

09. 地下水制御型帯水層蓄熱 (ATES) システムの開発

○富樫聡 (信州大学大学院・八千代エンジニアリング(株))・藤縄克之 (信州大学)

1. はじめに

福島原子力発電所の事故を契機に、今後、再生可能な自然エネルギーを積極的に活用する機運がますます高まるものと予想される。本研究は、地下浅層部が有する良好な断熱性及び蓄熱性を利用する従来の地下熱利用技術 (ATES: Aquifer Thermal Energy Storage)¹⁾ を発展させ、高効率な熱エネルギー利用と地下環境への負荷軽減を同時に達成できる新しい技術の開発を目指したものである。

2. 高効率 ATES システムの概要

本研究で開発するシステムを Figure1 に示す。本技術の最大の特徴は、揚水や注水により地下水の動水勾配を人為的に調整することによって地下水流動を制御し、地下水流動で逸散するおそれのある帯水層中の熱源プルームを採熱位置および時期に応じて効率的に滞留させ、熱エネルギーの再利用効率を向上させることにある。また、高温や低温となる影響範囲が制限できるため、周辺地下水に対する熱汚染も人為的にコントロールできる。したがって、従来方式のオープン型 (ATES) は、クローズド型 (BTES) に比べて蓄熱効果は高いが熱の再利用効率は高くなく、地下水流動がない場所では季節間の熱貯留で熱干渉が生じる可能性があること、地下水流動が大きい場所では蓄熱ロスも大きくなること等の難点があったが、本技術を用いれば地下水流動が人為的に制御できることから、これらの問題はすべて解決できる。

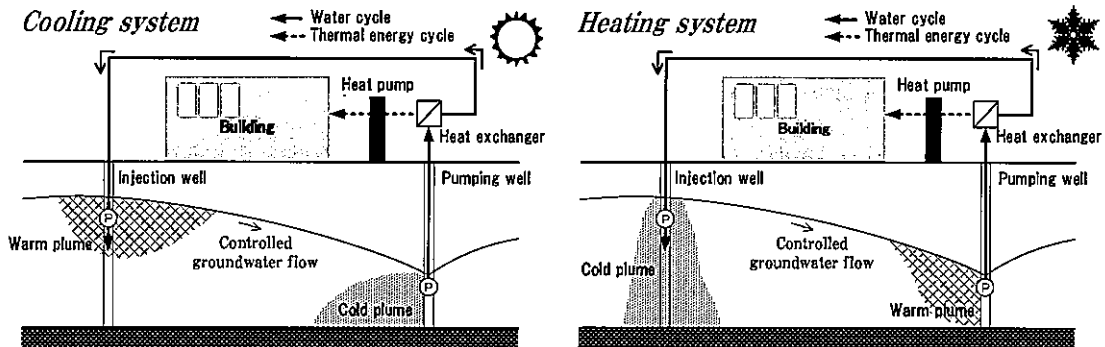


Figure1 地下水流動制御型 ATES の概念図

3. 研究対象地域の概要

本システムの実証試験が実施されている信州大学工学部は、標高が 350m 程度で、周囲を標高 1,000~2,000m 級の山地に囲まれた善光寺平と呼ばれる長野盆地の中央よりやや西側付近に位置している (Figure2)。長野市は日本でも寒冷な地域にあたるが、夏は標高の割に日中の気温が高く、最高気温が 30℃ 以上に上昇する日も年間 50 日程度あり、ヒートアイランド現象も顕在化している。一方、冬には氷点下となる日が年間 100 日程度あり、日本国内の他地域に比べ寒暖の差が激しく、冬場のエネルギー需要も多いことが特徴である。

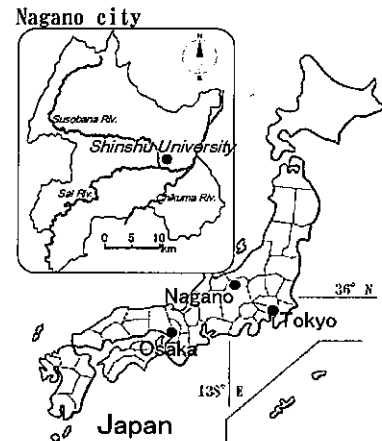


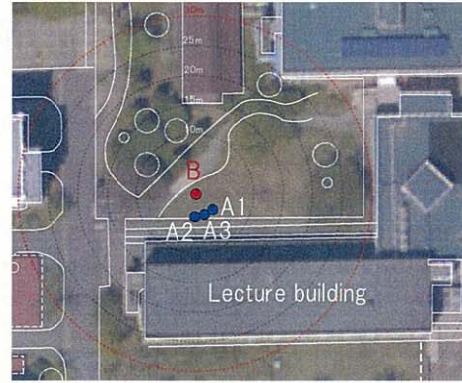
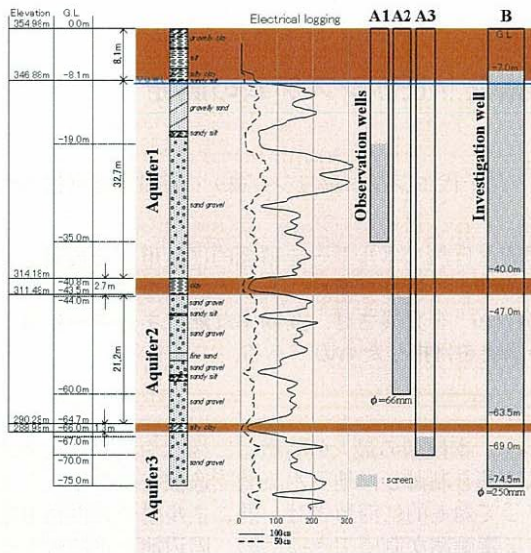
Figure2 研究対象位置図

4. 地質・地下水原位置調査

4.1. 地質構造

地質構造を明らかにするため、実証試験サイトでオールコアボーリング (φ66mm, DL-75m) と電気検層を行った。対象地の地質構造模式図および電気検層結果を Figure3 に示す。これらの結果より、粘土層で分離された砂礫から構成される 3 層の帯水層が確認できた。以降、浅層より順に第一帯水層、第二帯水層、第三帯水層と呼ぶ。なお、地表面直下には厚層約 8m の粘土層が存在し、揚水した地下水を帯水層へ還元する際、地表面からの人工涵養によることは困難であることが明らかとなった。

本サイトにおいて諸々の水文地質調査および熱物性調査を実施するため、明らかになった地質構造に基づいてマルチスクリーン構造の調査用井戸 B 孔および B 孔を中心とした半径約 3.8m の同心円上に調査用井戸 A1 孔 (第一帯水層)、A2 孔 (第二帯水層)、A3 孔 (第三帯水層) を Figure4 に示すように設置した。



(左) Figure3 地質調査結果

(右) Figure4 井戸配置図

4. 2. 各帯水層の間隙水圧, 地下水流動方向, 流速調査結果

観測井 A1 孔, A2 孔, A3 孔に間隙水圧計を埋設し, 地下水位のモニタリングを行った. その結果, 第一帯水層の地下水位は標高 345.5m 程度で, 不圧地下水面を持つことがわかった. 一方, 被圧されている第二帯水層と第三帯水層のピエゾ水頭は, 第一帯水層よりも第二帯水層で約 20cm, 第三帯水層で約 50cm それぞれ低いことが確認できた. 流向流速試験の結果, A1 孔内地下水は流速 $3.3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ で南南東へ, A2 孔では流速 $6.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ で南東へ流動しており, A3 孔は測定器の測定可能範囲の下限に近い値で他帯水層と比べて顕著な流動が見られないことがわかった.

4. 3. 水理特性

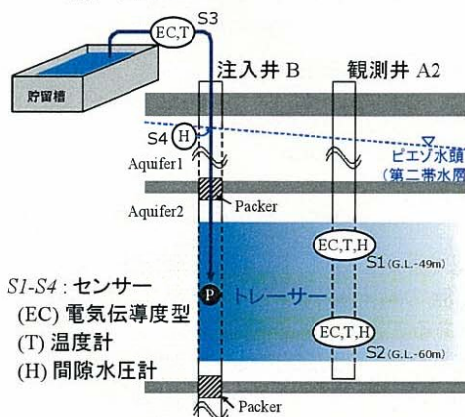
B 孔のマルチスクリーン区間にバッカーをかけて帯水層を分離し, 調査井 B 孔と観測井 A 孔群を用いて層別揚水試験を実施した. 試験結果を用いて行った透水係数の解析の結果, 各帯水層の透水係数は第一帯水層が $8.06 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, 第二帯水層が $1.83 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, 第三帯水層が $2.07 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ と評価された.

4. 4. 地下水温, 地下水質

自然状態の各帯水層の地下水温を把握し, 更に調査位置における地下水の流動傾向を捉えるため, 地下水温の鉛直プロファイルを計測した. その結果, 第二帯水層は第一帯水層よりも 0.3°C 程度程度高いが各帯水層の地下水温は概ね 14°C 程度で一定であることがわかった. これら結果, 地下水流動が相当大きいことが想定された. 一方, 地下水質も調査しており, その結果を地盤の目詰まり対策に役立てる予定である.

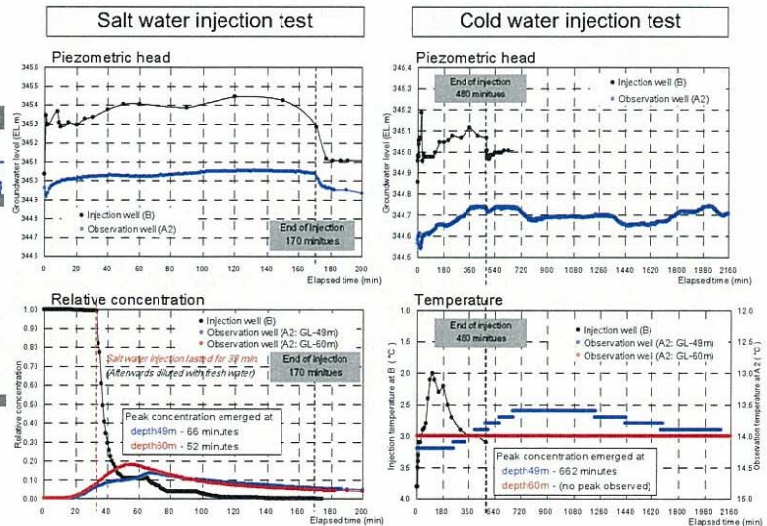
4. 3. 縦分散長, 横分散長, 熱伝導率, 体積熱容量の評価のための塩水・冷水トレーサー試験

第二帯水層を対象に, 貯留槽に塩水または冷水を貯留し, これをトレーサーとして B 孔から帯水層中に注入するトレーサー試験を実施した (Figure5). このとき, B 孔入口, および A2 孔の深度 49m と 60m にセンサーを設置し, 電気伝導度, 水温を継続観測した. また, 両孔の水位もあわせてモニタリングした. 塩水および冷水のトレーサー試験の結果を, それぞれ Figure6 に示す. 保存系トレーサーの塩水を用いた場合は, B 孔に塩水を注入してから深度 60m 地点では約 52 分後, 深度 49m 地点では約 66 分後にピーク濃度を観測した. 一方, トレーサーに冷水を用いた試験では, ピーク値が観測されたのは実験開始から約 662 分後 (深度 49m) で, 塩水に比べて時間を要する結果となった. また, 深度 60m ではピーク値が確認できなかった.



(左) Figure5 トレーサー試験模式図

(右) Figure6 トレーサー試験結果



5. 地下水制御型 ATEs の概略設計

5.1. 空調システムの運転条件

地下水流動制御の効果を数値シミュレーションにより評価する。このときの空調設備の運転条件を Table1 に示す。注水温度を平均気温程度で一定として蓄熱効率を高め、フリークーリングや床暖房等への適用を想定する条件とした。数値シミュレーションは地下水流動を制御しない場合(従来型 ATEs)、制御する場合(地下水制御型 ATEs)の2ケースで実施する。

Table1 空調運転条件

Operation mode	Period		Pumping / Injection rate		Injection water temperature	Elapsed time						
	date	number of days	(L/day)	(L/min)		(year)	1st year				2nd year	
						(month)	0	6	7	8	11	12
Heating	11/1-4/30	180	72,000	50.0	5°C const.	(day)	0	213	365	366	548	
Suspend	5/1-5/31	31	-	-	-	Operation mode	Heating	suspend	Cooling	suspend	Heating (2nd cycle)	
Cooling	6/1-9/30	122	72,000	50.0	25°C const.							
Suspend	10/1-10/31	122	-	-	-							

5.2. 揚水/注水システム設計

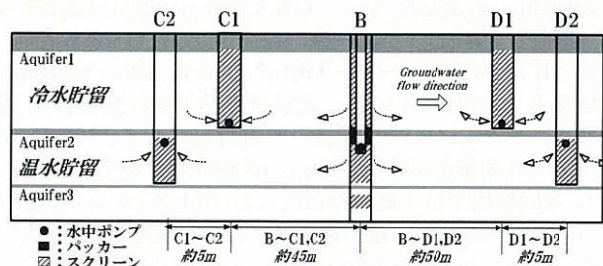
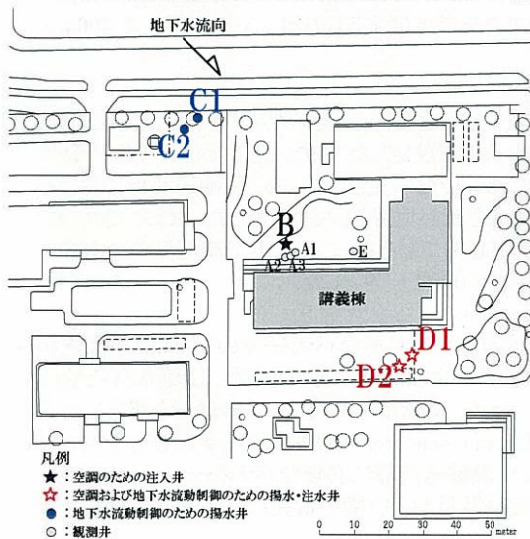
地質および地下水の調査結果より、地下のシステムの概略設計を次のとおりとした。

(1) 帯水層機能

冷水は密度差により下方へと沈降し、逆に温水は上方へ浮上する。また、一般的に地温勾配は地下深部程上昇する傾向にある。これら特性と蓄熱効率を考慮して、第一帯水層には冷水、第二帯水層には温水をそれぞれ貯留することとした。

(2) 地下水流動制御方法

上述の原位置調査結果より、実証試験サイトでは帯水層へ貯留する熱エネルギーが移流により利用地点(熱回収井)より下流へ移動し、季節間の蓄熱効果が低下する可能性が高いことが分かった。そこで、空調システムで利用する井戸群の他に、地下水流動制御を目的として流動方向の上流側に揚水井、下流側に注水井を設けることとした。これらの井戸配置を Figure7 に示す。このとき各位戸には Figure8 に示す機能を持たせ、これにより自然地下水の動水勾配を制御することとした。従来型 ATEs (Conventional ATEs) と地下水流動制御型 ATEs (Enhanced ATEs) の熱回収プロセスの概念を Figure9 に示す。図に示すとおり、自然状態では温水または冷水が下流へ移動するため熱回収が困難となるが、地下水流動制御用井戸の運用により、採熱したい時期に合わせて熱回収井付近に温水または冷水を留め、熱回収の効率を高めることが可能となる。本研究では得られている原位置調査結果より本技術の概略評価を行う。なお今後、最大採熱量を得るような流れ場とするための適切な揚水量、注入量は数値シミュレーションにより評価し、この結果を基にシステム設計を実施する予定である。



(左) Figure7 入れ子構造となる井戸配置図

(右) Figure8 井戸機能模式図

6. 数値シミュレーションによる評価

6.1. 地下水・熱連成解析コード

地下水流動の適切なコントロールが本技術の根幹となるため、地下水流動と熱移動現象を高精度でシミュレートする必要がある。そこで、本研究の数値シミュレーションに地下水・熱連成解析コード SWATER (Subsurface Water And Thermal Energy Resources) を用いた。ちなみに、SWATER は藤縄が開発した SIFEC⁽²⁻⁵⁾ を、3次元の飽和・不飽和密度依存地下水流動と熱移動解析用に改良⁵⁾ したものである。

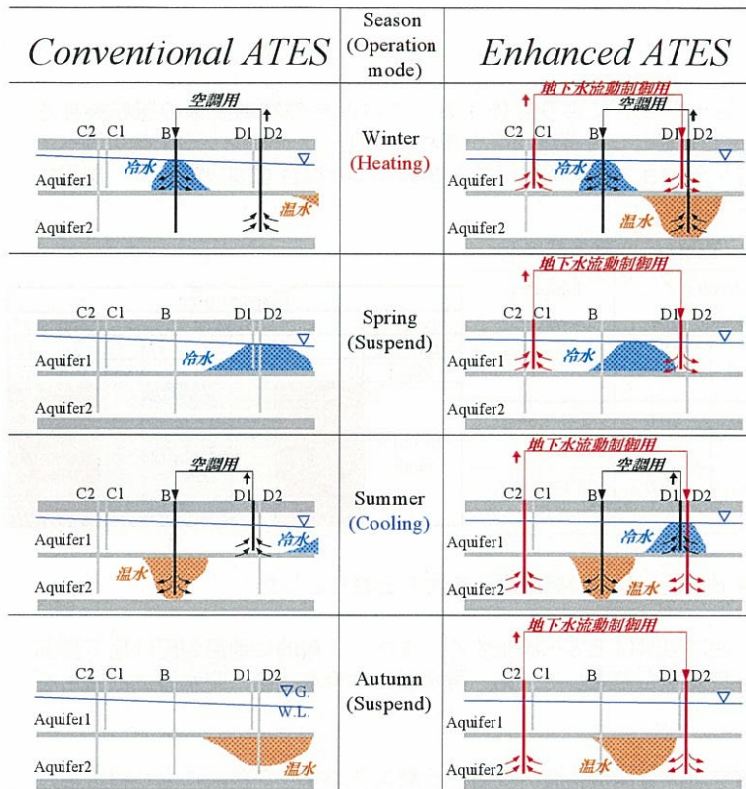


Figure9 従来型 ATEs と地下水流動制御型 ATEs の運用概念図

6. 1. 解析モデルと解析条件

(1) 有限要素メッシュ

井戸配置を基に作成した有限要素メッシュを Figure10 に示す。本モデルの節点数は 12,852、要素数は 23,712 である。また、計算対象領域は第二帯水層下面(標高 290.28m)までをモデル化するものとし、x-y 平面上で 400m×100m とした。

(2) 境界条件および初期条件

計算対象領域における地下水位分布に関する情報は今後調査する予定である。そのため、本検討対象地域では 1/100 程度の動水勾配があるものと想定して浸透流解析の境界条件を設定した。また、地下水位の年間変動特性についても今後の調査より把握することから、今回のシミュレーションでは一定としている。熱輸送解析における境界条件は、上流側を 14.0°C の定温度境界、地表面および基底を断熱境界として取り扱った。なお、浸透流と熱輸送の非定常連成問題の初期条件として領域内部の水頭分布が必要であるが、これは上下流境界の全水頭を直線補間して設定した。また、初期水温分布は原位置調査結果より 14.0°C で一定とした。

(3) 解析に用いたパラメータ

解析に用いたパラメータを Table2 に示す。飽和・不飽和浸透流の計算に必要なパラメータのうち間隙率は飽和体積含水率に等しいものとし、地質調査結果から想定される透水係数および間隙率を設定した。土壌水分特性曲線のパラメータについては現地の土質材料に対する試験値がないため、文献値を参考にして砂礫層を想定した土壌水分特性曲線を作成し、Powell の共役傾斜法を用いて同定した van Genuchten の関係式の α および β を用いる。また、今回検討では不飽和浸透流におけるヒステリシスは考慮しない。熱輸送計算に必要なパラメータのうち、固相、液相、気相の体積熱容量や熱伝導率は文献値を用いた。また、縦分散長および横分散長は、対象領域の土質構造や解析モデルスケールから判断し、一般的な値を採用した。

(4) 揚水・注水条件

空調システムで利用する地下水の揚水量は、暖房運転、冷房運転共に日平均揚水量 72,000L/day と設定した。また、地下水は循環利用するため、空調利用後に B 孔から注入する量は揚水量と同じとしている。注入水温は一定温度を注入するものとし、暖房運転時は 5°C、冷房運転時は 25°C とした。一方、地下水を制御する際の揚水量は、空調運転期間中、空調運転休止期間共に連続稼働させ、144,000L/day の地下水を揚水する条件とした。揚水した地下水は(空調運転で使用していない方の)熱回収井より、揚水量と同量を還元するものとし、このときの注入温度は、地下水制御用井戸から揚水した地下水の平均温度を与えた。

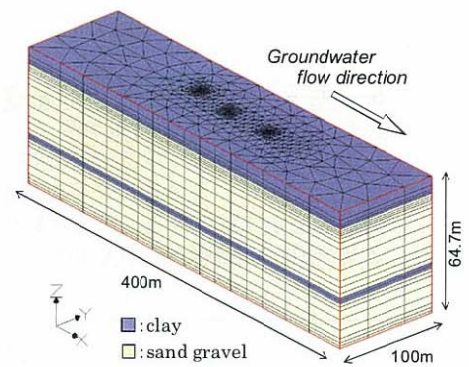


Figure10 FEM メッシュ

Table2 解析に用いたパラメータ

Saturated hydraulic conductivity at a reference temperature of 4°C			
Clay	K_r	0.00036	m/hr
Sand gravel (Aquifer 1)	K_r	0.821	m/hr
Sand gravel (Aquifer 2)	K_r	0.652	m/hr
Porosity	ϵ	0.2	-
Saturated water content	θ_s	0.2	-
Residual water content	θ_r	0.1	-
Parameter of van Genuchten eq.			
α		5.27	/m
β		2.138	-
Longitudinal dispersivity	α_L	1	m
Transverse dispersivity	α_T	0.1	m
Volumetric heat capacity of			
Solid phase	$(\rho C)_s$	528	J/m ³ K
Water phase	$(\rho C)_w$	1160	J/m ³ K
Air phase	$(\rho C)_a$	0.336	J/m ³ K
Heat conductivity of			
Solid phase	λ_s	0.909	W/mK
Water phase	λ_w	0.594	W/mK
Air phase	λ_a	0.024	W/mK

6. 2. 解析結果と考察

計算期間は 1.5 サイクル相当期間とした。システム運用開始からの空調運転期間別の水温分布を Figure11 に示す。地下水流動をしない場合 (Conventional ATES) と制御した場合 (Enhanced ATES) を整理し、比較した結果、地下水流動を制御することにより熱ブリュームの滞留効果が確認できた。また同時に、貯留する熱エネルギーの保持 (ピーク水温の維持) 効果もあることがわかった。これは、流速が大きいほど熱分散現象の影響が大きくなるが、地下水流動の制御により自然状態に比べて地下水流速が低減するため、これにより熱分散の影響が小さくなったことによるものである。

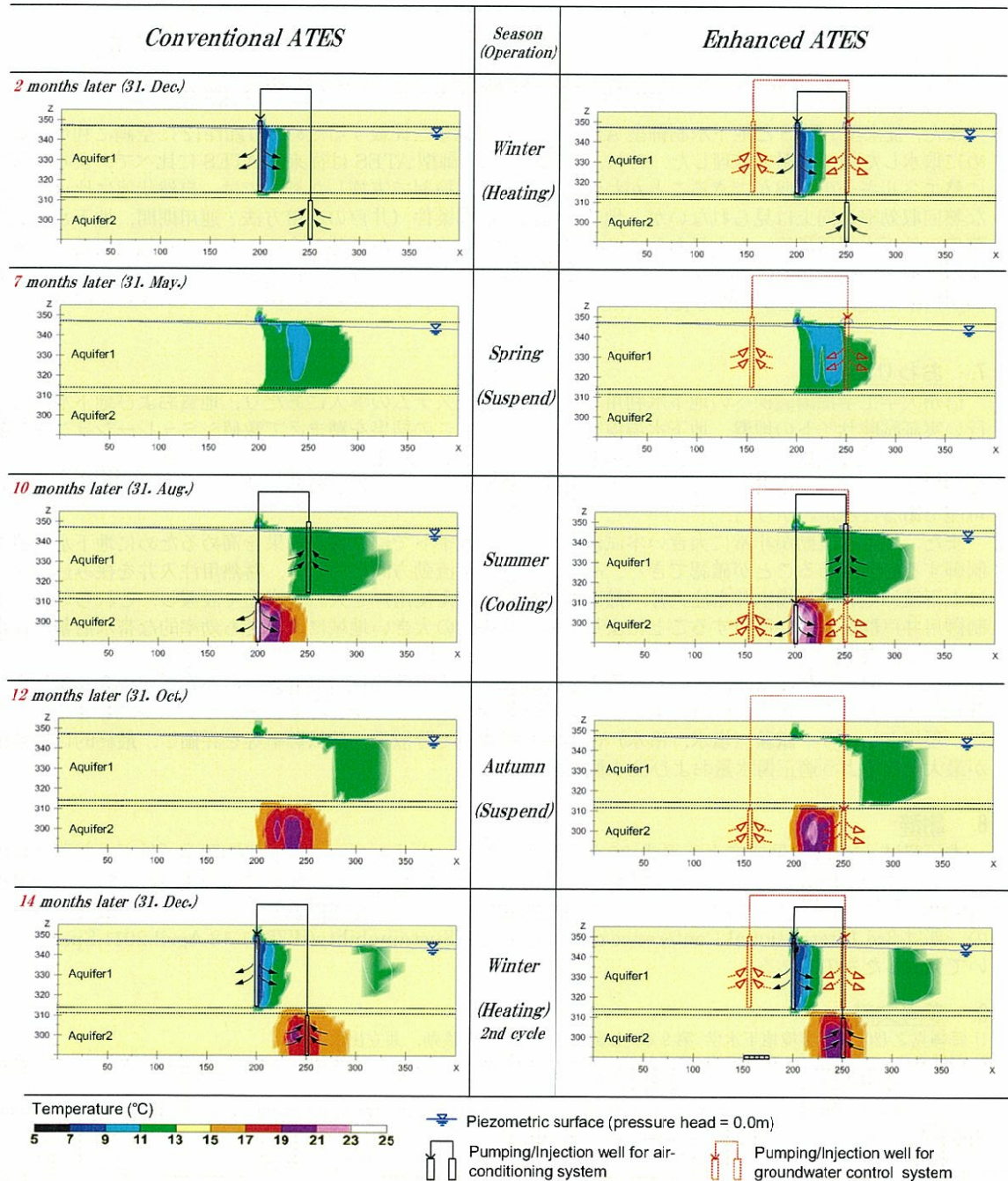


Figure11 数値シミュレーション結果(季節ごとの地下水温度分布図)

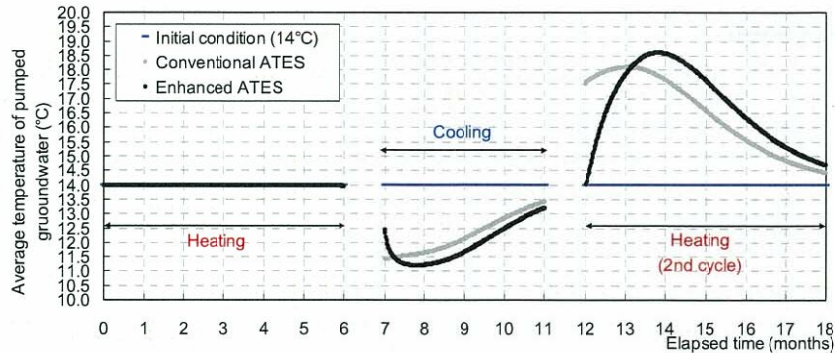


Figure12 従来型 ATES と地下水流動制御型 ATES の熱回収効率の比較

また、従来型 ATES と地下水制御型 ATES の熱回収効率を比較するため、Figure12 に空調に利用するために取水した地下水温を整理した。これより、地下水制御型 ATES は従来型 ATES に比べて、より効果的に熱エネルギーの回収ができることがわかる。なお、本検討で実施した計算では、自然状態に比べて大幅な熱回収効率の向上は見られないが、地下水流動の制御条件（井戸の運用方法・運用期間、地下水流動制御用の地下水循環量等）を、最もシステム効率が向上するような条件とすることにより熱回収効果も向上する。以上の結果から、最適な井戸配置の設計やシステム運用条件設定に数値シミュレーションによる評価が効果的であることがわかった。

7. おわりに

信州大学工学部講義棟への地下水利用ヒートポンプシステムの導入にあたり、地質および地下水調査を行い実証試験サイトの地盤、地下水環境を明らかにし、この結果を踏まえて数値シミュレーションを実施し、地下水制御型 ATES システムの概略設計とその評価を行った。

その結果、貯留する帯水層を分離することにより季節間の蓄熱による熱干渉が生じず、効率的な運転が可能であることがわかった。

また、地下水流動が非常に大きい本試験地のようなサイトでは、蓄熱効果を高めるために地下水流動を制御する必要があることが確認できた。そこで、地下水流動方向に対して、蓄熱用注入井を挟み込むように上下流にそれぞれ揚水井と注入井（熱回収井を切り替え使用）を入れ子構造で設置し、これらの地下水制御用井戸群を適切に運用することにより、地下水流動の大きい地域においても効率的な帯水層蓄熱が期待できることが分かった。

本研究で開発した技術は、井戸を設置できる場所と揚水/注入可能量に制限されるが、他の多くの場所で適用可能であると言える。今後、地下水位の年間変動を把握して、シミュレーションへ反映させるとともに、現場トレーサー試験（塩水、冷水）の結果を踏まえて分散長、熱伝導率等を評価し、最終的に採熱量が最大となるよう適正揚水量および注水量を検討する。

8. 謝辞

本研究は、NEDO 助成による平成 22 年度次世代型ヒートポンプシステム研究開発「地下水制御型高効率ヒートポンプ空調システムの研究開発」事業によった。本プロジェクトの共同研究者となる清水建設株式会社の皆様、および現地調査にご尽力頂いた株式会社日さくの皆様に感謝の意を表す。また、本研究の一部は 3rd International Conference on Energy and Sustainability(WIT,11-13.April.2011,Spain)において発表したものである。

9. 参考文献

- 1) 藤縄克之 (2010) : 環境地下水学 第 9 章 土壌・地下水中の熱移動, 共立出版
- 2) 藤縄克之, 増岡健太郎, 長野宇規, 渡邊紹裕 (2005) : 海面上昇がゼロメートル地帯に及ぼす影響を予測するための塩水浸入数値解析モデル. 土木学会論文集, VII-35, no. 790, 35-48.
- 3) Fujinawa, K. (1983) : A 'Characteristic' finite element method for dispersion-convection equation. Journal of Japanese Association of Groundwater Hydrology, 5, 2, 93-108.
- 4) 藤縄克之 (1984) : 特性曲線型有限要素法を用いた密度差のある地下水流動の数値解析—淡水・塩水 2 相流への応用, 日本地下水学会誌, 6, 1.
- 5) Fujinawa, K. (1986) : A 'characteristic' finite element scheme for convective-dispersive transport with non-equilibrium reaction. Int. J for Num. Meth. in Eng., 23, 6, 1161-1178.
- 6) 藤縄克之 (1992) : 熱対流を伴う飽和多孔体内熱移動に関する理論的研究 - 多孔体中の熱移動に関する研究 (IV) -, 農業土木学会論文集, 158, 47-56.