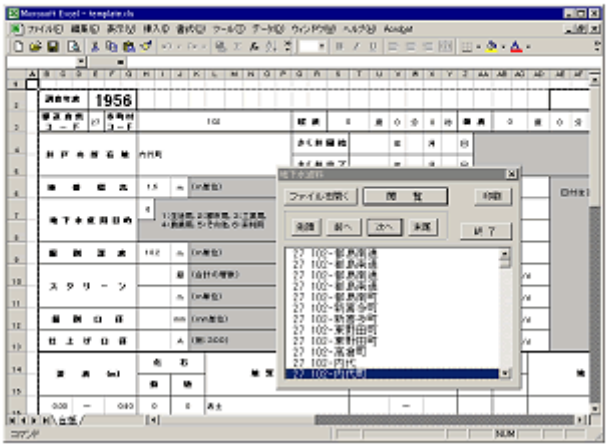


図-4.3 全国地下水資料台帳調査の表示例 [17]

(c)地下水位観測記録、地盤変動量

- 自治体等による地下水位や地盤変動量（水準測量）等の観測記録から、これまでの地下水位変動や地盤沈下の履歴を把握できる。

表-4.2 地下水位・地盤変動量情報（大阪市域）

| | |
|---|---|
| 大阪市 | 地盤環境；大阪市環境局環境管理部<br>https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000064234.html |

[17] 国土交通省，全国地下水資料台帳調査，(https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/f9_exp.html)，(参照 2024.3.18).

### (3) ポテンシャルマップ

- 大阪市では、市内の帯水層蓄熱ポテンシャルマップを整備、公表しており、ATES 導入判断の参考となる。また、大阪府においてもオープンループ方式の地中熱利用に関するポテンシャルマップが公開されている(表-4.3、図-4.4)。

表-4.3 帯水層蓄熱、オープンループ方式の地中熱ポテンシャルマップの例（大阪市域）

| | |
|---|---|
| 大阪市 | 大阪市帯水層蓄熱情報マップ<br>https://www.mapnavi.city.osaka.lg.jp/osakacity/Portal |
| 大阪府 | 地中熱適地マップ（オープンループ方式）<br>http://www.pref.osaka.lg.jp/eneseisaku/sec/chichunetsu_map.html |

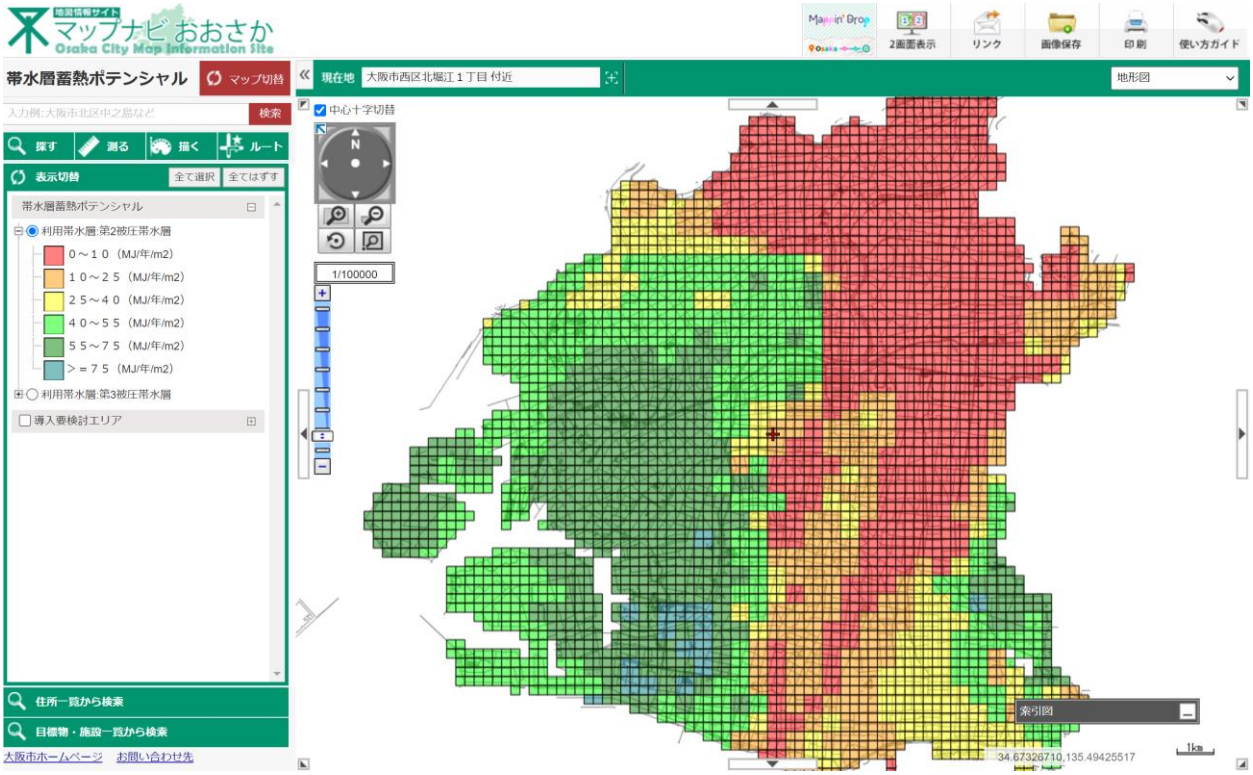



図-4.4 大阪市帯水層蓄熱情報マップ[18]

### (4) 地下水採取規制

#### (a)用水二法（指定地域）

- 大阪市をはじめ大都市等の一部の地域では、工業用水法・建築物用地下水の採取の規制に関する法律（ビル用水法）により、地下水採取規制が敷かれている(表-4.4、図-4.5)。
- しかし、工業用水法の指定地域外（大阪市域では、北区（旧大淀区を除く）や中央区、西区など）では、熱供給業の用に供する ATES の導入が可能である。
- また、ビル用水法の指定地域外（此花区の夢洲地区など）において、熱供給業の用に供さない場合は、ATES の導入が可能である。さらに、同指定地域内であっても、国家戦略特区の特例措置により許可基準の緩和を受けることができる。

[18] 大阪市, マップナビ　おおさか, (https://www.mapnavi.city.osaka.lg.jp/osakacity/Portal), (参照 2024.3.18).

表-4.4 ATES の熱源井戸にかかる地下水採取許可の基準（大阪市域）

| 地下水の利用用途 | 根拠法 | 地域 | 許可基準 |
|---|---|---|---|
| 熱供給業の用に供する地下水 | 工業用水法 | 指定地域外 | - |
| | | 指定地域内：<br>平成 18 年 4 月 1 日における行政区画その他の区域又は道路、河川によって表示された左記法律施行規則別記第 4 号に掲げる地域 | ストレーナ位置：<br>500 m 又は 600 m 以深<br>揚水機の吐出口の断面積：21 $cm^2$ 以下 |
| 建築物用地下水<br>(冷房設備及び暖房設備) | 建築物用地下水の採取の規制に関する法律<br>（ビル用水法） | 指定地域外 | - |
| | | 指定地域内：<br>昭和 37 年 8 月 31 日における大阪市の区域 | ストレーナ位置：<br>500 m 又は 600 m 以深<br>揚水機の吐出口の断面積：<br>21 $cm^2$ 以下 |
| | 国家戦略特別区域法及び環境省関係命令 | | 上記基準について特例措置あり |

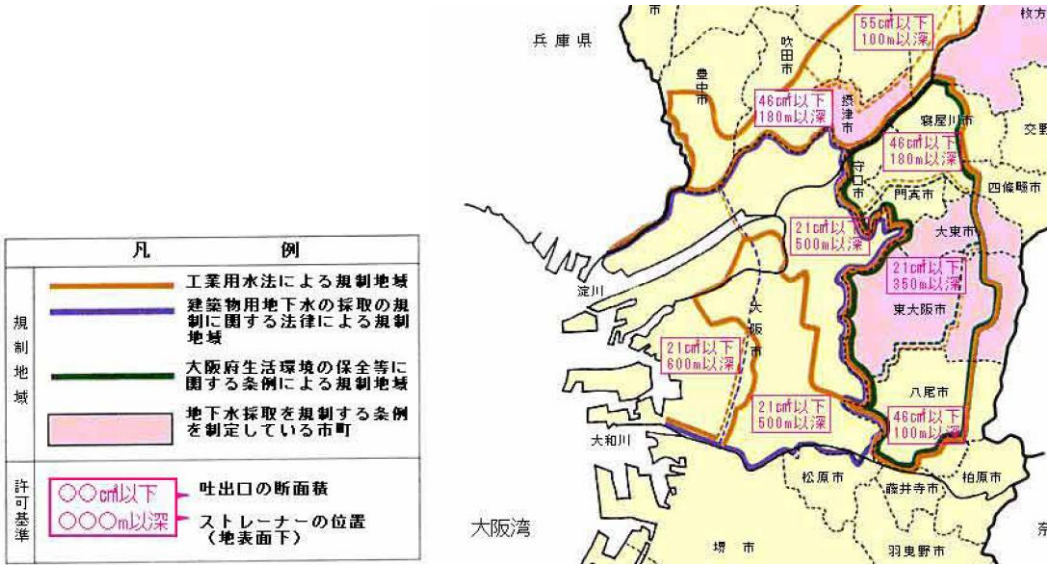



図-4.5 大阪市域における地下水採取規制[19]

[19] 大阪府　地下水採取規制・届出案内　法律等による地下水採取規制のあらまし　規制図（https://www.pref.osaka.lg.jp/attach/4908/00017712/kiseizu.pdf）, (参照 2024.3.26).

### (b)国家戦略特区等に基づく建築物用地下水の採取の規制に関する法律の規制緩和

- 大阪市からの国家戦略特区の規制緩和提案を受け、建築物用地下水の採取に関する特例措置を実現するため、令和元年 8 月、内閣府、環境省により共同命令が公布、施行され、現行の許可基準が緩和されている。
- 大阪市では、この規制緩和措置による許可手続きについて、帯水層蓄熱型冷暖房事業に供する建築物用地下水の採取の許可手続等に関する要綱[20]を定めている。

※緩和の概要

- ストレーナの位置は、内閣総理大臣の認定を申請する際に実施した実証試験で被圧地下水を揚水及び還水した帯水層の範囲内とし、かつ、揚水機の吐出口の断面積は、当該試験において用いた揚水設備の吐出口の断面積以下に緩和する。

※緩和の要件

要件①：事業を実施する場所は、連続する敷地で一体的に開発を行う区域とし、かつ、連続した地層構成及び同一の土質を有すること。

要件②：事業を実施する場所における土質に係る測定結果（揚水を行う帯水層に接する粘性土層の載荷に対する圧密量の測定結果を含む。）により、当該粘性土層が過圧密の状態にあり、かつ、揚水時の圧密圧力が圧密降伏応力に対して十分に小さいと認められること。

要件③：事業を実施する場所において、季節に応じた地下水や地盤への影響を把握するために十分な期間、当該事業と同程度の規模で被圧地下水を採取し、その全量を同一の帯水層へ還元する実証試験を実施した結果、当該場所及びその周辺において、地下水位、地盤高、地下水の水質及び間隙水圧に著しい変化が認められないこと。

要件④：前述の実証試験から得られる情報及び当該設備の運用時に想定される熱負荷に基づいて実施される地下水の温度変化に係るシミュレーション（実測値が再現できるものに限る。）により得られる情報から、地下水の温度に著しい変化が認められないと想定されること。

要件⑤：揚水設備の維持管理及び緊急時の対応に関する計画の策定、揚水設備の試運転の実施、事業の実施期間中におけるモニタリングの実施及び当該モニタリングから得られる情報の都道府県知事への報告、緊急時の都道府県知事への報告その他の地盤沈下の防止等の観点から必要な措置を講じられていること。

### （参考）他都市における規制等[21]

- 大阪市域等に敷かれる用水二法による規制のほか、自治体が独自に地下水採取に関する条例等を定めているところも多い。令和 3 年度の環境省の調査結果によると、都道府県が施行する条例/要綱等は 33 件、市区町村が施行する条例/要綱等は 361 件である（令和 4 年 3 月現在）。

---

[20] 大阪市，帯水層蓄熱型冷暖房事業に供する建築物用地下水の採取の許可手続等に関する要綱（2023 年 3 月 20 日），(https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000521028.html), (参照 2024.3.7).

[21] 環境省 水・大気環境局，令和 3 年度全国の地盤沈下地域の概況, 2023.5.

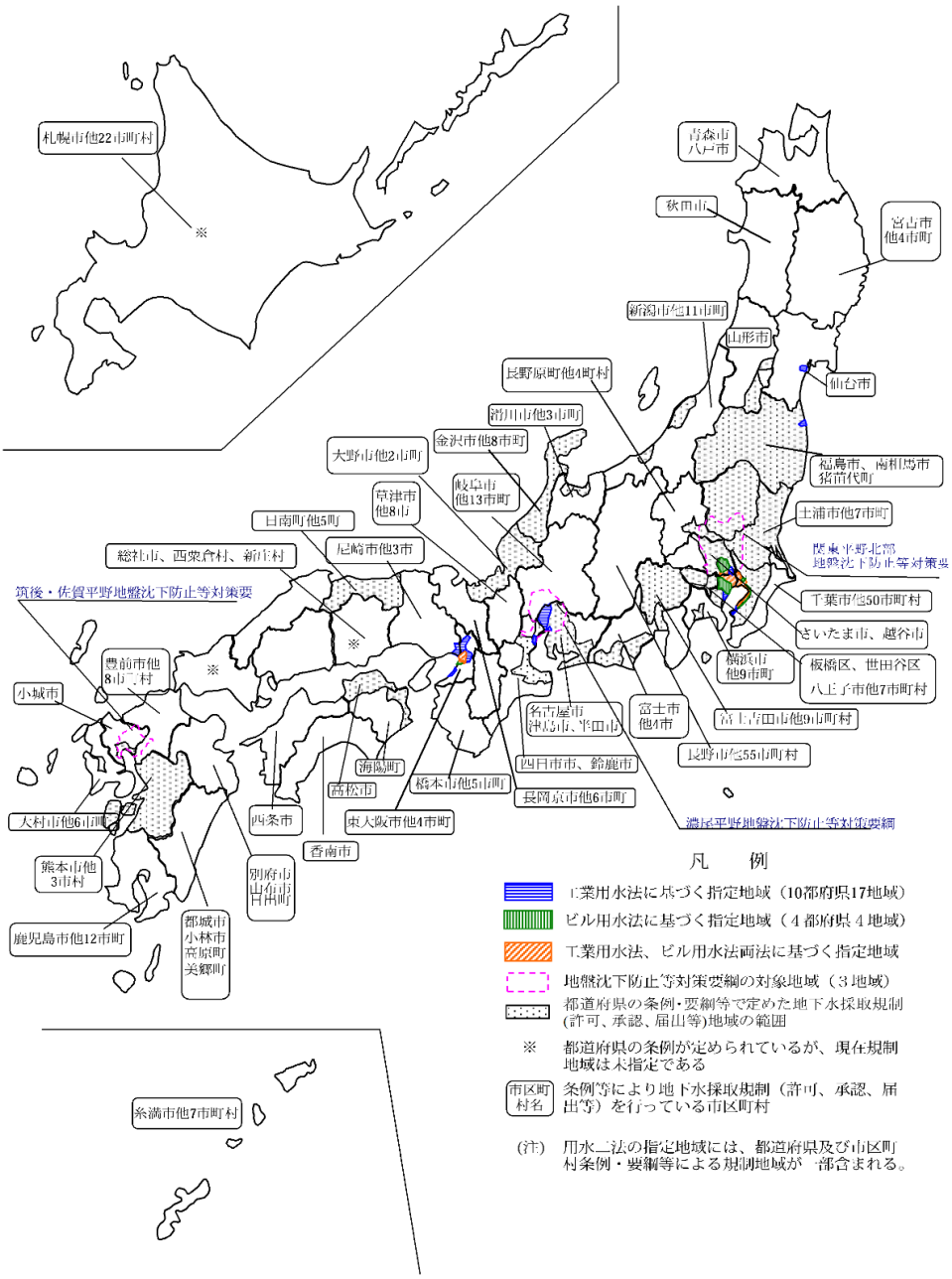



図-4.6　地下水採取に関する規制等の状況（概略図）[21]

## 4-2. 利用可能な帯水層並びに揚水・還水可能流量及びこれによる地下水・地盤環境への影響等

ATES は、地下水を直接扱うため、長期的、安定的運用には、帯水層の透水性、化学変化や粘土等の細粒による井戸の目詰まりの回避が重要となる。現地調査等の結果を基に、利用可能な帯水層を選定、揚水・還水可能流量を算定することで、性能や事業性の判断の参考となる。

また、粘土層の圧密試験により、過圧密であることを確認し、ビル用水法の許可が必要な場合には、国家戦略特区による規制緩和の措置要件に適合することを確認する。

### (1) 利用可能な帯水層

#### (a)地層の構成、地盤、水質の状況

- ボーリング調査では、計画地の地層構成、粘土層、帯水層の分布、地下水位を確認する。なお、ボーリング孔は後述するモニタリングで利用する観測井（7 章 p40 で後述）として活用できる。
- 二重管サンプラーや打ち込みサンプラーを用いたオールコアボーリングにより得られた試料から、帯水層の 1 m 毎にふるい分けにより粒度分布を測定し、細粒分（粒径 75 μm 以下）含有率が 10%以上の試料については沈降分析を行う。
- 掘削作業終了後に電気検層（比抵抗検層）を実施する。
- 帯水層の水質については、還元状態を確認するための酸化還元電位（ORP）、井戸洗浄時等の排水基準項目を測定する。

#### (b)帯水層の選択

- 上記の結果から、計画地において利用する帯水層（以下「利用帯水層」という。）とスクリーン、遮水層（粘土層）の位置を決定する。
- ATES は、地下水を直接扱うため、地下水の水質によっては化学変化等による井戸の目詰まりが懸念される。不圧帯水層は、大気と接することで地下水が酸化状態にあることが多いため、熱源井の目詰まりの原因となる鉄分の酸化など、その扱いが難しい。地下水を安定して利用する上では、雨水や排水等の影響を受けにくい還元域の被圧帯水層を利用する。
- また、粘土分の含有は、急激に透水性を悪化させ、洗浄による改善が困難なことから、スクリーンは粘土分（粒径 5 μm 以下）含有率が 10%以上の層を避ける。

#### (c)水理定数等の把握

- 揚水・還水可能流量の推定、地盤変動量のシミュレーションに用いる透水係数等の水理定数を把握する。
- 試験井（仕上げ φ150 mm ～ φ300 mm）またはボーリング孔を用いて揚水・還水試験を実施する。或いは、ボーリング調査時の粒度試験から、Hazen や Creager の方法等を用いて透水係数を推定しておき、後に設置する熱源井を用いた揚水試験により見直し、確定する。
- 地下水流動により蓄熱塊の移動が懸念される場合は、複数の観測井の動水勾配から地下水流速を推定し、流速が速い場合は熱回収率（3 章 p11 で後述）を算出する際に考慮する。

### (2) 揚水可能流量

- 揚水可能流量は、井戸の目詰まりを起こさないよう、孔壁での地下水流速から決定する。
- 実証事業等では、オランダの SIKB（Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer）が提唱する方法[22]による限界流速、$V_{bmax} = 2k$、すなわち帯水層の透水係数の 2 倍を採用している。なお、熱源井の掘削径については、5 章で後述する。
- 揚水可能流量は、(式 4-1)を用いて算出する。

$$Q_c = V_{bmax}\,\pi\,d\,l_w = 2\,k\,\pi\,d\,l_w \qquad \text{(式 4-1)}$$

ここで、$Q_c$：揚水可能流量（m³/d）、$V_{bmax}$：限界流速（m/d）、$d$：熱源井の掘削径（m）、$l_w$：井戸のスクリーン長（m）、$k$：透水係数（m/d）である。

- うめきた 2 期地区での実証事業では、透水係数を Creager による方法から 60 m/d（≒ $7\times10^{-4}$ m/s）と推定し、井戸掘削径 φ600 mm、スクリーン長 10 m から揚水可能流量を約 94 $m^3$/h で計画した。熱源井設置後、揚水試験結果から透水係数を 85 m/d （≒ $1\times10^{-3}$ m/s）、揚水可能流量は約 134 $m^3$/h に見直した。
- 舞洲の事例においても、同様の算定方法により、Dg2 層で約 434 $m^3$/h、Dg3 で約 111 $m^3$/h と、必要量を十分に上回る揚水可能流量が得られている。

### (3) 地下水位低下量

- 地下水位低下量は、同一帯水層への全量還水を前提として被圧帯水層を対象とした以下の群井の井戸理論式[23]を応用して求める。
- 1 対の熱源井で全量還水を行った場合は、地下水位低下量は(式 4-2)より求められる。

$$s = \frac{Q_{\mathrm{w}}}{2\pi kD}\left\{\ln\frac{r_r}{r_p}\right\} \qquad \text{(式 4-2)}$$

- (式 4-2)により、任意の位置での揚水・還水流量に対する地下水位低下量の予測が可能であるので、各熱源井近傍、観測井、その他の必要な位置での地下水位低下量を予測する。
- 図-4.7 は、(式 4-2)に基づき算出した実証事業での地下水位低下量の予測例である。熱源井から 20 m の地点の水位低下量は、うめきた 2 期で-0.4 m、舞洲 Dg2 で-0.2 m、舞洲 Dg3 で、-0.6 m であり、観測井の実測水位とほぼ一致する。

---

22 SIKB, Protocol 11001 Ontwerp, realisatie en beheer van het ondergrondse deel van installaties voor bodemenergie (https://www.sikb.nl/doc/BRL11000/Protocol_11001_v3_1_20211102.pdf), (参照 2024.3.26).

23 公益社団法人地盤工学会, 根切り工事と地下水－調査・設計から施工まで－3.3 群井による地下水位低下解析, pp126-133, 1991.

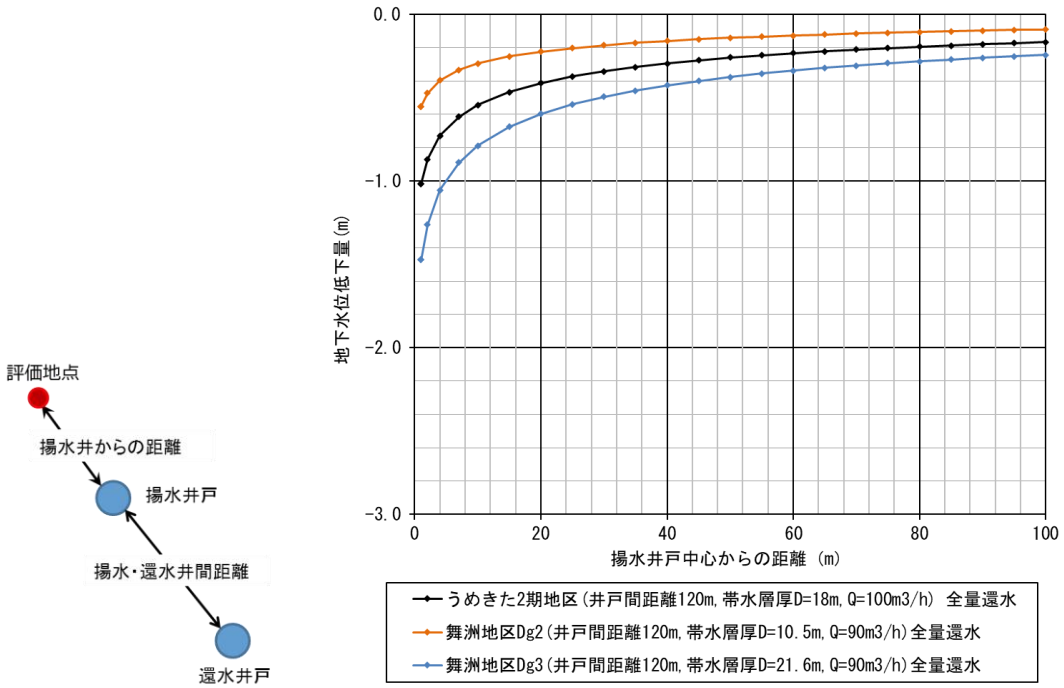



**図-4.7 地下水位低下量の予測例**

（※距離は、還水井から遠ざかる方向への長さであり、地下水位の低下量が最も大きくなる方向とした。）

### (4) 粘土層の圧密（圧密降伏応力）状況[24]

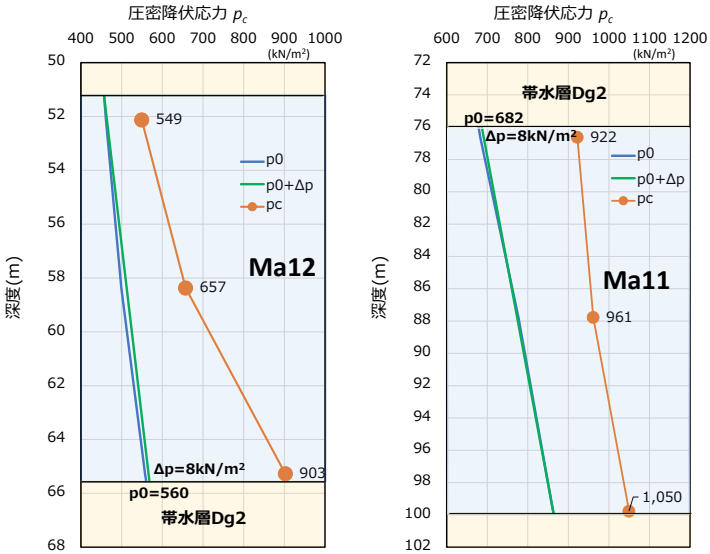
#### (a) 粘土層の圧密特性（圧密降伏応力及び過圧密比）の把握

- 利用帯水層の上下に接する粘土層の 3 深度（上部-中部-下部）以上から試料を採取し、圧密試験を実施する。
- 圧密試験により、深度毎の $e$-log $p$ 曲線を求め、圧密降伏応力 $p_c$ や過圧密比 OCR を確認する。
- 試料の乱れが圧密降伏応力 $p_c$ の過小評価につながるため、試料採取にはロータリー式二重管サンプラー（デニソンサンプラー）を用いる。

#### (b) 地下水位低下量と圧密降伏応力の比較

- 有効土被り圧 $p_0$ と利用帯水層の上下粘土層の圧密降伏応力 $p_c$ の深度分布を比較する。
- 利用帯水層の上部および下部の粘土層について、有効土被り圧 $p_0$（図-4.8 青線）と(3)で推定した地下水位低下量から換算した応力変化 $\Delta p$ の合計 $p_0+\Delta p$（図-4.8 緑線）が粘土層の圧密降伏応力 $p_c$（図-4.8 赤線）に比べて十分に小さいことを確認する。
- 例えば、図-4.7 に示す熱源井から 10 m 地点の増加応力は、地下水位低下量の予測から、うめきた 2 期で 5 kN/m$^2$、舞洲 Dg2 で 3 kN/m$^2$、舞洲 Dg3 で 8 kN/m$^2$ であり、この値は現地調査で得られた各粘土層の圧密降伏応力 $p_c$ に対して十分に小さい値となっている。

[24] 大阪市, 大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討結果(第二次中間とりまとめ), 2024.



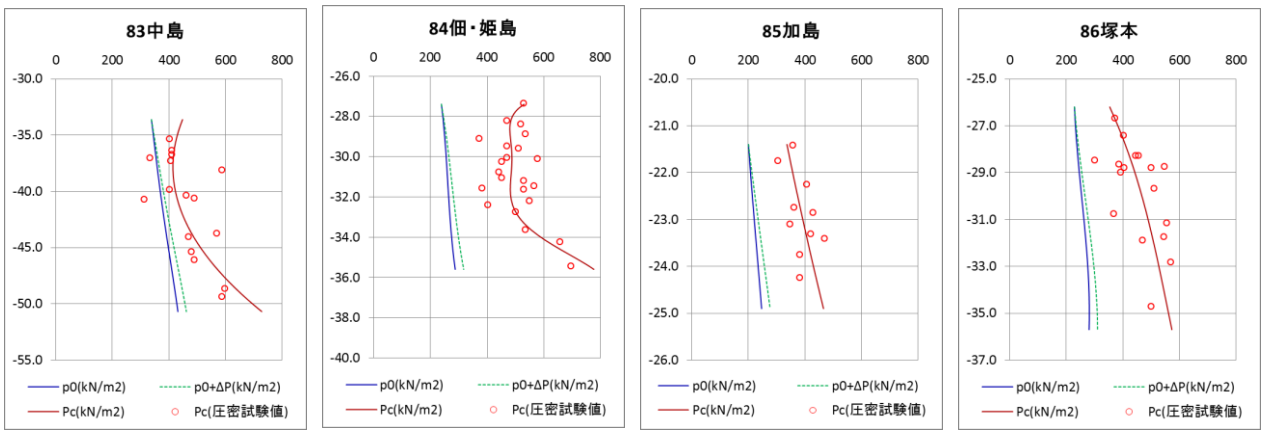

(a) 舞洲 Ma12　　(b) 舞洲 Ma11

**図-4.8 過圧密量 Δ$p_c$ と有効応力増加量 Δ$p$ の比較例(舞洲)**

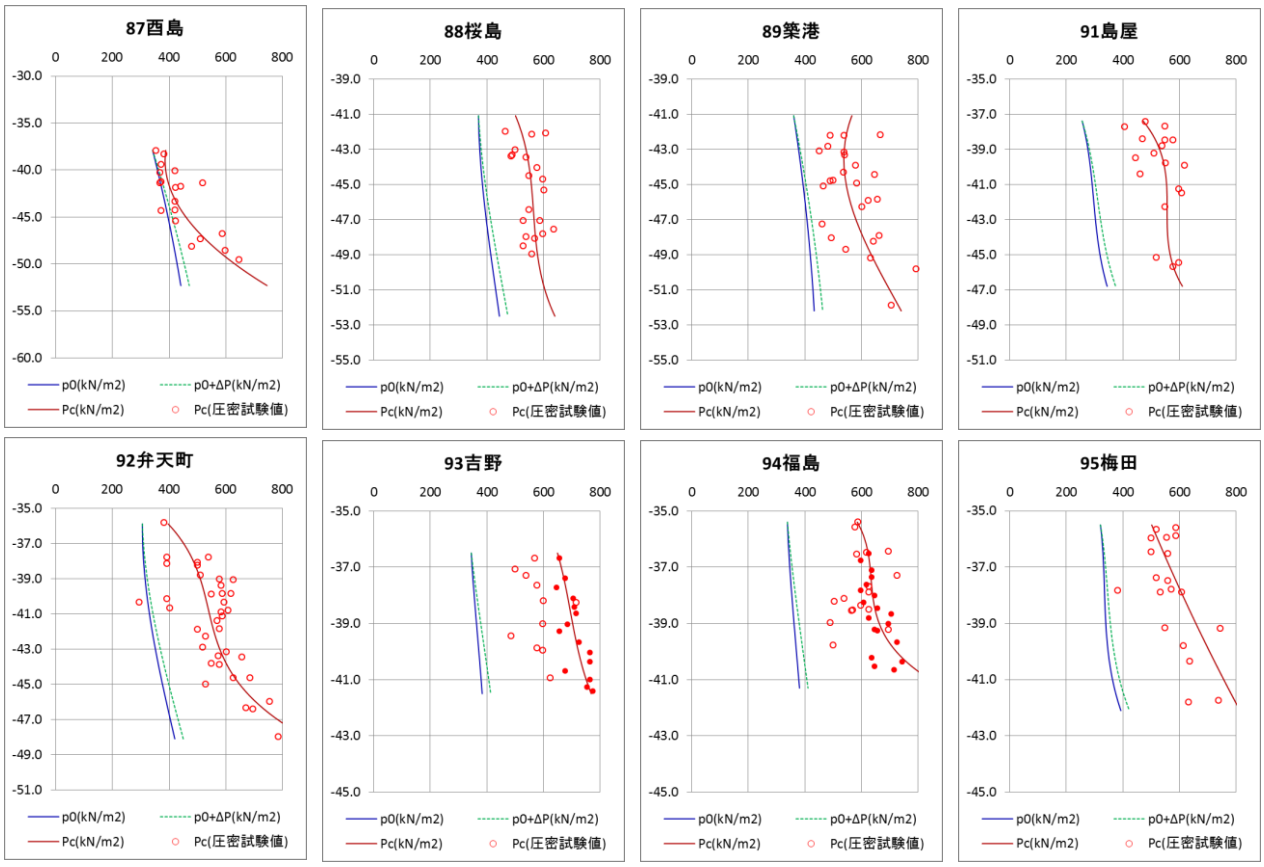
**(参考) 大阪市域の圧密状況**

- 図-4.9(1), 図-4.9 (2)に洪積粘土層(Ma12)の圧密降伏応力 $p_c$ と第 2 洪積砂礫層(Dg2)の最大揚水・還水時における井戸近傍の有効応力 $p_0$＋Δ$p$ を深度毎に比較した結果を示す。図中の赤丸(●)及白丸(○)は図-4.9 の各対象地域で実施した圧密試験結果を、赤線は回帰計算より求めた平均的な値を示す。白丸は、公共工事等のさまざまな目的で実施したボーリング調査結果を整理した結果であり、赤丸（基準ボーリング）は、大阪市立大学や研究機関が地質特性や地盤特性を把握するために実施した地域の代表的なボーリング調査の結果である。基準ボーリングは、地域の土質特性を把握するために、詳細に調査した結果であり、他のボーリング調査結果と比較してその精度は高いものである。
- 洪積粘土層(Ma12)の圧密降伏応力 $p_c$ は、地域によって直線的に分布している場合や弓型に分布している場合など様々であるが、何れの地域においても $p_c$ は、有効土被り圧 $p_0$ に最大揚水・還水時の有効応力増加量 Δ$p$（井戸近傍 1 m 地点で最大 30 kN/m$^2$ を想定）を加えた $p_0$＋Δ$p$ より大きいことから、概して、大阪市域において ATES 1 組による洪積粘土層(Ma12)の応力は、過圧密領域内にあると考えられる。
- なお、熱源井の近傍では、せん断抵抗力により地盤変動が抑制される。大阪市域では、熱源井近傍 10 m 以内の地盤変動量が、その外側と違いが無くなる（地盤高がほぼ一定になる）ことを DACSAR[25]を用いたシミュレーションにより確認している。

[25] Iizuka and Ohta, A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.




(a)淀川北部地域



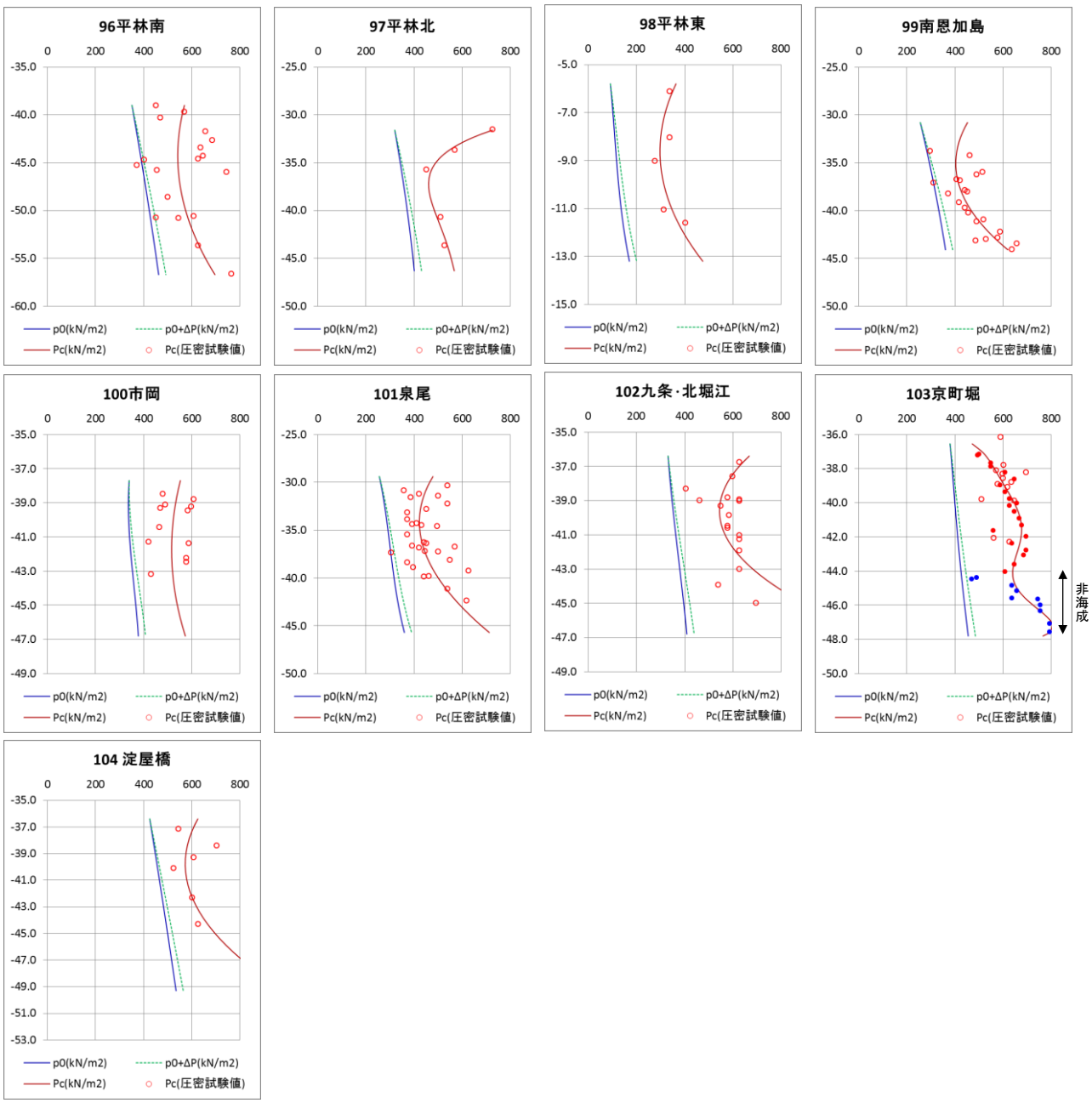

(b)淀川南部地域

**図-4.9(1) 大阪市域の洪積粘土層(Ma12)の圧密特性の地域的特徴[26]**

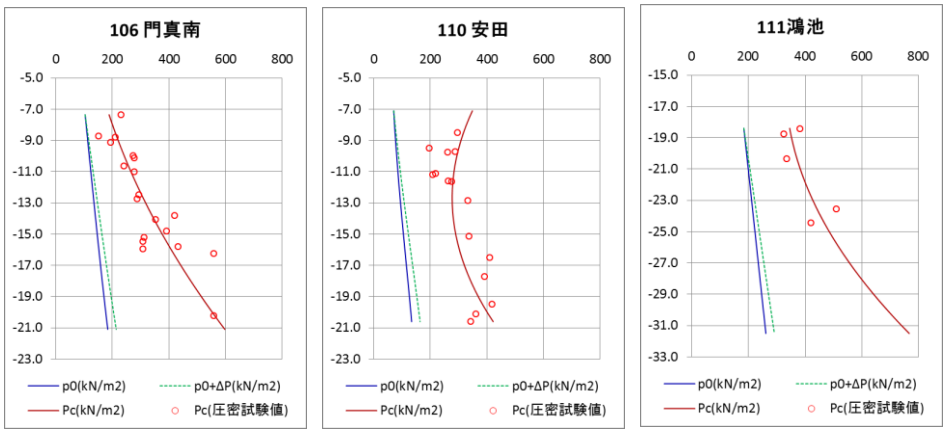
(●は,新関西地盤 2007[27]の基準ボーリング結果)

[26] 新関西地盤 -大阪平野から大阪湾- 2007 を元に作成.

[27] KG-NET・関西圏地盤研究会, 新関西地盤-ー大阪平野から大阪湾-, 2007.




(c)上町台地西縁地域




(d)東大阪東部地域

図-4.9(2) 大阪市域の洪積粘土層(Ma12)の圧密特性の地域的特徴 [26]

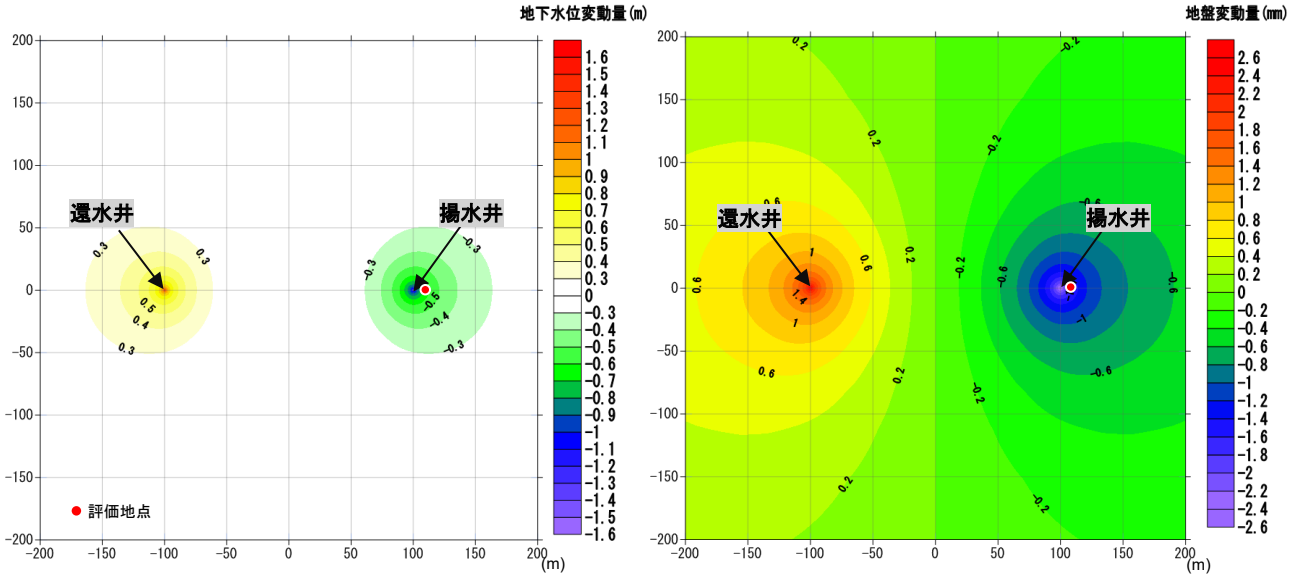
(●は,新関西地盤 2007[27] の基準ボーリング結果)

### (5) 地盤変動量など地下環境への影響

- ATES に係る当該設備の運用時に想定される地下環境（地下水位、地盤高と地下水の水温・水質）への影響について著しい変化が生じる恐れがないことをシミュレーションにより事前に確認する。

### (a)地下水位・地盤高への影響 [24]

- 地下水位変動量、地盤変動量に係るシミュレーションに使用するパラメータは、必ず現場試験から得られた範囲のものとし、ボーリング調査、圧密試験、揚水試験結果等に基づき地盤モデルを作成する。利用帯水層に接する上下の粘土層の圧密試験（(4)で前述）から得られた膨潤指数 $C_s$ や圧縮指数 $C_c$、$e$-log $p$ 曲線を平均化したモデルとして良い。
- ATES を想定運転期間中、前述(2)で算定した最大揚水流量で稼働しても、地下水位変動量と地盤変動量が十分に小さいことを確認する。
- シミュレーションには、有限要素法や有限差分法等による飽和・不飽和浸透流解析と圧密沈下解析を用いる。本市検討会議では UNSAF-3D-C[28] を利用した。この解析コードは、有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析により圧密沈下解析を行うもので、地下水の揚水・還水による地下水位の変化とそれに伴う地盤の圧密沈下を同時に解析することができる。
- 図-4.10 に 1 組の熱源井（井戸間距離：200 m、揚水・還水流量：100 m$^3$/h）による地下水位変動量と地盤変動量の解析例をそれぞれ示した。シミュレーションにより、評価地点における地下水位変動量と地盤変動量に著しい変化が生じないことを確認する。また、モニタリング時（7 章 p40 で後述）には、シミュレーション結果との対比を行い、実測値と著しく乖離していないことを確認する。
- 評価地点が熱源井間にある場合は、その外側にある場合に比べ還水の影響が大きくなるため、地下水位変動量や地盤変動量が過小評価される恐れがあることに留意する。




(a) 地下水位変動量　　(b) 地盤変動量

**図-4.10 地下水位変動量と地盤変動量の解析例（井戸間：200 m、揚水・還水流量：100 m$^3$/h）**

---

[28] 西垣誠・今井紀和・小松満・長井いづみ，圧縮に伴う比貯留係数の変化を考慮した地下水浸透に基づく地盤沈下解析手法，土木学会論文集, No.799/Ⅲ-72, pp.1-12, 2005.9.

**評価地点**

評価地点は ATES では全量還水することから、システムの稼働による地下水位の変動が抑制されるため、ATES の影響を明確に捉えられる範囲内に設定する。

ただし、熱源井近傍ではせん断抵抗力が働き、地盤変動量がシミュレーションの予測値より小さくなることを考慮する必要がある。なお、大阪市域では、熱源井近傍 10 m 以内は地盤高がほぼ一定になることをシミュレーションにより確認した。

大阪市域における実証事業では、熱源井から 16 m ～ 20 m の位置に観測井を設けて評価地点とし、観測井の地下水位等に基づき再現性を確認し地盤高への影響を評価した。

**(b)地下水温への影響**

- 舞洲地区における実証事業では 13℃ ～ 23℃での帯水層蓄熱運転を実施したところ、水温変化による明確な水質変化は確認されなかった。
- 還水温度による地盤環境への影響については、重金属類の溶出と微生物生態系への影響が知られている。
- 重金属類の溶出については、既往の調査事例[29]によると、地下水温の上昇に伴いホウ素濃度等の溶出量が増加するものの、地盤温度が 25℃程度までであれば僅かであると報告されている。また、微生物生態系への影響については、環境省が環境配慮型地中熱利用システムの構築実証事業で実施した微生物叢への実証実験[30]により、地盤温度は 8.4℃ ～ 28.8℃の間であれば、微生物群集構造等に大きな変化が見られなかったとされている。
- 以上の影響を考慮し、7 章に後述するモニタリングにより確認しながら地下水温の管理を行う。地下水の温度変化に係るシミュレーションソフトとしては、例えば DHI Group の地下水流動解析ツール FEFLOW[31]等が挙げられる。この解析コードは有限要素法による熱輸送解析を行うことができる数値シミュレーションソフトである。

---

29 小松登志子他, 戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究課題「地圏熱エネルギー利用を考慮した地下水管理手法の開発」研究終了報告書（平成 22 年 10 月～平成 28 年 3 月）, 2016.3.

30 環境省 水・大気環境局 水環境課 地下水・地盤環境室, 地中熱利用にあたってのガイドライン（第 4 版）, pp177-179, 2023.3.

31 DHI, FEFLOW, (https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow),(参照 2024.3.26).

## 5．熱源井の構築

帯水層蓄熱システムは、2本1組の熱源井と接続配管、熱交換器および付属の計器類と制御機器から成る。

目詰まりの要因を排除し、長期間安定した揚水・還水を実現するため、熱源井の構造等は以下のとおりとする。

(1) 熱源井の構造

・掘削径：孔壁での流速を抑えつつ大容量の揚水・還水を実現し、かつ目詰まり防止に必要なフィルタグラベルの厚さを確保できる孔径

・ケーシングおよびスクリーン：利用帯水層を原則単層とし、異なる水質の混合による目詰まり要因を排除し、流量を確保

・フィルタグラベル：システム運転による揚砂および帯水層の崩壊を防止

・帯水層の遮水：短絡流による水質の混合を防止

(2) 井戸間を地下水系統で接続する機構

・酸素の混入を防止する気密構造

・溶存ガスの気泡発生を抑制するための加圧状態を維持する閉回路

以上により構築した熱源井は、うめきた2期地区の実証において、最大揚水流量100 $m^3/h$、積算流量約57万$m^3$を同時同量で還水した。

- 熱源井は、ケーシングとスクリーン、掘削孔の利用帯水層とスクリーンの間を満たすフィルタグラベル、同じく粘土層とケーシングとの間を満たすシール材（膨張性粘土等）、利用しない帯水層とケーシングの間を充填するフィラーおよび水中ポンプと注水弁、揚水管、密閉式井戸蓋等で構成する（図-5.1）。

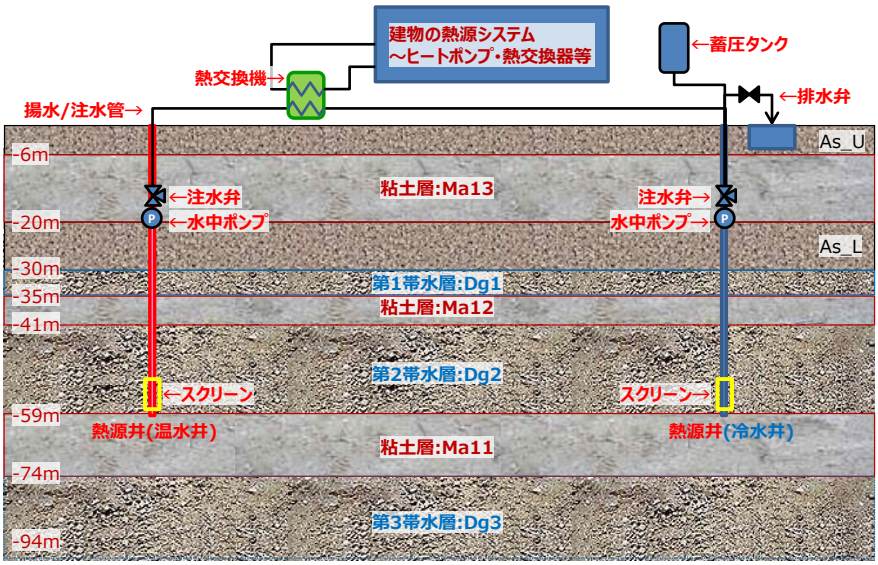



図-5.1 帯水層蓄熱システムで使用する熱源井の構成

- 注水法による地下水の人工涵養では、安定的に所定の量を注水できる技術を確立する上で、井戸の目詰まりを防止することが最も大きな課題となっている。
- 我が国では、地下水位低下による地盤沈下が問題となり、その対策として 1951 年から 1967 年にかけて地下水の人工涵養が実験的に実施されてきたが、そのほとんどが注水井の目詰まりにより短期間の実施に終わっている（表-5.1、表-5.2）。

- 汲み上げた地下水の還水が困難となるのは、以下の阻害要因による目詰まりが原因である（図-5.2）。

① 化学的目詰まり：地下水の酸化等の化学変化によるフロックや固形物の発生

化学的目詰まりの原因は酸化鉄によるものが多い。圧力の低下による溶存酸素の遊離や空気の混入により、地下水中の溶解性鉄が酸化され析出した酸化鉄がスクリーンに付着する。

② 生物学的目詰まり：酸化等による鉄バクテリア等の微生物の繁殖

何らかの有機物（懸濁物）が注入水に含まれると、微生物の発生に伴う目詰まりが発生する。

③ 気泡発生による閉塞：圧力開放による気泡の発生

目詰まりの原因となる帯水層での気泡発生は、注入水に含まれていた気泡がそのまま帯水層中に持ち込まれる場合と溶存酸素が気泡化する場合が考えられる。

④ 機械的目詰まり：帯水層中の細粒子の移動による孔壁、フィルタ部の閉塞

帯水層の細粒分が多い（10%以上）、あるいは仕上げ工程の井戸洗浄が不十分であると、揚水時に、周辺の細粒子が孔壁に集められ、目詰まりが発生する。

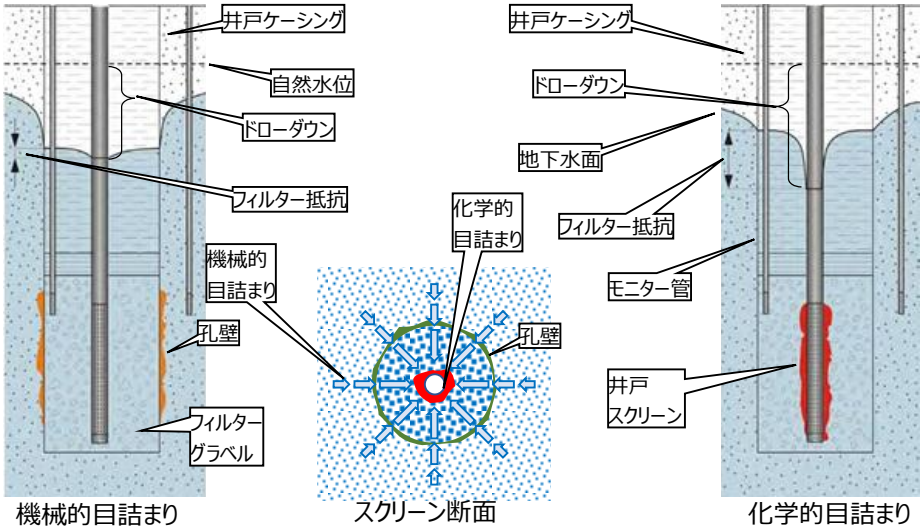



図-5.2 機械的目詰まりと化学的目詰り [3]

表-5.1 国内における地下水の人工涵養の主な事例[32]

| 実施日 | 実施年 | 実施場所 | 目的 |
|---|---|---|---|
| 尼崎市水道局 | 1951 | 武庫川河川敷 | 地盤沈下防止 |
| N紡績工場 | 1952 | 名古屋市 | 水位低下と地盤沈下を防止し、温調用水を増加させる |
| S冷蔵工場 | 1953 | 〃 | 水位低下により揚水量が減少したので水位の回復と利用効率の向上をはかる |
| 東洋レーヨン | 〃 | 瀬田工場 | 地下水増強 |
| 武田薬品工業KK | 1954 | 大阪工場 | 地下水増強 |
| 大阪市計画局 | 〃 | 臨海部西島地区 | 地盤沈下防止 |
| 尼崎市水道局 | 1955 | 神崎浄水場 | 還流実験 |
| 第三港湾建設局<br>京大防災研究所 | 1956 | 武田薬品大阪工場 | 注水に伴う大地の傾動観測 |
| 滋賀県外 | 1957 | 繊維工場 | 地下水増強 |
| ラジオ東京 | 〃 | 赤坂付近 | 地盤沈下防止 |
| 三共株式会社 | 1958 | 品川工場 | 地下水増強 |
| 科研化学KK | 1959 | 十条工場 | 〃 |
| 東洋レーヨンKK | 1960 | 徳島工場 | 塩水化防止 |
| Y化学工場 | 〃 | 墨田区 | 揚水量増加予備実験 |
| 地質調査所 | 〃 | 新潟市内野 | 地盤沈下防止実験 |
| 〃 | 〃 | 品川・製薬会社 | 地下水増強 |
| 〃 | 〃 | 徳島市<br>東邦レーヨン | 〃 |
| 〃 | 1961 | 保土ヶ谷化学KK | 地下水増強、地盤沈下防止 |
| 〃 | 1962 | 新潟市臨港 | 地盤沈下防止実験 |
| 農林水産省 | 〃 | 佐賀県白石 | 人工涵養実験 |
| 地質調査所 | 1963 | 上越市S工場 | 地下水低下地帯での鉄分を多量に含む層への注入実験 |
| 千葉市 | 1965 | 市北部ガス田 | 地下注入実験 |
| 農林水産省 | 1966 | 京都府神足 | 農業用井増強 |
| 〃 | 1967 | 福井県三国 | 〃 |
| 佐賀県 | 〃 | 有明干拓地 | 注入効率の変化の観測と注入システム開発 |
| T化学工場 | 〃 | 名古屋市港区 | 地盤沈下防止 |
| 地質調査所 | 〃 | 埼玉県妻沼 | 人工涵養実験 |

表-5.2 地下水の人工涵養実験における目詰まり調査[33]

| 地名 | 透水係数 | 注入水 | 注入井構造 ①深度 ②径 ③ストレーナ長 | 比注入量半減注入高（注入量） | 考えられる目づまりの原因 |
|---|---|---|---|---|---|
| 泰野 | $3.4\times10^{-2}$ cm/sec | 水道水 | ① 85m ②300mm<br>③ 18m | $4.2\times10^{3}$ m（38m³/h） | 空気泡，酸化鉄 |
| 大阪 | $1\sim5\times10^{-2}$ | 〃 | 51m 300mm<br>75m | $2.4\times10^{3}$ m（30m³/h） | 水道SS，酸化鉄 |
| 大東市 | $1\times10^{-2}$（推定） | 〃 | 182m 250mm<br>37.5m | $4.6\times10^{3}$ m（63m³/h） | 酸化鉄 |
| 妻沼 | $3.1\times10^{-2}$ | 地下水A45m井 Fe+Mn 1.78ppm<br>B15m井 〃 8.0 ppm | 200m 400mm<br>39.5m | A $4.1\times10^{3}$ m<br>B $0.04\times10^{3}$ m（60m³/h） | 酸化鉄，酸化マンガン |
| 平塚 | $1.1\times10^{-1}$ | 浅井戸水 | 80m 300mm<br>25m | $0.1\times10^{3}$ m（60m³/h） | ? |
| 佐賀白石 | $2.83\sim6.4\times10^{-3}$ | 深井戸水 | 165m 150~75mm<br>67.5m | －（定圧注入） | SS，微生物，酸化鉄 |
| 上越 | $6.2\times10^{-2}$ | 表流水浄化（凝集沈殿・急速濾過） 濁度 2~3 ppm | 285m 300mm<br>47m | $1.0\times10^{3}$ m（53m³/h） | SS，酸化鉄，微生物 |
| 山形 | $2.1\times10^{-3}$ | 表流水（粗大のみ除去，清澄） Fe 0.4ppm | 84m 300mm<br>36m | $3.6\times10^{3}$ m（42m³/h） | 酸化鉄 |
| 名古屋 | $5.6\times10^{-2}$ | 工業用水（浄水池の逆洗水の上澄水） 濁度 4 ppm | 200m 350mm<br>2cm | $0.4\times10^{3}$ m（21m³/h） | SS，酸化鉄 |

### (1) 熱源井の構造

#### (a)掘削径

- 熱源井の掘削径は、必要揚水流量と帯水層の透水係数、厚さ（スクリーンの長さ）より決定される。
- これまでの実証事業等では、揚水流量 100 m³/h（最大 2,400 m³/d）程度を確保するため、掘削径をφ600 mm、ポンプ容量に応じたケーシング径をφ300 mm（水道施設設計指針を参考）とした。よって、ケーシングと掘削孔の間を充填するフィルタグラベルの厚さは 150 mm となっている。
- 上記仕様で熱源井を構築し実証したところ、遮水層、容量 100 m³/h(最大 2,400 m³/d)のポンプ等を支障なく設置し、長期安定稼働に成功している。

32 小西康次郎，人工地下水と沖縄への想い，地下水技術，第 4 巻，第 12 号, pp32-43, 2000.

33 石崎・北川，注水井による地下水涵養-特に目詰まりとその対策ー，第 23 回水理講演論文集, 1979.

厚生労働省の水道施設設計指針(2012)の 2.12.3 構造の解説

揚水流量とケーシング径との関係を次のように定めている。

・揚水流量 1,500 $m^3$/d 未満の場合は、ケーシング径 250 mm(揚水管 100 mm)

・揚水流量 1,500～2,500 $m^3$/d の場合は、ケーシング径 300 mm(揚水管 125～175 mm)

・揚水流量 2,500 $m^3$/d 以上の場合は、ケーシング径 350 mm(揚水管 175 mm 以上)

(b)ケーシングパイプとスクリーン

- 異なる水質の混合による目詰まり要因を排除するため、利用帯水層（スクリーンを配置する帯水層）は、原則単層とし、同一帯水層間で揚水・還水する。
- ケーシングパイプとスクリーンの径は通常同じであり、ポンプ容量（必要揚水流量）に応じて水道施設設計指針等を参考に決定する。
- ケーシングパイプの材質には，金属系の鋼管または非金属系の樹脂管があり，井戸周囲の環境，予測される地質・水質・設置深度に応じた耐久性と耐食性を考慮して選定する。また，気密状態と加圧状態が維持できる構造とする。
- スクリーンの材質は、ケーシングパイプと同種のものを使用することが一般的である。また、樹脂製のケーシングパイプに、ステンレス製のスクリーンを配置する方法もある。スロットの開口率は 15% ～ 25%以上、スロット幅は周辺地盤の 40% ～ 50%粒径以下でかつフィルタ材の平均粒径より 0.1 mm 以上小さくする。

(c)フィルタグラベル

- フィルタグラベルは、スクリーンと孔壁との間に充填することにより、揚砂および帯水層の崩壊を防止する役割を果たす。フィルタグラベルの厚さは、井戸の掘削径とスクリーンの径から決定されるが、最低 100 mm ～ 250 mm 程度必要である。フィルタグラベルは上下の粘土層に十分重なるように設置する。
- フィルタ粒子の大きさは、帯水層の平均粒径（$d_{50}$）の 4～6 倍が適切で透水性が高く、帯水層の $d_{50}$ の 6～10 倍になると透水性が低下する。これは、井戸揚水時にフィルタ内で局所的に流速が上がり、周辺地盤の細粒子が侵入するためと考えられる。また、それ以上大きくなると帯水層の骨格粒子が流出し、井戸の崩落に繋がる（図-5.3）。
- これに対して、実証事業では、帯水層の $d_{50}$ の 4 倍より小さい、粒子が均一で清浄な丸い珪砂（$\phi$0.6 mm～$\phi$2.0 mm）を使用した。これは、帯水層を構成する土粒子が不均質で粒径幅が広いため、$d_{50}$ の 4～6 倍だと、粒子径の小さい土粒子にとってはフィルタ粒子が 6 倍より大きく、透水性の低下が懸念されるためである。
- 他方、フィルタ粒子が 4 倍より小さすぎると、周辺地盤の細粒子がフィルタ表面に堆積し、透水性が低下することが懸念されるが、掘削時の帯水層への細粒子の侵入防止と仕上げ時の洗浄を徹底的に行うことでリスクを低減した。
- その結果、システムの運転による揚水・還水に支障が無かったことから、以降の事例形成に採用している。
- なお、実証事業ではスクリーンの目詰まりの原因を特定するため、スクリーンの上部と下部に近いフィルタグラベル内にモニター管を挿入し、水位や水質を観測した。

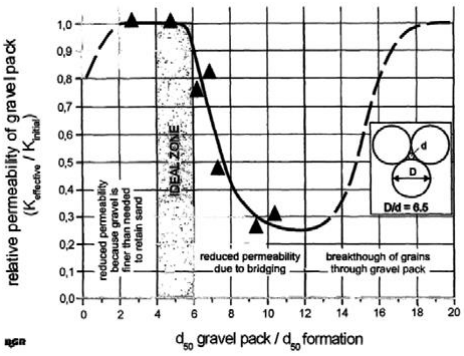



図-5.3 フィルタ材のサイズと透水性の関係[34]

### (d)帯水層間の遮水

- 帯水層間の短絡流による異なる水質の混合を避けるため、粘土層毎に止水用の膨張性粘土（ベントナイトペレット等※）によるシールを施す。特に、利用帯水層との確実な遮水が行えるよう利用帯水層の上下の粘土層部分には、2 m 以上の厚さでシールする。

※ 地下水の塩分濃度が高い場合は、高い塩分濃度においても膨潤性を発現するベントナイト（マルチゲル）の採用も検討する。ベントナイトは、ケーシング・スクリーン管建て込み後、透水材料として豆砂利、遮水位置にベントナイトを投入し、その膨潤により粘土層を形成し、遮水を行う。ベントナイトはペレット化したものを使用することで、膨潤までの時間を有し、施工時間を確保することができる。ベントナイトペレットの上下を豆砂利等で挟むことで、限られた膨潤範囲でベントナイトが密に膨潤し、遮水効果が高まることが期待できる。
　新エネルギー・産業技術総合開発機構ほか，再生可能エネルギー熱利用技術開発／再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発／都市域における、オープンループシステムによる地下水の大規模熱源利用のための技術開発，平成 27 年度～平成 30 年度報告書，平成 31 年 4 月

### (e)計測器

- 熱源井内の水位と水温を常時監視するために水位計と温度計を設置する。
- 時間最大揚水流量および積算流量を常時計測するために量水器を設置する。
- 地下水系統の気密、加圧状態を常時監視する圧力計を設置する。
- 帯水層間の遮水の状況を確認するため、利用帯水層の上部遮水層の直上帯水層の水位を観測できるモニター管を設置する。

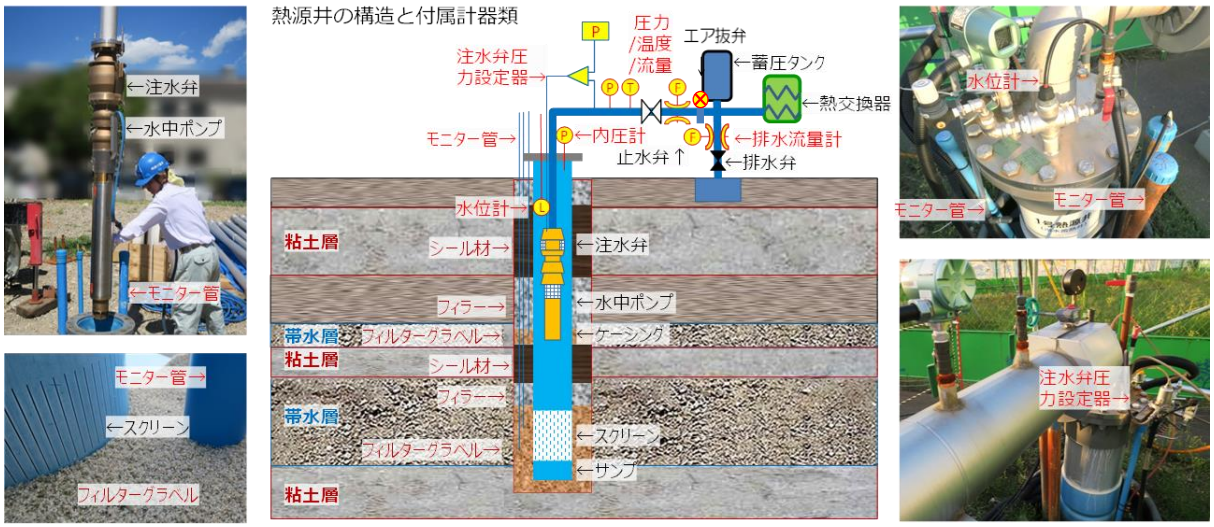



図-5.4 帯水層蓄熱用熱源井とポンプ・配管類および計測器の構成[3]

[34] Saucier, "Considerationsin Gravel Pack Design", Journal of Petroleum Technology, pp.205-211, February 1974.

### (2) 井戸間接続機構

- ATES では、目詰まりの原因となる地下水の酸化と気泡の発生を防ぐため、ポンプから注水弁･揚水管･蓄圧タンク･熱交換器までの地下水系統は、地下水と大気の直接の接触を避ける構造とする。また、気密構造を保った密閉回路とし、配管接続部のパッキンには、空気漏洩を防止するため密閉性の高い材質のものを採用する。
- システム停止中は、水中ポンプ直上の逆止弁により地下水系統内の圧力低下を防ぎ、圧力センサが低下を検知する都度、ポンプを再起動して常時加圧状態（60 kPa 程度）を維持する機構とすることで、地下水系統への空気の漏れ込みや気泡の発生を防止する。

### （参考）実証事業における目詰まり事例

- 舞洲地区の実証事業では、回路中のエア抜き弁が一時的に開放状態になり、地下水系統内に空気が混入し、還水側の熱源井に酸化鉄等の固形分が発生して目詰まりが生じた。
- これは、一時的な空気の混入により酸素が鉄と結合し析出したものであるが、その後、弁の閉鎖により、空気の混入が停止し、時間経過とともに元々生息している硫酸還元菌が鉄と結合した酸素を消費する還元反応が起き、目詰まりの解消に至った。
- なお、この時の目詰まりの発生、原因、解消は、地下水位および pH と酸化還元電位（ORP）の値の変化により確認できた。

## 6．熱源井の施工

目詰まりのリスクを軽減しながら、必要な揚水量を安定的に確保し、全量還水が可能な熱源井を施工するには、掘削時の泥水や帯水層に混入する細粒子が井戸に影響を与えないように

・清水掘りを基本とし、作業性に優れた掘削工法の採用

・孔壁保護にベントナイトを使用せず、帯水層への細粒子の侵入を抑制

・仕上げ時の十分な洗浄による細粒子の除去　等

に留意して施工する。

- 熱源井の機械的目詰まりを抑制し、帯水層の透水性を十分に活かした揚水・還水を長期間安定して実施するには、孔壁周辺の細粒子を増やすことなく掘削し、洗浄時にはこれらを極力除いておくことが重要である。

### (1) 掘削工法

- 各種さく井工法の比較検討について表-6.1、図-6.1 に示す。なお、我が国において熱源井として全量還水の運用実績が報告されているのは、リバースサーキュレーション工法とソニックドリル工法のみである。
- パーカッション工法は、西日本を中心に飲用井戸の掘削法として広く用いられ、重錘やハンマーなどによる衝撃力で地盤を砕いて掘削する工法である。ベントナイトを使用しないため、比較的良質な井戸掘削が可能であるが、リバースサーキュレーション法やロータリー工法に比べ施工性が悪く、近年採用例が少なくなってきている。

表-6.1 各種さく井工法の比較検討[35]

| 工法 | パーカッション | ロータリー | ロータリー<br>＋振動 | リバース<br>サーキュレーション | 回転振動<br>（ソニックドリル） | ダウンザホール<br>ハンマ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 掘削口径 | 300～750mm | 600mm | 600mm | 300～600mm | 300mm | 500mm |
| 掘削深度 | 250m | 1500m | 250m | 実績120m（300m） | 200m | 150m |
| 孔壁保護 | 清水堀 | 泥水加圧 | 泥水加圧 | 清水堀 | 清水堀 | 空気加圧 |
| 帯水層の閉鎖 | 泥水侵入 | 泥水押し込 | 泥水押し込 | 泥回収 | 孔壁圧密 | 堀屑押込み<br>一部回収 |
| 切羽情報 | 確認可 | 確認不可 | 確認不可 | 確認容易 | 確認不可 | 確認不可 |
| 海外事例 | 水道(過去) | 油井・温泉 | 基礎等 | 水道・注水井 | BTES・水井戸 | 岩盤基礎等 |

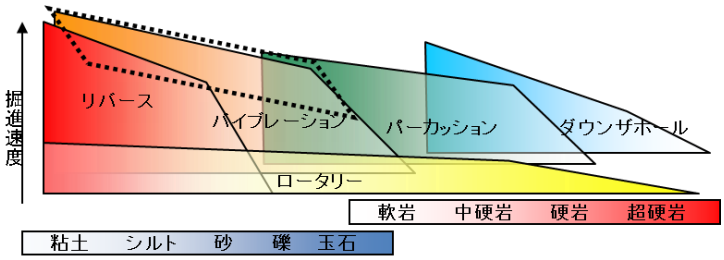



図-6.1　各種工法と適応する地盤の条件 [35]

[35] Edited by Robert J. Sterrett, PhD, RG, “Groundwater and Wells Third Edition”, Jonson screens, a Weatherford Company, 2007.

(a)リバースサーキュレーション法

- リバースサーキュレーション工法は、原則としてベントナイトは使用せず、地山の泥にポリマーを添加し粘度を確保しつつ、pH 調整により掘削泥中の粘土粒子が凝集を起こさないよう管理しながら掘削を進める。
- 掘屑を含んだ泥水は、ロッド内部を通じ排水されるため、掘削孔に泥水が壁を形成することがない。泥水を循環して掘削するロータリー工法に比べて、目詰まりのリスクが軽減され、高性能な井戸の構築が可能となる（図-6.2）。
- 本工法は、掘削過程において掘屑が時差なく地上に揚げられるため、切羽位置の正確な土質状況が把握でき、掘削と同時に各深度から採取したサンプルをサンプリングボックスに整理することで、適切な位置へのスクリーンの設置や確実な遮水を可能にする。
- オープンビットであるため、巨礫や玉石が混在する場合は、排土処理が困難となり、削孔に時間と手間を要する。これまでの国内の施工実績では、平均掘削進度は 10 m/d 程度である。
- 地上から最初の粘土層に到達するまで保護ケーシングを打ち込み、これにマッドタンクを接続、通常の地下水位より約 1 m 以上水位を上げ、この圧力で孔壁の崩落を防ぐ。掘削中は、十分な補給水を用意し、水位を維持すると共に、掘削泥の凝集を防止するため pH を 8 以上に保持する。
- 切羽の情報は、掘削時に上層部は 1 m 毎、帯水層部分に限っては 50 cm 毎にサンプルを採取し、この情報に基づき利用帯水層の確認やスクリーンの位置、膨張性粘土によるシールなどを行う
- 国内では掘削孔径 600 mm、掘進長 120 m の ATES 用熱源井 1 組で、最大揚水流量 90 m3/h の揚水・還水運転を実施した実績があり、大規模な ATES 用熱源井の掘削には、大孔径かつ大深度に適用可能な本工法が推奨される。

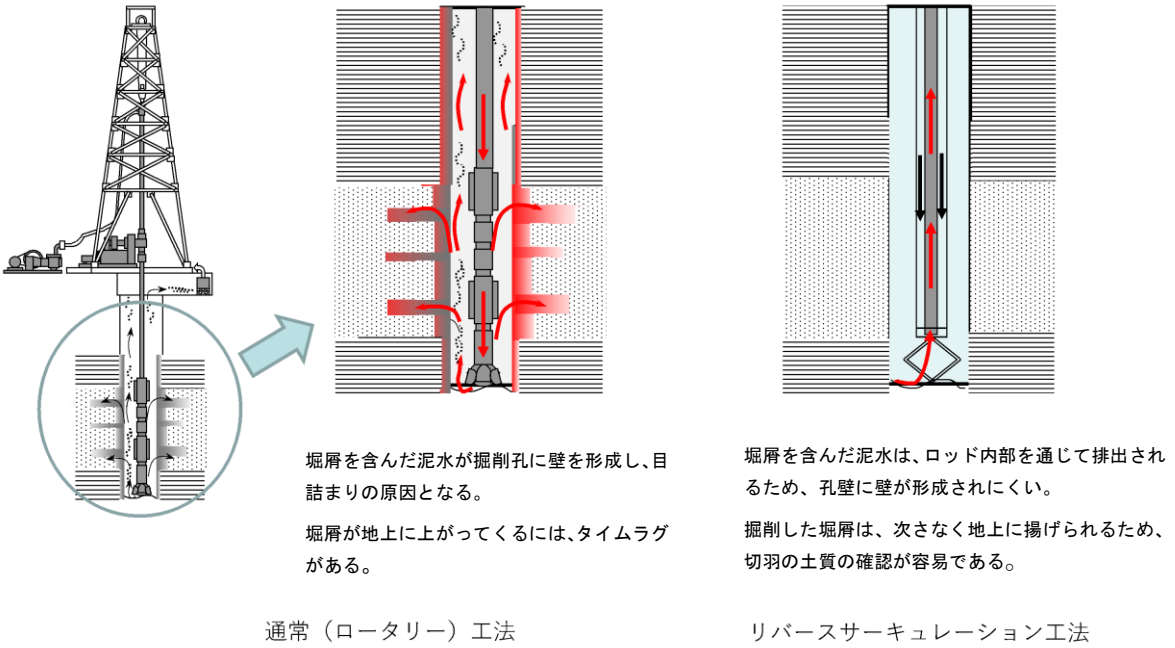



図-6.2 通常（ロータリー）工法とリバースサーキュレーション工法の比較 [3]

(b)ソニックドリル工法

- ソニックドリル工法は、ロータリー工法と比べ圧倒的な掘削時間の短縮を図れると共に、打撃エネルギーにより地盤を破砕・掘削するパーカッション工法と比べても 掘削時間を大幅に短縮す

る。また、一般の他工法に比べ地質にかかわらず掘削深度 100 m のボアホールを確実に構築することができる。

- ソニックドリル工法では、「高周波振動による孔壁の圧密効果」と「ビット径とロッド径の最小化（約 10 mm 程度）」により、孔壁を安定した状態とすることができる。これにより、掘削深度が 100 m 程度となる採熱孔工事においても、濁水ではなく、原則として「清水」を循環水として採用することが可能であるが、大孔径井戸の掘削は困難で、土質サンプルの採取が出来ないため、電気検層によりスクリーン位置が決定される。
- 山形県ではソニックドリル工法を用いて、掘削孔径 150 mm、掘進長 72 m の ATES 用熱源井 1 組で、揚水量 0.36 $m^3$/h、HP 能力(冷房 33.9 kW、暖房 39.1 kW)の ATES を構築した事例がある。

### (2) 孔壁保護

- 孔壁崩落の恐れがある場合は、必要に応じて一定期間後に自然に分解し井戸洗浄で容易に取り除くことができる生分解性ポリマーや増粘剤（帯水層掘削保護剤）[36]を使用する。一方、ベントナイトは、少量でも以降の井戸の性能に悪影響を及ぼすので、原則として利用しない。
- 高砂地区における熱源井の運転状況を図-6.3 に示す。ベントナイトを使用した 1 号熱源井（青色）では、ベントナイトを使用しなかった 2 号熱源井（橙色）に比べ、水位変化が大きく比湧出量※が小さい。1 号井では孔壁周辺にベントナイトが付着し、低透水性のゾーンを作り、帯水層の透水性を低下させたと考えられる。
- また、ベントナイト不使用の 2 号井でも時間の経過とともに、比湧出量が低下した。これは、1 号井の洗浄効果が十分であったために、システムの運転により、1 号井の細粒分が徐々に 2 号井の目詰まりを進行させたと推定される。

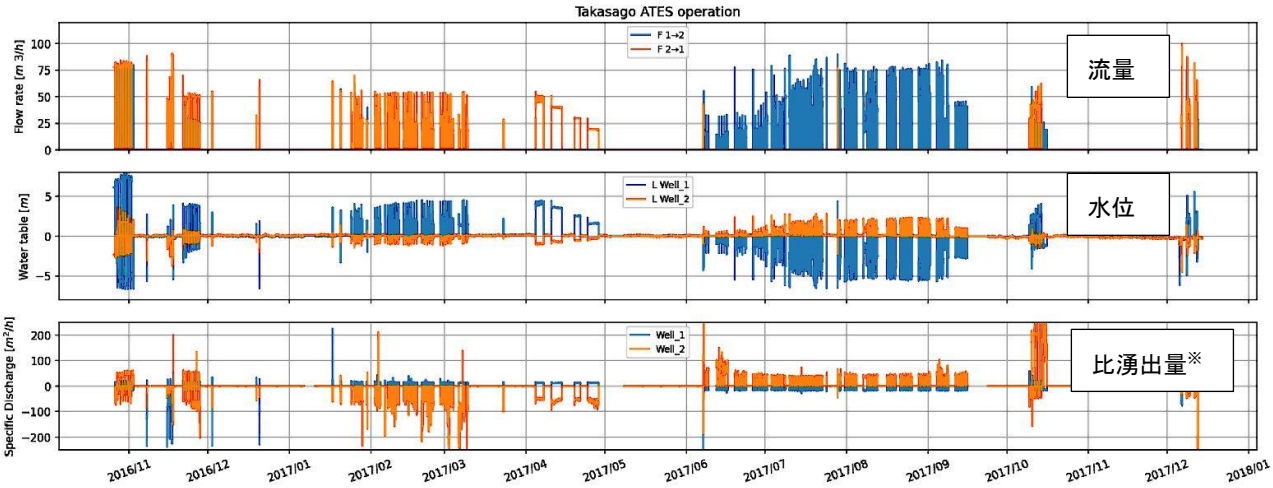



**図-6.3 高砂地区における熱源井戸の運転状況** [4]

※比湧出量：スクリーン長 1 m 当りで水位低下量 1 m に対して得られる揚水量

### (3) 井戸洗浄

- 図-5.2 に示したように、細粒子は井戸周辺からケーシングに向かって集中し、孔壁周辺で最も流速が大きくなるため、目詰まりリスクは孔壁周辺で高くなる。

---

[36] 宮本他, 杭打ち機を用いた井戸施工法の開発とその冷暖房利用 - （その 1）施工法の開発 - , 福井県雪対策・建設技術研究所年報地域技術第 24 号, 2012.3.

- この孔壁周辺の細粒子を、デベロップメントとよばれる井戸仕上げ時の十分な洗浄により極力取り除き、目詰まりリスクを低減する必要がある。
- 物理的洗浄には、ブラッシング洗浄、ベーリング洗浄、スワビング洗浄、エアージェッテイング洗浄などがある（表-6.2）。
- 間欠洗浄は、井戸構築当初、地下水中の粘土分やフィルタの間隙を通過するシルトなどの細粒を排出するには有効な方法と考えられる。エアサージングは、圧縮空気を使って水面を押し下げ、急減圧を行う。これを複数回実施して排水する。セクション洗浄は、フィルタスクリーンを区分洗浄する方法である。
- 複数の洗浄方法を組み合わせることが効果的であり、1 つ目は，帯水層にエネルギーを交互に出入りさせる方法(エアサージングやスワビング等)であり、2 つ目は、井戸から微細な堆積物を除去する方法 (ベーリングやセクション等)がよい。
- うめきた 2 期地区の実証事業では、間欠洗浄、エアサージング、セクション洗浄、断続揚水の順で行う方法を採用した。これは、井戸の孔壁付近から徐々に周囲の細粒分を除去していくという考えである。すなわち初期洗浄のうちから最大流量以上で揚水を行うと、収束域である孔壁周辺に細粒分が集中し、マッドケーキの形成やブリッジングにより、それ以降の洗浄が順調に進まなくなるためである。
- 洗浄効果は図-6.4 中に示す MFI※などを用いる方法があるが、MFI は国内での入手が困難であることから、プランクトンネットやメンブレンフィルタによる方法を推奨する。プランクトンネット（メッシュサイズ 100 μm）に 10 m3 の洗浄水を通水した時の細粒子の量が 0.1 g 以下となるまで、さらにメンブレンフィルタ（メッシュサイズ 0.45 μm、孔径 φ50 mm）に洗浄水を通水し、500 ml 以上が通るまで洗浄を行う。
- 各洗浄過程での洗浄排水の汚れ具合(排水ポンプ起動直後から最大汚れ、清澄迄の時間や濁りの変化)、メンブレンフィルタ、プランクトンネット双方の通水確認時のフィルタの汚れや残留物の目視確認なども、井戸の洗浄状態の経過を知る重要な指標である。
- 洗浄後には、段階揚水試験・連続揚水試験を行い、帯水層の透水係数および揚水流量を確定する。

**表-6.2 井戸洗浄方法の一例**

| 洗浄方法 | 原理・効果 |
|---|---|
| ブラッシング洗浄 | ケーシング管内を大きめ円形のワイヤーブラシを上下させることによりスクリーン及びケーシング内部の付着物を掻き落し除去する |
| ベーリング洗浄 | ケーシング内径に近いベーラーを使用し，ベーラーを引き揚げる時の衝撃作用を利用して目詰まりを除去する |
| スワビング洗浄 | ケーシング管内にサージプランジャーを挿入し，上下のピストン動作を与えて水の揺動を大きくしてスケールや砂粒を除去する |
| エアージェッテイング洗浄 | ケーシング管内でノズルより高圧水を噴出させ，スクリーン部の内外に強力な洗浄と衝撃作用を与えて目詰まりを除去する |
| エアサージング洗浄 | 圧縮空気で水面を押下げて排水し洗浄する |
| セクション洗浄 | 専用のポンプと穴あき管から構成された洗浄器具を使って，フィルタスクリーンを区分洗浄する |

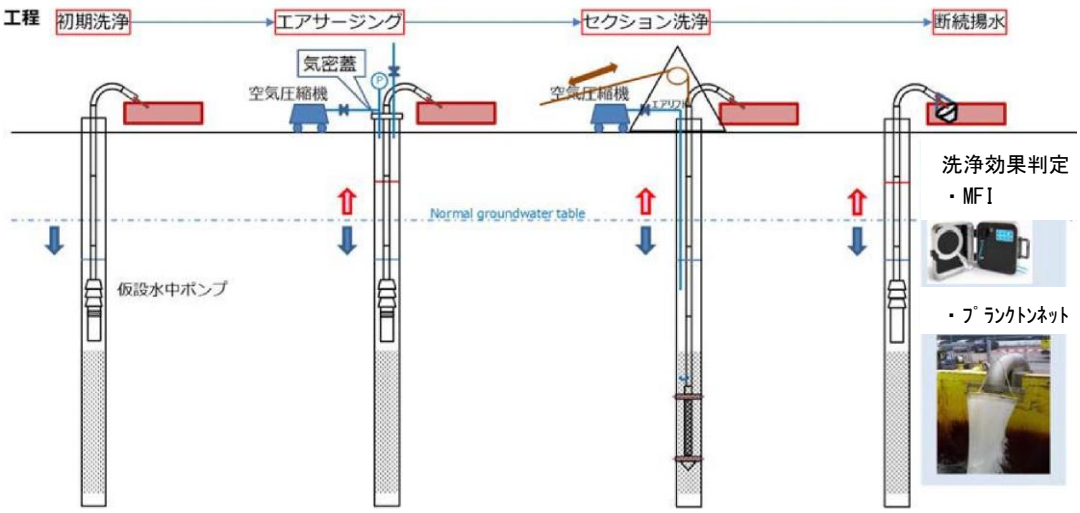



図-6.4 井戸の洗浄工程例 [3]

※ MFI(Modified Fouling Index)は、米デュポン社がイオン交換樹脂の閉塞評価に使うため開発した SDI(Silt Density Index)を改良した濁度の指標である。測定自体は、より小径の 0.45 μm メンブレンフィルタモジュールに洗浄水を注水し、その通過流量と膜の圧力損失の時間変化を測定して求めるもので、本質的に行っている内容は同じである。

## 7. 維持管理

### 7-1. モニタリング

帯水層蓄熱システムのモニタリングは、井戸の目詰まりを防止しシステムの初期性能を維持すること、周辺環境負荷や状態変化を把握することを目的として実施する。

#### (1) モニタリングの観点

- ATES の維持管理は、周辺地盤環境への影響評価、システムの健全性評価（目詰まり対策）を目的とし、環境省の『地中熱利用にあたってのガイドライン』[37]を参考に以下 3 点を考慮する。
  - ① 環境効果：省エネルギー効果、$CO_2$ 排出量削減効果、ヒートアイランド緩和効果等の把握
    「省エネルギー・$CO_2$ 排出削減効果」を概略的に把握することを目的とする
  - ② 環境負荷：日常の適正な運転管理のため、「システムが環境に与える負荷」を概略的に把握することを目的とする
  - ③ 環境影響：地下水・地盤環境への影響分析
    環境負荷の結果生じる「環境状態の変化」をできるだけ直接把握することを目的とする

#### (2) モニタリング項目

- ATES の熱利用は、採排熱量が大きいため『地中熱利用にあたってのガイドライン』（環境省）の基本+補足項目をもとに、実証事業の成果を踏まえて以下の項目とする。また、表-7.1 にシステムの維持管理に必要なモニタリング項目を、図-7.1 にそのイメージ図をそれぞれ示す。

表-7.1 システムの維持管理に必要なモニタリング項目

| | 項目 | 効果 | 負荷 | 影響 | 頻度 | 目的等 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ① | 揚水･還水井内水位 | | ○ | ○ | 常時 | ・熱源井の水位が導入初期段階より大きく変動していないことを確認 |
| ② | 井戸近傍地下水位<br>(ケーシング外･上部帯水層) | | ○ | ○ | 定期 | ・揚水･還水運転時のパイロット管とケーシング内外の水位を比較することで、目詰まりの可能性を確認<br>・揚水･還水運転時と停止時の上部帯水層に設けたパイロット管の水位変化により、上部帯水層に影響していないことを確認 |
| ③ | 揚水･還水水温 | ○ | ○ | | 常時 | ・設計温度と大きく乖離していないことを確認 |
| ④ | 揚水･還水流量 | | ○ | | 常時 | ・設計流量を超過していないことを確認 |
| ⑤ | 揚水･還水水質 | | ○ | ○ | 定期 | ・導入前と導入後3年間は水質調査を行い、水質に大きな変化が見られない場合は、以降の調査を省略してよい<br>・簡易的に計測可能な電気伝導率およびpH、酸化還元電位（ORP）は定期計測し、水質に大きな変動がないことを確認。<br>・環境基準を満たさない場合は、水質汚濁防止法を遵守するとともに、上部帯水層の水位及び水質を調査することにより地下水汚染が拡散していないことを確認 |
| ⑥ | 地盤変動量 | | | ○ | 定期 | ・毎年同時期（自治体の一斉観測の時期が望ましい）に年1回観測。システムの影響で地盤沈下していないことを確認 |
| ⑦ | 地下水系統 | | ○ | | 定期 | ・常時加圧状態を維持できていることを確認（停止時を含む） |
| ⑧ | 消費電力 | ○ | | | 定期 | ・揚水･還元ポンプ、熱媒循環ポンプ、ヒートポンプ本体、室内機等の消費電力を計測<br>・システムの効率（COP:成績係数）を把握 |
| ⑨ | 周辺地下水位･水温<br>（観測井） | | ○ | ○ | 定期 | ・バックグラウンドとして近辺の井戸や新たに設けた観測井で、揚水井と同様に水位･水温計測を行い、周辺に影響を与えていないこと確認 |

[37] 環境省, 地中熱利用にあたってのガイドライン（第４版）, 2023.3.

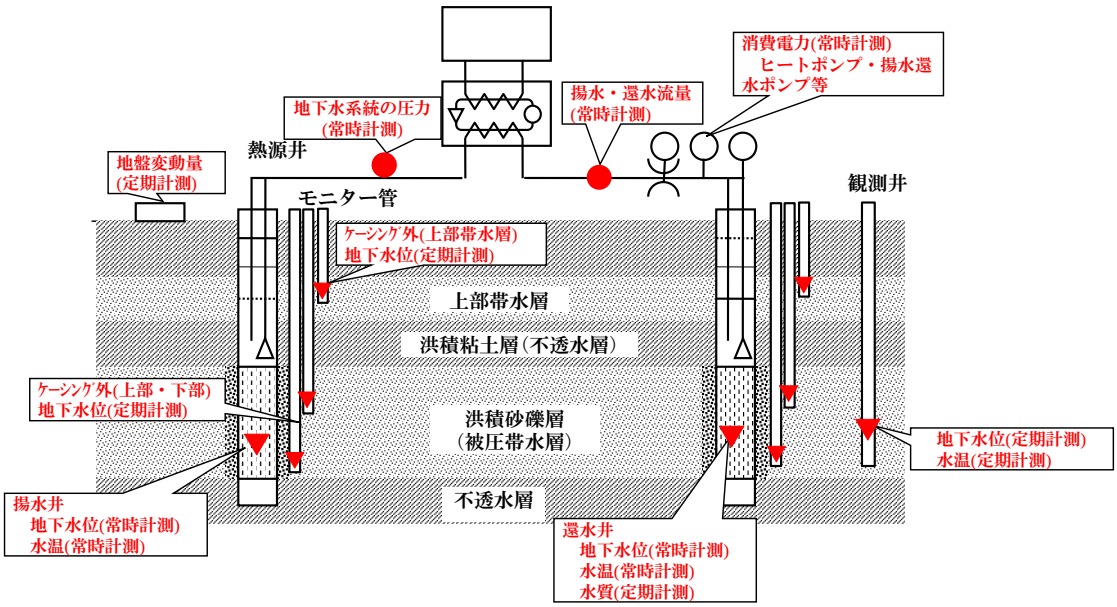



図-7.1 モニタリングイメージ

① 揚水・還水井内水位

- 揚水・還水による地下水位への負荷の蓄積（経年的に徐々に水位低下・上昇傾向）や目詰まり等による過大な変化を事前に防ぐため、水位計により揚水・還水井内の地下水位を連続記録する。
- 地下水位の変動が導入時に比べて 20% ～ 30%を超えて悪化した場合など、目詰まりの傾向が見られる場合は、濁度の確認を行う等その原因を特定するとともに、必要な対策を講じる。

② 井戸近傍水位（ケーシング外・上部帯水層）

- スクリーンの目詰まりの原因を特定するために、ケーシング外（フィルタスクリーン内）の上部および下部の地下水位や水質サンプルの採取が可能なモニター管を設置する。ケーシング内の揚水・還水井水位との比較や水質を測定することで、目詰まりが発生する可能性を確認する。
- 対象とする帯水層以外の地層に確実な遮水を行っていることを確認するために、利用帯水層の上部遮水層の直上の帯水層の地下水位や水質の観測が可能なモニター管を設置する。ケーシング内の揚水・還水井水位と比較することで、遮水の完全性と他の帯水層の水位や水質に影響していないことを確認する。

③ 揚水・還水水温

- 設計温度と大きく乖離していないか確認するため、揚水・還水井の水温を温度計により計測する。特に設計時の還水温度を超える場合は、その原因を特定し、必要な対策を講じる。
- また、冷温水の蓄熱量を明らかにするため、揚水･還水した流量と温度差を積算する。ATES の持続的な運用を図るため、年間を通じて熱干渉を起こさない範囲で熱量バランスを維持する。特に熱量バランスが崩れた場合は、2 年から 3 年の計画でバランスを復旧する。

④ 揚水・還水流量

- 設計流量と大きく乖離していないか確認するため、量水器を設置して、時間最大揚水流量および積算流量を計測する。揚水・還水流量の低下等が確認された場合は、目詰まりの可能性があるため、その原因を特定し、必要な対策を講じる。

⑤ 揚水・還水水質

- 還水時の温度変化等による地下水の水質への影響を把握するため、ATES 導入前に熱源井等で地下水の水質汚濁に係る環境基準項目（表-7.2）による地下水質調査を行うとともに、導入後も電気伝導率および pH、ならびに酸化還元電位（ORP）を把握し、導入前と大きな水質の変化がないことを確認する。水質調査の結果、環境基準を満たさない場合には、水質汚濁防止法を遵守するとともに、上部帯水層の水位及び水質を調査することにより地下水汚染が拡散していないことを確認する。

表-7.2 地下水の水質汚濁に係る環境基準項目[38]

| | | |
|---|---|---|
| カドミウム | クロロエチレン | チウラム |
| 全シアン | （別名塩化ビニル又は塩化ビニルモノマー） | シマジン |
| 鉛 | 1, 2-ジクロロエタン | チオベンカルブ |
| 六価クロム | 1, 1-ジクロロエチレン | ベンゼン |
| 砒素 | 1, 2-ジクロロエチレン | セレン |
| 総水銀 | 1, 1, 1-トリクロロエタン | 硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素 |
| アルキル水銀 | 1, 1, 2-トリクロロエタン | ふっ素 |
| ＰＣＢ | トリクロロエチレン | ほう素 |
| ジクロロメタン | テトラクロロエチレン | 1, 4-ジオキサン |
| 四塩化炭素 | 1, 3-ジクロロプロペン | |

地盤変動量

- 揚水による地盤への影響を把握するために、水準測量等により実測する。自治体等が一斉観測を実施している場合は、その時期に合わせることが望ましい。地盤沈下が発生した場合は、周辺の地下水位とも比較してその原因を特定し、必要に応じてその対策を講じる。

⑦ 地下水系統

- 空気の侵入と気泡によるスクリーンの目詰まりを防ぐために、揚水－還水系統が停止時を含め、常時加圧状態を維持できていることを確認する。地下水系統の配管圧力が、加圧状態が保たれていない場合は、その原因を特定し、必要な対策を講じる。また、孔内が大気と遮断されていることは、井戸蓋のパッキンの目視点検や孔内圧力計の動きにより確認する。

⑧ 消費電力

- 水中ポンプ、ヒートポンプ、2 次側の冷温水ポンプ、空調機等、システム全体で消費する電力を計測する。ヒートポンプ単体 COP、およびシステム COP(SCOP : 供給した冷水/温水の熱量に対する全体の消費電力の比、冷房 COP、暖房 COP、年間 COP)を把握する。
- ヒートポンプや各種ポンプは、メーカーの性能曲線があるので、COP が低くなっている場合は、運転方法や機器性能の低下状況等について確認する。

⑨ 周辺地下水位・水温

- 周辺への影響を確認するため、敷地境界付近にバックグラウンドとして観測井を設置し、水位・水温を観測する。周辺地下水位・水温が設計時と大きく乖離する場合は、その原因を特定し、必要な対策を講じる。

[38] 環境省, 地下水の水質汚濁に係る環境基準（平成 9.3.13 環告 10 最終改正平 28 環告 31）.

### ⑶ モニタリング頻度

- システムの稼働状況を把握するため、熱源井の揚水・還水流量、地下水位、孔内圧力、水温は常時測定（1 回／時以上を目安）とする。なお、最近の制御･監視機器は 1 分単位のデータ測定や記録機能を備えているため、細かくデータを記録しておけば、システムの故障解析に有効である。
- 熱源井によって生成される蓄熱塊の広がり状況並びに揚水・還水が周辺環境に及ぼす影響を把握するため、観測井の地下水位、水温及び、ケーシング外と上部帯水層の地下水位は、定期観測（1 回／月以上を目安）とする。
- 水質調査（地下水の水質汚濁および土壌汚染に係る環境基準項目）は、定期観測（温水蓄熱による影響を考慮して 1 回／年以上を目安）とし、導入後 3 年間、水質に大きな変化が見られない場合は、以降の調査を省略して差し支えないものとする。
- 水質調査を補完するための電気伝導率、pH、酸化還元電位（ORP）は、冷房・暖房運転の切り替え時期を捉え、2 回／年以上を目安に実施し、大きな変動が認められたときは、水質調査を行う。
- 地盤変動量は 1 回／年以上を目安に地盤高を測定するものとし、地域的な評価に資するため、行政が行う水準測量と時期を合わせることが望ましい。

## 7-2. 井戸洗浄

井戸の目詰まりを防止しシステムの初期性能を維持するために、冷房運転・暖房運転前の定期的な排水のほか、目詰まりの進展に応じて洗浄を実施することが望ましい。

また、モニタリングにより目詰まりの傾向が確認されれば、その発生原因を特定し、必要な対策を取る必要がある。井戸の目詰まりには、幾つかの原因があり、帯水層の構成土質、地下水環境、井戸の構造により、その発生機構は異なる。

### (1) 定期洗浄

- 井戸の目詰まりを防止するための定期的なメンテナンスとして、冷暖房の切り替え時（運転期間の終了時）に、スクリーンに堆積した細粒分を取り除くため、逆方向に 2 時間程度、最大流量で地下水を排出する。

### (2) 井戸洗浄

- 揚水井における揚水流量に対する水位低下量、還水井における還水流量に対する水位上昇量が、構築時と比べて 20% ～ 30%を超えて悪化した場合は、目詰まり除去の洗浄を行う必要がある。洗浄時期は、緊急時を除き、システムの運用を停止する中間期に実施する。
- 目詰まり除去のための洗浄工法は、物理的洗浄（6 章 p37 に詳述）、薬品洗浄等があり、目詰まりの状況を把握したうえで工法を決定する。
- ただし、断続揚水の効果が見られないほどに目詰まりした井戸については、直接機械洗浄を実施するほうが良いとしている。
- 物理的洗浄で目詰まりが改善されない場合は、薬品洗浄等も検討する。薬品洗浄は、井戸内に薬品の溶液を投入して、機械的洗浄で除去できない目詰まり要因を溶解除去する工法である。使用する薬品は、各種薬品の中から、水質や付着スケールによって適応可能なものを選定する。
- 最終的には段階揚水（還水）試験、連続揚水（還水）試験において、揚水流量・還水流量を計測し、洗浄効果を確認する。