

経済性に優れた地中採熱用熱交換器に関する研究

保科 秀夫, 岡 喜秋, 富田 和彦, 白土 博康

Study on Economical Ground Heat Exchanger for GSHP

Hideo HOSHINA, Yoshiaki OKA, Kazuhiko TOMITA, Hiroyasu SHIRATO

キーワード：地中熱交換器，ヒートポンプ，地中採熱，GSHP

1. はじめに

ヒートポンプとは、熱を温度の低い所から高い所に汲み上げ、その熱を利用するための装置である。熱源のエネルギーを利用することで使った電気エネルギーよりも多くの熱エネルギーを取り出すことができる。

一般に普及しているエアコンや地中熱利用ヒートポンプシステム（Ground Source Heat Pump System, 以降GSHP）はいずれもこのヒートポンプを利用し冷暖房を行っているが、エアコンは空気を熱源とし、GSHPは地中の熱を熱源とする点が大きな違いである。

つまりGSHPは、図1のように冬の暖房では外の空気より暖かい地中から、地中熱交換器を介して熱を汲み上げ、ヒートポンプで昇温して室内に放熱し、夏の冷房ではヒートポンプで室内から吸収した熱を外の空気より低い温度の地中に、地中熱交換器を介して放出するシステムである。

このシステムは、空気と違って年間を通してほとんど温度変化がない地中や地下水などを熱源としているため、特に空気熱を利用したヒートポンプシステムの効率が低下する積雪寒冷地などでの融雪や暖房への利用が期待されている。

しかし、施工費が高価であることからあまり普及が進んでおらず、施工費の中で大きな割合を占める地中熱交換器については規格がなく、各社各様で施工されているため相対的な実測データはほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、経済性の向上を目的とした新たな地中熱交換器（周囲の充填材を含む）を提案し、従来の地中熱交換器と合わせた6種類の地中熱交換器について、試験施工および同条件での採熱試験を行うことで、相対的な地中採熱量の実測データを蓄積するとともに、経済性の評価を行った。

事業名：一般試験研究

課題名：地中採熱用熱交換器に関する研究

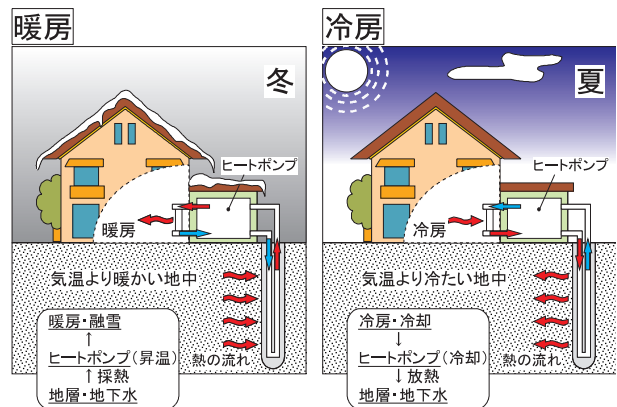


図1 地中熱利用ヒートポンプの概要

2. 採熱試験システムの概要

採熱試験に用いた地中熱交換器は、大別してU字管タイプと二重管タイプとした。地中熱交換器の概要を図2に、仕様を表1にまとめて示す。

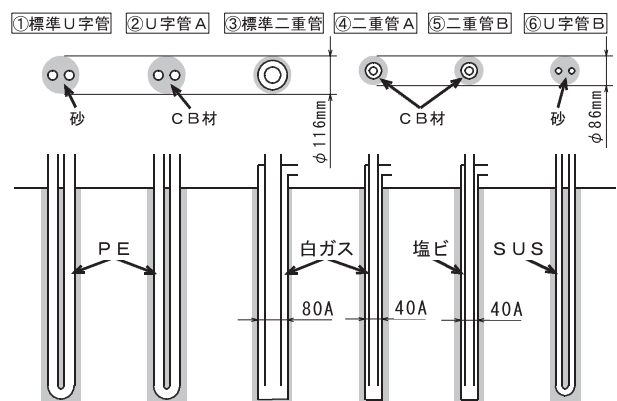


図2 地中熱交換器の概要

表 1 地中熱交換器の仕様

種類	外管			内管			充填材
	外径	材質	継手部	外径	材質	継手部	
① 標準U字管	20A	PE管	専用継手				砂
② U字管A	20A	PE管	専用継手				CB材
③ 標準二重管	80A	白ガス管	ねじソケット	40A			なし
④ 二重管A	40A	白ガス管	ソケット	20A	塩ビ管	ソケット	CB材
⑤ 二重管B	40A	塩ビ管	ソケット	20A	塩ビ管	ソケット	CB材
⑥ U字管B	20A	SUSフレキ管	専用継手				砂

U字管タイプは、従来の方式として専用の架橋ポリエチレン管（以後 PE管）を用いた①標準U字管、管は①標準U字管と同じで、充填材をボーリング時に排出されたベントナイトを含む泥水にセメントを約20wt%混ぜたもの（以後 CB材）にすることで廃泥水の処理費用の低減を図った②U字管A、管材にPE管より熱伝導率が大きく肉厚が薄いSUSフレキ管を用いて熱伝達の向上を図った⑥U字管Bの3種類とした。

二重管タイプは、従来の方式として管径が80Aの白ガス管を用いた③標準二重管、管の材質は③標準二重管と同じで、管径を半分にする事でボーリング費と資材費の低減を図った④二重管A、管径は④二重管Aと同じで、管材に塩ビ管を用いることでさらなる資材費の低減を図った⑤二重管Bの3種類とした。

ここで、①標準U字管、②U字管A、③標準二重管のボーリング径は一般的な116mm、④二重管A、⑤二重管B、⑥U字管Bのボーリング径は86mmとした。

これらの地中熱交換器を図3に示すように、各地中熱交換器の距離を約2~2.5mとし、約10mの深さで試験施工し、低温水循環装置へ並列に接続した。

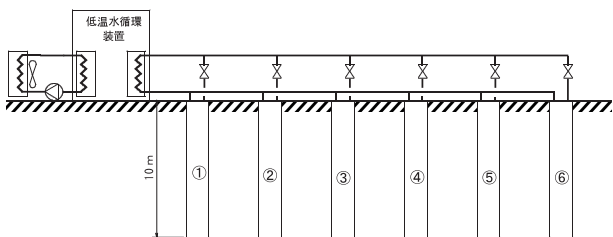


図 3 採熱試験システムのイメージ

3. 採熱試験システムの施工

3.1 ヒートポンプの製作

低温水循環装置の低温熱源として、消費電力が1.5kWのヒートポンプを製作した。製作図を図4に、外観を図5に示す。また、ヒートポンプ単体で行った性能試験の結果を、表2に示す。

この結果から、ヒートポンプのエネルギー効率を表す成績係数（COP）は、ヒートポンプとしては一般的な3.5~3.6であり、低温水循環装置としての使用に問題がないことを確認した。

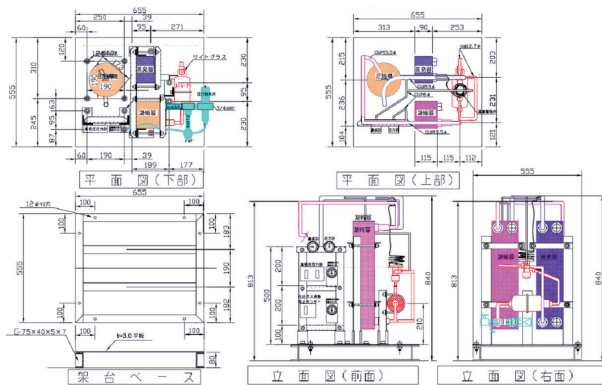


図 4 ヒートポンプの製作図

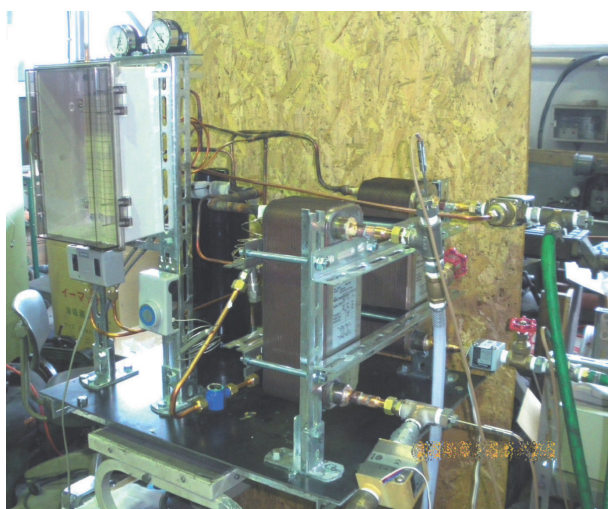


図 5 ヒートポンプの外観

表 2 ヒートポンプ性能試験の結果

	単位	試験15-50	試験15-45	試験15-40	試験15-40
1次入口温度	°C	15.1	15.3	15.2	15.1
1次出口温度	°C	6.7	6.6	6.6	6.4
2次入口温度	°C	12.2	12.5	11.0	11.7
2次出口温度	°C	50.2	45.5	40.2	40.7
1次流量	L/h	616.8	616.3	619.3	616.0
2次流量	L/h	195.9	209.4	227.6	231.8
消費電力	W	1790.0	1688.6	1581.4	1587.7
	kcal/h	2081.4	1963.5	1838.9	1846.2
放熱量	kcal/h	7453.4	6895.5	6652.5	6706.9
COP		3.58	3.51	3.62	3.63

3.2 ボーリングおよび地中熱交換器の施工

工業試験場の敷地内において、ボーリング工事から地中熱交換器の施工までを行った。ボーリングに使用した機械の外観を図6に、仕様を表3に示す。



図6 ボーリング装置の外観

表3 ボーリング装置の仕様

メーカー	鉱研工業株式会社					
型式	KT-100					
掘削能力	m	50~150				
スピンドル	内径	mm	46			
	回転数	rpm	Low	2nd	3rd	Top
	高速		132	215	308	505
	低速		25	42	60	98
	スラスト	kN	押し下げ 9 押し上げ 15			
	ストローク	mm	400			
巻上能力	kN	10				
送水ポンプ	吐出量	L/min	40			
	吐出圧	N/cm ²	150			
機体寸法(L×W×H)	mm	1,640×1,135×1,300				
質量(除原動機)	kg	340				
原動機	kW-P	モーター 3.7-4				
	PS	エンジン 5				

施工時の様子を図7～8に、完了時の様子を図9に、各地中熱交換器のヘッダー部分を図10～15に示す。



図8 施工の様子

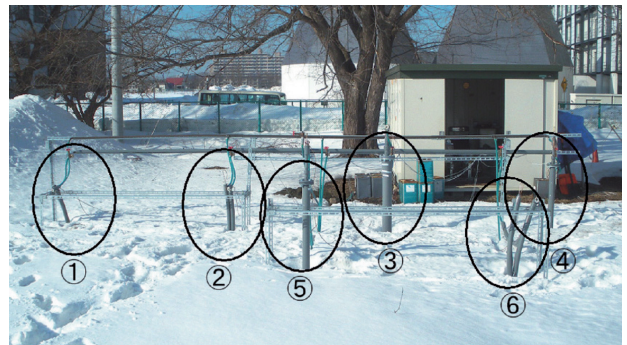


図9 地中熱交換器施工完了の様子

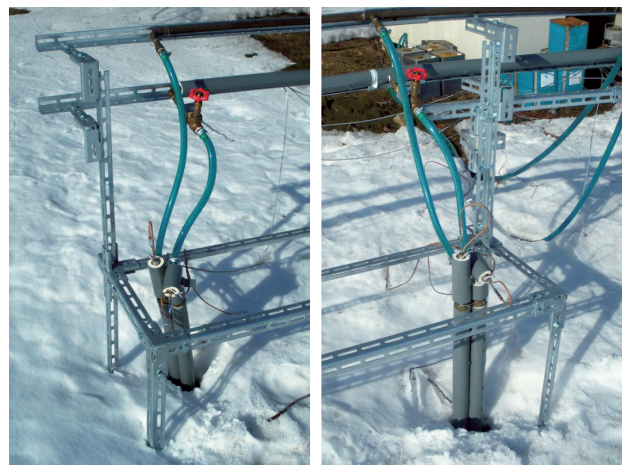


図10 ①標準U字管

図11 ②U字管A



図7 施工の様子



図12 ③標準二重管



図13 ④二重管 A



図14 ⑤二重管 B



図15 ⑥U字管 B

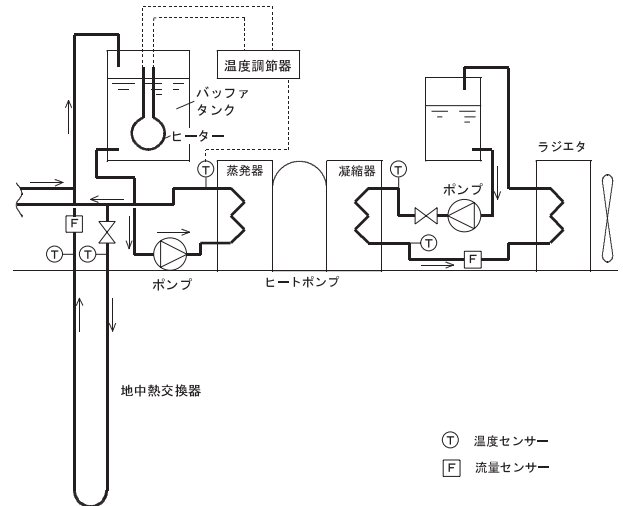


図16 採熱試験システムの配管フロー



図17 低温水循環装置

4. 採熱試験

4.1 試験方法

採熱試験は、実際の使用方法に合わせて、温度調節器と電気ヒーター（2 kW）でバッファタンク内温度を制御することで、不凍液の地中熱交換器入口温度を常時一定温度に保ち、各地中熱交換器に同じ流量（約2.2L/min）で循環し、約3日間連続で行った。

なお、ヒートポンプの運転により発生する熱は、ラジエータにより外気に放出することで連続運転を可能とした。

試験システムの配管フローを図16に、プレハブ内に設置した低温水循環装置を図17に、ラジエータを図18に示す。



図18 放熱用ラジエータ

4.2 試験結果

試験結果の一例として、4月5日から7日にかけて行った試験の結果を図19に示す。また、同様の試験を3回行い、そ

それぞれにおける地中熱交換器入口温度や各採熱量が安定した時点の平均値を表4にまとめて示す。

ここで、コストは配管資材費、施工費¹⁾、および廃土砂処理費（聞き取り）の合計、一定の採熱量を得るために掛かる総費用（以後 経済性）はコストを採熱量で除して求めた。なお、配管資材費については、本研究の試験施工で要した費用を基に算出した。

図19から、この試験で入口温度や各採熱量が安定したのは、4月6日の9:00頃からであることがわかった。

表4から、入口温度は-3.4~-3.6℃で、試験条件はほぼ均一であることがわかった。

試験結果をU字管タイプ①②⑥で比較すると、コストに大きな差はなく、管表面積当たりの採熱量はSUSのフレキ管を用いた⑥U字管Bが最も大きいですが、単位深さ当たりの採熱量では大差なく、経済性はこのタイプの中で①標準U字管が、若干優れていることがわかった。

二重管タイプ③④⑤で比較すると、コストは40Aの塩ビ管を用いた⑤二重管Bが最も安く、単位深さ当たりの採熱量は80Aの白ガス管を用いた③標準二重管が最も大きいですが、経済性は40Aの白ガス管を用いた④二重管Aが最も優れていることがわかった。

さらに、全6種類の地中熱交換器で比較すると、コストでは⑤二重管Bが安く、単位深さ当たりの採熱量については③標準二重管が高いが、最も経済性に優れていたのは④二重管Aであることがわかった。

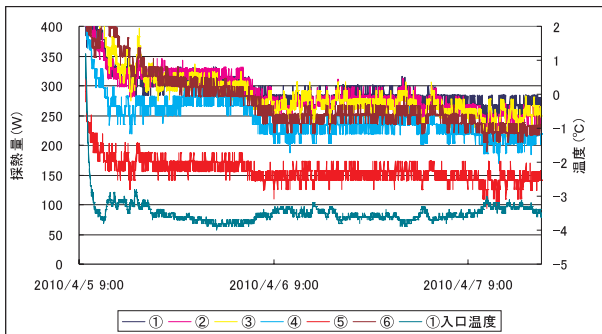


図19 採熱試験結果の一例

表4 採熱試験結果

項目	単位	① 標準 U字管	② U字管A	③ 標準 二重管	④ 二重管 A	⑤ 二重管 B	⑥ U字管B
入口温度	℃	-3.5	-3.6	-3.6	-3.5	-3.4	-3.6
管表面積	m ²	1.61	1.61	2.52	1.37	1.36	1.16
採熱量	W/m	26.7	26.2	27.2	23.3	15.0	25.0
	%	100	98	102	87	56	93
コスト	W/m ²	157.6	154.5	97.1	152.4	99.6	193.1
	円/m	18,443	18,443	22,718	15,672	12,788	18,335
配管資材	円/m	3,667	3,667	7,942	3,600	716	6,263
	円/m	14,100	14,100	14,100	11,700	11,700	11,700
	円/m	676	676	676	372	372	372
経済性	円/W	690	704	836	674	852	734

4.3 考察

管の熱伝導率以外はほぼ同じ条件である④二重管Aと⑤二重管Bにおいて、採熱量が大きく異なった原因を検証するため、簡単な試算を行った。

図20に示すように、外管の内径と外径を r_0 と r_1 、地中における採熱の影響が及ぶ範囲（以降 採熱範囲）を r_2 、管の内面積と対数平均面積を A_0 と A_{av1} 、採熱範囲の対数平均面積を A_{av2} とした時の伝熱量 q は、定常熱伝導の式を用いると次の通りとなる。

$$q = \frac{t_o - t_i}{\frac{1}{\alpha_0 A_0} + \frac{r_1 - r_0}{\lambda_1 A_{av1}} + \frac{r_2 - r_1}{\lambda_2 A_{av2}}} \quad (1)$$

ここで、 t_o ：採熱範囲外の地中温度 ℃、 t_i ：循環水温度 ℃、 α_0 ：管内の熱伝達率 W/(m²K)、 λ_1 ：管の熱伝導率 W/(mK)、 λ_2 ：採熱範囲の地中熱伝導率 W/(mK) とするが、④二重管Aと⑤二重管Bでは、 λ_1 以外は全てが同一と見なし、次のようにおく。

$$D = \frac{1}{\alpha_0 A_0} + \frac{r_2 - r_1}{\lambda_2 A_{av2}} \quad (2)$$

式(1)に式(2)を代入すると次のようになる。

$$q = \frac{t_o - t_i}{D + \frac{r_1 - r_0}{\lambda_1 A_{av1}}} \quad (3)$$

式(3)に、表5に示す条件を代入し、Dを算出した。

ここで、採熱範囲外温度 (t_o) は、④二重管Aから約2mの距離にある深度約8mの地中熱交換器の抗底温度（実測値）とした。

次に、算出したDと、表5に示す⑤二重管Bの条件を式(3)に代入し、単位深さ当たりの伝熱量 q を求めると、 $q = 17.6 \text{ W/m}$ となった。

つまり、④二重管Aと⑤二重管Bは、管の熱伝導率以外は全て条件が同じと仮定し、④二重管Aの採熱量 (23.3W/m) を基に算出した⑤二重管Bの採熱量は、採熱試験における実測値 (15.0W/m) より約17%大きいことがわかった。

これは、地中の熱伝導率が異なることに起因していると思われる。

しかし、④二重管Aと⑤二重管Bの距離（約2m）で地層や水位などが大きく異なることは考えにくいことから、充填材の充填状態など地中熱交換器の施工状態の違いが、採熱量に影響している可能性が考えられる。

ただし、施工から時間が経つことにより、地中熱交換器周囲の土が締まることで、地中熱交換器と土との隙間が埋まるなど、地中の状況が変化する可能性があることから、地中の状態が安定した頃に、改めて検証を行う必要があると思われる。

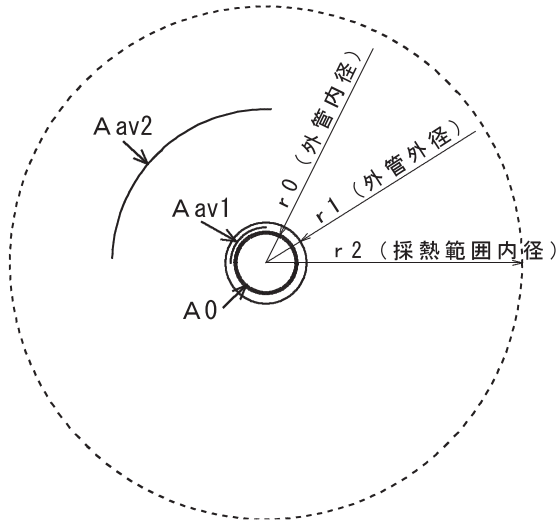


図20 地中熱交換器周辺の断面イメージ

表5 計算条件

項目		単位	④ 二重管 A	⑤ 二重管 B
採熱範囲外温度	t_o	°C	9.6	
循環水温度	t_i	°C	-3.5	
外管内径(半径)	r_o	mm	20	
		m	0.02	
外管外径(半径)	r_1	mm	24	
		m	0.024	
管平均面積	A_{av1}	m^2	0.138	
外管熱伝導率	λ_1	W/mK	36.00	0.16
採熱量(測定値)	q	W/m	23.3	15.0

5. まとめ

経済性の向上を目的とした新たな地中熱交換器を提案し、従来の方法と合わせた6種類の地中熱交換器について、採熱試験を行った。

その結果、単位深さ当たりの採熱量は80Aの白ガス管を用いた③標準二重管が、管の表面積当たりの採熱量はSUSのフレキ管を用いた⑥U字管Bが、コストは40Aの塩ビ管を用いた⑤二重管Bが最も安い、経済性は40Aの白ガス管を用いた④二重管Aが最も優れていることがわかった。

また、管の熱伝導率以外は同じ条件である④二重管Aと⑤二重管Bにおいて、採熱量が大きく異なった原因を検証した。

その結果、管の熱伝導率以外は全て条件が同一と仮定し、④二重管Aの採熱量を基に算出した⑤二重管Bの採熱量は、採熱試験における実測値より約17%大きいことがわかった。これは、充填材の充填状態など地中熱交換器の施工状態の違いが、採熱量に影響しているものと思われる。

ただし、施工から時間が経つことにより、地中熱交換器周囲の土が締まることで、地中熱交換器と土との隙間が埋まる

など、地中の状況が変化する可能性があることから、地中の状態が安定した頃に、改めて検証を行う必要があると思われる。

謝辞

ボーリング工事、および地中熱交換器の施工に際し、(株)アレフの渡邊大介氏、(株)オリエントジオサービスの磯井氏より多大なるご指導・ご助言を賜りました。

記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 勘経済調査会編：地質調査，積算資料12月号，p.777，(2008)