

2023年度成果報告会 プログラムNo.7

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/低コスト化のための共通基盤技術開発/見かけ熱伝導率の推定手法と簡易熱応答試験法および統合型設計ツールの開発・規格化

発表日：2024年1月31日

発表者： 長野克則

提案法人名：(国)北海道大学, (国)秋田大学, (国研)産業技術総合研究所

再委託先：(一社)全国さく井協会, (国)京都大学

共同実施：(学法)工学院大学, (学法)静岡理工科大学, (国)広島大学, (公)日本地下水学会,
(学法)金沢大学, (学法)東京海洋大学

問い合わせ先

国立大学法人北海道大学 E-mail: nagano@eng.hokudai.ac.jp TEL: 011-706-6285

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

1. 期間

2020年6月 ~ 2024年3月(終了予定)

2. 目標(中間・最終)

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化: 水文地質学の専門的知見に基づいた地質構造解析と広域地下水流動解析を行い、地質情報から高精度に推定する手法(産総研)と、本手法が適用できない範囲を含む全国を対象とした、地質情報に基づき統計学的に推定する手法(北大)を併せて開発する。

②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化: TRTのコストを縮減するための簡易TRTとして、1)大口径水井戸に適用可能なTRT装置の開発(秋田大)、2)垂直ボアホール型地中熱交換器に対応可能な簡易TRTの開発(北大)を行う。

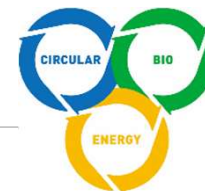
③統合型設計ツールの開発の開発・規格化: 現在主流となっているクローズドループシステムの設計ツールに①で開発した地盤物性データベースを加え、多種の地中熱交換器に対応可能とし、さらには建物・空調設備との連成を図る等、より精緻化すると共に、オープンループシステムの設計機能を加えた統合型設計ツールを開発する。

3. 成果・進捗概要

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化: モデル地域の数値モデル構築。地形AI全国モデルの改良と全国への適用。現地調査(オールコア採取、TRT)完了。数値TRTによる見かけ熱伝導率推計式の作成と検証を実施。

②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化: それぞれの簡易試験装置を製作した。全国6箇所(北海道札幌市、ニセコ町、山梨県甲斐市、広島県三次市、東京都江東区、滋賀県大津市)に、検証用の大深度(深度300m)地中熱交換器を設置した。CFD解析により、試験法とその有効性、課題について検討した。

③統合型設計ツールの開発の開発・規格化: DB規格化の共同WGを日本地下水学会と発足、東北5地域の地下水情報の整理、判定指標案の検討・検証、地下水還元の積雪時試験を実施、熱負荷・設備との連成計算アルゴリズムの開発、オープンループの設計手法の開発、簡易データ収集機器の設置(全国6カ所)、ツールの基本レイアウト・デザインの決定

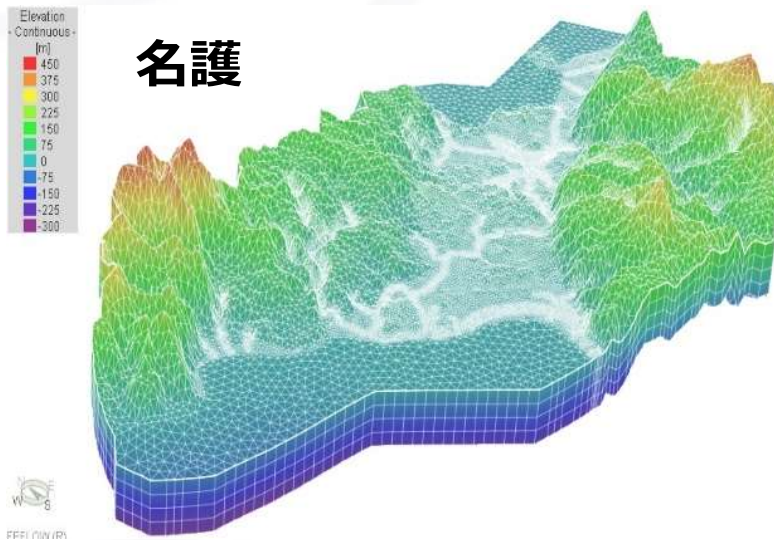
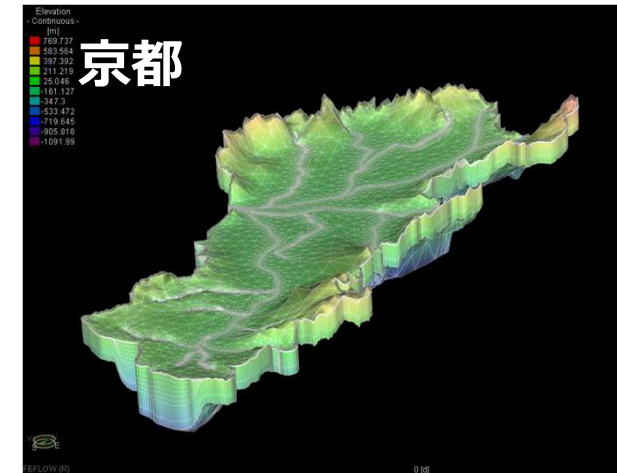


①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(産総研)

モデル3地域の数値モデル (地質構造解析・地下水流動解析結果) : 構築済み

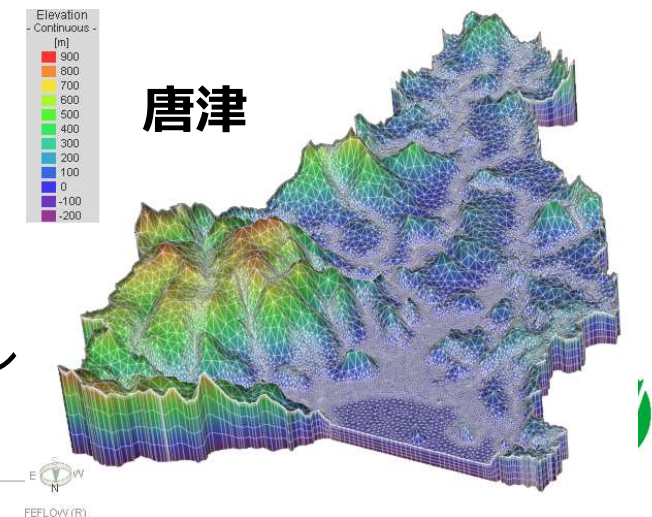
①京都盆地モデル

- 担当：京都大学
- 地質構造解析の成果を踏まえFEFLOWで京都盆地の水理地質モデル作成



②名護平野モデル

- 担当：産総研
- 島嶼特有の地下水賦存形態となる淡水レンズを想定した水理地質モデル作成



③唐津地域モデル

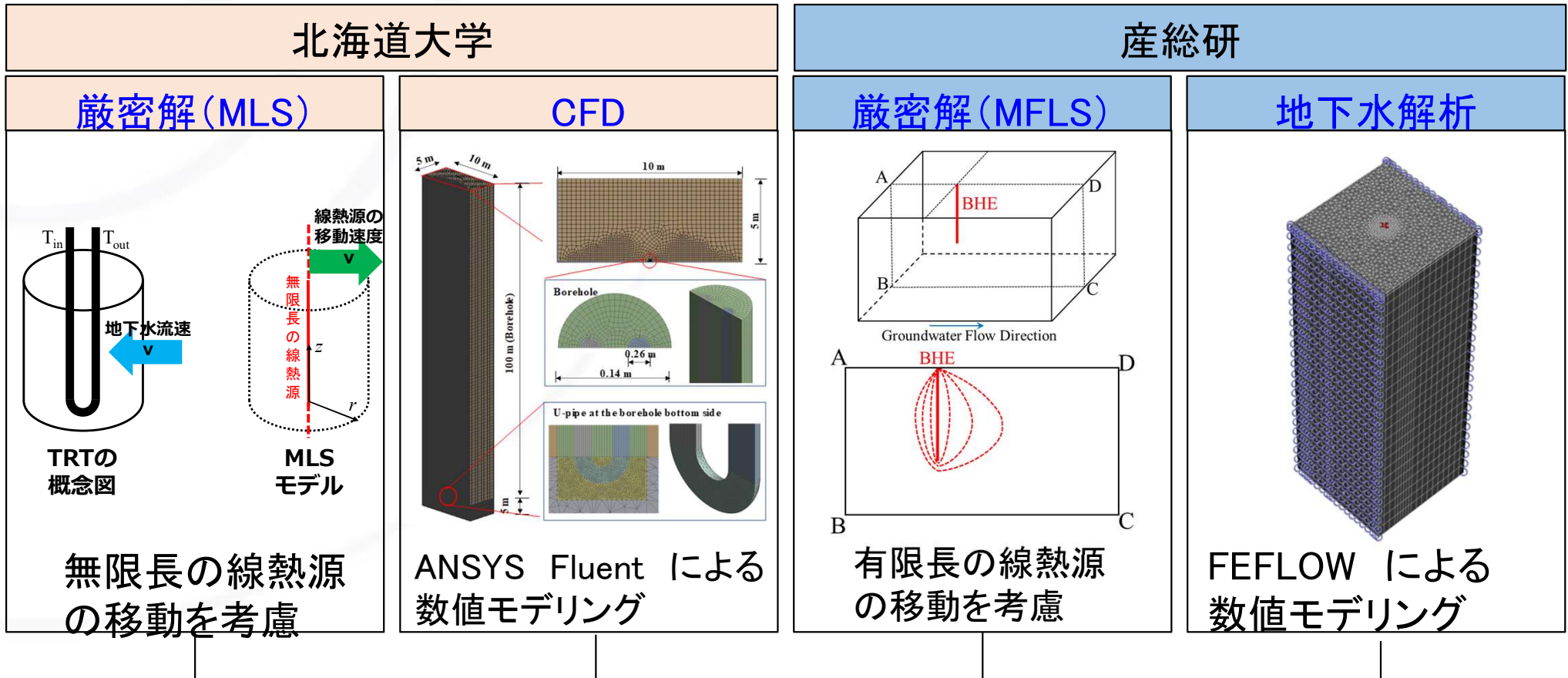
- 担当：産総研
- 地質構造解析の成果を踏まえFEFLOWで水理地質モデルを作成



①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(北海道大学・金沢大学・産総研)

数値TRTに基づく見かけ熱伝導率推計式の作成

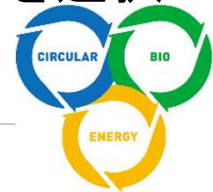
4つの手法により数値TRTを実施



推定手法の規格化

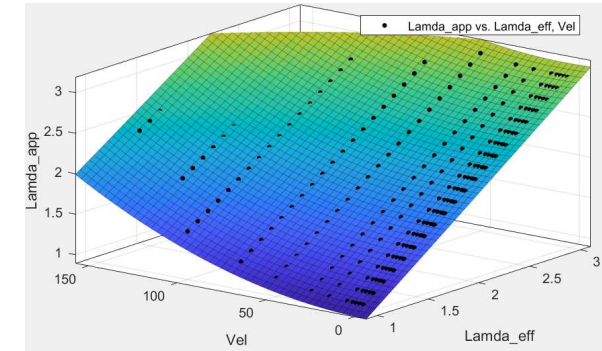
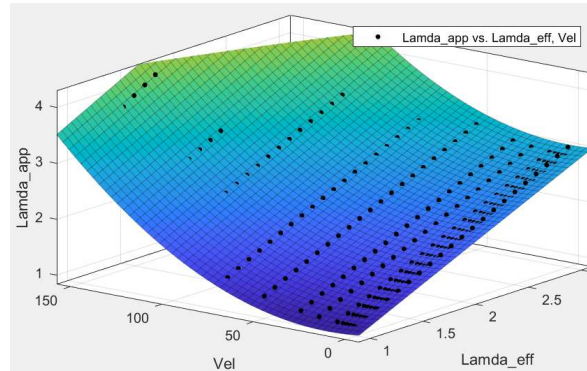
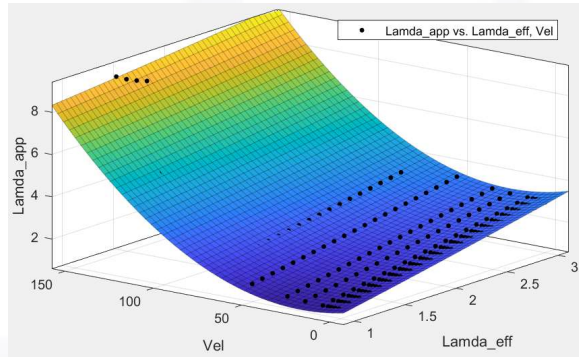
実務的観点より、有用性・技術レベル等を備えた手法を選択 (候補:MLS)

見かけ熱伝導率推計式の作成



①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(産総研)

MLS、CFD、MFLSの応答曲面を作成



推計式の
数学モデル

$$f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2$$

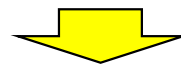
$f(x,y)$: λ app, x : λ eff, y : vel

決定係数
MLS: 0.9782

決定係数
CFD: 0.998

決定係数
MFLS: 0.9999

各数値TRT手法の結果を用いて作成した推計式の精度に
大きな差は見られない



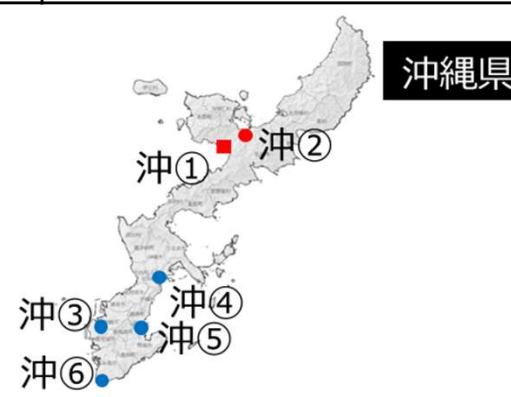
精度と実務利用を鑑みて採用する手法を検討

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(産総研)

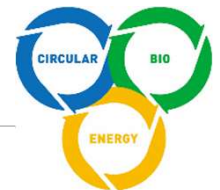
熱応答試験・オールコア採取

※全地点で調査・データ取得完了 (推計式検証に使用)

地域	調査地点		コア	TRT 見かけ熱伝導率[W/(m・K)]	備考
京都盆地	京①	京大宇治キャンパス	○	2.83@1回目、3.01@2回目	熱媒循環方式
	京②	京大宇治川オープンラボラトリ	-	2.69	熱媒循環方式
	京③	京大上加茂試験地	-	1.95 ※深度20mの平均値	ケーブル方式
唐津地域	唐①	佐賀県立唐津東中学・高校	○	2.32	熱媒循環方式
	唐②	唐津市上場商工会本所	-	2.39	熱媒循環方式
	唐③	佐賀県立虹の松原学園	-	1.97 ※深度50mの平均値	ケーブル方式
	※産総研独自予算により唐津市内4地点で追加実施 (唐津a~d)		-	a:2.23、b:2.81、c:2.61、d:2.22 ※深度50mの平均値	ケーブル方式
沖縄本島	沖①	名護市21世紀の森公園	○	3.87	熱媒循環方式
	沖②	名護市羽地地区センター	-	2.14 ※深度80m	熱媒循環方式
	沖③ ~⑥	那覇市、糸満市、 沖縄市、西原町	-	③2.05、④2.05、⑤1.60、⑥2.36 ※深度50mの平均値	ケーブル方式

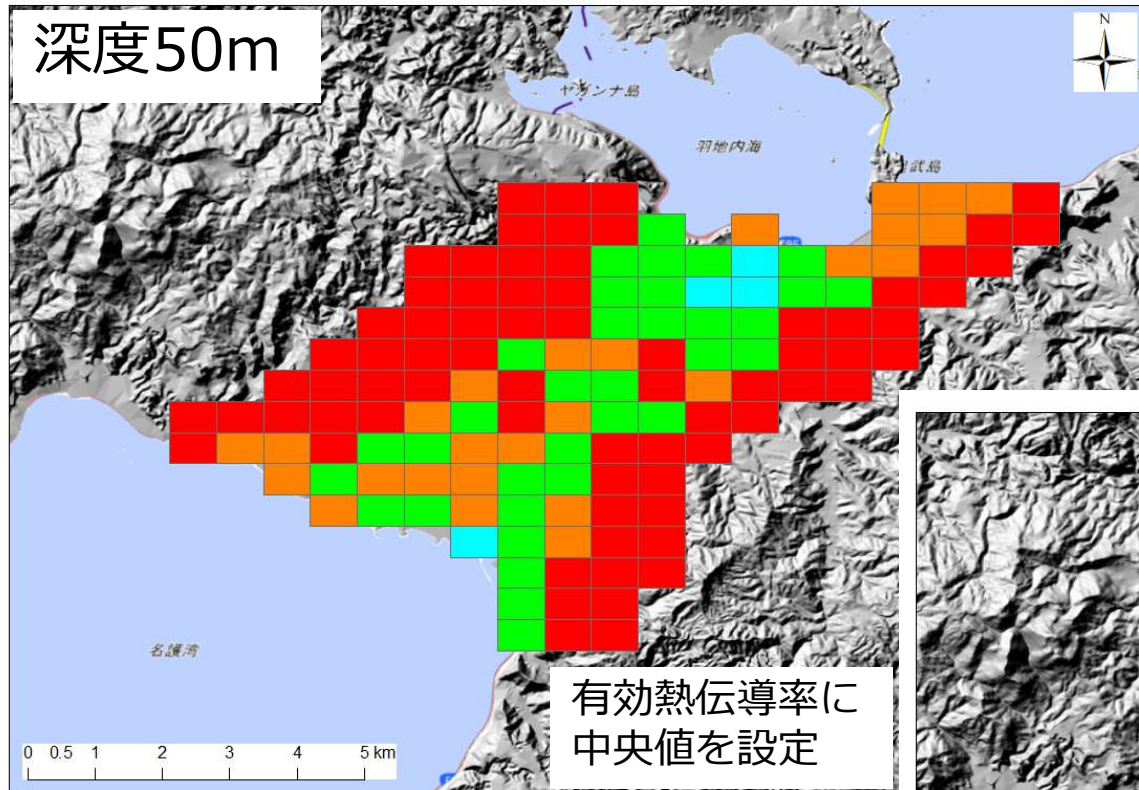


- : TRT (熱媒) & オールコア
- : TRT (熱媒)
- : TRT (ケーブル)
- : TRT (ケーブル: 独自予算)



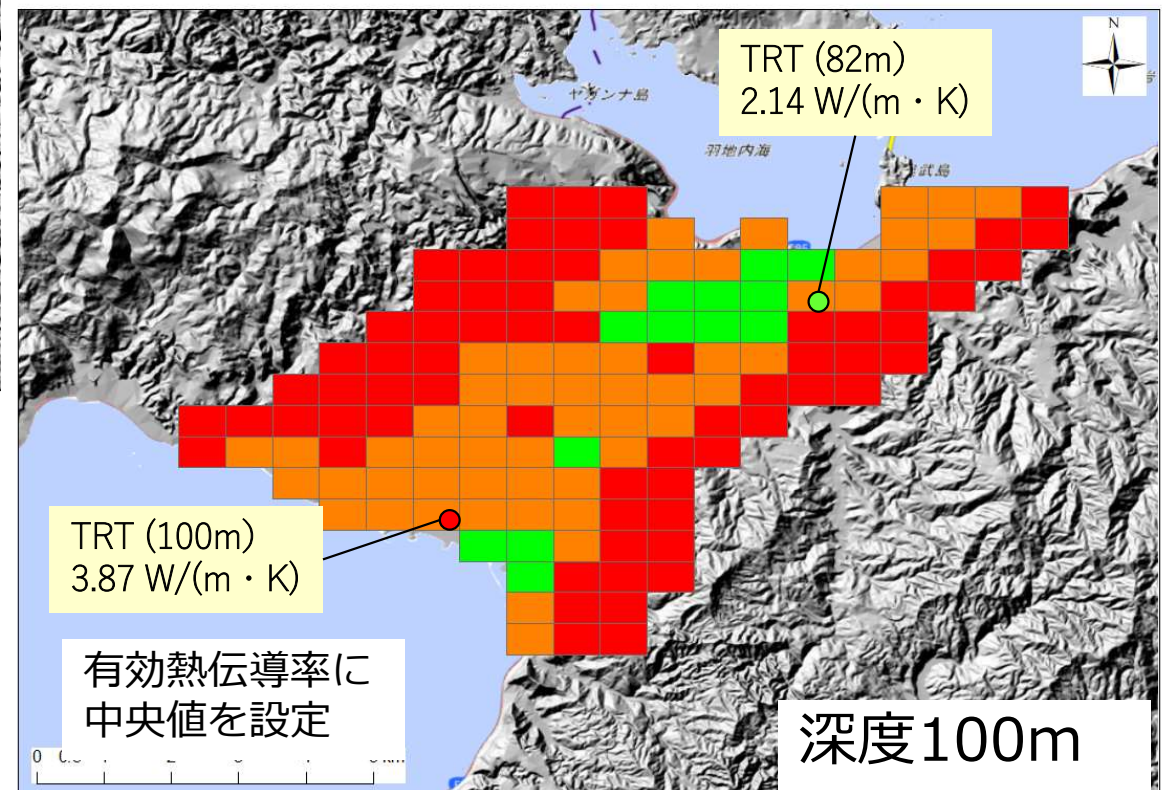
①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(産総研)

モデル地域の見かけ熱伝導率マップ (500mグリッド)



名護平野

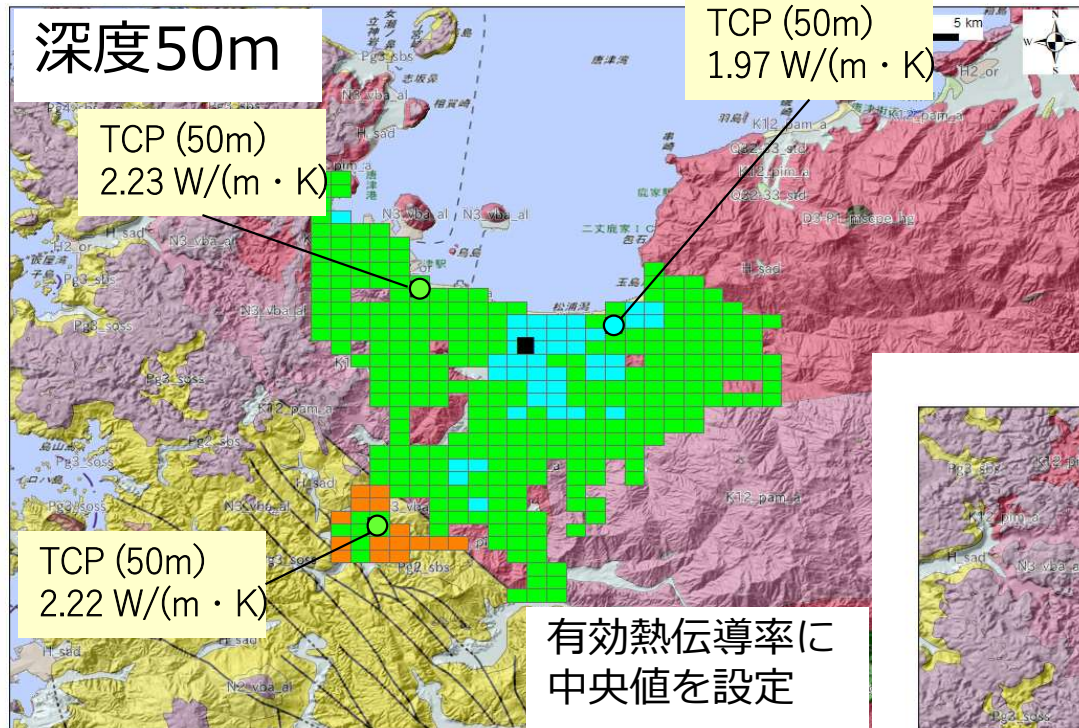
推定式 (MLS) で求めた見かけ熱伝導率の分布図 (深度100m)



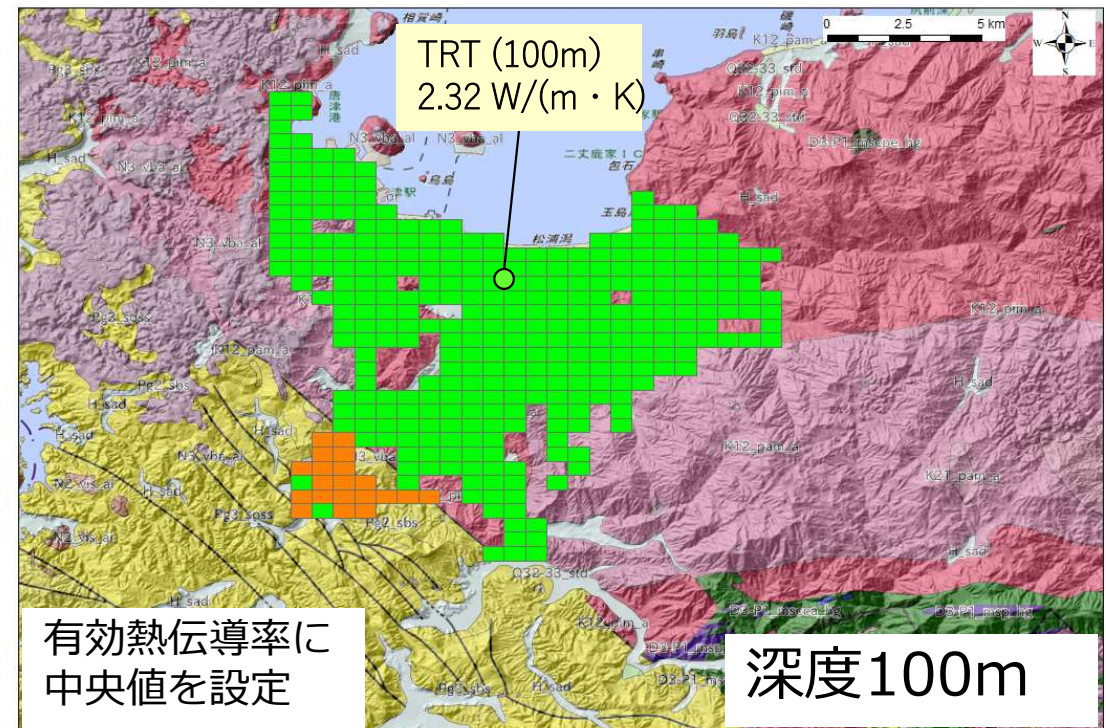
①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化(産総研)

モデル地域の見かけ熱伝導率マップ (500mグリッド)

唐津地域



推定式 (MLS) で求めた見
かけ熱伝導率の分布図
(深度50m:100m)

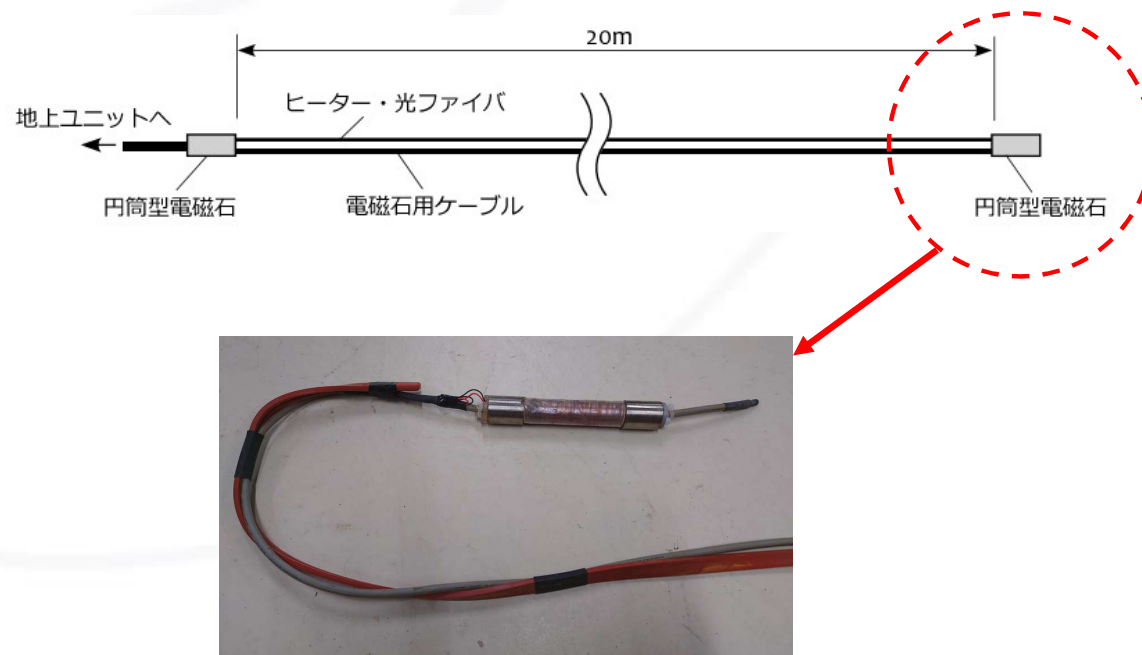


②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

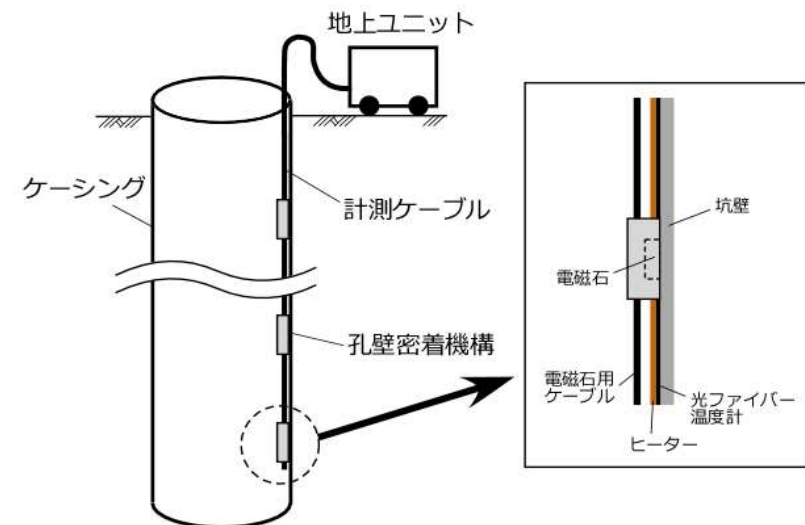
井戸の管壁に密着する電磁石付ヒーターユニットを用いたTRT (秋田大学)

背景: 従来のTRTは熱交換井として仕上げられた井戸でしか実施できない。

開発目的: 本装置はケーシング(鋼管)が設置されている**既存の水井戸**, 特に**大口径の水井戸に適用可能**であるため, TRTデータの拡充およびTRTにかかるコストの削減が期待できる。



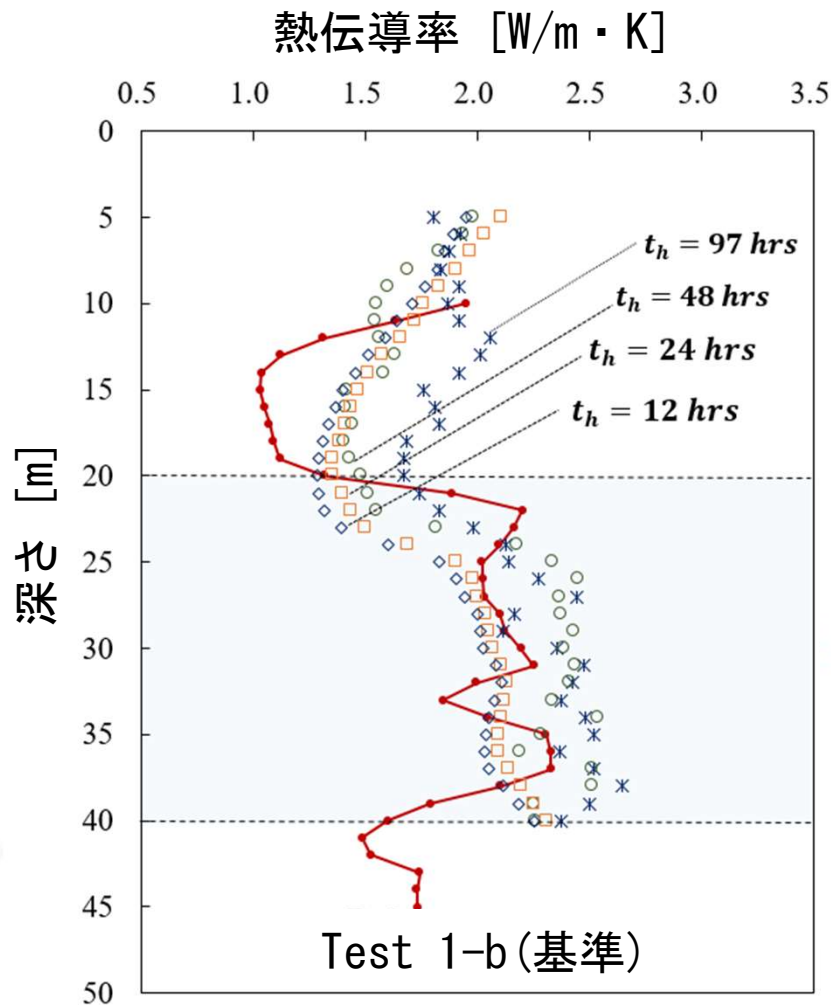
改良した計測ケーブル (上) と円筒型電磁石 (下)



簡易型TRT装置設置イメージ

②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

井戸の管壁に密着する電磁石付ヒーターユニットを用いたTRT (秋田大学)



- 全試験において、地下水流れが推定される深度20~40mで高い熱伝導率が得られた。
- 加熱時間を長くすることで、回復期間より推定される熱伝導率プロファイルは基準プロファイルと近似した傾向を示した。

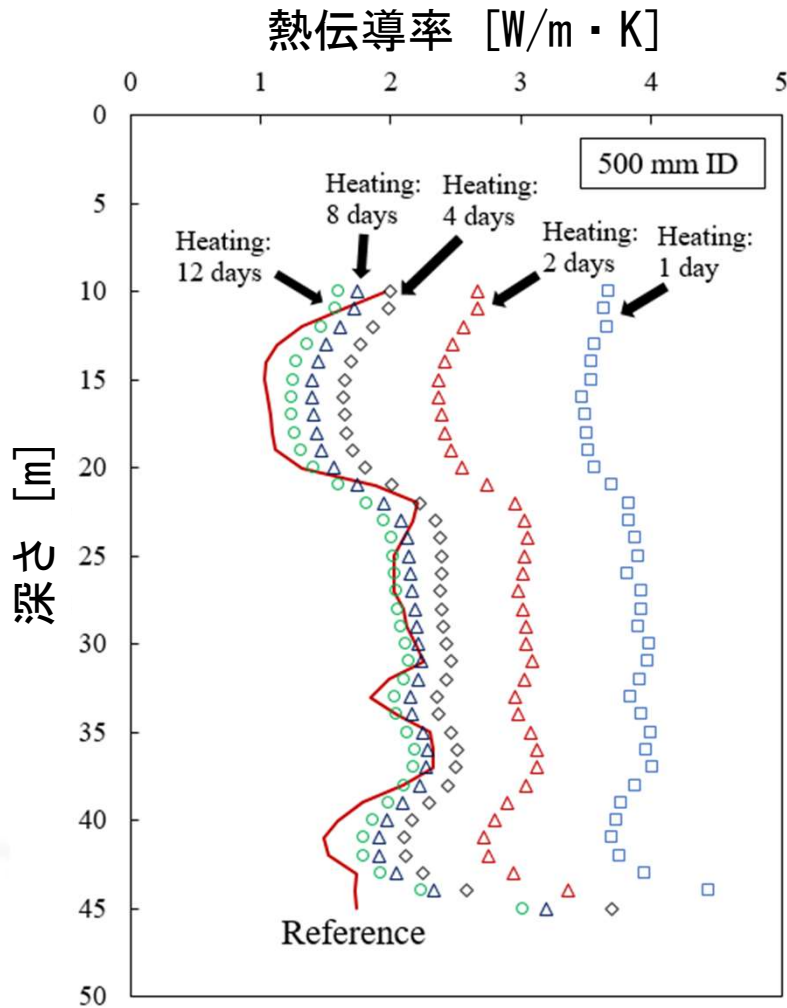
試験条件

	熱負荷 (W/m)	加熱時間 (hr)	温度回復時間(hr)	試験実施日
—●—	41.8	48	73	2023/6/21-6/26
*	42.7	12	27	2023/8/21-8/23
○	42.9	24	49	2023/9/1-9/4
□	43.8	48	49	2023/7/26-7/30
◇	44.3	97	96	2023/7/6-7/14

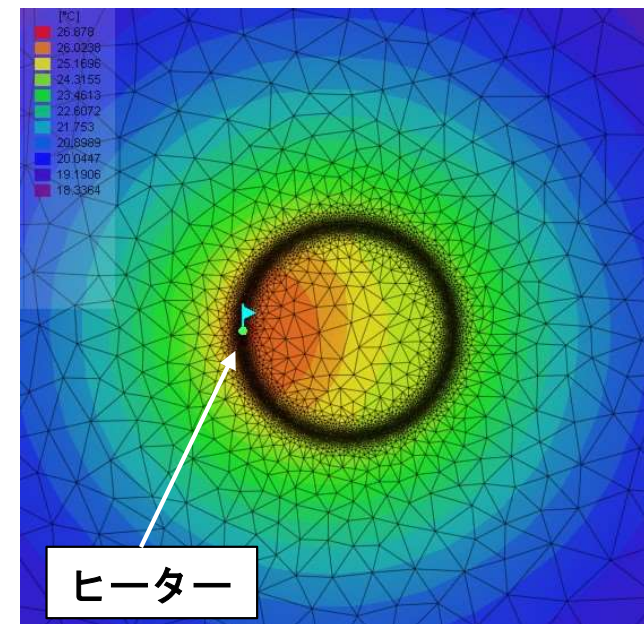
各試験の回復期間より推定された熱伝導率プロファイルと基準プロファイルとの比較

②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

井戸の管壁に密着する電磁石付ヒーターユニットを用いたTRT (秋田大学)



- 大口径の井戸においても加熱期間を延長することで、推定される熱伝導率は基準値に近づく と推定される。

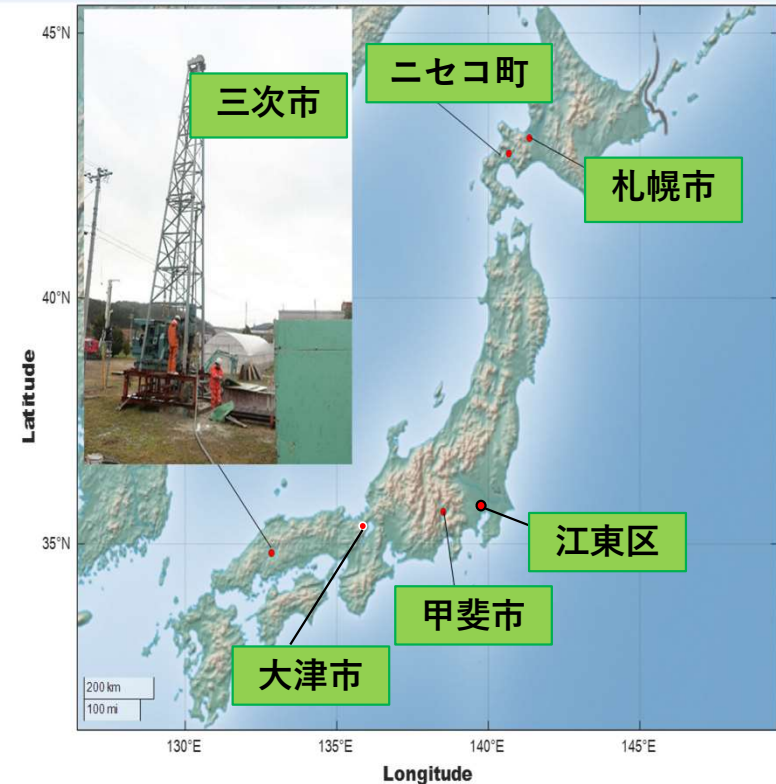
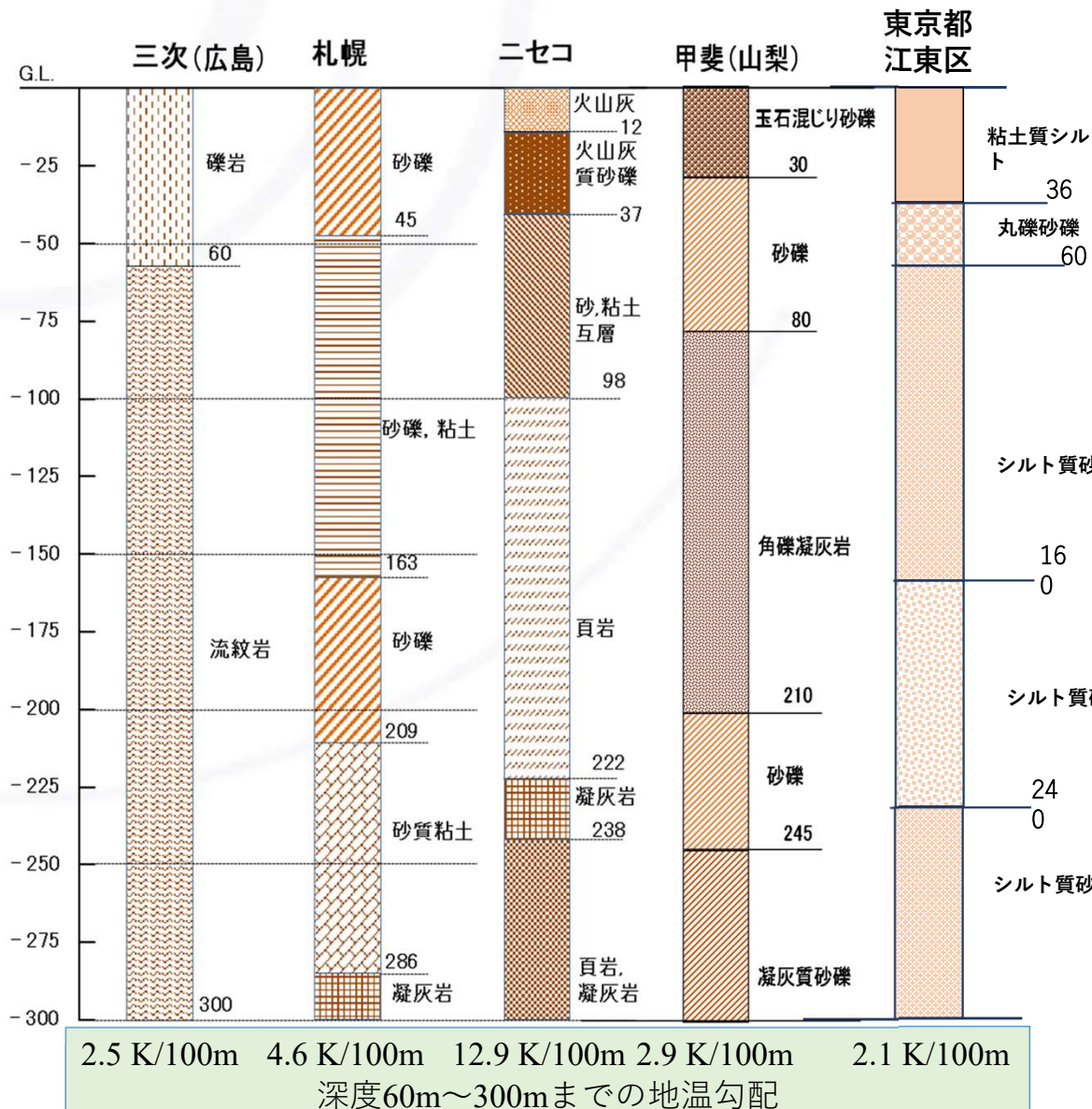


12日間加熱後の坑内温度分布 (深度20m)

異なる加熱期間を与えた数値TRTより推定した熱伝導率プロファイル (ID=500 mm)

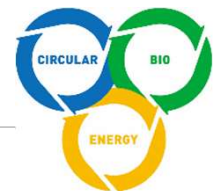
②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化



大深度BHE設置箇所(全国6か所)

1. 広島県三次市 (2022. 2)
2. 山梨県甲斐市 (2022. 3)
3. 北海道札幌市 (2022. 3)
4. 北海道ニセコ町 (2022. 8)
5. 東京都江東区 (2022. 3)
6. 滋賀県大津市 (2023. 1)

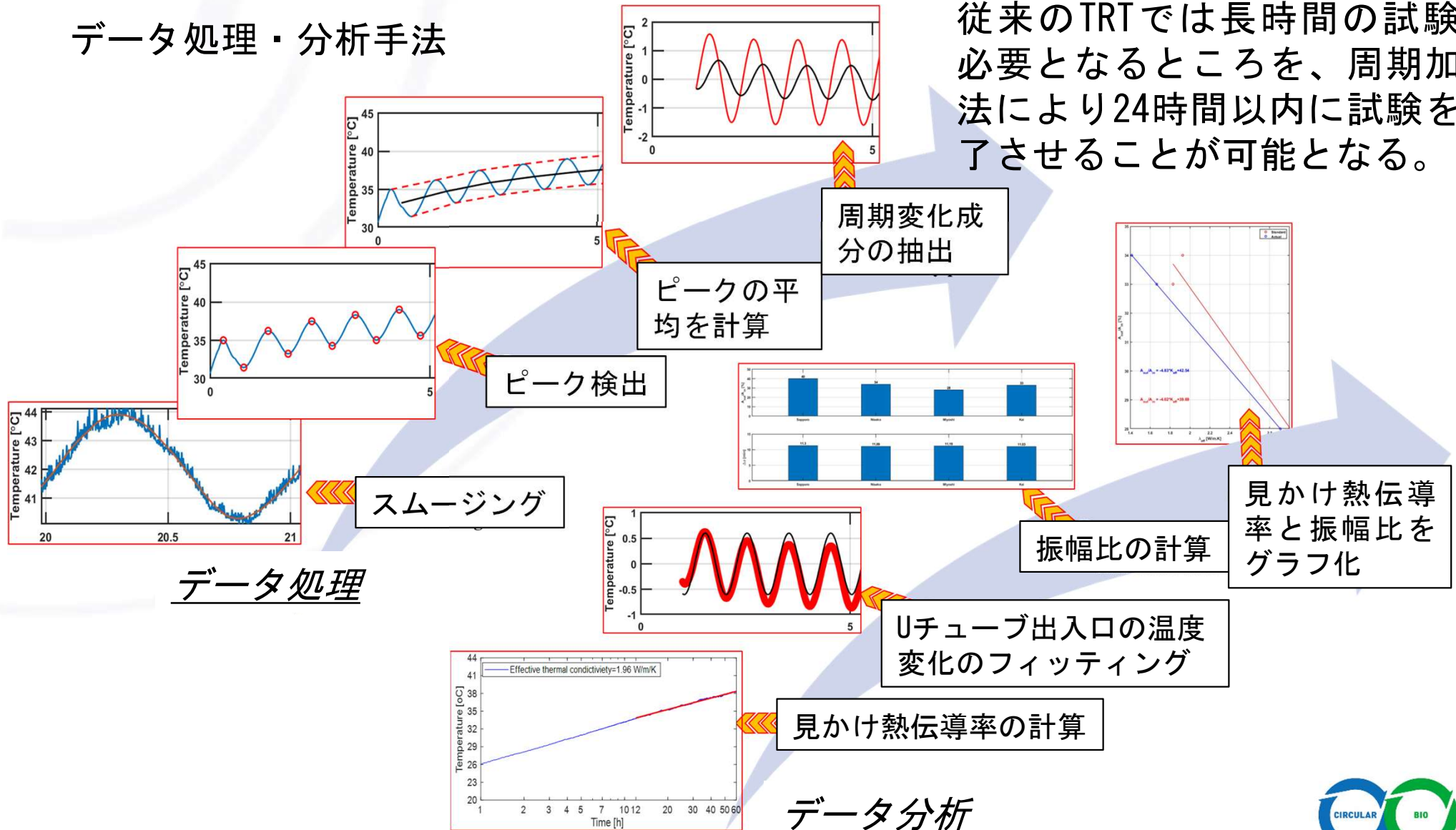


②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化

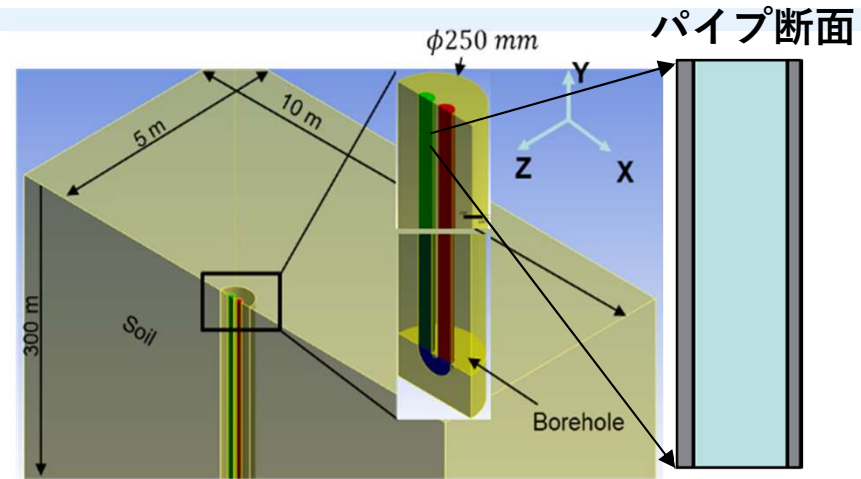
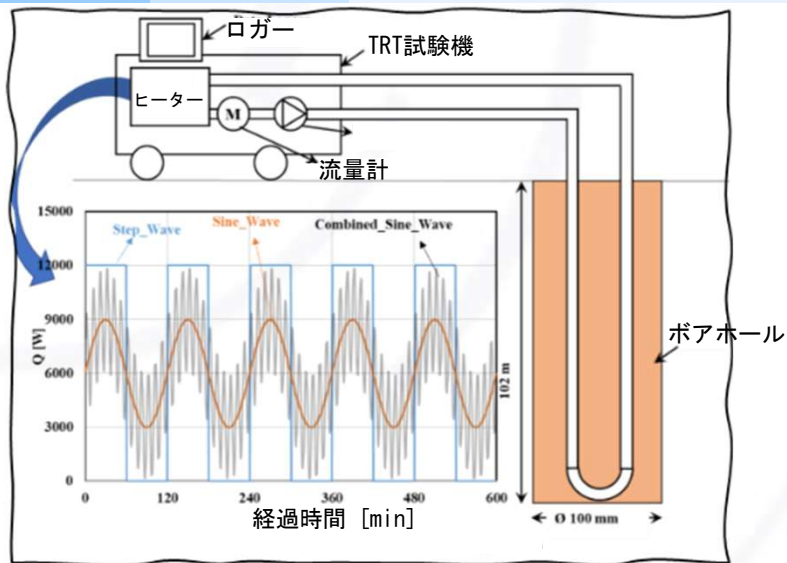
データ処理・分析手法

従来のTRTでは長時間の試験が必要となるところを、周期加熱法により24時間以内に試験を終了させることが可能となる。

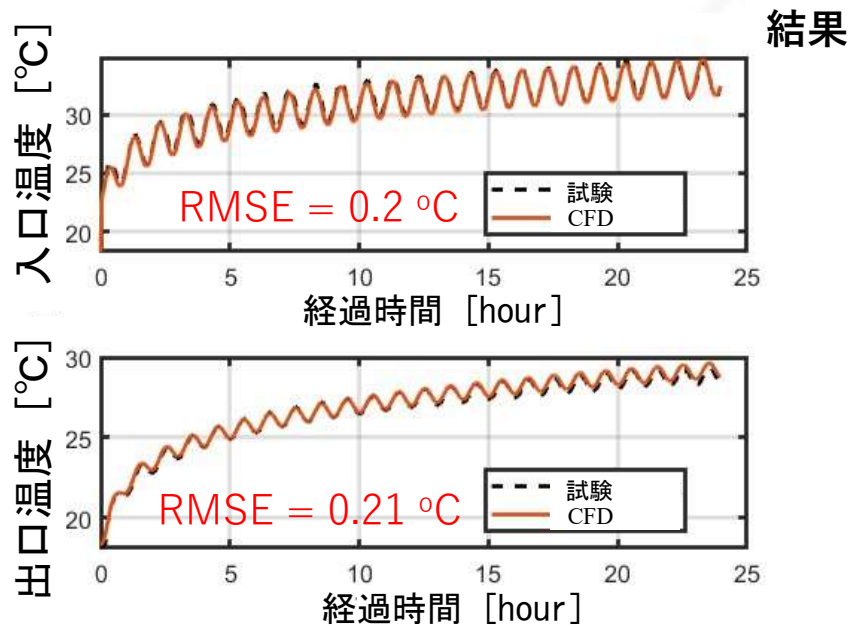
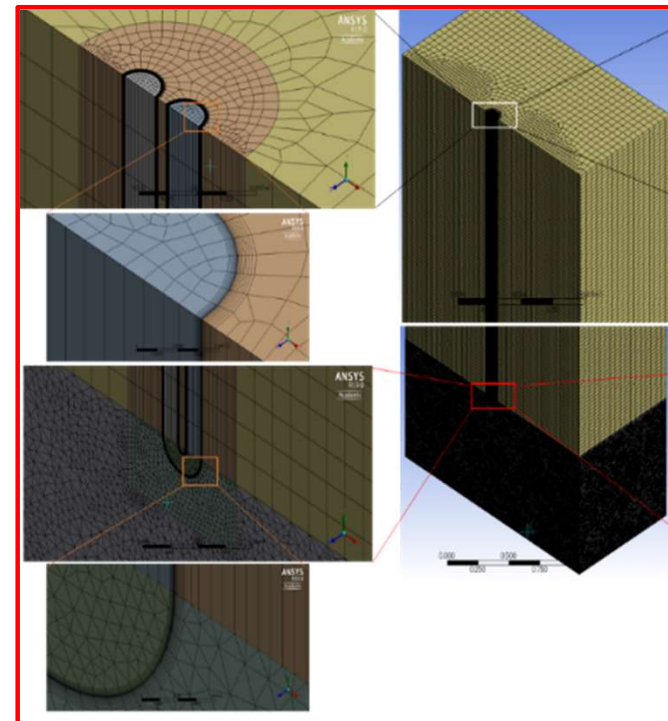


②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化



メッシュ



②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化

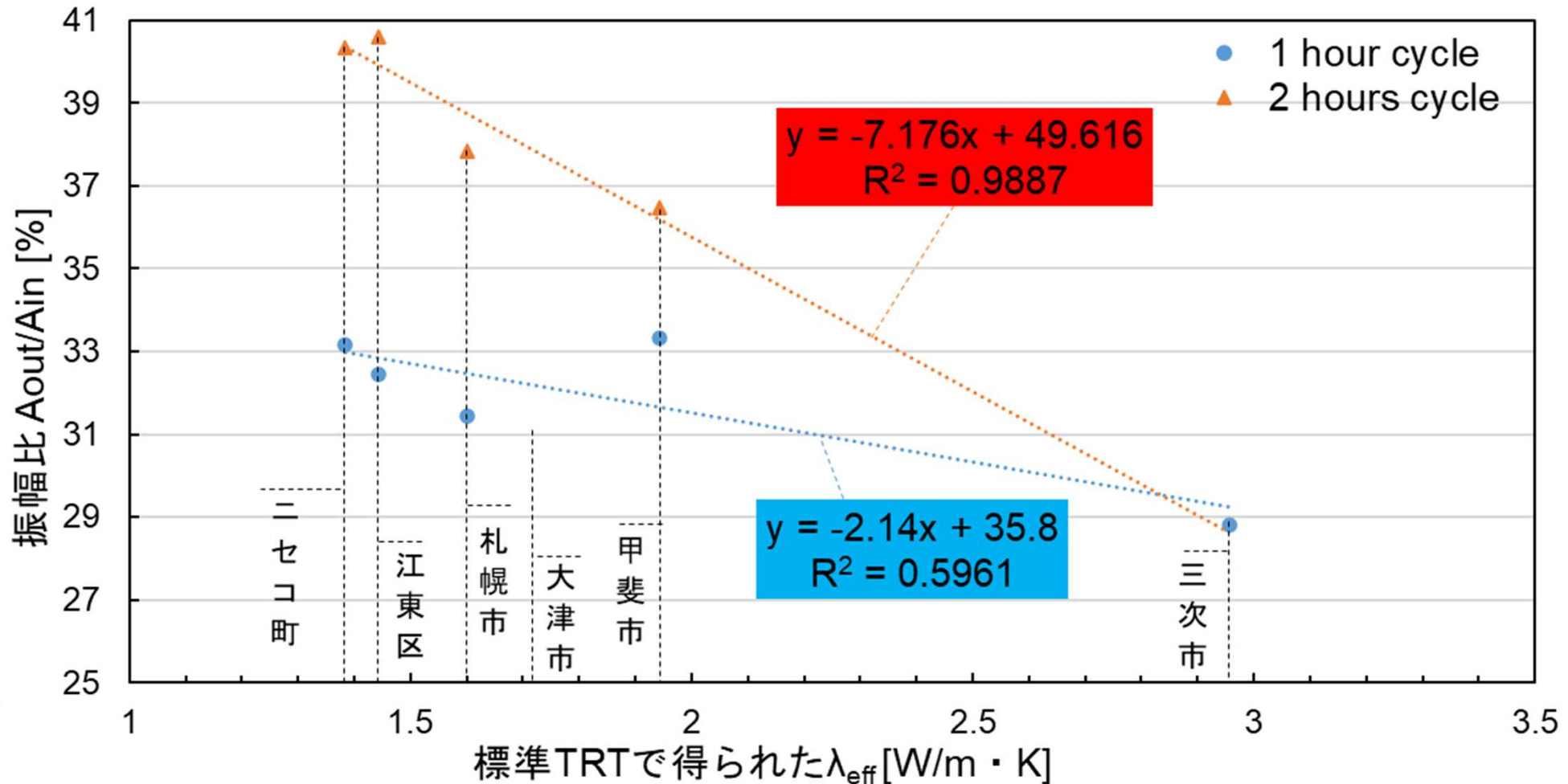


TRT試験実施状況

	標準TRT	周期加熱TRT		ヒーターケーブルTRT
		1h周期	2h周期	
広島県三次市	済	済	済	済
北海道札幌市	済	済	済	済
北海道ニセコ町	済	済	済	済
山梨県甲斐市	済	済	済	済
東京都江東区	済	済	済	済
滋賀県大津市	済	R6年1月予定	R6年1月予定	

②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化



今後の予定
 大津市で高感度な1時間周期・2時間周期TRT。
 三次市で高感度な2時間周期TRT。

②簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

周期加熱法による迅速TRT技術の開発と規格化

$$\text{Eq. (1): } 0.12x_4 - 0.21x_3 - 0.59x_2 + 0.2x_5 + 0.23x_6 + 0.38$$

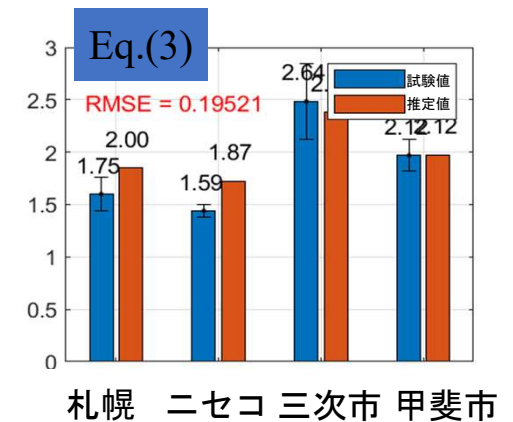
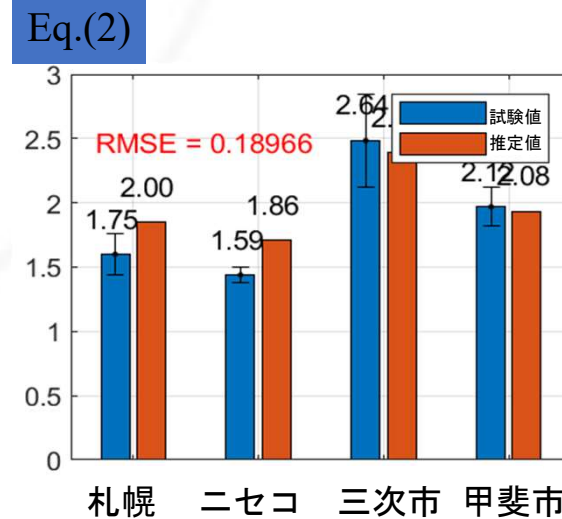
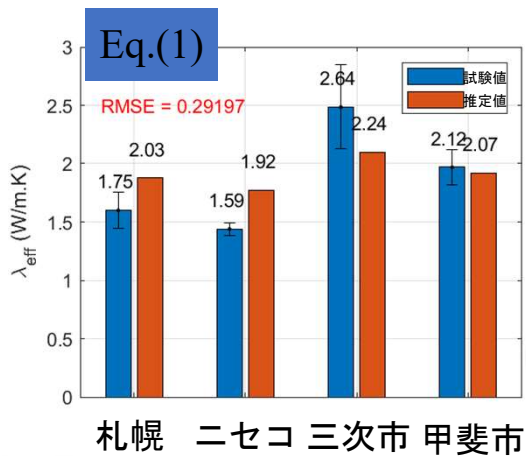
depth = 1; genes = 5;

$$\text{Eq. (2): } 0.29\sqrt{x_5} - 2.1e^{-1.0x_3} - 1.8\sqrt{x_3} + 0.74x_2 + 0.37\sqrt{x_6} + 2.8$$

depth = 2; genes = 5;

$$\text{Eq. (3): } 1.4x_3^{x_3} - 1.1x_2 - 2.1x_3 - 3.5e^{-1.0x_3} - 2.4e^{-1.0x_5} - 1.5 \sin(x_5) - 0.04x_1 + 0.42\sqrt{x_6} + 5.2$$

depth = 2; genes = 8;



	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y
Min	0.0135	16.16	0.3417	100.1607	2410	15.1548	0.2197
Max	0.0167	92.4349	13.3384	349.4217	4310	59.9776	3.6202

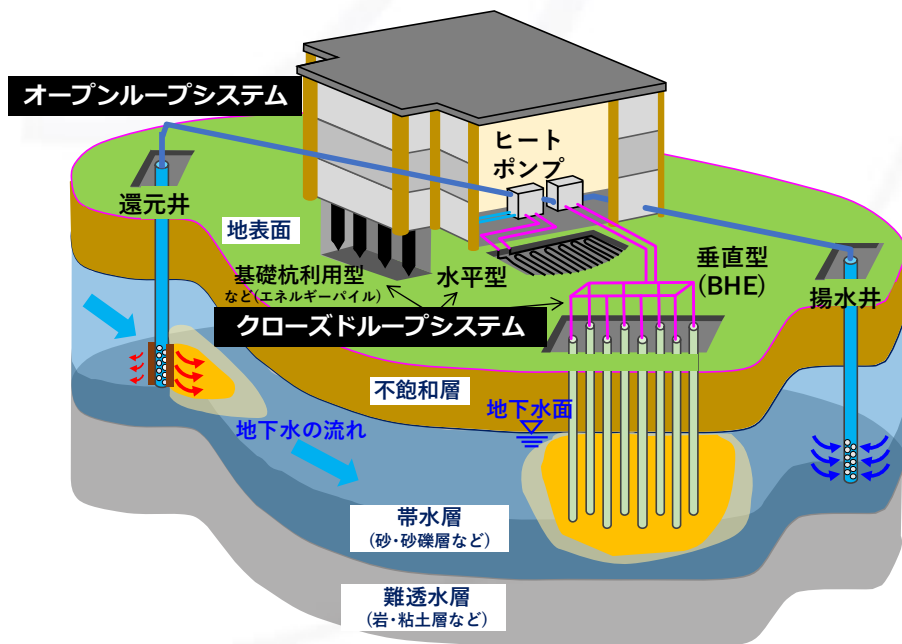
③統合型設計ツールの開発の開発・規格化 統合型設計ツール(建物・空調設備との連成計算)の開発

昨年度までの実施内容: 計算手法を適用するための入出力インターフェースの開発

本年度の実施内容: 設計ツールの拡張と検証および設計マニュアルの作成

統合型設計ツール全体イメージ

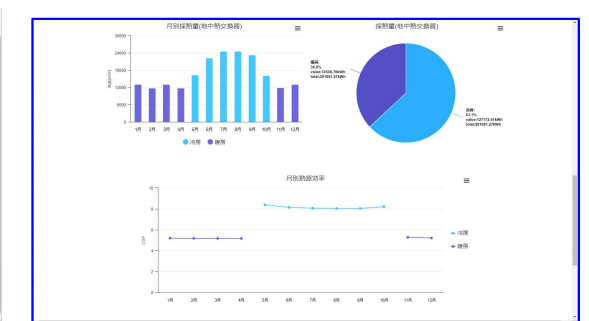
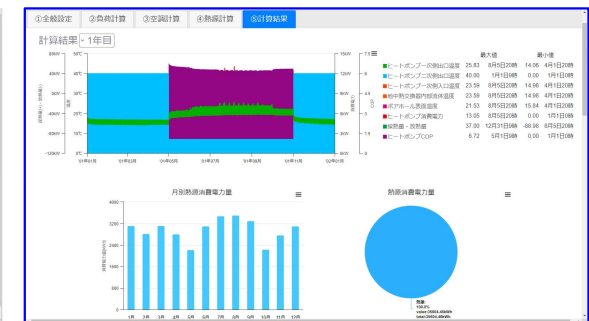
統合型設計ツールの入出力インターフェース



入力

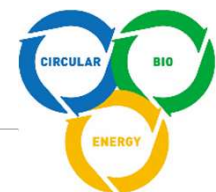


出力



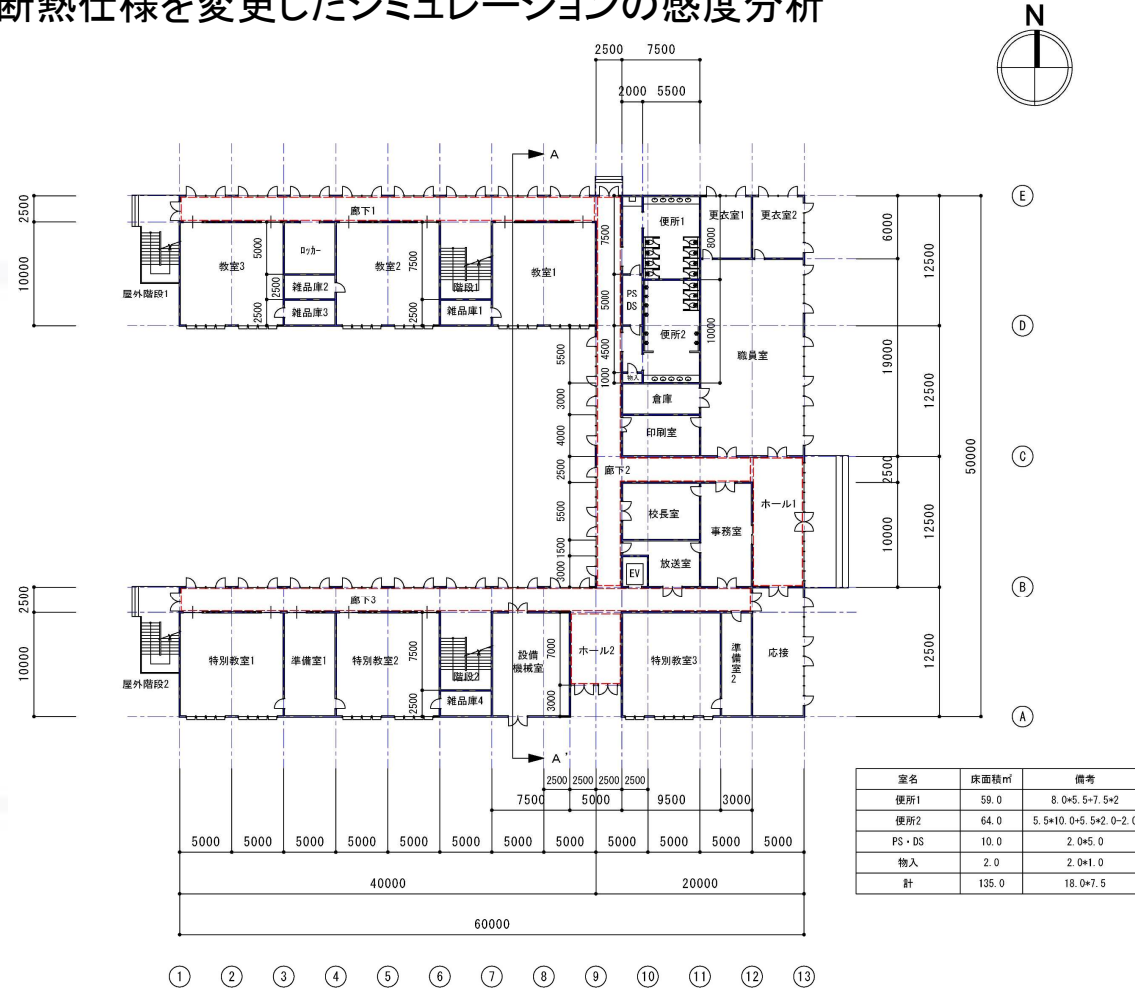
ユーザーインターフェースの特長

- Web版地中熱設計ツールと同様、Webサイトにアクセスすることで、インターネットブラウザでの利用が可能、ソフトウェアのインストールが不要
- 建築条件の入力は、一次エネルギー消費量計算プログラム（通称WEBPRO）のExcel入力シートを用いて行うため、設備設計者であれば容易に入力が可能



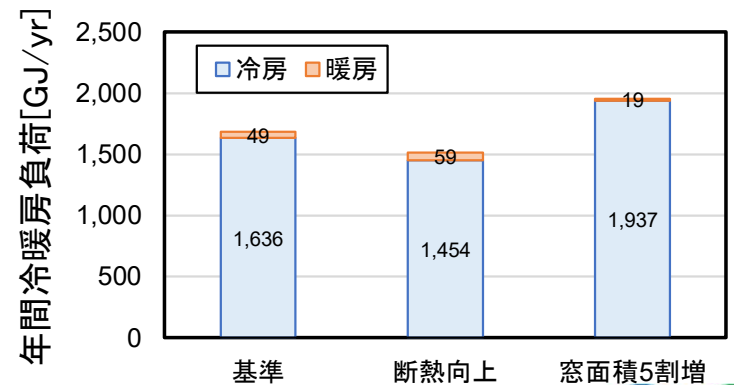
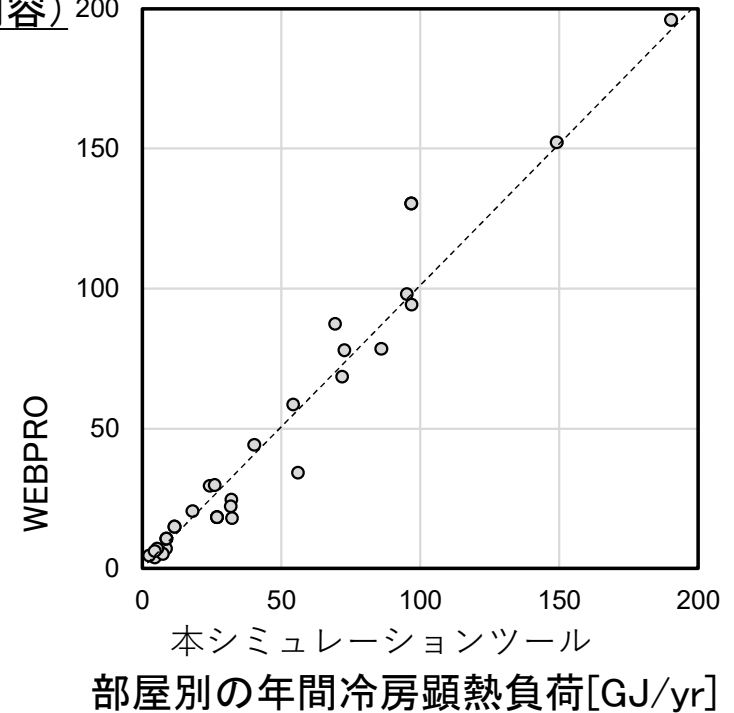
③統合型設計ツールの開発の規格化 建築シミュレーションの精度検証および感度解析

用途別建物の建築シミュレーション検証: ホテル・学校 (本スライドの内容)
断熱仕様を変更したシミュレーションの感度分析



モデル建物 (学校、5,000㎡) 1階平面図 1/400

省エネ法のモデル建物(学校)



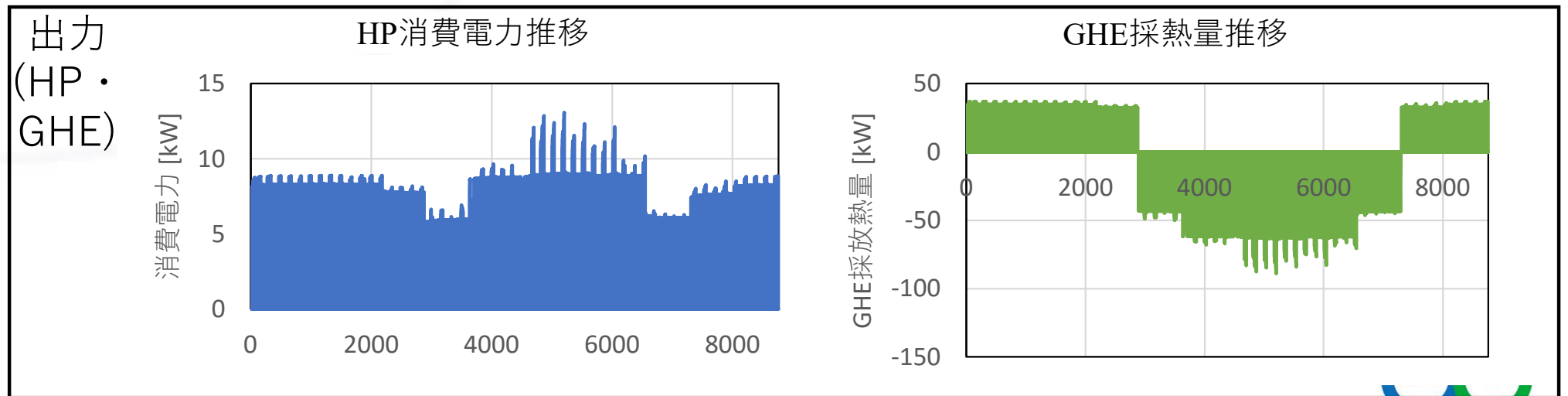
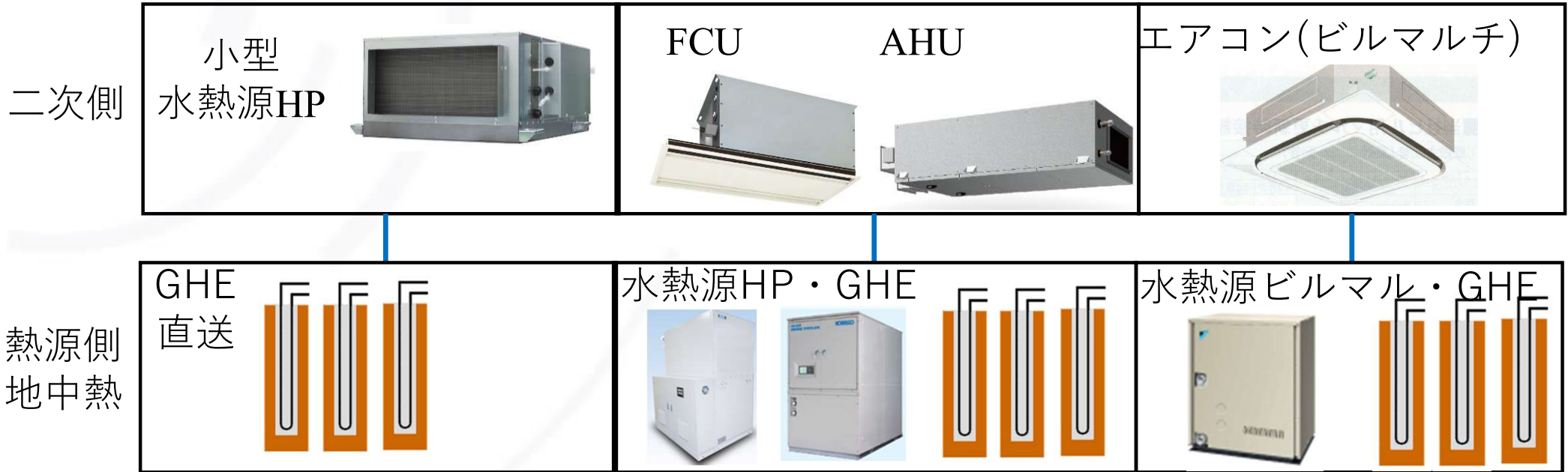
感度分析結果



③統合型設計ツールの開発の開発・規格化 (静岡理工大学・北海道大学)



統合型設計ツールの二次側モジュール開発と二次側に対応した熱源機器の整備



③統合型設計ツールの開発の開発・規格化 オープンループ型地中熱利用の採熱量概算システム

Ground Clubシステム上で、オープンループ型ヒートポンプにおける採熱量の予測解析の実行を可能とし、揚水-注水井戸の配置や運用パターンに対する意思決定を支援する概算システムを構築する。

予測解析の要件

1. 解析精度が検証されていること。
2. 予測期間10年の解析が10分前後で終了すること。
3. 対象位置、物性情報、井戸配置、井戸条件を入力するだけで解析が行えるUIを構築する。(数値解析未経験の利用者でも扱える)

解析の精度検証: 実施済み

数値分散を抑制する目安であるペクレ数およびクーラン数による検証。

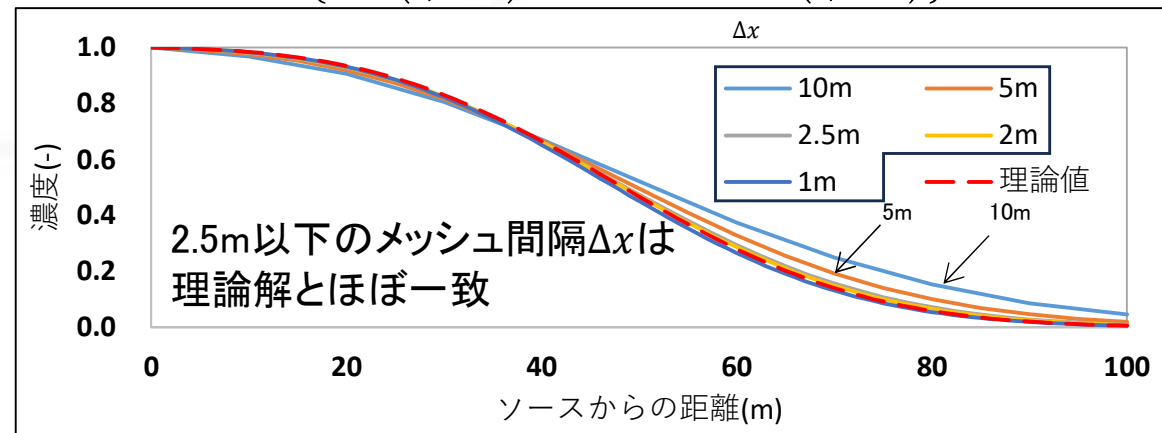
$$\text{ペクレ数: } P_e = \frac{v_x \Delta x}{D_x} = \frac{v_x \Delta x}{\alpha_L v_x} = \frac{\Delta x}{\alpha_L} \leq 2 \quad \text{クーラン数: } Cr = \frac{v_x \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

流速=100m/y(井戸周辺流速最大値)、縦方向分散長=5m、時間刻み1日とした条件を用いて、1次元移流拡散理論解(下式)と解析結果を比較。

$$c(x, t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{4Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{\sqrt{4Dt}} \right) \right\}$$

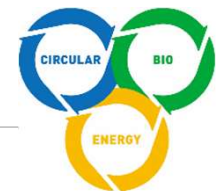
v_x : 流動方向の流速 Δx : メッシュ間隔
 α_L : 縦方向分散長 Δt : 時間刻み

D : 分散係数
 v : 間隙内流速



Δx (m)	Cr	Pe
1	0.27	0.2
2	0.14	0.4
2.5	0.11	0.5
5	0.05	1
10	0.03	2

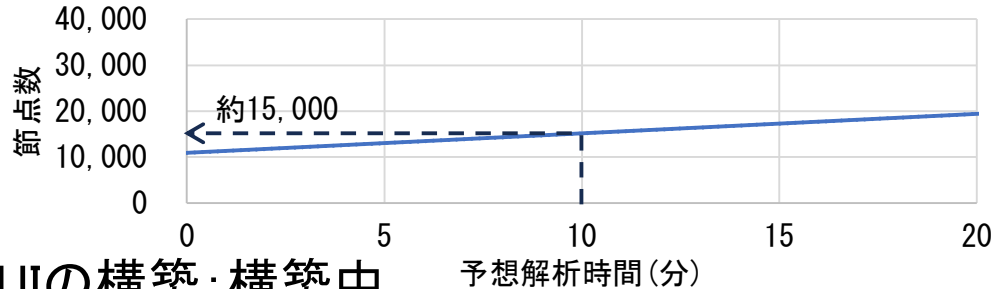
上図の結果から揚水-注水孔近傍のメッシュ間隔 Δx は2.5mを基本とする。



③統合型設計ツールの開発の開発・規格化 オープンループ型地中熱利用の採熱量概算システム

解析時間：実施済み

試算モデルによる検証の結果、15,000節点程度のモデルを構築することで、およそ10分で10年間の予測解析が実施できることがわかった。



検証に用いたPCスペック

プロセッサ: Intel®Core™ i7-8700
CPU3.2GHz
メモリ: 32.0GB

UIの構築：構築中

注水孔	注水量 (m³/d)	温度 (°C)	揚水孔	揚水量 (m³/d)	開始時間 (d)	継続時間 (d)
1 ①	5	30	②	5	0	365
2 ②	10	10	③②	5	365	730
3						
4						

土質名	透水性係数 (m/s)	熱伝導率 (W/(m·k))	密度 (kg/m³)	比熱 (J/g·k)	熱拡散率 (m²/s)
砂質土					
礫質土					
粘性土					

UIを用いた概算予測検討の手順

- ① 地図画面より解析対象地域を選定
- ② ボーリング情報を入力(自動/手動)
- ③ 対象地域の地下水流れの傾向を入力
- ④ 井戸の配置を選定(マウスクリック)
- ⑤ 井戸条件(運用パターン)を入力
- ⑥ 解析を実施
- ⑦ 結果を確認(採水温度、採熱量)

その他の搭載予定機能

- ・精度検証の知見に配慮した自動メッシュ生成機能
- ・熱物性データベースを利用した熱物性の自動割当機能
- ・物性一般値の表示
- ・揚水温度の採熱量変換
- ・任意箇所温度変化(熱汚染)



① 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

- ・水文地質学的検討と広域地下水流動解析を行う高精度推定法と、地質情報に基づき統計学的に推定する手法それぞれに基本スキームを決定
- ・モデル地域の数値モデルをすべて構築、現地調査(オールコア採取、TRT)を完了
- ・地形AI全国モデルの改良と全国への適用、日本全国の地下水環境の概略推計実施中
- ・数値TRTによる見かけ熱伝導率推計式の作成と検証を実施

② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

- ・改良型ヒーター付き光ファイバーケーブルの簡易試験装置を製作
- ・全国6箇所(北海道札幌市, ニセコ町, 東京都江東区, 山梨県甲斐市, 広島県三次市、滋賀県大津市)に検証用の大深度(深度300m)地中熱交換器を設置
- ・CFD解析により、試験法とその有効性、課題について検討

③ 統合型設計ツールの開発の開発・規格化

- ・DB規格化の共同WGを日本地下水学会と発足
- ・東北5地域の地下水情報の整理、指標案の検討・検証
- ・熱負荷・設備との連成計算アルゴリズムの開発
- ・オープンループの設計手法の開発
- ・簡易データ収集機器の設置(全国6カ所)
- ・ツールの基本レイアウト・デザインの決定

