

地下熱利用とヒートポンプシステム研究会 平成 22 年度 研究発表会 (第 8 回) プログラム

日 時 : 2011年3月1日 (火) 13:00 ~ 18:15

場 所 : 大町温泉郷 ホテル景水 1F フロント コンベンションホール

開会挨拶 地下熱利用とヒートポンプシステム研究会・主査 長野克則 13:00 ~ 13:05

特別講演 : 「地熱と地中熱の利用 - 我が国と世界の状況 -」 13:05 ~ 13:55

○ 松永 烈 (産業技術総合研究所 中央第 1 つくばセンター 次長 / 日本地熱学会 会長)

休憩 13:55 ~ 14:05

研究発表 : 研究発表時間一人10分 (発表8分、質疑2分)

セッション 1 : 地下水の熱利用 司会者 : 成田樹昭 (西日本工業大学) 14:05 ~ 15:05

1. 杭打ち機を用いた井戸施工法の開発

○ 宮本重信・山崎三知朗 (福井県雪対策・建設技術研究所)

橋詰善光 (三谷セキサン)、西垣 誠 (岡山大学)

2. 長野県における地下熱等利用システム導入に向けた実証調査について

~ 総務省「緑の分権改革」推進事業を活用して ~

○ 胡桃澤博司 (長野県環境部環境政策課)

3. 複数の揚水・注水井を組み合わせた ATES の高効率化に関する研究

○ 富樫 聡 (八千代エンジニアリング)、藤縄克之 (信州大学)

4. 地下水揚水をともなう地中熱交換井の熱交換能力評価

○ 山口雅登・藤井 光 (九州大学)、大島和夫・渡部敦史・石上 孝・

谷口聡子 (三菱マテリアルテクノ)

5. 都市内閉鎖帯水層を利用した蓄熱空調システムに関する研究

- 学内帯水層における日熱回収率の変化 -

佐々木健太 (大阪市立大学)、○ 中曾康壽 (関西電力)

伊藤貴之・中尾正喜・西岡真稔・鍋島美奈子 (大阪市立大学)

6. 複数台のインバーター圧縮機を有するヒートポンプの部分負荷特性と年間予測性能

長野克則・○ 森本真弘・久木野志保・David Blanco (北海道大学)

岡本 淳 (サンポット)

セッション2：垂直型地中熱交換器司会者：柴芳郎(ゼネラルヒートポンプ工業) 15:05～16:05

7. 杭打ち機を利用したU字管熱交換杭の施工法開発
 - 宮本重信・山崎三知朗(福井県雪対策・建設技術研究所)、橋詰善光(三谷セキサン)、坪田高士(セキサンピーシー)、長野克則(北海道大学)、久野 隆(NEXCO 西日本)
8. 杭打ち機を利用したU字管熱交換杭の熱交換特性の評価
 - 長野克則・丹野恵輔・中村真人・金 春月(北海道大学)、宮本重信(福井県雪対策・建設技術研究所)、久野 隆(NEXCO 西日本)
9. 異なる材質のU字管および媒体を用いた熱交換に関する実験的研究
 - 大山辰則・藤縄克之(信州大学)
10. ボアホール型地中熱交換器の放採熱量と熱源水温度レベルに関する実験データのまとめ
 - 成田樹昭(西日本工業大学)
11. 地中熱交換井の充填材変更による熱交換能力の変化についての検討
 - 駒庭義人・西村大輔・藤井 光(九州大学)、長 直勝・藤田幸人(九州電力)
12. 基礎杭利用地中熱交換器の採放熱特性の検討
 - 葛 隆生(北九州市立大学)、長野克則(北海道大学)、中村 靖(新日鉄エンジニアリング)

休憩 16:05～16:15

セッション3：水平型地中熱交換器 司会者：葛隆生(北九州市立大学) 16:15～17:05

13. 埋設段数の異なる Slinky-coil 式水平型地中熱交換器の数値モデリング
 - 山崎将平・藤井 光・駒庭義人(九州大学)、大島和夫・渡部敦史・石上 孝・谷口聡子(三菱マテリアルテクノ)、長 直勝・藤田幸人(九州電力)
14. 地下水流れ場におけるスリンキーコイル式水平地中熱交換器の熱交換特性の実験的検討
 - 長野克則・中村真人・丹野恵輔・李 懐・頼 遠翔・松原 聖(北海道大学)
15. 積雪寒冷地におけるスリンキーコイル式水平熱交換器を有する地中熱ヒートポンプシステムによる温室暖房の評価
 - 中村真人・松原 聖・長野克則(北海道大学)、生方雅男(独)北総研/花・野菜技術センター)、岡本 淳(サンポット)、大江基明(イノアック住環境)、水谷増美(ショーワ)
16. 水平型地中熱交換ループの適用事例
 - 田中雅人(ミサワ環境技術)

17. 蛇行配管式水平地中熱交換器を有する地中熱ヒートポンプ床放射暖房システムの数値計算による年間性能予測

○ 長野克則・絹村剛士 (北海道大学)

セッション4 : GSHPシステム実績、評価、予測 司会者 : 藤井 光 (九州大学) 17:05 ~ 18:15

18. 新日鉄エンジニアリング戸畑事業所新ビルの地中熱ヒートポンプシステムの性能予測

○ 中村 靖 (新日鉄エンジニアリング)、葛 隆生 (北九州市立大学)

19. ゼネラルヒートポンプ納入実績の傾向分析

○ 柴 芳郎 (ゼネラルヒートポンプ工業)

20. 赤平オーキッドにおける大規模地中熱ヒートポンプ温室冷暖房システムの年間性能評価

長野克則・中村真人・○ 李 懐・頼 遠翔 (北海道大学)

21. 大規模垂直型地中熱交換器群をもつヒートポンプシステムの数値モデリング

○ 藤本将史・藤井 光 (九州大学)、柴田和夫・広松 淳 (日伸テクノ)、
長野克則 (北海道大学)

22. 2種の地中放熱源を用いた冷房試験結果

○ 篠原敏雄 (千代田工営)

23. 自然エネルギーを利用した園芸施設暖房システムの熱源別効率比較

○ 加藤 渉・山谷 睦・堀野義人・桂木聖彦 (日本地下水開発)、
古野伸典 (山形県庄内総合支庁産業経済部農業技術普及課産地研究室)、
高杉真司・舘野正之 (ジオシステム)

24. 積雪寒冷地におけるヒートポンプを用いた融雪システムの性能評価

- 特に、地中熱ヒートポンプと空気熱ヒートポンプの運転挙動、および性能について
○ 長野克則 (北海道大学)

複数の揚水・注水井を組み合わせた ATESの効率化に関する研究

- 富樫 聡 (八千代エンジニアリング(株))
藤縄 克之 (信州大学)

NEDO助成事業:平成22年度「次世代型ヒートポンプシステム研究開発」事業成果の一部

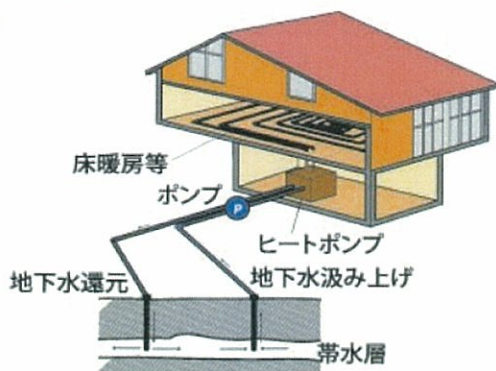


研究の背景



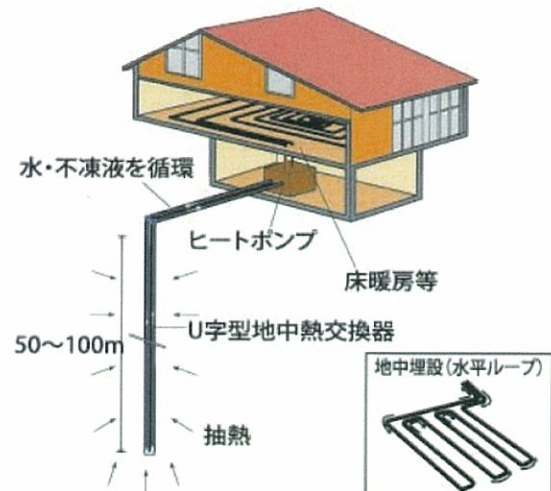
地下熱利用システム

- 地下水利用型
(オープン型: 従来方式)



汲み上げた地下水を地上で熱交換する方法

- 地中熱交換型
(クローズド型) 循環水(不凍液)により地中で熱交換を行う方法



地下水利用型の方が
採熱・放熱効果が高い



普及に向けて課題の改善をめざす

図: 地中熱促進協会作成

開発をめざす技術

地下水制御型ATESの概要

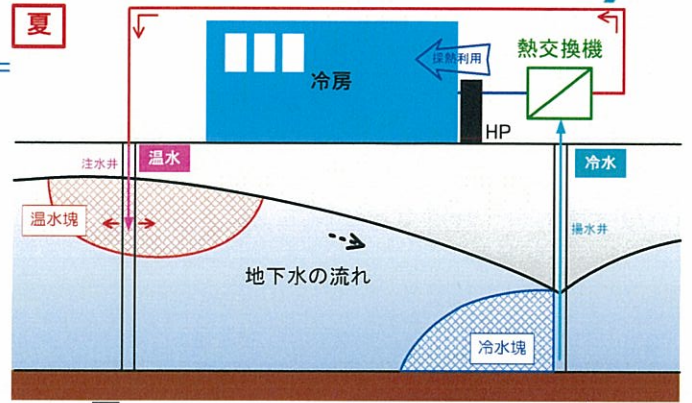
ATES：帯水層熱エネルギー貯留 (Aquifer Thermal Energy Storage)

- ◆揚水井および注水井により地下水位をコントロールし、人為的に地下水流れ場を制御する
- ◆空調運転時の排熱（温熱、冷熱）を付加した水を帯水層へ注入し、この蓄熱エネルギーを熱回収したい時期まで集水域に滞留させる

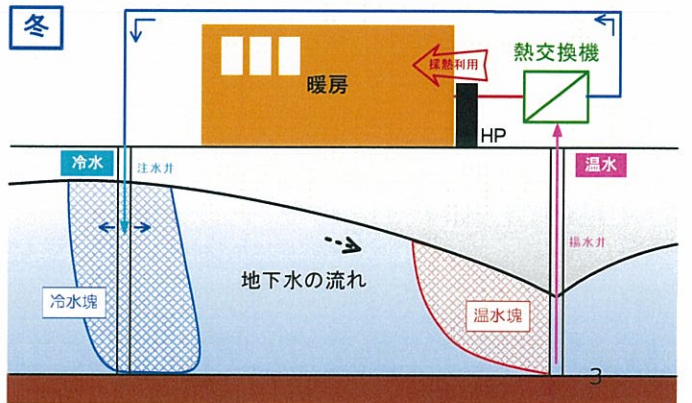


★利点

蓄熱した熱エネルギーの回収効率が向上し、**システム**の性能UPにつながる



空調運転条件（冷房・暖房）に応じて、季節ごとに切り替わる



研究の目的

地下熱利用システムの特徴

劣 ← → 優

項目	(C) クローズド型	(O1) オープン型 (従来方式)	(O2) オープン型 (地下水制御)	備考
ボアホールあたりの出力量	小	中	大	
蓄熱・再利用の効果	小	中	大	(O2) 蓄熱可能なATES (Aquifer Thermal Energy Storage) タイプ
地盤環境への影響	小	大	大	(O1)(O2)揚水による地盤沈下、注水による隆起
周辺地下水の熱汚染	大	大	小	(C) 付加した熱は管理できない (O1) 蓄熱による地下熱環境への影響が懸念 (O2) 影響範囲をコントロールできる
周辺地下水の汚染	大	小	小	(C) 不凍液の漏洩による汚染が懸念される
システムの導入実績	多	少	なし	
維持管理のしやすさ	易	中	中	(O1)(O2)地盤の目詰まり

【オープン型（従来方式）の問題点】

- ・クローズド型に比べ蓄熱効果は高いが、再利用の効率は高くない
- ・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あり
- ・地下水流動が大きい場所では、蓄熱ロスも大きくなる

すべての問題を解決できる



地下水制御型地下熱利用システムの開発

研究対象地域の概要

地域の概要

- 場所：長野県長野市
(信州大学工学部)
- 気象状況：
夏季…日中気温が標高の割に高い
冬季…氷点下は年間100日程度

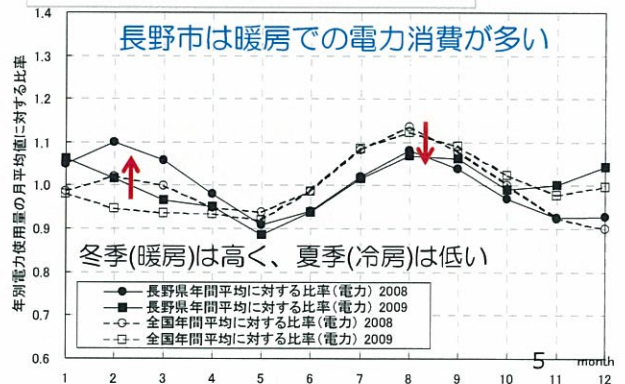


システム導入を予定する施設

信州大学工学部講義棟



長野市の年間電力消費の実態



実施した地質・地下水原位置調査の概要

調査目的

- 地下水の流動特性
- 地盤の熱特性

など、システム性能に関わるパラメータを明らかにする



調査結果の利用について

★地下熱利用に関わる地下水・地盤特性をいかに適正に評価できるかが、シミュレーションの精度に大きく寄与する

⇒ 高効率となるシステムの設計

●地質構造

目的：地盤を構成する地層状況をあきらかにする
方法：オルトホーリング調査、電気検層、温度検層

●地下水位

目的：自然地下水の流動状況把握
方法：自動計測（観測井に間隙水圧計設置）

●地下水流向、流速

目的：地下水流動方向の把握、流速の把握
方法：孔内流向流速試験

●水理特性

目的：地層の水理特性（透水係数等）の把握
方法：層別揚水試験

●地下水温

目的：自然状態の地下温度環境、地下水流動の把握
方法：手動計測（鉛直方向20cm間隔で取得）

●地下水質

目的：地下水還元時の目詰まり対策
方法：水質分析、ヒキサグイグラム、トリニアグラム作成

●熱移動特性

目的：物性値の評価
方法：塩水トレーサー試験（分散長）
温冷水トレーサー試験（熱伝導率、体積熱容量）

地質構造（オールポットリング調査・電気検層結果）

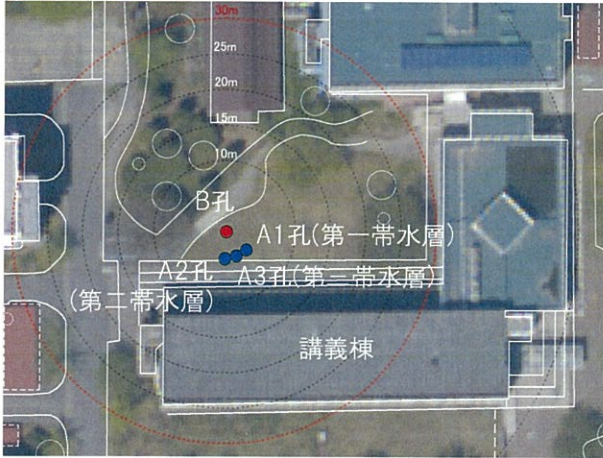
地質構造

- 深度-75mまでオールポットリング（A3）
- 良好な帯水層（砂礫層）が3層
- 地表付近は層厚8m程度の難透水層で被覆

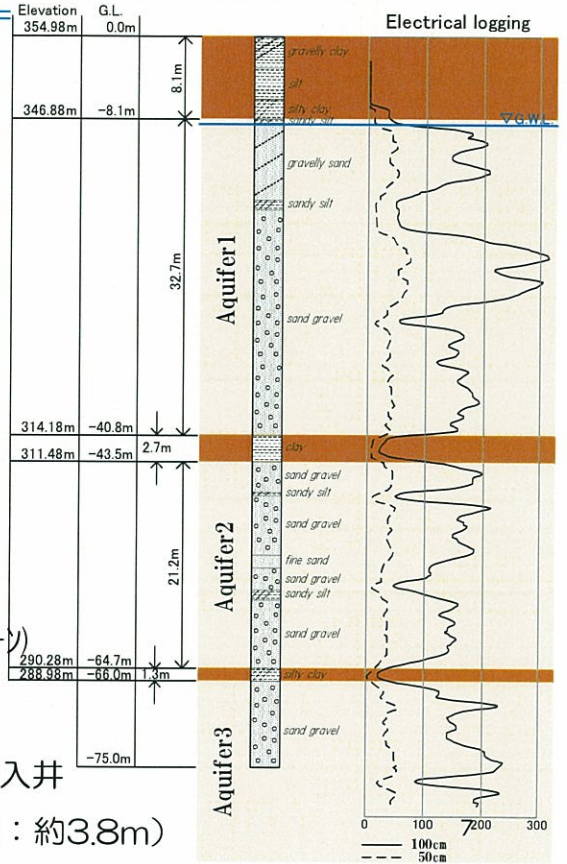


帯水層別に観測井を設置

井戸位置図



A孔群(ツグ ルスクリーン) 観測井
 B孔(マルチスクリーン) 調査用揚水/注入井
 (A孔~B孔間隔: 約3.8m)

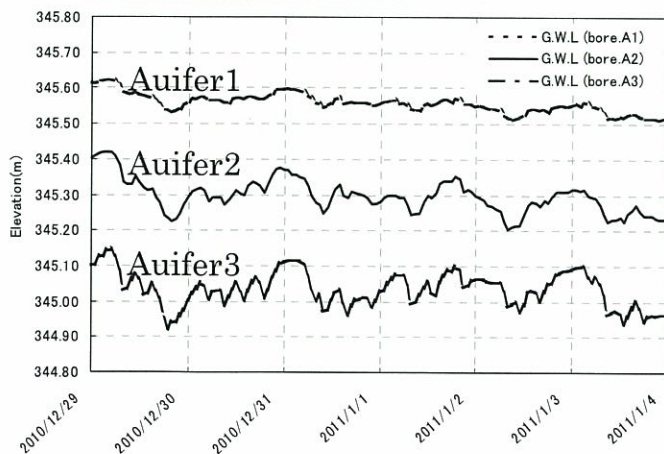


地下水状況（水位、流向、流速）

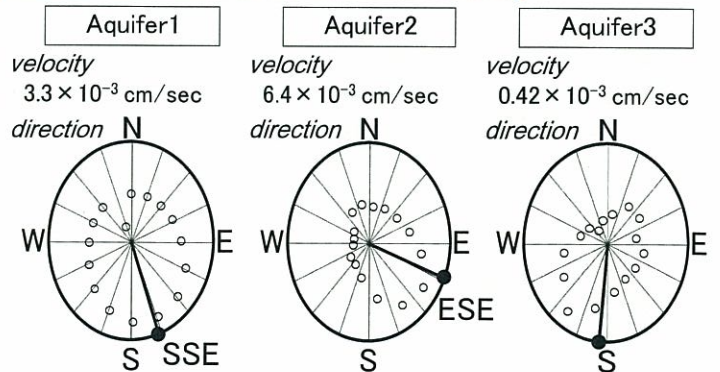
地下水状況

- 第一帯水層、第二帯水層、第三帯水層の順に地下水位は高い
- 孔内流速は第一帯水層 3.3×10^{-3} cm/s、第二帯水層 6.4×10^{-3} cm/sと大きい
- 第三帯水層は他2層に比べて地下水流動が小さい
- 第一帯水層、第二帯水層の地下水は南東方向へ流動

層別地下水位



地下水の流向と流速



○: 温度センサー検出水温相対位置
 ※流向は各温度センサーの検出水温分布を sinカーブ近似した際に頂点をとる方向として評価している
 試験日2011/1/5

地下水の流動特性

透水係数

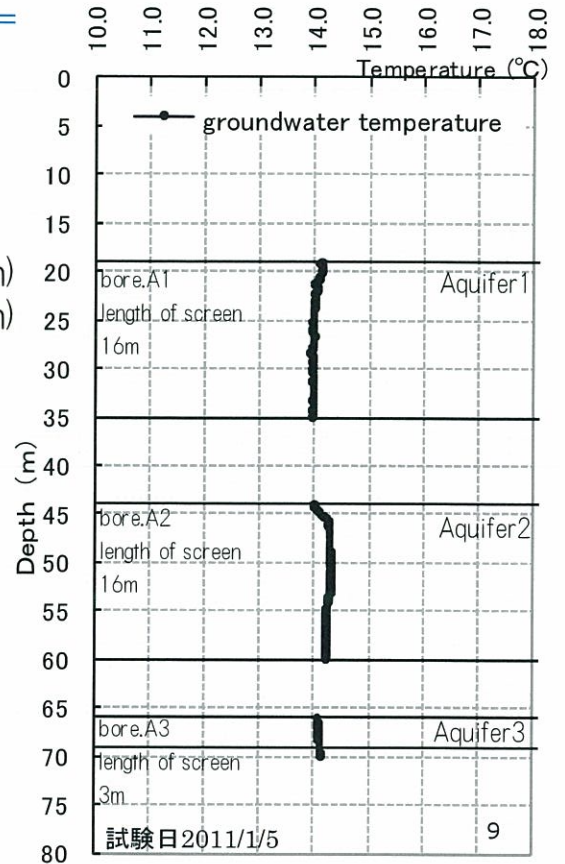
- 第一帯水層、第二帯水層で揚水試験を実施
- 第一帯水層の透水係数： $8.06 \times 10^{-2} \text{cm/s}$
- 第二帯水層の透水係数： $1.83 \times 10^{-2} \text{cm/s}$
- 第一帯水層の比貯留係数：0.0005 (1/m)
- 第二帯水層の比貯留係数：0.0005 (1/m)

透水性が高い

地下水水温

- 各帯水層の地下水温は14°C程度でほぼ一定であり、明確な地温勾配はみられない
- 第一、第二帯水層の地下水流動は大きいと想定される
- 第三帯水層はスクリーン長が短く、温度プロファイルからの流動特性評価は困難

地下水温度プロファイル



地下水質

水質

- 注水による地盤の目詰まり対策として、主要因である地下水中の鉄の除去方法に、軟水機 (Na型イオン交換樹脂) を想定している

水質試験結果

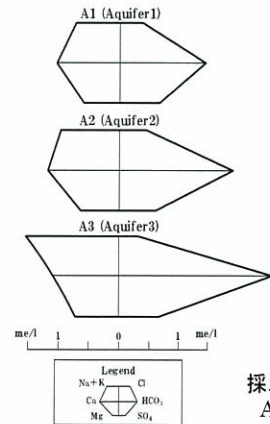
採水日: 2011/1/6

分析項目	第一帯水層 (A1孔)	第二帯水層 (A2孔)	第三帯水層 (A3孔)
鉄	0.50	1.1	0.65
溶解性鉄	0.06	0.02	0.03
マンガン	0.70	0.82	1.2
溶解性マンガン	0.39	1.3	1.1
カルシウム	20	23	21
マグネシウム	6.7	7.7	8.8

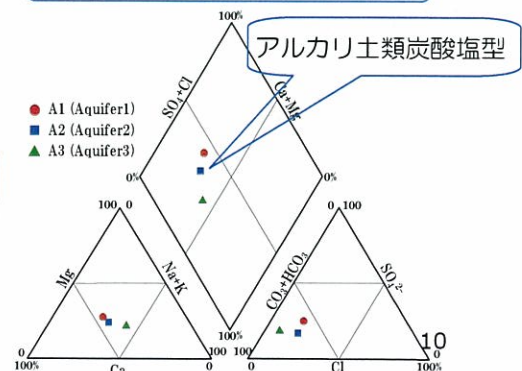
◆水質区分毎の水質制御システム例

水質区分	Fe処理	Ca処理	その他
Fe 5mg/L 以上	酸化+凝集沈殿+ろ過	軟水機	脱気装置
Fe 1~5mg/L	酸化+凝集ろ過	軟水機	脱気装置
Fe 0.03~1mg/L 以下	軟水機		脱気装置
Fe 0.03mg/L以下	-	軟水機	脱気装置

ヘキサダイアグラム



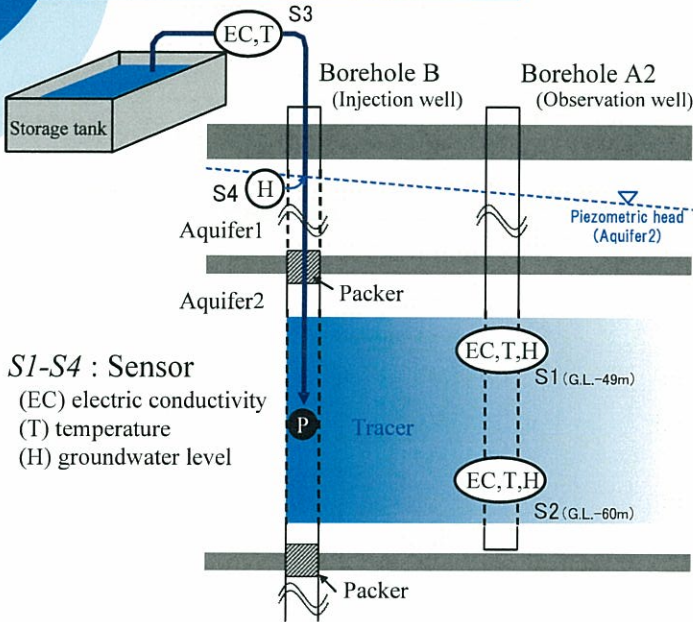
トリリニアグラム



トレーサー試験

地盤の熱特性把握のためトレーサー試験を実施 (塩水：機構的分散、冷水：熱伝導)
 ⇒熱分散・熱伝導の適切な評価はシステム設計条件を大きく左右

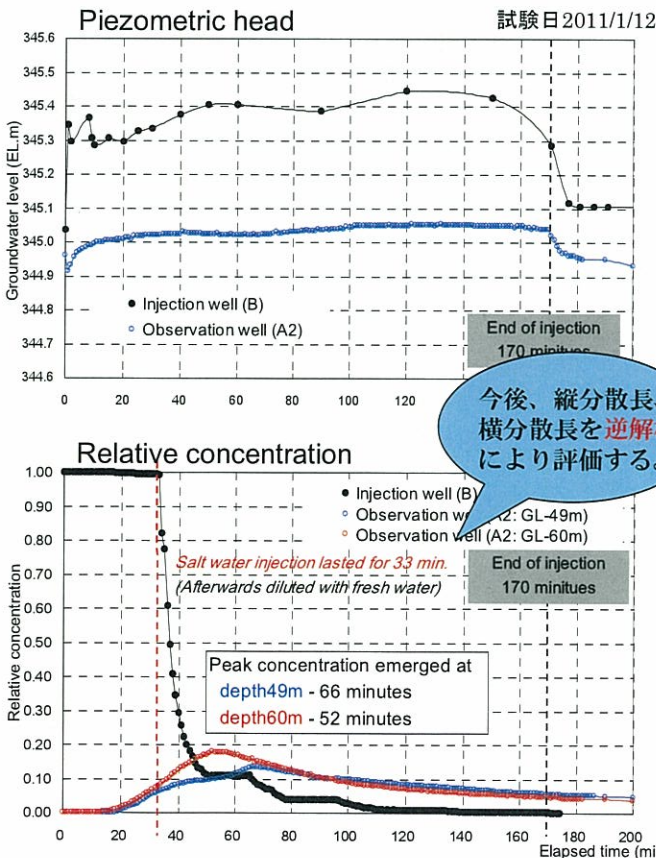
トレーサー試験装置模式図



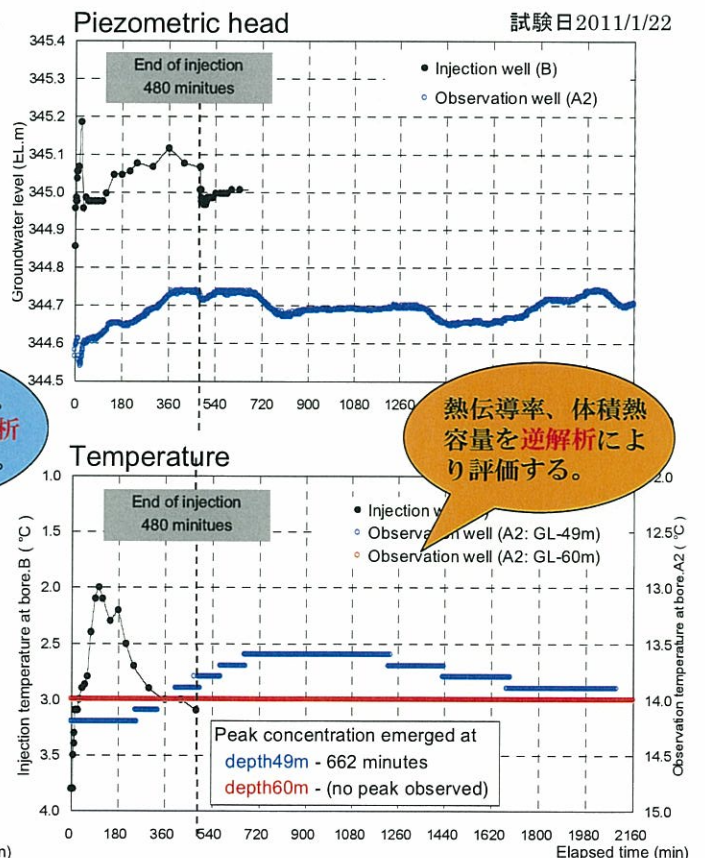
第二帯水層トレーサー試験実施手順

- ①ダブルパッカー工法で帯水層分離
- ②貯留槽で塩水（冷水）を作成し、B孔より注入
 【測定項目】
 - ・ 注入水の電気伝導度EC
 - ・ 注入水の温度T
 - ・ B孔水位
- ③A2孔内に設置したセンサS1,S2で
 継続自動観測
 【測定項目】
 - ・ 電気伝導度EC
 - ・ 温度T
 - ・ 間隙水圧H

Salt water injection test



Cold water injection test



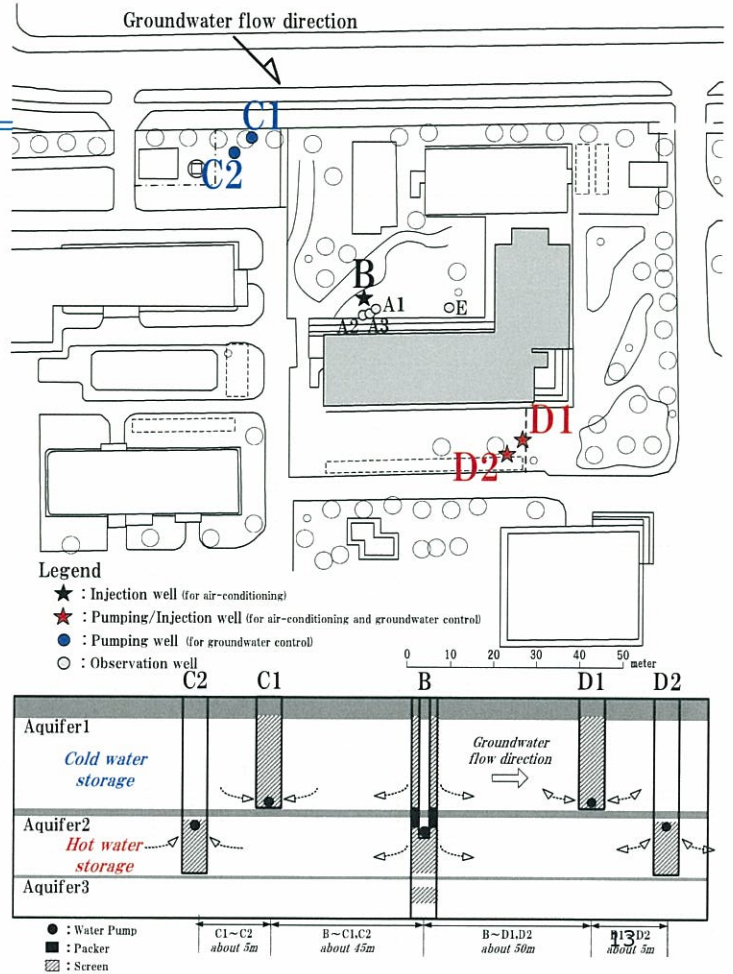
地下システム概略設計

地下システムの概要

地質・地下水原位置調査結果より、地下システムを以下のように考える

Point

- ①熱貯留媒体としての帯水層機能
 第一帯水層 : 冷水貯留
 第二帯水層 : 温水貯留
- ②空調システム用井戸配置
 注水井B孔より下流方向に熱回収井D孔群を設ける
- ③地下水流動制御システム用井戸配置
 顕著な地下水流動が想定されるため、注水井B孔の上流方向に地下水流動制御井C孔群を設ける



地下水制御方法の提案



システム概念と稼働条件

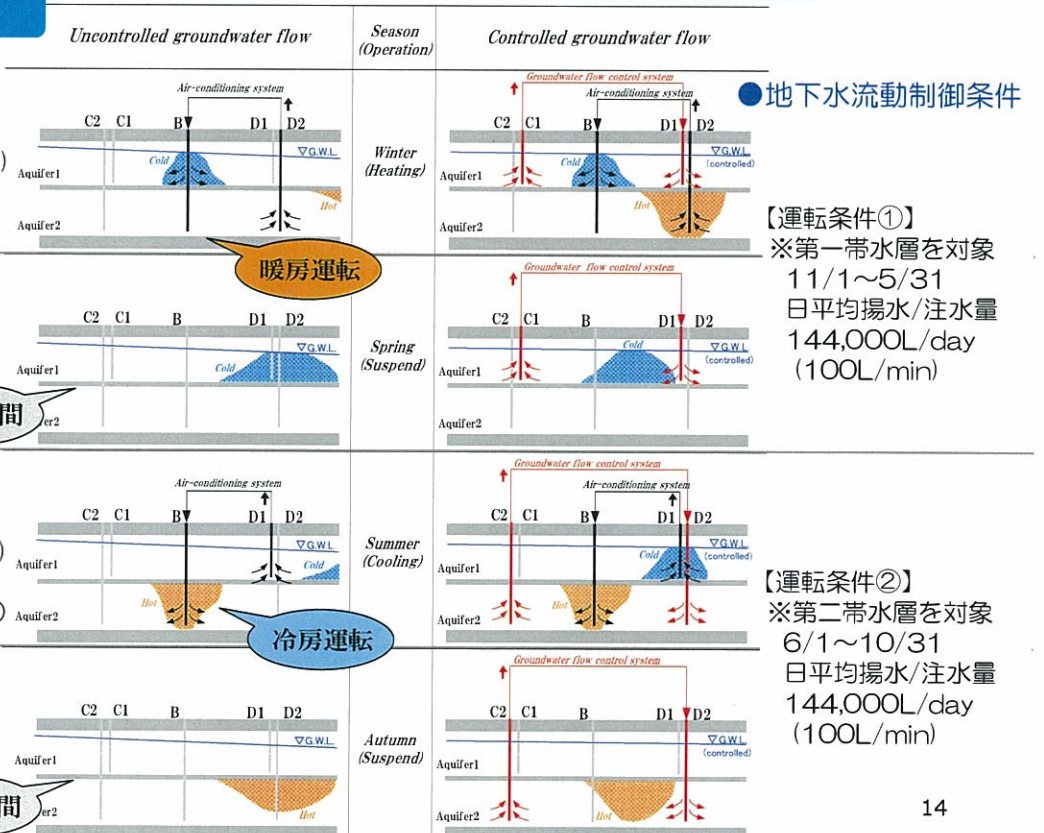
●空調条件

【暖房運転】 11/1~4/30
 日平均揚水/注水量
 72,000L/day (50L/min)
 【注入水温度】
 5°Cで一定 (平均気温程度)

【休止期間】 5/1~5/31

【冷房運転】 6/1~6/30
 日平均揚水/注水量
 72,000L/day (50L/min)
 【注入水温度】
 25°Cで一定 (平均気温程度)

【休止期間】 10/1~10/31



シミュレーションモデルと計算条件

シミュレーション条件

■初期条件

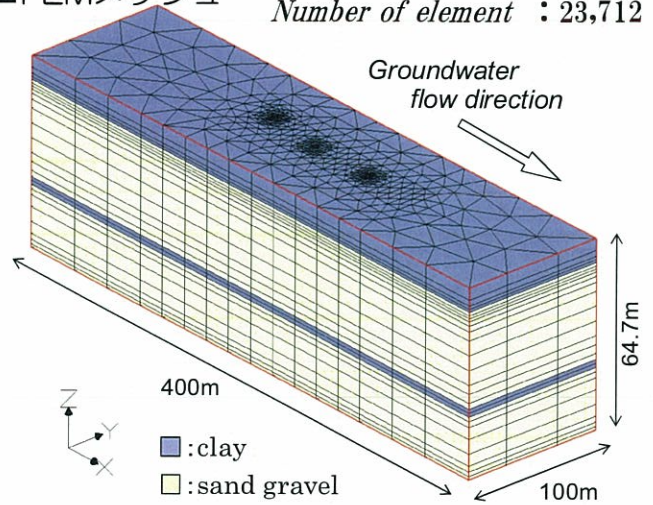
- ・初期温度 14°C
- ・初期動水勾配 1/100

■計算に用いたパラメータ

Saturated Hydraulic Conductivity at Reference Temperature of		
Clay	K_s	0.00036 m/hr
Sand Gravel (Aquifer1)	K_s	0.82080 m/hr
Sand Gravel (Aquifer2)	K_s	0.66960 m/hr
Porosity	n	0.200
Saturated Water Content	θ_s	0.200
Residual Water Content	θ_r	0.100
Parameter of van Genuchten eq.		
α		5.270 /m
β		2.138
Longitudinal Dispersivity	α_L	1.0 m
Transverse Dispersivity	α_T	0.1 m
Volumetric Heat Capacity of		
Solid Phase	$(\rho C)_s$	528.000 J/m ³ K
Water Phase	$(\rho C)_s$	1160.000 J/m ³ K
Air Phase	$(\rho C)_s$	0.336 J/m ³ K
Heat Conductivity of		
Solid Phase	λ_s	0.909 W/mK
Water Phase	λ_s	0.594 W/mK
Air Phase	λ_s	0.024 W/mK

■FEMメッシュ

Number of node : 12,852
Number of element : 23,712

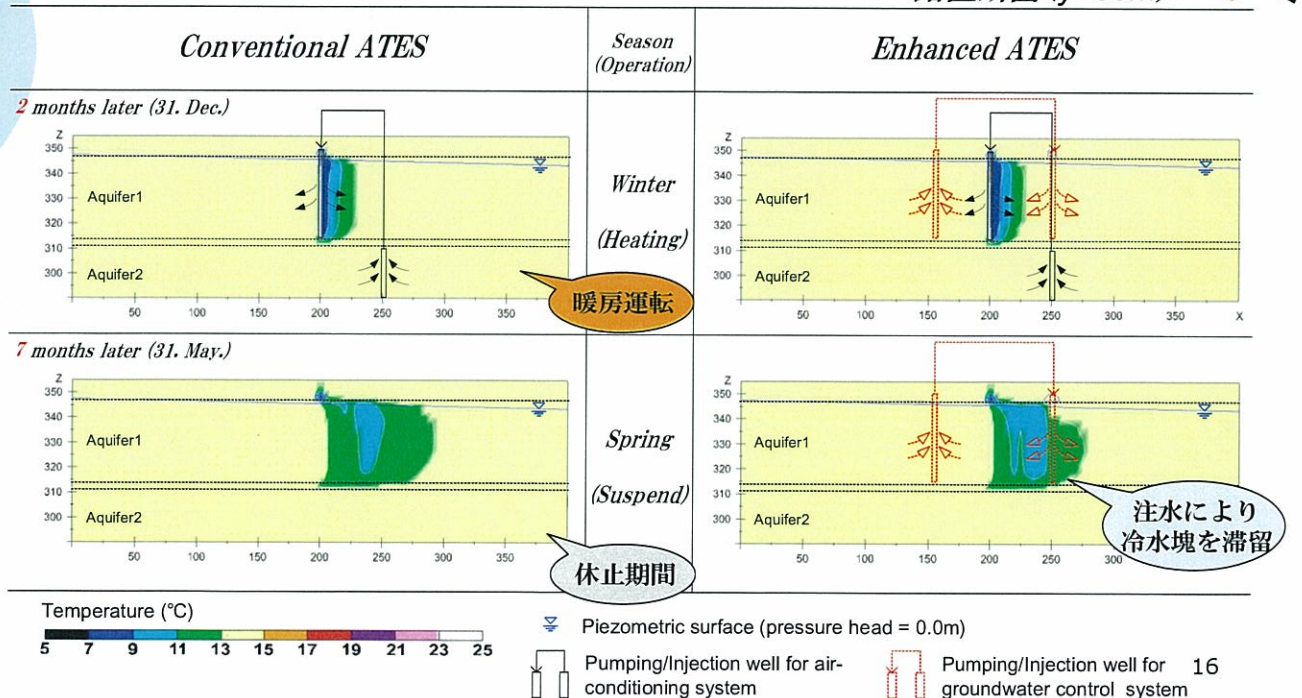
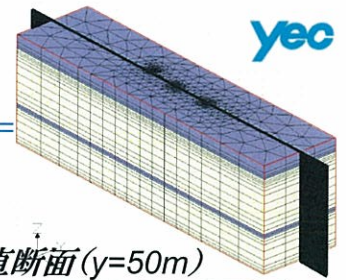


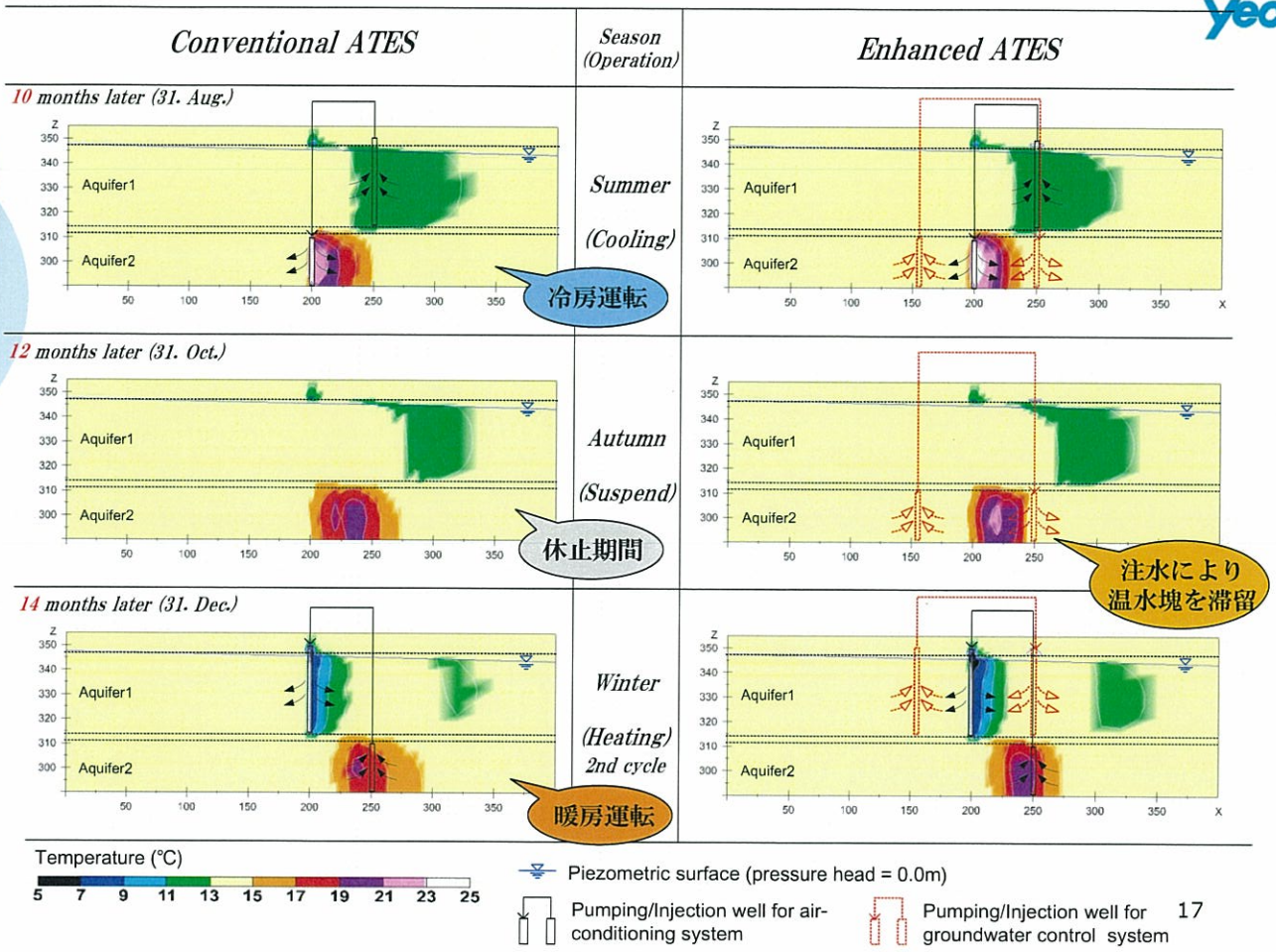
■空調運転条件

(年)	経過時間													
	1年目					2年目								
	(月)	6	7	8	11	12	13	(月)	6	7	8			
(日)	0	182	213	335	365	366	548	0	182	213	335	365	366	548
運転条件	暖房運転			休止	冷房運転			休止	暖房運転 2nd cycle					

SWATERによるシミュレーション結果

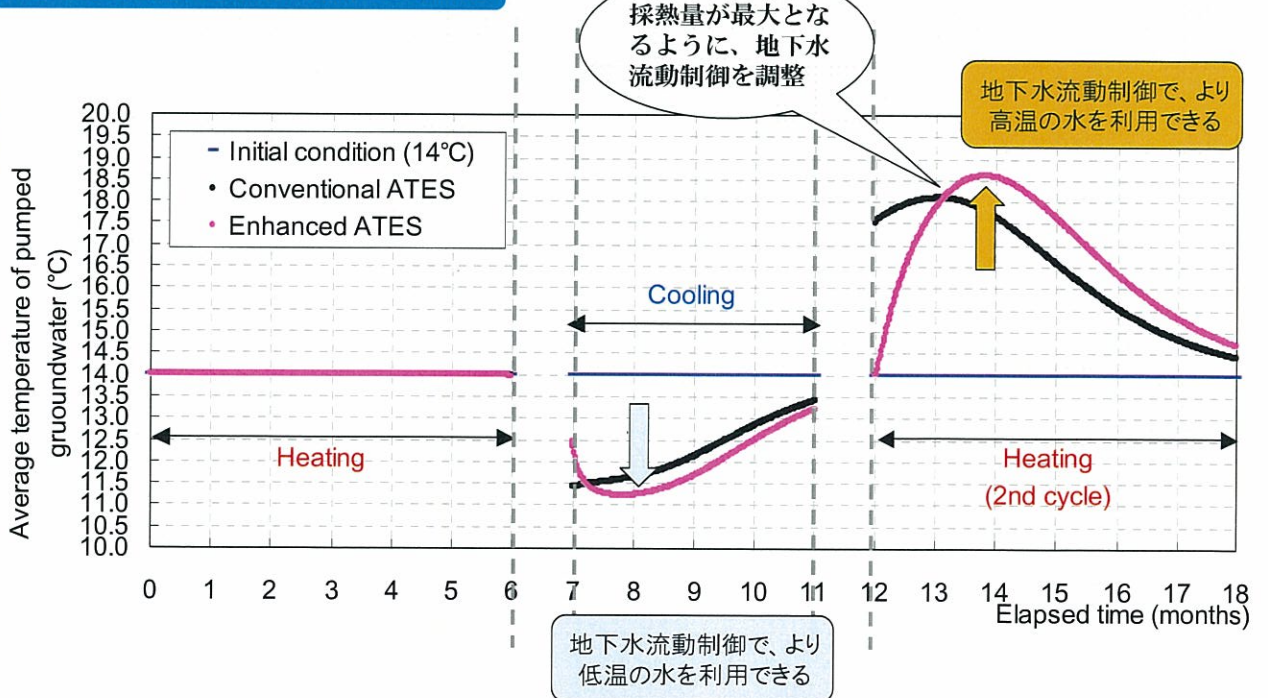
SWATER: 3次元飽和不飽和-熱・地下水流動連成解析コード
Subsurface Water and Thermal Energy Resources





地下水流動制御の効果

取水温度による蓄熱効果の評価



結論と今後の検討について

地質・地下水原位置調査

- ・ボーリング調査(G.L.-75m)より帯水層（砂礫層）は3層が確認できた
- ・地表付近は層厚8m程度の難透層水で被覆
- ・第一、第二、第三帯水層の順に地下水位は高く、地下水は南東方向へ流動
- ・地下水温は14℃程度でほぼ一定
- ・トレーサー試験より、地下水流動が大きく、分散現象が顕著にみられた（第二帯水層）

地下システム設計

- ・熱回収井の他、地下水流動制御を行うための**地下水流動制御井**を設け、空調運転と地下水流動制御の2系統の地下水循環システムを提案

シミュレーション結果

- ・地下水流動を制御することで、**熱利用効率を向上**できることが確認できた
- ・最大採熱量が得られるように地下水流動を制御するための、「揚水/注水量」、「運転期間」等 ⇒ **シミュレーションにより評価**できることが示された

今後の課題

- ・トレーサー試験結果より熱分散にかかわるパラメータの適正評価とシミュレーションへの反映
- ・年間サイクル検討に必要なモニタリングデータの蓄積とシミュレーションへの反映
- ・システム効率が最高となるような適正な地下水流動管理条件をシミュレーションで評価 19

おわり

ご清聴ありがとうございました。

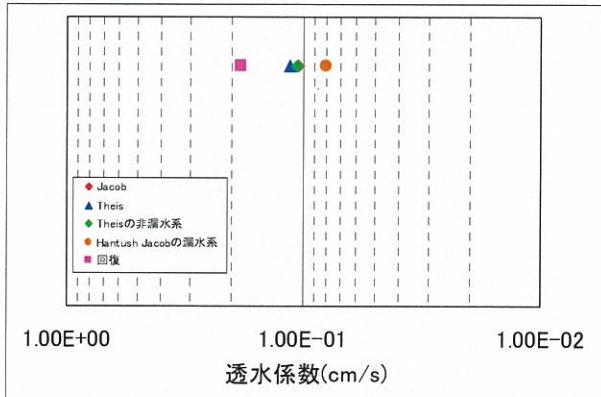
水理特性（揚水試験解析結果）

透水係数

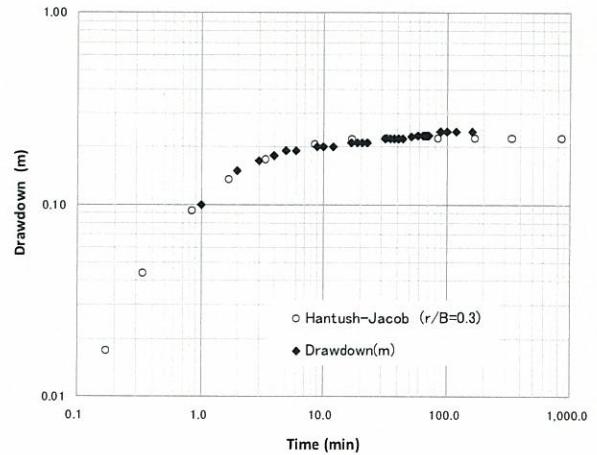
- 第一帯水層、第二帯水層で層別揚水試験を実施
- 第一帯水層の透水係数 : $8.06 \times 10^{-2} \text{cm/s}$
- 第二帯水層の透水係数 : $1.83 \times 10^{-2} \text{cm/s}$
- 第一帯水層の比貯留係数 : 0.0005 (1/m)
- 第二帯水層の比貯留係数 : 0.0005 (1/m)

} 透水性が高い

第一帯水層の透水係数解析結果



第二帯水層の透水係数解析結果

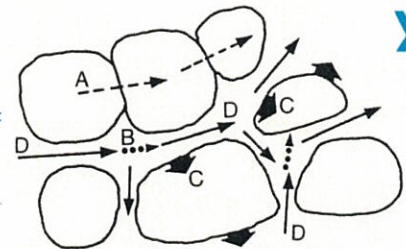
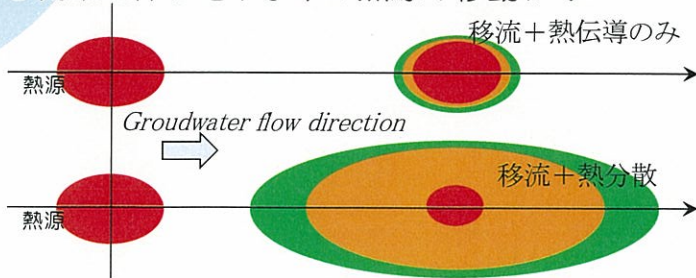


トレーサー試験の実施

熱分散について

地下水中の熱の挙動を精度良くシミュレーションするためには、熱分散や熱対流等の現象を適正にモデル化する必要がある。

- 流動を伴う地下水中の熱源の移動イメージ



- ルートA: 熱伝導による固相中の熱の流れ
- ルートB: 熱伝導による流体相中の熱の流れ
- ルートC: 固相と流体相の接触面を通して行われる熱交換
- ルートD: 液体の流れに伴う機構的分散

- 固相・流体相・気相の混合系熱分散率

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ed} + (\lambda_{md})_{ij} = (\rho C) D_{ij}$$

- λ_{ij} : 熱分散率
- λ_{ed} : 等価熱伝導率
- λ_{md} : 機構的熱分散率
- (ρC) : 体積熱容量
- D_{ij} : 水力学的分散係数

機構的分散・熱伝導の適切なモデル化はシステム設計条件を大きく左右する
⇒ 地盤の熱特性を把握のため

トレーサー試験を実施（塩水：機構的分散、温冷水：熱伝導）

(参考) 熱対流について

熱対流実験

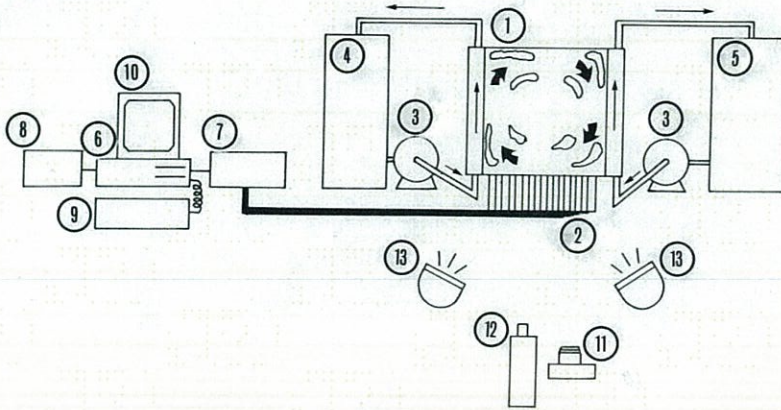


Fig.1 Schematic diagram of experimental system for thermal convection

- ① Saturated porous media, ② Thermocouple, ③ Pump, ④ High temperature water bath, ⑤ Low temperature water bath, ⑥ Computer, ⑦ Data logger, ⑧ Printer, ⑨ Key board, ⑩ Display, ⑪ Camera, ⑫ Video camera, ⑬ Light

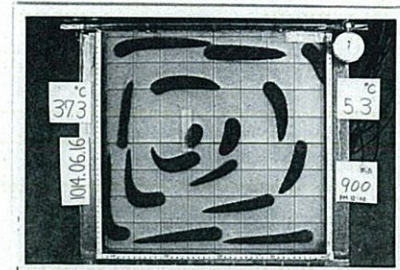


Photo.1 Tracer distribution at elapsed time of 900 min for glass beads with mean diameter of 0.6 mm under temperature difference of 30 °C (Experiment No.5)

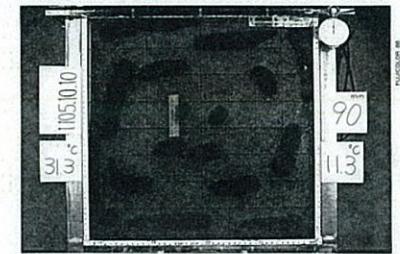


Photo.2 Tracer distribution at elapsed time of 90 min for glass beads with mean diameter of 1.0 mm under temperature difference of 20 °C (Experiment No.6)

藤縄克之: 熱対流を伴う飽和多孔体内熱移動に関する実験的研究, - 多孔体中の熱移動に関する研究(Ⅲ) -, 農土論集, Vol.158, pp.37~46, 1992a.

(参考) 島嶼における塩水浸入数値解析

【シミュレーションの結果】

SIFEC を用いて島嶼における塩水浸入解析を行ったところ

- I. 淡水レンズの形成が確認できた
- II. 予想したような流速ベクトルの分布が得られた



既存の解析コードによる解析結果との比較を行い
S I F E Cの有用性を検討する

- FEFLOW** ・ 世界で数々の実用事例のある解析コード
- ・ 移流分散方程式の解法は 風上有限要素法

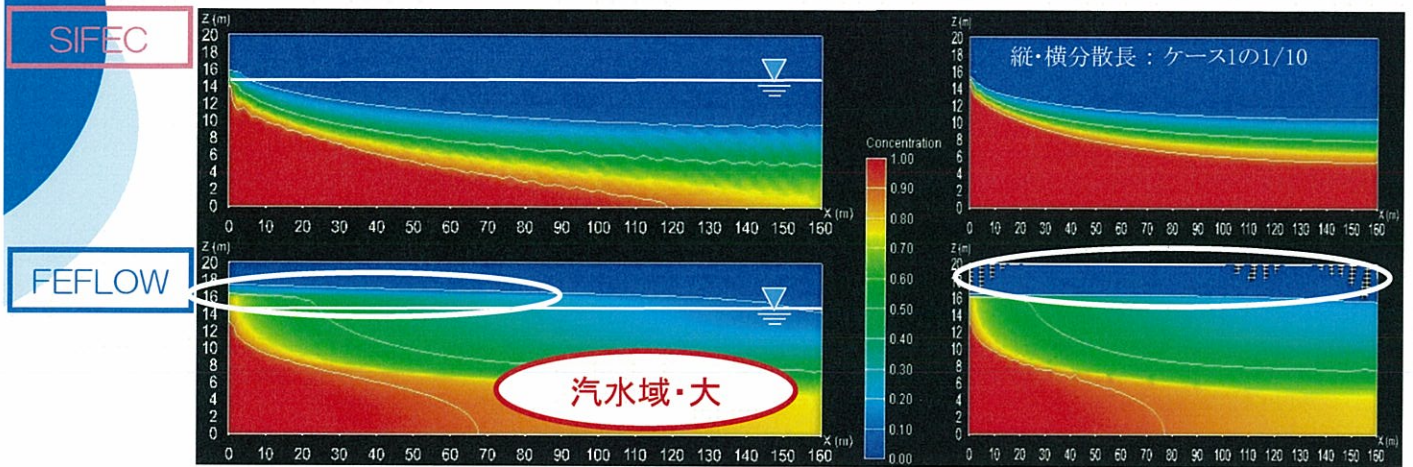
風上法 (Upwind Method)

- ・ 移流項に後方差分を用いる方法
- ・ 解の振動を抑えることができる
- ・ 数値分散に起因する計算誤差の発生

(参考) 島嶼における塩水浸入数値解析

SIFECとFEFLOWとの比較

解析結果(FEFLOW)・塩分濃度



1. 汽水域が広く不規則な濃度分布となった
数値分散の発生
2. 不飽和領域で非現実的な高塩分濃度値, 負の塩分濃度値が算出
数値分散 *アンダーシュートの発生*
3. 解析に用いるパラメータ値に制限