

都市域への導入を目指した帯水層蓄熱システムの研究開発

Research and development of Aquifer Thermal Energy Storage System for Urban Area

大阪市立大学複合先端研究機構、大阪市立大学大学院工学研究科

The Osaka City University, Advanced Research Institute for Natural Science and Technology

中曾康壽 博士(工学)、中尾正喜 博士(工学)、西岡真稔 博士(工学)

Yasuhisa Nakaso, Dr. ENG, Masaki Nakao, Dr. ENG, Masatoshi Nishioka Dr. ENG

キーワード：帯水層蓄熱(Aquifer Thermal Energy Storage)、地盤沈下(Land Subsidence)、地下水涵養(Groundwater recharge)、目詰まり(Well Clogging)

1. はじめに

2018年7月3日に発表された国のエネルギー基本計画における再生可能エネルギーへの取組みについては、『主力電源とするため、低コスト化、電力を電力系統に流す時に発生する「系統制約」の克服、不安定な太陽光発電などの出力をカバーするための「調整力」の確保に取り組む。』とあり、需給調整に加え蓄電池の導入などを奨励している。しかし、これらの記述はすべて電気利用に限られており、かつリアルタイムプライシングなどの積極的な経済的手法の推進や再生可能熱エネルギーの活用について、積極的には触れられていない。

筆者らは2015年から環境省の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」事業において、臨海都市域を対象に地盤沈下影響の軽減に配慮した全量還水可能な切替え型熱源井の開発を主軸に、採算性が確保できる能力200RT(700kW)、揚水・還水量100m³/hのシステムを構築、兵庫県高砂地区(熱源含む)で約1年半、大阪うめきた地区(熱源井のみ)で約2年半にわたる運用と性能検証を行ない、実用規模での利用に一定の目途を付けることができた。

本システムは、わが国のエネルギー需要の約3割を占める建築分野における制御可能な再生可能エネルギー源として最終需要が熱となる建物の足下にある帯水層を活用するものであり、かつ季節間、昼夜間蓄熱とも約8割の熱回収が可能なエネルギー貯蔵システムでもある。低価格大容量の蓄熱が可能のため、再生可能エネルギー電源の硬直的な料金制度が改善されれば、「調整力」として同電源の余剰電力も受入れすることで、一層の普及貢献に資すると考える。

なお、わが国で最初に地下水の揚水規制を開始し、本事業の共同実施も進めている大阪市では、この成果を受け、2018年8月17日、内閣府に国家戦略特区における新たな特例措置に係る提案として「帯水層蓄熱利用の普及に向けた国家戦略特区の規制緩和提案」を行っている。

2. 帯水層蓄熱システムとその現状

エネルギー需要の大きな大都市の多くは沖積平野や堆積盆地に位置するが、これらの地域では帯水層が発達していることが多い。この帯水層にある地下水の温度は、年間を通じて年平均気温+1~2℃であり、これをヒートポンプの熱源として利用すれば、省エネルギーに有効である。また臨海部では一般的に地下水流れが遅いことから、季節間にわたる蓄熱利用も可能であり、投入した熱量の8割程度が回収できるだけでなく、夏冬で熱需要のデマンドが逆転することから、さらなる省エネルギー効果が期待できる。

ただしわが国では、戦後の高度成長期に大量の地下水揚水を行った結果、地下水位の低下から粘土層の圧密沈下による地盤

沈下を引き起こし、都市インフラに甚大な被害を生じたため、大阪市を含め現在でも厳しい揚水規制が続いている。地下水の熱源利用を考える際、熱利用後の地下水の還水は、地盤沈下防止の観点から特に重要であるが、計画地点の水質に左右され、井戸の目詰まりを招くことが多い。表-1に示すように、これまで様々な実験検証が行われたが、臨海都市域において実用規模として100m³/hクラス(200RT相当)のシステムの実用化は困難であった。

表-1 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、pp32-43、2000.

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

地下水涵養のための注水実験が多数、実施されているが、ほとんどが注水井戸に目詰まりを生じ、短期間の実施に終わっている

3. 井戸の目詰まりの原因

筆者らは、標記事業の着手に当たり、国内外の実績を徹底調査し、実用規模の揚水・還元型大容量熱源井を実現するための必要要件について検討を行った。その課題は、井戸の目詰まり防止と長期間の安定運用の実現にあり、概ね、以下4点の対策が必要である。

①地下水の化学反応による固形物の生成と目詰まり

これまでわが国でも、地下水の水質分析は行われていたが、適切に還元を行うため分析指標としては、あまり意識されてこなかった。地域により相違はあるが、地下数10m以深では、土中の金属や有機物等の酸化により地下水は還元状態にあるが、この地下水を不用意に揚水し大気に接触させると、酸化が進み水酸化第二鉄などフロック状の固形物が生成される。これを還元井に戻せばたちまち目詰まりが生じる。地下水の還元には井戸を密閉構造にすべきとの認識も一部にはあるが、気密維持のための技術基準等は必ずしも明らかではなかった。



図-1 放置した地下水の状況

②水質の異なる地下水を混合することによる微生物環境の改変と目詰まり

①とも共通する課題であるが、酸化した地下水を不用意に還元することで、ガリオネラや鉄バクテリアなどの育成環境を還元井や隣接する帯水層に生じさせ、その結果、帯水層やスクリーンの目詰まりにつながる(図-2にイメージ図を示す。内容については今後精査したい)。また、採水量を確保するためにマルチスクリーンとすることもあり、一般的に各帯水層の水頭が異なることから、恒常的に地下水混合が生じ、化学変化等による目詰まりが進展する。マルチスクリーンは、恒常的な横流を生じ、地下水位の変動をもたらすので、沈下抑制の観点からも問題がある。

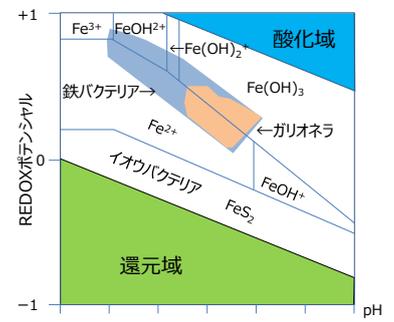


図-2 地下水と微生物等の育成環境(イメージ図)

③井戸の仕上げが不十分なまま揚水を開始することで起こる細粒分による目詰まり

もともと帯水層中には細粒分が含まれているが、熱源井を構築後、十分な洗浄を行わず運用を始めるため、細粒分が井戸の孔壁部分に集中し目詰まりを生じる。特に掘削工法にもよるが、ベントナイト等が帯水層中に詰まり(マッドスキン)、それを起点に目詰まりが進む。井戸はその構造上、放射状流れとなり、孔壁近傍の地下水流速が最も高くなるため、細粒の架橋などを起点に目詰まりが進む。特に①②の対策が不十分な場合は、これらと相俟って深刻な目詰まりにつながる。

④地下水の圧力開放による気泡の発生や水質変化による目詰まり

一般的に被圧帯水層の地下水は加圧状態にあるが、大気開放することでメタンやCO₂などの気泡が発生し、そのまま還元すれば目詰まりにつながる。また、CO₂の脱気により地下水のpHが変化し、炭酸カルシウムなどのスケールが沈着する恐れもある。pHの変化は、微生物の育成環境などにも影響する。

4. 帯水層蓄熱システムの構築

先に上げた目詰まりの原因の回避のため、確実にこれ等の支障を回避することを念頭に以下の対策を実施した。これまで2年半の運用を経ているが、水質に起因する目詰まりによる支障はない。以下の構成例は、あくまで一例を示すものであって、その採択は事業者の判断による。

ただし、被圧帯水層の利用と不透水層のシールは確実に実施する必要があるが、必要揚水量確保と確実な施工を行うためには、必要掘削径(<500mmΦ)の確保は必要と考える。なお、厚生労働省の水道施設設計指針2012においても100m³/h程度の揚水量のケーシング径は300mmとされている。



図-3 熱源井の概観(大阪うめきた地区)

(1) 井戸の仕様

利用する地下水は、被圧帯水層に限り、その水質(基本的に還元状態)を確認する。熱源井まわりの気密構造を実現するために井戸蓋はパッキンを入れボルト締めにするのみならず、還水井内に設けた注水弁により地下水系統全体の圧力制御を行い、常時、加圧状態に保つが、これは溶存ガスの気化防止と配管の接続部分からの空気の漏れ込み未防止策にもなっている。

井戸の掘削深度は高砂地区で75m、うめきた地区で60m、スクリーン長はそれぞれ20m、10mで、口径は共に600mmΦ、ケーシング径を300mmとしているが、これは100m³/hを揚水するポンプの収まりとフィルター層の厚み(150mm)の確保、および不透水層の確実なシールをするために採用した口径である。大口径とすることにより、孔壁部の流入流速を抑え、細粒による目詰まりの抑制を狙っている。因みに最大揚水量は、さまざまな決定方法が提案されているが、ここでは揚水量を孔壁において地山の透水係数k[cm/s]の2倍に相当する量以下に留めるよう運用している。

(2) 熱源井構築時の留意点

掘削工事において帯水層に掘削泥をなるべく押し込まないように、海外では揚水井の掘削に良く用いられるリバースサーキュレーション法を適用するため、新たにボーリングマシンの開発を行った。この方法では、掘削泥の混入はあるものの切羽位置の情報を的確に把握できる。今回開発したボーリングマシンの揚泥管の内径は125mmΦあり、仮に100mの深度を掘削中でも、揚泥管内の容積は高々1m³であるため、採水可能な帯水層の位置を確実に把握でき、適切な位置にスクリーンを設置できた。

また、削孔の保護には極力ベントナイトは使わず、掘削液の粘度維持にはポリマーを使い、掘削泥の分散性の確保のためにpH(>8.0)の管理も行った。削孔の保護は、ガイドパイプを建込み、常にGL+1mに水位を保つよう、供給量を確認しつつ外部から補給水を供給した。井戸の掘削後、直ちにケーシングを建込み、フィルターグラベルを投入、不透水層部分の膨張性粘土による封止を直ちに行う。



泥水循環配管の接続



ボーリングマシンの設置調整



掘削と掘削土のサンプリング

図-4 大阪うめきた地区における熱源井の掘削とその準備状況

(3) 井戸の仕上げ

ケーシングの吊り込み、フィルターの投入と膨張性粘土によるシールが終わり次第、洗浄を開始する。段階揚水に続き、エアサージング、セクション洗浄など、1週間程度を掛け洗浄を行うが、洗浄以降は最大流量を超えないよう、運用に留意する。



洗浄作業の準備



洗浄排水と排水タンク



デベロップメント時の排水と排水処理



排砂状況の確認

図-5 熱源井の洗浄作業とその準備状況

5. 実証事業とその成果

(1) 熱源井

熱源井については高砂で1年半約7万m³の揚水・還水を行ったが、目立った目詰まりは進展しなかった。うめきたで2年半の運用の後半、地盤沈下の影響を確認するため4か月にわたる100m³/hの連続最大流量運転と、その後に起きた震度6弱の北摂地震でも運転を継続したため合計で約50万m³の揚水・還水を行った時点で、目詰まりが明らかになった。#1号井は掘削時に崩落の恐れに備えベントナイトを50kg投入、設置時100m³/hの揚水時2.1mの水位低下のところ2.7mに進展(比湧出量が7割程度に低下)した。そのため井戸の再洗浄を行ったところ、設置時

以上に透水性が回復(1.9m)した。#2号井は掘削後の水位低下は1.2mであり、#1号井のベントナイトによる元々の目詰まりが疑われるが、その経過については現在検証中である。

水質については、両地区とも被圧帯水層であるDg2の地下水には鉄分(約10mg/L)、塩分(～1,300mg/L)とも多く含まれており、大気中に放置すれば30分程度で茶色く変色し沈殿物が生じる。高砂地区については、工場移転の関係で昨年末に閉止したが、開放点検の結果からは、井戸孔内には鉄の酸化物の沈着は認められず、通常であれば塩分を嫌うステンレス製のプレート式熱交換器やその他、地下水系統の機構部品には目立った腐食は見られなかった。

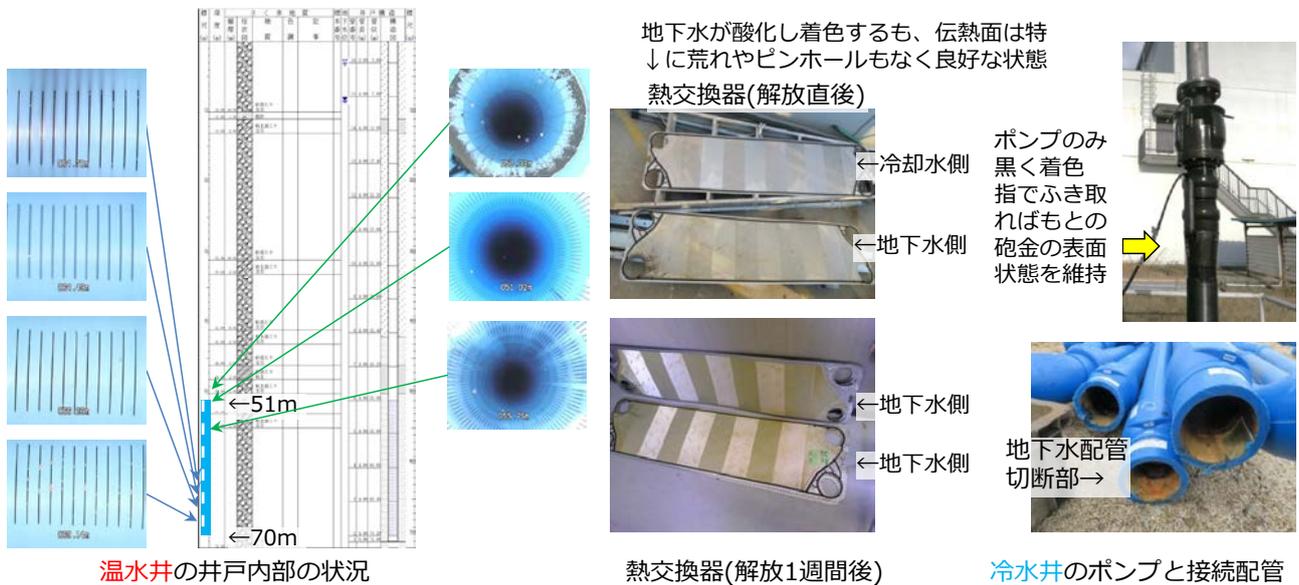


図-6 高砂地区における熱源井と地下水系統の分解点検結果

(2) 地盤沈下の影響評価

高砂地区では、熱源井の実現を第一に進めたため、地盤沈下に必要な粘土層のサンプルは十分に採取できなかった。一方、揚水規制地域であり、過去に地盤沈下を経験したうめきた地区ではGL-110mまでコアボーリングを行い、大阪市立大学にて圧密試験や水位低下に関わる沈下の影響評価を行った。一方、現地では最大100m³/hの揚水、揚水・還水試験を長期間行い、沈下の測量も行った。この結果、2～3mmの沈下や隆起が観測されたが、計測誤差も同程度であり、本システムの運用との関連も認められなかった。

(3) 熱源設備

高砂地区において、床面積4,040m²の工場建物を対象に最大揚水量100m³/hの熱源井1組で年間冷暖房可能な帯水層蓄熱システムを構築した。熱源機は新開発の冷暖房可能な低GWPターボヒートポンプで、そのスペックは図-7に示すとおりである。また、空調システム2次側は天吊型ファンコイルユニット冷)45kW/暖)40kW×16台の2管式冷暖切替えシステムである。

新開発インバーターボヒートポンプ
ETI-Z25 (冷暖房利用可)
 HFO-1233zd(E)低GWP冷媒
 ・45℃(0.192MPa(G))温水出力可能
 ・高圧ガス保安法対象外
 GWP(地球温暖化係数) = 1
 ODP(オゾン破壊係数) = 0

不燃

仕様	冷房	暖房	単位
能力	703.3	850	kW
供給条件	12→5	38→43	℃
供給流量	86.1	146.2	m ³ /h
熱源水条件	32→37	10→5	℃
熱源水流量	141.3	120.5	m ³ /h
電源電圧	3φ/400		V
INV入力	164	152	kW

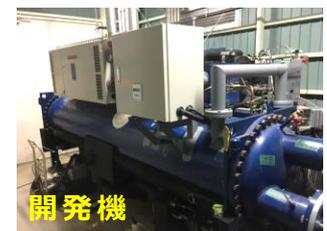


図-7 開発した熱源機

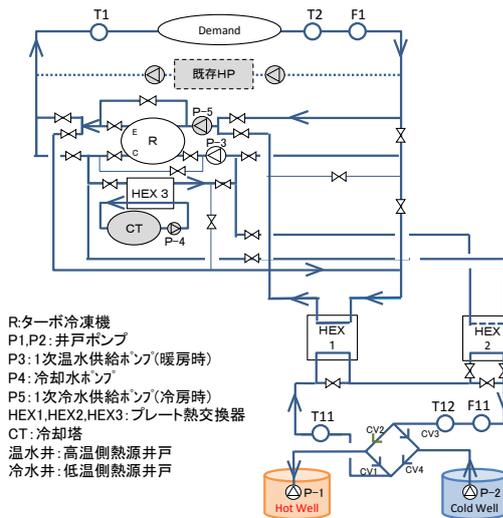


図-8 高砂地区での実証システム構成

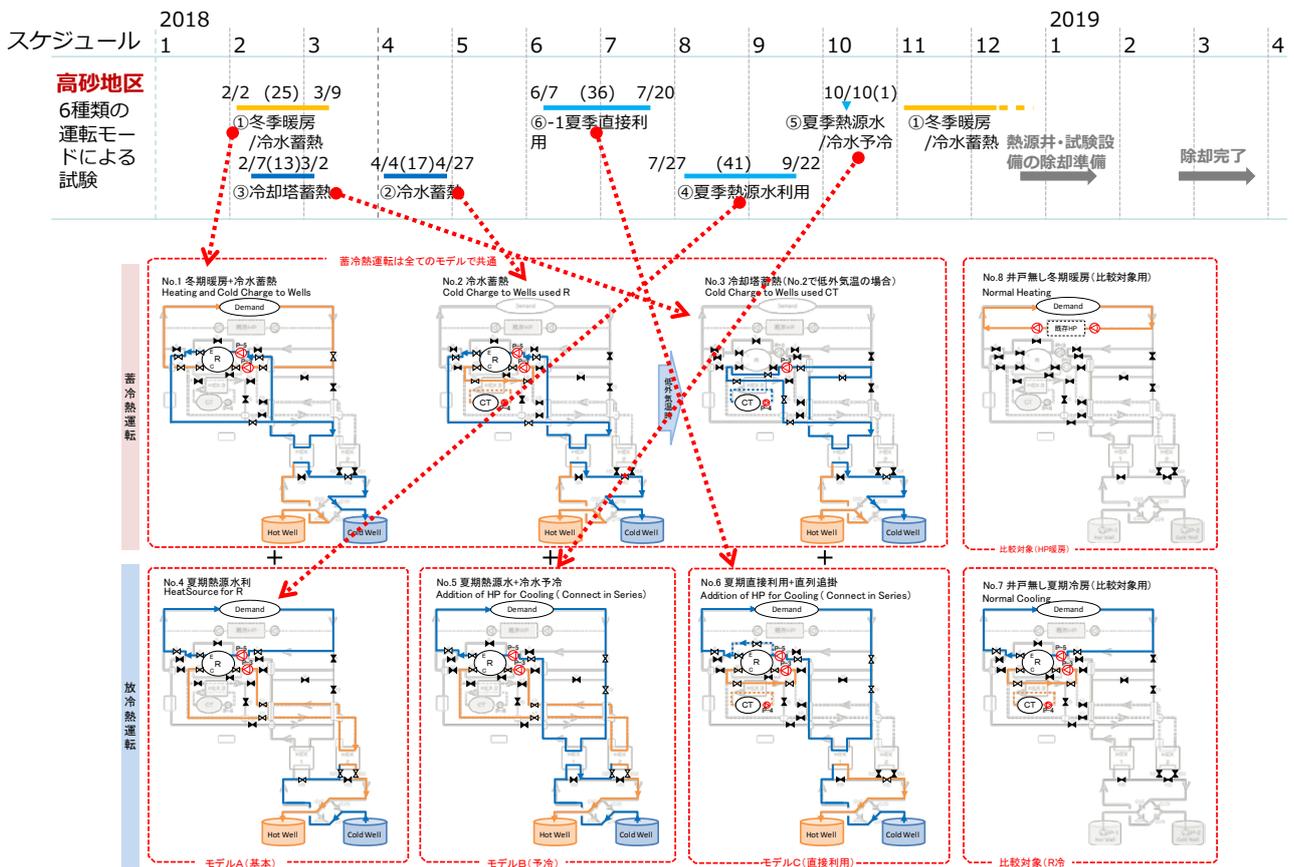


図-9 様々な運転モードと試験実証スケジュール

本実証事業では、季節ごとに様々な運用モードを検討し、システム構成を検討した。そして各季節ごとに適切な運転を行うべく、各モードのデータを収集した。次の図-10にこれらの実績をまとめているが、これとは別に開発した帯水層と熱源システムのシミュレーションモデルに基づき、今後、最適な運用方法の検討を進めていくこととしている。

1. 暖房期間中の冷凍機平均COPは3.8、平均システムCOPは3.3
2. 暖房時に同時に製造した冷水を蓄熱、冷房期間中に直接冷房に用いた場合(冷凍機は運転せず)の平均システムCOPは48.3
3. 冷房期間中に熱源水利用した時の冷凍機平均COPは9.4、平均システムCOPは6.1
4. 通年の冷暖房システムCOPは3.8となった。注)1kWh=0.0036GJ
各運転モードを適切な時期、適切な温度や流量で運用した場合は、更なる効率向上が期待できる。

項目	NO.1 冬季暖房+冷水蓄熱	NO.3 冷却塔蓄熱	NO.2 冷水蓄熱	NO.1 冬季暖房+冷水蓄熱	NO.6-1 夏季直接利用	NO.4 夏季熱源水利用	NO.5 夏季熱源水利用+予冷	合計
運転期間	2月2日～3月9日	2月7日～3月2日	4月4日～4月27日	12月8日～12月11日	6月7日～7月20日	7月27日～9月22日	10月10日	-
流れ方向	井戸2→井戸1			井戸1→井戸2				
実運転日数	25日	13日	17日	4日	36日	41日	1日	-
平均揚水温度[℃]	17.8	18.1	17.9	19.9	9.1	14.9	9.6	-
平均注水温度[℃]	6.5	6.4	6.4	13.5	17.6	22.7	19	-
積算井水流量2→1[m ³]	6,606	3,259	10,986	1,646	-	-	-	22,497
積算井水流量1→2[m ³]	-	-	-	-	10,011	20,441	145	30,598
工場負荷[kWh]	121,988	-	-	16,611	87,121	184,667	1,551	411,938
冷水蓄熱量[kWh]	90,652	35,555	148,583	13,302	-	-	-	288,092
温水蓄熱量[kWh]	-	-	-	-	98,389	207,108	1,160	306,657
冷凍機動力[kWh]	31,725	-	19,736	3,384	-	19,687	67	74,599
設備総動力[kWh]	36,695	4,125	30,688	4,294	1,805	30,060	133	107,800
冷凍機COP	3.8	-	-	4.9	-	9.4	16.1	-
冷房システムCOP	-	-	-	-	48.3	6.1	11.7	-
暖房システムCOP	3.3	-	-	3.9	-	-	-	-
冷房・暖房システムCOP	3.8							

冷房システムCOP:冷房工場負荷合計/(井戸ポンプP2+1次冷水供給ポンプP5(暖房時温水ポンプ)+冷却水ポンプP4+冷却塔)
暖房システムCOP:暖房工場負荷合計/(井戸ポンプP1+1次温水供給ポンプP3(冷房時冷却水ポンプ)+冷却水ポンプP4+冷却塔)

1. 冬季暖房+冷水蓄熱、冷却塔蓄熱、冷水蓄熱による冷水総蓄熱量は1037.0GJ
2. 夏期直接利用と夏季熱源水利用で払い出した温水蓄熱量の合計は1104.0GJ。

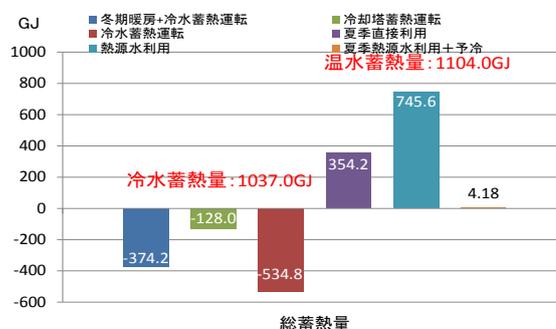


図-10 様々な運転モードによるシステム性能

7. おわりに - 帯水層蓄熱システムの意義

100%の還水が可能になれば、エネルギー需要の高い都市中心部に多数の帯水層蓄熱システムが実装されても、地域全体の平均地下水位の変動が抑制でき、地盤沈下のリスク低減が可能となる。今後、行政による地下水の熱源利用に関する法的枠組みの整備が進むことに期待し、以下にその意義を述べる。

1) 都市域で使える制御可能な再生可能エネルギー源としての価値

都市域で使える再生可能エネルギーとしては太陽光発電が想起されるが、夜間や雨天は発電できず出力変動も大きいため補助的なエネルギー源の域を出なかった。これ以外の再生可能エネルギー源としては下水熱や河川水利用もあるが、帯水層蓄熱システムは、都心部でも季節や天候、時間帯に左右されることなく場所も選ばず(帯水層からの採水量や沈下影響については事前の調査が必要)実装可能である。

2) 冬季にも使える水熱源としての価値

地下水は冬季にも凍結しない水熱源であり、大規模建物で使われるターボ+ボイラや吸収式冷温水器などの熱源機をターボ冷凍機単体で置き換えることができ、熱源の高効率化とコンパクト化をもたらす。

3) 低価格大容量のエネルギー貯蔵システムとしての価値

風力や太陽光発電の普及拡大のためのバッファとして蓄電池や水素利用が取り沙汰されているが、地下水流れが少なければ(年間10m以下)帯水層は蓄熱槽として利用できる。蓄熱量は井戸間距離の2乗に比例し、蓄熱単価は低くなる。蓄熱効率は蓄熱回数により左右されるが季節間、昼夜間とも8割程度が期待できる。

4) ヒートアイランド防止や防災対策としての価値

本システムは、排熱を大気放出しないので都市域で問題となっている夏期のヒートアイラ

ンド対策になる上、井水は非常時の消火用水や、フィルタ、イオン交換樹脂を通して飲料水としても利用可能である。

謝辞：本事業については、環境省地球環境局、ならびに大阪市内での実現をご検討の大阪市担当部局に多大なるご支援をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中曾康壽, 佐々木健太, 藤井良平, 中尾正喜, 西岡真稔, 鍋島美奈子: 閉鎖性帯水層の昼夜間蓄熱利用-第2報 簡易集中定数モデルの作成と検証-, 空気調和・衛生工学会論文集 No. 195, 2013年6月
- 2) 中曾康壽, 伊藤貴之, 佐々木健太, 藤井良平, 中尾正喜, 西岡真稔, 鍋島美奈子: 閉鎖性帯水層の昼夜間蓄熱利用-第1報 帯水層蓄熱モデルの実験検証-, 空気調和・衛生工学会論文集 No. 190, 2013年1月