

2023年度成果報告会 プログラムNo.3

再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減 技術開発/高度化・低コスト化のための共通基盤 技術開発/オープンループ方式地中熱利用にお ける最適設計方法の研究開発

発表日：2024年1月31日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名：(国)東海国立大学機構 岐阜大学 大谷具幸

*団体名：(国)東海国立大学機構 再委託：(株)日建設計総合研究所、(一財)GRI財団、(株)テイコク
問い合わせ先 (国)東海国立大学機構 岐阜大学 TEL: 058-230-1111(代表)

1. 目的

- ・ オープンループ方式の地中熱利用システム対象のシステムシミュレーションツールを開発する
- ・ 地下水の揚水可能量・還元可能量を設計段階で予測する手法を開発する

2. 期間

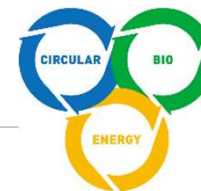
2020年6月 ～ 2024年3月

3. 目標(最終)

- ・ オープンループ方式地中熱利用システムの年間エネルギー消費量を実測値に対して誤差25%以内で予測できるようにする
- ・ 地下水揚水可能量・地下水還元可能量を設計時点で精度よく求める簡易推定手法を開発する

4. 成果・進捗概要

- ・ オープンループ用LCEMモジュールを開発した。その結果、システムの年間エネルギー消費量を設計時では誤差19%以内、コミッショニング時では誤差3%以内で予測できるようになった。
- ・ 既存の地下水資料に基づく透水係数の推定手法を開発した。その結果、実測値の0.5倍～2.4倍の範囲で推定できるようになった。
- ・ 単孔の地盤調査用ボーリング孔を用いて揚水試験と同等の値を測定できる手法を確認した。
- ・ 室内透水実験に基づいて還元井の目詰まり速度を推定する手法を開発した。

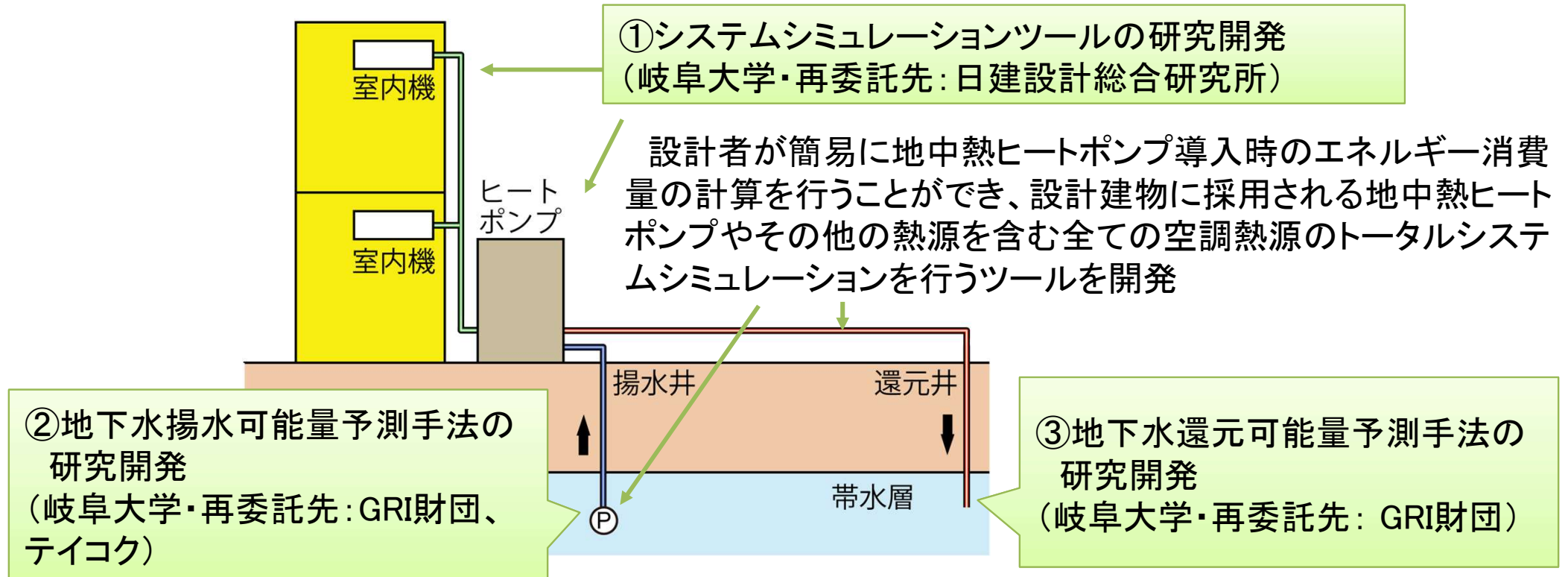


1. 研究開発の背景

先行プロジェクトであるNEDO再生可能エネルギー熱利用技術開発（2014-2018）において、ポテンシャルマップや設計ツールの開発が行われた。しかしながら、オープンループ方式の地中熱利用システムに関して以下の点が未解決課題として残されている。

- オープンループ方式の地中熱利用システムを対象としたシステムシミュレーションツールが存在しない。
- 地下水の揚水可能量・還元可能量を設計段階で予測する手法が存在しない。

2. 研究開発の項目



広域的な透水係数推定手法の研究開発、地盤調査ボーリング孔を利用した透水係数推定手法の研究開発により設計段階で地下水揚水可能量を予測する手法を開発

既存システムの還元井における還元能力の推移とそれに影響を与える地質・地下水条件の把握、帯水層を模した室内透水実験による透水性の変化の把握により、設計段階で地下水還元可能量を予測する手法を開発

3. 研究開発の目標

① システムシミュレーションツールの研究開発

オープンループ方式地中熱利用システムの年間エネルギー消費量を実測値に対して誤差 25 % 以内で予測可能な技術を開発する。加えて、全ての空調熱源のトータルシステムシミュレーションを行うツールを開発する。

② 地下水揚水可能量予測手法の研究開発

1) 広域的な透水係数推定手法の研究開発

推定した透水係数より地下水揚水可能量を設計時点で精度よく求める簡易推定手法を開発する。

2) 地盤調査ボーリング孔を利用した透水係数推定手法の研究開発

一般的なシステムにおいて井水出入口温度差を設計時点の $\pm 4^{\circ}\text{C}$ に対して実測値を誤差25%以内、すなわち $\pm 3^{\circ}\text{C}$ から $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の間に抑えるための地下水揚水可能量簡易推定手法を開発する。

③ 地下水還元可能量予測手法の研究開発

地下水還元可能量を設計時点で精度よく求める簡易推定手法を開発する。

4. 研究開発のスケジュール

研究開発項目	担当	2020				2021				2022				2023							
		1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q				
①システムシミュレーションツールの研究開発	東海国立大学機構、再委託: 日建設計総合研究所			ツール開発						UI作成・精度検証											
②地下水揚水可能量予測手法の研究開発 1)広域的な透水係数推定手法の研究開発 2)地盤調査ボーリング孔を利用した透水係数推定手法の研究開発	東海国立大学機構、再委託: GRI財団、テイコク			大阪平野で開発						濃尾平野で検証											
				フィールドAで開発						フィールドB, Cで検証											
③地下水還元可能量予測手法の研究開発	東海国立大学機構、再委託: GRI財団			大阪平野で開発						濃尾平野で検証											
				室内浸透実験																	

→ 当初計画
 → 実施済
 → 実施中

5. 研究開発の内容

①システムシミュレーションツールの研究開発

LCEMツール

オープンループ地中熱タイプ03:完全混合型水蓄熱槽+水位変化あり(公開予定)

初期化スイッチ	1:初期値 0:算出	計算開始
外気条件	計算開始行	59
乾燥温度 [°C]	計算終了行	59
相対湿度 [%]	現在計算中の行	59
絶対湿度 [kg/kg]	【計算状況の詳細】	非表示
露点温度 [°C]	計算中の日時	
エンタルピー [kJ/kg]	進捗率 [%]	
飽和水蒸気圧 [Pa]	計算回数	
水蒸気分圧 [Pa]	収束判定	

入力データ		出力データ	
乾燥温度 [°C]	冷房モード	冷房モード	2.00
相対湿度 [%]	HP製造熱量kW	HP製造熱量kW	-10.74
運転指令	HP部分負荷率	HP部分負荷率	0.19
運転モード	HP電力消費量kW	HP電力消費量kW	2.08
井水流量	井水ポンプ消費電力kW	井水ポンプ消費電力kW	0.25
日付	2018/1/3	日付	2018/1/3
室内側要求負荷kW	地中熱HP COP	地中熱HP COP	5.16
室内温度		室内温度	
室内湿度		室内湿度	
井水温度 [°C]		井水温度 [°C]	
熱源水入り温度 [°C]		熱源水入り温度 [°C]	
熱源水入り温度 [°C]		熱源水入り温度 [°C]	
その他井水利用量 L/min		その他井水利用量 L/min	

室内条件	
乾燥温度 [°C]	24.5
相対湿度 [%]	47
絶対湿度 [kg/kg]	0.0009
露点温度 [°C]	9.1
エンタルピー [kJ/kg]	28.9
飽和水蒸気圧 [Pa]	3071
水蒸気分圧 [Pa]	144
夏一次側二次側流体出口温度差 K	5.0
冬一次側二次側流体出口温度差 K	5.0
コイル入口温度(設定室温) °C	
冷房時	26
暖房時	22

③外気条件(固定)	
日射条件	
外気乾燥温度 °C	4.7
法線面直射日射量 (W/m²)	-
水平面天空日射量 (W/m²)	-
日時	2018/1/3 0:00

③井水温度条件	
エラー状態	0
合計循環水量 L/min	45.0
井水出口温度 °C	18.1
循環水入口温度 °C	14.4
外気乾燥温度 °C	4.7
法線面直射日射量 (W/m²)	-
水平面天空日射量 (W/m²)	-
日時	2018/1/3 0:00

③井水循環ポンプ	
エラー状態	0
運転状態	0:停止 1:運転
運転モード	0:停止 1:冷房 2:暖房
水量 L/min	45
利用水量	191.0
井水層内温度 °C	15.18
井水層内水量 m³	353.05
ポンプ入口温度 °C	18.11

③井水層(完全混合)	
エラー状態	0
運転状態	0:停止 1:運転
運転モード	0:停止 1:冷房 2:暖房
水量 L/min	0
利用水量	190.00
井水層内温度 °C	15.18
井水層内水量 m³	353.05

③地中熱HP	
エラー状態	good
運転状態	0:停止 1:運転
運転モード	0:送風 1:冷 2:暖
要求処理負荷 [kW]	-10.7
Δ(水入口空気温度 [°CDB])	22.0
Δ(水入口湿度温度 [°CWB])	18.5
外気乾燥温度 [°CDB]	4.7
熱源水入り温度 [°C]	15.2
熱源水入り温度 [°CDB]	14.4
水量 [L/min] 春	190

③境界条件	
エラー状態	good
運転状態	0:停止 1:運転
運転モード	0:送風 1:冷 2:暖
室内側要求処理負荷 [kW]	-10.7
要求処理負荷 [kW]	-10.7
Δ(水入口空気温度 [°CDB])	22.0
Δ(水入口湿度温度 [°CWB])	18.5
外気乾燥温度 [kg/kg]	0.0116
Δ(水入口湿度温度 [°CWB])	18.5
外気乾燥温度 [°CDB]	4.7
相当配管長 [m]	5
分岐管相当配管長 [m]	5
内外機高低差 (室外機-室内機)	5

別途中水利用によるポンプの発停制御を追加。

水位変化によるポンプ稼働条件	
水位低下時ポンプ強制稼働ON :1	0

その他井水利用運転条件: 中水利用など	
運転指令 0:停止 1:運転	1
中水利用水量 L/min	2

井水温度条件

井水ポンプ

井水層

地中熱HP

境界条件

↑出力データ

↑入力データ
(実測値データ使用)

5. 研究開発の内容

①システムシミュレーションツールの研究開発

ヒートポンプと揚水ポンプ年間消費電力量のLCEM推定値の実測値に対する誤差

	ヒートポンプ消費電力量		揚水ポンプ消費電力量		年間合計消費電力量	
	チューニング前	チューニング後	チューニング前	チューニング後	チューニング前	チューニング後
名古屋サイト	-16%	4%	-48%	-7%	-12%	3%
四日市サイト	-26%	-4%	15%	11%	-19%	-1%
岐阜サイト	-7%	-1%	-33%	-3%	-12%	-1%

①ヒートポンプ消費電力量の誤差の主な要因

- ・室内設定温度が夏期、冬期一定運用でない+実機の部分負荷時の消費電力補正係数がメーカー特性とやや異なる(LCEMはメーカーの理想運転を模擬している)。

②揚水ポンプ消費電力量の誤差の主な要因

- ・LCEM上は理想運転で動くが、現地では実揚程が設計値とずれが生じ、消費電力が異なると推測

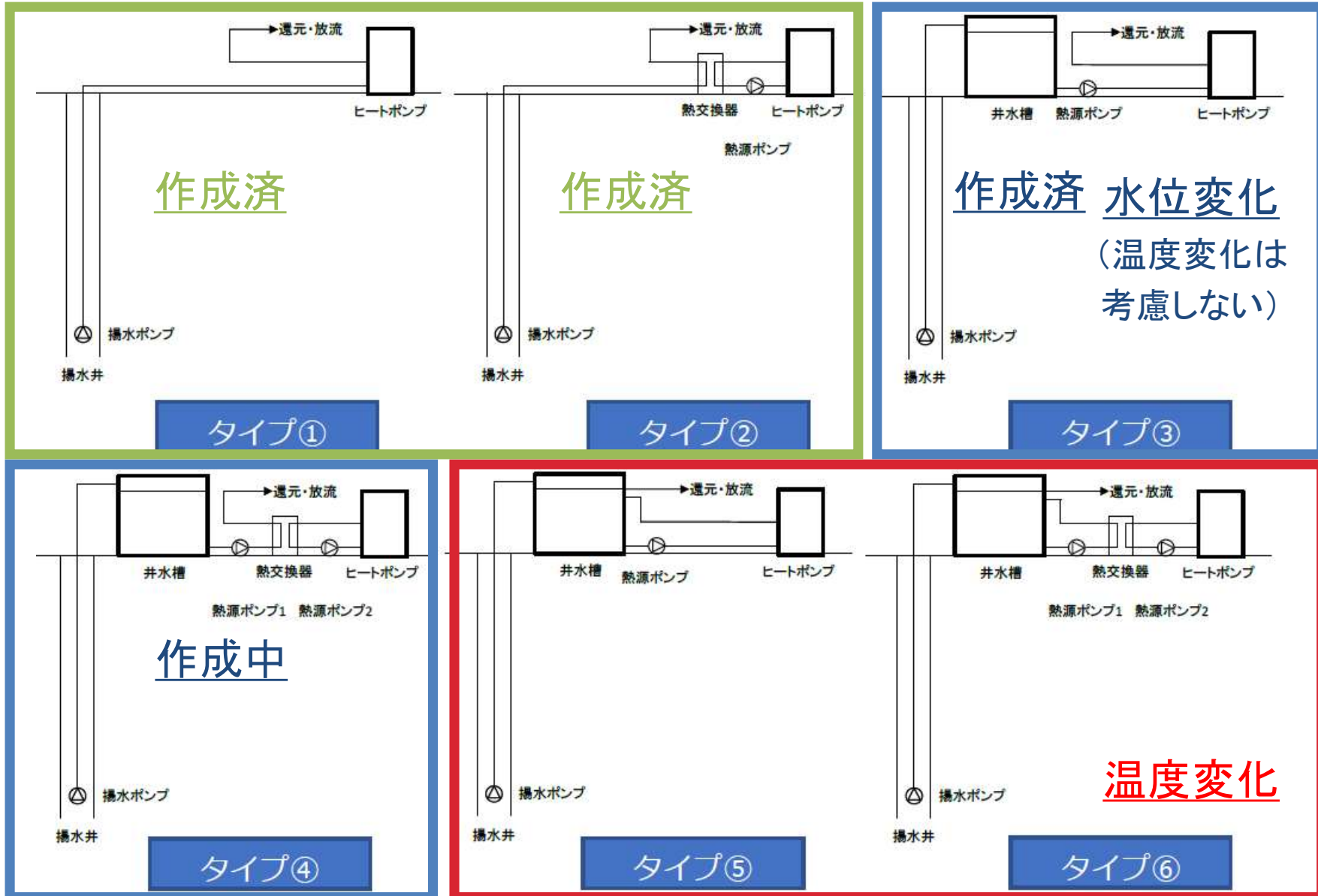
上記結果より、チューニングを実施しない場合においても、システム年間誤差はいずれも25%以内となることがわかった。運用後にはチューニングをすることで、更にシミュレーション精度が上がる。

→LCEMによる推定値は実測値と比べて消費電力量が小さめに出る傾向があるため、事前設計段階では10~20%程度増加する見込みで試算しておけば安全側だと言える。計算精度においては運用後のコミッショニングにてチューニングを実施されることが望ましい。

5. 研究開発の内容

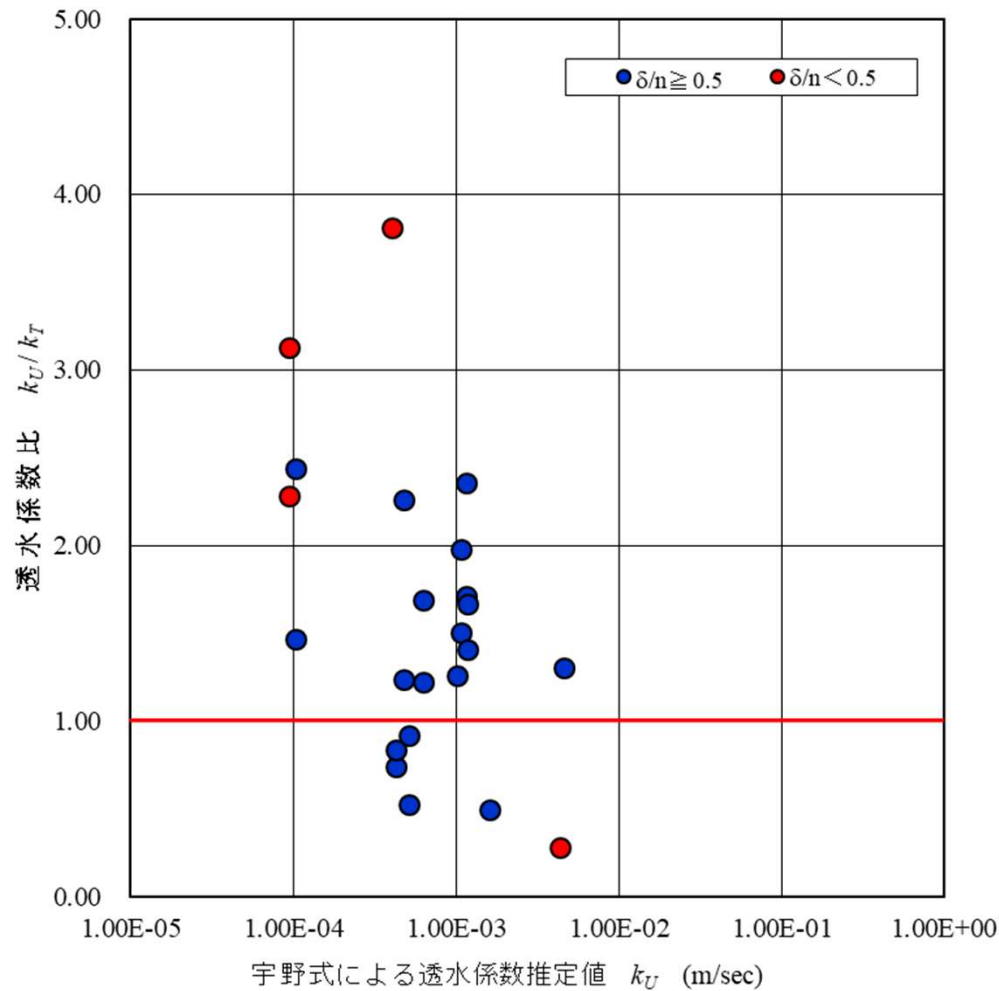
①システムシミュレーションツールの研究開発

井水槽の種類：大きく2パターン(タイプ①～④と⑤～⑥)



5. 研究開発の内容 ②地下水揚水可能量予測手法の研究開発

1) 広域的な透水係数推定手法の研究開発 全国地下水資料台帳に基づく検討



- 揚水井中心より1mにおけるレイノルズ数 Re が10以下で、かつ揚水量 Q が最小の資料を抽出する。
- $9.5 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-3}$ m/sの宇野式による透水係数推定値 k_U と、0.3~3.8の透水係数比 k_U/k_T が算定される。
- ストレーナ開口率 δ と帯水層の間隙率 n の相違が大きいほど大きな井戸損失が生じるので、ストレーナ開口率 δ と帯水層の間隙率 n の比である δ/n が0.5を下回るデータを除外する。
- $1.0 \times 10^{-4} \sim 4.6 \times 10^{-3}$ m/sの宇野式による透水係数推定値 k_U と、0.5~2.4の透水係数比 k_U/k_T が算定される。

5. 研究開発の内容

②地下水揚水可能量予測手法の研究開発

2) 地盤調査ボーリング孔を利用した透水係数推定手法の研究開発

フィールド名	実施地点	実施年度
フィールドA	三重県四日市市	2021
フィールドB	岐阜県大垣市	2022
フィールドC	京都府八幡市	2022

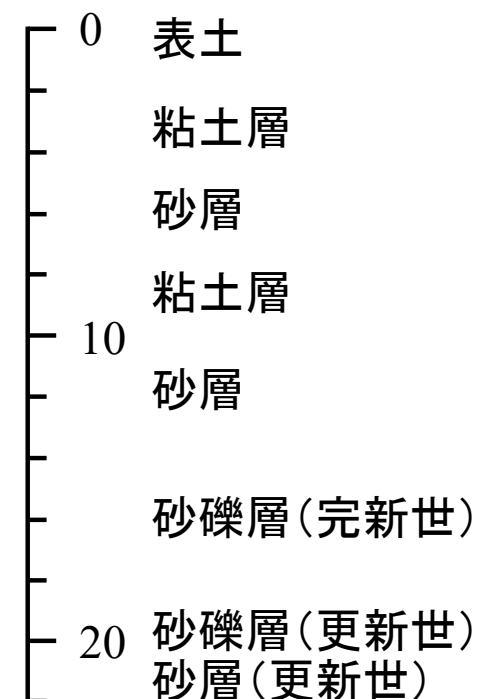
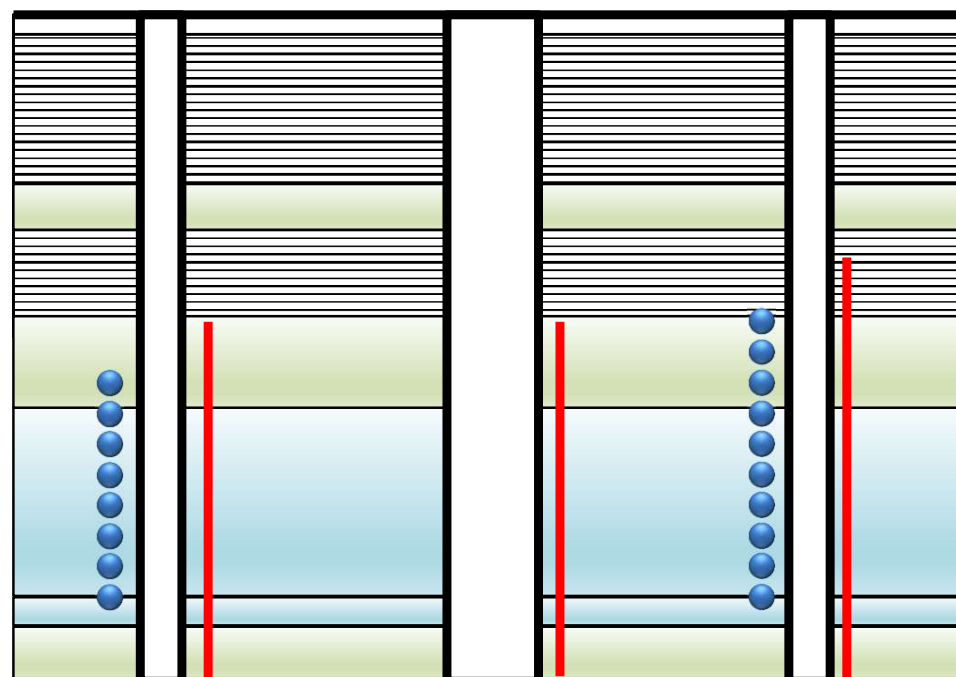
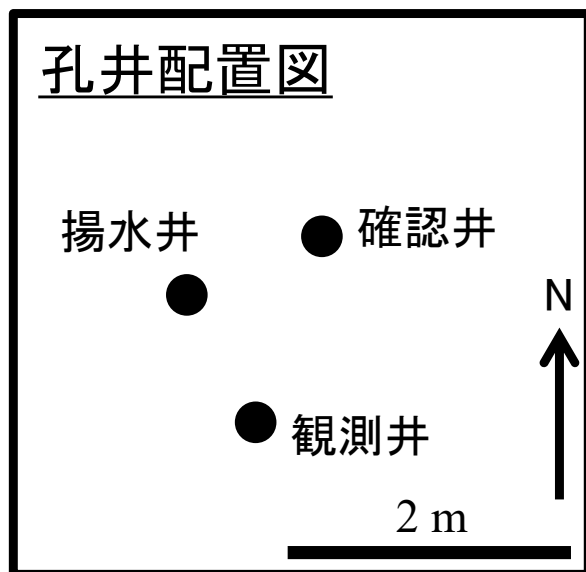
孔井断面図(フィールドC)

観測井

揚水井

確認井

GL-m



● 現場透水試験実施地点

| スクリーン

5. 研究開発の内容

②地下水揚水可能量予測手法の研究開発

2) 地盤調査ボーリング孔を利用した透水係数推定手法の研究開発

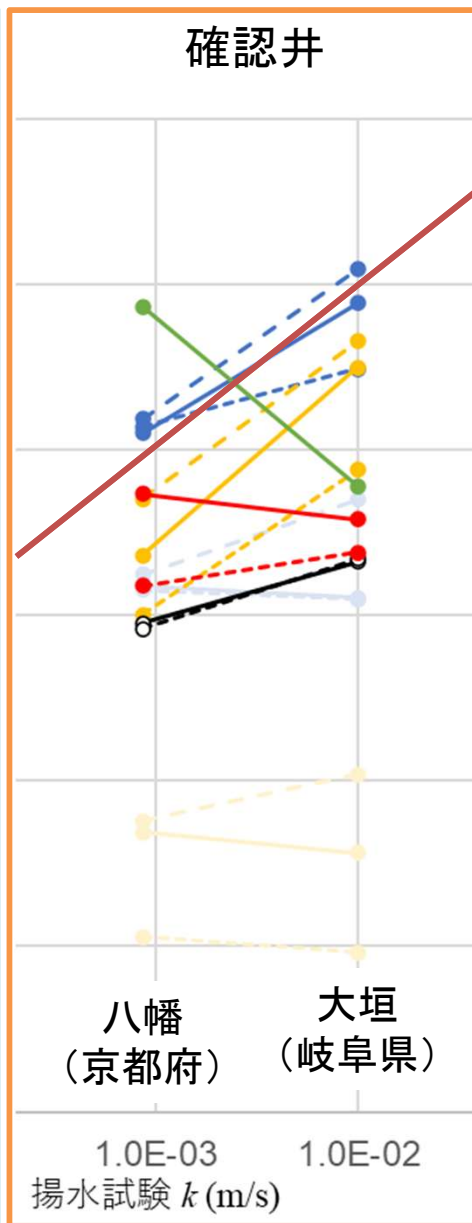
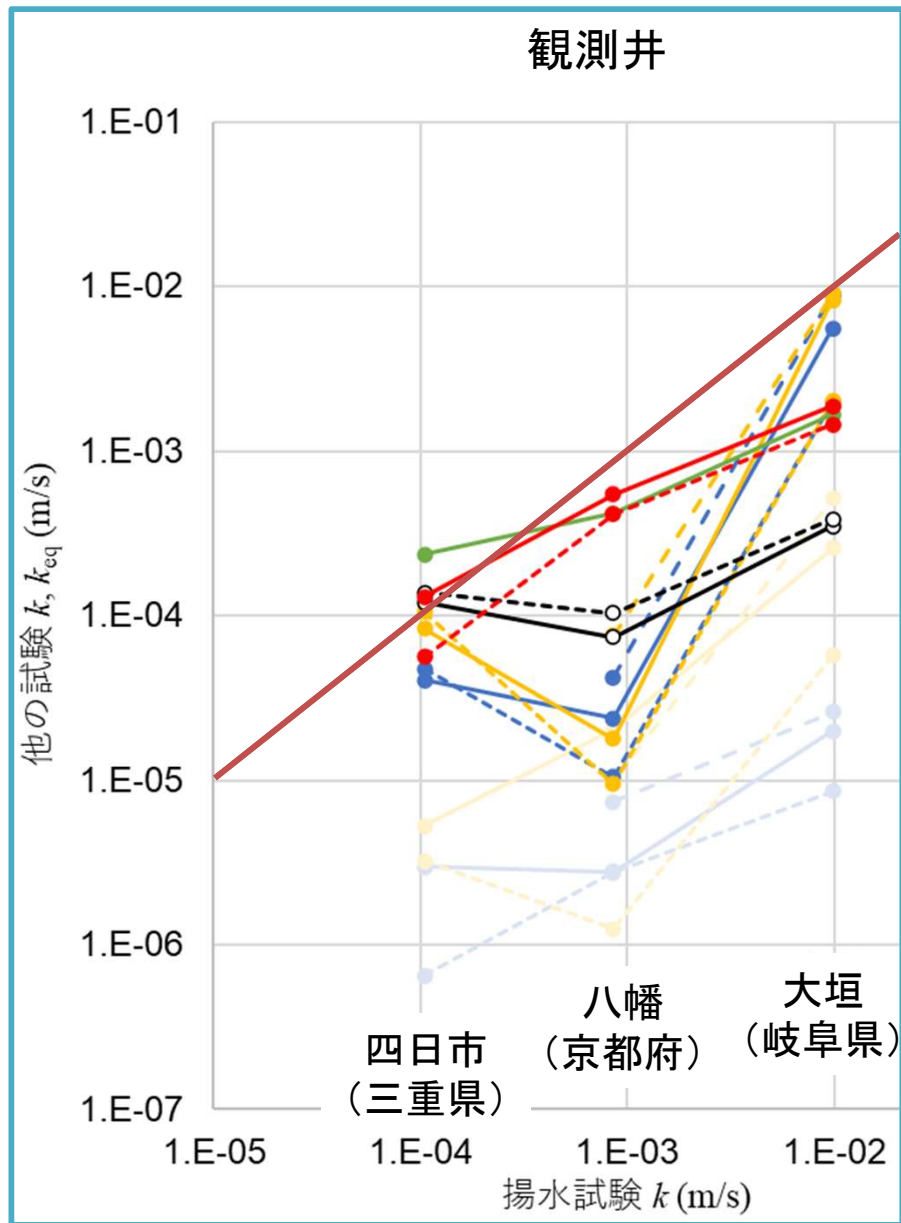
種別	掘削方法	掘削径(仕上げ)	コア試料	ストレナ深度	試験内容
水利用井の掘削手法 観測井	ロータリーバイブレーション(無水掘り)	φ116mm(VP65)	オールコア φ86mm(大垣・八幡) φ52mm(四日市)	(大垣) 31~40m (四日市) 10~14m (八幡) 12~20m	単孔式透水試験 室内土質試験 フローメータ検層 ※四日市: SPT
揚水井	ロータリーバイブレーション(清水掘り)	φ179mm(VP100) (大垣・八幡) φ283mm(VP150) (四日市)	採取なし	(大垣) 31~40m (四日市) 10~14m (八幡) 12~20m	揚水試験
一般的な地盤調査ボーリング 確認井	ロータリー(泥水掘り)	φ116mm(VP65)	φ66mm オールコア (SPT実施箇所についてはペネ試料)	(大垣) 28~40m (四日市) 5~14m (八幡) 10~20m	単孔式透水試験 室内土質試験 フローメータ試験 密度検層 ※四日市・八幡: SPT

SPT: 標準貫入試験

5. 研究開発の内容

②地下水揚水可能量予測手法の研究開発

各種手法による透水係数 k の測定値



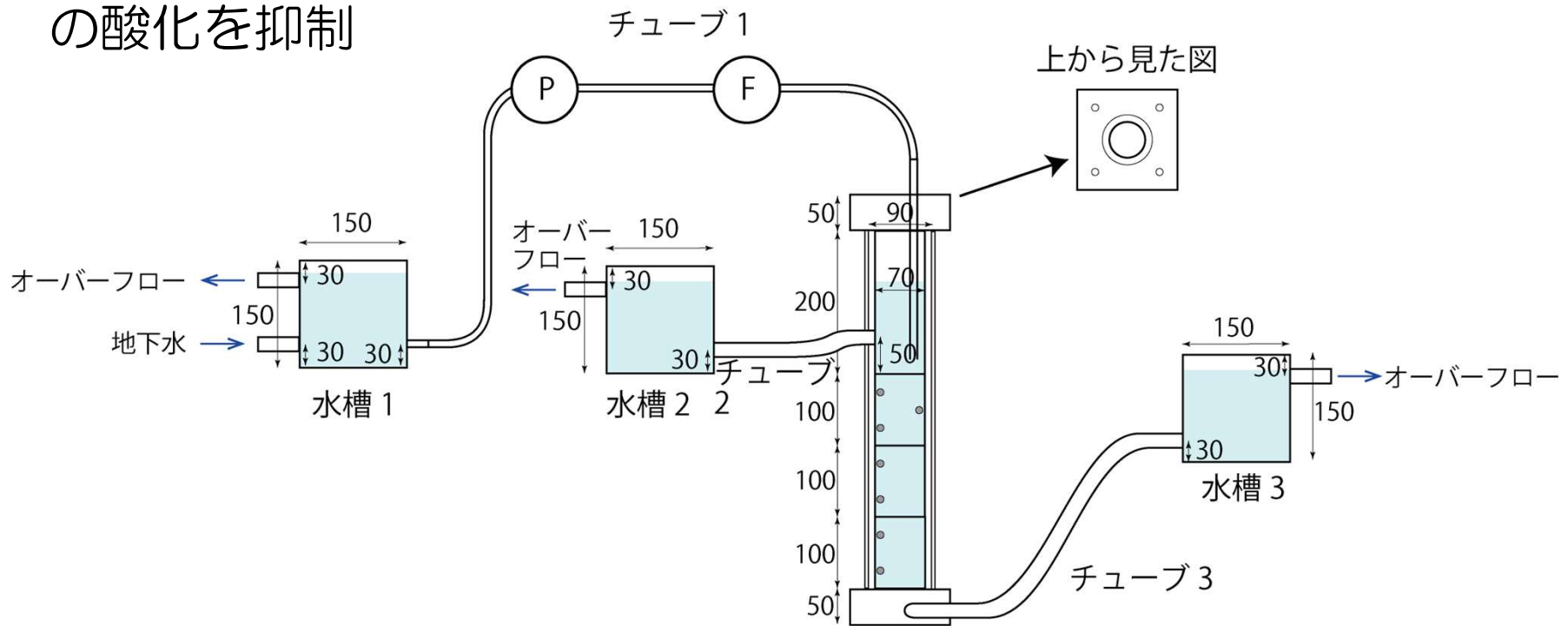
現場透水試験（ピエゾメータ法・非定常法）による測定値が、八幡の観測井を除けば揚水試験による値によく一致する

- 現場透水試験_ピエゾメータ法 (定常法) k_{eq1}
- 現場透水試験_ピエゾメータ法 (定常法) k_{eq2}
- 現場透水試験_ピエゾメータ法 (定常法) k_{eq3}
- 現場透水試験_チューブ法 (定常法) k_{eq1}
- 現場透水試験_チューブ法 (定常法) k_{eq2}
- 現場透水試験_チューブ法 (定常法) k_{eq3}
- 現場透水試験_ピエゾメータ法 (非定常法) k_{eq1}
- 現場透水試験_ピエゾメータ法 (非定常法) k_{eq2}
- 現場透水試験_ピエゾメータ法 (非定常法) k_{eq3}
- 現場透水試験_チューブ法 (非定常法) k_{eq1}
- 現場透水試験_チューブ法 (非定常法) k_{eq2}
- 現場透水試験_チューブ法 (非定常法) k_{eq3}
- 粒度組成 (Creager) k_{eq1}
- 室内透水試験 k_{eq1}
- 室内透水試験 k_{eq2}
- フローメータ試験 k
- フローメータ試験 k_{eq1}

5. 研究開発の内容 ③地下水還元可能量予測手法の研究開発

室内透水実験装置の概要

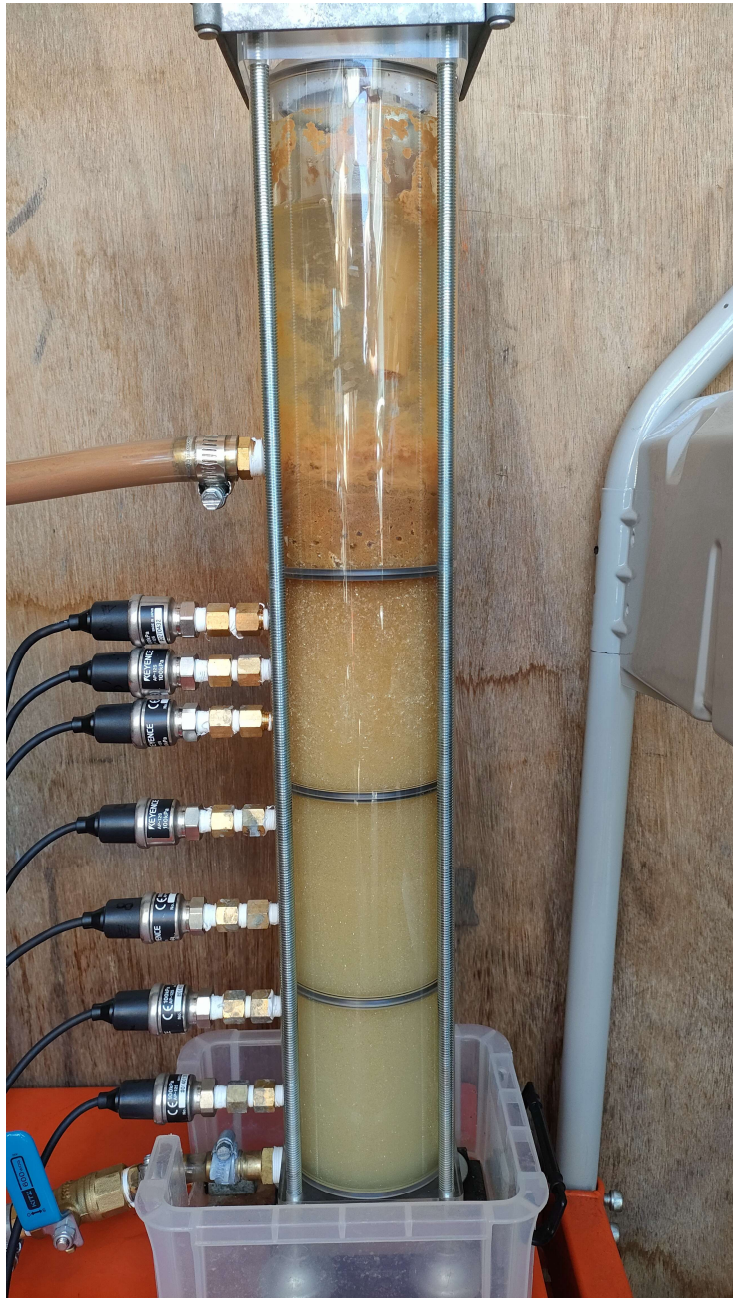
- カラム上部を開放することによりガスの放出を容易にする
- カラム上部にオーバーフロー管を設置し、試料内に投入する地下水の酸化を抑制



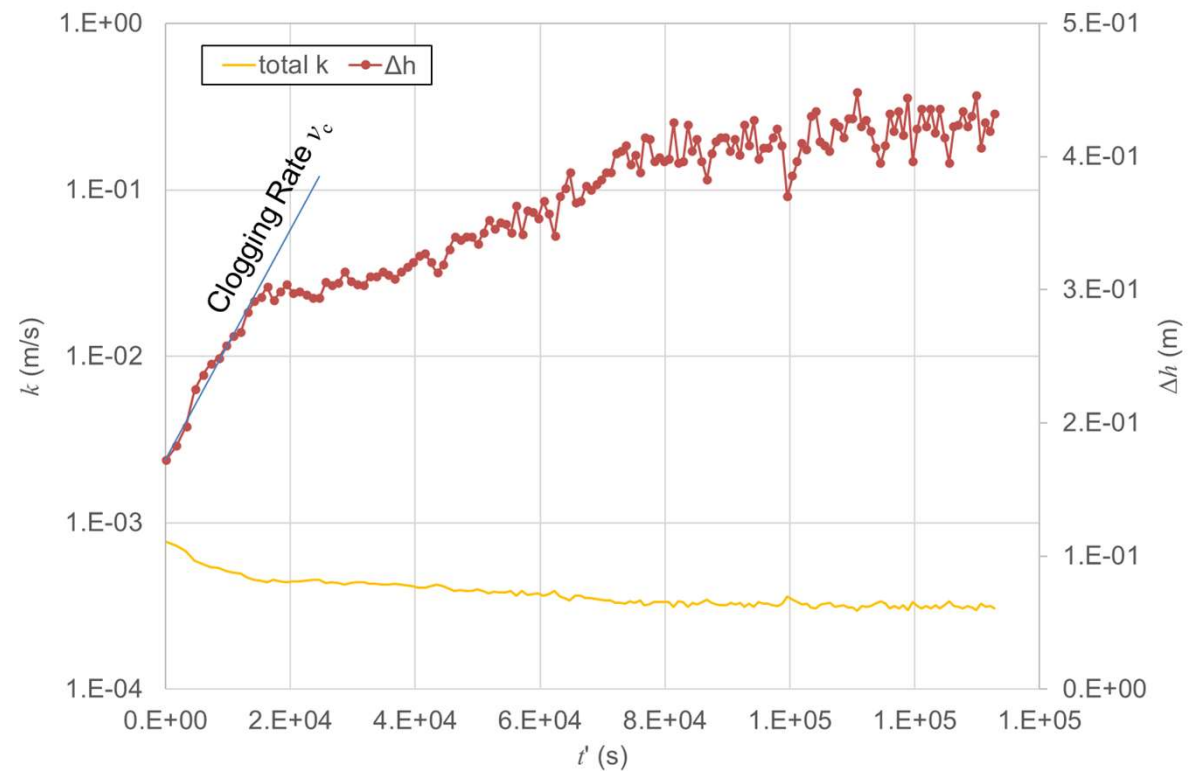
チューブ 2, 3 は配管抵抗を小さくするために、内径が大きい方が望ましい。
水槽 1, 2, 3 は 15 cm 角の立方体

- 圧力センサ設置用の穴 (P) 送水ポンプ (F) 流量センサ

実験結果 (1)



等流量を仮定したときの k , Δh の変化 (23/8/25-9/1)



5. 研究開発の内容 ③地下水還元可能量予測手法の研究開発

実験結果 (2)

実験条件・目詰まり速度・累積還元量 1 m^3
およびカラム断面積 1 m^2 あたりの Δh の増加量

No.	実施日	Δh (m)	初期流量 Q_{initial} (m^3/s)	目詰まり 速度 v_c (m/s)	$\Delta h / V$ ($1/\text{m}^2$)	$\Delta h / (V/S)$ (-)
1	23/8/1-25	0.172	5.4E-06	3.4E-05	6.3E+00	2.4E-02
2	23/8/25-9/1	0.172	5.4E-06	8.1E-06	1.5E+00	5.8E-03
3	23/9/1-7	0.122	3.3E-06	2.2E-06	6.8E-01	2.6E-03
4	23/9/7-20	0.068	2.4E-06	1.4E-06	5.9E-01	2.3E-03

実験地点における実システムのモニタリング結果では、 $\Delta h / (V/S) = 4.61 \times 10^{-4}$ であり、上の値ははガスによる目詰まりの影響を含む安全側の値を示している。

6. 研究成果の公開

2024年1～2月	オープンループ方式用LCEMモジュールのうち、井水槽を用いないタイプ①、②、および井水槽内での温度変化を考慮しないタイプ③、④のモジュールをホームページ上で公開
2024年度中	オープンループ方式用LCEMモジュールのうち、井水槽内での温度変化を考慮するタイプ⑤、⑥のモジュールをホームページ上で公開
2024年度中	地下水揚水可能量、地下水還元可能量の推定方法に関するマニュアルをホームページ上で公開
2024年度中	研究成果を地中熱利用促進協会ホームページ上で掲載
2024年度 およびそれ以降	各種団体で研究開発成果の普及を図るとともに、新たに得られたデータを用いて各手法の高精度化を継続

7. まとめ

1. オープンループ用LCEMモジュールを開発した。その結果、システムの年間エネルギー消費量を設計時では誤差19%以内、コミッショニング時では誤差3%以内で予測できるようになった。
2. 既存の地下水資料に基づく透水係数の推定手法を開発した。その結果、実測値の0.5倍～2.4倍の範囲で推定できるようになった。
3. 単孔の地盤調査用ボーリング孔を用いて揚水試験と同等の値を測定できる手法を確認した。
4. 室内透水実験に基づいて還元井の目詰まり速度を推定する手法を開発した。