

01. 水・熱連成解析による地下水循環型地中熱採熱システムの性能評価

○富樫聡（八千代エンジニアリング）、宮下秀樹（守谷商会）、
中村三昭（守谷商会）、藤縄克之（信州大学）

1. はじめに

現在国内では、持続可能な社会システム実現に向けて、熱利用を含めた再生可能エネルギーをこれまでの政策よりも前倒して大量導入することが急務となっている。一方、再生可能エネルギーのひとつに位置づけられる地中熱の利用が大きな省エネ効果をもたらすことは広く知られるようになり、地中熱利用システムの導入件数は急激な増大傾向にあるものの¹⁾、初期導入コストが高い、導入コストを回収できる運用効率の不明瞭等が、いまだに大きな普及阻害要因となっている現状にある。

以上の背景を受けて、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、コストダウンを目的とした地中熱利用技術およびシステムの開発、ならびに各種再生可能エネルギー熱の利用について、蓄熱利用等を含むトータルシステムの高効率化・規格化、評価技術の高精度化等に取り組むことで再生可能エネルギー熱利用の普及拡大に貢献することを目的とした事業を2014年度から実施している²⁾。

本研究は、NEDO事業「再生可能エネルギー熱利用技術開発」において、特に地中熱利用トータルシステムの効率化技術開発及び規格化を重点項目とした『地下水循環型地中採熱システムの研究開発』（研究代表者：株式会社守谷商会）の一環として、開発システムの性能評価を目的とした不飽和領域における水・熱連成解析を実施し、システム機能の見える化を図ったものである。

2. 開発する地下水循環型地中熱採熱システム³⁾

従来のクローズド型水平式およびクローズド型垂直式の地中熱採熱システムよりも熱交換量が多く、かつ建設コストが廉価となる地下水循環型地中熱採熱システムを開発する。開発システムの模式図を図1に示す。本システムの基本構造は、地中浅層部に埋設した熱交換器（熱交換パイプ）に熱交換媒体を循環させることにより採熱するクローズド型水平式の地中熱採熱システムである。従来方式との特筆すべき違いは「①プレキャスト化した熱交換槽内に熱交換器を設置することで、場所を選ばずに安定した性能を発揮できる」、「②熱交換槽内上部に注水パイプを設け、槽内で人為的な流水環境を形成することで、移流による熱交換量増大が期待できる」、「③熱交換槽下部に遮水性シートを埋設し、槽内水分量を制御することで熱交換能力の最大化が図れる」等である。なお、熱交換器にはスリンキーコイルやシート状採熱管を用いており、図2のとおり4つの熱交換槽を建設した。このうち、数値解析の対象としたのはスリンキータイプの4段構造を採用した2槽である（図2の右側2つが該当）。

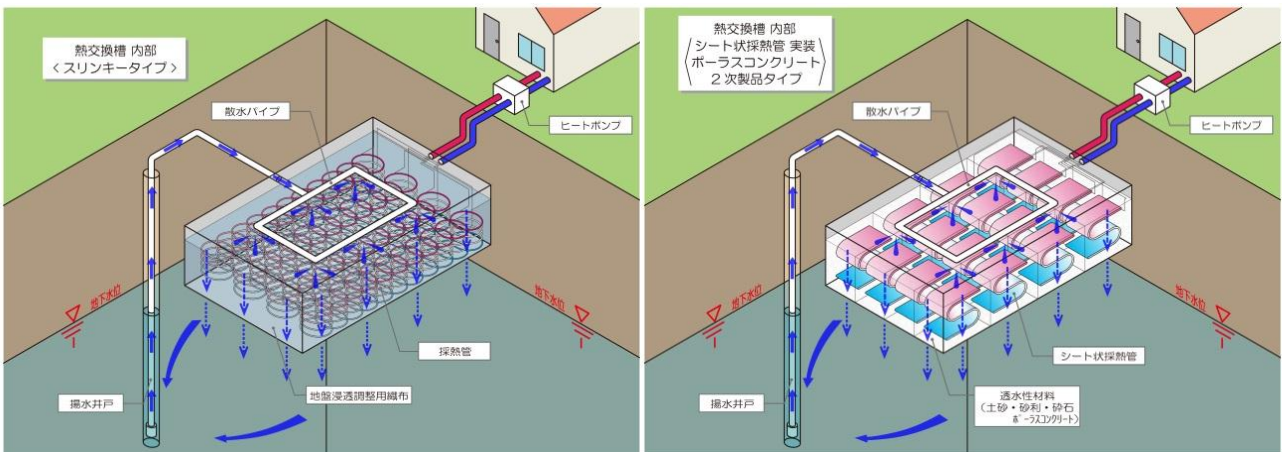


図1 地下水循環型地中熱採熱システムの概念図

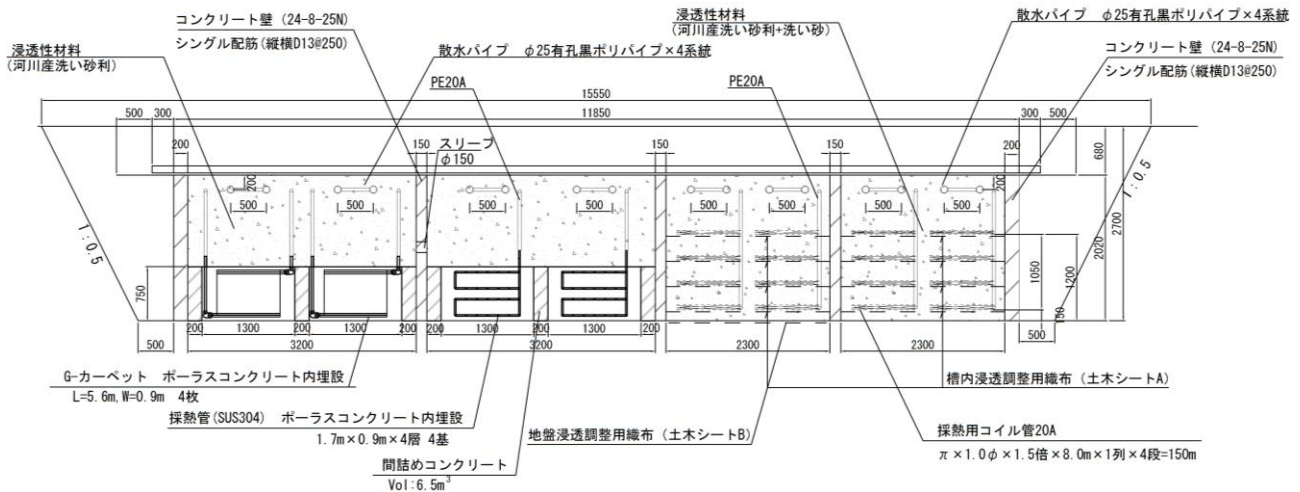


図2 実証試験に用いる地下水循環型地中熱採熱システムの鉛直断面図

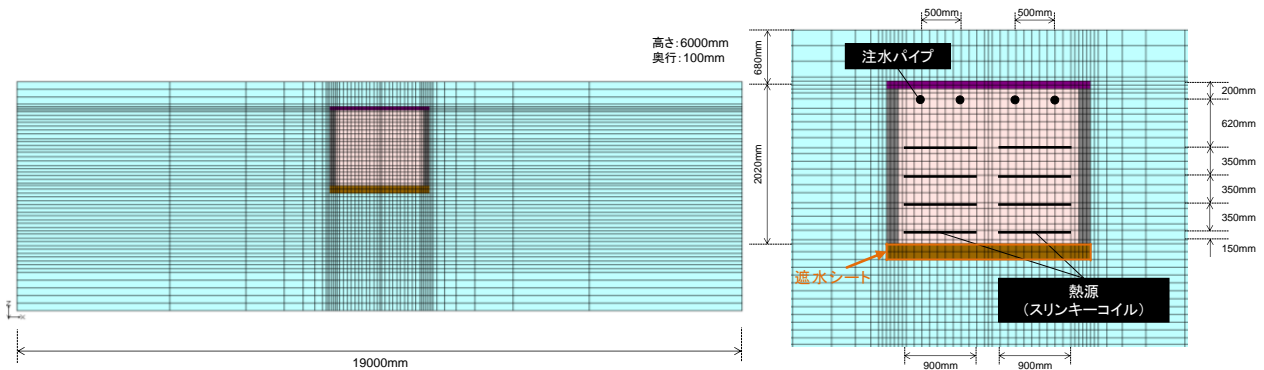


図3 数値解析に用いた有限要素メッシュ (左：全体図、右：拡大図)

3. 水・熱連成解析による性能評価

3. 1. 検討方針

開発システムが具備する機能の定性評価を目的として、水・熱連成解析を実施した。

数値解析にあたり開発システムの機能を考えると、熱交換槽内に設置した注水パイプからの注水により鉛直下向きの流れ場（不飽和浸透流）を人為的に形成するため、このときの地中の熱移動現象を表現する必要がある。したがって、流体の密度依存性を考慮した飽和・不飽和多孔体中の浸透流に関する基礎方程式と熱移動の基礎方程式にしたがう連成解析が不可欠となる。そこで本研究では、このような機能を有する水・熱連成解析コード sWATER (Subsurface Water And Thermal Energy Resources) ⁴⁾ を適用することとした。sWATER は詳細な多孔体中の熱移動理論に基づき、密度流を考慮した飽和・不飽和浸透流解析にはガラキーン型有限要素法を、熱の移流分散解析には特性曲線型有限要素法をそれぞれ用いている。これにより、数値分散や解の振動等による計算誤差を抑制でき、地中の熱移動を精度良く表現できることが大きな特徴であり、これまでも地中熱利用システムの設計に適用された実績がある ⁵⁾。

3. 2. モデルおよび解析ケース

図3に検討に用いた鉛直断面2次元の有限要素メッシュを示す。なお、本研究はシステムデザイン段階の検討であるため、実際のシステム運転条件は想定せず、採熱量把握のための加熱循環試験を対象として全7ケース（表1参照）で数値解析を実施した。各解析ケースは、【目的1】注水の有無による熱移動の比較（ケース1とケース3、またはケース2とケース4）、【目的2】熱媒循環方向の違いによる熱移動の比較（ケース1とケース2、ケース3とケース4）、【目的3】遮水シートによる遮水効果の検証その1（ケース3とケース5：熱交換槽内透水係数≠地層透水係数）、【目的4】土木シートによる遮水効果の検証その2（ケース6とケース7：熱交換槽内透水係数=地層透水係数）の4つの目的の下に設定した。

表 1 解析ケース

ケース名称	ユニット内充填材K (cm/sec)	地層K (cm/sec)	遮水シート (cm/sec)	注水	熱源温度条件	初期水分分布	熱媒循環方向
ケース1	1.0*10 ⁻³	1.0*10 ⁻²	なし	なし	仮定値*1	飽和	下段から上段
ケース2	1.0*10 ⁻³	1.0*10 ⁻²	なし	なし	仮定値*1	飽和	上段から下段
ケース3	1.0*10 ⁻³	1.0*10 ⁻²	なし	あり(14.0℃)	仮定値*2	不飽和	下段から上段
ケース4	1.0*10 ⁻³	1.0*10 ⁻²	なし	あり(14.0℃)	仮定値*2	不飽和	上段から下段
ケース5	1.0*10 ⁻³	1.0*10 ⁻²	1.0*10 ⁻⁴	あり(14.0℃)	仮定値*2	不飽和	下段から上段
ケース6	1.0*10 ⁻²	1.0*10 ⁻²	なし	あり(14.0℃)	仮定値*2	不飽和	下段から上段
ケース7	1.0*10 ⁻²	1.0*10 ⁻²	1.0*10 ⁻⁴	あり(14.0℃)	仮定値*2	不飽和	下段から上段

*1: 熱伝導卓越サイトの熱応答試験結果を参考に作成

*2: 移流サイトの熱応答試験結果を参考に作成

3. 3. 解析結果

数値解析の結果、図 4 左に示す熱伝導による熱交換のみのケース（ケース 1：従来方式の水平ループ）に比べて、図 4 中に示す注水パイプからの散水により強制対流を発生させるケース（ケース 3：開発システム）は、熱交換器周辺の温度上昇が抑制されるとともに、不飽和浸透流による移流効果で温水塊が熱交換槽の内から外へ移動する様子が確認できた。また、両ケースの計算で得られた熱交換槽内の温度は、連続運転時間の長期化に伴い大きな差異が生じることが明らかとなった。これら結果から開発システムは、従来方式に比べて、安定して高い採熱性能を発揮できる可能性が示された。

また、熱交換器中の熱媒体の循環方向の違いにより生じるシステム性能についても検証をおこなった。数値解析の結果、循環方向を下方から上方とするケース（図 4 中：ケース 3）に対して、上方から下方とするケース（図 4 右：ケース 4）の方が、熱交換器周辺の温度上昇をより抑制できている。これは、散水パイプから注水する水は低温の地下水（14.0℃）であり、散水パイプに近い箇所より高温の熱媒体が地層と熱交換するほど、注水による効果が発現しやすいためと考えられる。

一方、システム性能の向上を目指し、熱交換槽下部に遮水性の高いシートを敷設して槽内の水分量を調整することで熱交換量を増大させるケースについても、数値解析を実施した。結果として、地中の温度分布はシートがある場合とない場合で大差はなかった。しかしながら、図 5 に示すとおり数値解析で得られた土壌水分量の分布を見ると、シートありのケース 7 では槽内をより飽和状態（体積含水率 $\theta = 0.200$ のとき飽和度 $S = 1.0$ ）に近づける効果があることが示された。したがって、開発システムにおいて注水量を制御することで、熱交換効率向上に寄与する地水環境（流速、水分量）を人為的にコントロールできる可能性が明らかとなった。

なお、本検討で設定した熱源温度条件は、本実証試験用システムを導入したサイトと類似した水理地質構造を有する現場で実施した熱応答試験結果を参考に設定している。しかしながら実際には、開発システムのように水平型の熱交換器を多段構造で埋設する場合は、加熱循環試験の時間経過とともに各段の熱交換器が熱干渉するため、ボアホール式熱交換器における試験時の出入口温度と同様の温度推移をすることは考えにくい。したがって本検討については、今後の原位置試験結果を踏まえて、適切な条件設定の下で数値解析の再検証が望ましい。

4. おわりに

現在開発をすすめている地下水循環型地中熱採熱システムについて、水・熱連成解析コード sWATER を適用し、システム性能評価のための数値解析を実施した。数値解析の結果、従来方式に対して開発システムの優位性が確認できた。また、注水量や熱交換槽内の水分量を人為的に制御することで、熱交換量の最大化が期待できることが明らかとなった。次年度以降ではこれら数値解析結果も参考として、注水量や熱媒体の循環方向等の条件の違いによるシステム性能を、実証試験によって定量的に評価することとする。

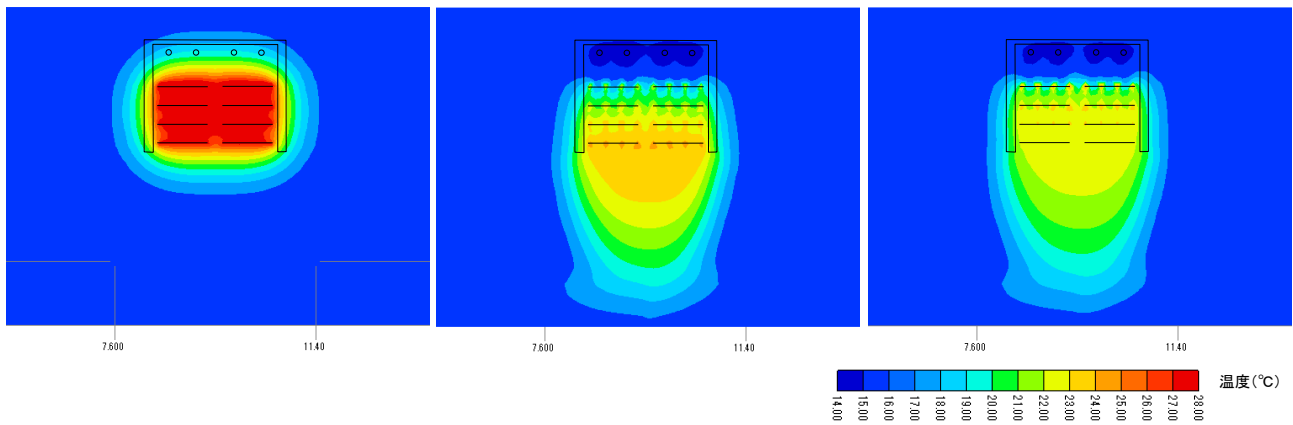


図4 数値解析結果：72時間後の地中温度分布
 (【左】ケース1, 【中】ケース3：循環方向下→上, 【右】ケース4：循環方向上→下)

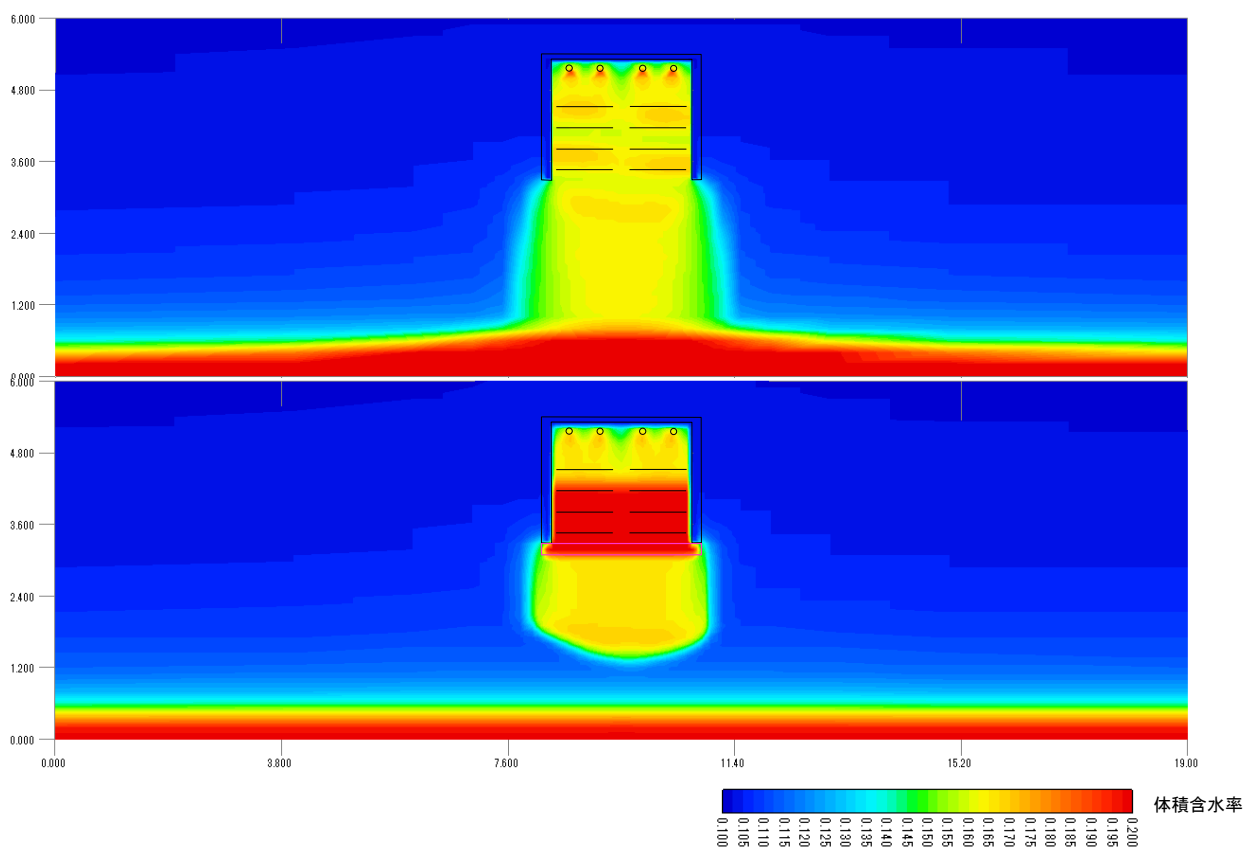


図5 数値解析結果：6時間後の土壌水分分布
 (【上】ケース6：遮水シート無, 【下】ケース7：遮水シート有)

5. 謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「再生可能エネルギー熱利用技術開発」事業によった。ここに記して、関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 環境省(2015)：web サイト <http://www.env.go.jp/press/100271.html> (2015.4.8 閲覧)
- 2) NEDO(2014)：web サイト http://www.nedo.go.jp/koubo/FF2_100099.html (2015.4.8 閲覧)
- 3) 守谷商会(2014)：特願 2014-026665 「地中熱採熱システム及び地中冷暖房又は給湯システム」により特許出願済
- 4) 藤縄・富樫(2011)：地下熱利用技術 9. 地下熱利用のための数値解析技術, 地下水学会誌, Vol.54, No.1, pp.39-52.
- 5) A. Tomigashi, K. Fujinawa (2014)：Improvement of Operational Scenario for an Enhanced Aquifer Thermal Energy Storage (E-ATES) System Based on Numerical Simulations, GRAND RENEWABLE ENERGY 2014,