

蓄熱都市の創造 ー帯水層蓄熱システムの普及へ向けた技術開発ー
Thermal energy storage city -Technological development for the spread of ATES system-

大阪市立大学 複合先端研究機構

Osaka City University

Advanced Research Institute for Natural Science and Technology

中尾 正喜

Masaki NAKAO

キーワード：帯水層蓄熱 (Aquifer Thermal Storage)、井戸 (well)、目詰まり (Clogging)、
地盤沈下 (Ground Settlement)、規制緩和 (Deregulation)

1. はじめに

地下水は、熱源としての利用や防災・環境用水利用など多面的利用のニーズが広がっているが、地盤沈下や熱的環境影響を回避しつつ、安価で大規模な地中熱利用技術が確立されることにより、都市に遍く眠っている熱利用資源である帯水層の価値を創出することが望まれる。西ヨーロッパや北米は、地中熱ヒートポンプの先進国である。特にオランダは、帯水層蓄熱 (ATES (Aquifer thermal energy storage) と呼ぶ) 利用の先進国であり、2015年時点で約2000件超のオープンループ型の ATES システムが稼働している。

わが国でも多くの研究者による研究がなされてきた (既往研究の例を 1) ~5) に示す) が、我が国で ATES が普及しなかった原因として過去の過剰な揚水が招いた地盤沈下とその対策としての揚水規制がある。また、規制地域外において、ATES システムの技術開発や実証が過去行われてきたが、一部を除いて小流量であることと、還水井戸の目詰まりによる流量低下を経験したことにより、普及できる技術とは見做されていなかったことも原因の一つである。

わが国特有の地層構造の複雑さを克服し、長期に安定して使用可能な熱利用井戸の構築技術および、我が国の気候に適し、長期にわたり安定して蓄熱利用が可能な ATES の運用制御技術が待たれていた。

2. 海外の導入事例

ドイツ連邦国会議事堂ビルに適用された ATES システムは2つの異なる帯水層に高温と低温に分けて蓄熱している⁶⁾。上部の帯水層は夏期の冷房のために使用され、下部の帯水層は暖房に使用されている。下部の帯水層は300m以深にあり、夏期にはCHPから排熱を蓄え冬期の暖房を助けている。高温側の帯水層は最高70°Cに達することがある条件で運用されている¹⁾。低温帯水層と高温帯水層の熱収支が報告されており、シミュレーション結果ではあるが規模の大きさが理解される。夏期、揚水温度は6°Cから10°C、注水温度は15°Cから28°Cであり、冬期蓄熱分の回収利用熱3.950 MWh/年、冬期平均揚水温度22°C、注水温度5°Cで冬期の蓄熱量4250MWh/年であるので、蓄熱回収率93%と試算されている。高温帯水層は夏期、揚水温度20°C、注水温度70°Cで、2.650 MWh/年蓄熱する。冬期には揚水温度65°Cから30°Cで熱回収量は2.050 MWh/年である。蓄熱回収率は77%である。

大規模な ATES の利用施設として、ストックホルムのアーランダ空港はよく知られた事例である⁷⁾。2005年にフィージビリティ・スタディが開始され、続いて水質地質調査が行われ、環境アセスメントを実施し、2008年8月に許可が得られている。許可後 ATES システムの建設に着手し、2009年5月末竣工した。このシステムは、約8MWの冷房および暖房負荷を対象とし、揚水・還水の最大流量は720m³/hで計画されている。運用実績の報告は見当たらないが、わが国の ATES よりはるかに規模が大きいことが理解される。

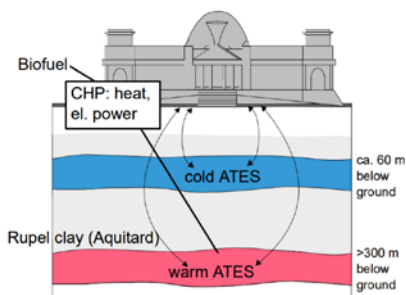


図1 ドイツ連邦国会議事堂ビル2つの ATES

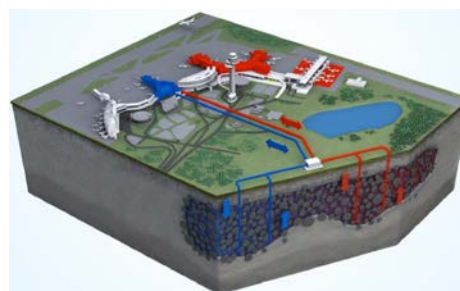


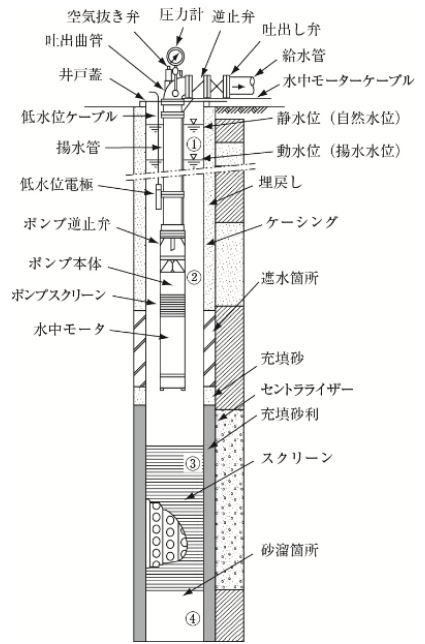
図2 スウェーデンアーランダ国際空港の ATES 利用

3. 熱源井戸構築技術

熱利用の基本構造は上水に用いられる井戸（図3）と同じである。地下水の熱利用は、目新しいものではなく、水量や水質に優れた地域では、現在もよく利用されている。しかし、当該地域の地盤や帯水層の状況、井戸の構造や利用時の地下水の水質変化等により、還水井の目詰まりが生じ、都度の還水井の逆洗や1本の揚水井に対して複数の還水井が必要となることが頻繁に起こった。

わが国の地下水には比較的高い濃度の鉄イオンが含まれることが多く、地下水が大气に触れることで地下水中の鉄イオンが酸化し、析出したフロックが細粒と相乗して深刻な目詰まりを生じる例が散見された。また、井戸のフィルタ径が大きく取られることが多く、揚水井から産出した細粒やシルト分が、還水井で目詰まりを引き起こすこともあった。加えて、嫌気性領域では活動が抑えられていた鉄バクテリアが、酸素の混入により繁殖し、目詰まりを起こす事例も見られた。

また、揚水井の構築についても、一般に回転式掘削ビットの先端から泥水（ベントナイト）を注入し、孔壁の崩落を防ぎつつ掘削を進める方法、あるいは打撃ハンマーと、掘り屑回収用のペーラーによるパーカッション工法が採用されることが多いが、共に掘削した孔壁の周りに粘土の被膜が残るため、帯水層の透水性を妨げ、目詰まりの拡大につながる懸念があった。



水道施設設計指針
(厚生労働省2012)

図3 井戸構造

オープンシステムが目詰まりの原因を整理（図4）すると、次の通りである。

目詰まりの原因

<還水井で顕著>

(a) 化学的目詰まり

一 地下水の化学変化を誘引

(b) 生物学的目詰まり

一 微生物の育成環境を構築

<揚水井・還水井とも>

(c) 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. 残存する掘削泥による孔壁周辺の被膜形成

iii. 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

- ・ 洗浄時を超える揚水実施による細粒の移動

- ……地下水流速が最も高い揚水井周辺の帯水層の目詰まり

- ……還水井において流速が低下する部分での細粒の停留

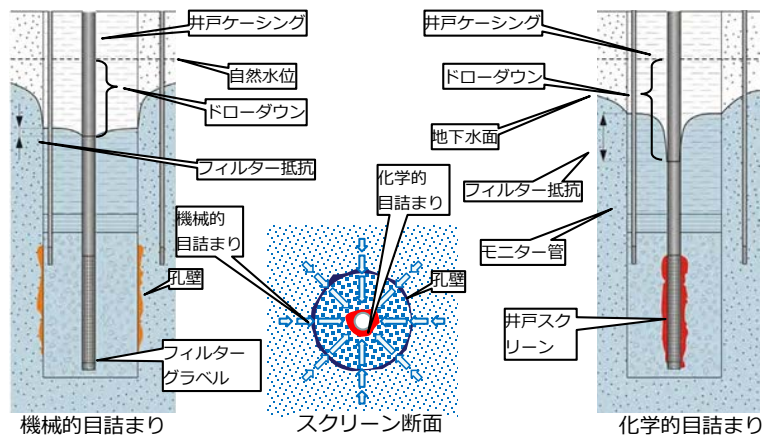


図4 井戸の目詰まり

環境省の実証事業において目詰まりの原因となる酸化域の地下水を使わない、揚水・還水は同一の帯水層を使い地下水混合を避ける、粘土の含有率が低く透水性の高い帯水層を選定するなど配慮して井戸を構築した（図5）。掘削工法は欧米で水源用の井戸に一般的に使われるリバース循環方式を採用し、ベントナイトはなるべく使わず、孔壁での目詰まりを防いでいる。また、細粒の移動・閉塞を防ぐため、孔壁での流速を抑える井戸口径（600mmφ）としている。フィルタサイズは排砂と偏流抑制のため平均粒径1mm、フィルタ層の厚さ125~150mmとしている。スクリーンは縦スリット型である。その他、地下水システムの気密維持は当然ことながら、洗浄工法なども工夫し、配管システムの常時加圧（空気の侵入防止と気泡発生抑制）も行っている（図6）。



図5 開発したボーリングマシンと掘削状況

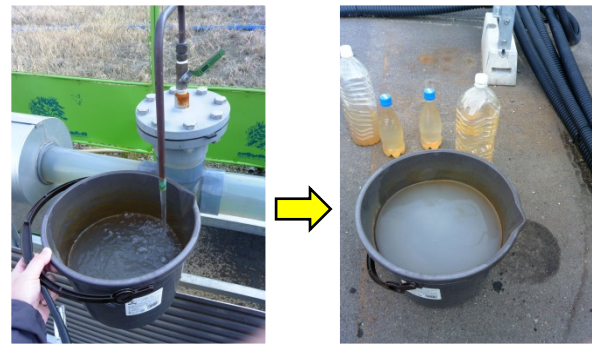


図6 地下水を汲み上げるとやがて白濁

兵庫県の三菱重工高砂工場内（高砂地区と呼ぶ）において構築した熱源井は瀬戸内海に隣接していることから鉄分11mg/Lの他、塩分も2,000mg/L（海水の1/10）と濃度の高い地下水を利用することとなった。またうめきたDg2では鉄分10mg/L、塩化物3,500mg/Lであった。

この高砂地区に構築した熱源井の運用性能として、揚水・還水流量に対する水位変化量を調査した。揚水・還水量100m³/hのとき、ベントナイトの使用量が多かった1号井では井戸運用開始時（2016年7月）の水位変化量は7.5m、運用終了時（2017年12月）7.8mであったが、ベントナイト使用量を抑制できた2号井では、運用開始時6.5m、運用終了時3.9mであり透水性が上昇した。高砂地区の経験を経て、うめきた地区に高砂地区と同規模の100m³/hの揚水・還水を実現するための試験設備を構築した。1号井の水位変化は1.8m、2号井では僅か1.2mであった。沈下影響が無く、実用規模の揚水・還水量を実現できている。

4. 熱利用技術

井戸の開発実証試験と並行して、熱利用にかかわる技術開発も進んでいる。長期間帯水層の蓄熱利用を可能とするため、帯水層蓄放熱量の年間サイクルの熱収支平衡、各井戸（高温井戸、低温井戸）の1シーズン当たりの積算流量の平衡、二つの井戸間の熱干渉抑制などに配慮しつつ、低炭素化効果を最大化する運用制御法の開発を進めている。特に冬期の非空調時間帯における低温外気を利用した低温井戸の冷却は有効である。暖房負荷がない時間帯に、低温の冷却水を活用したフリークーリングや高効率冷凍機による高効率冷水製造により帯水層の低温井戸側を冷却することができる。夏期に熱源の冷却水として使用する際には高温井戸へ排熱を注入し、冬期のヒートポンプの熱源として活用できる（図7）。

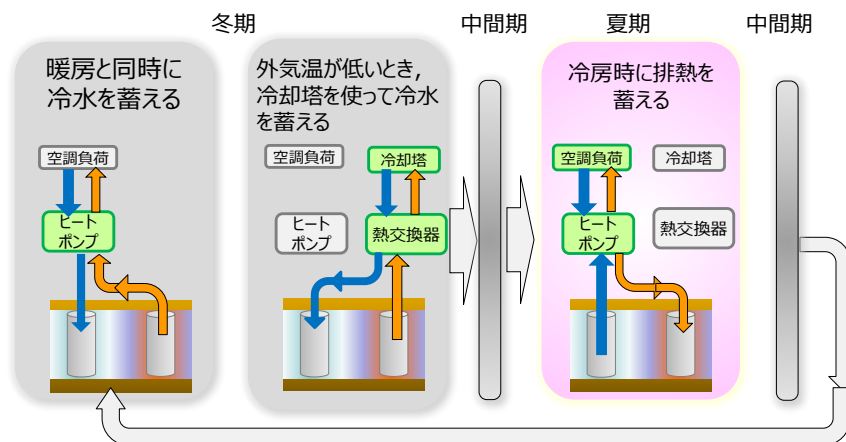


図7 ATESの年間運転サイクル

次に、三菱重工サーマルシステムズの高砂事業所での実証試験⁹⁾(図8)を紹介する。実証対象施設は工場であり、定

格冷房能力 703kW (加熱能力 850 kW) のターボ冷凍機を使用しており、空調対象面積は 4000m² である。2017 年 2 月よりターボ冷凍機により暖房の実証運転を開始した。暖房の温水温度は 43°C、井戸への注水温度を 6°C とした。本システムは冬期から運用をスタートしたので、冬期間は初期地中温度 18°C で揚水して、ヒートポンプ (ターボ冷凍機) 熱源として利用している。2 月 2 日から 3 月 3 日までの暖房運転実績でヒートポンプ単体の期間平均 COP は 3.8、期間平均システム COP は 3.3 であった。ボイラーを使用せず、ターボ冷凍機で暖房運転できたことは低炭素化のため意義深い (図 9)。第 4 世代の低 GWP 冷媒 (HFO 冷媒) を使える製品化された熱源機はターボ冷凍機だけなので、HFO 冷媒で冷/暖房できるシステムとしても意義深い。

1 年間で試験を終えたが、仮に 2 年目を運転すれば、夏期の排熱注入により揚水温度が高い状態からスタートするので、より COP が高くなることが期待される。

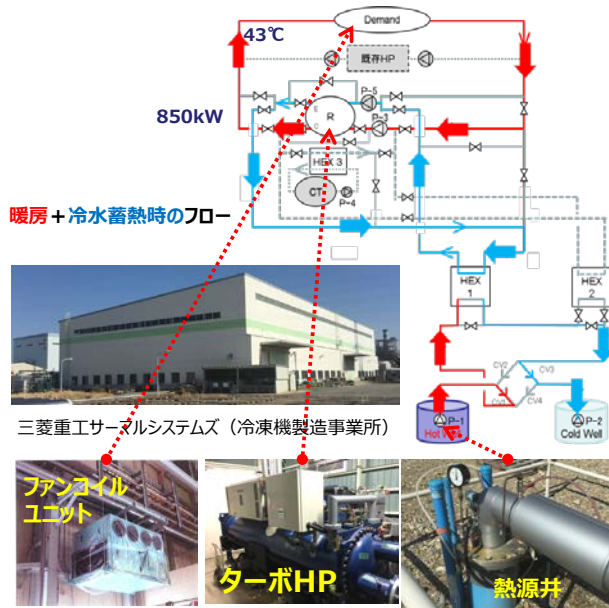


図 8 工場空調への適用 (実証試験)

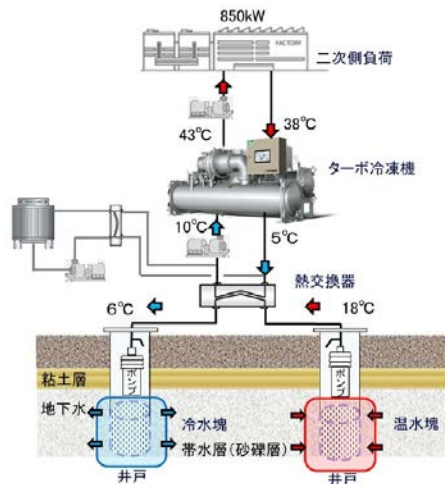


図 9 暖房運転 (文献 10) より引用

冬期夜間の外気温度が低い時、冷却塔を使って冷水を製造し蓄熱した。冷却塔は夏季の冷凍機の冷房能力に合わせた選定したため、外気湿球温度が 0°C 以上で冷却塔能力不足により冷却温度は上昇する。冬季に冷却塔による蓄熱分を増やすには、冷却塔の容量や冷却塔の運転条件の見直しが必要である。当然であるが、必要な動力は冷却水ポンプと冷却塔ファンだけなので、ヒートポンプの COP、システム COP が高くなった (図 10、図 11)。

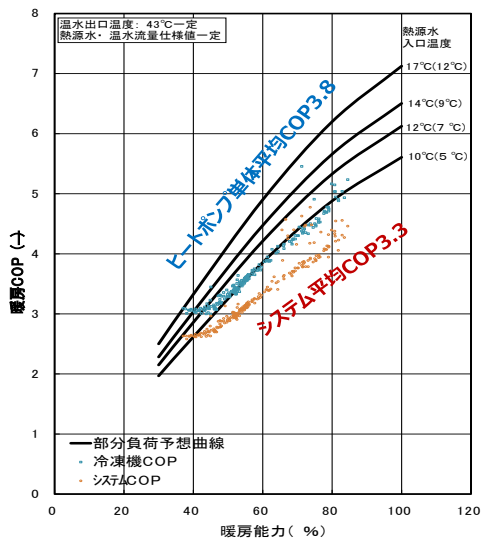


図 10 温水供給温度 43°C 及び井戸注水温度 6°C 到達後の暖房運転の 1 時間平均ターボ冷凍機単体 COP 及びシステム COP

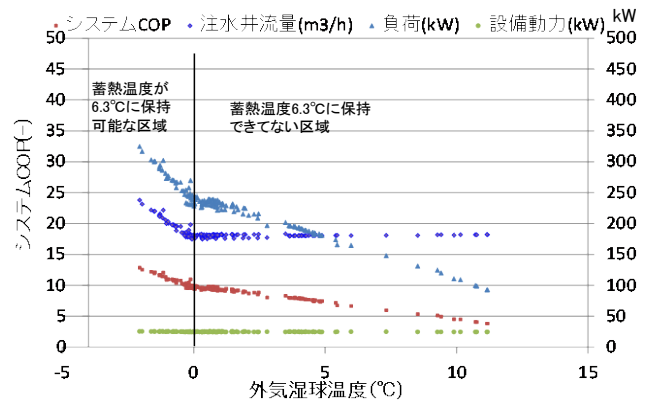


図 11 冬期の低外気温時の冷水蓄熱運転

2月からATESによる暖房運転の実証試験を開始したため夏期に使用する冷水蓄熱が不足する。そこで、夏期に使用する熱量を想定し、中間期に冷凍機を運転して不足分を賄った。中間期におけるターボ冷凍機の運転実績から、単体COPと部分負荷予想曲線との誤差は5%以内である(図12)。インバータターボ冷凍機の特徴である部分負荷時の効率の高さが活かされている。

冬期6°Cで蓄えた冷水を利用し、冷凍機を運転しないで直接工場負荷側に冷房供給した(図13)。冷水蓄冷完了から約1.5ヵ月経過した時点で冷水利用を始めたが、6°Cで貯めた地下水温度は約1.4°Cしか上昇していなかった。直接利用期間における地下水温度は7.4°Cから11.5°Cに上昇した。除湿が難しくなり、蒸し暑いとのクレームに応じ、一般に使われている冷却塔による冷却水利用を経て、熱源水利用に切替えた。この期間の平均システムCOPは48.3であった(図13)。

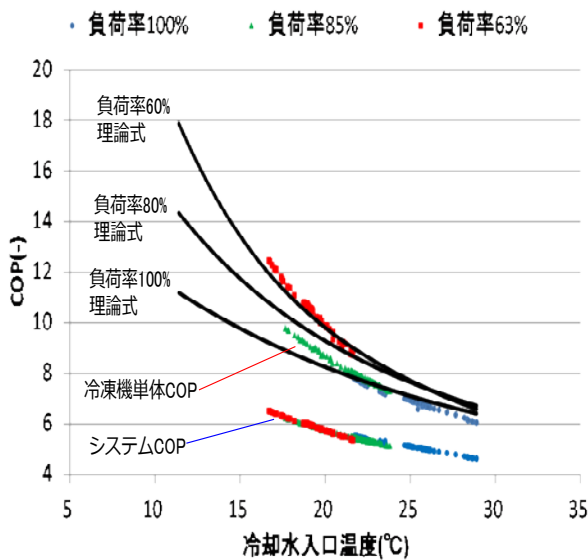


図12 中間期の冷凍機による蓄熱運転

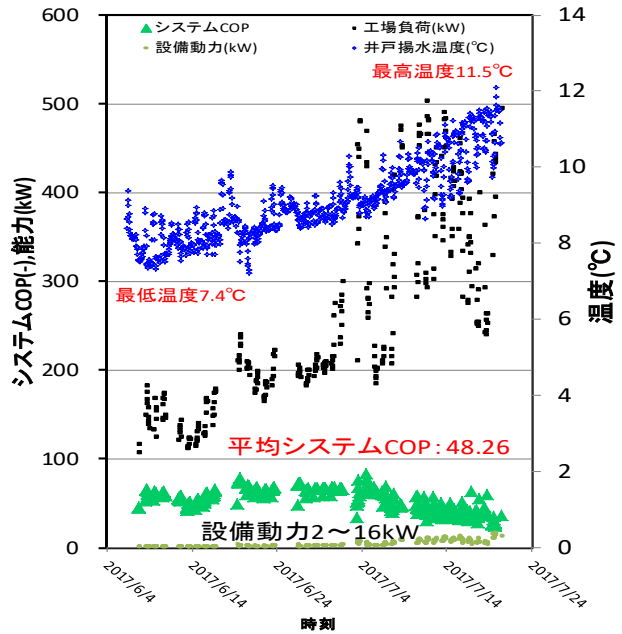


図13 夏期の低温地下水による冷房運転

揚水温度が上昇すると冷凍機は熱源水として揚水を利用(熱交換器を介して)するため冷却塔利用より高いCOPが得られる。このCOP向上効果を図14に示した。冷却水温が32°Cから20°Cに低下するのに伴い、冷却塔利用の場合COP5.4程度であるのに対し、揚水を熱源とした場合COP10程度に上昇した。

以上のように、冷房運転の高効率化を実証した。その他、ヒートアイランド対策として大気熱負荷を低減できた。

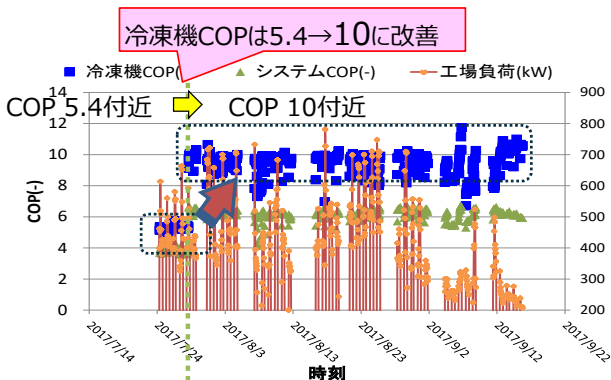


図14 夏期の冷凍機COP向上

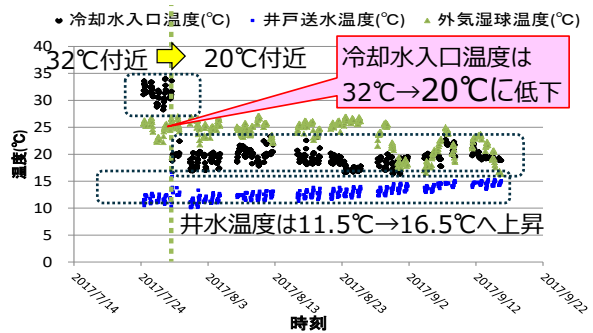


図15 夏期の井水・冷却水温度

5. 蓄熱設計運用技術

蓄熱設計のための与条件として蓄熱対象とする帯水層の厚さ、地下水流速、敷地の制約により決まる井戸間距離、揚

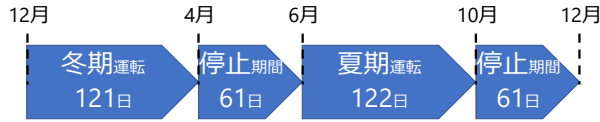


図 19 運転期間 (2 年間)

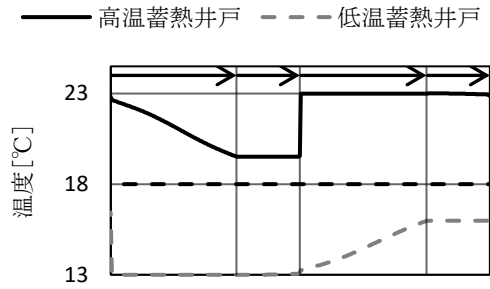


図 20 運転期間と井戸温度 (1 年間)

図 21 より井戸間距離が近い (100、150 m) とき、積算流量が大きいほど熱回収率が小さくなっている。これは積算流量の増大に対し、井戸間距離が小さく蓄熱塊同士が干渉しているためである。高温蓄熱塊と低温蓄熱塊の蓄熱半径は積算流量 30 万 m^3 のときそれぞれ 114 m である。図 21 より干渉が起こらない井戸間距離は 150m から 200m の間であり 228m より小さい。これは片方の井戸が蓄熱して蓄熱塊が広がっているとき、他方の井戸は揚水し蓄熱塊が縮小しているからである。

図 22 において、井戸間距離が小さいとき平行配置の方が直交配置と比較して熱回収率が大きい。これは上流側にある蓄熱塊は下流の蓄熱塊が遠くなる方向に流れ、受ける影響が少なくなったことが原因と考えられる。逆に井戸間距離が大きくなると直交配置の方が平行配置よりも熱回収率が僅かに高いことが分かる。詳しくは、文献 11) を参照されたい。なお式 2、式 3 に注水半径と蓄熱半径の定義式を示し、表 2 にうめきた地区における積算流量と注水半径、蓄熱半径を示す。

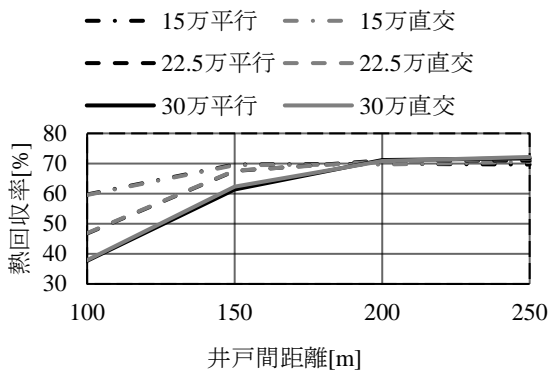


図 21 地下水流速 0 m/y, 2 年目夏期運転終了時の熱回収率

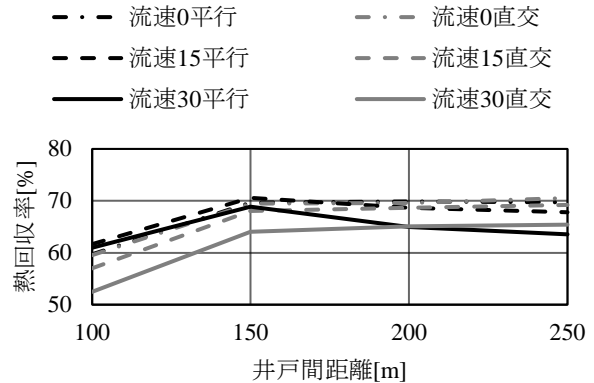


図 22 積算流量 15 万 m^3 , 2 年目夏期運転終了時の熱回収率

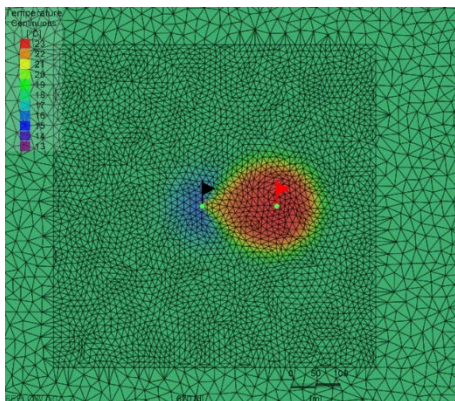


図 23 平面温度プロフィール (積算流量 30 万 m^3 、井戸間距離 150m、2 年目夏期運転終了時)

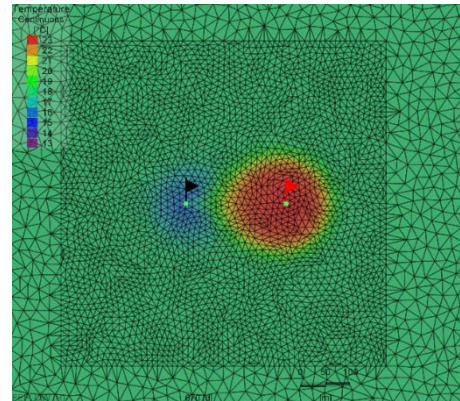


図 24 平面温度プロフィール (積算流量 30 万 m^3 、井戸間距離 200m、2 年目夏期運転終了時)

$$R_h = \sqrt{\frac{V_{in}}{n\pi L}} \quad \text{式 1}$$

$$R_{th} = \sqrt{\frac{c_w \rho_w V_{in}}{c_{aq} \rho_{aq} \pi L}} = \sqrt{\frac{n c_w \rho_w}{c_{aq} \rho_{aq}}} R_h \quad \text{式 2}$$

- R_h : 注水半径[m] n : 間隙率[-]
 R_{th} : 蓄熱半径[m] V_{in} : 積算還水量 [m³]
 L : スクリーン長帯水層厚[m]
 c_w : 水比熱[kJ/kg/K]
 ρ_w : 水密度[kg/m³]
 c_{aq} : 不透水層比熱[kJ/kg/K]
 ρ_{aq} : 不透水層密度[kg/m³]

表 2 各積算流量における還水・蓄熱半径 (うめきたの帯水層 Dg2)

積算流量[万 m ³]	還水半径 [m]	蓄熱半径 [m]
15	126.2	80.7
22.5	154.5	98.9
30	178.4	114.2

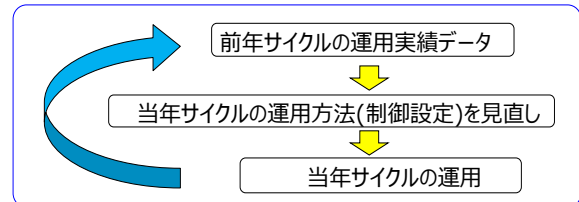


図 25 年間サイクルの運用結果を翌年にフィードバックする運用手法

5.2 帯水層蓄熱の長期安定運用性

ATES を都市部で普及させるには長期にわたり安定的に蓄熱利用するため帯水層の年間熱収支が平衡することや、各井戸の蓄熱域の平衡維持が必要である。これらの条件を満足するため、筆者らは環境省の実証試験事業において図 25 のような運用手法を検討している。前年の運用方法の結果を評価して翌年の運用方法を見直す方法である。

熱平衡と積算流量平衡を同時に満足させるために、運用上 3 つのパラメータが操作可能である (図 26)。与えられた空調負荷に対し、積算流量や年間熱収支を制御するため、冬期冷却塔蓄熱の制御設定値、冬期低温井戸への還水温度設定値、夏期高温井戸への還水温度設定値を操作する。長期安定運用制御方法開発の第一ステップとして冬期の冷却塔蓄熱により熱収支が平衡していることを前提に、冬期と夏期の還水温度設定値をパラメータとして積算流量を平衡させる方法を示した。またその有効性をシミュレーションにより明らかにした¹²⁾。なお、冷却塔蓄熱による操作に関しては、今後検討予定である。

①冬期、非空調時、冷却塔 (または冷凍機による) 低温蓄熱の制御設定値の変更

外気湿球温度 < 外気湿球温度設定値 ⇒ 冷却塔または高効率冷凍機運転
 外気湿球温度 > 外気湿球温度設定値 ⇒ 冷却塔および高効率冷凍機停止

各シーズンごとの積算流量収支平衡

②冬期、低温井戸への還水温度設定値の変更

・還水温度設定値を上げる(下げる)

各シーズンごとの熱収支平衡

③夏期、高温井戸への還水温度設定値の変更

・還水温度設定値を上げる(下げる)

低炭素化効果の最大化

(破線部: 検討予定)

図 26 長期安定運用のための操作パラメータ

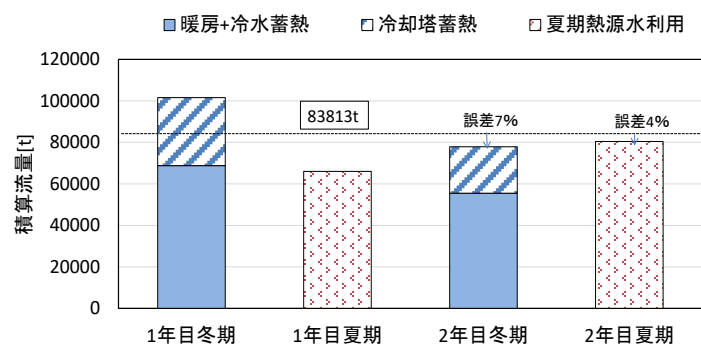


図 27 積算流量平衡の制御効果 (2 年目は還水温度操作により積算流量平衡を制御)

6. 地盤沈下回避技術^{13), 14)}

過去の地盤沈下の経験を踏まえて、国内の大都市部は揚水規制が導入されている。規制緩和を提案するためには、1 時間 100 トン規模の揚水・還水を実施しても沈下しない地盤条件を明らかにすることが必要である。

ATES において、水位変動の全量を還元 (還水) すれば、年平均地下水位は一定である。しかし、新潟県魚沼市のように年平均地下水位は一定であっても、年一サイクルの周期的な水位変動により地盤沈下が生じた事例があるので、揚水量を全量還元するだけでは沈下しないとは言えない。粘土層や蓄熱対象の帯水層を含む地盤構造と沈下の関係が明らか

にされつつあり^{13),14)}、水位変動を所定の範囲に抑制できれば沈下が観測できないレベルになることが期待される。

揚水に伴い被圧帯水層の水位は低下する。この水位低下が粘土層の有効応力を増加させるメカニズムとうめきたの地層構造を図 28 に示す。被圧帯水層の季節ごとの揚水、注水に応じて上下の粘土層が沈下、膨張を繰り返す。

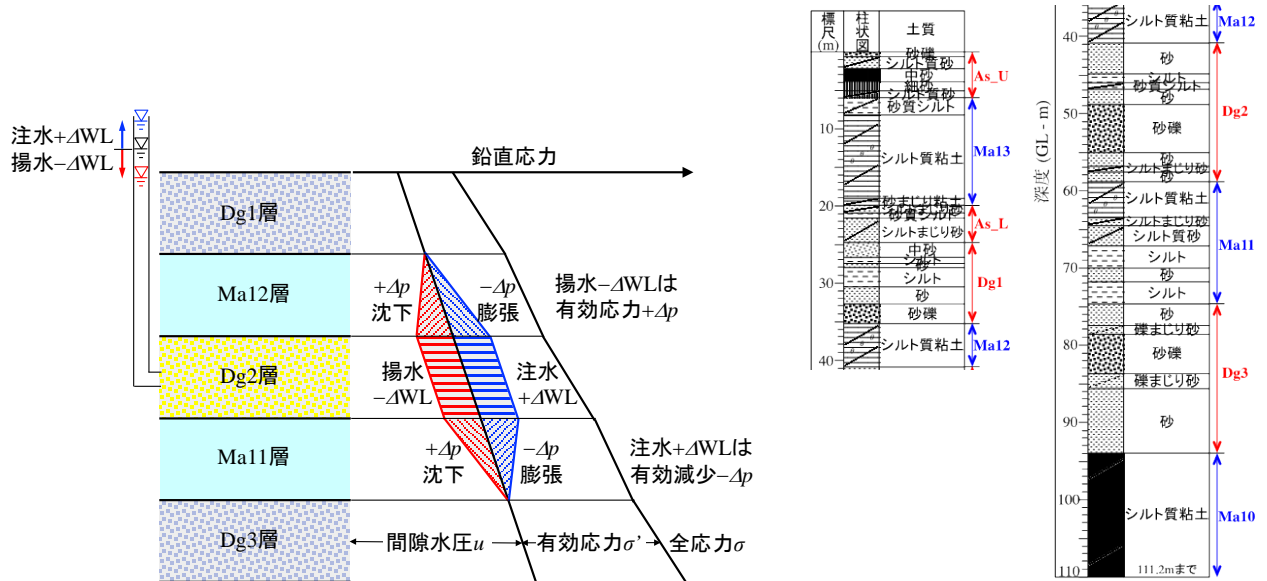


図 28 被圧帯水層の水位低下による粘土層の有効応力増加 (提供：大阪市立大学大島明彦教授)

うめきたの沖積、洪積粘土層の繰返し圧密試験結果を紹介する。

熱源井からの揚水・注水(季節間利用)による地下水位変動による繰返し荷重が圧密挙動に与える影響を調べるために、Ma13~Ma10層に対して6ケース(各ケース8供試体、計48個)の繰返し圧密試験を実施している(空圧式の全自動圧密試験装置を使用)。繰返し载荷時間60分(载荷30分、除荷30分)。繰返し回数100回である。

うめきたの繰返し圧密による圧縮曲線の例を図 29 に引用して示す。

Case4 (Ma12下部) のひずみ ϵ - $\log p$ 関係を示す。 ϵ は有効土被り圧 p_0 時を原点としている。

図には段階载荷圧密試験の ϵ - $\log p$ 関係も重ねて示している。繰返し荷重幅が大きいほど、ひずみ ϵ が蓄積していくことがわかる。

粘土層全体の沈下量は次の方法で求めている。

圧密試験サンプルの深度が中央になるように n 個の層に分割する。粘土層の上・下面の帯水層の水位低下後の有効応力分布と現状の有効土被り圧 p_0 から分割層中央の有効応力増加 Δp を求める。繰返し圧密試験の地下水位低下による有効応力増加とひずみ ϵ の関係から、 Δp に対するひずみ ϵ_i を求める。各分割層の沈下量 $\Delta S_i = \Delta H_i \times \epsilon_i$ から、粘土層全体の沈下量 $S_t = \sum S_i$ を求める。

図 30 は繰返し圧密挙動を考慮した沈下量を、図 31 は静的地下水位低下時と繰返し時の沈下量比較結果を示したものである。±10m までは繰返しと静的沈下量は大きく異なるが、±12.5m 以上となると繰返しの沈下量は大きくなるが示されている。繰返しサイクル(年)100で沈下量5cmを許容すると、Dg2層の地下水位変動量許容値は±10m、許容沈下量を1cmとすると±2.5mとなる。

沈下量を評価するサイクル(年)数については建物の耐用年数を考慮して設定すべきであろう。うめきたにおいてはDg2層を蓄熱利用する際、水位変動を±2.5mにできれば、沈下を懸念しなくて良いと言えよう。

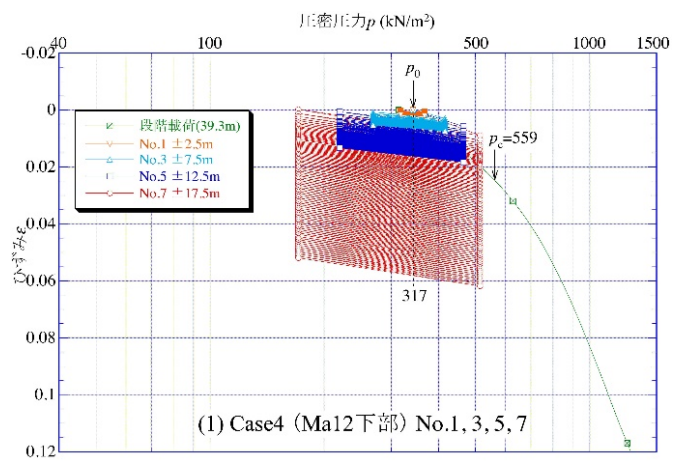


図 29 うめきた繰返し圧密による圧縮曲線の例

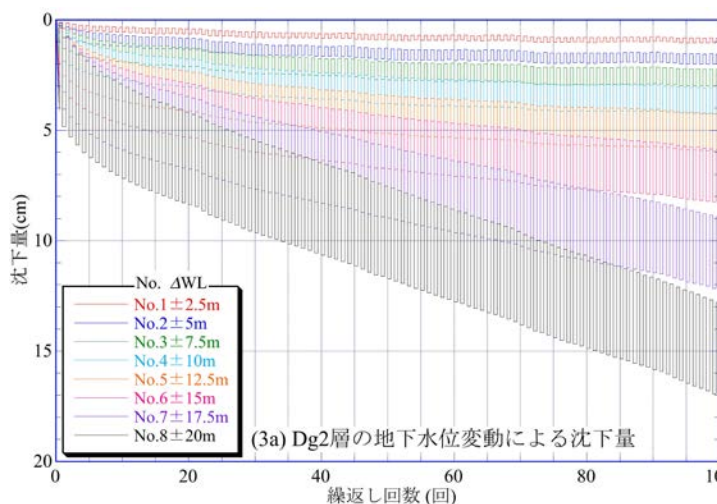


図30 繰返し圧密挙動を考慮した沈下量

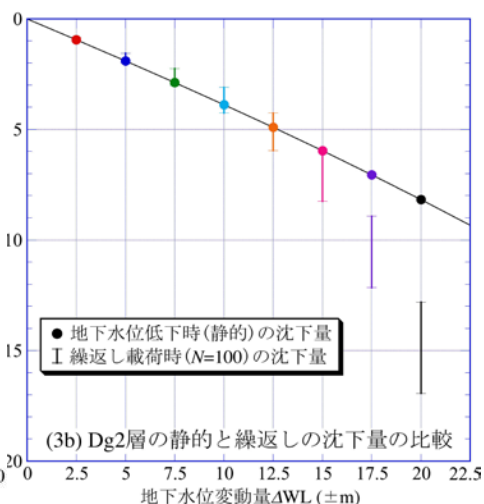


図31 静的地下水水位低下時と繰返し時の沈下量比較

7. 帯水層蓄熱の普及へ向けて

7.1 規制緩和の動向

国内の地下水揚水規制実態については桂木¹⁵⁾らによる調査研究がある。桂木らは全国の各自治体が制定している地下水の採取に係わる条例を調査して、市町村毎にATESシステムの適応性の判定を行っている。その結果、全世帯の半数以上においてATES導入時には社会システムによって制約を受ける現状を明らかにしている。制約を受ける地域は、主に3大都市圏とその周辺に集中しており、地盤沈下対策として浅層地下水の採取を厳しく制限している。3大都市圏とその周辺以外の地域においても、宮城県、新潟県、長野県、山梨県、石川県、佐賀県、長崎県および熊本県の8県の23自治体において「導入困難」と判定している。この調査研究により、現状の地下水揚水規制下では都市部での普及が困難であることは明らかである。

平成30年8月、大阪府は内閣府に対してATES利用の普及に向けた国家戦略特区の規制緩和提案を行った¹⁶⁾。産学官連携により持続可能な地下水利用技術としてATES利用技術が開発され、大阪府域において実証を行い、省エネルギー、省CO2効果等と地盤沈下防止効果が確認されたことから、当該技術を許可できる特例措置を求めたものである。

平成31年2月、大阪府は環境省に対して、大阪府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を環境省へ報告した。この報告の内容が、現在、国が検討している地下水の市街地における利用に係る規制緩和に活かされることで、ATES利用技術の普及に向けたルール化が期待される。

大阪府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の概要は次のとおりである（大阪府環境局のホームページを引用）。

- (1) うめきた地区で実施した実証実験の結果、帯水層蓄熱利用システムは、汲み上げた地下水から熱のみを採りだした後、全量を元の地層に還元するため、長期間の連続運転においても地盤沈下は生じなかった。
- (2) 大阪府域の規制地域内は一定の弾性があり、帯水層蓄熱が地盤に与える力は、これに比べて十分に小さいことから、建物の空調用に利用する限り、ATESは、大阪府の地下水採取規制区域の全域で、地盤沈下を生じることなく利用できる。今後、立証に向けたさらなる検討が必要。
- (3) 技術開発・実証事業の成果に基づき、帯水層蓄熱利用システムを適正に利用するために必要となる設備・構造に係る要求事項や設計上の留意事項及びシステムの運用中のモニタリングについてとりまとめた。
 - ① 帯水層蓄熱利用システムの設備・構造に係る要求事項等
 - ・地盤沈下の防止のため、熱源井による地下水の汲み上げと還元を行う地層は、同一の帯水層とすること等により、当該地域の平均的な地下水水位を維持すること
 - ・地下水の水質変化を防止するため、大気との接触を避け気密を維持する等の構造とすること
 - ② 帯水層蓄熱利用システムの維持管理に係る要求事項
 - ・CO2排出量削減効果等を把握するため、地下水から採り出した熱量及びシステム自身が消費するエネルギーを監視

すること

- ・地下水・地盤環境に与える負荷や影響を把握するため、地下水を汲み上げ、地下に還元した量、地下水の水位、水質、地盤の高さを監視すること

7.2 ポテンシャルマップの整備

大阪市は、市域の地中に大きな再生可能エネルギーが存在していることを周知し、このエネルギーの利活用の実現に向けた機運を高めるため、帯水層蓄熱情報マップを作成した。地図情報サイト「マップナビおおさか」上で閲覧できる。上町台地より西の臨海部でポテンシャルが高いことが示されている。

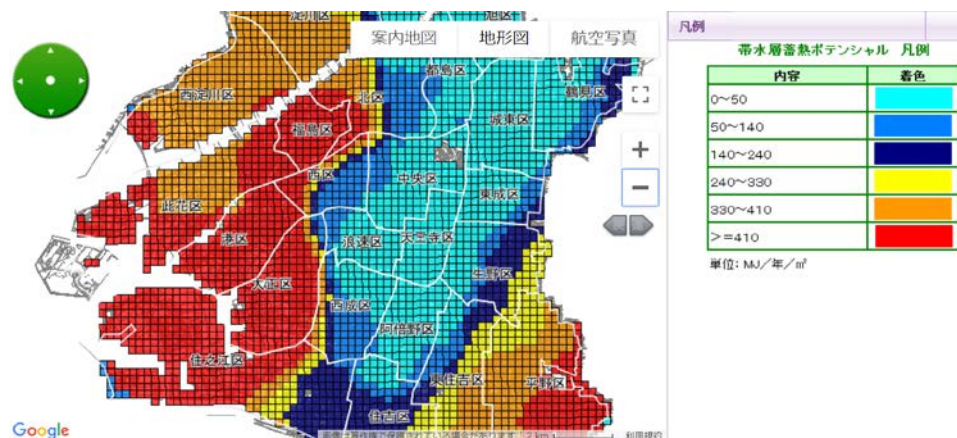


図 32 帯水層蓄熱情報マップ

8. 蓄熱都市の実現へ向けて

熱利用可能な帯水層を足元を持つ大阪市のような都市において、長期蓄熱により都市域全域の空調用エネルギー消費を削減し、短期蓄熱により、不安定電力の変動吸収などが可能となる。しかし、生態系への影響、水質変化など個々の調査成果はあるが、地下水学、地盤工学、生態学、熱エネルギー工学など多くの分野で得られた知見を総合化できていない。環境省の水・大気環境局がとりまとめた「地中熱利用にあたってのガイドライン 改訂増補版」¹⁷⁾は地中熱利用に伴う地盤への熱影響や地下微生物への影響に関する新たな知見を追加したもので、総合化へ向けた取り組みといえよう。しかし、熱的環境影響に対する見解は比較的小規模な熱利用を前提としたものであり、今後大規模な熱利用に対応するガイドラインの改定が必要となる。さらに、海外の先進事例も参考に、法的な環境整備が望まれる。

謝辞

本報告で説明した三菱重工業高砂製作所内における実証成果は、平成 27～29 年度の環境省 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の「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」（代表 関西電力株式会社）の実施により得られたものである。また 5 章は関西電力と大阪市立大学の共同研究で得られたものである。

6 章は文献 13)、14)からの引用に負う。記して著者に感謝する。

参考文献・引用文献

国内の既往研究の例

- 1) 落藤 澄、池永 義啓、中村 真人[他]、帯水層の蓄熱効果に関する長期測定とその考察、空気調和・衛生工学会 論文集 17(50)、53-61、1992
- 2) 横山 孝男、梅宮 弘道、寺岡 達夫、帯水層を用いた季節的蓄熱利用、日本機械学会論文集 B 編 46(402)、p322-330、1980-02
- 3) 黄 錫鎬、大岡 龍三、南 有鎮 [他]、地中熱空調システムのための地中採・放熱量予測モデルの開発：第 1 報-モデルの構築と簡易な土壌物性値推定法の提案、空気調和・衛生工学会 論文集 31(108)、1-10、2006

- 4) 中村 慎, 清水 孝昭, 樋口 祥明 [他], 都市部における帯水層蓄熱計画時の地盤調査法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 67(560), 23-30, 2002
- 5) 中村 慎, 山岡 正洋, 樋口 祥明 [他], モデルビルにおける省エネルギー効果と経済性: 敷地内帯水層蓄熱システムに関する研究(その2), 日本建築学会計画系論文集 67(554), 41-46, 2002

海外の導入事例

- 6) Burkhard Sanner, Underground Thermal Energy Storage for the German Parliament in Berlin, System Concept and Operational Experiences Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005
- 7) I. Wigstrand, The ATES project - a sustainable solution for Stockholm-Arlanda airport, Proceedings Effstock 2009 - The 11th International Conference on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability, Stockholm, Sweden, 14-17 June 2009, Session 6.3, paper 55

井戸構築技術

- 8) 中曾 康壽[他], 帯水層蓄熱空調システムの普及に向けた研究開発(第1報) 都市域での利用を目指した揚水・還水切替型熱源井の開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 197-200, 2017年9月

実証事例

- 9) 坂井正頌[他], 帯水層蓄熱空調システムの普及に向けた研究開発(第3報) 試験設備概要と試験パターン概要, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 205-208, 2017年9月
- 10) 坂井 正頌, 崔 林日, 淵本 剛[他], 大規模再生可能エネルギー利用 帯水層蓄熱ターボ冷凍機システム, 三菱重工技報 Vol.54 No.2 (2017) 冷熱特集

蓄熱設計運用技術

- 11) 中谷公亮, 西岡真稔, 鍋島美奈子, 中尾正喜, 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究(第3報) 地下水流速, 井戸配置, 積算流量が熱回収率に与える影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2019年9月, 予定
- 12) 竹口智也, 西岡 真稔, 鍋島 美奈子, 中尾正喜, 中曾康壽, 空調利用を目的とした帯水層蓄熱の研究, (第4報) 夏期・冬期の蓄熱量・流量を平衡させる運用方法の検討, 第48回近畿支部学術研究発表会, A-83, 2019年3月

地盤沈下

- 13) 末吉拳一・大島昭彦・小坂慎一・久保田耕司・笹尾憲一: うめきた粘土層の地下水位変動による繰返し圧密挙動と沈下量予測, Kansai Geo-Symposium 2017, pp.108-113, 2017.
- 14) 天満脩平・大島昭彦・末吉拳一・久保田耕司・笹尾憲一: 地下水位変動を受ける洪積粘土層の繰返し圧密特性を考慮した沈下予測, Kansai Geo-Symposium 2018, pp.55-60, 2018.

規制緩和

- 15) 桂木聖彦, 藤井光, 黒沼覚, 井上純, 山谷睦, 沼澤喜一. 日本国内における帯水層蓄熱普及に向けた社会システム調査. 日本地熱学会誌 40, no. 3 (2018年): 193-206.
- 16) 大阪市環境局環境施策部, <https://www.city.osaka.lg.jp/hodoshiryu/kankyo/0000460546.html> (参照2019年5月31日)
- 17) 地中熱利用にあたってのガイドライン 改訂増補版, 環境省, 水・大気環境局, 2018年3月