

2021年度成果報告会

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

(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

問い合わせ先

北海道大学 長野克則

E-mail:nagano@eng.hokudai.ac.jp

TEL: 011-706-6285

1. 期間

開始：2020年 6月 終了(予定)：2022年 3月

2. 最終目標

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)、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 推定手法のスキームを確立し、数値TRT等による推定手法の検証を行った。また、検証地域の一つである京都市において、コアボーリングを実施し、詳細な地質情報を得た。

② それぞれの簡易試験装置を製作した。全国4箇所(北海道札幌市、ニセコ町、山梨県甲斐市、広島県三次市)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 DB規格化の共同WGを日本地下水学会と発足、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

研究開発概要

【研究開発テーマ名】

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

【事業者名】

国立大学法人北海道大学・国立大学法人秋田大学・国立研究開発法人産業技術総合研究所（研究代表：長野克則北海道大学大学院工学研究院教授）

【開発目標】

地中熱システムのコスト低減を目的に、以下3項目の開発・規格化を行う。

① 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

（北海道大学・産業技術総合研究所・京都大学（再委託））

② 簡易熱応答試験（TRT）法の開発・規格化

（北海道大学・秋田大学）

③ 統合型設計ツールの開発・規格化

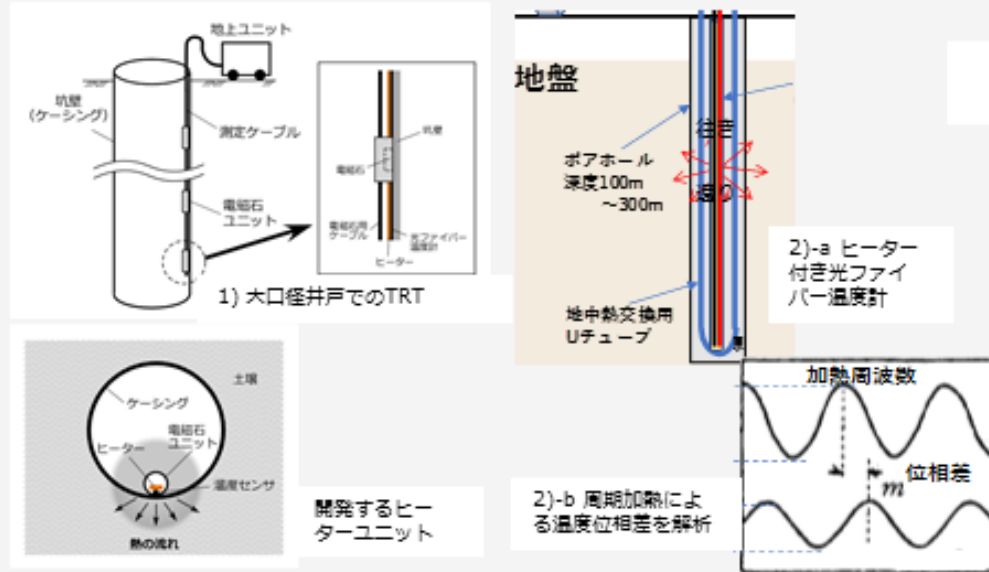
（北海道大学・産業技術総合研究所・工学院大学（共同実施）・静岡理工科大学（共同実施）・広島大学（共同実施）・公益社団法人日本地下水学会（共同実施）・一般社団法人全国さく井協会（再委託））

【研究開発概要】

各項目参照

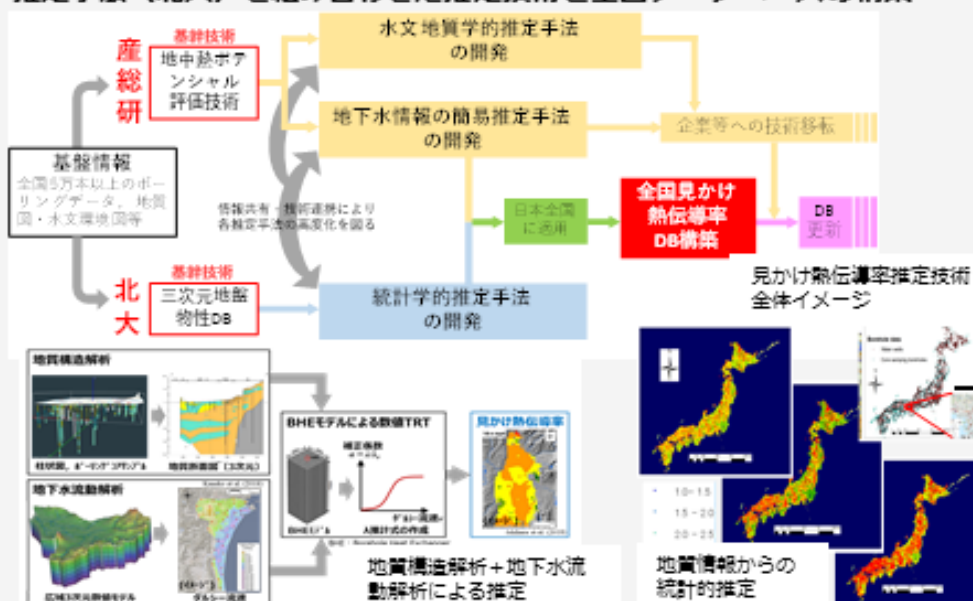
②簡易熱応答試験(TRT)法の開発・規格化

- 1) 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）
- 2) 垂直型地中熱交換器対応：a. 発熱ヒーター付き光ファイバー温度計を用いた簡易TRT, b. 周期加熱法による温度位相差解析による迅速TRT（以上、北大）



①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

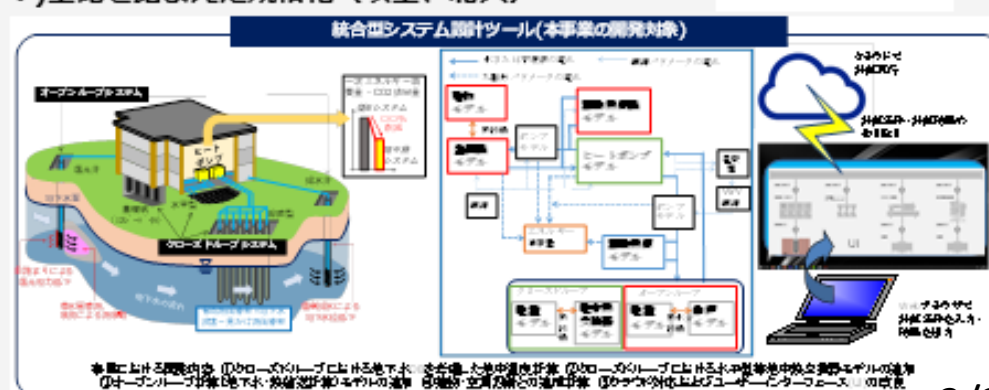
水文地質学的推定手法・地下水情報の簡易推定手法（産総研）と統計学的推定手法（北大）を組み合わせた推定技術と全国データベースの構築



③統合型設計ツールの開発・規格化

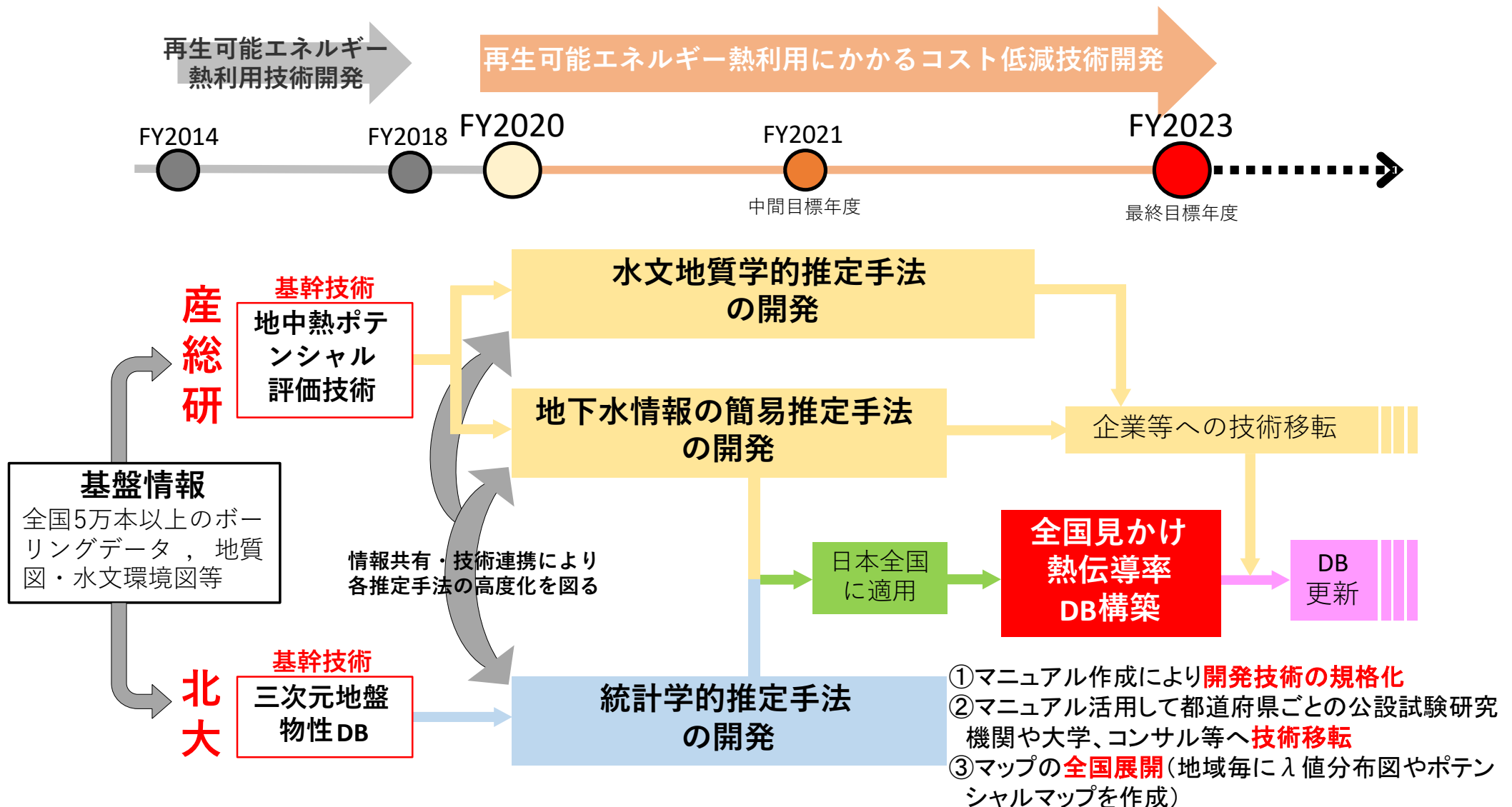
クローズド・オープンループシステムに対応した世界初の統合型ツール

- 1) 地盤・帯水層データベースからの入力（北大）
- 2) オープンループシステムの実証実験に基づく最適な地中熱利用形態の判定技術開発（産総研）
- 3) 任意の地中熱交換器モデルを実装, 4) 建物・空調設備との連成計算, 5) LCEM, Webプログラムとの連携, 6) 簡易測定機を用いた実測による検証, 7) 上記を踏まえた規格化（以上、北大）



1. 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

わが国に賦存する地下水流れ効果を設計に反映させることで、
地中熱システムの適正化を図るべく、見かけ熱伝導率の推定技術を開発・規格化する



1. 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

1.1 見かけ熱伝導率の推定技術: 水文地質学的推定手法の開発（産総研）

2020年度は、検証地域である京都盆地において、コアボーリングを行い、詳細な地質情報を入手した。

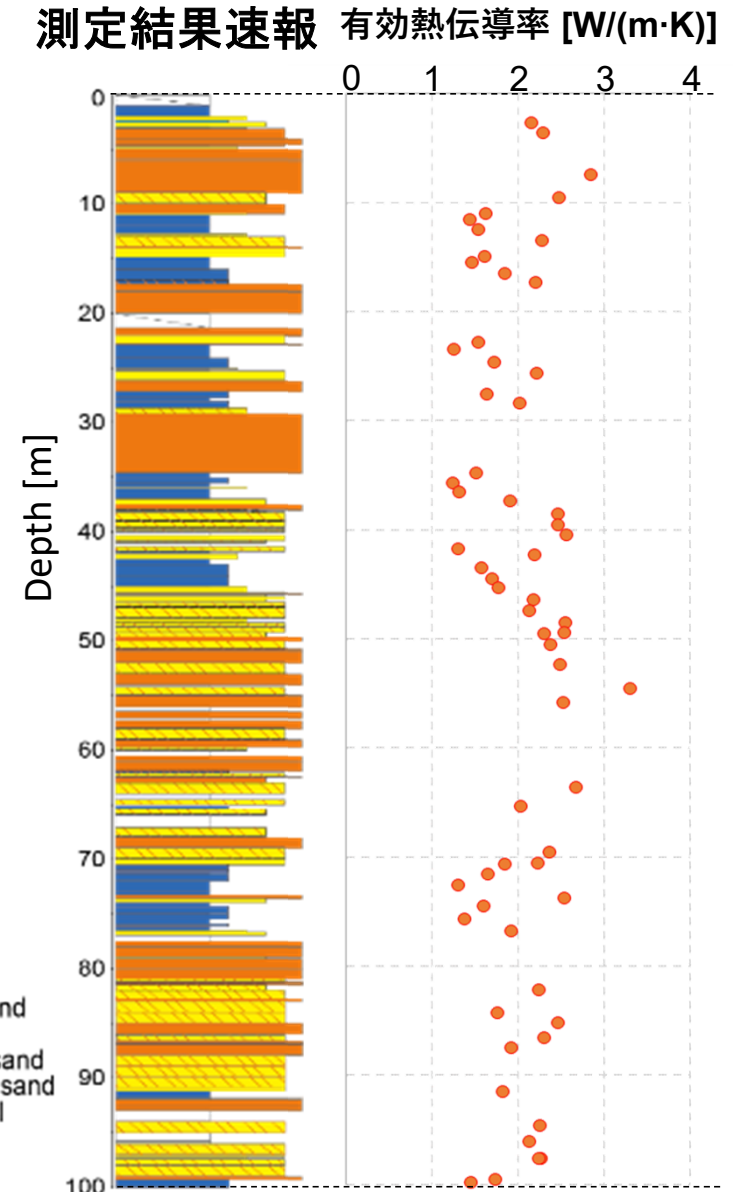
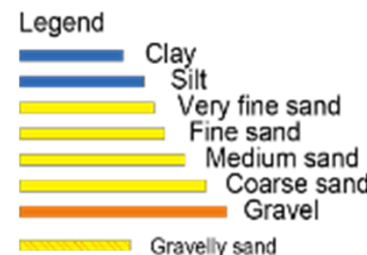
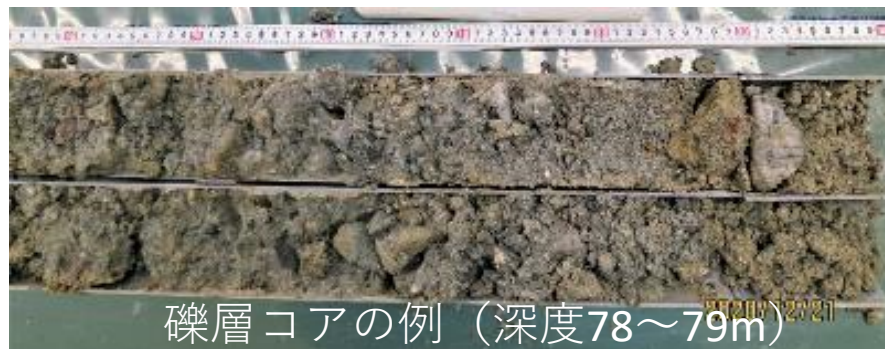
※層厚による加重平均値

京都盆地で採取したコアの熱伝導率測定

有効熱伝導率の平均値: 2.09 W/(mK)

体積熱容量の平均値 : $2.74 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$

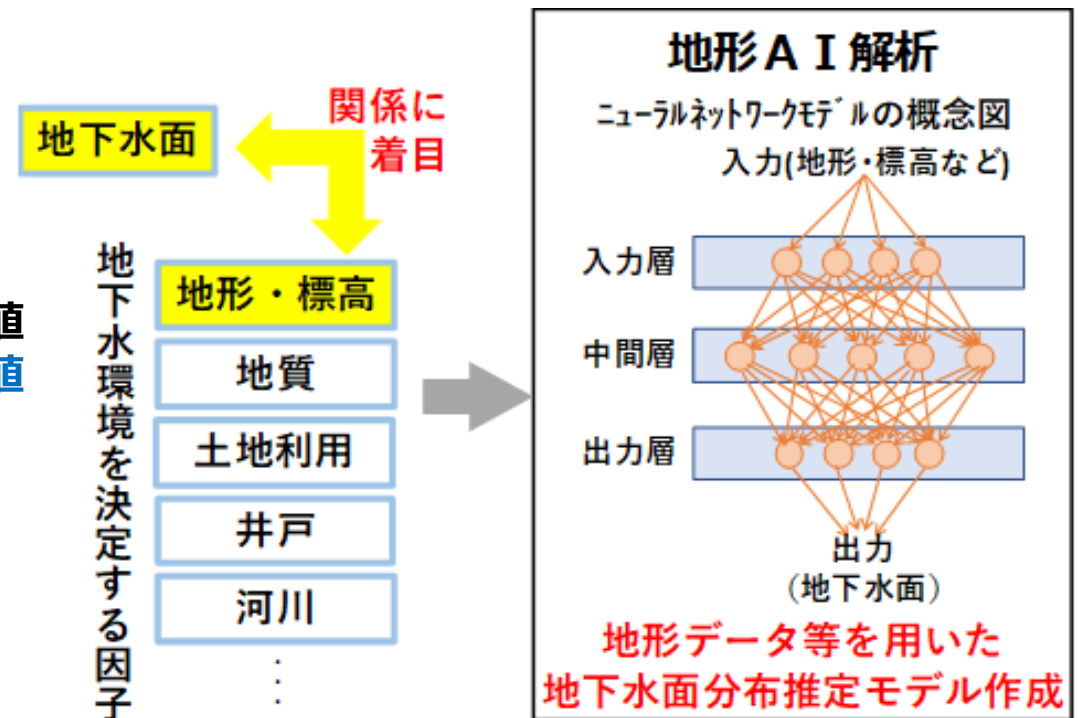
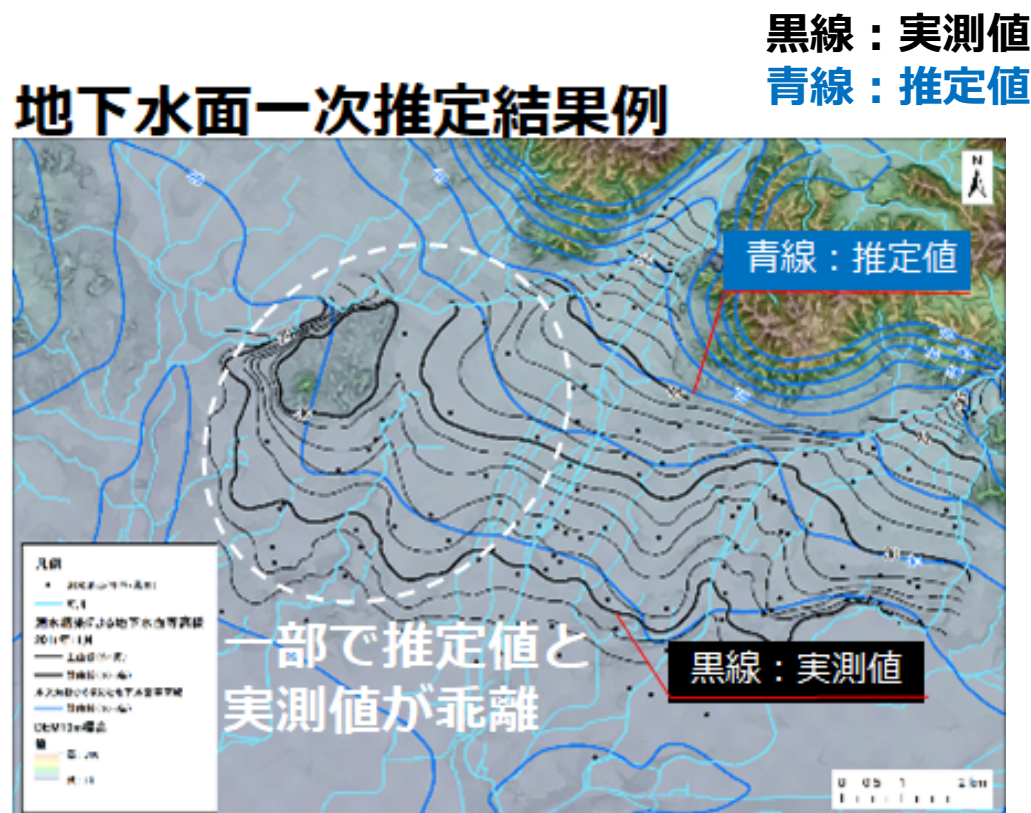
- コアの7割以上が「粗粒砂～礫層」(例: 写真)
- 厚い砂礫層が含まれていることから、本調査地は地下水の透水性が高いと予想



1. 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

1.1 見かけ熱伝導率の推定技術: 地下水情報の簡易推定手法の開発

地形AI解析に基づき簡便に地下水面等高線やダルシー流速等を推定する手法の確立を目指す（右図参照）



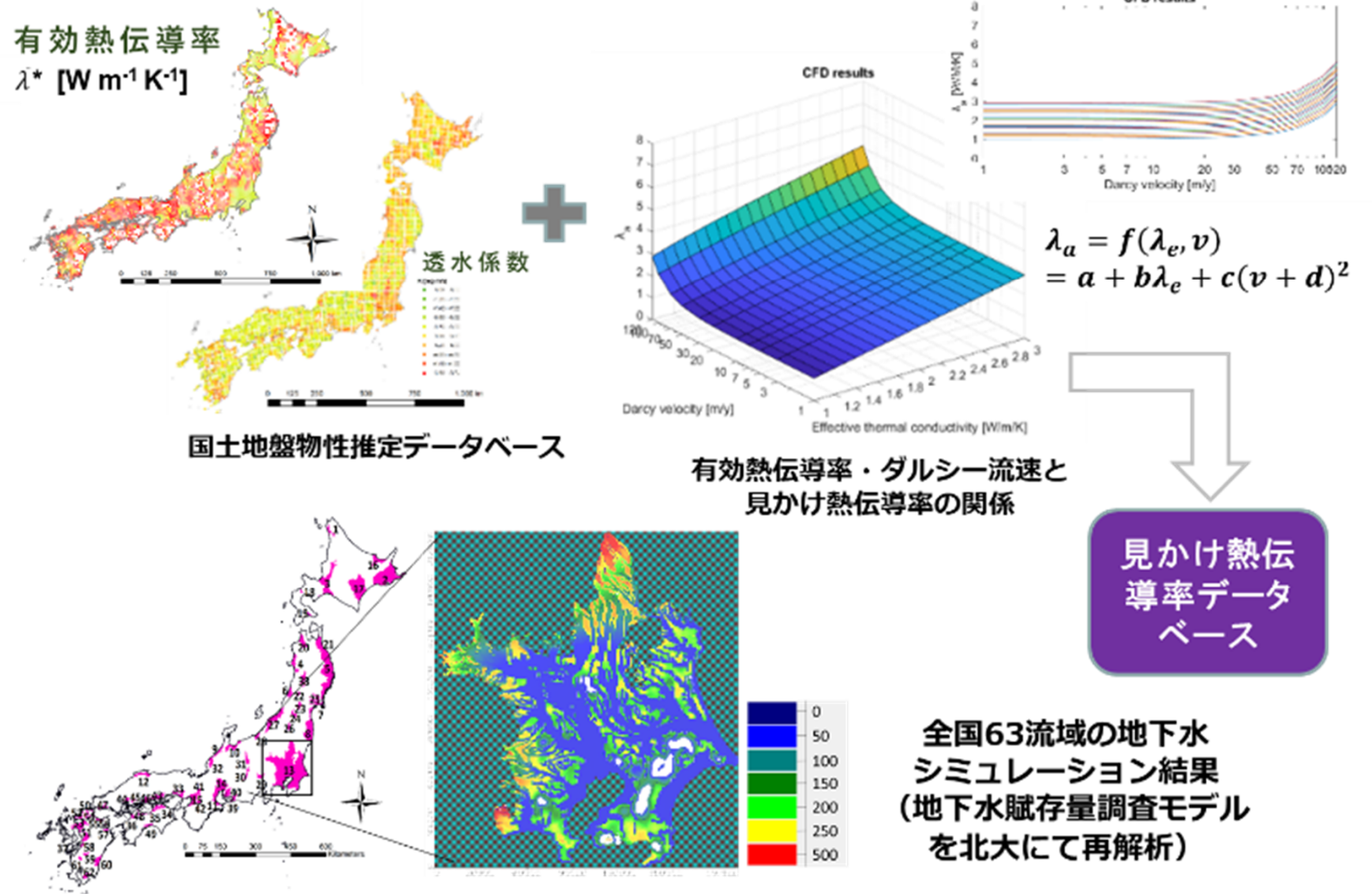
2020年度の成果

- ・ 全国10地域において標高データを用いた地下水面の一次推定を実施
- ・ 推定値と実測値を比較して大局的な再現性を確認 → 地域によっては両者が乖離
- ・ 今後、一次推定値をベース＋他変数を取り込んで推定値の高度化（NNモデル適用）

1. 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

1.1. 見かけ熱伝導率の推定技術:統計学的手法(北海道大学)

既往NEDO研究委託(2014~2018)で開発した地盤物性DBに,地下水シミュレーションを組み合わせ,数値TRTによる応答局面による変換により見かけ熱伝導率を推定する

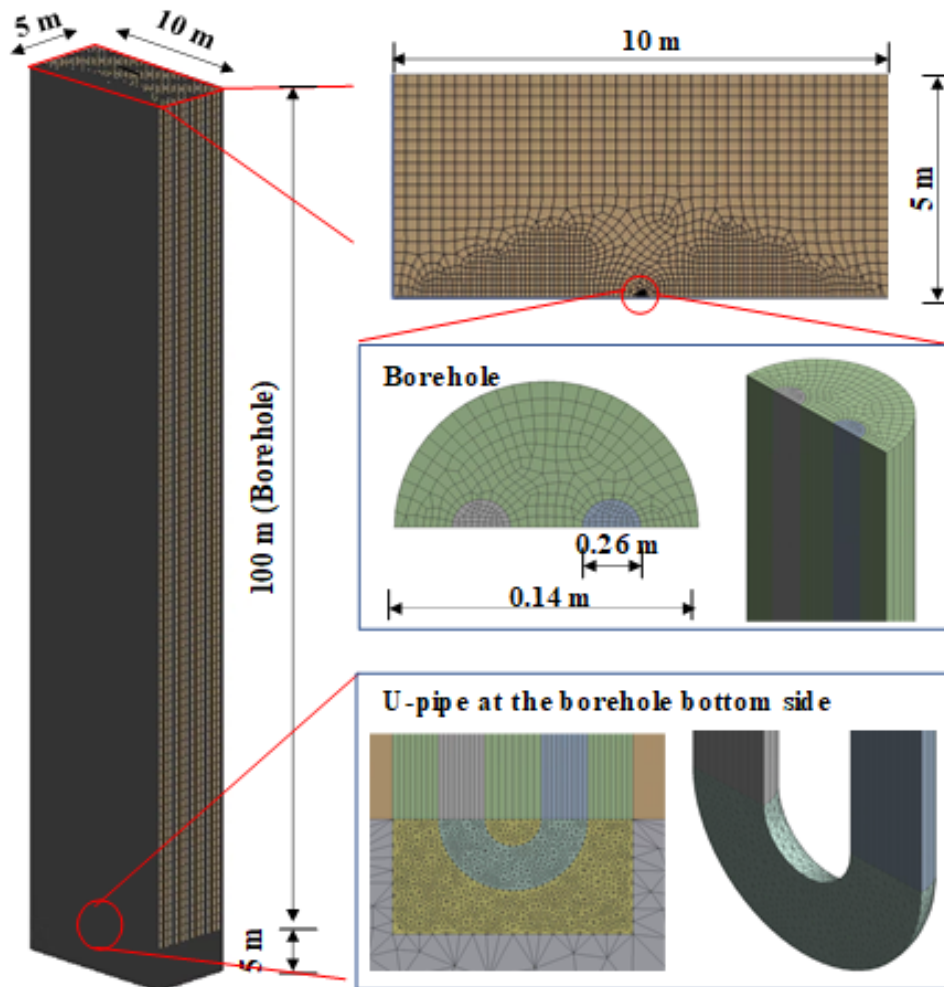


1. 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

1.1. 見かけ熱伝導率の推定技術:統計学的手法(北海道大学)

見かけ熱伝導率を推定するための応答局面の決定

➤ CFD(ANSYS Fluent)を用いた数値TRTにより様々な条件での見かけ熱伝導率を計算

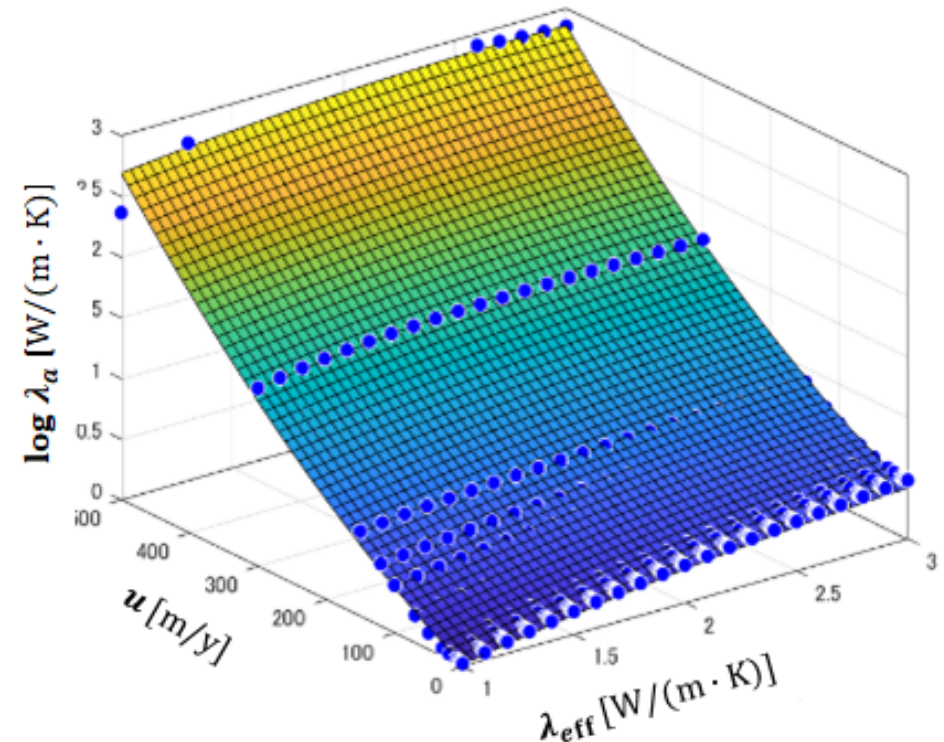


数値TRTのためのCFD モデル

◆ 見かけ伝導率の近似式

$$\log(\lambda_a) = a + b\lambda_e + cu + d\lambda_e^2 + eu^2 + f\lambda_e u$$

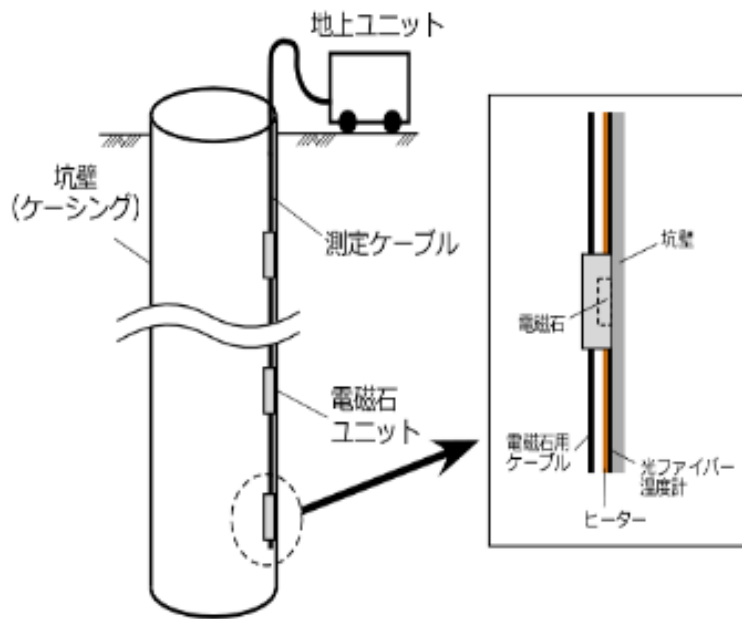
$$R^2 = 0.99$$



見かけ熱伝導率に対する応答局面 8/25

2. 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

大口径の水井戸や大深度のBHEに適用可能なTRT装置および周期加熱法を用いたTRT装置を開発および規格化することで、
TRTにかかるコストや時間の削減を目指す。



大口径水井戸に適用可能な
TRT装置の設置イメージ



周期加熱法のためのTRT試験機



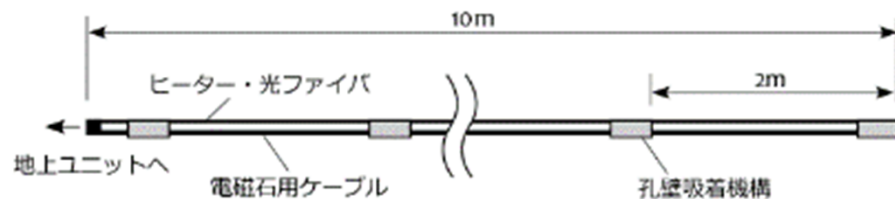
発熱ヒーター一体光ファイバーケーブル

2. 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

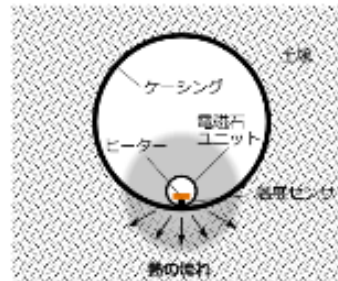
2.1. 井戸の管壁に密着する電磁石付ヒーターユニットを用いたTRT（秋田大学）

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：本装置は鋼管が設置された水井戸であればTRTの実施が可能であるため、TRTコストの削減および土壌熱伝導率データの拡充が期待できる。



大口径水井戸対応簡易型TRT装置の概要

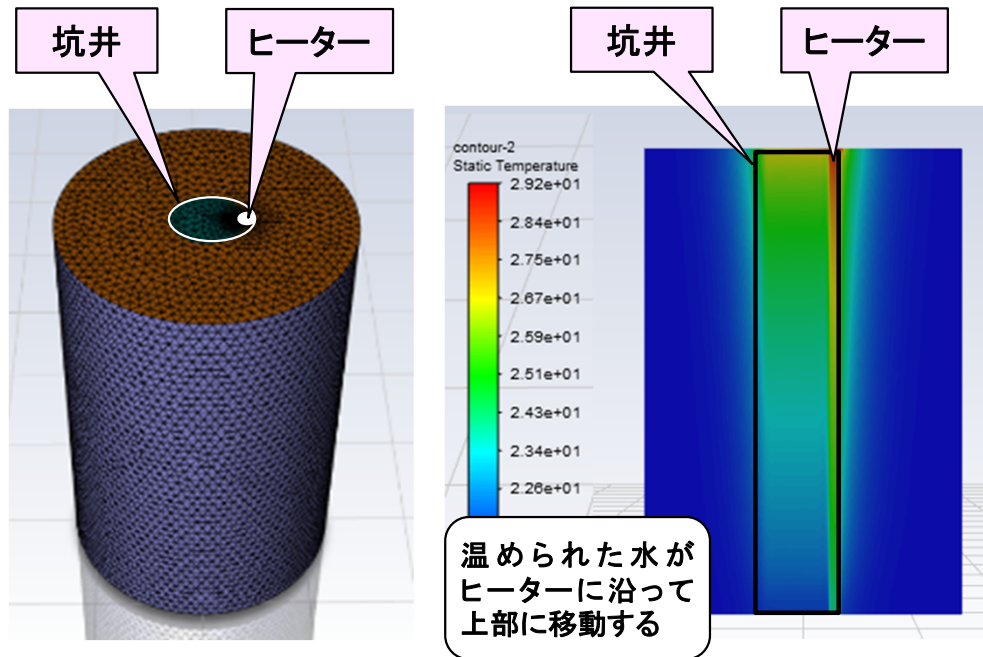


孔壁吸着機構の試作機（上）と
金属壁への吸着状況（下）

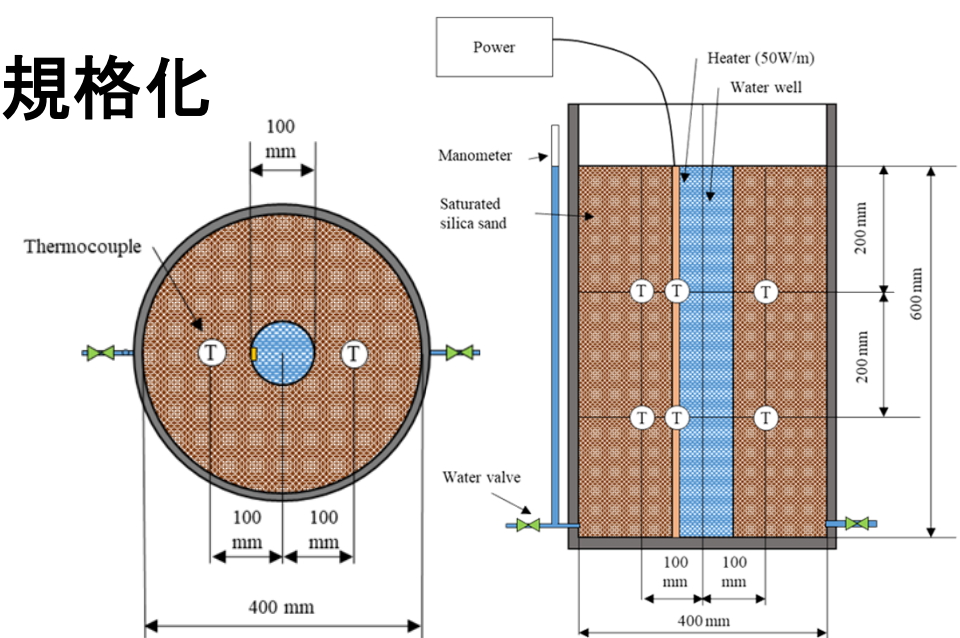
- 2020年度に設計した大口径水井戸対応簡易型TRT装置を製作中である。試作機では、孔壁吸着機構の自重を支える程度の吸着力が確認できた。

2. 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

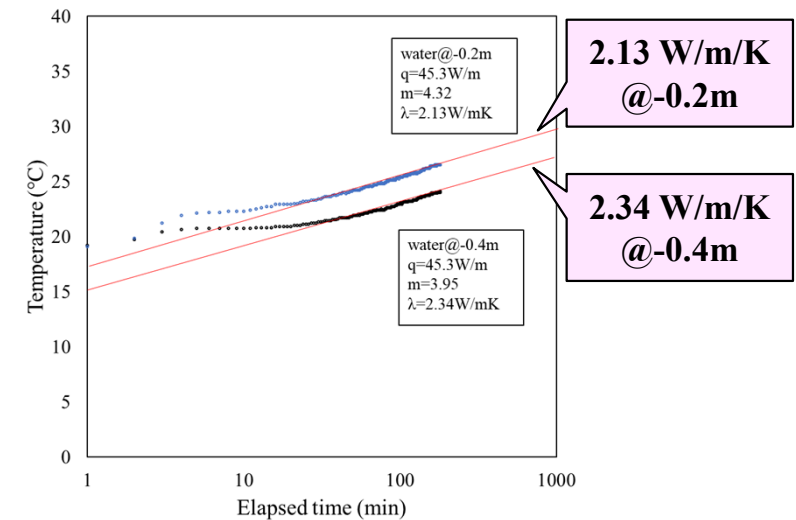
2.1. 井戸の管壁に密着する電磁石付ヒーターユニットを用いたTRT（秋田大学）



数値モデルおよびシミュレーション結果



室内実験装置模式図



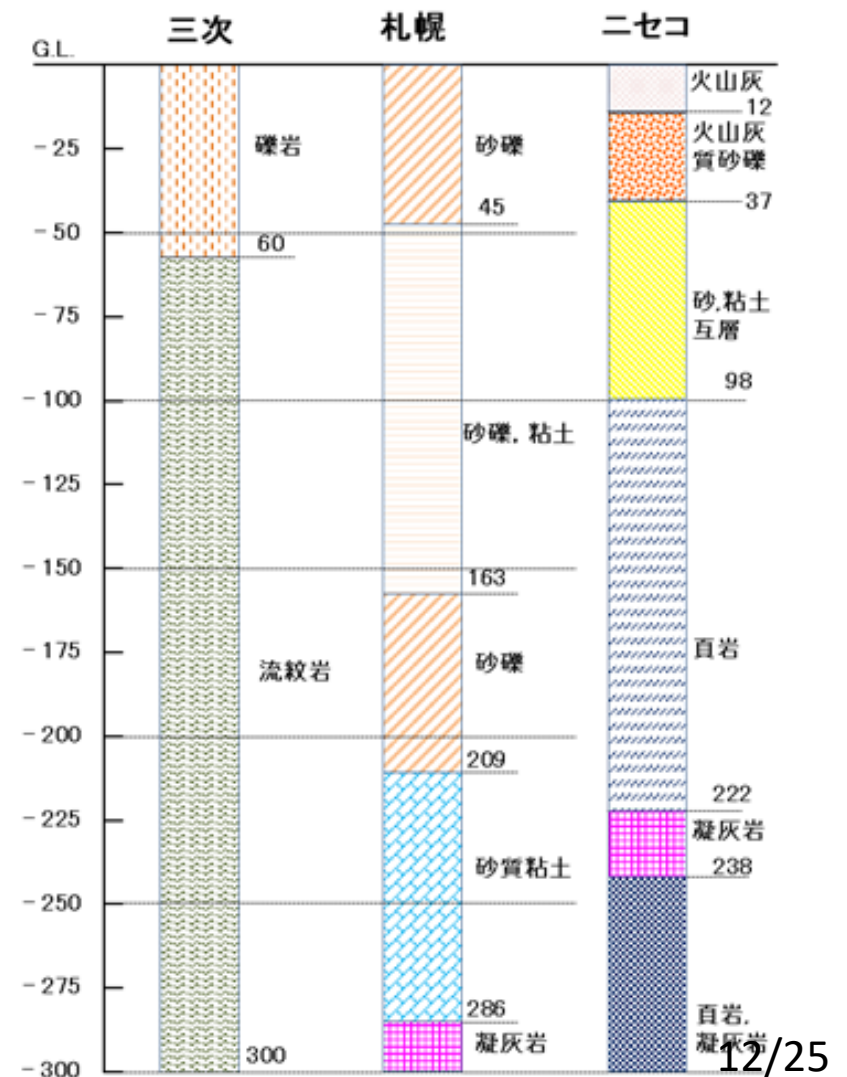
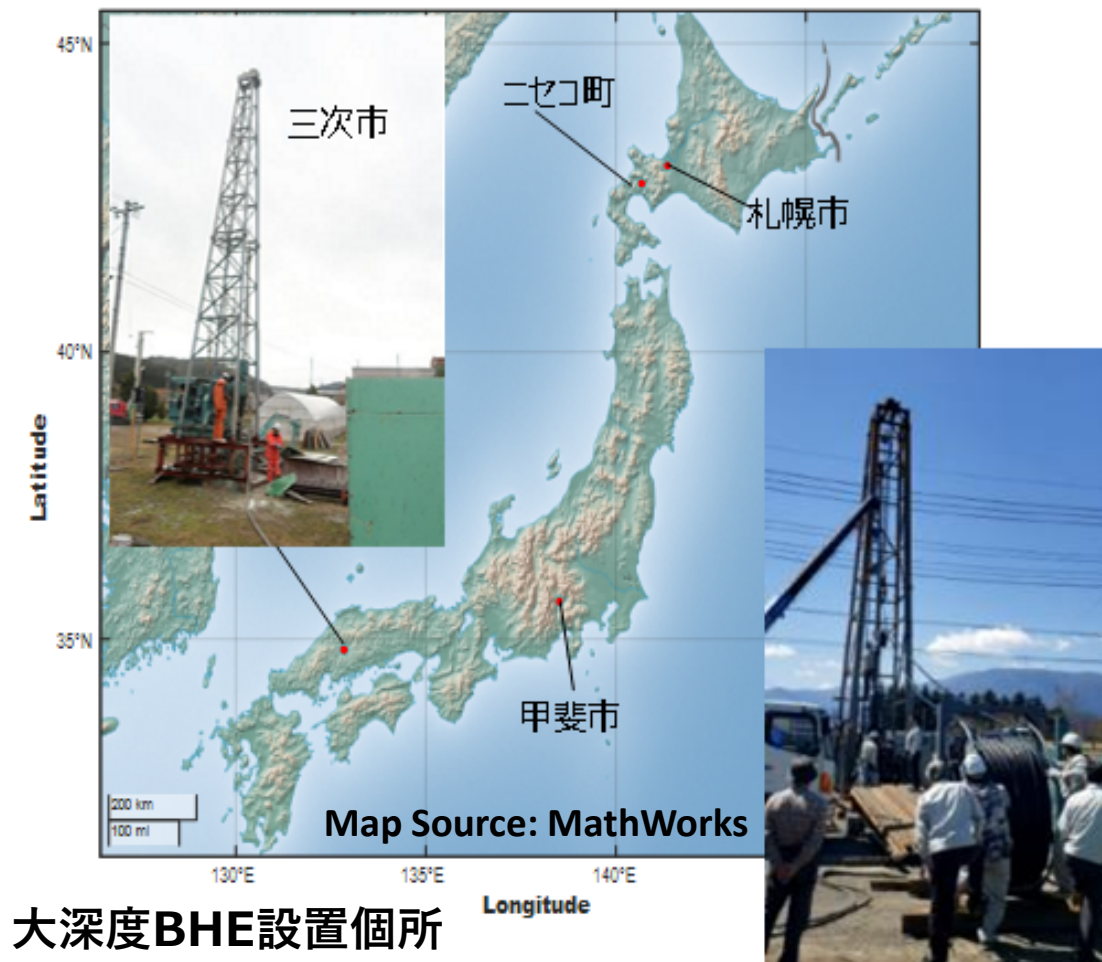
深度0.2, 0.4mにおける見かけ熱伝導率

- 簡易TRT装置を模擬した室内実験および数値モデルにより、深度による見かけ熱伝導率の違いおよびTRT中における水井戸内の温度挙動を再現した。

2. 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

2.2. 垂直型地中熱交換器対応: 発熱ヒーター付き光ファイバー温度計を用いた簡易TRT

- ・ 堅硬な基盤(白亜系流紋岩類)が分布する三次市はダウンザホール法で掘削(約10日)
- ・ 未固結もしくは第三系のその他地域では, ロータリー法により掘削(約20日)



2. 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

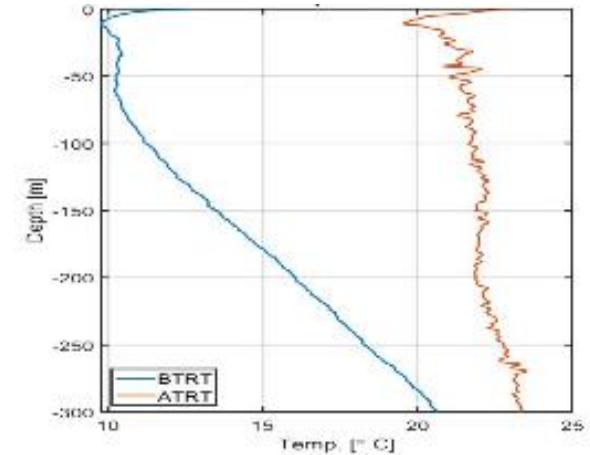
2.2. 垂直型地中熱交換器対応: 周期加熱法による温度位相差解析による迅速TRT



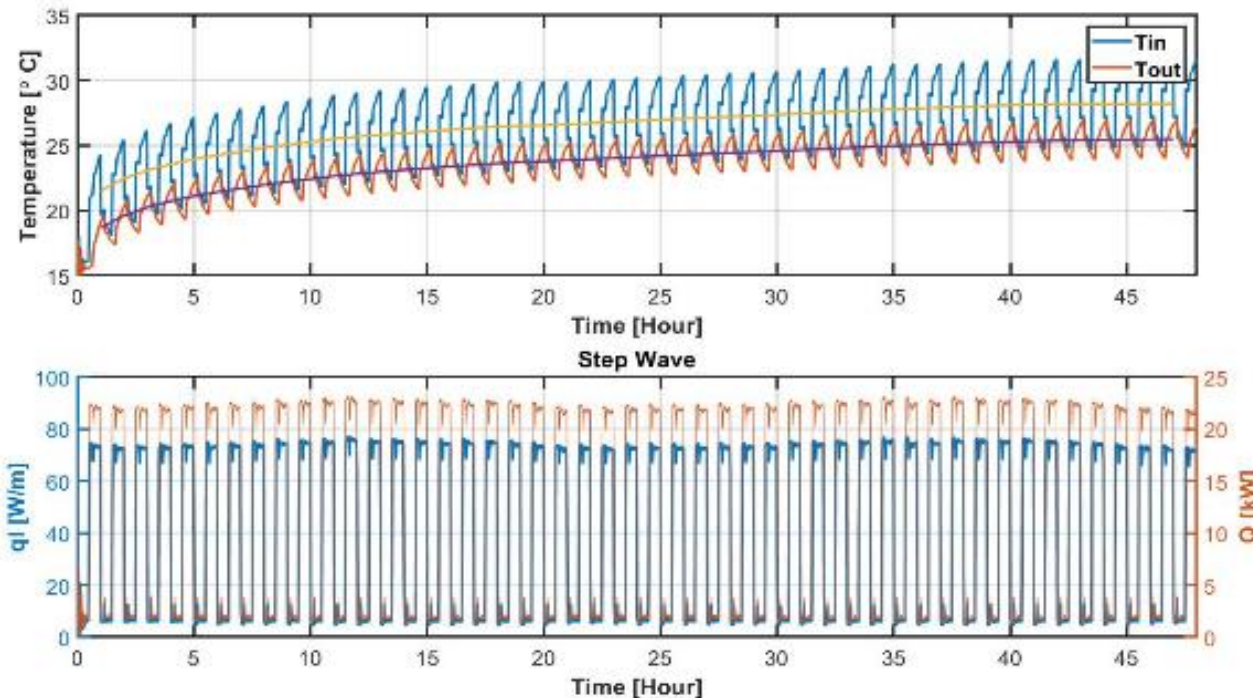
Test Specifications

- Depth = 300 m
- $d_b = 250$ mm
- $d_o = 43$ mm
- $d_{in}(0-140) = 36$ mm
- $d_{in}(300\text{m}) = 30$ mm
- $Q_{max} = 20$ kW
- $FR = 63 \pm 2$ L/min
- $T_{cycle} = 60$ min
- Time = 48 h

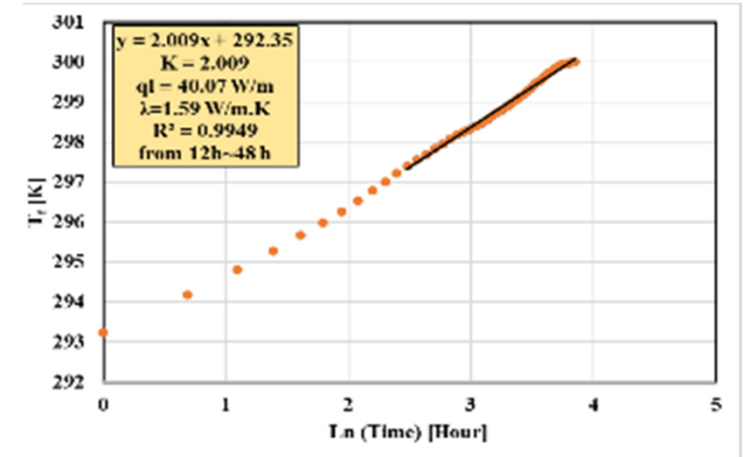
2-温度プロファイル



1-時間経過による入出口の温度と加熱量の変化



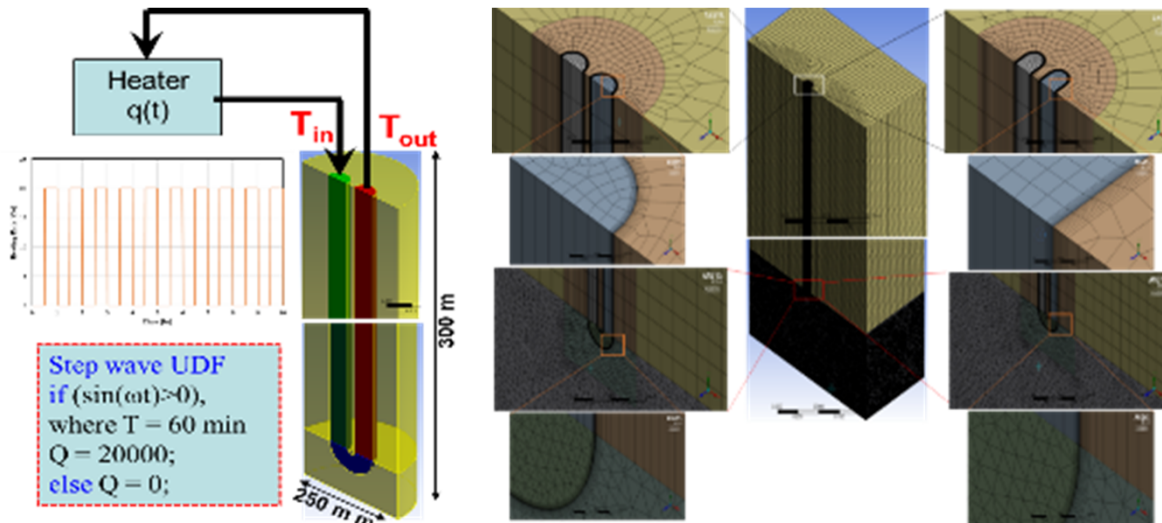
3-時間経過による温度変化 (12-48 h)



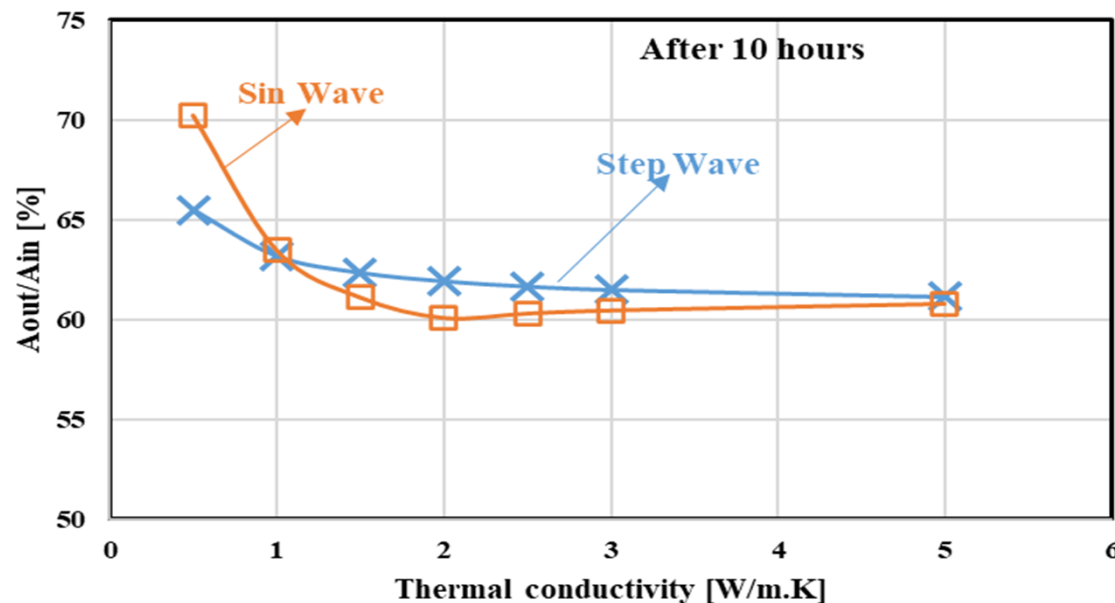
$Q_{1_avg} = 40.1$ W/m, avg heating rate in W/m[12 kW]
 $A_{in} = 3.4$ K, Average amplitude of the inlet temp.
 $A_{out} = 1.47$ K, Average amplitude of the outlet temp.
The average $A_{out}/A_{in} = 42\%$.

2. 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

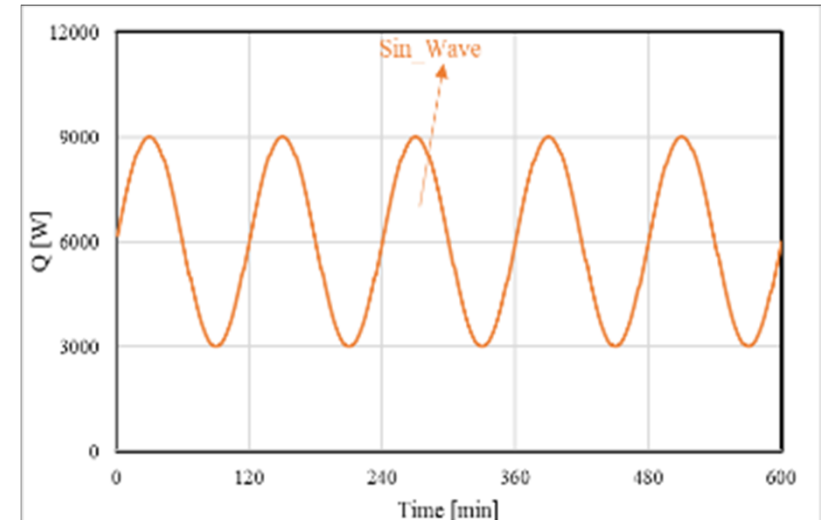
2.2. 垂直型地中熱交換器対応: CFDによる周期加熱法の数値再現実験



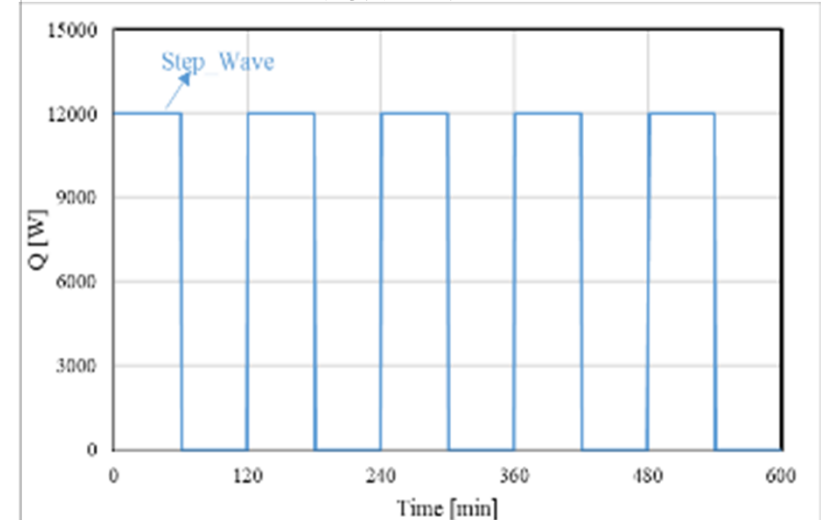
CFDモデル



温度振幅の往き還り比と有効熱伝導率の関係



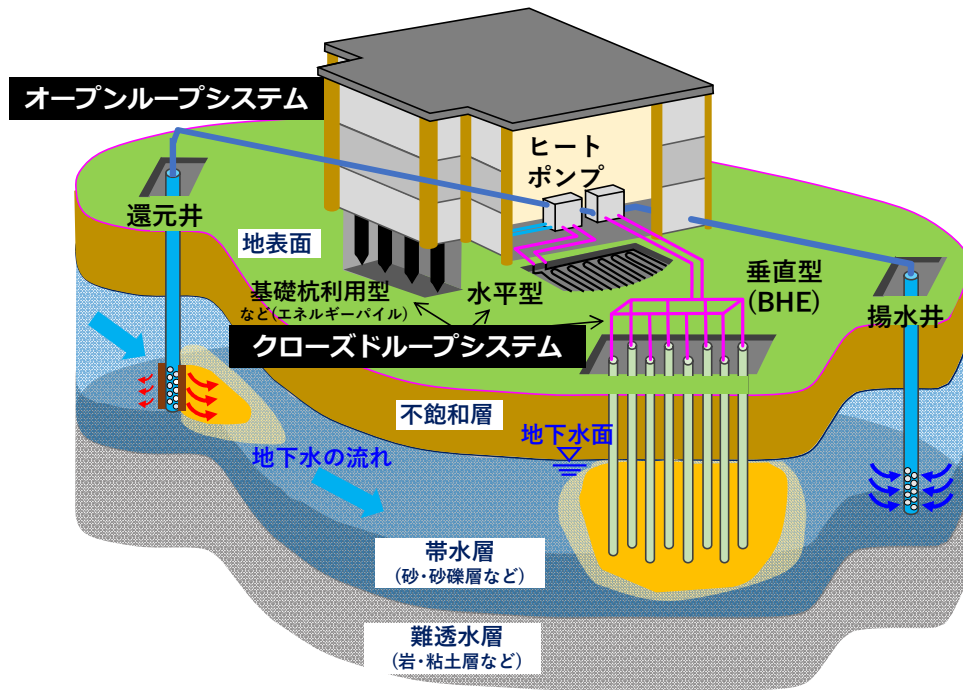
周期加熱



ステップ加熱

加熱パターン

3. 統合型設計ツールの開発・規格化



統合型設計ツールイメージ

1) 設計に必要な地盤・帯水層データベースの規格化

- 日本地下水学会との規格化による共同研究開始
- さく井協会による全国アンケート調査の開始

2) オープンループシステムの実証実験に基づく最適な地中熱利用形態の判定技術開発

- (産総研)

3) 地下水流れおよび多種の地中熱交換器に対応した設計ツールの開発

- 統合型ツールに組み込み中

4) 建物・空調設備との連成シミュレーションの作成

- 標準問題によるプログラムの検証

5) 設計ツールと他のツール、プログラムとの連携方法の確立

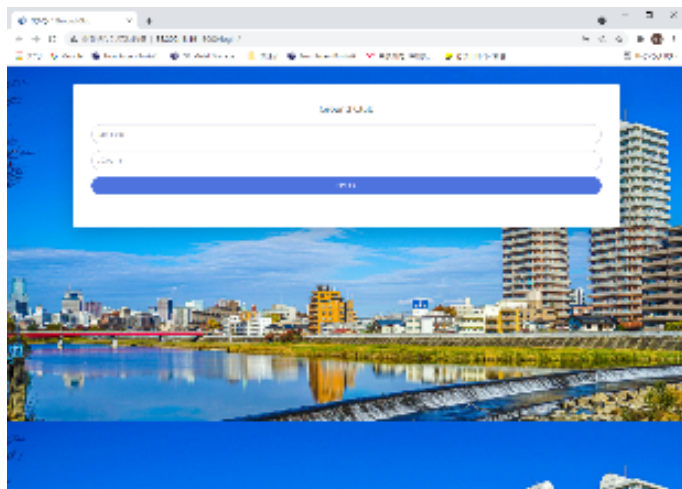
- LCEMによるHPデータベースの統合

6) オープンループシステムの設計ツールの開発

- 簡易シミュレーター製作に着手

7) 計算精度検証のためのGSHPシステム運転データの収集と分析

- 全国6カ所に設置、測定開始



ログイン画面



条件入力画面



計算結果出力画面

3. 統合型設計ツールの開発・規格化

本技術開発における設計ツールの特徴

※CL…クローズドループ、OL…オープンループ

項目		北大チーム	岐阜大
概要	設計ツール名称	Ground Club Advanced CO	LCEM
	使用言語	日本語（英語, 中国語ほか）	日本語
	プログラミング言語	MATLAB, Fortran, Java	Excel
	開発要素	<ul style="list-style-type: none"> ・CL・OL統合(CO)、実務者向けの簡易ツール＋高度検討可能なオプション ・地中熱の全種類の方式を地下（地下水、地質）データ含め網羅 	<ul style="list-style-type: none"> ・OL用LCEM構築シート ・補機動力（揚水ポンプ）の消費エネルギー、井水配管に伴う流量の変化を考慮し計算
適用範囲	地中熱源	CL・OL（蓄熱有(ATES)・無）	CL・OL(蓄熱無)
	その他	別熱源方式(空気熱源・太陽熱等再エネ)とのハイブリッド	LCEMで利用可能な他の熱源とのハイブリッド
データ	インプット	地中温度・有効熱伝導率・帯水層厚・地中熱交換器形状・ヒートポンプ仕様など	地下水温度・揚水可能量・還元可能量(OLの場合)、外気温、冷暖房熱負荷
	アウトプット	各種運転状況、熱源水温度、蓄熱量、設備消費電力、SPF、CO2排出量、LCC	各種機器運転状況・消費電力・効率、地中採放熱量、熱源水温度
開発後の運用	想定ユーザー	設備設計・施工監理技術者	設備設計・施工監理技術者
	ツール管理者	民間ソフトウェア会社	民間コンサル会社、大学(未定)
	提供方法	基本機能版無料／高機能版有料	無料

3. 統合型設計ツールの開発・規格化

3.1.設計に必要な地盤・帯水層データベースの規格化

日本地下水学会との共同実施として、2021年度より産学によるWG（参加機関：広島大学，東京大学，長崎大学，京都大学，地域地盤環境研究所，アクアジオテクノ，竹中工務店，日本地下水開発，興和，東邦地水，日本工営）を立ち上げ，統合型設計ツール，特に地下水熱利用に必要なデータベースについての構成要素（透水係数などの物性値や地下温度など）を規格化を進めている。2021年9月時点で，地中熱の研究設計に用いる既存資料の収集整理を行っている。

規格化に向けた既存資料の収集整理状況（抜粋）

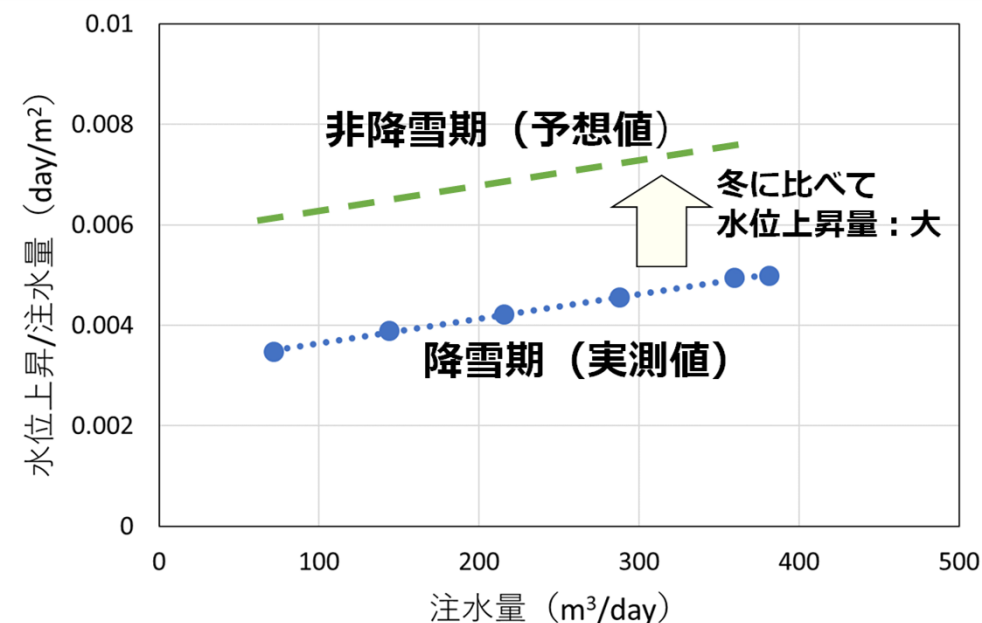
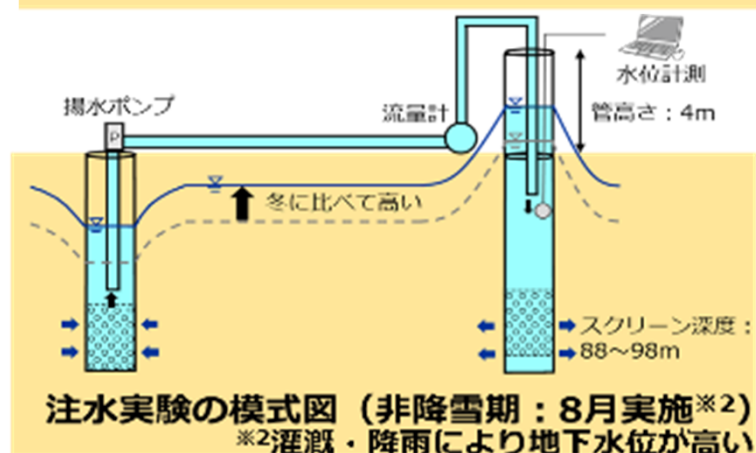
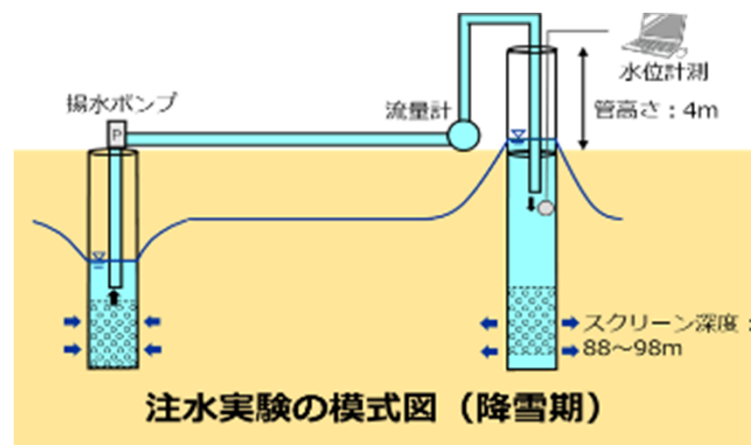
（１）文献・資料の基礎情報			（３）地下水情報				（４）帯水層	
文献・資料名	言語	発行年	地下水位		比流束（ダルシー流速）		地質調査	
			実測データ	解析／推定	実測データ	解析／推定	ボーリング	
							コア有り	コア無し
石川県河北平野に導入した地中熱ヒートポンプシステムの性能評価と	JP	2020						○
地下水マップ（説明資料含む）	JP			コンター			○	
地下水利用適正化調査報告書	JP			コンター			○	
仙台平野における地下温度構造に関する研究その１，３次元地下水流	JP	2005						
日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成	JP	1995						
単一及び複数帯水層に適用した帯水層蓄熱利用システムにおける地盤沈下量の予測	JP	2020						

3. 統合型設計ツールの開発・規格化

3.2. オープンループシステムの実証実験に基づく最適な地中熱利用形態の判定技術開発

安定的な還元可能性を判断するための指標検討のため原位置実験（注水実験）を実施

地下水位の異なる2時期（降雪期・非降雪期）の注水実験を実施し、水理水頭の注水量への影響を把握



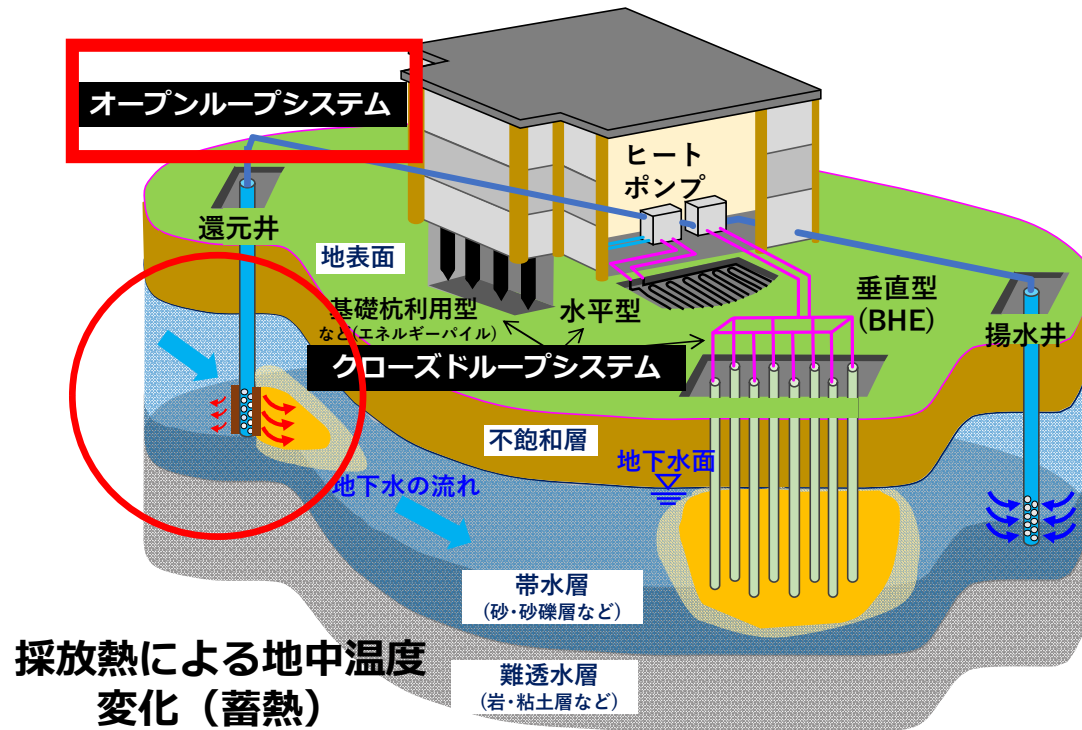
降雪期 (2020年度) の測定結果

降雪期の注水試験結果と非降雪期に想定される結果

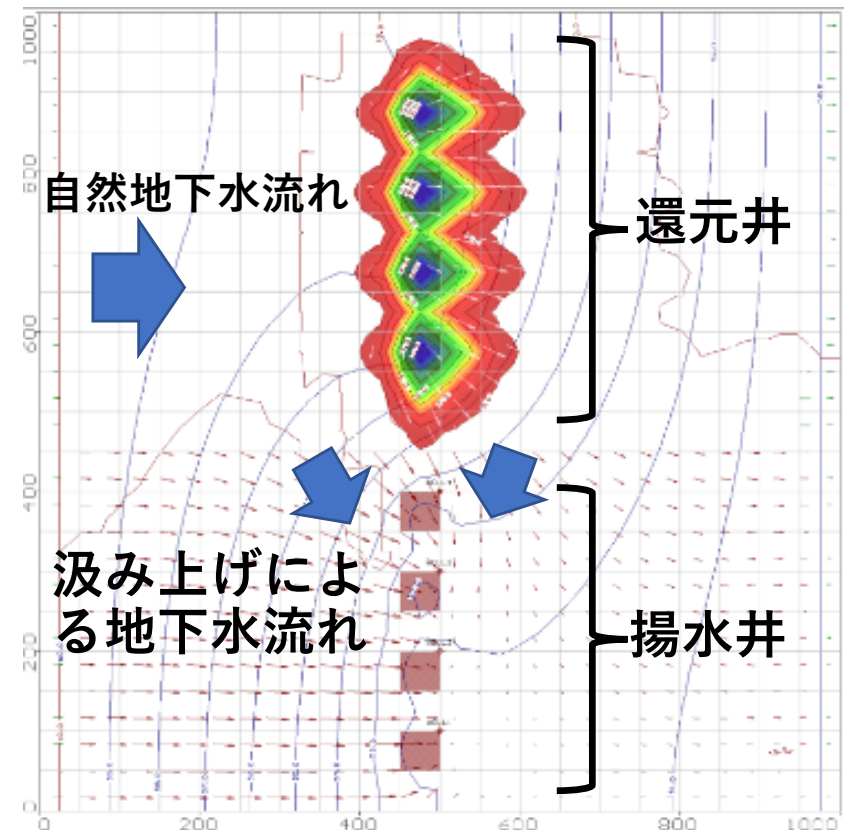
3. 統合型設計ツールの開発・規格化

3.2. オープンループシステムの実証実験に基づく最適な地中熱利用形態の判定技術開発

- ・ 季節間での暖冷房利用による蓄熱量計算（ATES評価）
- ・ ヒートポンプシミュレーションとの組み合わせによるシステム効率評価
- ・ 水平三層（帯水層＋上下加圧層（熱漏洩））モデルと，メッシュ・物性値（見かけ熱伝導率採用）の簡素化による，実用速度の確保（多数パターンの比較計算）



統合型設計ツールにおけるオープンループシステム



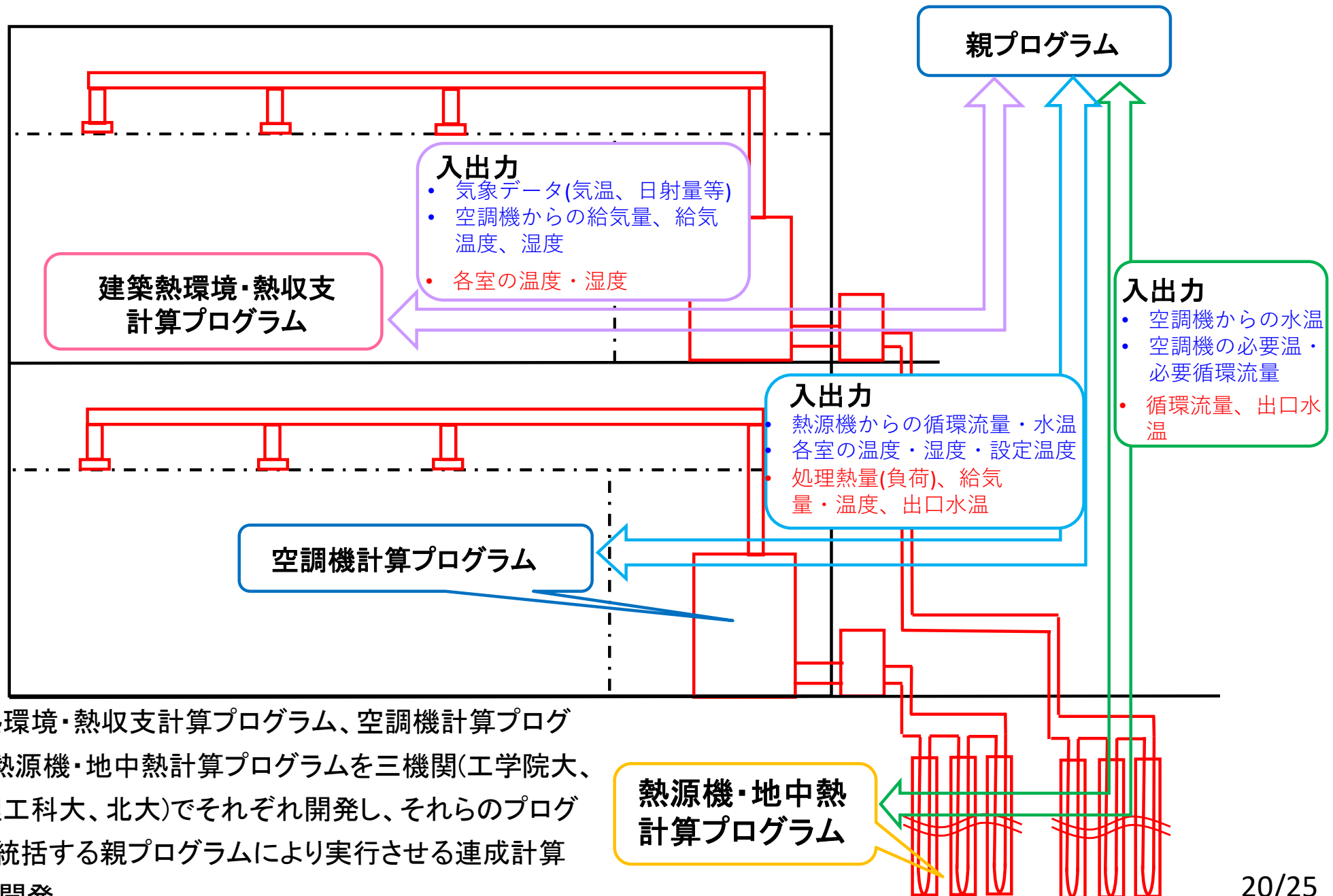
簡易シミュレーターによる蓄熱計算イメージ

過年度NEDO事業成果（日本地下水開発株式会社，2014～2018）におけるATES実証試験データを検証に用いる予定

3. 統合型設計ツールの開発・規格化

3.4. 建物・空調設備との連成シミュレーションの作成

入出力の青字は入力、
赤字は出力を示す。

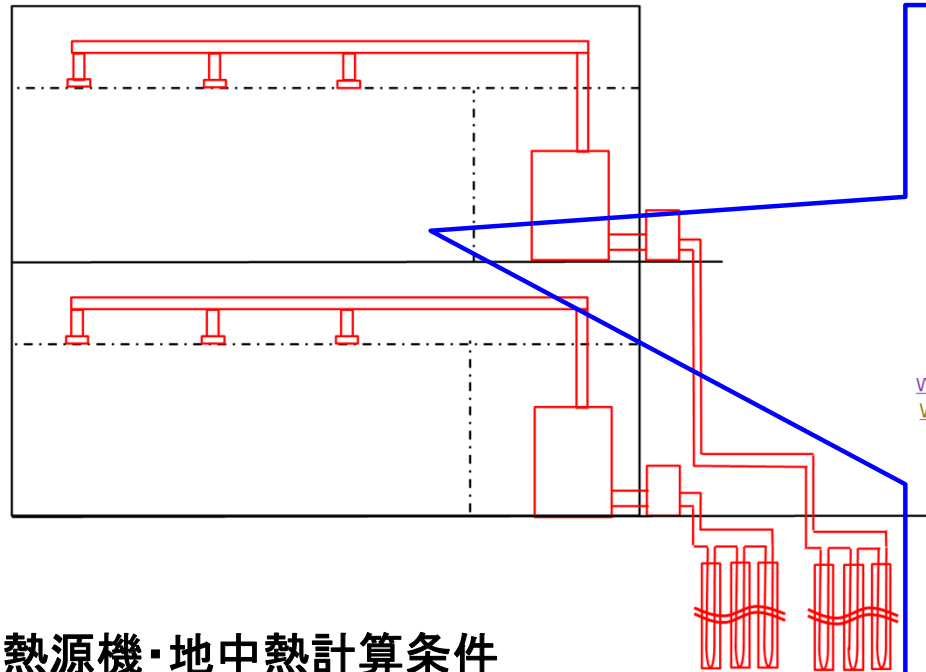


建築熱環境・熱収支計算プログラム、空調機計算プログラム、熱源機・地中熱計算プログラムを三機関(工学院大、静岡理工科大、北大)でそれぞれ開発し、それらのプログラムを統括する親プログラムにより実行させる連成計算手法を開発

3. 統合型設計ツールの開発・規格化

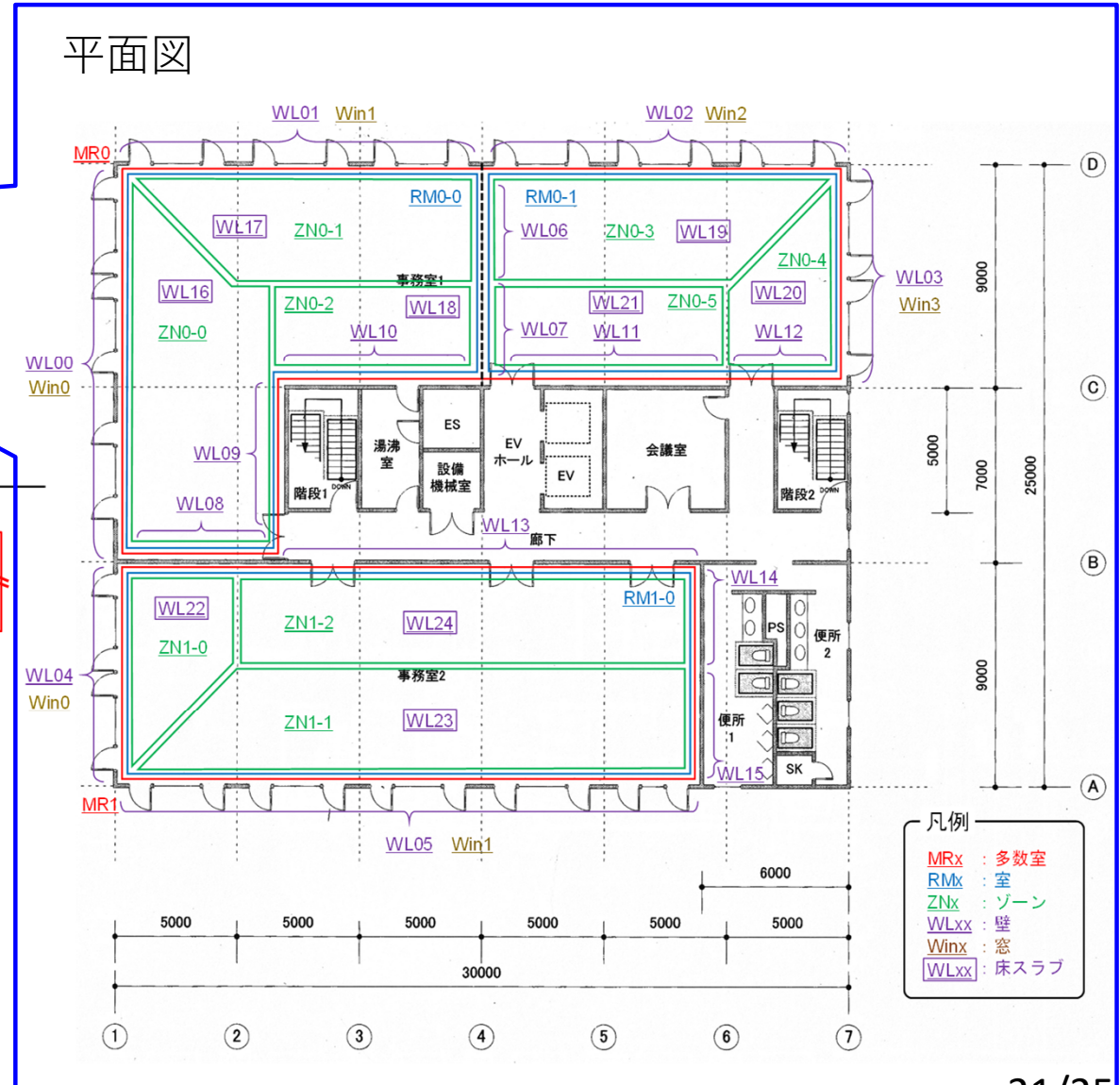
3.4. 建物・空調設備との連成シミュレーションの計算例

省エネ法のモデル建物方で用いられる標準オフィスの1フロア
(5,000m²)を対象として、建物・空調機と地中熱の連成計算を実施



熱源機・地中熱計算条件

- ・ヒートポンプ: 定格出力140 kW
- ・地中熱交換器長さ×本数: 100m×20本
- ・熱交換器種類: ボアホールシングル Uチューブ
- ・初期地中温度: 17℃
- ・地盤の有効熱伝導率: 1.5 W/(m・K)
- ・地盤の比熱: 2.0 kJ/(kg・K)
- ・地盤の密度: 1500 kg/m³



3. 統合型設計ツールの開発・規格化

3.4. 建物・空調設備との連成シミュレーションの計算例

代表週(7/13～7/18)の
計算結果

建築熱環境・熱収支計算

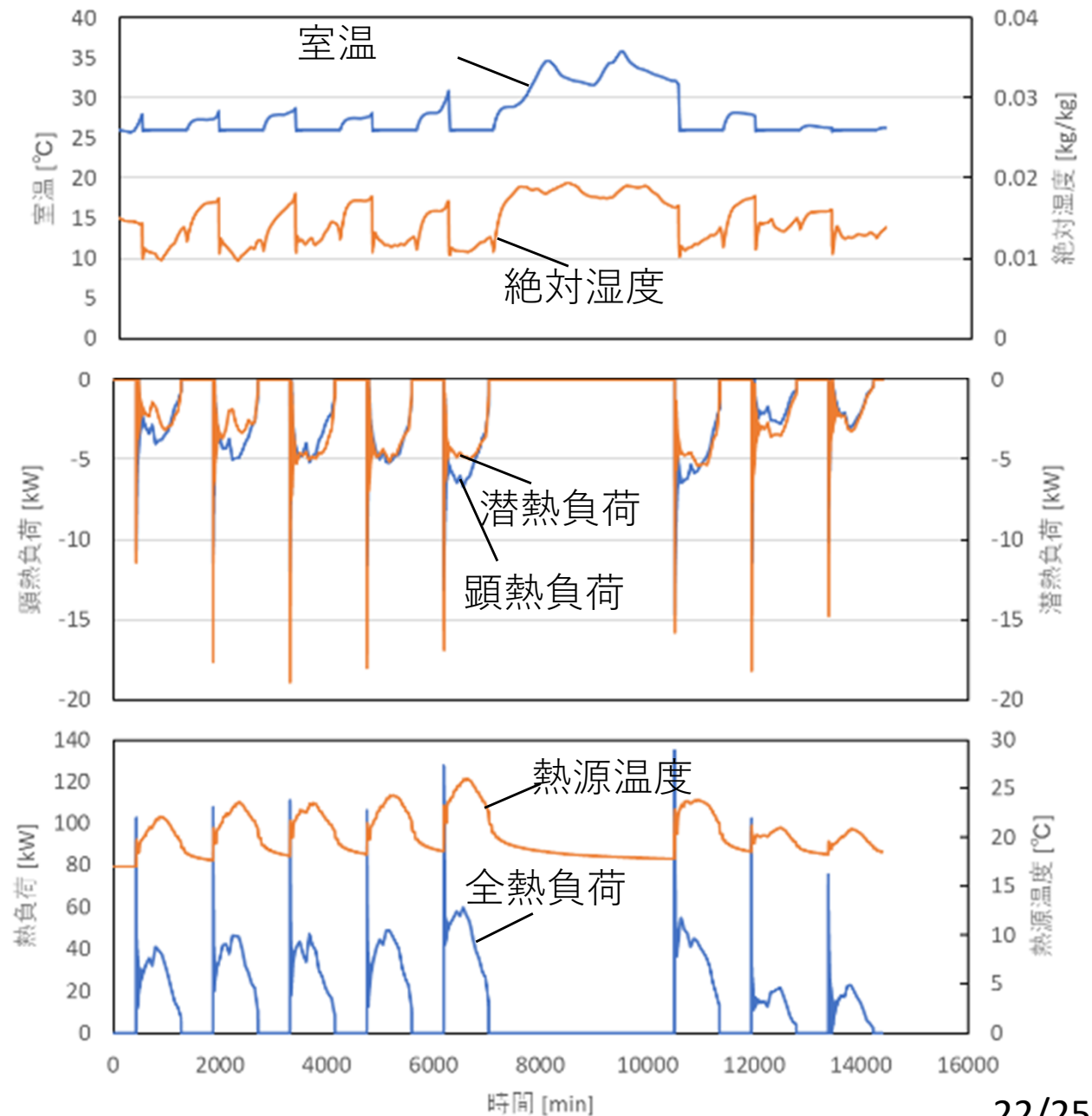
代表室の室温湿度

空調機計算

顕熱・潜熱負荷

熱源機・地中熱

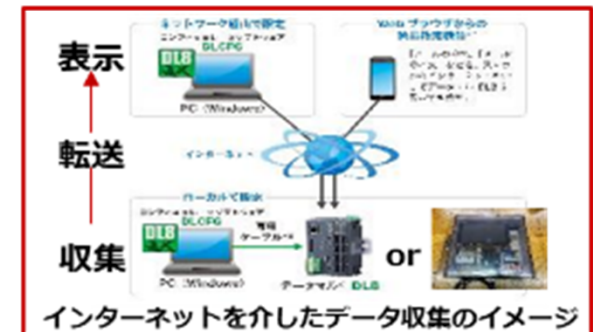
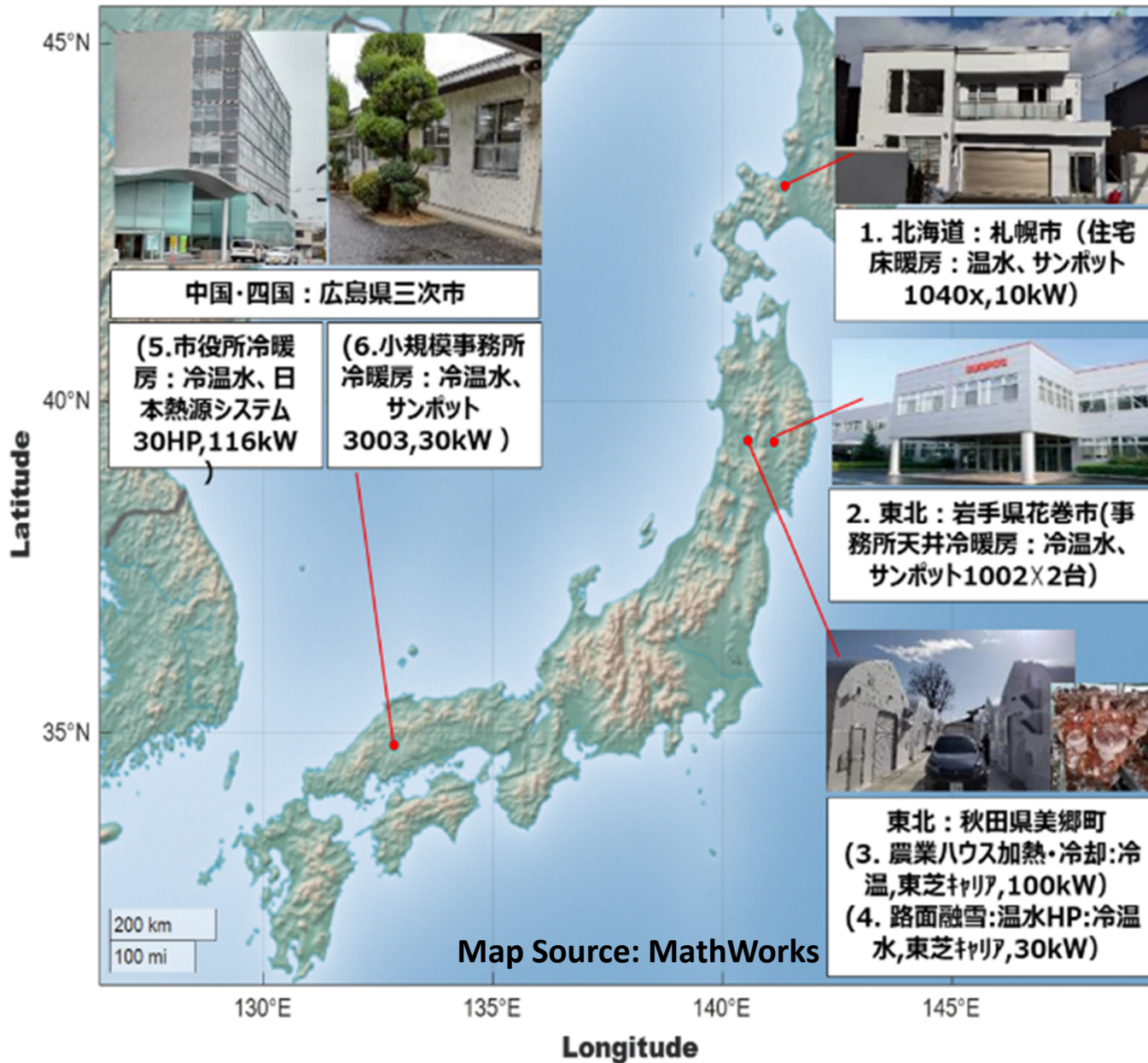
熱負荷と熱源温度



3. 統合型設計ツールの開発・規格化

3.6. 簡易測定機に用いた実測による検証

GSHPデータ収集システムの設置と測定(システムの構築)



成果の普及に向けた取り組み

	2020年度	2021年度	計
論文	0	0	0
研究発表・講演	3	2	5
受賞実績	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	3	2	5
展示会への出展	0	0	0

2021年3月24日
空調タイムス 掲載

2021年3月31日
北海道建設新聞 掲載

2021年3月31日
北海道新聞 掲載

2021年4月21日
空調タイムス 掲載

2021年8月31日
北海道新聞 掲載



2021年4月21日 空調タイムス 掲載記事

大学発技術として、特に簡易熱応答試験の装置及び解析手法について、北海道大学、秋田大学それぞれにて、特許取得を目指す予定である。また産総研は、開発した見かけ熱伝導率推定技術の各研究機関や民間企業への技術移転を進める。

2020年度の成果概要(まとめ)

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
- ・検証地域の一つ、京都市において、コアボーリングを実施し、詳細な地質情報を取得
- ・数値TRT等による統計学的推定における応答局面を決定

② 簡易熱応答試験法(TRT)の開発・規格化

- ・大口径井戸，周期加熱，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4箇所(北海道札幌市，ニセコ町，山梨県甲斐市，広島県三次市)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
- ・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