

2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.16

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12月18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. 背景・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. 実施期間

2020年6月 ～ 2024年3月

3. 実施内容・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（システムの年間エネルギー消費量設計時：誤差19%以内、コミッショニング時：誤差3%以内で予測）
- ・ 既存資料に基づく透水係数の推定手法（実測値の0.5倍～2.4倍）を開発
- ・ 単孔の地盤調査用ボーリング孔により透水係数を精度よく測定する手法を確認
- ・ 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

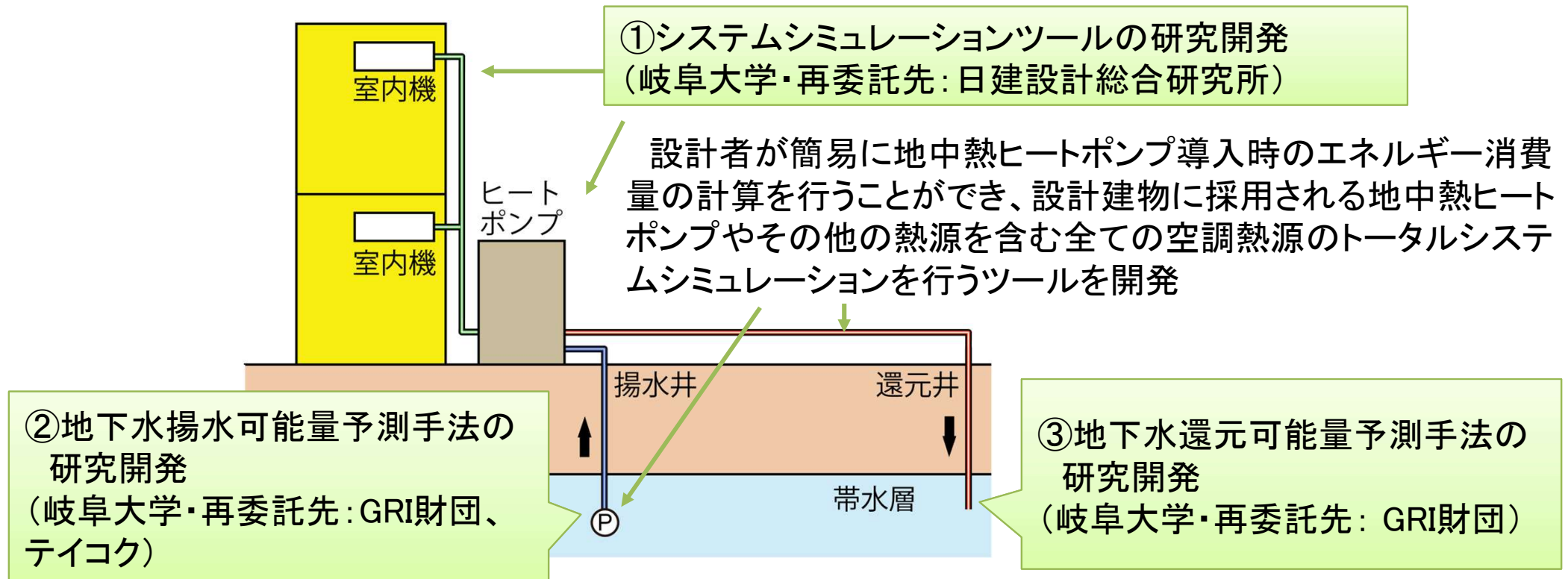


1. 研究開発の背景

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



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. 研究開発の内容

①システムシミュレーションツールの研究開発

LCSEMツール

初期化スイッチ		
1: 初期値	0: 算出	
0		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
湿球温度 [°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]	2.00	冷房モード	
相対湿度 [%]	24.5	HP製造熱量kW	-10.74
運転指令	0.19	HP部分負荷率	0.19
運転モード	2.08	HP電力消費量kW	2.08
井水流量	0.25	井水ポンプ消費電力kW	
日付	2018/1/3		
室内側要求負荷kW	-1.16	地中熱HPCOP	5.16
室内温度	2.0		
室内湿度	5.0		
井水温度 [°C]	14.0		
熱源水入り温度 [°C]	14.0		
熱源水入り温度 [°C]	14.0		
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
湿球温度 [°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井水温度条件	
エラー状態	0
運転モード 0:停止 1:運転	1
運転モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	2
水量 L/min	45
冷却水入口温度 °C	19.11
冷却水温度 °C	14.37
ポンプ入口温度 °C	18.11

冷却水ポンプ制御	
送水制御 0:定速 1:定速+最小吐出圧	2
最高ポンプ効率 %	57
最高効率点流量 L/min	9.24
ポンプ効率 %	20
光熱量消費時の揚程 kPa	209
必要な揚程 kPa	112
実際の周波数 Hz	104
実際の周波数 Hz	300
実際の揚程 kPa	932
消費電力 kW	0.3
流量比(最小吐出圧) Vdr	100.0
冷却水温度 °C	19.1
最高効率点流量 L/min	190
最高効率点揚程 kPa	200
配管特性 指数n	2
PAQ7+R 係数A	18.945
係数B	0
エラーコード(異常発生回数)	0
エラー判定	good

冷却水ポンプ属性	
設計水量 L/min	190
設計揚程 kPa	200
ポンプによる温度上昇 °C	1
定格周波数 Hz	50
上限定周波数 Hz	60
下限定周波数 Hz	30
動力補正係数 aeo	1
動力補正係数 beo	0

夏期補正係数	0.9
冬期補正係数	0.9

③井水温度条件	
エラー状態	0
運転モード 0:停止 1:運転	1
運転モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	2
水量 L/min	0
利用水量	190.00
井水温度 °C	18.1
井水層内水量 m³	353.05

井水層属性	
水層内水量 リットル	353
水量比 %	9.35
水層内混合後温度	15.2
井水温度	19.1
現状水層内温度	15.0

井水層属性	
水層容量 リットル	1000
定格水量 L/min	190
最低水量比 %	0.2
初期水層内温度 °C	15
初期水層容量 リットル	500

夏期補正係数	0.9
冬期補正係数	0.9

③井水温度条件	
エラー状態	0
運転モード 0:停止 1:運転	1
運転モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	2
水量 L/min	0
利用水量	190.00
井水温度 °C	18.1
井水層内水量 m³	353.05

井水層属性	
水層内水量 リットル	353
水量比 %	9.35
水層内混合後温度	15.2
井水温度	19.1
現状水層内温度	15.0

井水層属性	
水層容量 リットル	1000
定格水量 L/min	190
最低水量比 %	0.2
初期水層内温度 °C	15
初期水層容量 リットル	500

夏期補正係数	0.9
冬期補正係数	0.9

③井水温度条件	
エラー状態	0
運転モード 0:停止 1:運転	1
運転モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	2
水量 L/min	0
利用水量	190.00
井水温度 °C	18.1
井水層内水量 m³	353.05

井水層属性	
水層内水量 リットル	353
水量比 %	9.35
水層内混合後温度	15.2
井水温度	19.1
現状水層内温度	15.0

井水層属性	
水層容量 リットル	1000
定格水量 L/min	190
最低水量比 %	0.2
初期水層内温度 °C	15
初期水層容量 リットル	500

夏期補正係数	0.9
冬期補正係数	0.9

③井水温度条件	
エラー状態	0
運転モード 0:停止 1:運転	1
運転モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	2
水量 L/min	0
利用水量	190.00
井水温度 °C	18.1
井水層内水量 m³	353.05

井水層属性	
水層内水量 リットル	353
水量比 %	9.35
水層内混合後温度	15.2
井水温度	19.1
現状水層内温度	15.0

井水層属性	
水層容量 リットル	1000
定格水量 L/min	190
最低水量比 %	0.2
初期水層内温度 °C	15
初期水層容量 リットル	500

夏期補正係数	0.9
冬期補正係数	0.9

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

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
水位低下時ポンプ強制稼働ON	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)

4. 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ため（LCEMはメーカーの理想運転を模擬）

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

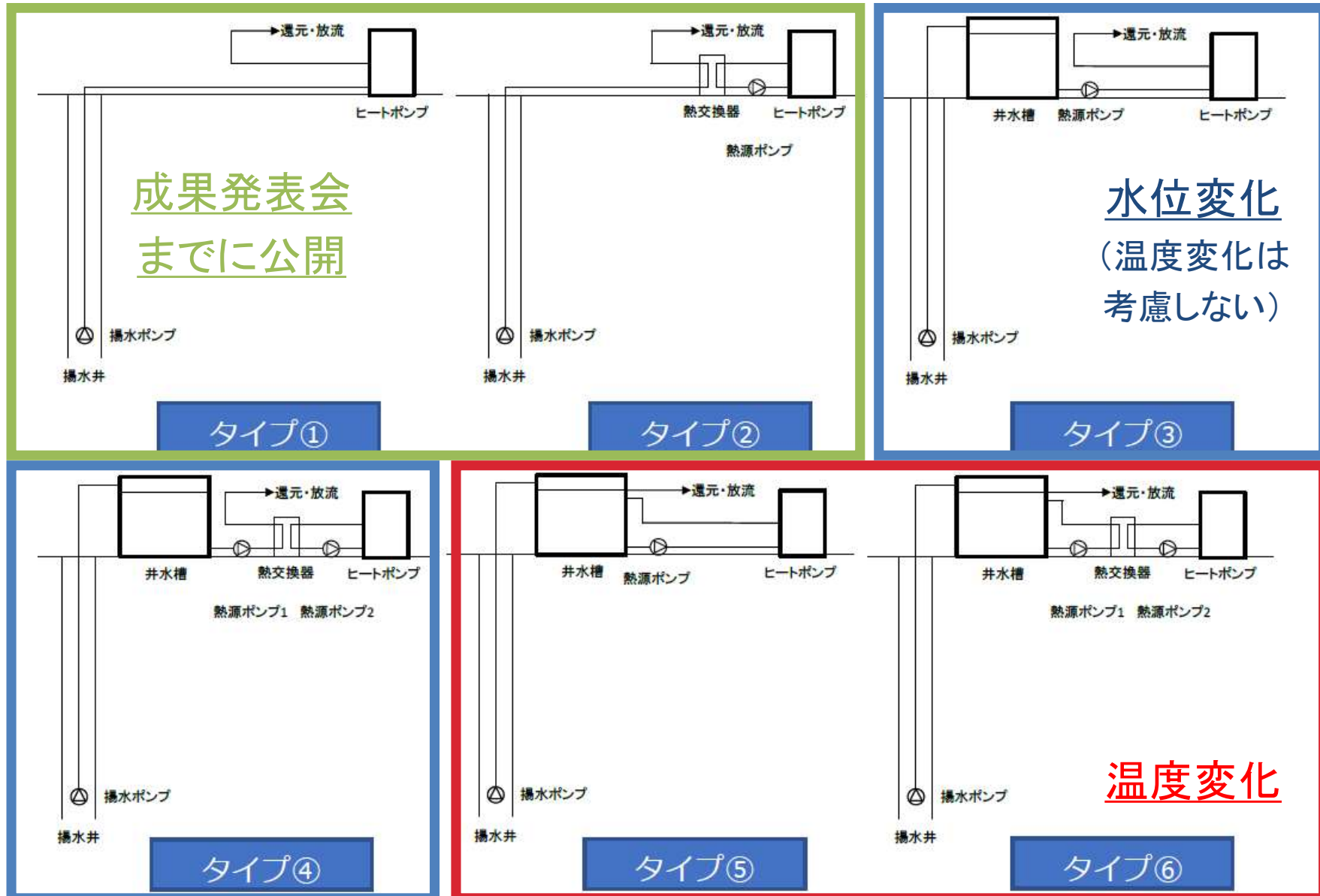
LCEM推定値の実測値に対する誤差： -19% ～ -12% （チューニング前）
-1% ～ 3% （チューニング後）

- LCEMによる推定値は実測値に対して小さいので、事前設計段階では10~20%程度増加する見込むことが望まれる
- 運用後のコミッショニングにてチューニングを実施することが望ましい

4. 研究開発の内容

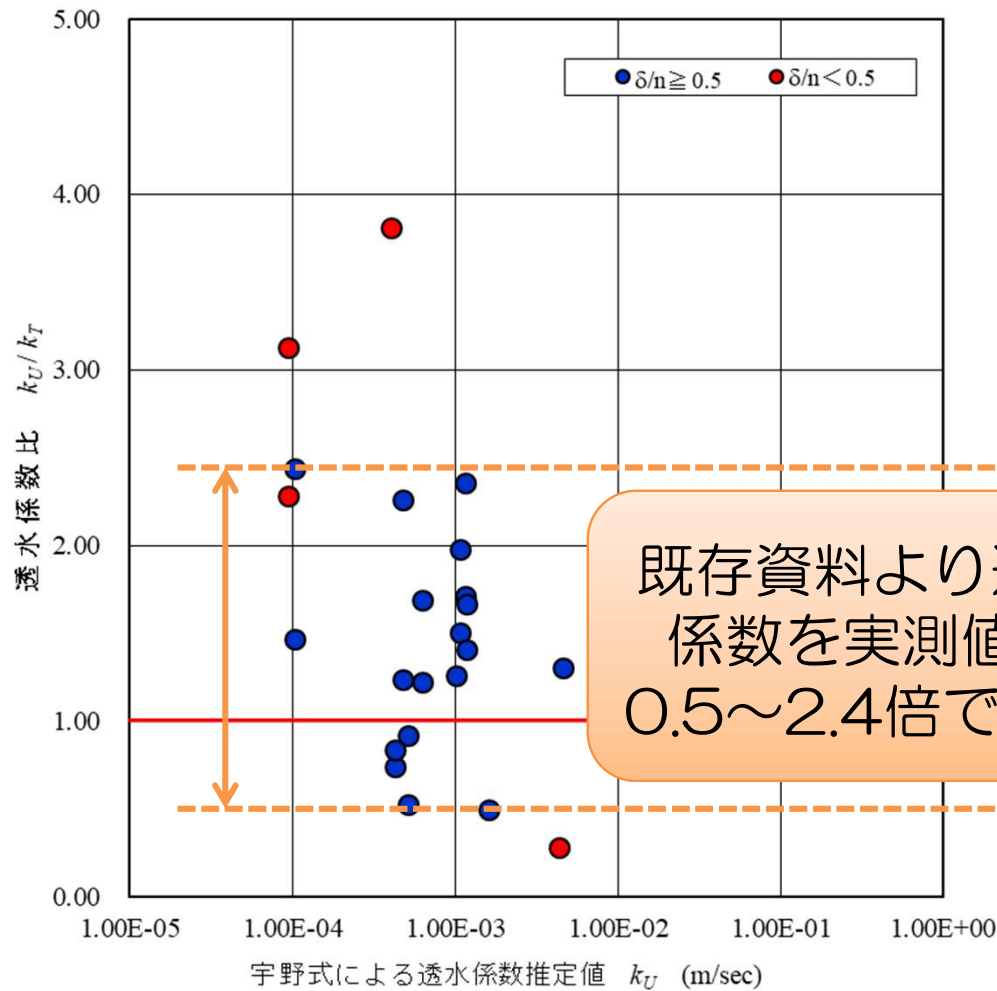
①システムシミュレーションツールの研究開発

①～④: 成果発表会までに公開 ⑤～⑥: 年度内に公開予定



4. 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



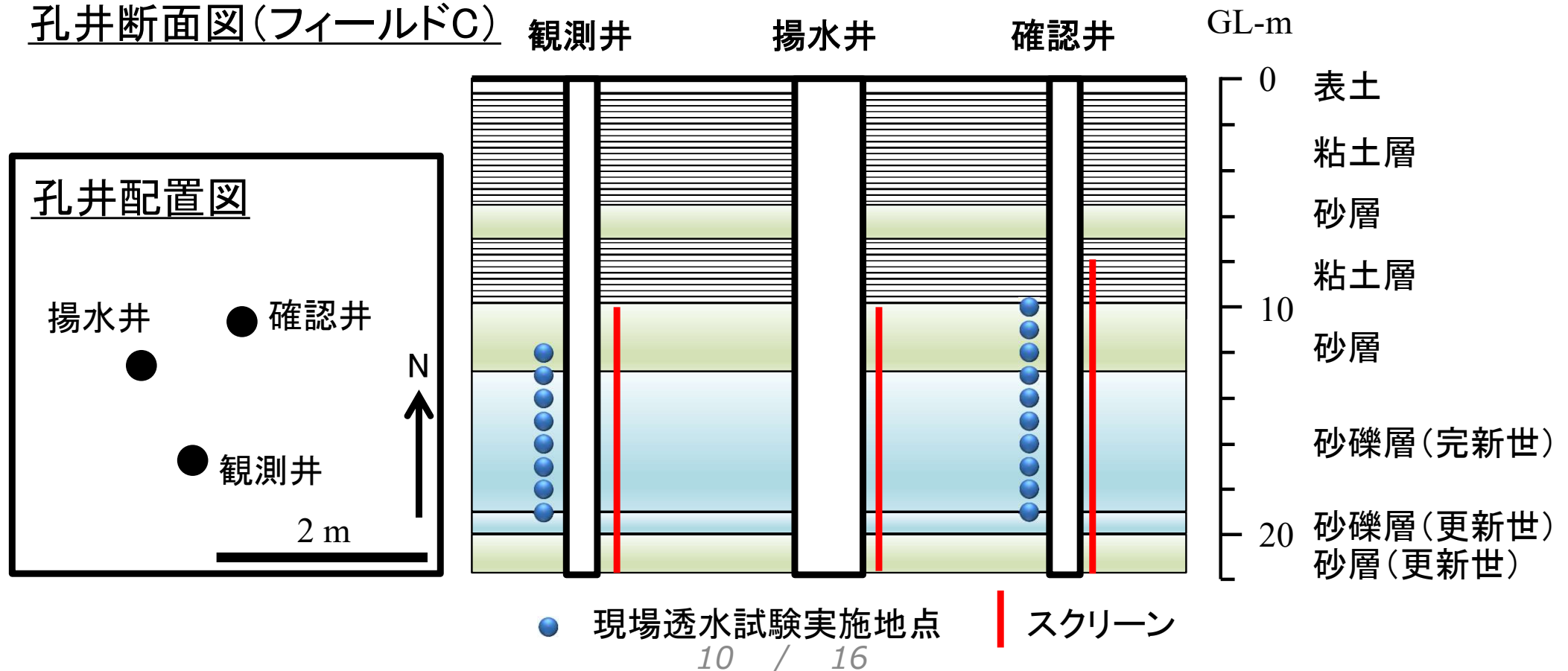
- 揚水井中心より1mにおけるレイノルズ数 Re が10以下で、かつ揚水量 Q が最小の資料を抽出する。
- $9.5 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-3}$ m/sの宇野式による透水係数推定値 k_U と、0.3~3.8の透水係数比 k_U/k_T が算定される。
- ストレータ開口率 δ と帯水層の間隙率 n の相違が大きいほど大きな井戸損失が生じるので、ストレータ開口率 δ と帯水層の間隙率 n の比である δ/n が0.5を下回るデータを除外する。
- $1.0 \times 10^{-4} \sim 4.6 \times 10^{-3}$ m/s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

4. 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)



4. 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

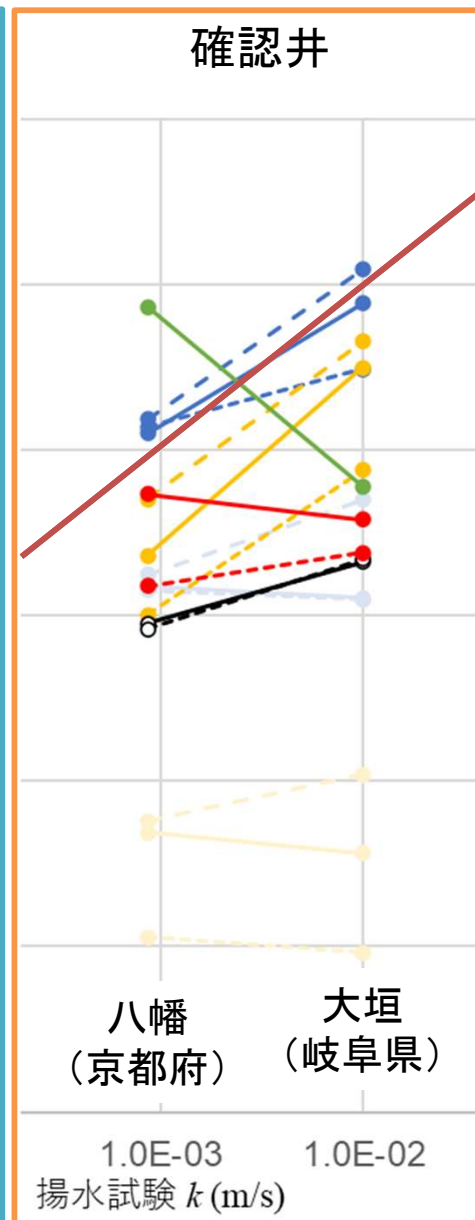
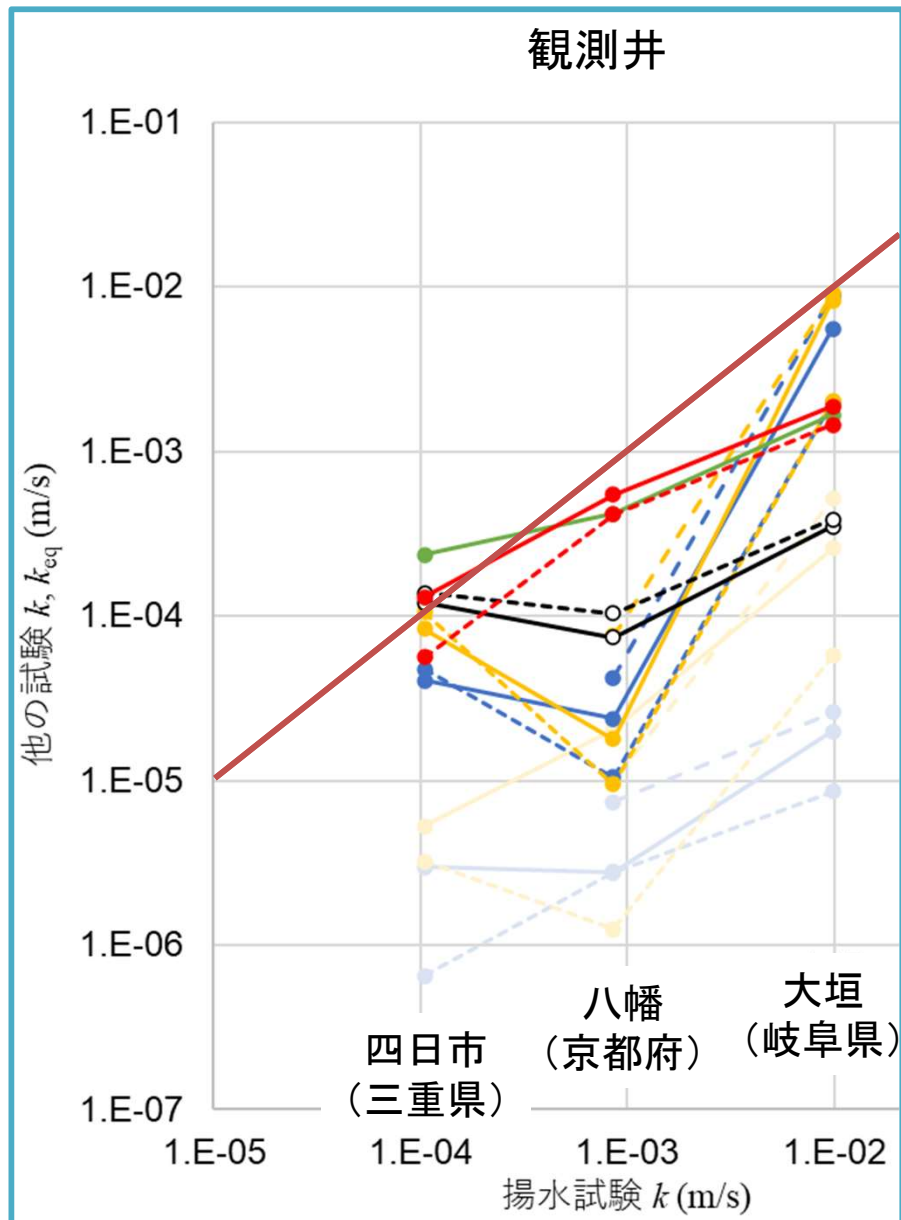
種別	掘削方法	掘削径(仕上げ)	コア試料	ストレナ深度	試験内容
水利用井 観測井	ロータリーバイブレーション(無水掘り)	φ116mm(VP65)	オールコア φ86mm(大垣・八幡) φ52mm(四日市)	(大垣) 31~40m (四日市) 10~14m (八幡) 12~20m	単孔式透水試験 室内土質試験 フローメータ検層 ※四日市: SPT
揚水井	ロータリーバイブレーション(清水掘り)	φ179mm(VP100) (大垣・八幡) φ283mm(VP150) (四日市)	採取なし	(大垣) 31~40m (四日市) 10~14m (八幡) 12~20m	揚水試験
確認井	ロータリー (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

4. 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



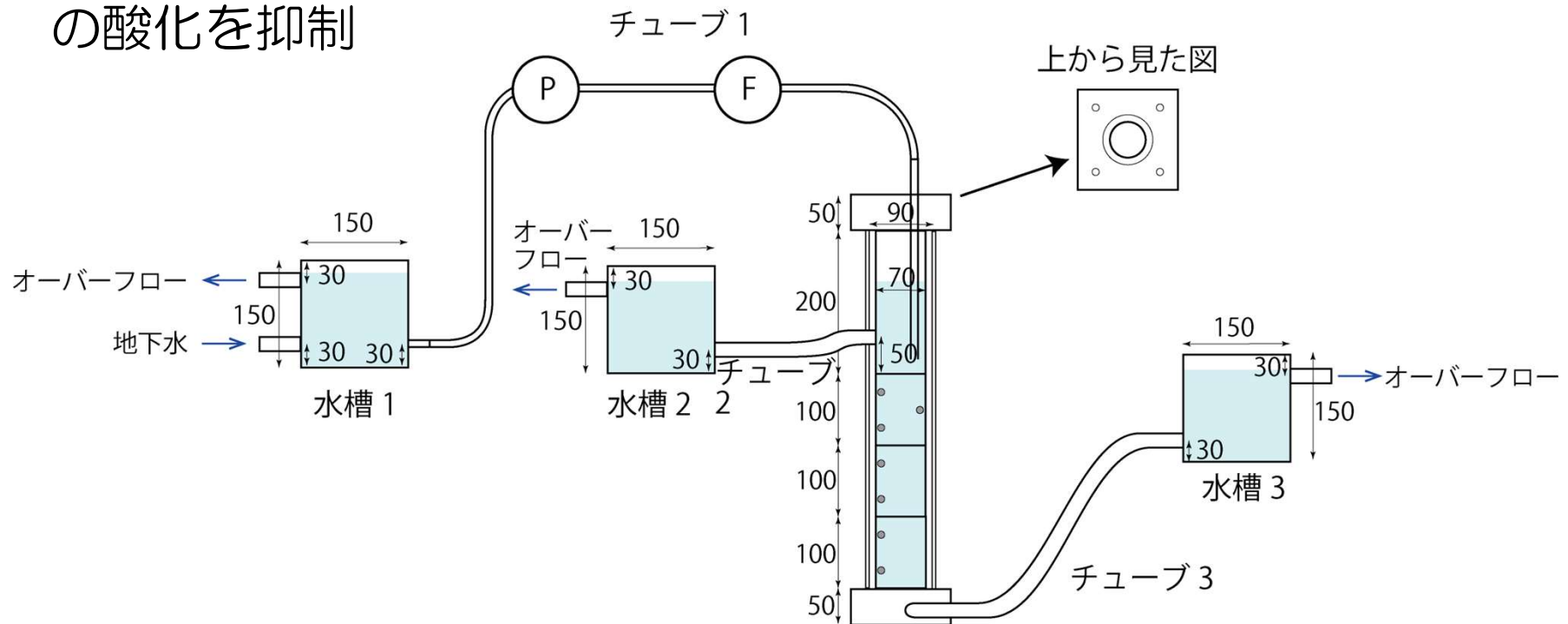
現場透水試験（ピエゾメータ法・非定常法）による測定値が、八幡の観測井を除けば揚水試験による値によく一致する

- 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}

4. 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



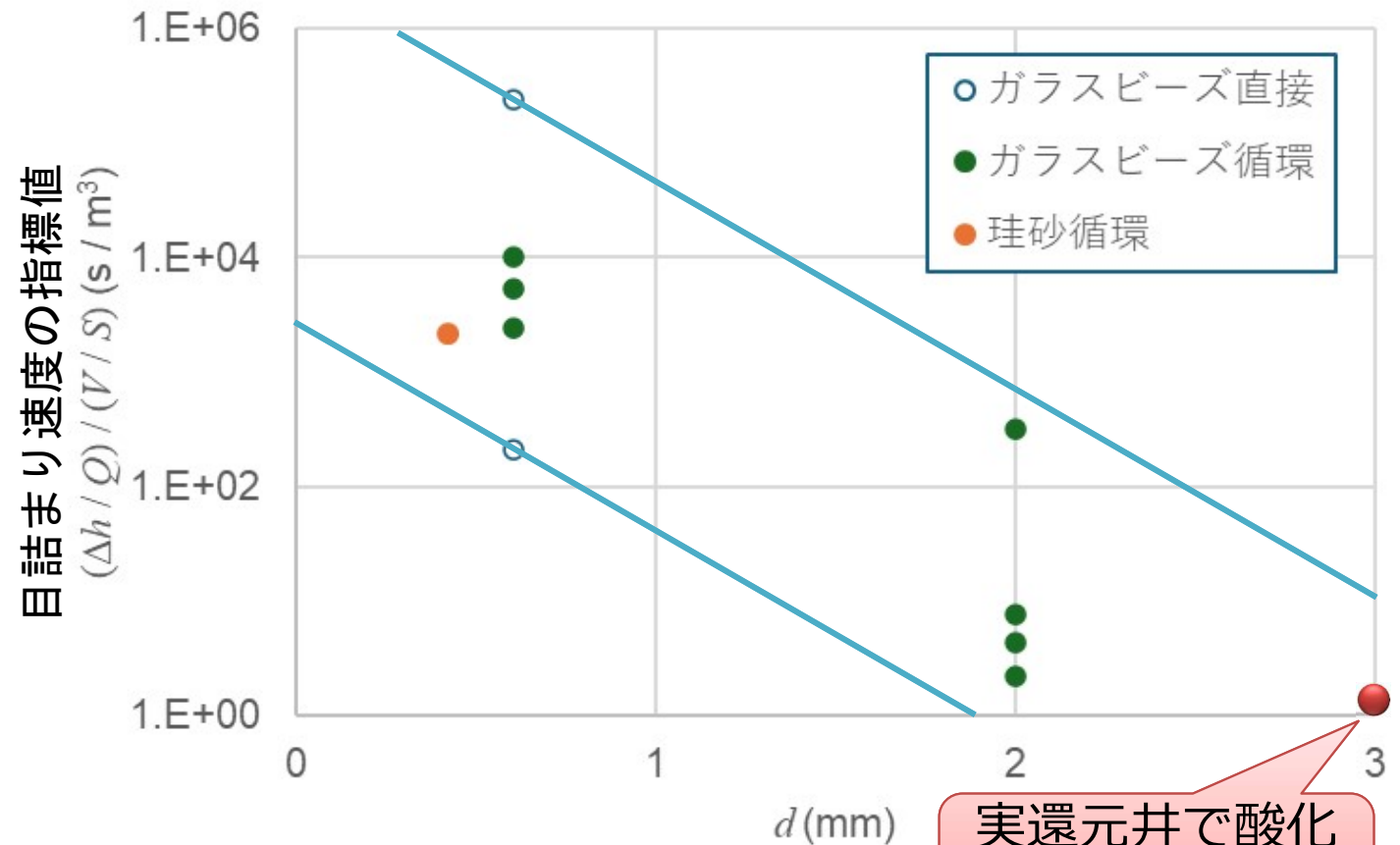
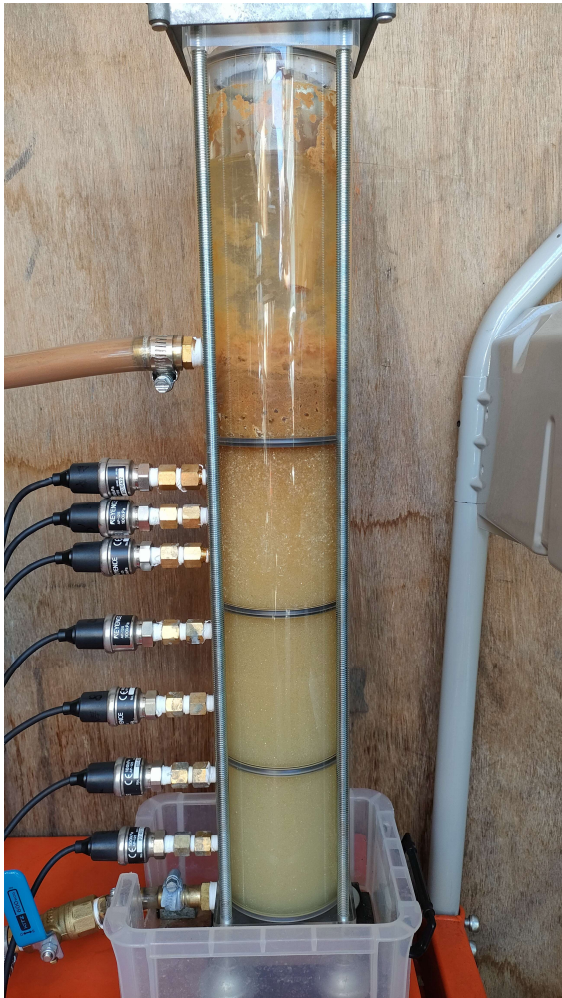
チューブ 2, 3 は配管抵抗を小さくするために、内径が大きい方が望ましい。

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

4. 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



実還元井で酸化
を促進した場合

本実験により、井水の酸化が促進される場合の
目詰まり速度の指標値を推定できることを確認

5. 研究成果の公開

2024年12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	研究成果を中部地中熱利用協議会のセミナーで紹介
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
2025年度以降	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

6. 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。