

平成 23～25 年度 再生可能エネルギー関連産業創出プロジェクト事業

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

浅部地中熱利用システムの開発

Development of a Ground source heatpump system by the Shallow Layer

平成 26 年 3 月



はじめに

現代の社会では、地球温暖化防止のために再生可能エネルギーの利用と省エネルギー技術の導入が必要とされています。特に、東日本大震災とそれに伴う原子力災害の発生以降、エネルギーの安定供給の観点からも、より一層再生可能エネルギー利用への関心が高まっています。福島県においても、総合計画「ふくしま新生プラン」を策定し、東日本大震災からの復興・再生の牽引役として再生可能エネルギーの飛躍的な推進を掲げております。

再生可能エネルギーには、太陽光、風力、地熱、水力、バイオマスなどがあります。最近では、エネルギーの時間・季節変動が少ない、安定した熱エネルギー源である地中熱が着目され、大型商業施設等での利用が始まっています。

ハイテクプラザでは、県内事業所の再生可能エネルギー関連分野への進出を促進し、関連産業の振興を図るため、平成 23 年度から平成 25 年度の 3 年間にわたり、再生可能エネルギー関連産業創出プロジェクト事業「浅部地中熱利用システム開発事業」に日本大学工学部および県内企業とともに取り組んでまいりました。浅部地中熱とは、地中熱のなかでも地下 30m 程度までの浅い部分の熱を指し、地下 100m 程度まで利用する従来手法と比較し、低コストでの設備の導入が期待できます。

本事業では、浅部地中熱を空調や給湯に利用することで省エネルギー効果を得るシステムの開発を目的とし、浅部地中熱利用時の地中温度変化の計測等をミニモデルや実物大設備を用いて行い、浅部地中熱を高効率に利用するための設備設置基準を検討しました。また、実証試験住宅を設置し、長期にわたる空調利用試験等を行ってまいりました。

本報告書は、各研究機関での 3 年間にわたる研究開発の成果をとりまとめたものです。本事業で得られた知見が浅部地中熱利用普及へ向けての参考となれば幸いです。

終わりに、本事業の推進にあたり貴重な御意見、御協力をいただきました大学・関係機関・企業の皆様方に心から厚く御礼申し上げます。

平成 26 年 3 月

福島県ハイテクプラザ
所長 袖岡賢

平成 23 年度～25 年度 再生可能エネルギー関連産業創出プロジェクト事業

浅部地中熱利用システムの開発

目 次

第1章	研究概要	1
第2章	ミニモデルによる最適な熱交換井間隔の検討 福島県ハイテクプラザ 技術開発部	3
第3章	復興住宅用小型地中熱ヒートポンプシステムの開発 日本大学 工学部	13
第4章	小型ヒートポンプ用浅部地中熱採熱システムの開発 有限会社 住環境設計室	23

第 1 章

研究概要

研究概要

昨今、地球温暖化の問題により環境保全、省エネルギーが強く求められており、2005年には京都議定書が発効され、CO₂を含む温室効果ガスの削減に向けた取り組みが一層強まってきている。さらに2011年に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、原発依存に対する不安と、エネルギー需要をどう賄うかが問題となっており、原発に頼らないエネルギーの創出のため、再生可能エネルギーの利用推進の動きが強まっている。福島県では、復興ビジョンにおいて、再生可能エネルギーの飛躍的推進を政策の1つとして策定したほか、福島県再生可能エネルギー推進ビジョンにおいて、2040年を目標に県内のエネルギー需要量の100%以上を再生可能エネルギーで生み出すことを目指している。

再生可能エネルギーは、太陽光、風力、地熱といった光、力、熱などのエネルギーを電気エネルギーへ変換して利用することがほとんどである。これに対し、本研究で取り扱う地中熱利用は、地中に存在する熱エネルギーを、熱エネルギーのまま利用するものである。そのためエネルギー変換損失が存在せず、効率の良いエネルギー利用技術といえる。地中熱利用では、熱交換井と呼ばれる井戸を地中に設置して熱の授受を行う。地下の温度分布は、表層では季節ごとの気温変化に合わせて変動し、不易層と呼ばれる地下深くの層では、年間を通して一定の温度となる。一般的な地中熱利用は、この不易層における熱の授受を主とするため、地下100 m程度の熱交換井を設置する。地中熱をヒートポンプでくみ上げて、冷暖房や給湯に利用する地中熱ヒートポンプが開発され、寒冷地を中心に普及し始めている。

地中熱ヒートポンプは、年間を通して安定した熱源である地中熱を利用するため、現在広く普及する空気熱源式のヒートポンプと比較し電力消費量が小さく、ランニングコストが安価である。しかし、熱交換井の掘削費など初期コストが高価で普及が足踏みしている。そこで、本事業では熱交換井に建物の基礎杭である鋼管杭を利用し、地下30 m以浅の地中熱を利用する「浅部地中熱利用技術」の開発を目的とした。熱交換井の深度を浅くし、従来の掘削技術とは異なる容易で迅速な施工を可能とすることで初期コストを抑え、地中熱利用の普及促進を目指す。本事業は、ハイテクプラザから日本大学工学部、および（有）住環境設計室へ研究委託し、ハイテクプラザを含めた3者が研究に参画することで浅部地中熱利用システムの開発およびそれに伴う課題解決に向けて研究を行った。各機関における研究の概要は以下の通りである。

・ハイテクプラザ

浅部地中熱利用システムを利用した時の地下の温度低下および採放熱特性を評価できるミニモデルを作製し、採放熱特性および地中温度変化特性の検証を行った。また、シミュレーションソフトを利用してミニモデルと同等のモデルを解析し、ミ

ニモデルとの比較を行い、熱交換井の設置間隔の検討を行った。

- 日本大学工学部

日本大学工学部キャンパス内に設置した2つの熱交換井群を利用し、季節毎の浅部地中熱利用システムの採放熱特性および温度回復特性について実験を行った。また、実証住宅を利用した冷暖房および給湯実験を行い、熱交換井群の特性について実験を行った。それらの結果から、浅部地中熱利用システムの設計・施工に関するガイドラインを作成した。

- 有限会社住環境設計室

本事業の熱交換井群および実証住宅の設計・施工を行い、採熱特性および施工性を向上させた高性能鋼管杭の開発を行った。実証住宅は同社内へ建設し、年間を通した冷暖房システムの効果の検証を行った。

研究成果



住宅外観



地中熱ヒートポンプと室内

実証住宅



改良型鋼管杭



浅部地中熱ミニモデル

第 2 章

ミニモデルによる最適な熱交換井間隔の検討

福島県ハイテクプラザ 技術開発部

浅部地中熱利用システムの開発

ーミニモデルによる最適な熱交換井間隔の検討ー

Development of a Shallow Depth Ground Source Heat Pump System

-Study of best distance between the ground source heat exchanger by a miniature model-

技術開発部 工業材料科 五十嵐 雄大 伊藤 弘康 小柴 佳子

生産・加工科 大内 繁男 平山 和弘（現 企画管理科）吉田 英一

プロジェクト研究科 加藤 和裕

再生可能エネルギーの1つである地中熱を利用したヒートポンプは一般の空気熱源ヒートポンプと比較して効率がよく、省エネや節電効果が期待できるが、熱交換井の掘削費用が高価であり、普及が足踏みしている。そこで本研究は熱交換井に鋼管杭を用いた浅部地中熱利用システムの開発について浅層地下における熱特性を調査するため、ミニモデルによる実験およびコンピュータシミュレーション解析を行った。その結果、浅部地中熱利用による地下温度変化は交換井中心より約1mの範囲で生じるとの知見を得た。

Key words: 再生可能エネルギー 地中熱 浅部 浅層 ヒートポンプ シミュレーション

1. 緒言

日本は高度経済成長による産業の目覚ましい発展を遂げる一方で、電力使用量も比例して増加した。それに伴い、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスによる地球温暖化現象が深刻になった。そこで電力需要を満たし、安全でクリーンなエネルギーとして注目されたのが原子力発電である。しかし、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、原子力発電の安全性は疑問視され、それに代わるエネルギーが必要となった。そこで注目されたのが、再生可能エネルギーである。再生可能エネルギーとは、永続的に利用可能でかつ実効性のあるエネルギーを指す。¹⁾

再生可能エネルギーには、太陽光、風力、水力、地熱など様々あるが、そのほとんどは光や力学的エネルギーを電気エネルギーへと変換して利用する技術である。しかし、本研究で取り扱う地中熱利用は熱エネルギーをそのまま熱として取り扱うため、エネルギー変換のロスがなく効率の良いエネルギー利用方法である。

地中熱利用は地下数mから100m程度に存在する熱を利用する方法である。一般に地下10mより浅い層は気温の影響を受け季節により変動し、それより深い層では恒温となり、その温度は北海道では10℃、東京では18℃程度である。²⁾ 地中熱利用では、この地下に存在する熱をくみ上げるために「熱交換井」とよばれる採熱用の井戸を掘削する必要がある。また、地中熱利用形態として、オープンループ型およびクローズドループ型と呼ばれる2種類の方法がある。オープンループ型は熱交換井内に存在する地下水を直接汲み上げ、熱利用し、井戸へ還元する方式である。クローズドループ型はUチューブとよばれるポリエチレン製の管を熱交換井へ入れ、熱交換を行う方法である。オープン

ループ型はクローズドループ型と比較し効率が良いが、メンテナンス箇所が増えるほか、揚水規制地域では利用できないなど制限も多い。クローズドループ型はオープンループ型に効率の面では劣るものの、ほとんどメンテナンスフリーで、規制がないためどこでも利用可能である。本研究においてはクローズドループ型を対象としている。これら熱交換井から汲み上げた熱は一般にヒートポンプで熱をポンプアップし冷暖房や給湯などに利用する。これを地中熱ヒートポンプと呼ぶが、一般的な空気熱源式ヒートポンプ冷暖房設備（家庭用エアコン）と比較し高効率で、節電効果が高い。また、外気に排熱を行わないことから、都市部で問題となるヒートアイランド現象の抑制も期待できる。

地中熱利用ヒートポンプは北海道など寒冷地域を中心に活用が広まっているほか、最近では関東圏などの都市部においてもその利用可能性が自治体を中心に検討されている。³⁾ しかしながら、実際の普及は拡大しているとは言えない。普及しない大きな要因の1つに熱交換井の掘削コストが高いことが挙げられる。掘削深度や熱交換井数は必要とするエネルギー量によって異なるが、家庭用では一般に100m程度の掘削が必要とされ、その費用は約1万円/m²と非常に高価である。これは、熱交換井掘削に専用の重機を利用する必要があり、工期も長いことが原因とされている。この問題を解決するため、日本大学工学部、（有）住環境設計室およびハイテクプラザは地下浅部における地中熱利用システム（浅部地中熱利用システム）の開発を目指した。この技術は、住宅建設時に軟弱地盤等において耐震・免震目的で施工する基礎鋼管杭で地中熱利用を行うものである。複数本埋設した長さ10m程度の杭内部を不凍液等で充填し、Uチューブを入れ熱交換を行

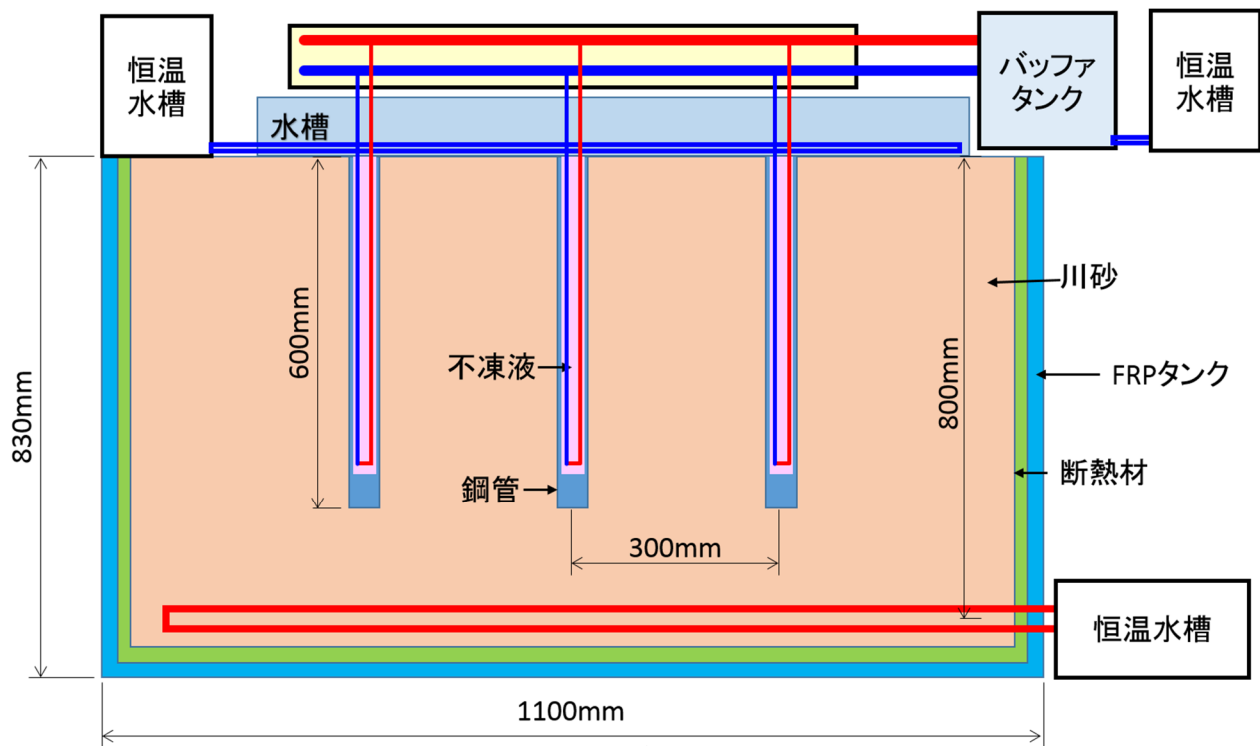


図1 ミニモデル模式図

う。この方法を採用することで掘削に専用機が不要となり、容易かつ短期間での熱交換井施工が可能となるため大幅な初期コスト削減が期待できる。さらに軟弱地盤等における耐震・免震効果と地中熱利用による節電の2つの効果を得ることが可能となる。しかし、一般住宅における地下浅層での地中熱利用は未だ例がなく、実際の利用には不明な点が多い。例えば、通常の地中熱では主に恒温層（不易層）で熱交換を行うのに対し、浅部地中熱では主に季節変動する層での熱交換となる。また、熱交換井内部は通常珪砂等を充填するが、浅部地中熱では不凍液等を充填する。それらの違いにより、浅部地中熱における採熱特性は通常のものとは異なることが考えられる。ヒートポンプ利用時の地中温度変化を把握することは、地中熱利用ポテンシャルがどの程度かを表す重要な要素である。また、複数本の杭を利用することから、熱干渉を生じない設計とすることが、効率の良いシステム設計につながる。

そこで本研究では、浅部地中熱利用システムを模した1/10ミニモデルを作製し、採熱を行なった時の採熱量、地中温度変化およびその温度分布を測定し、基礎杭による浅部地中熱利用における最適な杭間隔を検討した。また、コンピュータシミュレーションを用いてミニモデルと同条件の実大モデルを再現し有限要素法による熱解析を行い、ミニモデルとの差異について検討した。

2. ミニモデル

2. 1. ミニモデルの構造

ミニモデルの模式図を図1に示す。ミニモデルは実サイズの1/10となるよう設計した。長さ1100mm、幅660mm、高さ830mmのFRP製タンクに川砂を充填し地盤を模した。その際、FRPタンクは周囲の温度変化の影響を受けにくいよう全面を断熱材で覆った。この地盤モデルの中心およびその左右300mmの位置に、熱交換井を模して内径約20mm長さ600mmの一端を閉じた鋼管を配した。鋼管内部は不凍液で満たした。鋼管にはUチューブを模した内径2mmのポリエチレン製チューブを長さ500mmまで管内に挿入し、それぞれヘッダーを模した内径19mmのホースへと接続した。また、タンクの底には地中温度を再現するためホースを配し任意の温度の水を循環させ、温度を調節できる構造とした。さらに外気温度を再現するためタンク上面に水槽を設け、温調できる構造とした。また、地中熱の採熱を行うチューブ内循環液を任意の温度とするため、温調ポンプでバッファタンク内の液を循環させた。液の循環は空気圧で送液するダイヤフラムポンプで行い、任意の流量を実現できる構造とした。なお、循環液に係る配管についてはすべて断熱し、外気の熱の影響を受けにくい構造とした。

ミニモデル内での温度測定は図2の位置で行った。測定には測温抵抗体Pt100を用いた。測定データはデータロガーを介して収集され、グラフツールを利用し、ネットワーク上から測定状況および数値データを回収できる構造とした。（図3）

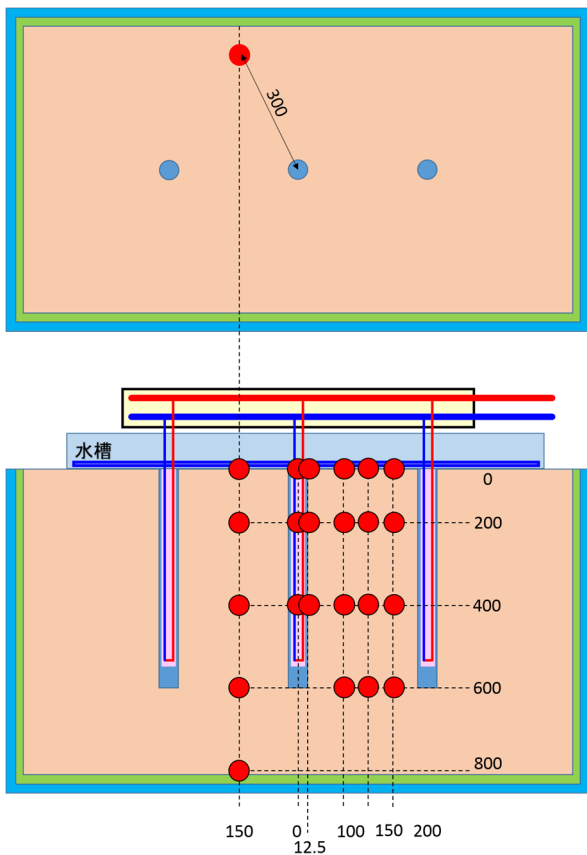


図2 測温抵抗体の位置

3. 実験方法

3. 1. 採熱循環液の選定

循環液の種類および温度は循環管内を乱流で流れるように選定した。これは、層流の速度分布が乱流と比較して、熱交換に寄与しない管中心で大きくなり効率が落ちるためである。²⁾⁴⁾層流か乱流かはレイノルズ数 Re を求めることで決定できる。 Re は粘性係数を μ 、密度を ρ 、平均速度を v 、管直径を d とすると、

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

によって表され、乱流の条件は $Re=2000$ 以上である。この条件を満たす流速を調査するため、粘性係数および密度を測定した。また、ミニモデル上で循環液の流速を測定することは困難であるため、算出した流速から流量を算出することとした。粘性係数は B 型粘度計を用いて測定した。また密度は各液を一定体積とし、電子天秤を用いて重量測定して算出した。循環液の候補としては一般的に利用される、40%エチレングリコール水溶液 (EG)、40%プロピレングリコール水溶液 (PG) および水道水の 3 種とした。

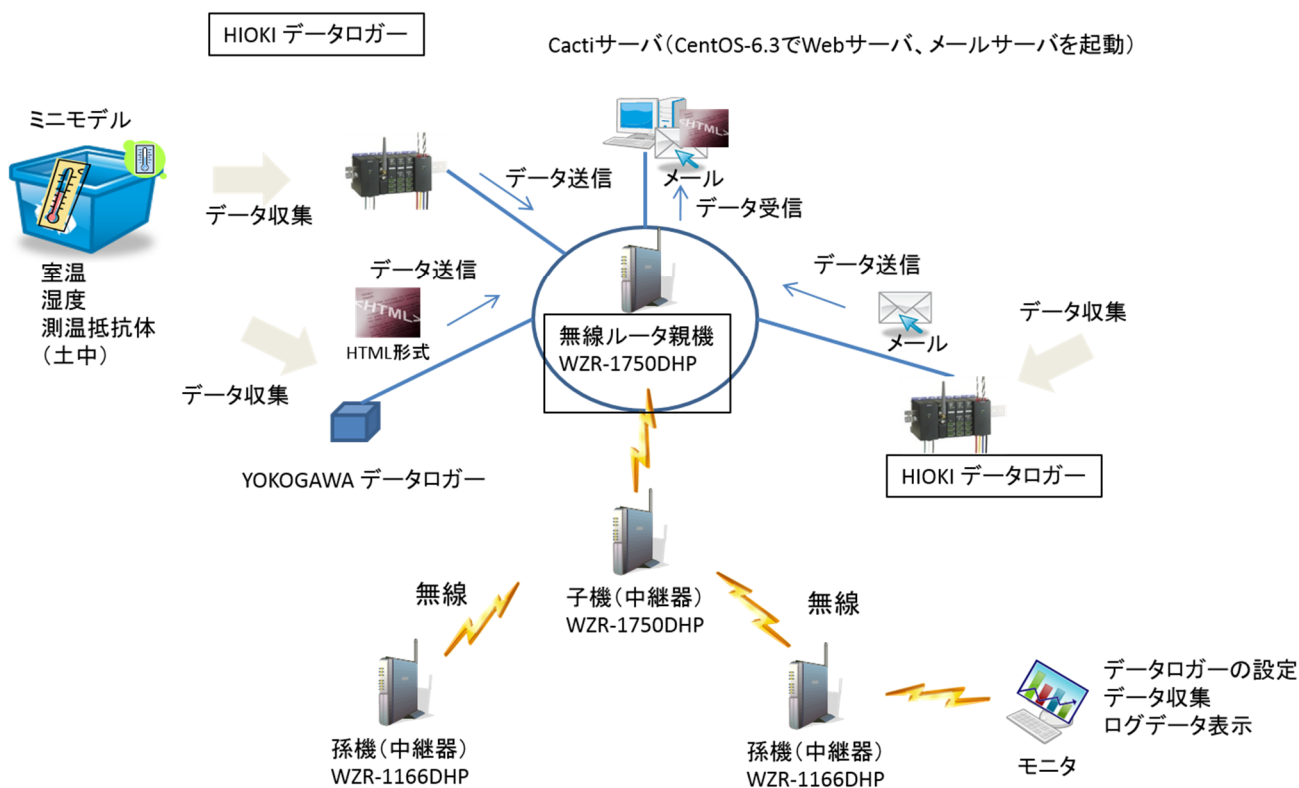


図3 データ収集部の模式図

3. 2. ミニモデルによる採熱実験

2. で作製したミニモデルを利用して浅部地中熱利用の暖房利用時の再現実験を行った。ミニモデルにおける地下温度は日本大学工学部内で行われた過去の実験結果より 15℃とし、表面温度は郡山の冬季の平均気温を参考に液温度を 0.2℃に設定した。また、採熱循環液をミニモデル中央の熱交換井のみ循環し、1 本の熱交換井が周辺の土中へ与える影響を正確に把握できる構造とした。また、循環液は文献の 1 次側還水温度を参考にバッファタンク温度を 2℃とした。²⁾実験はミニモデル土中温度が定常状態となったところで実験を開始した。日本大学工学部の過去の実験によると、ミニモデルが 1/10 の場合、時間が 100 倍となる結果が出ていることを参考に、循環時間は 10 分間とし、実時間で約 16 時間となるよう設定した。また、循環部について循環液の往還それぞれの温度を測定した。計測位置は図 4 の通り、循環液配管部、ヘッダー内端部および U チューブの往側と還側で行った。さらに、還水をメスシリンダーに一定時間貯留し、その量を計測して流量とした。

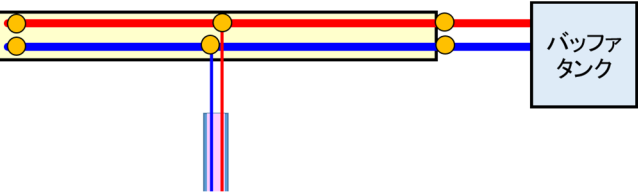


図4 測温抵抗体の位置

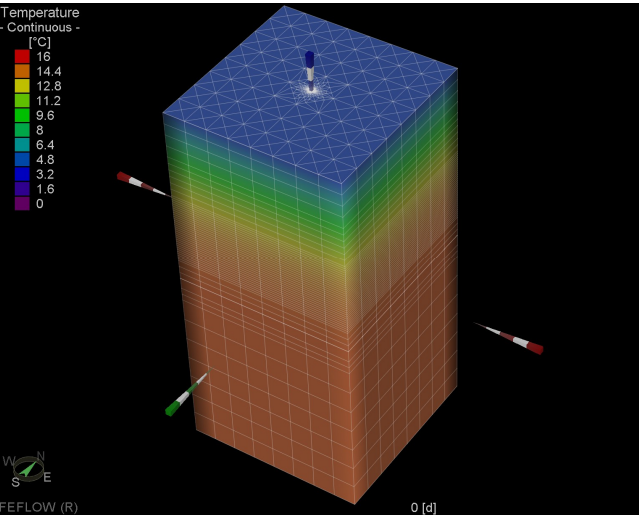
3. 3. コンピュータシミュレーションによる解析

ミニモデルによる再現実験との比較を行うため、コンピュータシミュレーションを用いてミニモデルと同等の地質および採熱構造を有する実大スケールモデルを再現した。シミュレーションソフトは地下水流れや地下の熱輸送を解析する有限要素解析ソフト FEFLOW (DHI-WASY) を使用した。まず初期条件として、地表面を郡山市の年平均気温 12.1℃、地下 8m および 16m を 15℃に固定して定常解析を行うことで平均気温時の地中の温度分布を再現した。次に、過去の月別平均気温を用いた温度曲線を作成しモデル地表面に与え、タイムスケール 2 年 (730 日) での非定常解析を行った。そして非定常解析の最終結果の表面温度を固定温度境界条件として浅部地中熱採熱解析を行った。モデル概要、初期・境界条件を表 1 および図 5 に示す。条件に設定した値は文献等を参考にしたほか、土壌水分および間隙率については実測した値を採用した。⁵⁾⁶⁾通常 FEFLOW では熱交換井の設置条件を与えれば自動的に井戸特性を境界条件としてモデルに組み込むことが可能であるが、本研究においては測定範囲が通常 FEFLOW が扱う範囲 (流域スケールや、平野など) と比較し極

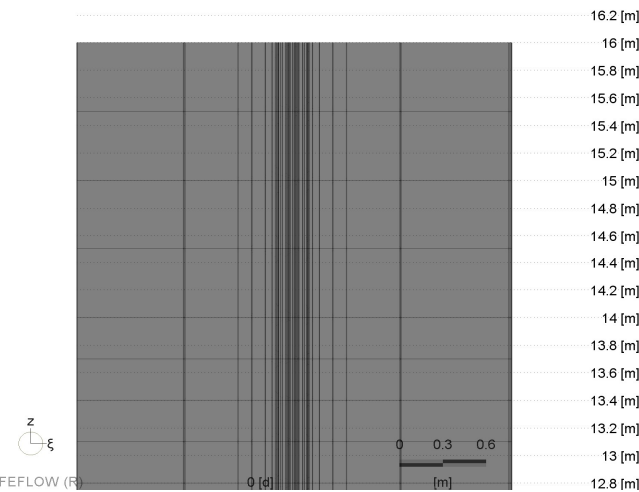
めて小さいことや、それに伴い熱交換井内部に充填した溶液についても採熱に大きな役割を持つことから、自動組み込みの機能を用いず、交換井内部となる要素に水の物性を設定することで、熱交換井の内部を表現したモデルとした。

表 1 モデル概要およびパラメータ値

間隙率[%]	38
熱容量[MJ/m³・K]	4.919
熱伝導率[W/m・K]	1.35
レイヤー数	55
エレメント数	120010
変温層深度	0-8m (45 レイヤー)
恒温層深度	8-16m (10 レイヤー)



(a) 3D モデル



(b) 断面モデル

図5 シミュレーションモデル (中心に熱交換井を設定)

4. 結果および考察

4. 1. 採熱循環液の選定

採熱循環液の候補とした、40%エチレングリコール水溶液 (EG)、40%プロピレングリコール水溶液 (PG) および水道水の粘性係数、密度およびそれらより算出した $Re=2000$ を満足する流量を表 2 に示す。EG および PG と水道水を比較した場合、密度は大きく変化しないが、粘性係数は EG で約 2.7 倍、PG で約 3.1 倍と大幅に増加した。そのため必要流量も同程度の倍率を必要となることがわかった。ミニモデルは、ヘッダー部と U チューブの接続をシリコンチューブで接続しており、EG および PG を必要流量で送液した場合、継手部がその送圧に耐え難いと考えられるため、本研究においては水道水を採熱循環液とした。

表 2. 循環液の粘性測定結果および乱流となる流量

	EG	PG	水道水
粘性係数 [Pa・s]	4.50×10^{-3}	5.10×10^{-3}	1.67×10^{-3}
密度 [kg/m ³]	1025.9	1046.9	999.97
Re=2000 の流量 [m ³ /s]	1.35×10^{-5}	1.56×10^{-5}	5.24×10^{-6}

4. 2. ミニモデルによる浅部地中熱利用再現実験

まず、採熱実験の結果から得られた採熱量を算出する。図 4 に示したとおり、循環配管の往路および還路の複数点で温度測定を行ったが、採熱量は最も外因が少ないことが予想される U チューブ至近の温度で算出した。地中熱利用時の U チューブ往還温度およびその温度差を図 6 に示す。初期の温度はヘッダー等の配管内に滞留していた循環液の温度が影響するため、室温の影響を受けた温度となっているが採熱開始に伴い徐々に低下し、4 分後には U チューブ内温度は概ね 2~3℃で推移している。この結果を用いてミニモデルにおける採熱量を算出する。往きの温度を T_{in} 、還りの温度を T_{out} とすると、温度差 $\Delta T [^{\circ}C]$ は、

$$\Delta T = T_{out} - T_{in}$$

この時の流量を $Q [L/min]$ 、循環水比熱を $C [J/kg \cdot K]$ とすると、採熱量 $q [W]$ は

$$q = C \cdot \Delta T (Q/60)$$

と表せる。さらに、U チューブ挿入深さ $L [m]$ で除することで単位長さ当たりの採熱量とすることができる。

⁵⁾ 再現実験における代表値として、 $T_{in}=2.6 [^{\circ}C]$ 、 $T_{out}=2.9 [^{\circ}C]$ 、 $Q=0.540 [L/min]$ (実測値) とし、水の比熱を $4,180 [J/kg \cdot K]$ とおく。 $L=0.5 [m]$ であるから、単位長さあたりの採熱量は $22.6 [W/m]$ となる。一般的な値と比較すると ²⁾ 有り得る範囲内であるが少し低めである。これは、屋内での実験であるため砂が乾燥状態であることが原因と考えられる。実際の利用では、雨水など地表水の涵養や地下水の存在などにより、地盤が湿潤状態であることが一般的であるため、今回の実験

値以上の採熱が予想される。

次に浅部地中熱利用の再現実験の結果を図 7 に示す。横軸の 0mm は熱交換井中心を示す。(a) は、再現実験前のミニモデル内の温度分布である。再現前の状態から若干管内部が周辺と比較して温度が低いことがわかる。これは、地表面温度を再現するために設置した水槽により熱交換井が冷却され、それに伴い熱交換井内の不凍液が対流することで冷却されたと考えられる。この温度低下のような熱交換井周辺の環境変化は、実際には外気による冷却のほか、太陽熱の入熱、家屋による断熱などの様々な因子が関与して起きる複雑な現象であることが予想される。また、このような現象は一般の地中熱のように不易層から採熱する熱交換井のように井戸直径に対し井戸長さが十分大きい場合は、熱交換全体からは非常に影響度が小さいため無視できるが、浅部地中熱は井戸直径に対して井戸長さが小さいため、これらを考慮する必要がある。また、地表からの冷却だけでなく、熱交換井より深い地下からの入熱についても同様のことが言える。図 7 (b)~(f) はそれぞれ、1, 3, 5, 7, 10 分後の地中温度分布である。時間経過とともに、熱交換井を中心として、周辺の地盤が冷却されていく。例えば、熱交換井中心から 50mm、深度 600mm の位置では、約 12℃あった温度が 10 分間の運転によって 11℃程度まで低下している。運転前と 10 分間運転後の温度分布の比較を図 8 に示す。深度が深くなるにつれて変化量は大きくなることがわかる。これは、循環液と周辺温度差が関係し、表層は温度差が小さいため熱交換量が小さく、深部では温度差が大きいため熱交換量が大きくなると考えられる。また、同図から、温度変化が生じているのは交換井中心から約 100mm 程度までで、100mm より外では温度変化がほとんど見られない。よって、ミニモデルでの 10 分間の運転 (実時間 1000 分、約 16 時間) 程度の採熱による熱の影響は熱交換井中心から 100mm 程度であることがわかった。

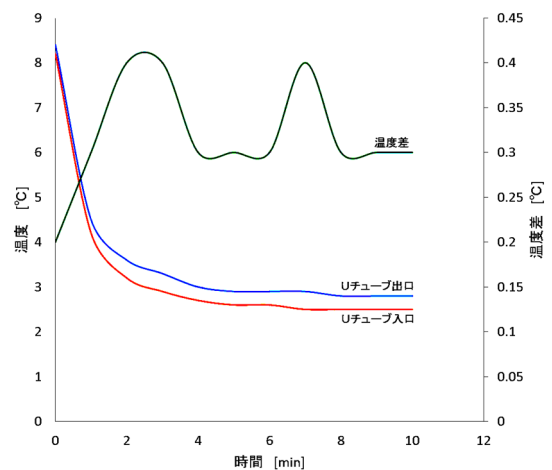
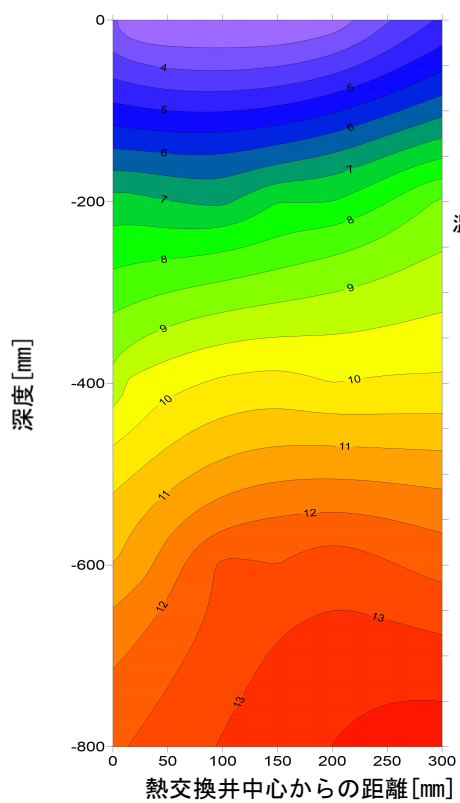
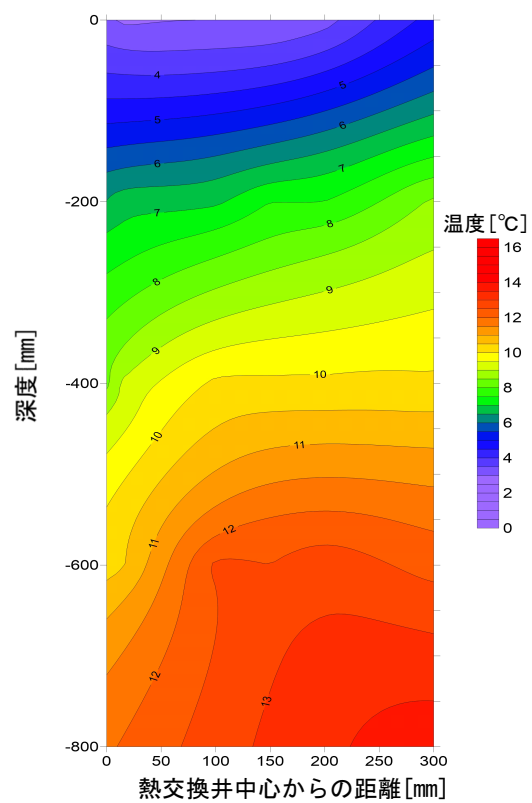


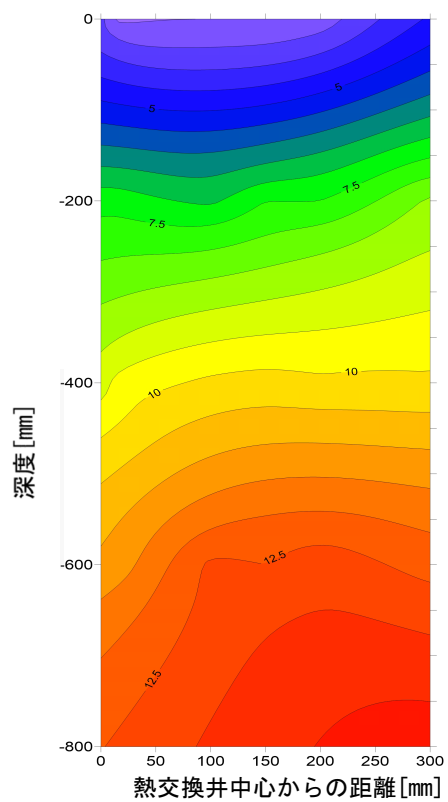
図 6 採熱実験による循環液温度変化



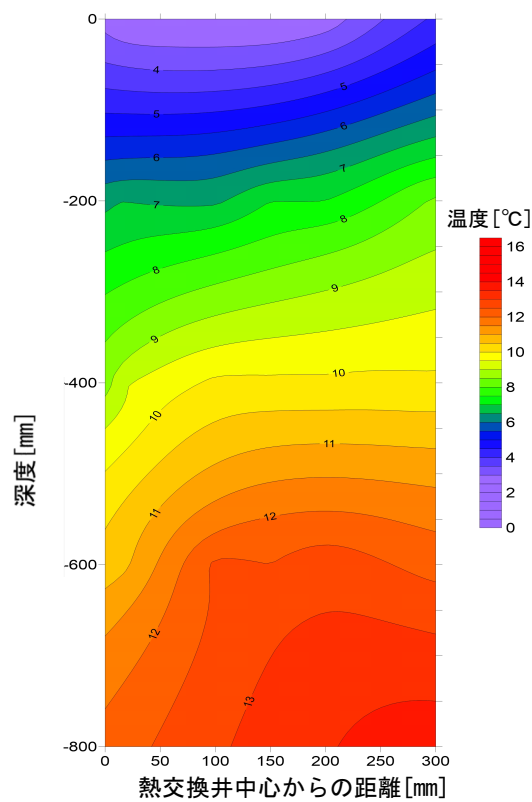
(a) 開始前



(c) 3 分後



(b) 1 分後



(d) 5 分後

図7 ミニモデルの時間経過ごとの地中温度変化

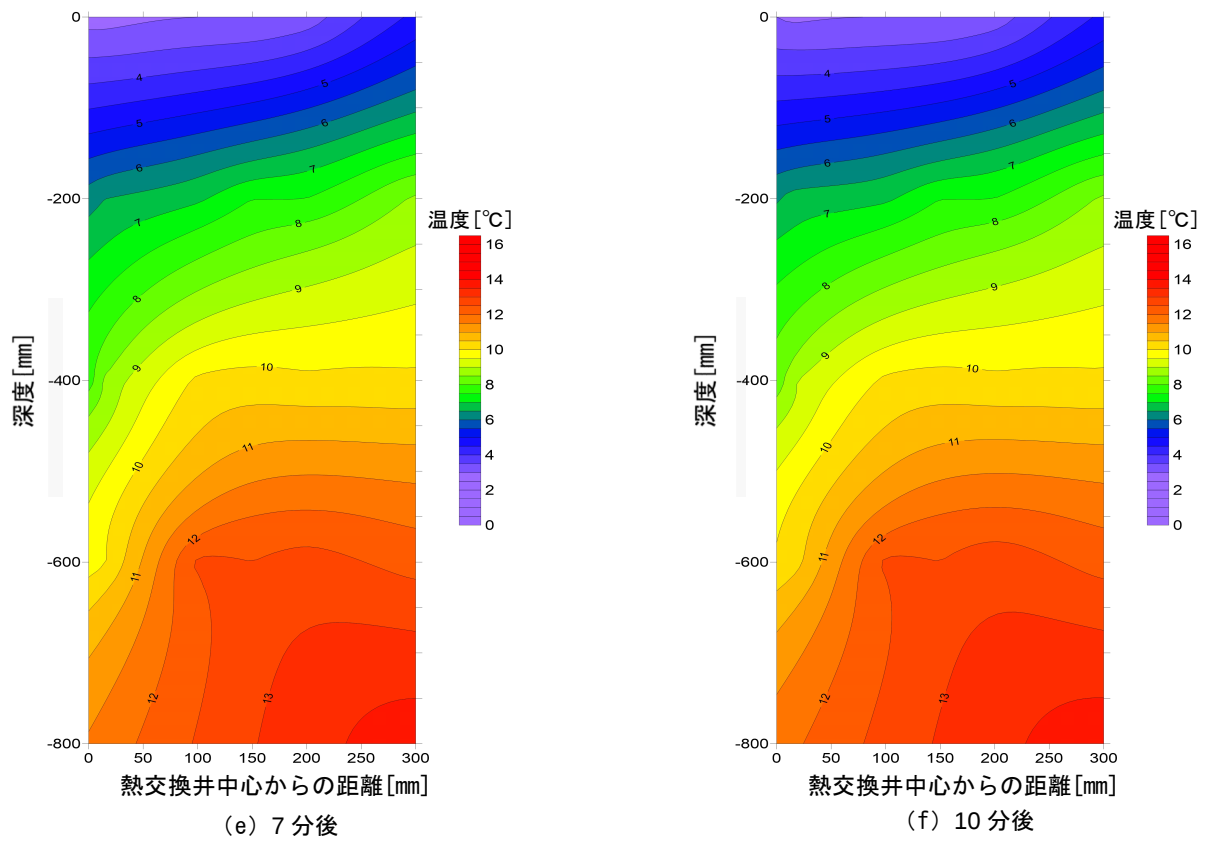


図7 ミニモデルの時間経過ごとの地中温度変化

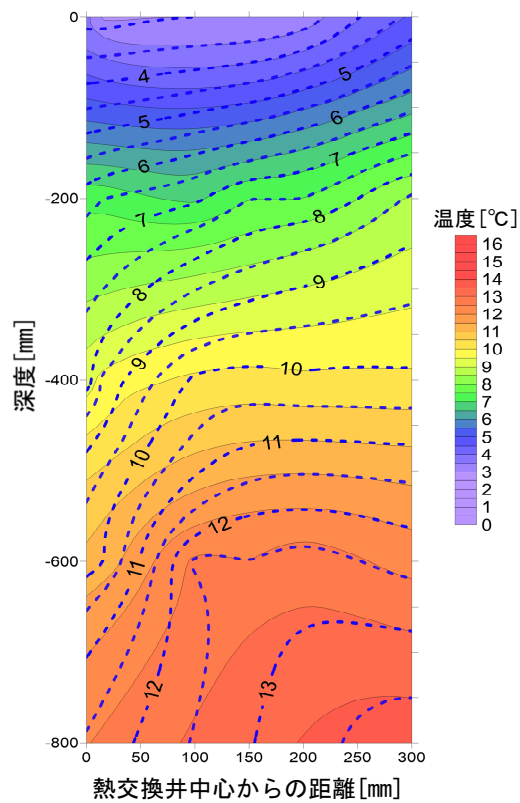
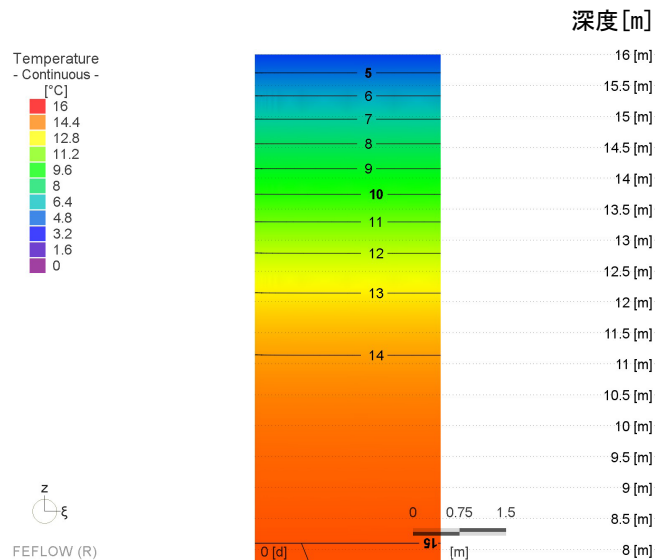


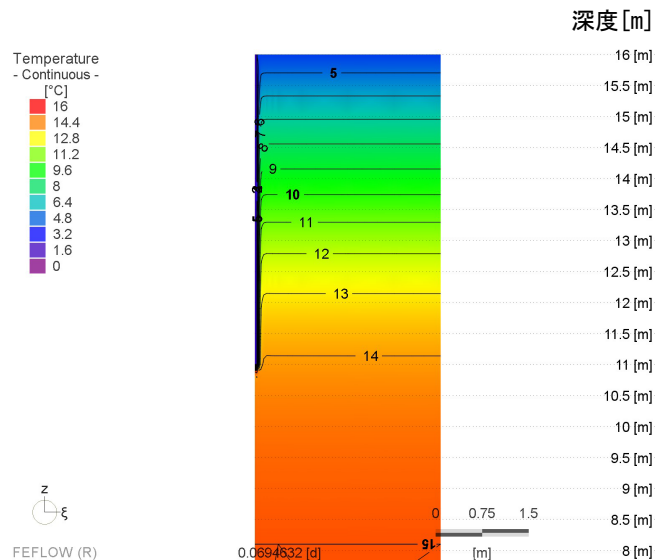
図8 開始前と10分後の地中温度比較
(破線：10分後の温度分布)

4. 3. シミュレーションによる解析

シミュレーションによる解析結果を図9に示す。シミュレーションは実大スケールで行ったため、100倍の時間で考え、実験開始前、約100、300、500、700、1000分後とし、ミニモデルと比較した。まず、(a)は開始前の状況である。ミニモデルでは熱交換井を中心に若干の温度低下があったが、シミュレーションでは深度ごとの温度は一定で井戸内部においてもその状況は同じであった。これは、熱交換井モデルが液体として扱っていないことで、熱対流を生じないことや、モデルの関係上、0m, 8m, 16mのレイヤーに固定温度境界を設け、かつ外部との熱の授受が全くないことが要因と考えられる。次に、(b)～(f)を見ると、ミニモデルでの実験結果と同様に、時間経過と共に温度が低下している。また、温度低下がみられる範囲は交換井中心から約1mで、ミニモデルで得られた100mm(実大スケールで1m)と同様の結果を得られた。ミニモデルとシミュレーションモデルを比較すると、1) 初期条件に差異があること、2) シミュレーションはモデルが簡略化されていること、3) ミニモデルは断熱していても必ず外部との境界で熱収支が存在すること等のため、結果を単純に比較することは困難であるが、両者ともに、浅部地中熱利用の熱影響が管中心から1mという結果については、一定の定量性があると考えられる。一般的な地中熱利用では熱交換井間は5m程度の間隔をあけることが推奨されていることから、最大で熱交換井を中心とした半径2.5mの範囲で温度変化が生じると考えられる。本報告書のシミュレーション結果およびミニモデルによる再現結果は1日のみ運転した場合の結果であり、運転停止から次の運転開始までの地中温度の回復状態によっては、熱交換井中心から半径1m以上の温度低下が生じることが予想される。今後、季節毎や年間、またはそれ以上の長期運用を想定したシミュレーションを行うことが重要であり、また、それらを実証住宅における結果と比較する必要があると考えられる。

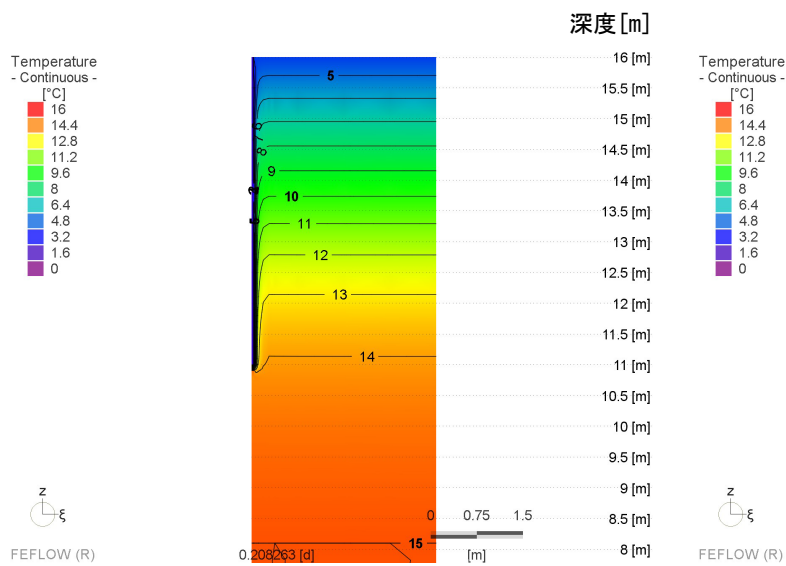


(a) 開始前

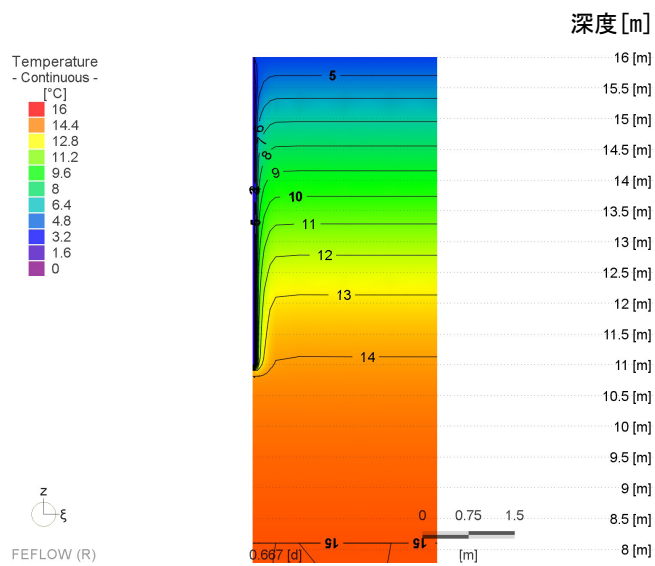


(b) 100 分後 (1 分後)

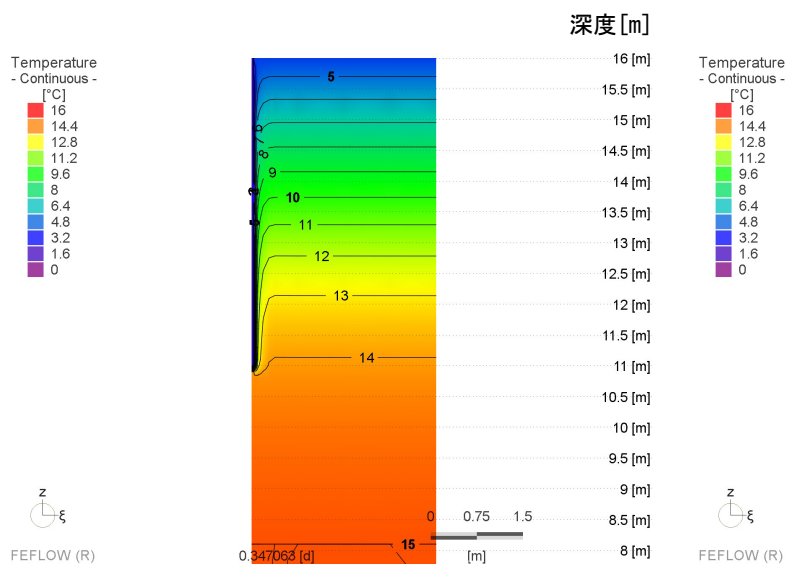
図9 シミュレーションの時間経過ごとの地中温度変化
(カッコ内はミニモデル時間スケールの値)



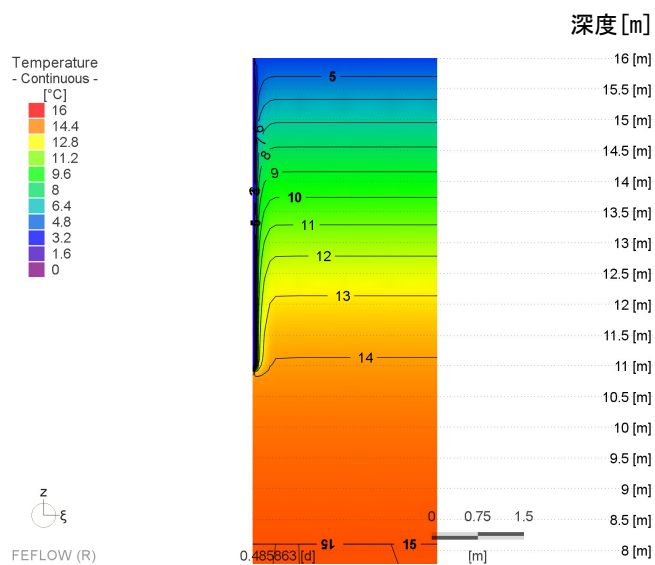
(c) 300 分後(3 分後)



(e) 700 分後(7 分後)



(d) 500 分後(5 分後)



(f) 1000 分後(10 分後)

図 9 シミュレーションの時間経過ごとの地中温度変化
(カッコ内はミニモデル時間スケールの値)

5. 結言

以上のように、本研究では浅部地中熱システムの1つの重要な設計項目である鋼管杭の設置間隔についてミニモデルによる地中熱利用再現実験およびシミュレーションによる再現実験を行い検討した。その結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) 浅部地中熱利用ミニモデルを作製し、利用時の地中の状態を再現することができた。
- (2) ミニモデルにおいて、運転前の地中温度は熱交換井付近が周辺土壌よりも低下した。
- (3) 暖房運転時の再現実験を行い地中温度の測定を行った結果、地中温度は経時的に低下した。
- (4) ミニモデルを利用した10分間の採熱実験で、地中の温度低下は熱交換井中心から半径100mmの範囲であった。これは実大スケールでは16時間の運転で1mの範囲に影響があると考えられる。
- (5) FEFLOWを用いて、ミニモデルと同等の浅部地中熱利用時の地下温度変化を確認した。
- (6) シミュレーションの結果、ミニモデルと同様に管中心より半径1mの範囲においてのみ温度低下があった。

本報告書の結果は、1日分の運転を想定した場合におけるデータである。実際の運転は夏季および冬季それぞれ90日程度の運転が予想される。また、1年を通して温暖または寒冷な地域では季節ごとの運転期間が異なるため、地中の熱バランスが変化する恐れもある。今後、ガイドラインの作成やミニモデルの実用性の検証には、通年を想定した繰り返し運転による再現実験や、運転バランスをあえて崩した再現実験などを行う必要があると考えられる。現在、地中熱利用ポテンシャルを評価するソフトウェアが比較的安価に販売されているが、水平方向からの採熱のみを考慮した計算方法で、浅部地中熱のように上下面からの熱影響を考慮する必要があるモデルには対応はしていない。また、本研究において利用したFEFLOWは非常に高価で、簡単に入手できないものであることから、安価で簡易的な浅部地中熱に特化したシミュレーションソフトまたは、ミニモデルが必要であると考えられる。本研究で作製したミニモデルは標準的な川砂を利用したが、例えば、粘土や礫質などの場合も簡単に再現できる構造とする必要があると考えられる。今後の浅部地中熱利用システムの利用促進のためには、ポテンシャル評価ソフトやミニモデルの単純化および高精度化、ガイドラインの策定が急務となると考えられる。

参考文献

- 1) エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用および化石エネルギー源の有効な利用に関する法律
- 2) 北海道大学地中熱システム工学講座 地中熱ヒートポンプシステム p11, 2007
- 3) 例えば 横浜市泉区 平成24年度泉区地中熱利用普及可能性調査報告書
- 4) 萩三二 熱伝達の基礎と演習 p38
- 5) 岡垣、斎藤 湿った砂の熱伝導率: 不定常熱流法による測定 p117, 1957
- 6) 吉岡真弓 福島大学大学院地球熱システム特論講義資料
- 7) 武田ほか 東北地質調査協会協会誌「大地」vol. 41 p73, 2004

第 3 章

復興住宅用小型地中熱ヒートポンプシステムの開発

日本大学 工学部

浅部地中熱利用システムの開発

～ 復興住宅用小型地中熱ヒートポンプシステムの開発 ～

Development of a Shallow Depth Ground Source Heat Pump System

Development of Compact Ground Source Heat Pump System for Restoration Housing

日本大学工学部 伊藤 耕祐

住宅の基礎下等に鋼管杭型浅部地中熱交換井群を適切に設置すれば、家の冷暖房・給湯等に必要の熱供給能力を備えるシステムを構築できることを示した。福島県郡山地域の厳冬期においてもエネルギー消費効率は3以上であり、熱伝導に優れた採熱管の開発による改善も期待できる。ただし、単位時間・単位土壌体積当たりの採放熱量が 2.5 W/m^3 以下となるような熱交換井の設計やシステムの運用が必要であった。この基準は種々の実証実験によりさらに検証されるべきである。本システムは、小型で安価な地中熱ヒートポンプの市場投入による普及拡大が期待できる。

Key words: 浅部地中熱、鋼管杭、熱交換井、地中温度、ヒートポンプ

1. はじめに

1. 1. 背景

1972年、資源・工業生産・汚染・食料生産・人口の変化を計算して「成長の限界」を指摘したのは、MITの科学者メドウズ達「ローマ・クラブ」であった。40年の時を経た今、それが近未来に現実になることは想像に難くない。そのような時代において「ロハス(LOHAS・・・健康で持続可能な生活スタイルを意味する英語 Lifestyles of Health and Sustainability の頭文字を取った語)」は、人々の様々なライフスタイルの今後のあり方を示している。日本大学工学部では、科学技術が本来あるべき姿を見つめ直し、「ロハスを実現するための工学」を「ロハス工学」と称して2000年代のはじめから教育・研究活動を展開しており、その一環として、2008年より「ロハスの家」プロジェクトを推進している。その中で、本報の主題である「浅部地中熱」を用いた冷暖房・給湯システムの研究開発を、郡山市の企業(有)住環境設計室と共同で推進している。

地表に降り注ぐ太陽光のエネルギーにより地表は温められ、その熱は地表付近に一時的に蓄えられた後、夜間の放射冷却や冬季の放熱によって再び宇宙に戻ってゆく。地中熱(ちちゅうねつ)とは、地表からの深さ約100mまでの地中の熱であり、主に上述のような太陽エネルギーが熱源である。地熱(ちねつorじねつ)は、深さ数km以深の地中の熱であり、地球の中心で発生した天然放射性元素の崩壊熱が主な熱源である。地熱はしばしば地中熱と混同されるが、両者の熱源は本質的に異なっている。より表層(地表から深さ30m程度まで)の地中熱は、99%以上太陽エネルギーが熱源であるとされており「再生可能なエネルギー資源」である。本報では、このような地表付近の地中熱を特に「浅部地中熱(せんぶちちゅうねつ)」と呼び、地熱はもとより従来の一般的な定義による地中熱とも区別する。

環境省が2012年3月に発行した「地中熱利用ガイドライン」によると、東京電力管内の空気熱源の一般的なエアコンを地中熱ヒートポンプによる方式に置き換えれば、原発5～7基分に相当する500万kWのピーク電力節減になるという。地中熱利用技術は欧米や中国で普及しており、特に2000年以降の伸びが大きい。日本の市場規模はその数百分の一である。これは、地質の違いにより、日本では採熱システム(熱交換井)の設置に欧米等と比べてかなり高額な数百万円のコストがかかることが大きな技術的要因の一つである。

これに対して、日本大学工学部が(有)住環境設計室と共同で研究中の浅部地中採熱システムは、現状に対して劇的なコスト低減が可能であり、実用化が期待されていた。

1. 2. 本事業の位置付けと目標

浅部地中熱を利用する実用技術を福島県で開発し、福島県から発信し、広く普及させることによって、福島県の関連産業の振興と再生可能エネルギー利用の促進が図られる。このような観点から、本事業は、冷暖房・給湯システムをはじめとする様々な浅部地中熱利用技術を実用化して福島県の産業振興に資する目的で計画され、平成23年4月から3年計画で実施されるはずであった。ところが、事業開始を目前にした平成23年3月11日に発生した東日本大震災と、それに伴う福島第一原子力発電所の事故の影響により、本事業は一時的に棚上げされた。その後福島県は、脱原発を県の方針とするに至り、再生可能エネルギーの飛躍的推進を重要な柱とする復興ビジョンが策定され、本事業は福島県復興計画の一部として、予定より約9ヶ月遅れた平成23年12月末より実質的な活動が開始された。

本事業の目標は、初期投資の少ない浅部地中熱抽出システムと熱効率の高いヒートポンプシステムを組み合わせ、住宅の冷暖房・給湯等、地中熱を様々な用途に利用することが可能なシステムを開発することである。

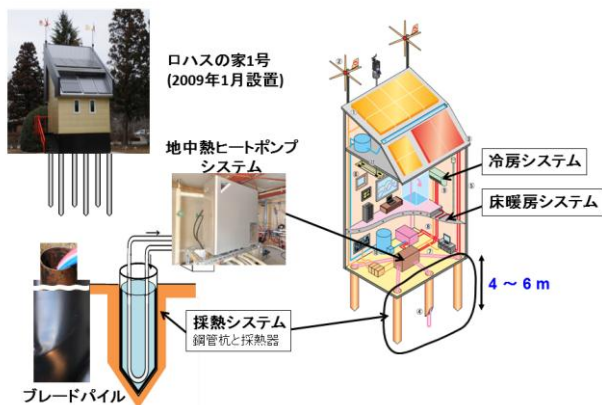


図1 浅部地中熱利用システムを用いた実験住宅例
(日本大学工学部ロハスの家1号)

る。事業は福島県ハイテクプラザを通じて日本大学工学部と(有)住環境設計室に委託された。

1. 3. 浅部地中熱利用システムの概要

本事業で開発を目指す浅部地中熱利用システムは、(1) 浅部地中熱抽出システム及び (2) ヒートポンプシステムで構成される。本事業では、(1)の開発と改良を(有)住環境設計室が、(2)の開発と改良、並びに(1)と(2)で構成されるシステム全体の最適化を日本大学工学部が担当した。両機関は常にデータを共有し、密に連携して解析を行った。

(1)の熱抽出システムは、熱交換井と採熱管で構成される。熱交換井には、住宅の基礎に用いられる鋼管杭を用いる。採熱管 (U チューブ) には主に架橋ポリエチレン製のパイプを用いる。(2)のヒートポンプシステムは、地中熱ヒートポンプを中心とし、地中からの熱

抽出系 (1 次側) と熱利用機器への給熱系 (2 次側) の 2 種類の熱媒液循環系を有する。この熱媒液循環系に熱媒液を循環させて熱交換を行う。このシステムを温風冷暖房、床暖房、および給湯に用いた実験住宅の例を図 1 に示す。

1. 4. 実施項目

本報で述べる日本大学工学部担当の事業では、1) 本事業で用いた地中熱ヒートポンプシステムの特性評価を行い、2) 鋼管杭型熱交換井群の特性と課題を明らかにして、3) システム設計のガイドラインを提案する。

上記 1)には、実証住宅における冷暖房・給湯の実証実験、並びに試作小型地中熱ヒートポンプの給湯性能評価実験を含む。

2. 実験施設

本事業で用いる実験施設は、福島県郡山市田村町の日本大学工学部キャンパス内に設置された地中熱センター東 (以下 GCE) 及び同西 (以下 GCW)、並びに福島県郡山市逢瀬町の(有)住環境設計室敷地内に設置された福島県浅部地中熱実証住宅の 3 ヶ所である。日本大学工学部キャンパス内の実験施設の配置図を図 2 に示す。

2. 1. 地中熱センター東 (GCE)

GCE は、福島県郡山市の日本大学工学部キャンパス内に 2011 年 11 月に同学部が独自に設置した実験施設である。熱交換井には、(有)住環境設計室が国土交通大臣認定を取得済みの「ブレードパイル」と称する回転埋設式鋼管杭が 18 本用いられており、3.5 m 間隔で

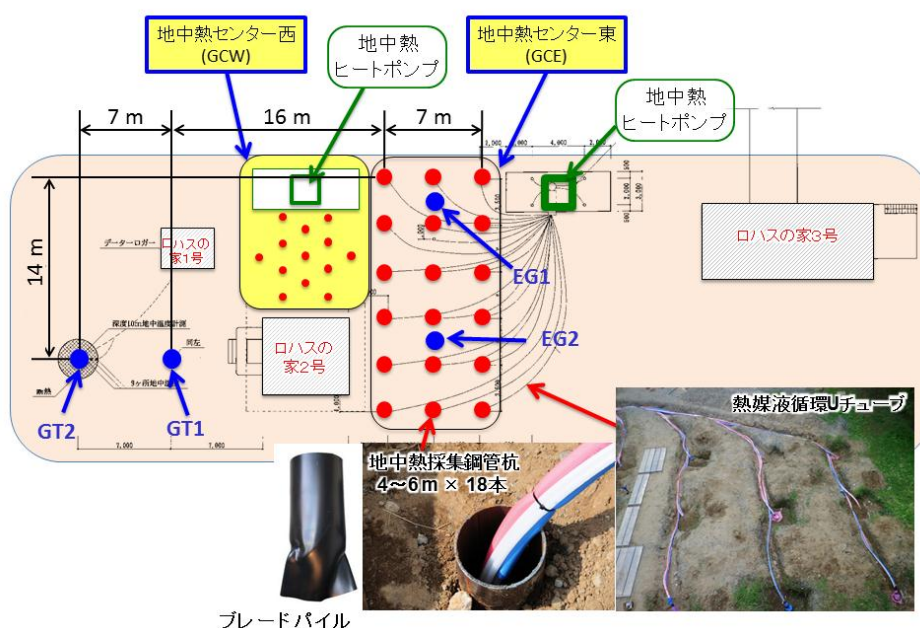


図2 日本大学工学部キャンパス内の実験施設の配置図

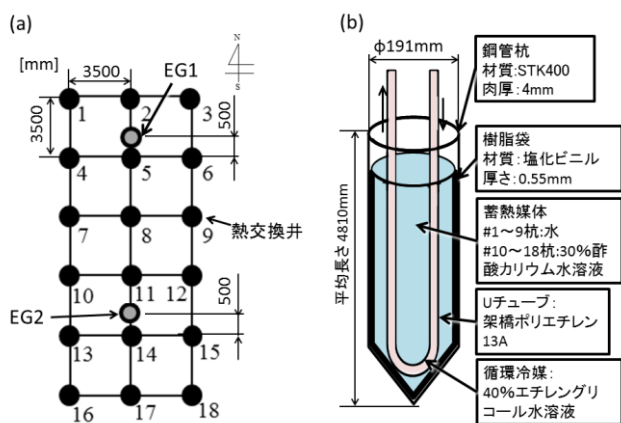


図3 地中熱センター東 (GCE) の (a) 熱交換井配置及び (b) 採熱管の構造

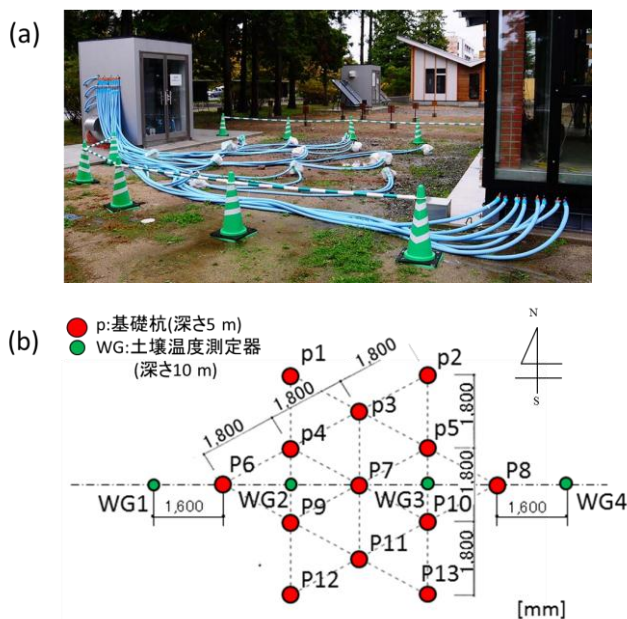


図4 地中熱センター西 (GCW) の (a) 外観と (b) 熱交換井配置

格子状に配置され埋設されている (占有面積約 120 m^2)。それらの配置と熱交換井の構造を図3に示す。鋼管杭の外径は 191 mm 、平均長さは 4.5 m である。鋼管杭の中には熱媒液 (＃1～9 杭は水、＃10～18 杭は 30% 酢酸カリウム水溶液) が満たされている。採熱管 (U チューブ) には、内径約 13 mm の架橋ポリエチレン製のパイプが用いられている。U チューブは、上述の熱媒液が満たされた鋼管杭内に挿入されている。チューブ内には熱媒液 (40% エチレングリコール水溶液) が封入されている。本施設に設置されているヒートポンプは、サンボット製 GSHP-1001 型である (定格暖房能力 10 kW)。熱負荷体として、ファンコイルユニット (ダイキン工業製 FWPM8A) が設置され、温風はダクトより室外に排出される。熱交換井内部の水温分布とその変化を計測するため、杭内に挿入された採熱管には 1 m おきに温度センサー (T 型熱電対) を取り付けてある。

採熱管を流れる熱媒液の温度と流量を測定するための白金測温抵抗体と流量計も備える。熱交換井群内の土壌の温度分布を計測するため、図3に示す位置2カ所の地中に長さ 10 m の土壌温度計 EG1、EG2 が設置されている。これらのデータは、データロガー (グラフテック製 GL820) を用いて1分毎にサンプリングされる。

2. 2. 地中熱センター西 (GCW)

GCW は、本事業における種々の解析的な実験を行うため、2012年に日本大学工学部キャンパス内に新たに設置された実験施設である。熱交換井には、前述の「ブレードパイル」が13本用いられている。熱交換井は、一般住宅の基礎杭間隔 (約 2 m /本) よりもやや狭い 1.8 m 間隔で埋設されている。その配置を図4に示す。熱交換井の構造は GCE と類似である。鋼管杭の外径は 140 mm 、長さは 5 m である。鋼管杭の中には水が満たされている。採熱管 (U チューブ) には、内径約 13 mm の架橋ポリエチレン製のパイプが用いられている。U チューブは、水が満たされた鋼管杭内に挿入されている。チューブ内には熱媒液が封入されている。現在市場で一般的に使用されている熱媒液は、プロピレングリコール水溶液又はエチレングリコール水溶液であるが、これらには毒性があり、廃棄時や万が一漏れ出した場合などの環境負荷が環境省によって懸念されている。本施設では、環境適合性を考慮し、生分解性のある酢酸カリウム系水溶液を熱媒液として採用した。ヒートポンプは、サンボット製 GSHP-1001 型 (改) である。これは、現行量産モデルの基幹部品をベースとして、定格暖房能力が 6.0 kW になるよう改造を加えた試作品である。やや効率は落ちるが、運転モードを限定すれば 10 kW までの運転も可能である。2 次側の放熱部として、隣接する日本大学工学部内の実験施設「ロハスの家2号」の蓄熱床を用いることができる。

熱交換井内部の水温分布とその変化を計測するため、杭内に挿入された採熱管には 1 m おきに温度センサーを取り付けてある。これらの温度センサーは T 型熱電対を用いているが、通常は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 程度の誤差があるため、蓄熱材と冷温水を用いた校正装置を作製し、白金測温抵抗体 (JIS Class A) を用いて校正したものを使用している。採熱管を流れる熱媒液の温度と流量を測定するための白金測温抵抗体と流量計も備える。熱交換井群内の土壌の温度分布を計測するため、図4中に示す位置4カ所に地中に長さ 10 m の土壌温度計 WG1～4 が設置されている。これらのデータは、データロガー (グラフテック製 GL820 及び江藤電気製 CADAC3) を用いて1分毎にサンプリングされる。



図5 福島県浅部地中熱実証住宅（福島県郡山市逢瀬町）

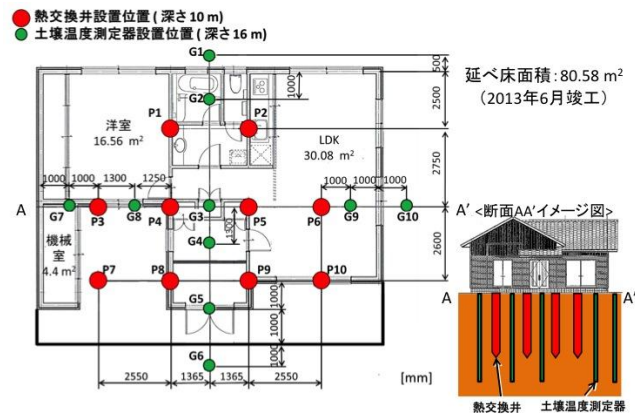


図6 福島県浅部地中熱実証住宅の間取りと熱交換井及び土壌温度測定器設置位置

表1 福島県浅部地中熱実証住宅の各仕様

	メーカー	型式	備考	設置場所
地中熱 ヒートポンプ	サンボット	GSHP-1002UR	定格 10 kW	機械室
ファンコイル ユニット	ダイキン工業	FWH4B	定格 3.61 kW	洋室
		FWH8B	定格 7.22 kW	LDK
床暖房	サンボット	ゴムチップパネル	厚さ12 mm	LDK南側 洗面脱衣所 廊下
	サンボット	ゴムチップパネル	厚さ22 mm	洋室
	積水化学	積水パイプ		LDK北側

2. 3. 浅部地中熱実証住宅

本事業の成果を反映させつつ、実際の家の冷暖房需要に近い条件で実証データを蓄積するため、福島県郡山市逢瀬町多田野の(有)住環境設計室の敷地内に、木造平屋建て、延べ床面積約 80 m²、約 17 m²の洋室と約 30 m²の LDK を備える実証住宅が設置された（図 5 及び 6）。

本実証住宅の浅部地中採熱システムは、鋼管杭型熱交換井、採熱管、ヒートポンプで構成され、室内の冷暖房・給湯機器並びに家入り口のポーチの融雪配管に給熱できるよう設計されている。本実証住宅の熱交換井には、前述の「ブレードパイル」が 10 本用いられている。鋼管杭の外径は 140 mm、長さは 10 m である。鋼管杭の中には水が満たされている。杭配置を図 6 に示す。採熱管（U チューブ）は、内径約 13 mm の架橋ポリエチレン製のパイプであり、水が満たされた鋼管杭内に挿入されている。チューブ内には熱媒液として酢酸カリウム系水溶液が封入されている。ヒートポンプは、サンボット製 GSHP-1002UR 型である（定格暖房能力 10 kW）。本実証住宅の冷房は冷風で、暖房は温風と床暖房により行う。その仕様を表 1 に示す。給湯システムは、200 L の温水タンクを備え、暖房・融雪と併用して給熱できるだけではなく、夏季冷房時にも給熱できるよう設計されている。入り口ポーチは地

中熱による融雪も可能である。

実証住宅の照明には LED が用いられており合計の消費電力は 414 W である。従来型の照明（場所に応じて蛍光灯又は白熱電球）を用いた場合の消費電力約 2200 W と比較して、80%以上の消費電力削減が図られている。実証住宅の屋外には、太陽光発電システムが設置されている（図 5）。定格発電能力は 2 kW（1 kW x 2 系統）で、DC 24V 100 Ah の蓄電システムを備える。その発電・放電・充電・蓄電特性の例を図 7 に示す。日射量に対する発電効率は最大で 15%であり、仕様通りであった。（計測の都合で図の発電量は 1 系統分のデータであるが、他方も正常に発電していることを確認済みである）放電負荷は LED 照明であり、最大で 1 kWh/day の放電がなされたが、蓄電量の不足は生じておらず、設計通りの性能を示した。この蓄電量で、全照明の半分を約 6 時間（例えば 17～23 時まで）連続点灯することが可能であり、実生活における一晩の照明の消費電力量のほぼまかなうことが可能と考えられる。

熱交換井内部の水温分布とその変化を計測するため、杭内に挿入された採熱管には 1 m おきに白金測温抵抗体で校正済みの温度センサー（T 型熱電対）を取り付けてある。採熱管を流れる熱媒液の温度と流量を測定するための白金測温抵抗体と流量計も備える。また、地中熱冷暖房の効果を確認するため、床や壁などにも

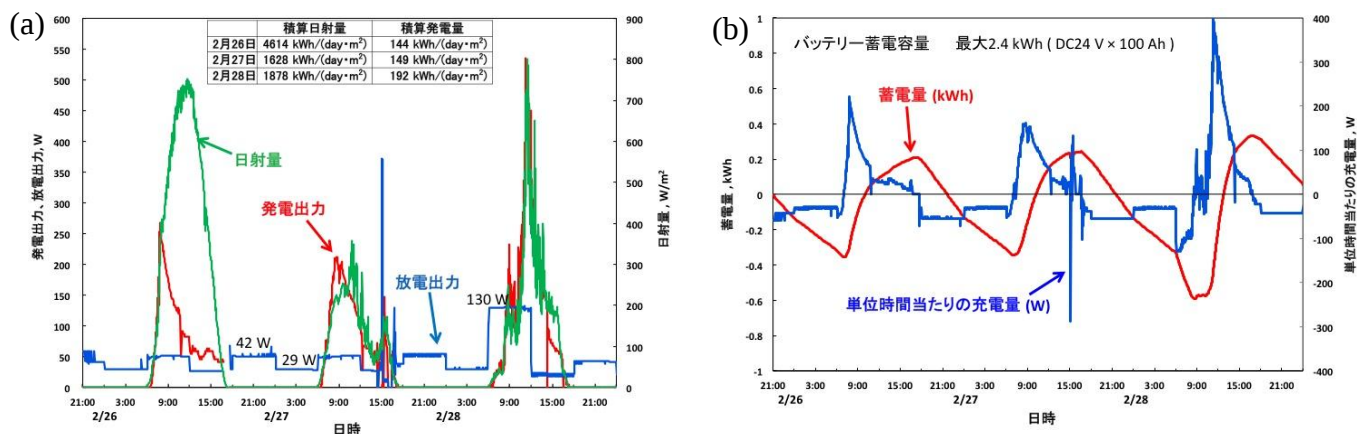


図7 浅部地中熱実証住宅太陽光発電システムの(a) 発電・放電特性、および (b) 充電・蓄電特性

温度センサーが設置されている。

土壌温度分布を計測するため、図6に示す位置10カ所の基礎下には長さ16mの土壌温度計G1～10を設置した。これらのデータは、データロガー（グラフテック製GL820）を用いて1分毎に常時サンプリングされている。

2. 4. 小型地中熱ヒートポンプの試作

一般的なエアコン用の空気熱源ヒートポンプと比べ、地中熱ヒートポンプは販売台数が著しく少ない。このため量産効果が得られず、販売価格が下がらないのが現状である。また、現行の戸建て住宅用地中熱ヒートポンプは、家全体の熱需要をすべてまかなうことを前提としたモデル設定となっている。地中熱システムの普及促進のためには、家の熱需要を部分的にまかなえる小型で安価な地中熱ヒートポンプが必要である。

このため、本事業では、日本大学工学部の佐々木直栄教授の設計協力を得て、空気熱源ヒートポンプ用の部品を流量した小型地中熱ヒートポンプの試作を試みた。ベース部品は、定格出力5kWの空気熱源ヒートポンプ用のコンプレッサであり、R410Aを冷媒として

一般家庭用の単相100Vで作動する。

3. 地中熱ヒートポンプシステムの特性

3. 1. GCWおよびGCEのシステム特性

GCWおよびGCEにおいて、種々の設定で運転した時の冷暖房出力とエネルギー消費効率の関係を図8に示す。冷房・暖房共に、エネルギー消費効率は3～5程度であり、概ね設計仕様書通りの性能を示した。いずれのモデルも5kW付近の部分負荷で高い効率が得られるように設計されており、出力の増加と共にエネルギー消費効率は低下する傾向がある。

夏季のGCEにおいて冷房運転により100kWh/dayの放熱を一定期間行う実験を繰り返し行った時の放熱による土壌温度上昇と期間平均のエネルギー消費効率を図9に示す。図中の「連続運転」は、4.2kWの放熱を連続して行った場合、「断続運転」は、7.4～8.2kWの放熱を1日12～13時間行った後に11～12時間停止するというパターン運転を行った場合である。各実験共、9日運転後のデータをプロットしてある。各々の総放熱量はほぼ同じである。図9の横軸は、それぞれの実験開始時の土壌温度（深さ1～6mの平均値）である。

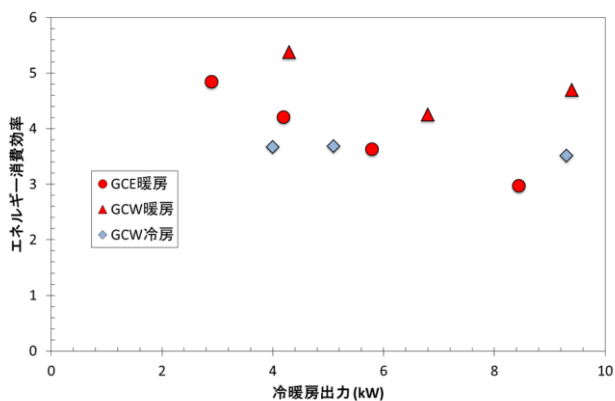


図8 GCW及びGCEの地中熱ヒートポンプシステムの種々の運転条件下のエネルギー消費効率

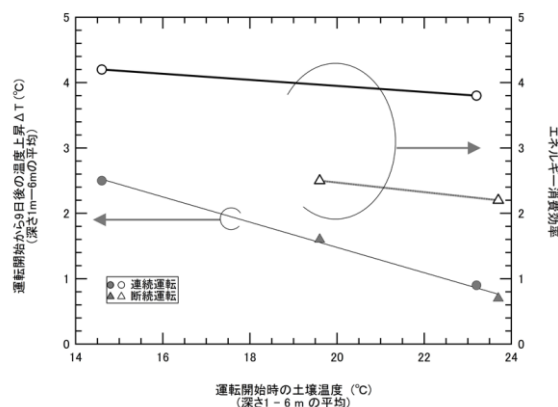


図9 GCEにおける放熱による土壌温度上昇とエネルギー消費効率

放熱による土壌温度上昇は、実験開始時の土壌温度が高いほど小さくなる傾向があった。運転パターンによる差は本実験では見られなかったが、より軽負荷運転の場合は大きな差が生じる可能性があり、今後詳細な実験確認が必要である。

エネルギー消費効率は、実験開始時の土壌温度が高いほど低くなる傾向があった。これは、ヒートポンプ1次側（この場合は放熱側になる）の熱媒液温度が高くなり、放熱効率が低下したためである。夏季には過度の土壌温度の上昇を（冬季は低下を）生じさせないよう、運転パターンを制御する必要がある。

また、エネルギー消費効率は軽負荷の連続運転の方が高かった。断続運転でも1日当たりの放熱量は連続運転と同じであったが、短時間で同じ熱量を得るために高出力で運転したことにより電力消費量に大きな差が生じた。これは本施設のヒートポンプ固有の仕様上の特性を反映している。

このように、採放熱量が同じでも運転の仕方によって特性が異なる場合があるため、熱交換井やヒートポンプの特性を生かす最適制御を行う必要がある。上記とは逆に高出力側の方が効率の高いヒートポンプを使う際には、バッファ用蓄熱水タンクを用いる例もある。蓄熱を家の基礎や特殊な蓄熱媒体で行う例もある。本事業の範囲からは逸脱するが、熱源システムの特性に合わせて家の断熱・遮熱・蓄熱特性を最適化することも重要である。家の構造や特性、熱源機の選定や運用システムを、施主のライフスタイルに応じて総合的に設計又は選定し、提案できる事業者の育成が望まれる。

3. 2. 実証住宅の給湯システム特性

実証住宅の給湯設備単独の実験を行った結果を図10に示す。約1時間半で15℃の水200Lを50℃に昇温することができた。ヒートポンプ2次側で計測したエネルギー消費効率は3.1であったが、タンクの水の

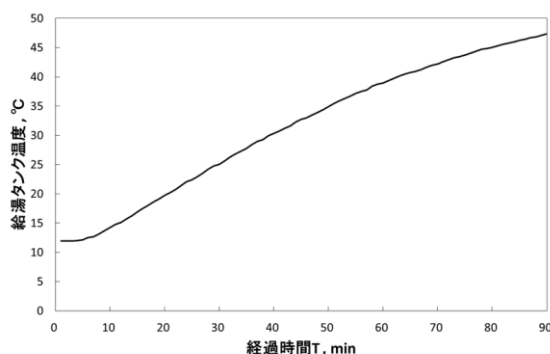


図10 福島県浅部地中熱実証住宅における給湯設備単独の実験結果

昇温から逆算した給湯システム全体の効率は2.0であった。これは、給湯タンクの断熱が不十分で熱損失が大きかったためであることが明らかになった。断熱と制御を改善することにより、給湯システムの効率を3以上に高めることが可能と考えられる。

日本大学工学部キャンパス内のロハスの家3号（図2）に補助熱源として設置されている自然冷媒ヒートポンプ給湯機（いわゆるエコキュート）を用いて比較のために同時期に行った実験では、12℃の水465Lを60℃に昇温するために約8時間を要し、エネルギー消費効率は1.9であった。この比較実験を行った日は、冬の郡山としては比較的暖かかったことから、厳冬期（特に霜取り運転が頻発する降雪時）はさらに効率が低下すると考えられる。

本事業の地中熱ヒートポンプシステムは、厳冬期でもエネルギー消費効率が3を下回ることがなかった（図8）ことから、寒冷地における地中熱ヒートポンプ給湯機の優位性が確認された。

3. 3. 試作小型地中熱ヒートポンプの特性

本事業で試作した小型地中熱ヒートポンプのエネルギー消費効率と、これを給湯に利用した場合の最大湯量と給湯温度の関係を、図11に示す（実験室での模擬熱源での結果）。ベース機のコンプレッサ仕様の制約により、給湯温度55℃設定では運転継続ができなかったが、50℃以下であれば、エネルギー消費効率4以上の性能で運転可能であった。また、原水温度15℃の時、給湯温度50℃以下であれば、湯量1.5L/min以上を確保できると考えられ、概ね妥当な性能を備える。

このような給湯能力を備える小型ヒートポンプは、温水式床暖房や融雪にも活用することが可能である。本事業では時間と予算の制約があり、量産を前提とした開発に必要な耐久性の確認や制御の最適化には至らなかったが、十分に将来性があると考えられる。

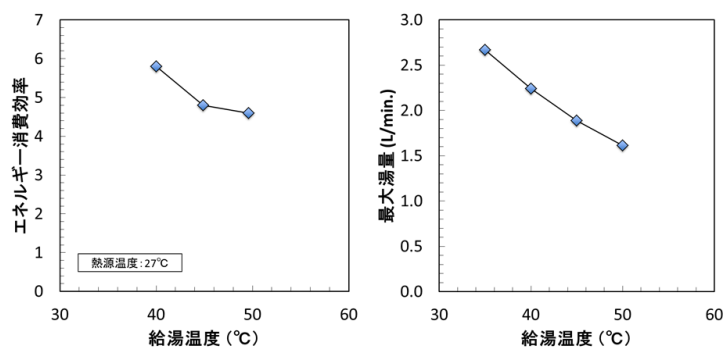


図11 試作小型ヒートポンプのエネルギー消費効率及び給湯量

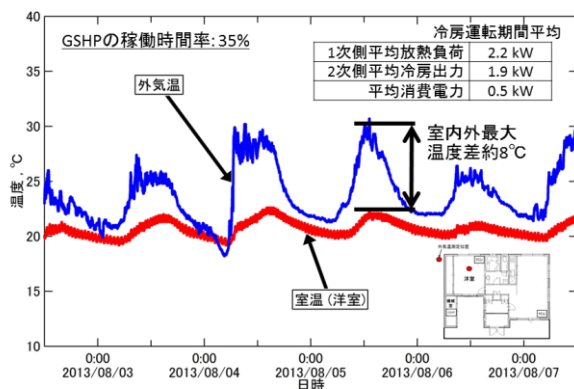


図12 浅部地中熱実証住宅の冷房時における室温及び外気温の推移

住宅の熱需要に部分的に対応できる安価なヒートポンプがあれば、導入時の総設備コストを大幅に低減することが可能であり、普及拡大のきっかけとなる。今後このような仕様の地中熱ヒートポンプの量産を手がける福島県内の事業者が出ることに期待したい。

4. 実証住宅の冷暖房特性

実証住宅の冷房運転の結果の一例を図12及び13に示す。図12より2013年8月2～7日の平均室温は約20.7°Cであった。室温と外気温の差は最高値で8.4°Cで、日平均値で6.6°Cであった。この期間平均の出力は1.9 kW、エネルギー消費効率3.9であった。室温と外気温の最高値の差が最大となった8月5日の日中の1時間のデータを図13に示す。冷房出力が増減しているのは地中熱ヒートポンプが稼働と停止を繰り返しているためである。この1時間の平均冷房出力は2.5 kWであり、定格の約25%の出力で運転されていた。それでも平均室温は21°C以下であり、冷房能力として十分である。その時の室内外温度差は8°Cであった。出力にまだ余裕があることも考慮すると、本冷房システムは外気温35°Cでも室温を28°C以下に保つために十分な能

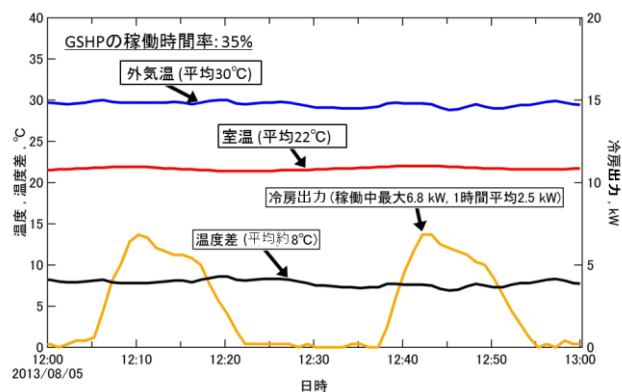


図13 浅部地中熱実証住宅の冷房時における外気温、室温、冷房出力の推移

力を持つと考えられる。

実証住宅の暖房運転の結果の一例を図14に示す。12月23～31日は停止期間である。暖房停止時の室内外温度差は、平均で4.2°Cであった。2013年12月12～15日、2013年12月21～22日、2014年1月1～3日、2014年1月13～16日は、実際に人が滞在し日常生活に近い暖房を行った。外気温が0°C以下の日も室温は20°C前後に保たれており十分な実用性を有する。2013年12月13～14日の運転状況を図15に示す。この期間の平均暖房出力は7.3 kWであり、エネルギー消費効率は3.3であった。

2014年1月17日より、4月までの予定で平均出力4.2 kWで暖房運転を継続し、採熱が土壌温度へ及ぼす影響を解析するための実験を行っている。

5. 鋼管杭型熱交換井群の特性と課題

5. 1. GCE 及び GCW の熱交換井群の特性

地中熱センター東(GCE)において、熱交換井群の一部(10本、合計長さ49m)を用い、熱供給能力に対して過剰な出力で採熱実験を行った時のヒートポンプ1次側(地中側)の循環熱媒液温度を図16に示す。熱媒

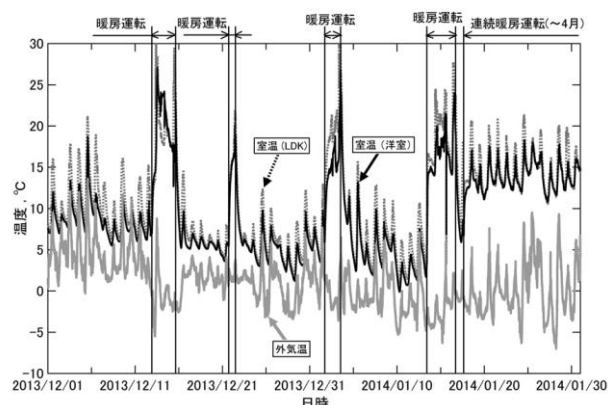


図14 浅部地中熱実証住宅における冬季の外気温、室温の推移

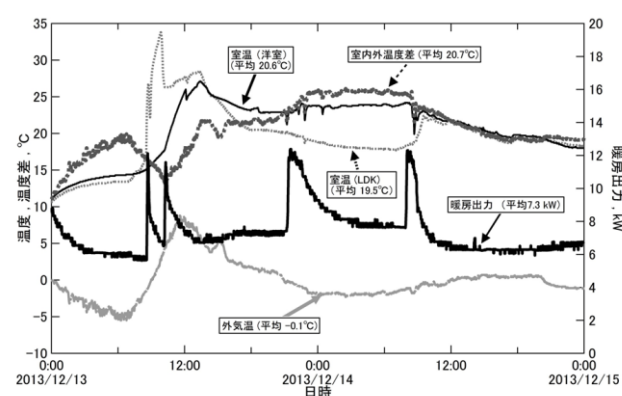


図15 浅部地中熱実証住宅における暖房時における外気温、室温、冷房能力の推移

液温度は、2 時間後に -8°C 以下になり、凍結による破損を防止するため運転を停止した。この間の採熱量は 11 kWh、エネルギー消費効率は 3 であった。熱交換井（鋼管杭）内部の平均温度は採熱中に約 10°C から約 0°C まで低下し、採熱を停止すると十数時間でほぼ回復したが、採熱を繰り返すと徐々に低下し続け、この条件では継続的な採熱はできなかった。

上記は極端な例であるが、単位時間当たりの採熱量を減らしても同様の傾向が見られた。その原因は、採熱管の材質が熱伝導率の小さいポリエチレンであるためである。在来工法では、100 m 前後の熱交換井を掘削し、地面に直接採熱管を埋設するため、コスト・耐久性・作業性等からポリエチレン製の U チューブが用いられている。本システムに於いても、市場で実績のあるこの技術を採用したが、採熱管の内外の温度差が大きくなり、温度の高い地中を熱源としていることのメリットを生かしきれていない。熱伝導率の大きな金属製の採熱管を使用すれば、ヒートポンプ 1 次側（地中側）の循環熱媒液温度を高く保つことができ、エネルギー消費効率の向上につながると考えられる。

現状でも、単位時間当たりの採熱量を下げるとより長い時間運転を継続することができる。例えば、GCE の 18 本の熱交換井すべて（合計長さ 81 m）を用い、凍結あるいは加熱防止の基準値（ -8°C および 40°C ）に達するまでの運転時間を計測したところ、暖房のための 3.2 kW の採熱で 400 時間、2.3 kW の採熱で 2,500 時間以上の連続採熱がそれぞれ可能であった。また、冷房のための平均 4.3 kW の放熱を夏季に累計で 1700 時間以上行うことが可能であった。

地中熱センター西(GCW)において、同様に計測したところ、暖房のための 3.5 kW の採熱、及び冷房のための 5.5 kW の放熱で、それぞれ 100 時間以上の連続運転が可能であった。

上記の連続運転時間と熱交換井 1 m 当たりの冷暖房出力の関係を図 17 に示す。ここで、横軸に示す冷暖房

出力は、前述の採放熱量（＝ヒートポンプ 1 次側）ではなく、2 次側の熱量である。冷房と暖房の傾向線が一致しているように見えるのは、運転停止の限界温度設定がたまたまそのようになっていたためであり、限界条件を現段階における実用的な値に設定した場合の見かけの特性と見なすべきである。熱伝導率の大きな採熱管が開発されれば、高出力で運転を継続できる時間をかなり改善できると考えられる。現状の GCE では、冬期間（約 3000 時間）の連続採熱が可能な暖房出力は 25 W/m 程度である。（ただし、後述する通り、季節全体にわたる採放熱量は、土壤温度の過度な変化を起こさないという観点から決定されるべきである。）

在来工法（100 m 前後のボアホール型熱交換井）における単位熱交換井長さあたりの出力は 30～50 W/m 程度とされているので、GCE の能力はその 5～8 割程度である。しかし、地表付近（深さ 0～1 m）は冬季の土壤温度が 5°C を下回り、杭の地表付近部分は採熱にほとんど寄与していないと考えられる。よって、GCE において採放熱に寄与している実効長はもっと短いと考えるべきである。仮に地表から約 1 m は採放熱にほとんど寄与していないと仮定すると 30 W/m 前後となり、ボアホール型に匹敵することになる。

2014 年 1 月 1 日の実証住宅中心部の基礎下深さ 1 m 地点は不易層温度と同等の 14°C であり、深さ 4 m はそれを 2°C 上回る 16°C であった。GCE においても、表層を適切に断熱することにより表層の温度低下を軽減することができ、採熱能力の向上が期待できる。

GCE における 2.3 kW の連続採熱で得られる暖房出力は 2.9 kW であった。これは 70 kWh/day に相当し、GCE と同程度の面積（ 120 m^2 ）の住宅を暖房するために十分な熱量である。福島県郡山地域において杭基礎が必要な土壤に建てられる住宅の平均的杭長は 8～10 m と言われているので、GCE の約 2 倍の採放熱能力が見込まれることになる。よって、家の基礎下（および必要ならば庭や駐車場）の面積を活用して浅部地中熱

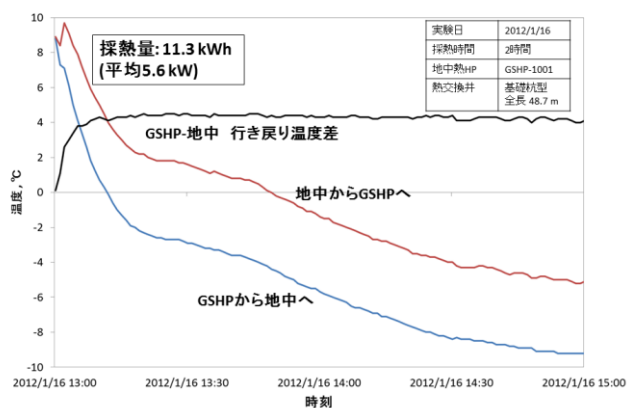


図16 GCEにおける過剰採熱実験時のヒートポンプ 1次側（地中側）の循環熱媒液温度変化

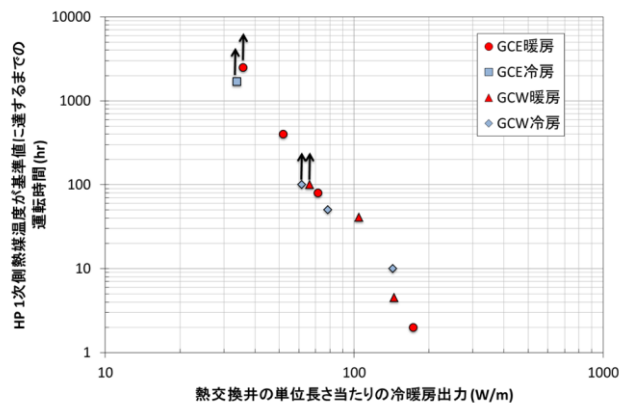


図17 GCW及びGCEにおける連続運転時間と熱交換井 1 m 当たりの冷暖房出力の関係

交換井群を設置すれば、給湯や融雪も含めた家の総熱需要を十分にまかなうことが可能と考えられる。

このように、鋼管杭型熱交換井群を用いた浅部地中採熱方式は、起床時や帰宅時など、短時間の急激な熱需要に対応することが可能で、かつ連続冷暖房時の能力も在来技術と同等以上であるといえる。ただし、過度の採熱を長期間継続することによる過度の土壌温度の変化を起こさないようにシステムを設計・運用するための基準が重要である。

6. 採熱システム設計基準の検討

前章で考察に用いた「単位長さ当たりの出力」という指標は、単一熱交換井の施設容量の検討には便利であるが、複数の熱交換井で構成されるシステムを設計する場合、熱交換井の相対的位置関係を決めるためには使えない。住宅の鋼管杭基礎を用いた熱交換井群において、近接する基礎杭から採熱すると熱干渉が発生して採熱能力が低下する。よって、採放熱出力そのものよりも長期間採熱が継続できるための熱交換井の配置や適切な運用が重要であり、そのための基準が必要である。

在来技術であるボアホール式熱交換井を複数本設置する場合、熱干渉を防止するためには少なくとも 5 m 以上の間隔をあける必要があるとされている。この方式の標準的な採熱能力を 50 W/m として単純化して考えると、直径 5 m (=面積約 20 m²) の円筒の土壌から 50 W/m 採熱していることになり、土壌の単位体積あたりの熱量に換算すれば 2.5 W/m³ である。熱交換井群を配置する場合も、これと同等の採放熱量を守れば長期間の連続運転が継続できると考えられる。この考え方に沿って、これまでの実験結果を以下に考察する。

GCW は、熱交換井間距離が 1.8 m であるから、熱交換井 1 本あたりの土壌占有面積は約 2.5 m²/本である。この施設で、平均で約 1 kW (6.5 W/m³ に相当) の採熱を約 50 日間行なって 1.2 MWh を採熱した場合において、熱交換井群内部の土壌温度を非採熱部と比較したところ、約 6℃の低下が観測された。この温度差は 8 月まで解消されなかったため、持続可能な条件とはいえない。

GCE は熱交換井間距離が 3.5 m であるから、熱交換井 1 本あたりの土壌占有面積は 9.6 m²/本である。ここで 2.3 kW の採熱を行う場合は約 3 W/m³ の採熱負荷となり、ボアホール方式とほぼ同等である。この条件では、冬季に 2,500 時間 (3.5 ヶ月) 以上の連続採熱が可能であった。このとき、土壌温度計測点 EG1 で最大 3.8℃の採熱による土壌温度低下が観測されたが、採熱停止後約 60 日で回復したことから、この条件は持続可能な条件と考えられる。

以上の考察より、2.5 W/m³ 以下という設計基準が、

鋼管杭群を用いた浅部地中採熱システムにおいて妥当な値であると考えられる。ただし、長期間の採放熱の影響を調べたデータは、現状では前述の GCE におけるデータのみである。異なった気候・地質や異なった採放熱パターンではもっと限界値が低い可能性もある。今後、実証住宅における長期間の採放熱実験や、種々の実証施設での採放熱実験を行って、より信頼性の高い基準値を策定する必要がある。

7. まとめ

- 1) 本事業で開発した浅部地中熱利用システムのエネルギー消費効率は、厳冬期においても 3~5 であった。また、自然冷媒ヒートポンプ給湯機との比較では、寒冷地における地中熱ヒートポンプ給湯機の優位性を確認した。現行システムに用いている架橋ポリエチレンよりも熱伝導率の高い採熱管を開発すれば、さらなる効率向上が期待できる。
- 2) 定格冷暖房能力 5 kW 程度の小型地中熱ヒートポンプを、空気熱源ヒートポンプ用の汎用部品を流用して試作し、給湯性能評価によりその将来性を示した。今後量産を手がける福島県内の事業者が出ることに期待したい。
- 3) 福島県郡山市逢瀬町に設置した浅部地中熱実証住宅は、実用上十分な冷暖房・給湯能力を有することを確認した。ただし、採放熱に伴う土壌温度変化を今後長期間にわたって解析する必要がある。
- 4) 同市田村町の日本大学工学部の実験施設地中熱センター東 GCE (平均杭長 4.5 m×18 本、杭埋設間隔 3.5 m、占有面積約 120 m²) は、その合計長さと同じボアホール型熱交換井に匹敵する採熱能力を有することを明らかにした。また、これと同程度の面積の戸建て住宅の冷暖房熱量に相当する採放熱を行っても、次のシーズンまでに土壌温度が回復するような運用が可能であることを示した。
- 5) 冬季の採熱と夏季の放熱が各季節を通して継続でき、かつ過度の土壌温度の低下や上昇を招かないための熱交換井の配置や適切な運用が必要である。そのために最も重要な採熱システムの設計基準は、「杭間距離を直径とする円の面積と合計熱交換井長さの積で採放熱出力を除いた値が 2.5 W/m³ 以下であること」である。代表例として、単位長さ当たり 50 W/m の採放熱を行いたい場合、上記を満足するための杭配置は次のように決定される：
(a) 平均杭間距離：5 m 以上
(b) 杭密度：20 m²/本以上

(c) 杭長さ：10 m 以上

しかし、住宅の鋼管杭基礎を熱交換井として利用する場合は、実際の杭長さは地質によって決定される。十分な杭長が取れない場合がある。その際は採放熱出力の上限を押さえるなど運用時の対応が必要である。なお、前述の 4) のように運用時の採放熱出力が小さい場合は、上記よりも不利な杭配置でも持続可能な採熱が可能である。

上記以外で設計時に考慮すべき項目として、(有)住環境設計室の別報の知見も考慮し以下が挙げられる：

(d) 表層を適度に断熱し土壌温度分布の最適化をはかること

(e) ブレードパイル等、低コストで埋設が可能な鋼管杭を熱交換井として用いる、特に、新築住宅の基礎として埋設する鋼管杭を用いる、さらに、免震特性を持たせた杭配置とするなど、家全体の費用対効果を改善する設計を行うこと

(f) 熱交換井内に水等の熱媒液を充填させ、採熱管外壁周辺に熱交換効率を低下させる空隙が生じないように配慮すること

今後は、本事業で確認した設備とは異なる気候・地質・熱需要における実証実験データを蓄積し、上記の設計基準の裏付けデータを蓄積すると共に、精度・内容の充実を図る必要がある。

- 6) 福島県郡山地域における戸建て住宅の杭基礎の平均的長さは 8～10 m であり、GCE の約 2 倍の採放熱能力が見込まれる。また、家の基礎下など、適度に断熱された場所に熱交換井群を埋設することにより採熱能力の向上が期待できる。よって、家の基礎下を活用し、さらに必要に応じて庭、駐車場等に浅部地中熱交換井群を設置すれば、給湯や融雪も含めた家の総熱需要を十分にまかなうことが可能と考えられる。ただし、同一採熱量でも、エネルギー消費効率は運転パターンにより大きく異なる場合がある。また、過度の採放熱は土壌温度の過度の変化を引き起こし、効率の低下や自然環境への悪影響を引き起こす可能性もある。よって、熱交換井やヒートポンプの特性を生かす最適設計および制御を行うことが重要である。家の構造や特性、並びに熱源機や運用システムを、施主のライフスタイルに応じ、総合的に設計又は選定し、提案できる事業者の育成が望まれる。

第 4 章

小型ヒートポンプ用浅部地中熱採熱システムの開発

有限会社 住環境設計室

浅部地中熱利用システムの開発

～ 小型ヒートポンプ用浅部地中熱採熱システムの開発 ～

Development of a Shallow Depth Ground Source Heat Pump System

Development of a Shallow Depth Ground Source Heat Extraction System for Compact Heat Pumps

(有)住環境設計室 影山 千秋

再生可能エネルギーの活用は世界共通の課題であり福島県でも重要な意義を持つ。その中で最も安定で身近にあり、個人でも利用できるのが地中熱だが、熱交換井の構築費が高額なため日本では普及していない。本研究では、熱交換井を掘削して造るのではなく、建物の基礎杭として施工した中空鋼管杭を利用することにより、設置費の大幅な低減を行う。但、基礎杭は 10 m 前後であり、温度の季節変動がある地中から採熱するため不明点が多い。この深さの地中熱を「浅部地中熱」と呼び、その利用の可能性と効率、活用手法について実験を通し検証した。

Key words: 浅部地中熱、鋼管杭、熱交換井、地中温度

1. はじめに

1. 1. 本事業の位置付けと目標

地中熱（ちちゅうねつ）とは、地表からの深さ約 100 m までの地中の熱であり、主に太陽エネルギーが起源である。地熱はしばしば地中熱と混同されるが、両者は異なったものである。本報では、地表から概ね深さ 30 m 程度までの地中熱を特に「浅部地中熱（せんぶちちゅうねつ）」と呼び、地熱はもとより従来の一般的な地中熱とも区別する。

本事業は、冷暖房・給湯システムをはじめとする様々な浅部地中熱利用技術を実用化して福島県の産業振興に資する目的で計画された。開始直前の 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災と、それに伴う福島第一原子力発電所の事故を経て、本事業は福島県復興計画の一部として、予定より約 9 ヶ月遅れた 2011 年 12 月末より実質的な活動が開始された。

本事業の目標は、初期投資の少ない浅部地中熱抽出システムと熱効率の高いヒートポンプシステムを組み合わせ、住宅の冷暖房・給湯等、地中熱を様々な用途に利用することが可能なシステムを開発することである。事業は福島県ハイテクプラザを通じて日本大学工学部と(有)住環境設計室に委託された。

1. 2. 浅部地中熱利用システムの概要

本事業で開発を目指す浅部地中熱利用システムは、(1) 浅部地中熱抽出システム及び(2) ヒートポンプシステムで構成される。本事業では、(1)の開発と改良を(有)住環境設計室が、(2)の開発と改良、並びに(1)と(2)で構成されるシステム全体の最適化を日本大学工学部が担当した。両組織は常にデータを共有し、密に連携して解析を行った。

(1)の熱抽出システムは、熱交換井と採熱管で構成される。熱交換井には、(有)住環境設計室が開発し、国土交通大臣認定を取得済みの「ブレードパイル」と称する回転埋設式鋼管杭等を用いる。採熱管（U チューブ）には主に架橋ポリエチレン製のパイプを用いる。

このシステムを温風冷暖房、床暖房、および給湯に用いた実験住宅の例を図 1 に示す。

1. 3. 実施項目

本報で述べる(有)住環境設計室担当の事業では、日本大学工学部と共同で取得したデータを解析することにより下記の 1)及び 2)を実施した。またそれらと平行して、平成 24～25 年度に 3)を実施した。

- 1) 浅部地中温度分布解析による実用化の可能性の検討
- 2) 浅部地中採放熱に伴う土壌温度への影響評価
- 3) 浅部地中熱実証実験住宅の設計及び設置

2. 実験施設

本事業で用いる実験施設は、福島県郡山市田村町の日本大学工学部キャンパス内に設置された地中熱センター東（以下 GCE）及び同西（以下 GCW）、並びに福島県郡山市逢瀬町の(有)住環境設計室敷地内に設置された福島県浅部地中熱実証住宅の 3 ヶ所である。日本大学工学部キャンパス内の実験施設の配置図を図 2 に示す。

2. 1. 地中熱センター東（GCE）

GCE は、福島県郡山市の日本大学工学部キャンパス内に 2011 年 11 月に同学部が独自に設置した実験施設である。熱交換井には、平均長さ 4.5 m、外径 191 mm のブレードパイルが 18 本用いられており、3.5 m 間隔で格子状に配置され埋設されている（占有面積約 120 m²）。それらの配置と熱交換井の構造を図 3 に示す。鋼管杭の中には熱媒液（#1～9 杭は水、#10～18 杭は 30%酢酸カリウム水溶液）が満たされている。熱交換井内部の水温分布とその変化を計測するため、杭内に挿入された採熱管には 1 m おきに温度センサー（T 型熱電対）を取り付けてある。熱交換井群内の土壌の温度分布を計測するため、図 3 に示す位置 2 カ所の地中に長さ 10 m の土壌温度計 EG1、EG2（詳細は後述）が

設置されている。これらのデータは、データロガー（グラフテック製 GL820）を用いて 1 分毎にサンプリングされる。

2. 2. 地中熱センター西 (GCW)

GCW は、本事業における種々の解析的な実験を行うため、2012 年に日本大学工学部キャンパス内に新たに設置された実験施設である。熱交換井には、長さ 4.5 m、外径 140 mm のブレードパイルが 13 本用いられている。熱交換井は、一般住宅の基礎杭間隔（約 2 m/本）よりもやや狭い 1.8 m 間隔で埋設されている。その配置を図 4 に示す。熱交換井の構造は GCE と類似である。鋼管杭の中には水が満たされている。

熱交換井内部の水温分布とその変化を計測するため、杭内に挿入された採熱管には 1 m おきに温度センサーを取り付けてある。これらの温度センサーは T 型熱電対を用いているが、通常は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度の誤差があるため、蓄熱材と冷温水を用いた校正装置を作製し、白金測温抵抗体（JIS Class A）を用いて校正したものを使用している。採熱管を流れる熱媒液の温度と流量を測定するための白金測温抵抗体と流量計も備える。熱交換井群内の土壌の温度分布を計測するため、図 4 中に示す位置 4 カ所に地中に長さ 10 m の土壌温度計 WG1～4（構造詳細は後述）が設置されている。これらのデータは、データロガー（グラフテック製 GL820 及び江藤電気製 CADAC3）を用いて 1 分毎にサンプリングされる。

2. 3. 浅部地中熱実証住宅

本事業の成果を反映させつつ、実際の家の冷暖房需要に近い条件で実証データを蓄積するため、図 5 に示す実証住宅を設計し、福島県郡山市逢瀬町多田野の（有）住環境設計室の敷地内に設置した（図 6）。木造平屋建て、延べ床面積は約 80 m^2 で、約 17 m^2 の洋室と約 30 m^2 の LDK を備える。

本実証住宅の浅部地中採熱システムは、鋼管杭型熱交換井、採熱管、ヒートポンプで構成され、室内の冷暖房・給湯機器並びに家入り口のポーチの融雪配管に給熱できるよう設計されている。本実証住宅の熱交換井には、前述の「ブレードパイル」が 10 本用いられている。鋼管杭の外径は 140 mm、長さは 10 m である。鋼管杭の中には水が満たされている。杭配置を図 7 に示す。採熱管（U チューブ）には、内径約 13 mm の架橋ポリエチレン製のパイプが使用されている。U チューブは、水が満たされた鋼管杭内に挿入されている。チューブ内には熱媒液として酢酸カリウム系水溶液が封入されている。ヒートポンプは、サンポット製 GSHP-1002UR 型である（定格暖房能力 10 kW）。本実証住宅の冷房は冷風で、暖房は温風と床暖房により

行う。その仕様を表 1 に示す。給湯システムは、200L の温水タンクを備え、暖房・融雪と併用して給熱できるだけではなく、夏季冷房時にも給熱できるよう設計されている。入り口ポーチは地中熱による融雪も可能である。

実証住宅の屋外には、太陽光発電・充電システムが設置されている。定格発電能力は 2 kW、蓄電容量は DC 24V、100 Ah である。実証住宅の照明には LED が用いられており、消費電力削減が図られている。熱交換井内部の水温分布とその変化を計測するため、杭内に挿入された採熱管には 1 m おきに白金測温抵抗体で校正済みの温度センサー（T 型熱電対）を取り付けてある。採熱管を流れる熱媒液の温度と流量を測定するための白金測温抵抗体と流量計も備える。また、地中熱冷暖房の効果を確認するため、床や壁などにも温度センサーが設置されている。

土壌温度分布を計測するため、図 7 に示す位置 10 カ所の基礎下には長さ 16 m の土壌温度計 G1～10（構造詳細は後述）を設置した。これらのデータは、データロガー（グラフテック製 GL820）を用いて 1 分毎に常時サンプリングされている。

2. 4. 土壌測温システム

地中熱利用に伴う地中の温度変化を計測するため、非採熱部及び採熱部数カ所に土壌温度計が設置されており、地中の土壌温度が日々 1 分毎に計測されている。土壌温度計の基本構造を図 8 に示す。

非採熱部の土壌温度計 GT1 及び GT2 は、福島県郡山市の日本大学工学部キャンパス内に設置されている。同キャンパスの地中熱センター東および西との相対的な位置関係を図 2 に示す。GT1 及び GT2 は、深さ 20 m までの土壌温度計測が可能である。GT1 周辺は日当たりが良く、採熱部からも十分離れている。GT1 の西 7 m に埋設された GT2 の表層には、直径 3 m、厚さ 200 mm の断熱材が設置されている。

採熱部の土壌温度計は、日本大学工学部キャンパス内の地中熱センター東(GCE)に 2 カ所、地中熱センター西(GCW)に 4 カ所、そして、浅部地中熱実証住宅に 10 カ所設置されている。図 3 に示す GCE の採熱部の土壌温度計 EG1、及び図 4 に示す EG2 及び GCW の土壌温度計測 WG1～WG 4 は、いずれも深さ 10 m までの土壌温度計測が可能である。図 7 に示す浅部地中熱実証住宅の土壌温度計 G1～G10 は、いずれも深さ 16 m までの土壌温度計測が可能である。

3. 新しい回転埋設鋼管杭と貫入実験結果

これまで浅部地中熱利用の為に施工した鋼管杭は、ブレードパイル又はこれに拡底板を装着した bD パイルであった。しかし、浅部地中熱利用システムの普及を図るためには、より高い支持力を持つ杭、より硬い地盤への貫入が可能な杭、より簡便に施工できる杭など、設置場所の地盤の特性やニーズにより適合した新しい鋼管杭の開発が望まれる。この課題に対し、次の 4 種の回転埋設鋼管杭（図 9(a)～(d)）を造り、施工実験を行った。今回の施工試験敷地は、ミニオートマチックラムサウンディング試験で換算 N 値 40 前後と、一般的な回転貫入杭施工が行なえない硬い地盤であり、ブレードパイルも貫入しない地盤である。

bD パイルの最大支持力は、地盤耐力ではなく杭材耐力、すなわち拡底板の許容曲げ応力度により決定する。図 9(a)に示す「高支持力型 bD パイル」は、杭軸部と拡底板の間にリブを入れて拡底板の最終耐力を向上させており、3～5 割大きな支持力を得ることができる。1 本当たりの製作コストは増加するが、杭先端地盤耐力が高い場合には杭本数を減らすことで杭工事の総額を低減出来る可能性が高く、浅部地中熱利用の可能な対象建築物が増加する。リブの影響による貫入性の悪化が懸念されたが、通常使用のトルク 1.7 t・m の油圧モーターで回転貫入が可能であった。

高い N 値の地層に、大口径の杭がオーガ掘削なしに施工可能であれば、中層の鉄筋コンクリート造の建物でも浅部地中熱利用が容易となる。図 9(b)は、「高硬度地盤への回転貫入を狙った大支持力杭」であり、下刃は S 字をした掘削圧密の働きを補助するもの、上刃は回転運動により下方への力を発生させるものである。ブレードパイルでは貫入しない今回の施工試験の地盤で施工出来た。その際に必要な鉛直力も小さかった。

図 9(c)は、支持力は期待しないが、高い N 値への貫入を狙った、より低価格の回転貫入杭である。図 9(b)の杭の拡底板とそれに付属する上刃・下刃が無いので安価に製造できるが、貫入性には懸念があった。貫入時には鉛直力を必要とし、図 9(b)よりは貫入性は劣るものの、比較的小さなトルクでの施工が可能であった。

図 9(d)は、小型施工機で施工可能な「細径回転貫入杭」である（管径約 60 mm）。bD パイルと相似形の細径回転貫入杭で、既設住宅等の狭い場所における、より簡便な熱交換井としての利用を考える。今回の施工試験敷地は N 値が高く貫入困難であったが、事前にオーガーで地盤を少し緩めた状態ならば貫入可能であった。別の敷地では 6 m までの施工が可能であった。さらに、低い N 値では手に持てる施工機で貫入できた。

4. 地中の温度分布と通年の変化

4. 1. 地中の温度分布と年間の変化

地中浅部の温度は地質、地下水流、気象条件などのさまざまな要因によって影響を受けるが、月間平均の土壌温度は主に外気温に連動して変動する。ただし、土壌温度が最高および最低を示す時期は、外気温が最高および最低となる時期とずれており、地表から深くなるほど時間差が大きくなる。地中温度の変動幅は、地表付近では大きく、深くなるほど小さくなる。地表から約 10 m 以深では年間を通じてほぼ一定値となり、これを不易層温度という。その値は年間の平均外気温 +1～3℃と言われており、福島県郡山市田村町の日本大学工学部キャンパスでは約 15℃である。一般的な地中熱利用システムでは、不易層から採熱するが、本事業の浅部地中熱利用システムでは、より表層に近く季節変動の大きな浅部地中より採熱するため、その温度変化の特徴を解析することは重要である。

4. 2. 浅部地中温度の特徴と利用可能性

日本大学工学部キャンパス内の非採熱部に設置された GT1 における土壌温度分布の経時変化を図 11(a)に示す。地表から深度約 5 m では、11 月に最高温度約 17℃となり、6 月に最低温度約 13℃となる。つまり、浅部地中の温度は、暖房期間の初期では不易層温度（15℃）よりも 2℃高く（暖房に有利）、冷房期間の初期では逆に 2℃低い（冷房に有利）。各期間の後半ではその傾向が逆転し不利になるが、その差は 2～3℃程度であり、十分に実用性があるといえる。ただし、地表から 2 m までの温度は外気温や日射の影響を強く受け、夏は大きく上昇し冬は低下する。このため、熱交換井の地表付近の部分は、採熱に寄与していないか、場合によっては損失になっている可能性がある。これを防止するためには、熱交換井群が埋設されている地面の表層を断熱したり、熱交換井内部の地表付近に断熱材を封入したりするなどの対策が必要と考えられる。

4. 3. 表層断熱の浅部地中温度分布への影響

日本大学工学部キャンパス内の非採熱部に設置された GT2 における土壌温度分布の経時変化を図 10 に示す。前述のように、GT2 表面には直径 3 m、厚さ 200 mm の断熱材が設置されている。図 10 と 11 を比較すると、地表から 2 m 程度までの深さの温度分布に大きな差が見られる。年間の最低および最高温度は、断熱の有無によりそれぞれ約 3℃の差がある。表層断熱なし（図 10）では、冬季の 12～4 月に土壌温度が 8℃以下となるが、表層を断熱した場合（図 11）はその約半分の期間（2～4 月）に過ぎず、暖房に適した温度分布となる期間が長い。また、表層を断熱しない場合、7 月上旬

には土壌温度が 22℃以上となるが、表層断熱した場合は 8 月以降であり、冷房に適した温度分布となる期間が長い。

4. 4. 実証住宅の浅部地中温度分布

本事業では、住宅の基礎杭を熱交換井として利用することを想定しており、実証住宅で上記の断熱効果が得られるかどうかを解析した。実証住宅南側外(G6)と中心部(G3)の土壌温度の経時変化を図 12 及び 13 に示す。不易層温度は、日本大学工学部キャンパス(GT1)より 1℃低い 14℃であったが、温度変化の傾向は GT1 及び GT2 と同様である。深度 0.5～10 m の平均温度を図 14 に示す。実証住宅の設置が完了した 5 月以降、8 月までに冷房運転により若干放熱したものの大きな差は見られない。しかし、その後住宅南側外(G6)と住宅中心部(G3)の差は拡大し、10 月 25 日より暖房実験による採熱を断続的に行っているにもかかわらず 2014 年 1 月 1 日時点で、G3 の平均温度は不易層温度よりも約 2℃高い。2013 年 7 月～2014 年 2 月の深さ方向の土壌温度分布を図 15 に示す。冬季暖房実験準備のための採熱開始直前の 10 月 25 日の土壌温度は、いずれの場所及び深度においても不易層温度(約 14℃)よりも高い。暖房運転中の 12 月 1 日で深度 2 m 以下、1 月 1 日でも 4 m 以下において、土壌温度はいずれも不易層温度を上回っている。住宅中心部では、1 月 1 日の深度 1 m においても不易層温度を上回っている。

よって、住宅基礎下の適切な位置の基礎杭を選んで採放熱を行うことにより、不易層において採放熱を行う在来工法よりも効率良く地中熱を利用できる可能性が高い。同様に、既設住宅用に駐車場や空き地に熱交換井を埋設する場合は、表層に断熱材を設置した方が良い場合があると考えられる。ただし、いずれの場合も、断熱面積が大き過ぎると太陽光からの入熱を遮断することになるのでかえって不利になると考えられ、「適切な断熱」を行う必要がある。

4. 5. 融雪実験

ポーチに 5～10 cm の積雪が生じた 2014 年 2 月 8 日 12:00 に融雪配管への温水循環を開始した。(同時に床暖・ファンコンベクター暖房、給湯も運転した。) 3 時間で融雪パイプ上面の雪は融け、5 時間でほぼ全面で融けた。その後、ポーチ上面を完全に除雪したまま温水を循環し続けたところ、周辺部の積雪が 10～15 cm となっても連続的に融け続け、着雪しなかった。効率的な融雪には、降雪より少し前に予熱することが望ましいが、10 cm 程度ならば厳冬期でも 3～5 時間で融かすことができることが確認された。

5. 浅部地中採熱による土壌温度変化

前章の図 10 が示す通り、晩秋から春先にかけて、地中浅部の土壌温度は徐々に低下する。例えば深さ 4 m の地点では、11 月は約 18℃だが 4 月下旬には約 6℃低下して約 12℃になる。このような地中から過度に採熱すると、土壌温度がさらに低下して効率が低下したり、さらには採熱を継続することができなくなる場合がある。冬季に暖房運転を行う際は、暖房期間の後半に地中温度が過度に低下しないように、システム設計や運用を工夫する必要がある。

さらに、年間平均の土壌温度が一定になるよう、採放熱のバランスをとらないと、採放熱の効率が年々悪化してしまうことに加えて、自然環境に影響を及ぼしかねない。よって、熱交換井群の給熱能力は、このような観点から定義されるべきであり、その能力が負荷体(=家)の熱需要を超えないように設計すべきである。年間を通じた継続可能性を考える場合、関東地方では、暖房負荷(=採熱)と冷房負荷(=放熱)がほぼ同じと言われており、年間を通じて採放熱バランスを保ちやすい。一方、東北地方では、冷房負荷よりも暖房負荷が大きいと、さらなる注意が必要である。持続可能な地中採熱システムを構築するために、冬季の採熱による土壌温度低下を、春～秋の太陽光からの入熱によって補うことのできるレベルに抑える必要がある。

本事業では、熱交換井の配置が異なる実験施設で異なる採熱負荷で実験を行い、土壌温度の変化を以下の通り解析した。

5. 1. 浅部地中熱センター西(GCW)における採放熱による土壌温度変化

GCW での採熱前後における、熱交換井群断面の土壌温度分布を図 16 に示す。図 16(a)の採熱開始前(2013 年 11 月 9 日)は、地表から 4 m 付近の温度が約 18℃と年間を通じて最も高い時期である。図 16(b)に示す 2013 年 12 月 29 日の温度分布は、約 50 日にわたって 3 kW の採熱を断続的に 416 時間行った後の採熱中のデータである。このときの期間平均の採熱負荷は約 1 kW、総採熱量は 1.2 MWh であった。

図 16(a)及び (b)を比較すると、熱交換井に挟まれた土壌の温度(WG2、WG3)は、50 日間で 7～10℃低下している。この間の季節変動による温度低下を図 10 の計測点から読み取って補正したところ、採熱による土壌温度低下は最大約 6℃であった。在来技術では、熱交換井群は 5 m 以上離して設置すべきという経験則があるが、GCW ではあえてそれよりも大幅に間隔を狭くしてある。以上の結果から、熱交換井を密に配置しすぎると、採熱が継続できなくなる場合があると考えられる。

5. 2. 浅部地中熱センター東(GCE)における採放熱による土壤温度変化

GCE の熱交換井の半数を用いて、2012 年 4 月 12 日から 30 日まで、採熱負荷約 3 kW で一日あたり 10 時間の採熱を断続的に 19 日間繰り返した。採熱部(EG1)の土壤温度は採熱により低下し、季節変動を補正した深さ 6 m 地点の土壤温度低下は、12 日目に最大値 0.6 °C を示した。その後温度差は縮小し、19 日目にはほぼ同一温度となった。実験期間の後半は外気温が高くなり、地表からの入熱が大きかったため、土壤温度低下が起こりにくかったと考えられる。

より長期間の採放熱による土壤温度変化を解析するため、2013 年 1~4 月に暖房運転による連続採熱実験と、2013 年 7~8 月に冷房運転による放熱実験を実施した。また、2013 年 12 月より 2014 年 4 月までの予定で、暖房運転による連続採熱実験を実施中である。それらの結果より、長期間にわたる土壤温度の変化を過年度で観測して採熱の影響を調査している。本稿執筆時点までの結果を、図 17 及び 18 に示す。冬季の暖房のための期間平均約 2 kW、合計 6.1 MWh の採熱により深度 3 及び 6 m の土壤温度はそれぞれ 3.8°C および 2.1 °C 低下したが、いずれも採熱停止後約 60 日間ではほぼ回復している。この採熱量は、GCE と同程度の面積を持つ福島県郡山地域の一般的戸建て住宅における冬季の総暖房熱量に匹敵する。また、夏季の冷房のための期間平均約 4 kW、合計 8.3 MWh の放熱により、深度 3 及び 6 m の土壤温度はそれぞれ 8.2°C および 3.1°C 上昇し、放熱停止後約 50 日間でそれぞれ 4.7°C および 2.5 °C 回復した。GCE と同程度の面積を持つ福島県郡山地域の一戸建て住宅における夏季の総冷房熱量は 1 MWh 程度と推定されるため、実用的な運用を行った場合は、放熱に伴う温度上昇は数分の一であり、暖房運転開始前までに土壤温度は回復すると考えられる。以上より、GCE の採放熱能力は、同程度の面積を持つ一般的戸建て住宅の冷暖房需要をまかなうために十分と考えられる。

GCE の平均杭長は 4.5 m であり、表層から 2 m 程度までの土壤温度変化が大きいことも考慮すると、採放熱に寄与する実効長はもっと短いと考えるべきである。一方、福島県郡山地域において杭基礎が必要な土壤に建てられる住宅の平均的杭長は約 8 m であり、GCE の約 2 倍の採放熱能力が見込まれる。よって、家の基礎下（および必要ならば庭や駐車場）の面積を活用して浅部地中熱交換井群を設置すれば、給湯や融雪も含めた家の総熱需要を十分にまかなうことが可能と考えられる。

ただし、土壤の熱物性は地質によって異なるため、異なる地質における実証データを蓄積してゆくことも重要である。本事業終了後も GCE における長期採放熱

の影響や実証住宅下の土壤温度の変化の解析を行ない、それらのデータにより、適切な設備容量を持つシステムの設計基準を確立する必要がある。

6. まとめ

- 1) 地表から不易層まで（約 10 m）の浅部地中の温度は季節変動があるが、その変動幅と深さ方向の温度分布は、実用的な熱利用が十分に可能な範囲である。さらに、採熱部表層を適切に断熱することにより、熱利用により適した温度分布とすることができる。一例として、福島県郡山市逢瀬町の浅部地中熱実証住宅基礎下の土壤温度は概ね不易層温度よりも高く、冬期の暖房に適した分布となっていた。ただし、太陽光からの入熱を過度に遮熱しないよう、断熱部の面積や熱交換井の配置を適正化する必要がある。
- 2) 福島県郡山市田村町の日本大学工学部キャンパスに設置された地中熱センター東（平均杭長 4.5 m × 18 本、杭埋設間隔 3.5 m、占有面積約 120 m²）は、同程度の戸建て住宅の冷暖房熱量に相当する採放熱を行っても、次のシーズンまでに土壤温度が回復し、年間平均土壤温度を変化させない運用が可能であることが示唆された。福島県郡山地域における戸建て住宅の杭基礎の平均的長は約 8 m であり、上記の約 2 倍の採放熱能力が見込まれる。よって、家の基礎下、庭、又は駐車場に浅部地中熱交換井群を設置すれば、給湯や融雪も含めた家の総熱需要を十分にまかなうことが可能と考えられる。
- 3) 杭間距離が狭すぎると採放熱に伴う土壤温度変化が大きくなり、継続的な運転ができなくなる場合がある。例えば、日本大学工学部地中熱センター西（杭間距離 1.8 m）は同東（同 3.5 m）よりも採熱に伴う土壤温度低下が大きかった。今後、熱交換井群の最適な配置や適切な運用のための基準を確立する必要がある。



(日本大学工学部ロハスの家1号)

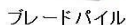


図2 日本大学工学部キャンパス内の実験施設の配置図



図3 地中熱センター東（GCE）の（a）熱交換井配置
及び（b）採熱管の構造



図4 地中熱センター西 (GCW) の (a) 外観
と (b) 熱交換井配置

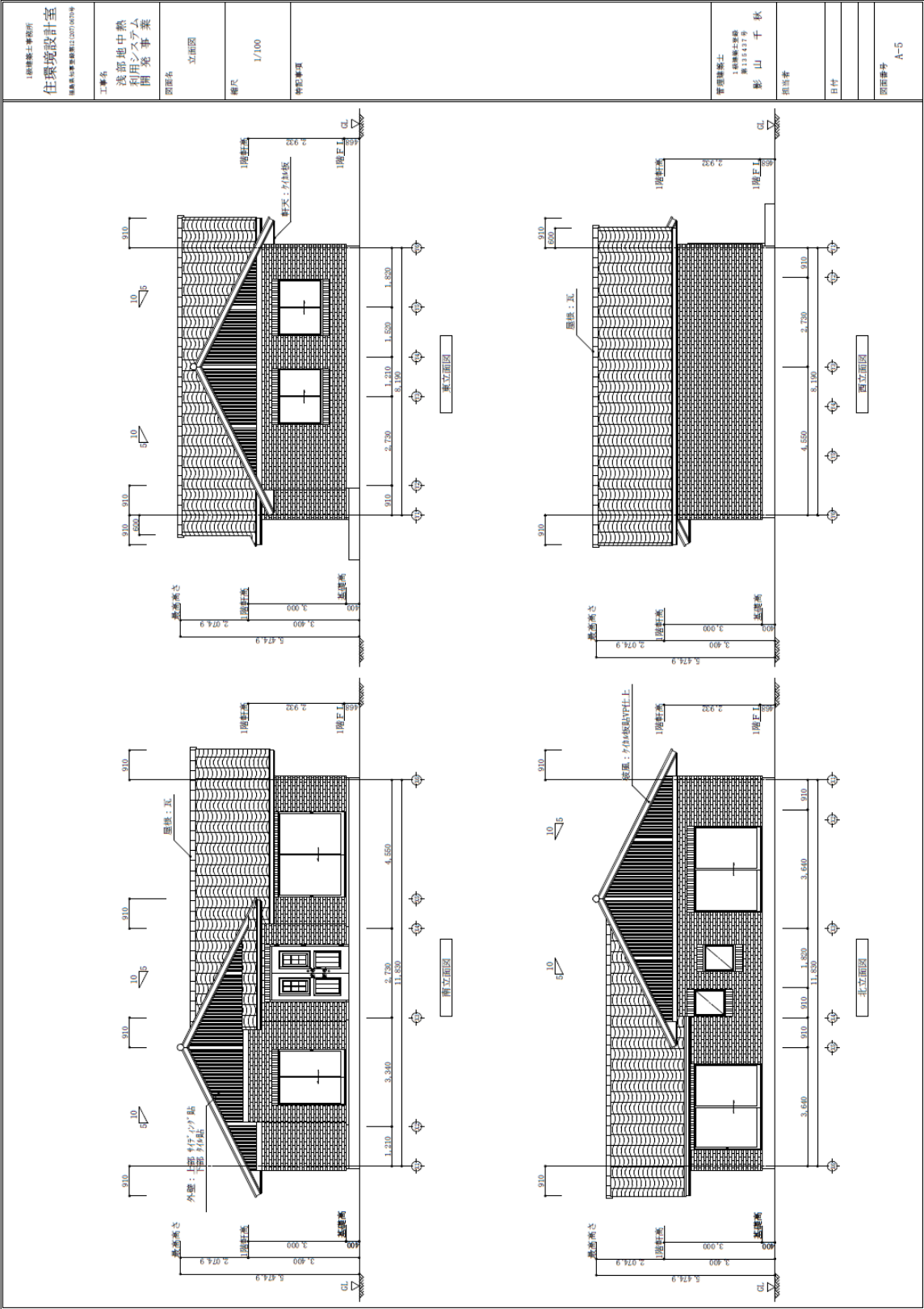




図6 福島県浅部地中熱実証住宅（福島県郡山市逢瀬町）

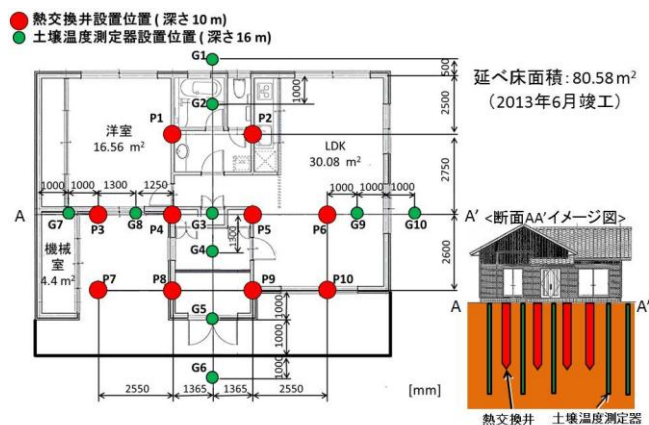


図7 福島県浅部地中熱実証住宅の間取りと熱交換井及び土壌温度測定器設置位置

表1 福島県浅部地中熱実証住宅の各仕様

	メーカー	型式	備考	設置場所
地中熱 ヒートポンプ	サンボット	GSHP-1002UR	定格 10 kW	機械室
ファンコイル ユニット	ダイキン工業	FWH4B	定格 3.61 kW	洋室
		FWH8B	定格 7.22 kW	LDK
床暖房	サンボット	ゴムチップパネル	厚さ12 mm	LDK南側 洗面脱衣所 廊下
	サンボット	ゴムチップパネル	厚さ22 mm	洋室
	積水化学	積水パイプ		LDK北側

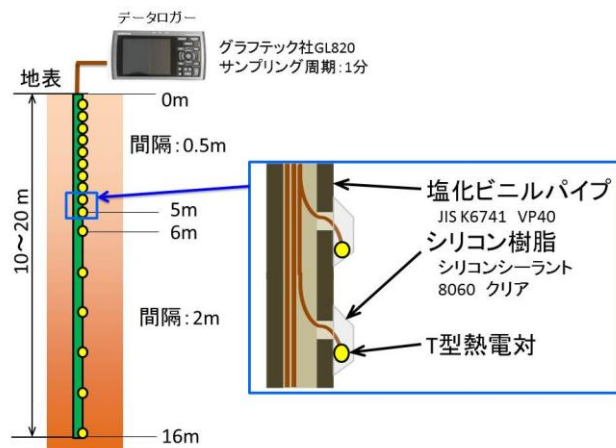


図8 土壌温度測定装置の構造

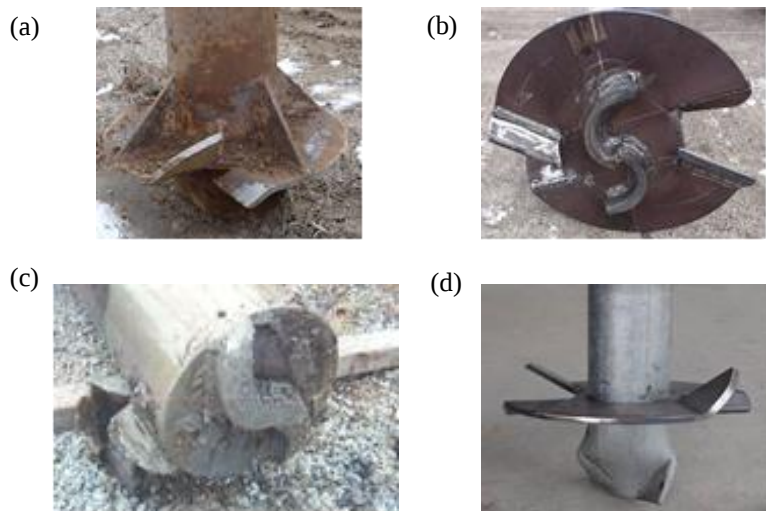


図9 4種の回転埋設鋼管杭 (a) 高支持力型bDパイプ (b) 高いN値への回転貫入が可能な大支持力の杭 (c) 支持力を期待しない、高いN値への貫入が出来るより低価格の回転貫入杭 (d) 小型施工機で施工可能な細径回転貫入杭

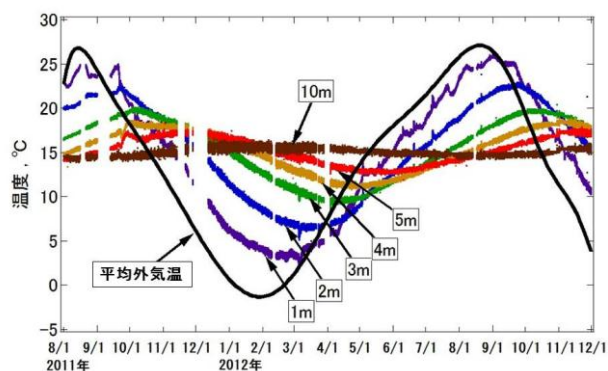


図10 福島県郡山市日本大学工学部キャンパス(GT1)における各深さの土壌温度の推移

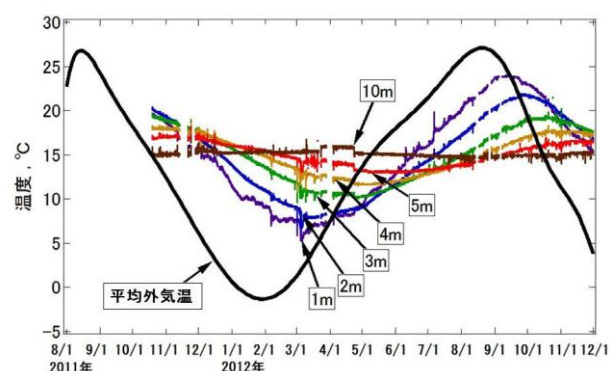


図11 福島県郡山市日本大学工学部キャンパス(GT2)における各深さの土壌温度の推移 (表層断熱部)

G6地点

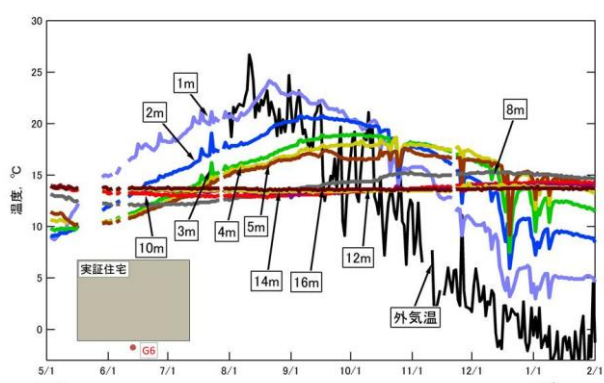


図12 浅部地中熱実証住宅南側外 (G6) における土壌温度変化

G3地点

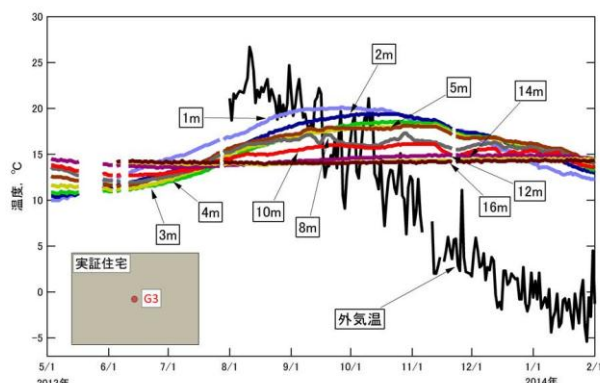


図13 浅部地中熱実証住宅南側外 (G3) における土壌温度変化

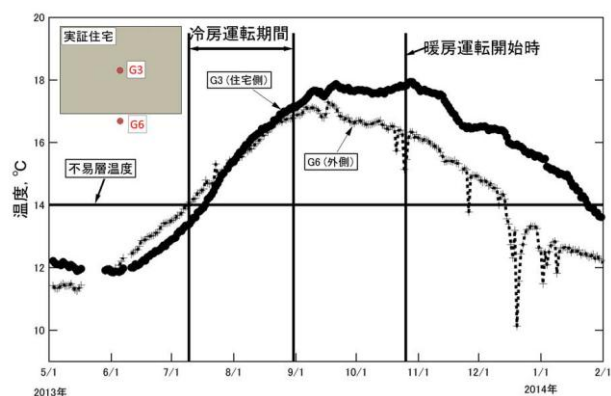


図14 福島県浅部地中熱実証住宅におけるG3、G6地点の深さ0.5m～10mの平均土壌温度変化

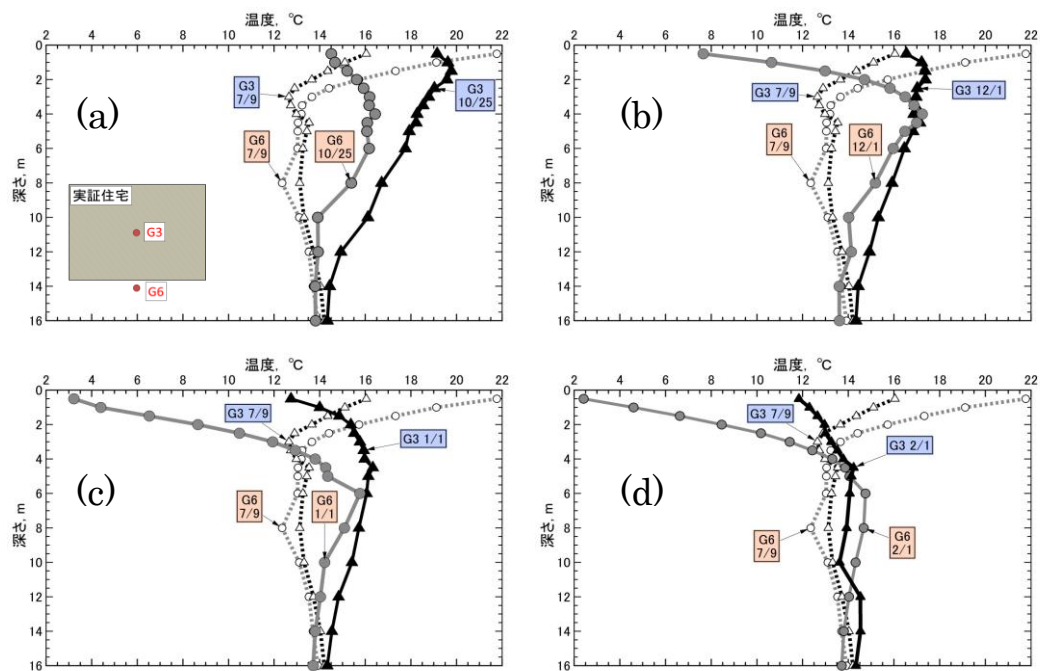


図 15 浅部地中熱実証住宅における土壌温度分布の推移 (2013 年 7 月～2014 年 2 月)

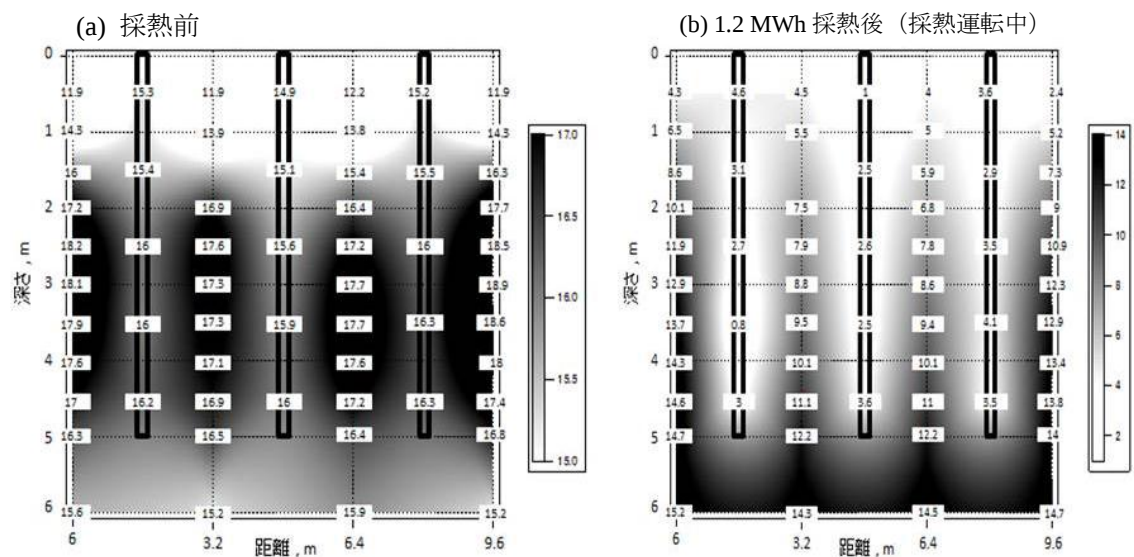


図 16 GCW における採熱前後の土壌温度分布の変化 (a) 採熱前 (b) 1.2 MWh 採熱後 (採熱運転中)

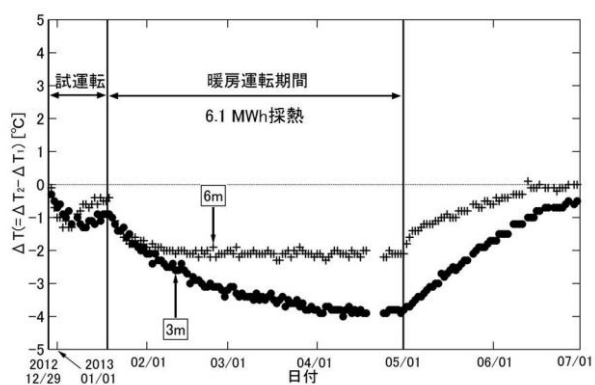


図 17 GCE の深さ 3m、6m の 6.1 MWh の採熱による土壌温度低下

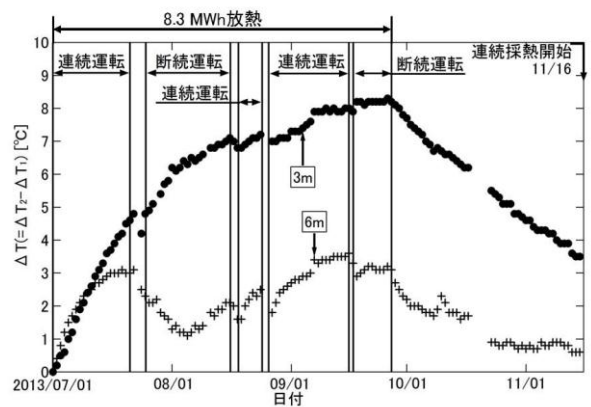


図 18 GCE の深さ 3m、6m の 8.3 MWh の放熱による土壌温度上昇

謝 辞

本研究開発事業の推進にあたり、ご指導、ご支援をいただきました大学、関係機関の方々
に対し、ここに改めて深く感謝申し上げます。

敬称略・順不同

所 属 ・ 役 職	氏 名
日本大学 工学部 機械工学科 教授	佐々木 直 栄
日本大学 工学部 機械工学科 教授（特任）	小 熊 正 人
福島大学 共生システム理工学類 教授	柴 崎 直 明
独立行政法人 産業技術総合研究所 福島可能エネルギー研究所 地中熱チーム長	内 田 洋 平

福島県ハイテクプラザ研究報告書

Technical Reports of Fukushima Technology Centre

再生可能エネルギー関連産業創出プロジェクト事業

浅部地中熱利用システムの開発

平成 26 年 3 月発行

発 行

福島県ハイテクプラザ

〒963-0215 福島県郡山市待池台 1 丁目 12 番地 郡山西部第 2 工業団地内

TEL 024-959-1737（直通） FAX 024-959-1761

編 集

福島県ハイテクプラザ

技術開発部 工業材料科