

再生可能エネルギー熱利用技術開発/

地中熱利用トータルシステムの高効率化技術開発および規格化、  
および再生可能エネルギー熱利用のポテンシャル評価技術の開発/

**低コスト・高効率を実現する間接型地中熱ヒートポンプ  
システムの開発と地理地盤情報を利用した設計・性能予測  
シミュレーションツール・ポテンシャル評価システムの開発**

期間 開始:2014年7月 終了:2019年2月

(国)北海道大学、(株)日伸テクノ、鉱研工業(株)、(株)イノアック住環境  
サンポット(株)、新日鉄住金エンジニアリング(株)、ジーエムラボ(株)

(国研)産業技術総合研究所

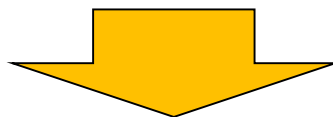
**2019年10月17日**

問い合わせ先  
北海道大学大学院工学研究院  
環境システム工学研究室  
教授 長野 克則  
E-mail:nagano@eng.hokudai.ac.jp  
TEL: 011-706-6285



# 事業の目的と主要な研究開発成果

- ① 従来の地中熱ヒートポンプ(HP)と比較してイニシャルコスト20%以上、ランニングコスト20%以上の削減が可能な地中熱HPシステムを開発する。
- ② 特に温暖地の中規模以上の建物の地中熱HPの導入を容易にできる、太陽熱や空気熱などといった他の熱源と複合したハイブリッドシステムを確立する。
- ③ 最小限の地中熱HPの規模で最大限の導入効果を得られる、設計・性能予測ツールの高精度化や地中熱ポテンシャルマップ整備を実施する。



1. 自動ロッド脱着システム搭載ボーリングマシン
2. 最小掘削断面に対応する新型形状Uチューブ
3. 低コスト・高効率な60kW級冷暖房HPと新型30kW級給湯専用HP
4. 地中熱利用熱回収HPシステムと自律型最適制御システム
5. Ground Club Cloud: 次世代型地中熱設計性能予測ツール
6. 地中熱交換器マルチスケール対応FEMシミュレーション
7. 三次元地盤データに基づく地中熱利用ポテンシャルの全国評価



# 事業実施体制（コンソーシアム体制）

本技術開発は、北海道大学と6法人および産総研のコンソーシアムにより実施

技術開発責任者  
長野克則（北海道大学）

①低コストに寄与する地中熱交換器の削孔機・工法の開発および高効率地中熱交換器の開発

(株)日伸テクノ 

- ・工法の開発
- ・フィールド試験による地中熱交換器設置コスト評価

鉦研工業(株) 

- ・削孔機(バイブロドリル、スクリューロッド、オートメーション化)の開発


(株)イノアック住環境 

- ・扁平チューブを用いたUチューブの開発
- ・Y字継手、樹脂ヘッダの開発

③低コスト・高効率に寄与する地中熱ヒートポンプ最適制御システムの開発

新日鉄住金エンジニアリング(株) 

- ・最適運転制御システムの開発、フィールド試験による制御システムの検証および制御パラメータの検討


サンポット(株) 

- ・制御ユニットの開発

ジーエムラボ(株) 

- ・制御システムのソフトウェア開発

②低コスト・高効率な多熱源多機能対応連結型地中熱ヒートポンプの開発

サンポット(株) 

- ・地中熱ヒートポンプの開発、制御システムの開発

北海道大学 

- ・地中熱交換器の性能評価
- ・サイクルシミュレーションによるヒートポンプ設計条件の決定
- ・最適制御システムのロジック構築
- ・設計・性能予測ツール、サイトレベル熱移動シミュレーションの計算手法開発
- ・地中熱ポテンシャル評価手法の構築

④地理地盤情報を活用した設計・性能予測シミュレーションツールの開発とポテンシャル評価手法・評価マップの作成

新日鉄住金エンジニアリング(株) 

- ・シミュレーションツールの検証

ジーエムラボ(株) 

- ・性能予測ツール、サイトレベル熱移動シミュレーションの実用化
- ・ポテンシャルマップの作成

↓ 共同研究

産業技術総合研究所 

- ・地盤地層データベースおよび地下水データベースの構築

①地中熱交換機の削孔機・工法および高効率地中熱交換器の開発

②多熱源多機能対応連結型地中熱ヒートポンプの開発

③地中熱ヒートポンプ最適制御システムの開発

④地理地盤情報を活用した設計・性能予測シミュレーションツールの開発とポテンシャル評価手法・評価マップの作成



北海道大学

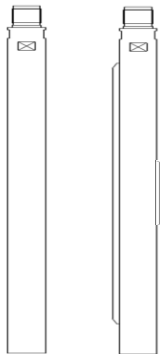
# 自動ロッド脱着システム搭載ボーリングマシン

## 従来技術

- 地中熱交換器設置の掘削作業において**作業人員が3人必要**

## 開発技術

- ロッド装填, 孔内洗浄, 抜管工程の自動化により**作業員1名**で実施可能



標準ロッド 1枚羽根ロッド  
(ゆれ防止版付) フラッシング時間を**5%削減**

フラッシング時間 (分/ロッド)	
標準ロッド	1枚羽根 ロッド
94秒	88秒

振動数/起振力	起振ウェイト	掘削時消費馬力(kW)	平均掘削時間(分/m)	対T社製機比	対従来機比
42Hz/170kN	HEAVY	32.0	1.08	82.4%	53.7%
67Hz/225kN	MIDDLE	32.0	0.93	71.0%	46.3%
90Hz/220kN	LIGHT	32.2	1.63	124.4%	81.1%
42Hz/90kN	(従来機)		2.01	153.4%	
160Hz	(T社製機)		1.31	—	

\*T社製機は168による単管掘削, データをP133に換算

バイブロヘッドによる掘削時間削減検証結果

起振ウェイトMIDDLEを使用した場合

**掘削時間**は従来機比で**54%**, T社機比でも**29%削減**



リモート操作盤



操作盤



バイブロヘッド



ロッドマガジン

掘削機本体



本事業で開発のバイブロヘッド、自動ロッド脱着システム搭載の専用機を製作、100mのボアホール4本を掘削。

\* 従来3人作業だった脱着作業を1人で実施、ロッド

脱着工数の30%削減

\* 洗浄作業の自動化を進め、洗浄時間の25%削減

## 試験掘削

2倍速再生



### 従来工法と開発機による工法のコスト比較

見積要素	従来工法による施工コスト	開発機による施工コスト対従来工法比	備考
機械損料	100%	100%	損料単価*施工日数
労務費	100%	35%	作業人数*施工日数
材料費	100%	100%	燃料、水、泥材等
管理費	100%	63%	原価*定率(%)
その他	100%	100%	

### 標準施工日数と開発機による施工日数の比較

項目/工法		回転振動式 従来工法(注)	回転振動式 FSGT-150C
地質	粘性土	◎	◎
	砂礫	◎	◎
	玉石	△	△
	軟岩	◎	◎
	硬岩	△	△
掘削深度		50~150m	50~100m
作業人数		4~5人	2~3人
施工日数/井 (100m井)		3~5日	2~3日

注：地中熱利用ガイドブック2018年版より引用



①地中熱交換機の  
削孔機・工法およ  
び高効率地中熱交  
換器の開発

②多熱源多機  
能対応連結型  
地中熱ヒートポ  
ンプの開発

③地中熱ヒート  
ポンプ最適制  
御システムの開  
発

④地理地盤情報を活用した設計・  
性能予測シミュレーションツールの  
開発とポテンシャル評価手法・  
評価マップの作成



北海道大学

# 最小掘削断面に対応する新型形状Uチューブ：扁平Uチューブ

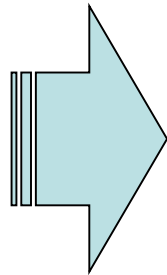
## 従来技術

- 掘削口径に対し，円形断面では離隔が確保できず，熱干渉を受ける



ボアホール熱抵抗

0.14 m・K/W



ボアホール熱抵抗

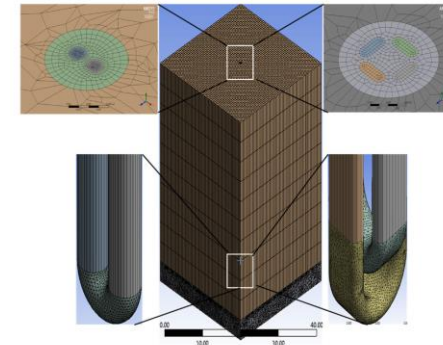
0.11 m・K/W (20%減)

## 開発技術

- 扁平断面にすることで，地盤側の距離を短絡化し，かつ行き還り離隔を確保し，熱抵抗**Rb, 20%軽減**



熱応答試験実施状況



CFDシミュレーション  
解析結果

# Y字形状ブランチ電気融着方式継手の開発

- ・Uチューブ・ダブル方式専用のY字形状ブランチ電気融着方式継手を開発
- ・継手個数と接合作業の回数を削減
- ・削減率: 20～62%

Y字形状ブランチ電気融着方式継手による削減効果

		Y字形状 ブランチ継手	従来部材工法
必要継手個数	個	4	6～16
接合作業回数	回	4	6～16
材工金額	指数	80～38	100
削減率	%	20～62	基準



従来技術による地上配管例



Y字形状ブランチと地上配管例



# 樹脂ヘッダーの開発

- ・軽量，防錆塗装不要でワンタッチ接続可能な樹脂製ヘッダーを開発
- ・金属製ヘッダーに比べ安価かつ，コンパクト

接合時間：40分⇒8分に短縮

樹脂製ヘッダーによる削減効果

		樹脂製ヘッダー	従来技術
接合時間	分	8	40
枝管間隔	mm	75	125
設置スペース	指数	69	100
材工金額	指数	59	100
削減率	%	41	基準



樹脂製ヘッダー



樹脂製ヘッダーの接合部



# 60kW級冷暖房HP・新型30kW級給湯専用HP

## 従来技術



## 開発技術

- ・従来の資産を継承して、30kWモジュール×2台で構成、  
ノンインバータ機+インバータ機とすることで、コストダウンを実現。
- ・性能を従来と同等以上とするため、圧縮機、熱交換器を最適化。  
⇒ 価格は30 kW機で**270万円⇒192万円と29%コストダウン**  
60 kW機で**480万円⇒362万円と25%コストダウン**
- ・業務用の給湯専用熱交換器を新たに開発。  
⇒ 出力は30kW級で価格は現行を維持。

### ■従来の30kW級冷暖房HP

#### 特徴

最大30kW冷暖房出力

インバータ制御により高効率部分負荷運転

複数台連結運転により大規模物件対応

暖房出力:28.0kW, COP4.3

冷房出力:26.5kW, COP4.5

寸法:W614×D850×H1475

### ■給湯専用HPのラインナップなし



60kW級冷暖房HP 3次試作機

周波数	項目	暖房	冷房
50Hz	出力[kW]	56.2	53.3
	消費電力[kW]	13.1	11.8
	COP(目標)	4.3(4.3)	4.5(4.5)



30kW級給湯専用ヒートポンプ3次試作機

項目	目標	試作機
出湯温度[℃]	65.0	65.0
熱出力[kW]	30.0	32.7
消費電[kW]	7.5	7.85
COP[-]	4.0	4.17

COPの目標値達成

COPの目標値達成

\*1 運転条件

暖房運転: 採熱戻り0℃、冷暖房行き35℃、採熱流量180L/min

冷房運転: 採熱戻り30℃、冷暖房行き7℃、冷暖房流量180L/min



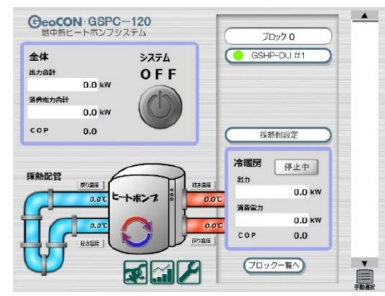
北海道大学

② 低コスト・高効率な多機能・多熱源対応連結型地中熱ヒートポンプモジュールの開発

・地中熱ヒートポンプと冷却塔，  
太陽熱などの補助熱源からなる  
ヒートポンプシステムの簡易  
コントローラを開発



簡易コントローラ制御盤

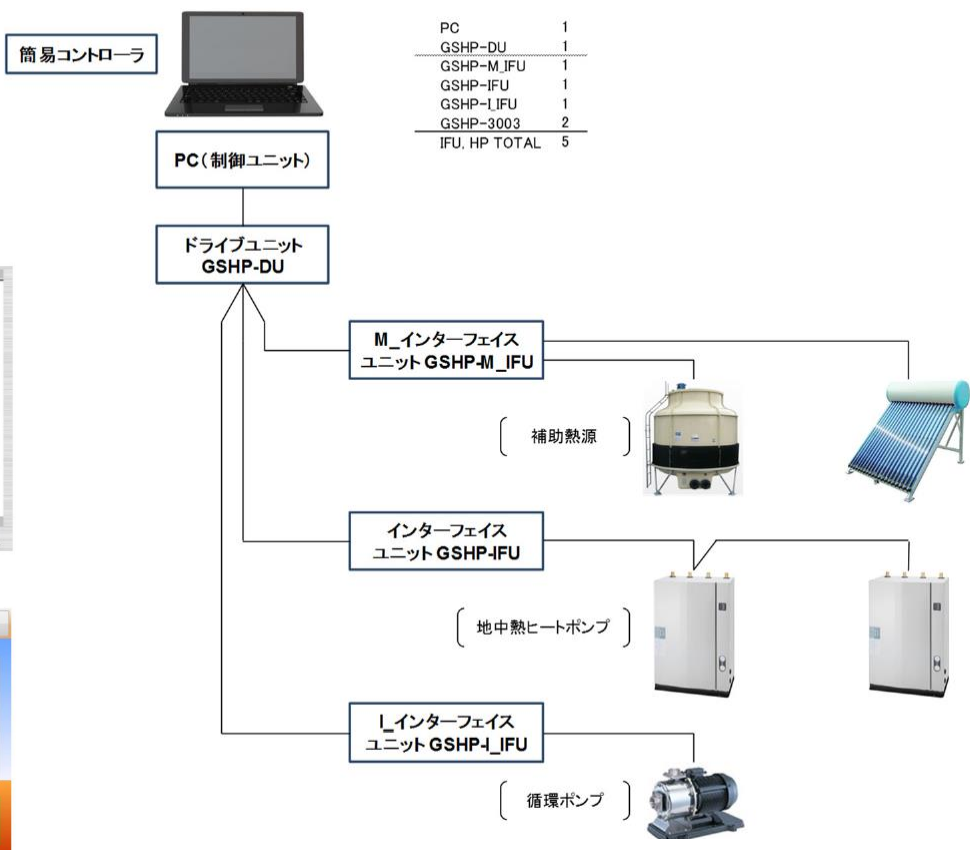


a システム全体画面



c ブロック画面

システム画面の例



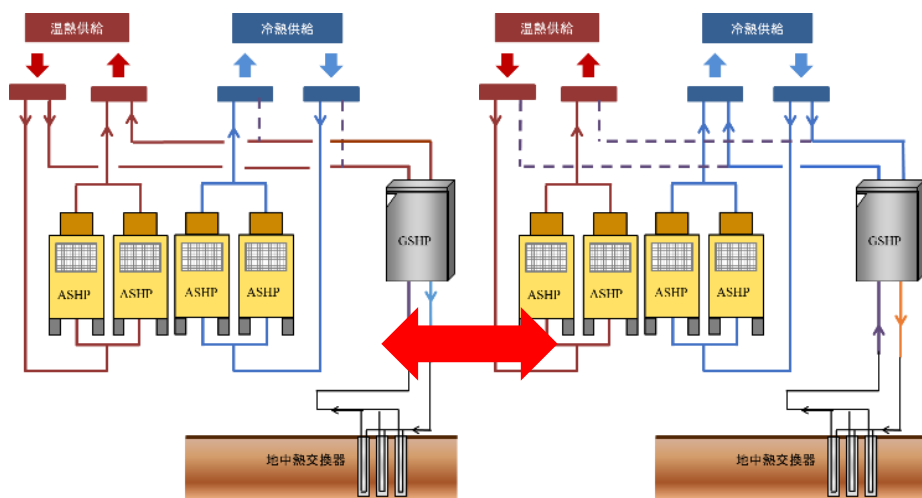
# HR-GSHPシステムと自律型最適制御システム

## 従来技術

- 大規模な物件において、地中熱ヒートポンプシステムは冬季は 暖房、夏季は冷房の運転で、一部のベース負荷のみを賄う

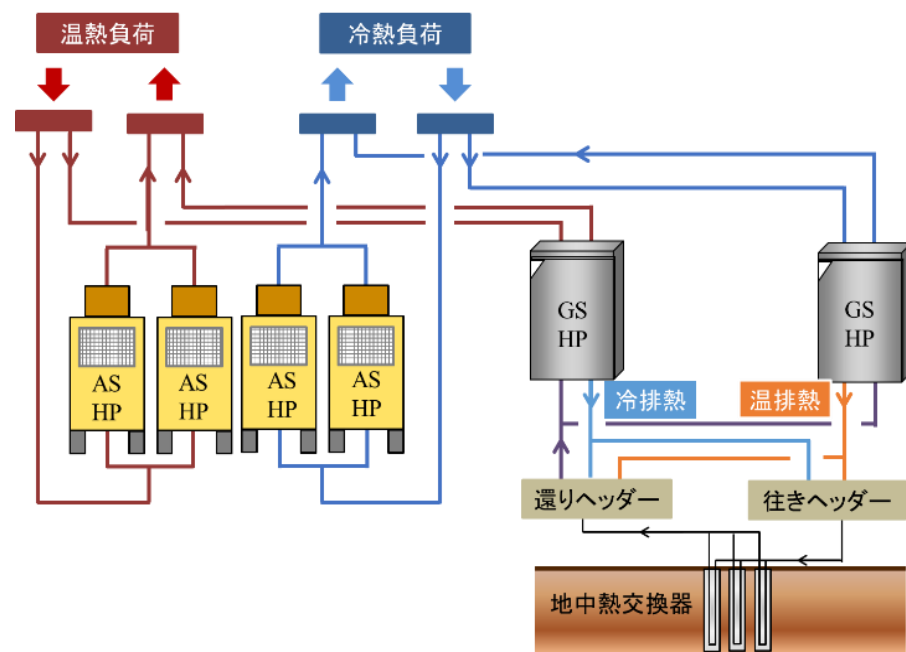
## 開発技術

- 同時もしくは短時間内に繰り返し発生する負荷に対して、地中熱ヒートポンプを運転し、熱回収効果により賄うことができる負荷を大幅に増大



冬季:暖房  
(温熱)のみ

冬季:冷熱  
(温熱)のみ

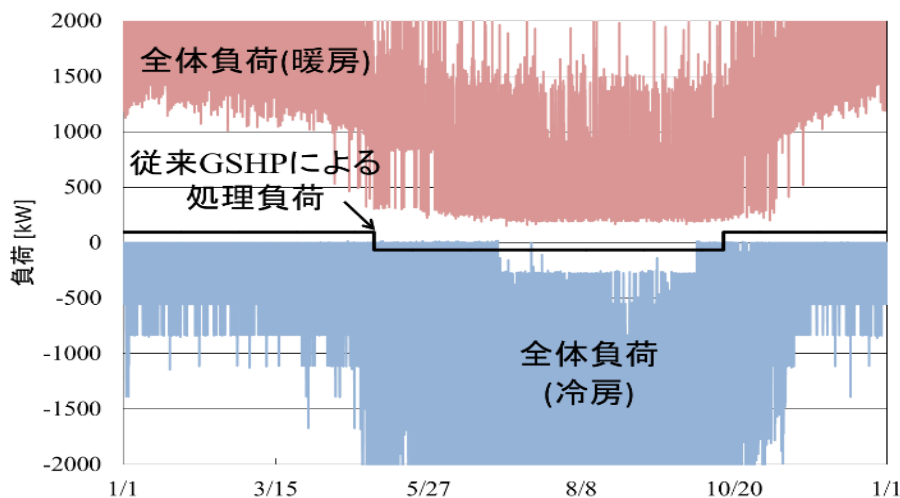


# HR-GSHPシステムと自律型最適制御システム

## 従来技術

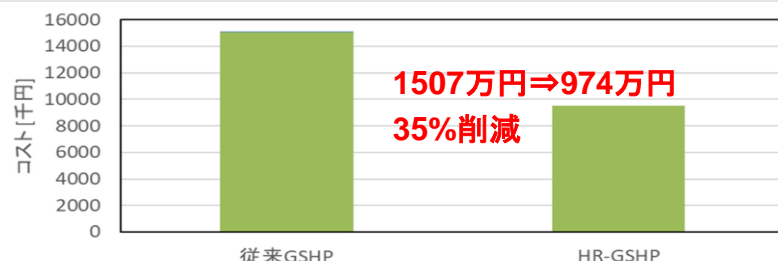
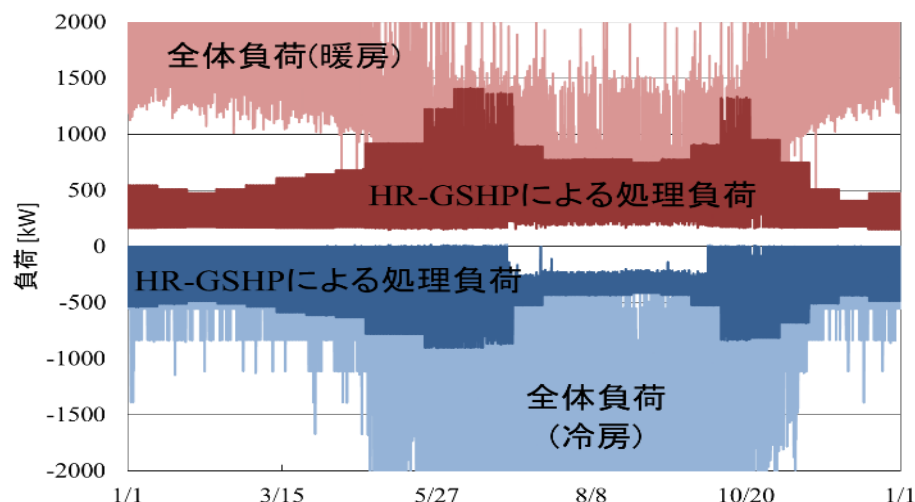
- 大規模な物件において、地中熱ヒートポンプシステムは冬季は 暖房、夏季は冷房の運転で、一部のベース負荷のみを賄う

### 複合施設導入時の負荷

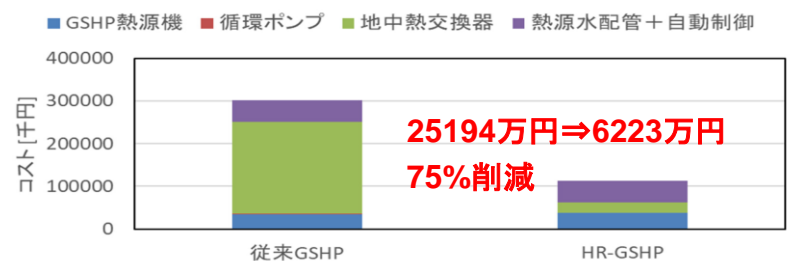


## 開発技術

- 同時もしくは短時間内に繰り返し発生する負荷に対して、地中熱ヒートポンプを運転し、熱回収効果により賄うことができる負荷を大幅に増大



HR-GSHP システムと従来GSHP システム  
のランニングコストの比較



HR-GSHP システムと従来GSHP システム  
の初期コストの比較

①地中熱交換機の  
削孔機・工法およ  
び高効率地中熱交  
換器の開発

②多熱源多機  
能対応連結型  
地中熱ヒートポ  
ンプの開発

③地中熱ヒート  
ポンプ最適制  
御システムの開  
発

④地理地盤情報を活用した設計・  
性能予測シミュレーションツールの  
開発とポテンシャル評価手法・  
評価マップの作成

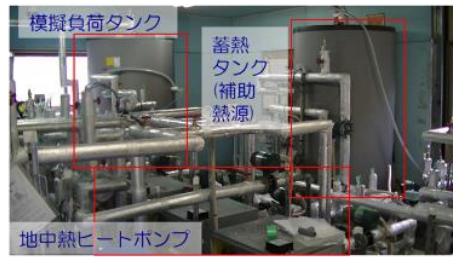
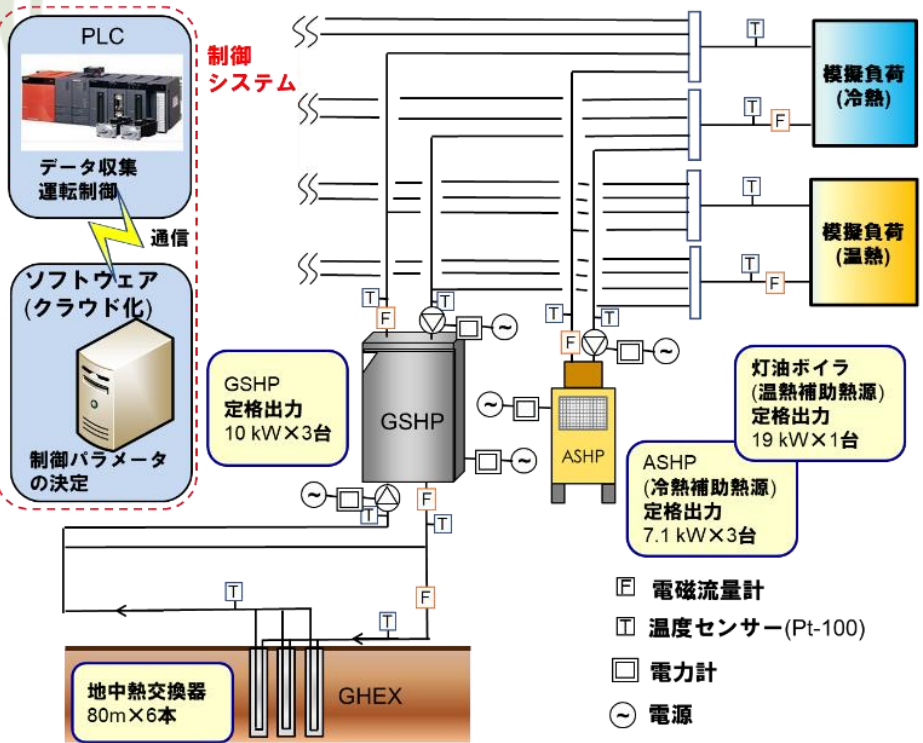


北海道大学

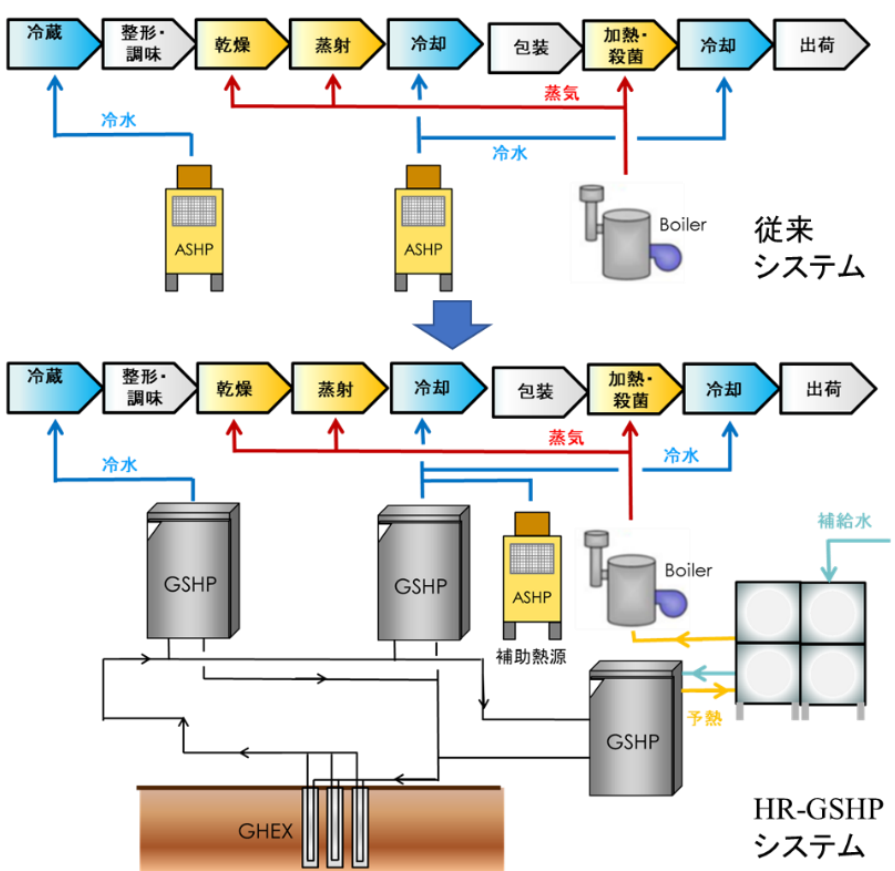


# 地中熱利用熱回収ヒートポンプシステムと自律型最適制御システム

HR-GSHPシステムフィールド試験装置



HR-GSHPシステムの食品工場への導入



①地中熱交換機の削孔機・工法および高効率地中熱交換器の開発

②多熱源多機能対応連結型地中熱ヒートポンプの開発

③地中熱ヒートポンプ最適制御システムの開発

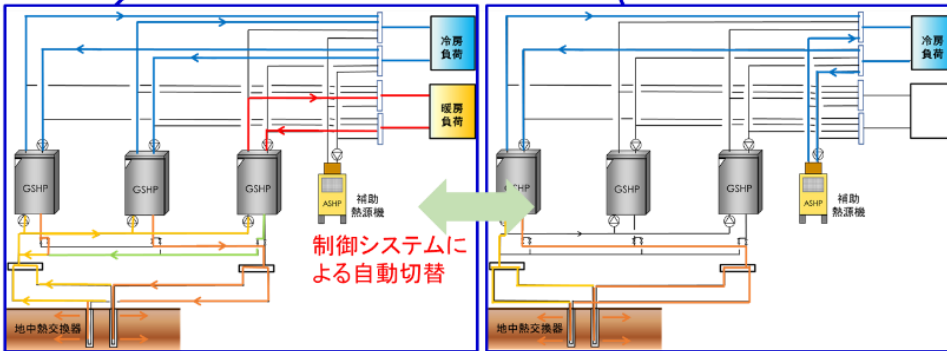
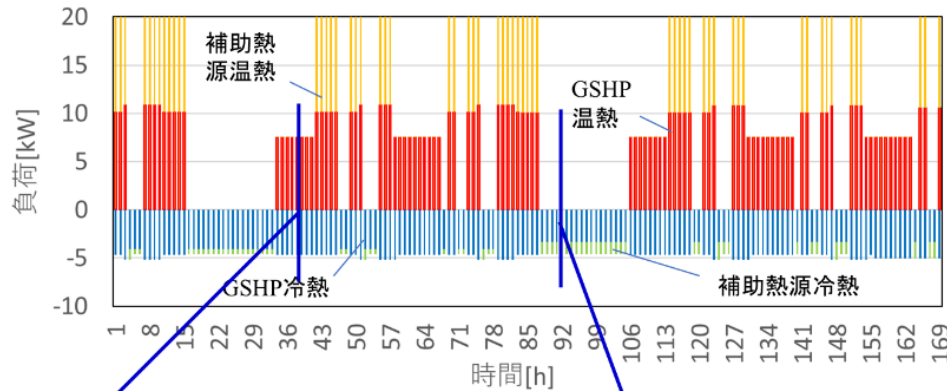
④地理地盤情報を活用した設計・性能予測シミュレーションツールの開発とポテンシャル評価手法・評価マップの作成



北海道大学

# 地中熱利用熱回収ヒートポンプシステムと自律型最適制御システム

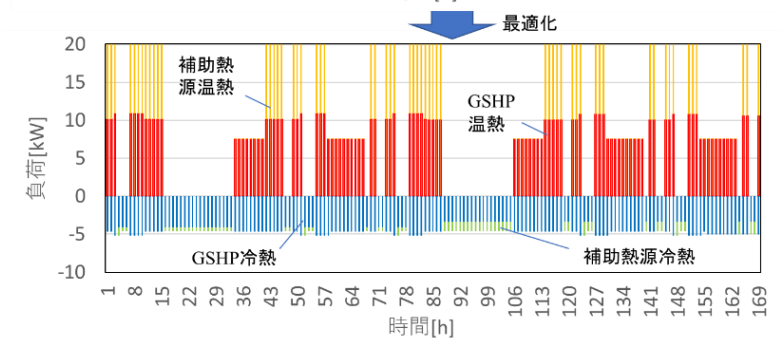
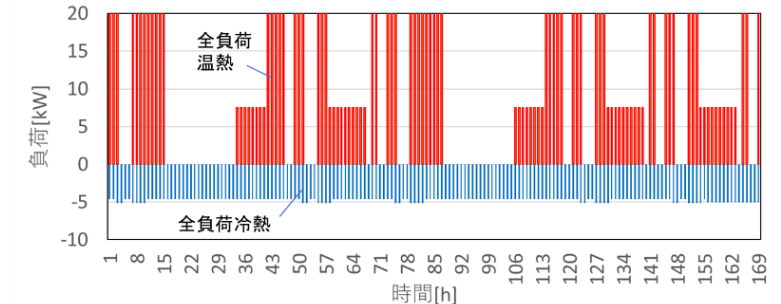
自律型最適制御システムの制御一例



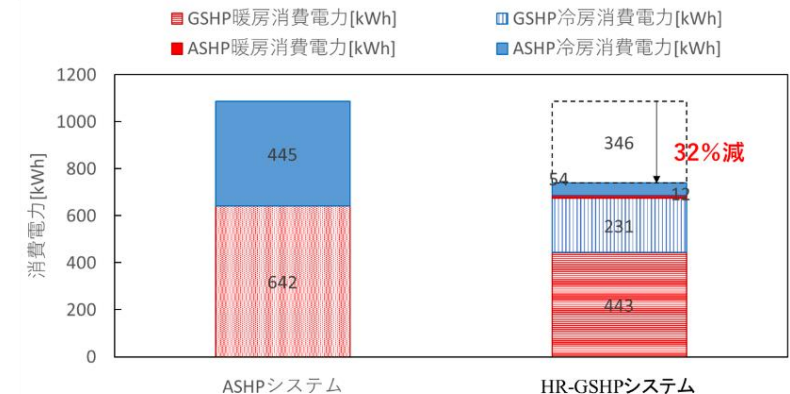
温熱供給・冷熱供給GSHP熱源機同時運転時  
→GSHP熱源機の出力増大運転  
→GSHP熱源機の高効率運転を最大限活用

温熱供給・冷熱供給GSHP熱源機片側運転時  
→補助熱源機の運転によるGSHP熱源機運転抑制  
→熱源水温度の過度の上昇・低下を抑制

最適化を用いた設計による負荷分配の一例



試験結果(HR-GSHPシステムの導入効果)の一例



①地中熱交換機の削孔機・工法および高効率地中熱交換器の開発

②多熱源多機能対応連結型地中熱ヒートポンプの開発

③地中熱ヒートポンプ最適制御システムの開発

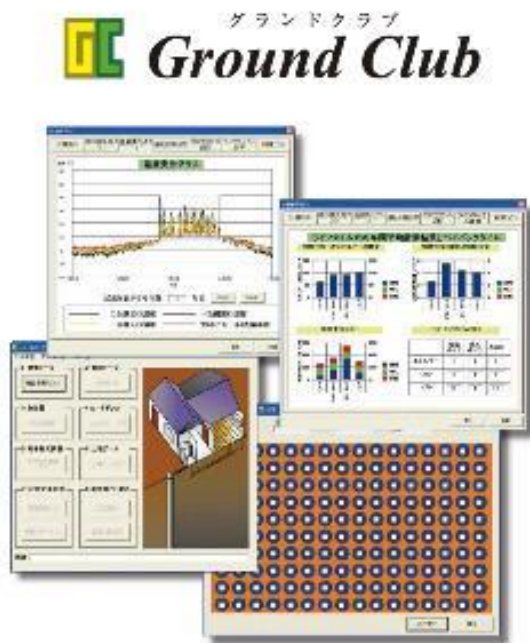
④地理地盤情報を活用した設計・性能予測シミュレーションツールの開発とポテンシャル評価手法・評価マップの作成



## 従来技術(スタンドアロン)

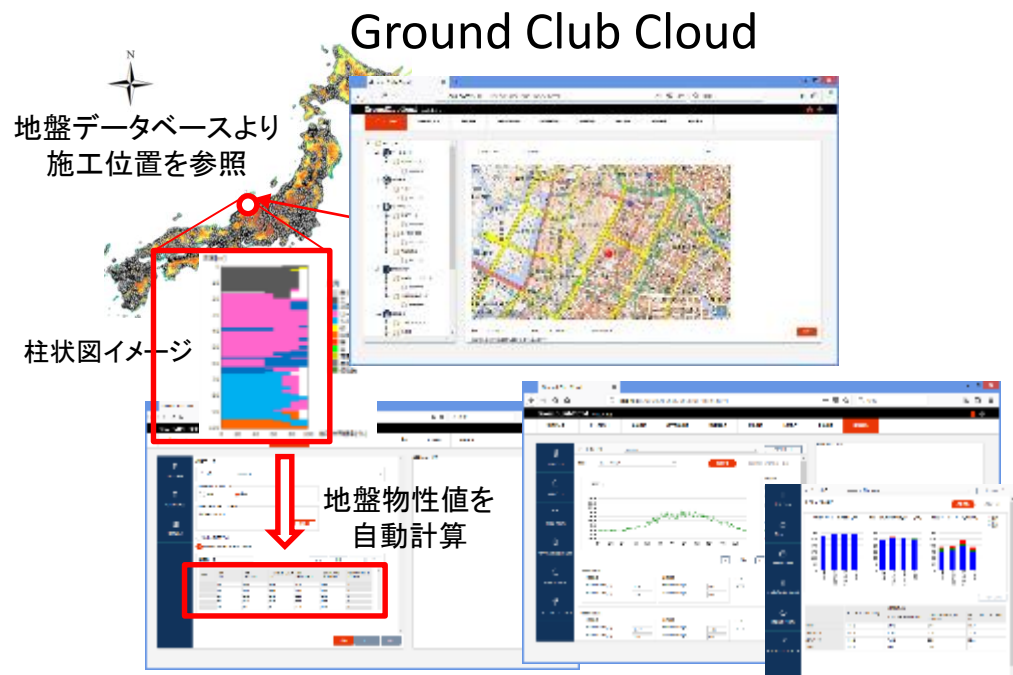
- ・使用前にPCにインストールする必要がある。
- ・設計箇所に応じ地盤条件を調査・設定する必要がある。
- ・単層地盤流速無しの簡易モデル計算

地中熱源ヒートポンプシステム性能予測プログラム



## 新開発(クラウド)

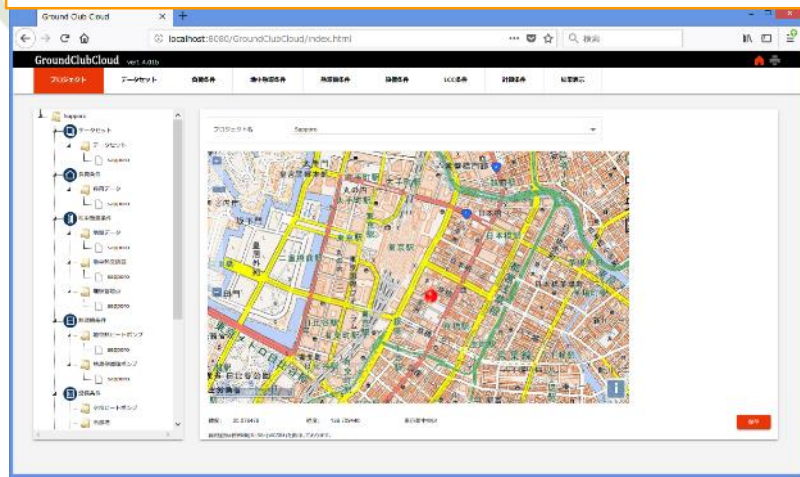
- ・Web上でインストール不要, 世界中, いつでもどこでも利用可能
- ・過去の計算ケースをサーバー保存, 読み込み再利用可能
- ・地理地盤データベースと連動し, 地盤条件の推定値を入手可能
- ・複層地盤条件, 潜熱考慮, 地中熱交換器種類の追加、補助熱源機の設定, 最適化計算等 多数の機能を追加。



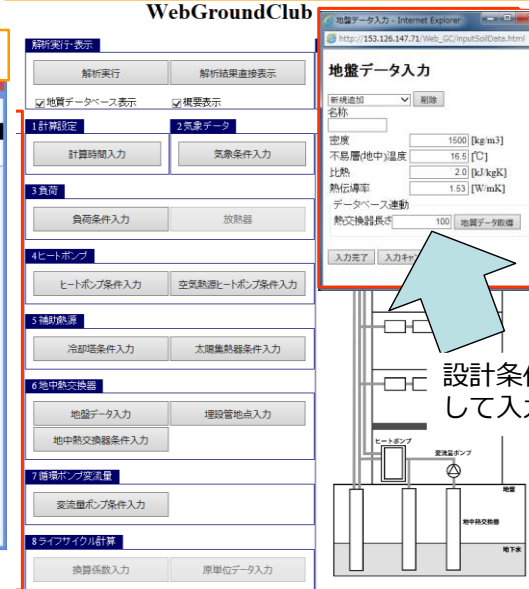


# Ground Club Cloud

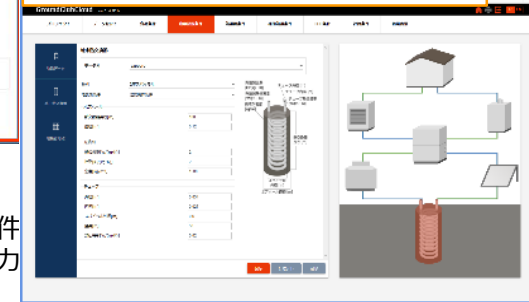
## プロジェクト作成画面



## 条件設定画面



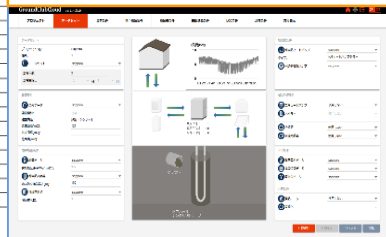
## 地中熱交換器設定画面(2重スパイラル)



設計条件  
して入力

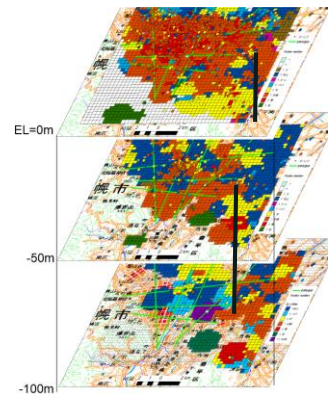
英語化  
中国語化

## Ground Club Cloud 画面

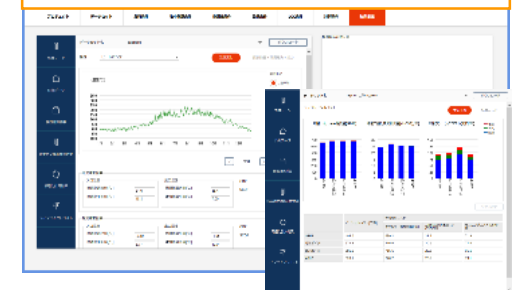


多言語化 語句リスト

## 【グリッド推定】



## 結果表示画面



①地中熱交換機の  
削孔機・工法およ  
び高効率地中熱交  
換器の開発

②多熱源多機  
能対応連結型  
地中熱ヒートポ  
ンプの開発

③地中熱ヒート  
ポンプ最適制  
御システムの開  
発

④地理地盤情報を活用した設計・  
性能予測シミュレーションツールの  
開発とポテンシャル評価手法・  
評価マップの作成



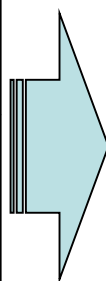
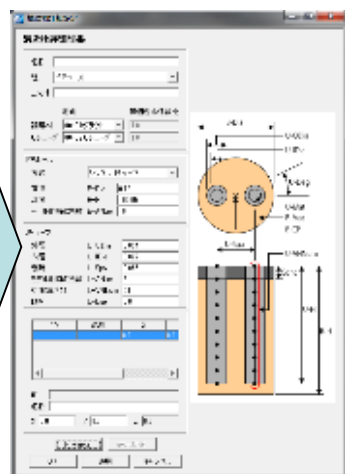
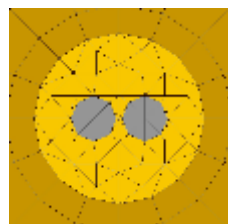
北海道大学



# 地中熱交換器モデルを搭載したマルチスケール対応FEMソフトウェア

## 従来技術

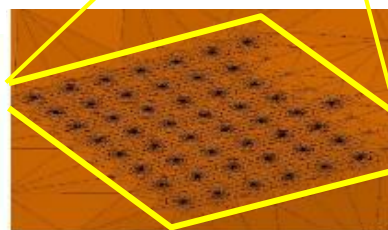
- ・Uチューブ、ボアホール形状を手作業でモデル化する必要がある為、モデル作成作業に多大な時間を要していた。
- ・地中熱交換器を含む解析モデル全体を詳細な時間刻みで計算する必要があり膨大な計算時間を要していた。



## 開発技術

- ・地中熱交換器作成テンプレートにより自動的にUチューブ、ボアホールグラウトをモデル化でき、モデル作成時間が大幅に短縮可能となった。
- ・解析モデルを地中熱交換器と周辺地盤に分けてモデル化し、それぞれ異なった時間刻みを与え連成させる機能(マルチスケールモデル)を開発。  
時間刻み等を調整する事で計算時間を大幅に短縮(従来技術の1/40)可能となった。

周辺地盤(広域モデル)



地中熱交換器(詳細モデル)

③広域モデルの計算

$\Delta TG$

②節点平均熱流量を連成

①詳細モデルの計算

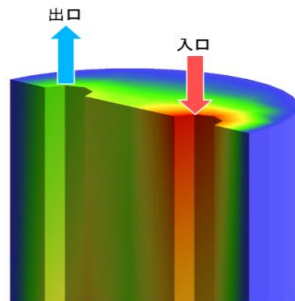
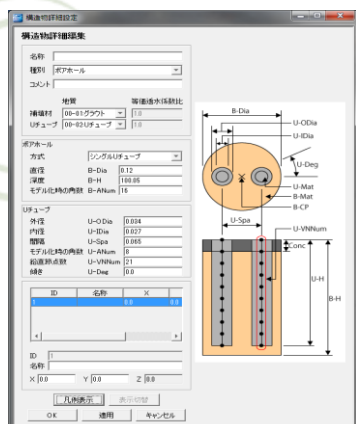
$\Delta TL$

④節点温度を連成



連成計算の流れ

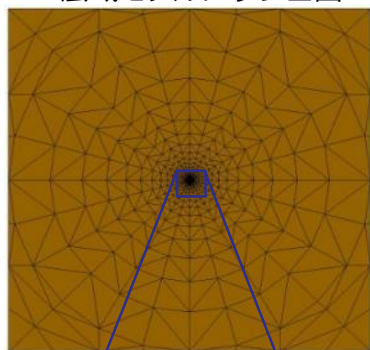
# FEMによるサイトレベルシミュレーションツール



熱流動解析結果

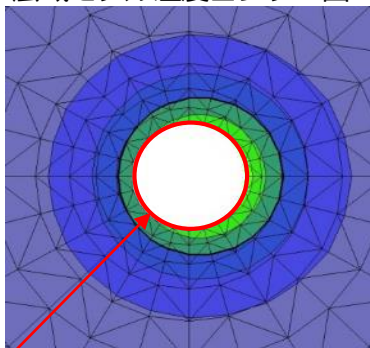
## BHEモジュール組み込み

広域モデルメッシュ図

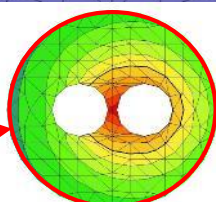


連成計算

広域モデル温度コンター図

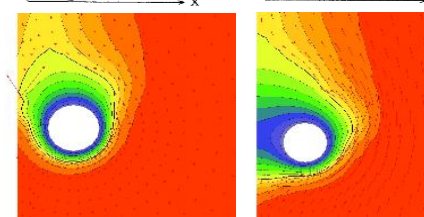
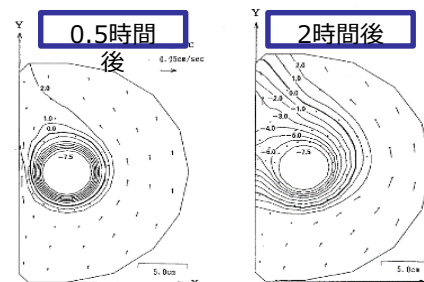
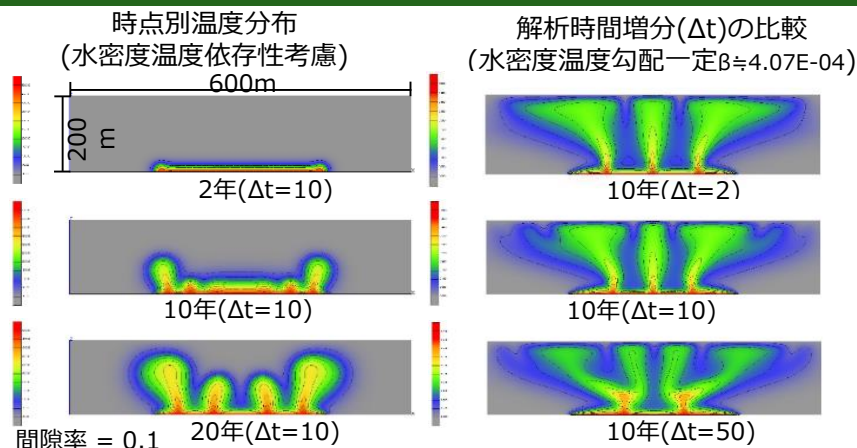


節点熱流量  
と節点温度  
の連成面

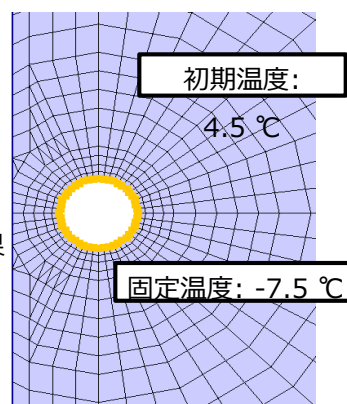


## マルチスケールモデル

## 地下水・熱密度流解析



計算結果



参考論文と計算結果の凍結範囲の比較

凍結パイプ周辺メッシュ図

## 土壌凍結計算の検討

①地中熱交換機の  
削孔機・工法およ  
び高効率地中熱交  
換器の開発

②多熱源多機  
能対応連結型  
地中熱ヒートポ  
ンプの開発

③地中熱ヒート  
ポンプ最適制  
御システムの開  
発

④地理地盤情報を活用した設計・  
性能予測シミュレーションツールの  
開発とポテンシャル評価手法・  
評価マップの作成

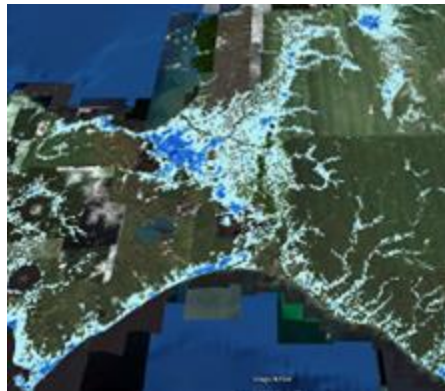


北海道大学

# 三次元地盤データベースに基づく全国地中熱ポテンシャルマップ

## 従来技術

- ・全国レベルは採熱可能量など概略に留まる
- ・一部地域で整備が進むが推定手法や精度が異なり、比較困難
- ・地中熱交換器長さ計算が、最大出力で計算する場合、過剰設計



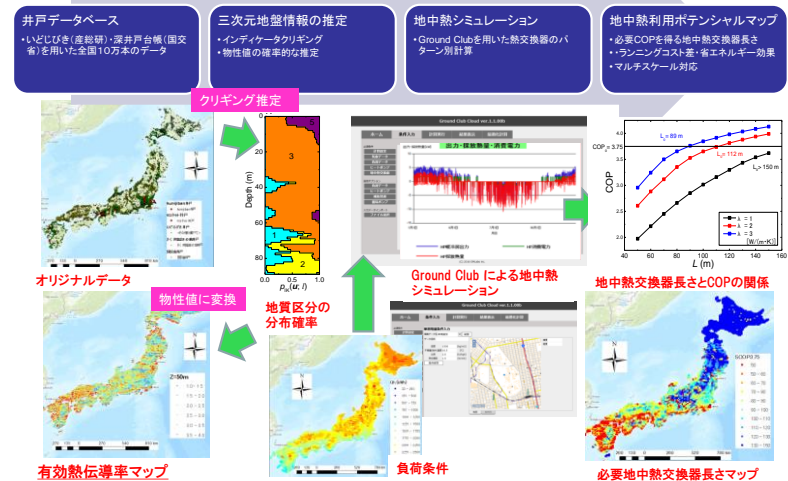
既存ポテンシャルマップ例  
(環境省)

$$\text{暖房用の必要深さ [m]} = \frac{\text{ヒートポンプの最大出力 [W]} \times \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} (R_p + R_s F_H)}{\text{地中熱の最低温度 [°C]} - \text{熱源水の許容最低温度 [°C]}}$$

地中熱交換器長さの簡易計算式

## 開発技術

- ・井戸データから任意地点・深度の地質種別および有効熱伝導率等の物性値を三次元推定
- ・グリッドシミュレーションによる全国評価
- ・COPやLCC, CO2排出削減量など導入効果を最大にする地中熱交換器長さの決定



地中熱ポテンシャルマップ整備フロー

①地中熱交換機の削孔機・工法および高効率地中熱交換器の開発

②多熱源多機能対応連結型地中熱ヒートポンプの開発

③地中熱ヒートポンプ最適制御システムの開発

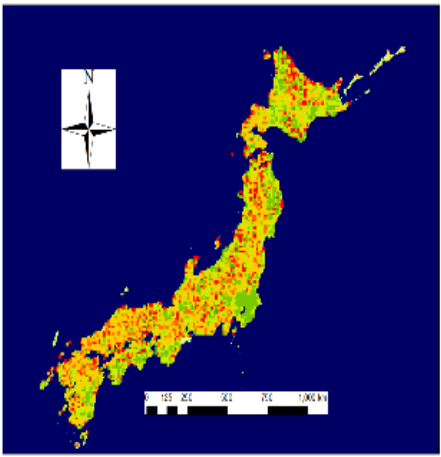
④地理地盤情報を活用した設計・性能予測シミュレーションツールの開発とポテンシャル評価手法・評価マップの作成



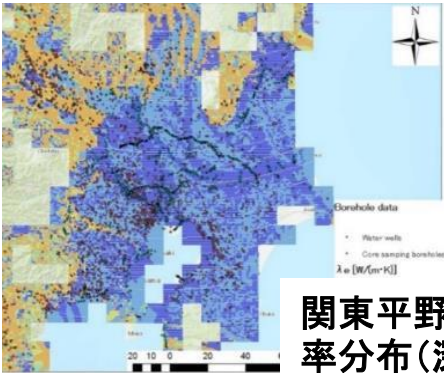
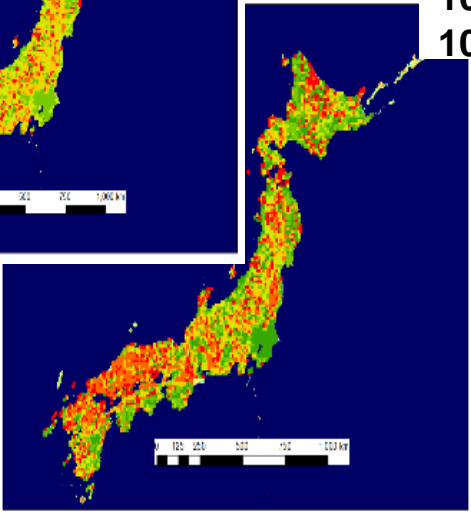
北海道大学



# 地中熱利用ポテンシャルマップ構築

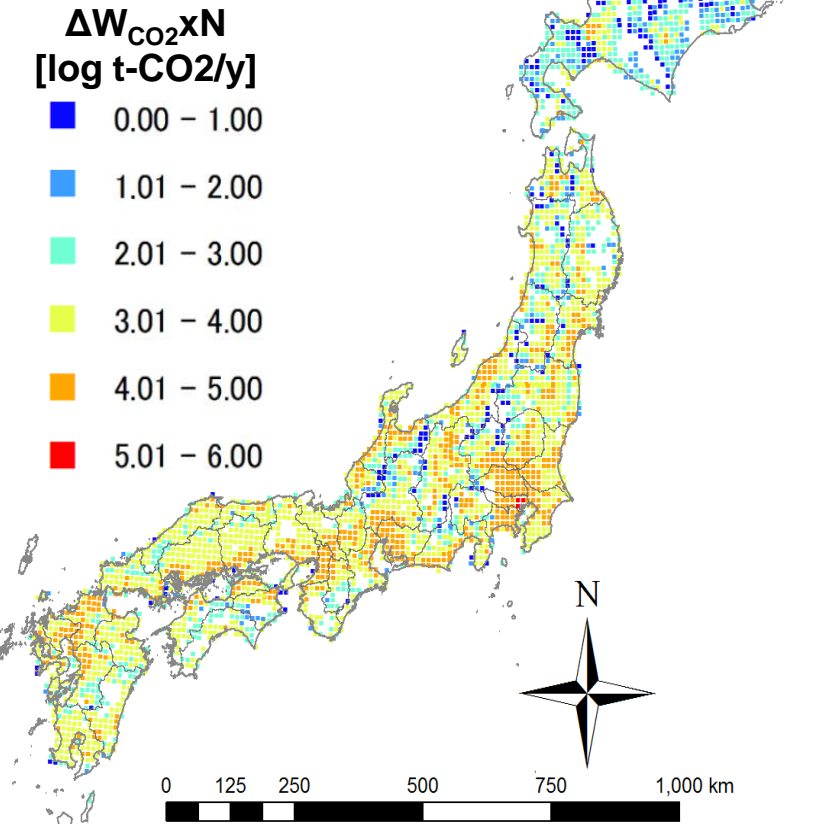


全国の平均有効熱伝導率  
(深度50m,  
100m, 150m,  
10kmグリッド)



関東平野における平均有効熱伝導率分布(深度100m, 500mグリッド)

建物種別毎で加重平均したCO2排出量削減ポテンシャルマップ例



①地中熱交換機の  
削孔機・工法およ  
び高効率地中熱交  
換器の開発

②多熱源多機  
能対応連結型  
地中熱ヒートポ  
ンプの開発

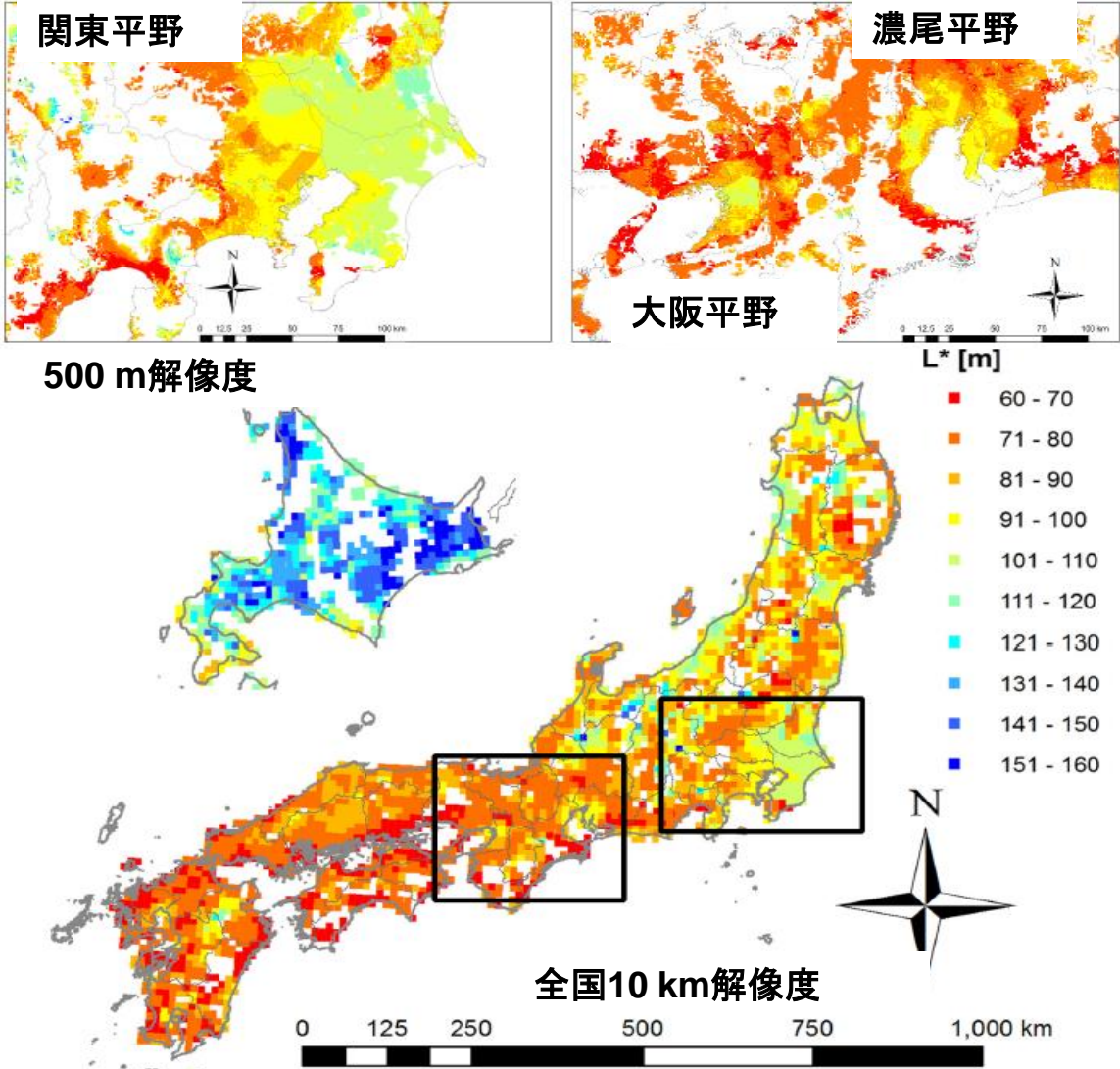
③地中熱ヒート  
ポンプ最適制  
御システムの開  
発

④地理地盤情報を活用した設計・  
性能予測シミュレーションツール  
の開発とポテンシャル評価手法・  
評価マップの作成





# 地中熱利用ポテンシャルマップ構築



①地中熱交換機の  
削孔機・工法およ  
び高効率地中熱交  
換器の開発

②多熱源多機  
能対応連結型  
地中熱ヒートポ  
ンプの開発

③地中熱ヒート  
ポンプ最適制  
御システムの開  
発

④地理地盤情報を活用した設計・  
性能予測シミュレーションツールの  
開発とポテンシャル評価手法・  
評価マップの作成



イニシャルコスト・維持コストとも、目標削減率20 %以上を達成

## イニシャルコスト

## 維持コスト

	従来技術 (60 kW換算)	NEDO 開発技術	削減率		従来技術	NEDO 開発技術	削減率
(1)地中熱交換器設置	44.1	29.4	33%				
(2)地中熱ヒートポンプコスト	15.7	11.0	30%	従来を100とする	100.0	100.0	
(3)室内機・配管設置	35.3	31.8	10%	(1)容量制御システムの出力制御		15.0	
(4)制御盤・簡易コントローラ設置	4.9	4.9	0%	(2)ヒートポンプの高効率化		8.0	
◆導入コスト	100.0	77.0	23%	(3)循環ポンプの制御		5.0	
kW単価 (円/kW)	510,000	392,760	-	合計	100.0	72.0	28%



## ①地中熱交換器の削孔機・工法の開発および高効率垂直地中熱交換器の開発

- ・100m掘削対応機を製作、ロッド脱着、洗浄の自動化により25%以上の工数を削減に成功
- ・新型Uチューブのロングラン成形ができ、施工の目途を得た。熱応答試験や数値計算により熱抵抗値も20 %以上削減可能。

⇒ 別フィールドでの施工検証、性能試験を行い、最終的な性能評価・検証を実施。

## ②低コスト・高効率な多機能・多熱源対応連結型地中熱ヒートポンプの開発

- ・60kW級冷暖房ヒートポンプは目標COP(暖房:4.3, 冷房4.5)を達成。
- ・30kW級給湯用ヒートポンプは沸き上げシーケンスを開発, 7種類の運転パターンを自動化。
- ・複数台のヒートポンプの連結型制御システム(簡易コントローラ)の運転制御を確認。目標COP4.0を達成。

⇒ 実用化に向け、最終的な製品性能の確認と、細部の詰めを行う。

## ③低コスト・高効率化に寄与する地中熱ヒートポンプ最適運転制御システムの開発

- ・温熱負荷・冷熱負荷が同時に発生する建物の省エネに寄与する地中熱利用熱回収ヒートポンプシステムを開発。
- ・実建物を想定したフィールド試験を実施し、制御システムの運転検証とシステムの省エネ効果を実証。

⇒ 実建物への導入に向けたイレギュラー対応の運転制御の組み込みや、システムの標準化を行う。

## ④シミュレーションツールの開発とポテンシャル評価手法・評価マップの作成

- ・Ground Club Cloudの必要な機能や基本デザインは完成

⇒ 多人数同時ログイン時の安定性や多言語化など、実用化に向けた検証に取り組む。

- ・FEMサイトレベルシミュレーションツールはボアホール9本のモデルに対しマルチスケール連成計算を実施、計算時間を従来の1/40を達成した。

⇒ 凍結・融解を考慮した計算結果とフィールド試験による実測結果の比較検証を行う

- ・地中熱オープンシステムによるポテンシャルマップの全国データベース, 推定システムが完成

⇒ 地下水を考慮した高解像度マップも含む、最終的なポテンシャルマップを整備, 公開

