

# 場所打ち杭を用いた地中熱空調システムの 普及・実用化に関する研究

## 第1報——実験による熱特性の把握とフィージブルスタディ

関根 賢太郎\*<sup>1</sup> 大岡 龍三\*<sup>2</sup>  
横井 睦己\*<sup>3</sup> 柴 芳郎\*<sup>4</sup>  
黄 錫鎬\*<sup>5</sup> 南 有鎮\*<sup>5</sup>

地中熱空調システムは、夏季冷房時に土壤をヒートポンプの放熱源、冬期暖房時には採熱源として利用することで、季節間を通じた排熱の有効利用を図り、省エネルギーや二酸化炭素排出削減に貢献する空調システムである。また建物からの空調排熱を大気に放熱しないため、都市部におけるヒートアイランド防止にも寄与するものと期待できる。しかし、地中熱交換器の設置コストが普及の阻害となっている。本研究は、地中熱利用空調システムの普及・実用化を目的とし、地中熱交換器施工コスト削減のために、場所打ち杭を熱交換器として併用したシステムの検討を行うものである。本報は、場所打ち杭と地中熱交換器を併用した場合の熱特性把握のために行った実大実験結果ならびに試験適用を行った施工実績をもとに、標準的な中規模ビルをモデルとしてフィージブルスタディを行った結果について報告する。

キーワード：地中熱・場所打ち杭・冷暖房システム・実験

### はじめに

土壤を熱源とする地中熱ヒートポンプを利用した空調システム(地中熱空調システム)は、土壤の莫大な蓄熱能力を考慮して、夏季冷房時に土壤をヒートポンプの放熱源(ヒートシンク)として利用し、冬期暖房時には土壤をヒートポンプの採熱源(ヒートソース)として利用することで、季節間を通じた排熱の有効利用を図り、省エネルギーや二酸化炭素排出削減に貢献する空調システムを実現しようとするものである。またこのシステムでは建物からの空調排熱を大気に放熱しないため、都市部における熱汚染(ヒートアイランド)防止にも寄与するものと期待できる。

本システムは、寒冷地である欧米では広く導入され、その研究例および適用物件は数多くある。我が国でも古くか

ら研究され<sup>1)</sup>、適用物件もわずかではあるが増えてきている。しかし、地中熱交換器を埋設するための地盤掘削費が、欧米が3,000~5,000円/mであるのに対し、日本では、複雑な地盤性状による掘削時間の増加や少ない物件数で掘削機械導入コストの回収を行う必要があるなどの理由により10,000~20,000円/mと非常に高価である<sup>2)</sup>。このことが地中熱空調システム導入のためのイニシャルコストの増大を招き、単純投資回収年数の面で従来の空調システムと比較すると不利となり、我が国の適用物件増加の障害となっている。事実、ポアホール地中熱交換器を用いた8000m<sup>2</sup>規模の事務所ビルにおける研究<sup>3)</sup>では、回収年数を36~58年と試算している。

そこで地盤掘削費の削減のため、建物の基礎杭を地中熱交換器として利用するシステムが提案され<sup>4),5)</sup>、モデル建物が各地で試験的に実用化されつつある<sup>6),7)</sup>。しかし、その熱的有効性に関しては未解明な部分が多く、設計手法や施工方法・投資対効果など手探りの状態で進められている。

\*<sup>1</sup> 大成建設(株)技術センター 正会員

\*<sup>2</sup> 東京大学生産技術研究所 正会員

\*<sup>3</sup> 大成建設(株)設計本部 正会員

\*<sup>4</sup> ゼネラルヒートポンプ工業(株)開発部 正会員

\*<sup>5</sup> 東京大学大学院 学生会員

また現在、導入・検討されている物件はそのほとんどが既製杭(PHC 杭や鋼管杭)を利用した中小規模建築であるが、近年都市部の建築物は、既製杭搬入時の交通事情や杭部分のコスト削減の観点から場所打ち杭が広く用いられている。

本研究は、地中熱空調システムの都市部での拡張・普及のため、都市部で利用が多い場所打ち杭と地中熱交換器を併用した地中熱空調システムの開発を行い、現在広く用いられている空気熱源ヒートポンプと比較し、省エネルギー率(電力量削減率)30%、単純投資回収年数10年以内をすることを目的とする。

本報は、場所打ち杭と地中熱交換器を併用した場合の熱特性把握のために行った実大実験結果ならびに試験適用を行った施工実績をもとに、標準的な中規模ビルをモデルとしてフィージブルスタディを行った結果について報告する。

## 1. 場所打ち杭を利用した地中熱交換杭

### 1.1 地中熱交換杭の概要

図-1 に場所打ち杭を利用した地中熱交換器の概要を示す。直径 800~4000mm の場所打ち杭の外周部に樹脂製の U 字管型熱交換チューブ(以下 U チューブと記す)を複数本設置する。U チューブは場所打ち杭の構造用鉄筋(鉄筋かご)に設置し、掘削穴に建て込みを行う。その後、コンクリートを打設して通常の基礎杭として利用する。U チューブを杭内部ではなく杭外周部に設置しているため、構造設計上の断面欠損はなく、杭径を大きくする必要もない。またコンクリート素材や強度など通常の杭と同じものを利用することによりイニシャルコストの増を回避している。また、杭外周部に設置することにより出来る限り U チューブ同士の熱干渉を抑え、採放熱量を最大化させることを意図している。U チューブの本数は、杭径と地中採放熱量との関係から最適な本数を選択する。U チューブは、樹脂製の配管を使用するため、半永久的に利用可能である。

### 1.2 地中熱交換杭の熱的課題

場所打ち杭は、既製杭に比べて孔径が大きいことから、熱交換効果の増大も期待される一方、杭の本数が減少するので効率的な熱交換方式の考案が重要である。また、1本の杭外周部に複数の U チューブを設置するため、隣接する U チューブとの間隔がボアホール方式と比較して小さいことから U チューブ同士の熱干渉も懸念される。

場所打ち杭は、建物形状および地盤状況により異なるが、通常 6~7m スパンごとに長さ 20~30m 程度の杭がフーチン下に 1 本ずつ配置される。一般的な事務所の空調面積(40m<sup>2</sup>)に対して、空調負荷は 3.2~4.0kW 程度である。そのため、1 フロアを空調するためには杭長あたり約 160~200W/m・本の採放熱量が必要である。

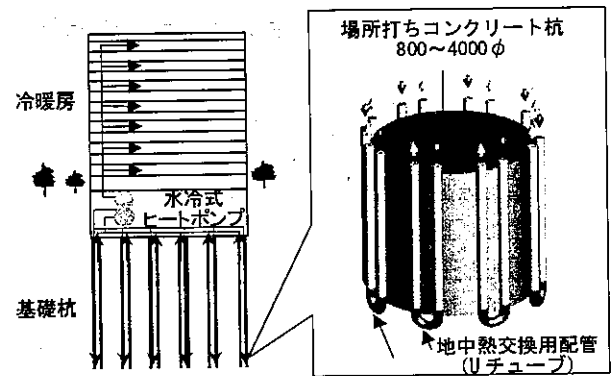


図-1 場所打ち杭を利用した地中熱交換器

## 2. 実験概要

### 2.1 実験目的

地中熱交換杭の熱的特性の把握を目的として、実大実験装置を製作し、夏期の冷房および冬期の暖房実験を行った。

### 2.2 実験施設

実験施設は、東京大学生産技術研究所の千葉実験所内に構築した。図-2~4 に装置平面図、システム概要、実験施設での土質柱状図を示す。

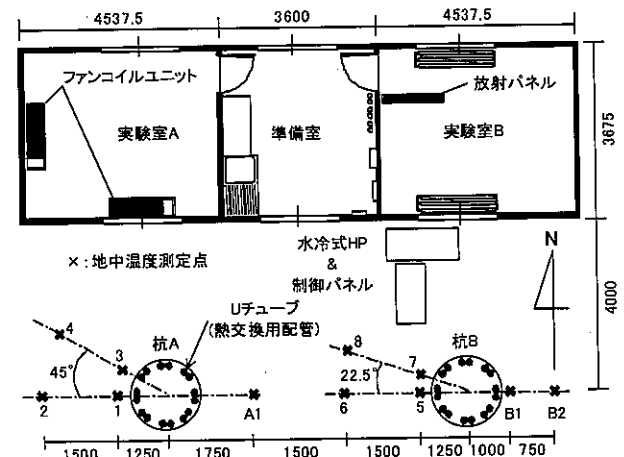


図-2 実験施設平面および地中温度測定点

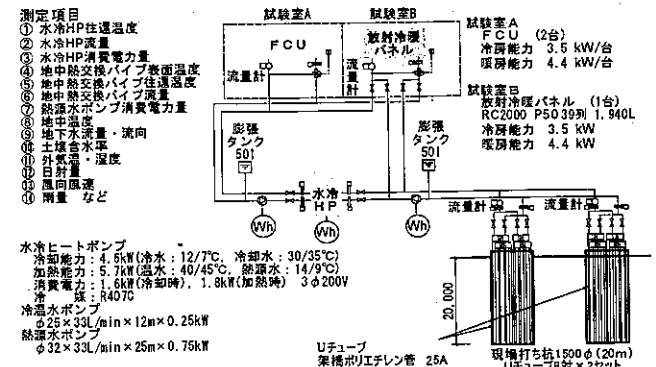


図-3 システム概要

深さ [m]	層厚 [m]	柱状	土質名	色調	記号
1	1.7	[Pattern]	ローム	茶褐色   淡赤褐色	灰白色の 3cm程度の 軽石片を 含む
2			粘土質 ローム		
3	3.2	[Pattern]	凝灰質粘土		
4			砂質粘土		
5	0.7	[Pattern]	粘土質細砂		
6	1.3	[Pattern]	砂質粘土		
7	0.8	[Pattern]	粘土質細砂		
8	12.67	[Pattern]	地下水位	淡茶褐色	石英粒子 に富む細 粒砂
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

図-4 土質柱状図

(1) 地中熱交換器

土壌との熱交換器となる基礎杭には、場所打ち杭(杭径1500mm, 長さ20m)を2本使用し、Uチューブを杭周囲に配置する手法を考案した。Uチューブは、設置による杭の断面欠損など構造的に問題のないように余掘り部分に設置している。今回の装置では、Uチューブ(外径34.0mm, 内径28.8mm)を1つの杭の周囲に8対設置しており、バルブの開閉により使用する本数を調整できるようにした。杭間隔は、一般的な建物の標準スパン間隔である6m(杭芯間)を想定して設置した。図-5にUチューブの設置状況を示す。



図-5 Uチューブ設置状況

(2) ヒートポンプと室内空調システム

熱源機器は冷却能力4.6kW, 加熱能力5.7kWの水冷ヒートポンプを設置した。実験室は、それぞれの室にファンコイルユニット(2台: 冷却3.5kW, 加熱4.4kW)と放射冷暖房パネルを設置した。

2.3 測定項目

測定は地中の温度分布および地中熱交換器のU字管表面温度をT型熱電対にて測定した。冷温水と熱源水の温度は

白金測温抵抗体により測定した。また、システムの電力使用量と外気温、相対湿度、風速と風向、日射、大気圧、雨量なども連続的に記録した。表-1に各種測定項目を示す。

表-1 測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	測定点
地中温度	T型熱電対	GL-0.1m, -1m, -5m, -10m, -19m
Uチューブ表面温度	T型熱電対	GL-0.1m, -1m, -5m, -10m, -19m
熱源水温度	Pt100	配管内
冷温水温度	Pt100	配管内
熱源水・冷温水流量	流量計	配管内
機器消費電力量	電力量計	動力盤
外気温・湿度, 風向・風速, 日射量, 雨量, 地下水位		

2.4 運転方法

実験は夏期、水冷式ヒートポンプの冷房運転を行い地中へ放熱し、冬期は暖房運転を行い地中から採熱を行った。中間期はヒートポンプの運転を行わず、地中温度の回復を試みた。運転期間および時間を表-2に示す。一日の運転スケジュールは、一般の事務所ビルを想定して月曜日から金曜日の9:00~17:00(8h)の運転とし、土・日曜は運転しないものとした。また、水冷式ヒートポンプを実験期間通じて最大能力で運転させるために、室内側で模擬負荷(ルームエアコン: 冷却2.5kW, 加熱2.8kW)の運転を行った。

夏期冷房運転期間は、2004年6月16日から9月30日まで、冬期暖房運転期間は、12月1日から2005年4月1日までとした。なお、暖房運転は12/1より9:00~17:00(8h)の運転で開始したが、模擬負荷を運転しても昼間に負荷不足となりヒートポンプが容量制御運転を行う回数が多く見られたため、12/16より夜間21:00~5:00(8h)の運転とした。さらに1/27より杭1本での運転に切り替え、杭1本当りの最大採熱量の把握を行った。さらに2/23からは、流量を2本運転時の1本当りの流量へ変更して実験を継続した。

表-2 運転期間および時間

モード	期間	時間	運転方法
冷房	6/16~8/20	9:00~17:00(8h)	模擬負荷あり
	8/21~9/30	9:00~17:00(8h)	模擬負荷なし
暖房	12/1~12/15	9:00~17:00(8h)	杭2本
	12/16~1/26	21:00~5:00(8h)	杭2本
	1/27~2/22	21:00~5:00(8h)	杭1本
	2/23~4/1	21:00~5:00(8h)	杭1本: 流量調整

\*暖房期間は、全期間模擬負荷あり

3. 実験結果

3.1 冷房実験結果

(1) 熱源水温度

図-6に冷房実験中の熱源水温度(土→HP)と外気温の関係を示す。

実験を開始した 6/16 9:00 の熱源水温度(土→HP)は約 19℃であった。開始後、熱源水温度(土→HP)は徐々に上昇し、8/13 16:00 に 29.2℃となり、開始時から約 10℃上昇した。8/21 に熱源水温度(土→HP)が水冷式ヒートポンプの冷却水温度設定(30℃)を超える可能性があったため、機器保護と COP 低下防止のため、模擬負荷の運転を OFF として実験を継続した。

水冷式ヒートポンプ運転中の外気温の平均は 28.8℃、最高は 37.2℃であった。一方、熱源水温度(土→HP)の平均は 26.0℃、最高は 29.2℃であり、平均で約 2.2℃、最高で 8.0℃外気より低い結果となった。

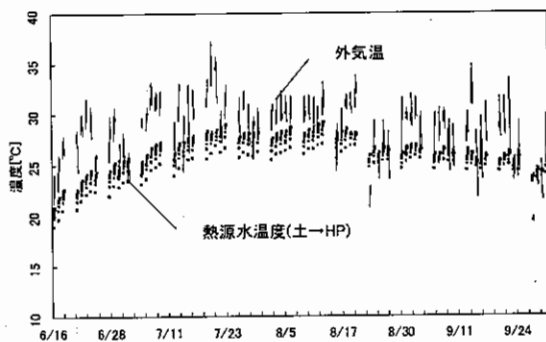


図-6 外気温と熱源水温度

(2) 地中温度

図-7 に B1 点(杭 B 中心から 1m[杭表面から 0.25m]: 図-2 参照), 図-8 に B2 点(杭 B 中心から 1.75m[杭表面から 1.0m] 地点での地中温度変動を示す。

杭に近い B1 点の冷房実験開始時の温度は、-5m が 19.8℃、-10m が 17.3℃、-19m が 17.7℃であった。各点とも運転に伴い温度が上昇し、冷房実験終了時(9/30)の温度は-5m が 24.4℃、-10m が 23.3℃、-19m が 19.2℃となり、それぞれ 4.6℃、6℃、1.5℃の上昇であった。

杭から遠い B2 点の冷房実験開始時の温度は、-5m、-10m、-19m とも 17.5℃であった。冷房実験終了時(9/30)の温度は -5m が 21.4℃、-10m が 21.7℃、-19m が 18.1℃となり、それぞれ 3.9℃、4.2℃、0.6℃の上昇であった。

両地点とも GL-0.1m、-1.0m は、外気温に依存し、他の深度では冷房運転による地中への放熱の影響が見られる。

また、-5m と-10m の温度変化は似ているが、-19m の温度変化はこれらに比べ若干小さい。これは、熱交換器長が地上から 20m しかないため-19m の地点においては、放熱の影響が小さくなっているためと考えられる。図-7において、-5m の初期温度が高いが、この原因については、初期時点における局所的な土壌条件のため(例えば雨水のパイプ流の通り道となっている等)と推測されるが、詳細については不明で今後の課題としたい。

(3) 地中放熱量

図-9, 10 にそれぞれの杭から地中への放熱量, 表-3 に運転期間ごとの平均を示す。

実験期間中の放熱量の最大値は、277W/m・杭(杭 B)であり、U チューブ 1 対当りにすると 34.6W/m・対であった。

冷房期間での平均放熱量は、模擬負荷運転期間(6/16~8/20)は、206 W/m・杭(杭 A), 221 W/m・杭(杭 B)であった。

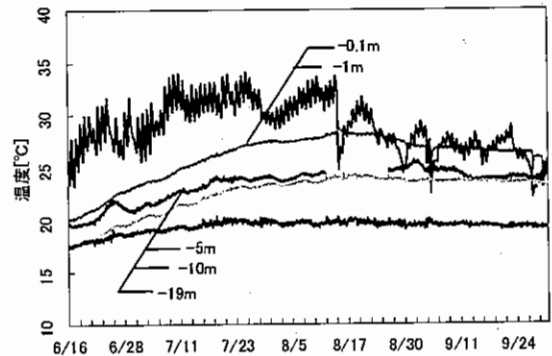


図-7 地中温度(B1: 杭 B 中心から 1m)

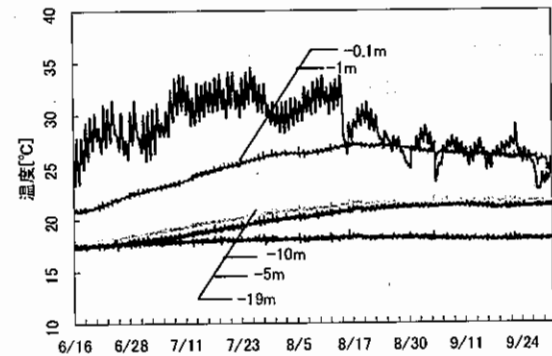


図-8 地中温度(B2: 杭 B 中心から 1.75m)

模擬負荷を停止した 8/21~9/30 は、空調負荷も減少し水冷式ヒートポンプも容量制御運転を行っているため、119 W/m・杭(杭 A), 136 W/m・杭(杭 B)と減少したが、冷房期間全体では、173 W/m・杭(杭 A), 189 W/m・杭(杭 B)となった。

本方式は、U チューブ間隔が狭く(直径 1500mm 周囲に 8 対設置で 589mm 間隔)、互いの熱干渉が懸念される。そこで U チューブ 1 本での期間平均放熱量を 40W/m・対<sup>8),9)</sup>と仮定し、以下に示す式により基準採放熱率を求めた。

$$W = Q_a \times M \times \alpha \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

W : 杭 1 本当りの期間平均放熱量[W/m]

Q<sub>a</sub> : U チューブ 1 本での期間平均放熱量[W/m]

M : 杭 1 本当りの U チューブ本数(対数)[本]

α : U チューブの基準採放熱率

期間通じての基準採放熱率は、0.54(杭 A), 0.59(杭 B)と

なった。今回の実験において、放熱量が平均的なUチューブの値に達しなかった原因としては、地盤条件や運転条件の差も考えられるが、Uチューブが近距離で隣接することによる熱干渉もその一因であると推測される。

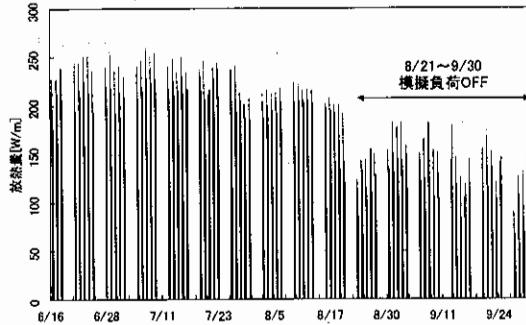


図-9 地中放熱量(杭 A)

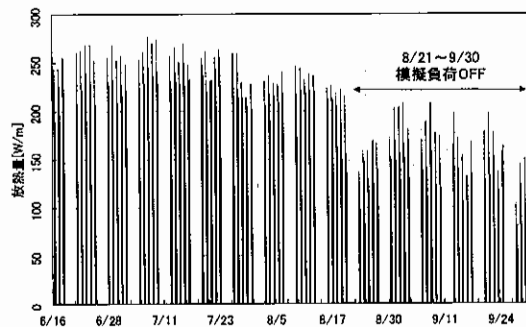


図-10 地中放熱量(杭 B)

表-3 期間平均(冷房)

期間	運転方法	杭	冷却				
			HP→土 ℃	土→HP ℃	Δt ℃	流量 L/min	放熱量 W/m
6/16~8/20	模擬負荷あり	A	28.3	26.1	2.2	27.4	206.0
		B	28.3	26.0	2.3	27.3	221.2
8/21~9/30	なし	A	26.8	25.6	1.2	27.5	119.5
		B	26.8	25.4	1.4	27.4	136.4
6/16~9/30	-	A	27.7	25.9	1.8	27.4	173.3
		B	27.8	25.8	2.0	27.3	189.1

(4) ヒートポンプ効率

図-11 に冷房期間での水冷式ヒートポンプ単体での成績係数(COP)および熱源水ポンプ動力を含んだシステム成績係数(S.COP), 表-4 に冷房期間での月別効率を示す。

冷房実験開始直後の熱源水温度が低い6月は、COP5.6と高い値を示すが、熱源水温度が高くなるにつれてCOPの値も徐々に低くなり、9月は3.6となった。しかし、冷房期間通じてのCOPは4.6と高く、空冷ヒートポンプのCOPと比較すると効率の高いシステムであることが確認できた。

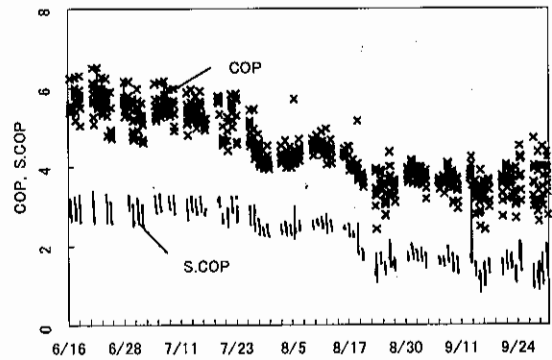


図-11 COP, S.COP

表-4 冷房期間ヒートポンプ効率

	6月	7月	8月	8月	9月	期間
模擬負荷	○	○	○	×	×	
生産熱量[kWh]	512	1,091	597	159	455	2,813
HP消費電力[kWh]	92	216	139	44	126	617
熱源水ポンプ消費電力[kWh]	82	175	108	152	162	580
COP	5.6	5.1	4.3	3.6	3.6	4.6
S.COP	2.9	2.8	2.4	1.7	1.6	2.4

3.2 暖房実験結果

(1) 熱源水温度

図-12 に暖房実験中の熱源水温度(土→HP)と外気温の関係を示す。

暖房を開始した12/1 9:00の熱源水温度(土→HP)は、約17℃であり、実験後徐々に下がりはじめ、杭1本の運転に切り替えた1/27には約6℃にまでなり、開始から約11℃の温度降下となった。水冷ヒートポンプ運転中の外気温平均は、6.0℃、最低は-3.9℃であった。熱源水温度は、平均10.1℃、最低6.2℃と平均で約4℃、最低で10℃外気よりも高い結果となった。

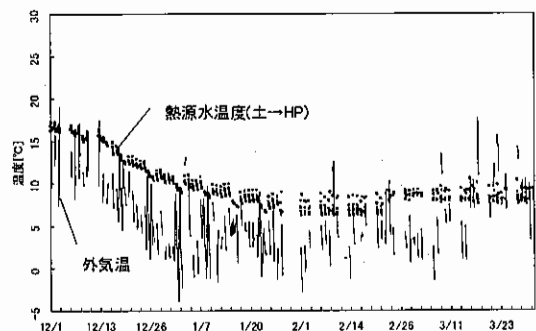


図-12 外気温と熱源水温度

(2) 地中温度

図-13 に B1 点(杭 B 中心から 1m[杭表面から 0.25m]: 図-2 参照), 図-14 に B2 点(杭 B 中心から 1.75m[杭表面から

1.0m]地点での地中温度変動を示す。

暖房開始時の地中温度は、両地点とも-10mで20℃、-19mは17.5℃とほぼ等しく、冷房終了時に杭からの距離による温度上昇の違いがあったものが、10~11月の2ヶ月で解消された結果となった。実験とともに-0.1mと-1mは外気温とともに降下し、-5m、-10m、-19mは採熱の影響で下降している。

暖房終了時のB1点の温度は、-5mで15.6℃、-19mで16℃、-10mで14℃となり、暖房開始時と比較すると6℃(-5m)、5.6℃(-10m)、1.6℃(-19m)下降した。B2点の温度は、-5mで16.4℃、-19mで16.8℃、-10mで15.4℃となり、3℃(-5m)、4.3℃(-10m)、0.5℃(-19m)下降した。

またB1地点の-5mの温度変化は、非常に激しい。この理由は夏期実験の場合と同じく、この点における局所的な土壌条件が影響していると考えられるが、詳細は不明で今後の課題としたい。

実験期間中の地中採放熱による各地点の地中温度変動幅は、冷房・暖房ともほぼ等しい結果となった。

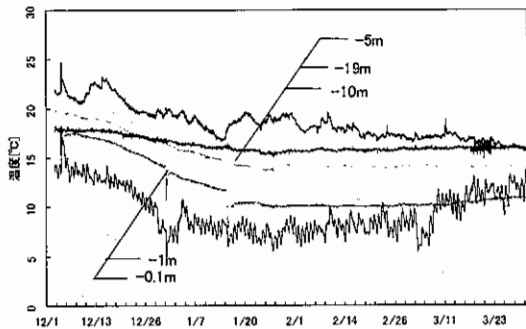


図-13 地中温度 (B1 : 杭 B 中心から 1m)

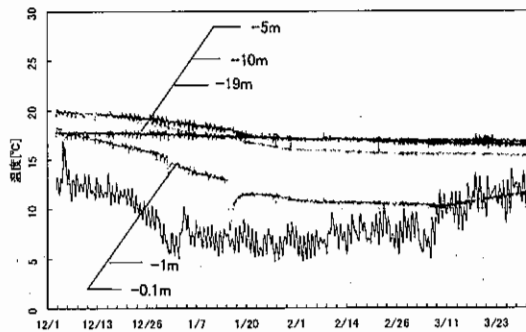


図-14 地中温度 (B2 : 杭 B 中心から 1.75m)

(3) 地中採熱量

図-15, 16にそれぞれの杭から地中への放熱量, 表-5に運転期間の平均を示す。

12/1より運転を開始したが空調負荷が少なく、水冷式ヒートポンプが容量制御運転となり杭採熱量が少ない結果となった。そこで、12/16より運転時刻を夜間に変更、1/27

からは杭 A からの採熱をやめ、杭 1 本のみの運転とした。さらに、2/23より杭 1 本当りの流量を減らし実験を継続した。実験期間中の最大放熱量は、261(杭 B)W/mであり、Uチューブ 1 対当りでは 32.6W/mであった。期間平均採熱量は、杭 1 本(流量:杭 2 本分の流量)運転期間(1/27~2/22)は、212W/mであった。さらに杭 1 本(流量:杭 2 本運転時の 1 本分の流量)に変更した期間(2/23~4/1)は 182W/mとなった。

冷房・暖房実験の結果、今回提案した地中熱交換杭(直径 1500mm, Uチューブ 8 対)の実験サイトにおける最大採放熱量は 260~280W/m(Uチューブ 1 対当たり 32~35W/m), 期間平均で約 180~200 W/mの能力があることを確認した。

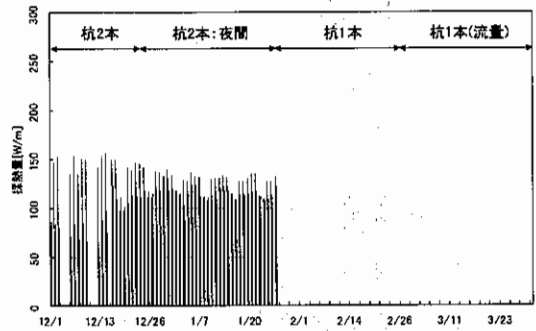


図-15 地中放熱量 (杭 A)

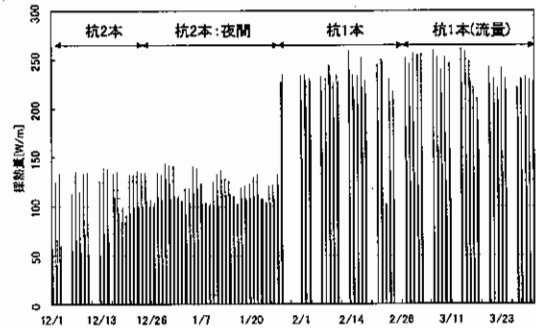


図-16 地中放熱量 (杭 B)

表-5 期間平均(暖房)

期間	運転方法	杭	加熱				流量 L/min	採熱量 W/m
			HP→土 ℃	土→HP ℃	Δt ℃			
12/1~12/15	杭 2 本(昼)	A	15.2	15.9	0.7	26.5	70.0	
		B	15.1	15.7	0.6	26.7	52.5	
12/16~1/26	杭 2 本(夜)	A	8.6	9.8	1.2	26.2	114.8	
		B	8.5	9.7	1.2	26.5	106.4	
1/27~2/22	杭 1 本	B	5.8	7.0	1.2	49.9	211.9	
2/23~4/1	杭 1 本(流量)	B	6.3	8.5	2.2	24.5	182.4	

※2/23~の流量は、1/27~の流量(49.9L/min)の 1/2 を目標に調整したが、バルブ調整の加減により結果的に 24.5L/min となった

(4) ヒートポンプ効率

図-17 に暖房期間での水冷式ヒートポンプ単体での成績係数(COP)および熱源水ポンプ動力を含んだシステム成績

係数(S.COP)の時系列変化、表-6 に暖房期間での運転ごとの効率を示す。暖房実験開始直後の12/1~15は、熱源水温度が高いが二次側負荷が少ないためCOPは低く、3.9となった。夜間運転として負荷を安定させた12/16以降、熱源水温度は徐々に低くなるが、二次側負荷が多いためCOPは4.3と高くなり、さらに杭1本運転にした1/27以降は5.1となった。暖房実験は様々なパターンで運転をしたため期間での平均値は参考値程度であるが4.5であった。

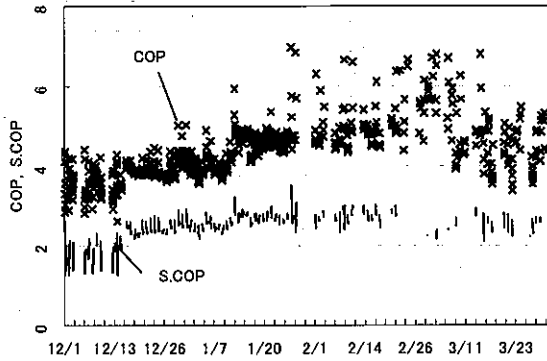


図-17 COP, S.COP

表-6 暖房期間ヒートポンプ効率

	12/1 ~15	12/16 ~1/26	1/27 ~2/22	2/23 ~4/1	期間
利用杭本数	2本	2本	1本	1本	
運転時間	昼	夜	夜	夜	
流量調整	、	、	、	○	
生産熱量[kWh]	386	2,242	597	691	3,916
HP消費電力[kWh]	99	522	117	142	880
熱源水ポンプ消費電力[kWh]	91	345	94	115	645
COP	3.9	4.3	5.1	4.9	4.5
S.COP	2.0	2.6	2.8	2.7	2.6

### 3.3 土壌温度変動

#### (1) 季節間蓄熱効果

図-18に実験期間中のB1, 2地点(図-2参照)の代表月の上下温度分布を示す。実験開始前の5月は-5m以下の温度は杭からの距離にかかわらず約17°Cであった。冷房による放熱で徐々に温度が上がり、冷房終了時の9月の3点(-5m, -10m, -19m)の平均温度は、B1で22.2°C, B2で20.4°Cとなり、冷房運転による地中への放熱で杭中央部(GL-10m)を中心に、杭芯から同心円状に1.75mの範囲までの地中が約3~6°C昇温された結果となった。

冷房運転終了後、徐々に地中温度が下がり、暖房運転開始時の3月の平均温度は、B1で19.6°C, B2で18.8°Cとなり、冷房開始時の地中温度より約2°C程度高く、杭中央部(GL-10m)を中心に、杭芯から同心円状に1.75mの範囲まで範囲での冷房放熱による季節間蓄熱効果を確認した。

暖房運転開始後、徐々に温度が下がり、暖房運転終了時の3月末にはB1で15.2°C, B2で16.2°Cとなり、暖房採熱の影響により、実験開始前(19°C)と比較し、3~4°C地中温度を下げた結果となった。

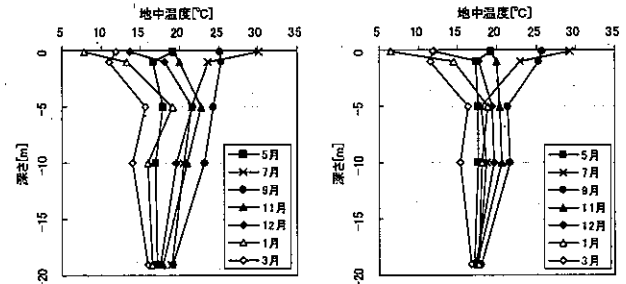


図-18 地中温度変動(左: B1 右: B2 位置は図-2参照)

#### (2) 杭間の熱干渉

杭を熱交換器として併用する場合、杭間隔は構造計画上決定されてしまう。そこで、今回設置した6m間隔の杭間で杭同士の熱干渉が生じるかの確認を行った。図-19に杭表面から2m離れた測定点2, 4, 6, 8(図-2参照)のGL-10mでの温度を示す。杭A, B間の測定点6, 8の温度は、測定点2, 4より約1°C高くなっており、杭間の熱干渉の影響が多少見られる結果となった。

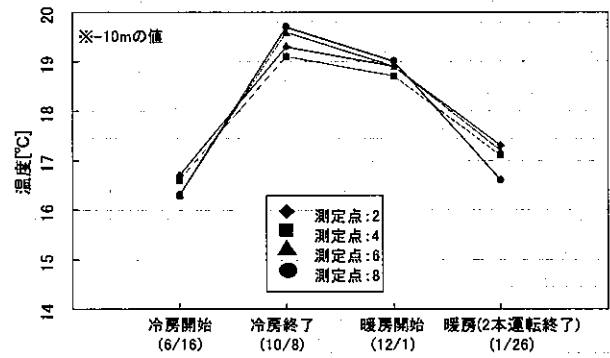


図-19 地中温度変動(杭間隔の影響)

### 4. イニシャルコスト

地中熱利用空調システムの普及・実用化のためには、地中熱交換器埋設コスト削減が大きな課題となる。提案している場所打ち杭を熱交換器として併用する本システムのイニシャルコスト把握のために、実物件で施工を行った際のコスト把握を行った。

システムの適用を行った物件は、千葉県に計画された某大学施設である。1階エントランス部分(約100m<sup>2</sup>)の空調(冷却: 2.5kW, 加熱: 2.8kW)に用いるために、場所打ち杭(直径: 1.5m, 杭長: 18m, 1本)に熱交換用配管(PE100 Uチ

ューブ20A)を外周に8対設置した熱交換杭の施工を行った。図-20に施工状況を示す。

地中熱交換杭施工時に時間・人工などの確認を行い、併せて行った同形状の通常杭との比較を行い、熱交換杭の工事費を算出した。表-7に施工時の時間・人工の比較を示す。熱交換杭は、配管を杭周囲に結束しながらの施工のため、通常杭よりも施工時間が1.5h増となった。さらに熱交換用配管の結束・支持のための人工が16人h増となった。表-8にこれらをもとに算出した熱交換杭工事費を示す。熱交換杭とすることにより通常杭と比較すると約1.5万円/mのイニシャルコスト増となる結果となった。

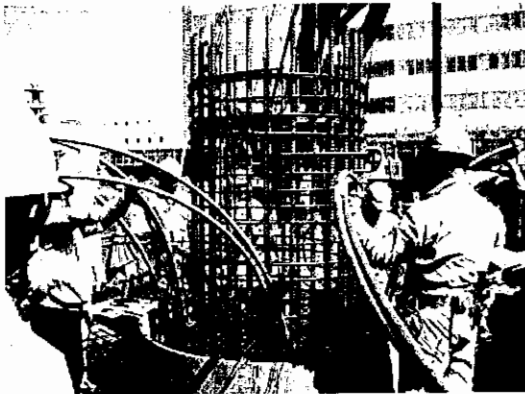


図-20 熱交換杭施工状況

表-7 熱交換杭施工による時間・人工の増分

	作業時間	配管施工	増分
熱交換杭	2.0 h	8人	16人h
通常杭	0.5 h	-	-
増分	1.5 h	-	-

表-8 熱交換杭工事費

	単価	数量	小計
配管費(8対)	600円/m・対	18m	86,400円
消耗品雑材	配管工費の10%		3,520円
杭部配管工費	2,200円/人h	16人h	35,200円
杭工事費(増分)	91,350円/h	1.5h	137,025円
熱交換杭工事費計			262,145円
1m当りの熱交換杭工事費			14,564円/m

配管工事単価：2,200円/人h-17,600円/日<sup>1)</sup>÷8h<sup>4)</sup>  
 杭工事単価：91,350円/h-20,300円/m<sup>2</sup>×36m<sup>3)</sup>÷8h<sup>4)</sup>  
<sup>1)</sup>平成16年度公共工事設計労務単価表(東京都)  
<sup>2)</sup>建設物価 アースドリル工法φ1500×25m(東京)  
<sup>3)</sup>1日1台の杭打ち機で18m杭を2本打設(36m)  
<sup>4)</sup>1日の就労時間：8h

一般的に用いられるボアホール方式と提案した場所打ち杭を併用したシステムの建設費の比較を表-9に示す。表-9の中で、シングルUチューブは一般的に用いられるボアホール方式で使用されると仮定する。Uチューブ1対当りの採放熱量は、40W/mであると仮定した。掘削費は日本で一般

的に用いられる10,000円/mとした。提案した場所打ち杭を併用したシステムの採放熱量は2004年に冷房実験に基づいていた。

単位採放熱当りの提案システムの建設費は72円/mとなり、ボアホール方式の300円/mと比較すると約1/4となることを確認した。

表-9 熱交換方式による採放熱量当たりのイニシャルコスト

熱交換方式	ボアホール (Uチューブ1対)	本システム (Uチューブ8対)
採放熱量 [W/m]	40	200
掘削コスト [円/m]	10,000	-
配管費 [円/m]	2,000	-
杭・配管施工費増 [円/m]	-	-
コスト計 [円/m]	12,000	14,564
採放熱量当り [円/W]	300	72

## 5. フィージブルスタディ

### 5.1 モデル設定

以上の結果を踏まえ、本システムを中規模事務所ビルに採用した場合のフィージブルスタディを行った。表-10に建物概要、図-21にモデル建物基準階平面図、図-22に杭伏図を示す。検討地域は東京とし、杭方式および本数は場所打ち杭(直径：1.5m、杭長20m、30本)と仮定した。

表-10 モデル建物概要

検討地域	東京
用途	事務所
延床面積	6,600m <sup>2</sup> (空調面積：4,840m <sup>2</sup> )
建物規模	地上8階、地下なし
運転時間	平日：8時～18時(日・祭日・土：なし)

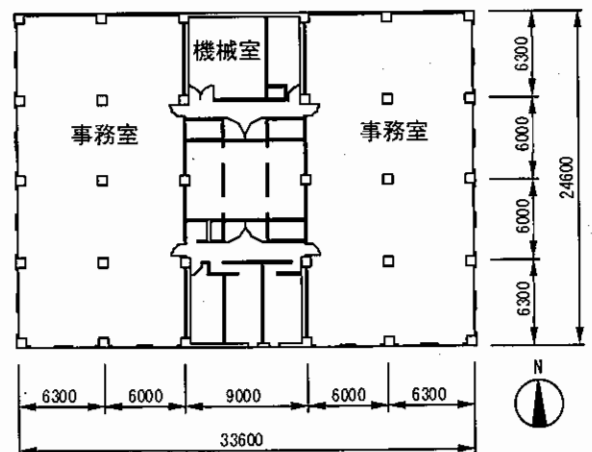


図-21 モデル建物基準階平面図

### 5.2 空調システム設定

図-23に比較を行った空調システムを示す。比較を行う



空調システムは、熱源機器を台数分割して設置した中央熱源方式とし、通常システムは一般的な空冷 HP 方式、地中熱利用システムは、空冷 HP を台数分割した1台を地中熱利用の水冷 HP に置き換えたシステムとした。

表-11 にそれぞれの空調システムの熱源容量設定を示す。熱源容量は、冷房のピーク負荷で決定した。まず、地中熱利用システムの水冷 HP 容量を実大実験結果より、地中からの採放熱量  $160\text{W/m}\cdot\text{本}$  とし、 $160\text{W/m}\cdot\text{本}\times 20\text{m}\times 30\text{本}=96\text{kW}(27\text{RT})$  と算出した。残りの負荷を空冷 HP 2 台で分割し、1 台 58RT とした。比較を行う通常システムは、水冷 HP 27RT を空冷 HP に置き換えたシステムとした。

### 5.3 計算条件と計算方法

計算は、設定した条件および HP の期間成績係数などから部分負荷効率も考慮した年間エネルギーシミュレーションにより各システムのランニングコストを算出した。次に熱源システムに関わる部分(地中熱利用システムに関しては熱交換杭・熱源水配管・ポンプも含む)のインシヤルコストを実施工から算出した熱交換杭施工費などから算出し、インシヤル・ランニングコスト差から単純投資回収年数を算出した。なお計算比較対象は通常システムの一部が地中熱利用システム(水冷 HP+熱交換杭)に置き換わった部分のみに限定した。

### 5.4 計算結果

表-12 に通常システムと地中熱利用システムの年間での消費電力量を示す。地中熱利用システムは、熱源水ポンプの消費電力量が付加されるが、COP が高く HP 消費電力量が減るため、消費電力量削減率は 20% となった。

表-13 に単純投資回収年を示す。単純投資回収年は、施工実績からのインシヤルコストおよび開発を行っている水冷 HP の COP では 17.7 年となり、普及・実用化の一つの目安となる 10 年以内とはならなかった。しかしボアホール方式と比較すると  $1/2\sim 1/3$  以下となり、システムの採用の可能性は高くなったと考える。

## 6. まとめ

- 1) 地中熱利用空調システムの普及・実用化を目指し、インシヤルコスト削減を目的として場所打ち杭を地中熱交換器と併用したシステムを提案し、その熱特性を把握するために、実大実験装置を用いた年間冷暖房運転実験を行った。
- 2) 冷房・暖房実験の結果、今回提案した地中熱交換杭(直径 1500mm, U チューブ 8 対)の実験サイトにおける最大採放熱量は  $260\sim 280\text{W/m}$ (U チューブ 1 対当たり  $32\sim 35\text{W/m}$ )、期間平均で約  $180\sim 200\text{W/m}$  の

能力があることを確認した。

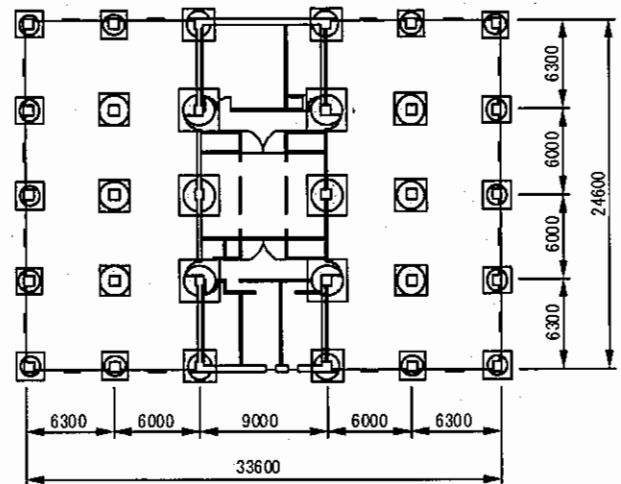


図-22 モデル建物杭伏図

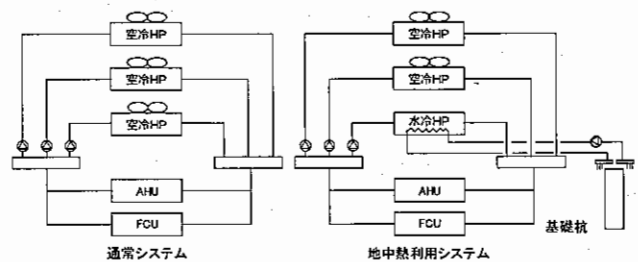


図-23 空調システム図

表-11 空調システム

		通常システム (空冷 HP)	地中熱利用システム (空冷, 水冷 HP 併用)
冷房負荷[GJ/年]			1,418
冷房ピーク[MJ/h]			1,825
暖房負荷[GJ/年]			628
暖房ピーク[MJ/h]			1,013
地中採放熱量[W/m 本]			160
杭本数[本]			30
杭長[m]			20
熱交換用配管[対/本]			8
地中採熱量[kW]			96
熱源容量	空冷 HP	27RT×1 58RT×2	58RT×2
	水冷 HP	—	27RT×1
	合計		144RT

表-12 省エネルギー効果

	通常システム	地中熱利用システム
HP 消費電力量[kWh]	215,297	167,454
ポンプ消費電力量[kWh]	—	3,327
消費電力量合計[kWh]	215,297 (100%)	170,781 (80%)
差[kWh]	—	44,516 (20%)

- 3) 実験期間中の水冷式ヒートポンプの成績係数は、最大5.6(冷房), 5.1)暖房であり、期間平均は4.6(冷房), 4.5(暖房)と高く、一般的な空冷ヒートポンプと比較すると効率が高いことが確認できた。
- 4) 暖房運転開始時の地中温度は、冷房開始時より約2℃程度高く、冷房放熱による季節間蓄熱効果が確認できた。
- 5) 冷房運転終了時、杭と杭の間の地中温度は、同じ距離離れた杭と杭の間以外の地点と比較すると、約1℃高くなっており、杭間の熱干渉の影響が多少見られる結果となった。
- 6) 試験施工を行った物件でのコストをもとにボアホール方式とのイニシャルコストの比較を行った結果、採放熱量当りのイニシャルコストは72円/Wとなり、ボアホールシステムの1/4となった。
- 7) 中規模事務所ビルをモデルとしたフィージブルスタディにより現状では、回収年数は17.7年となったが、熱交換杭施工費の更なる削減や水冷HPのCOP向上により、普及・実用化の一つの目安となる10年以内となる可能性があることを確認した。

今後、さらなる省力化工法の検討などを行い、普及・実用化の目安となる投資回収年数10年以内を達成させる予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、平成15・16年度(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構『エネルギー使用合理化技術戦略的開

発 エネルギー使用合理化技術実用化開発 大都市における基礎杭を利用した地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究(研究代表者東京大学大岡龍三助教授)』によった。

## 参 考 文 献

- 1) 長野克則・落藤 澄ほか：土壤熱源ヒートポンプシステムに関する研究(第1～4報), 空気調和・衛生工学会論文集, No.54(1994-2), pp.55～66, No.56(1994-10), pp.25～34, No.58(1995-6), pp.1～11, No.60(1996-2), pp.39～49
- 2) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：地球熱利用システム 地中熱利用ヒートポンプシステムの特徴と課題(2004), pp.7
- 3) 相賀 洋・石野久彌・三小田憲司・富家貞男：ボアホール地中熱交換器を用いた地中地盤蓄熱システムの性能評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.555(2002-5), pp.77～84
- 4) 森野仁夫・岡 建雄：鋼管杭による土壤放熱・採熱に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.404(1989-10), pp.49～57
- 5) 竹内正紀・宮本重信・木村照夫・坪田論治：基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No.52(1993-6), pp.59～69
- 6) 濱田靖弘・窪田英樹・中村真人・横山良太郎・落藤 澄・長倉香織・斎藤央・圓山彬雄・照井康穂：空調用エネルギーパイルシステムに関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2001), pp.353～356
- 7) 加賀久宣・宮本重信・西畑正一・多田幹男・小林一郎・竹内正紀・大岡龍三：基礎杭利用地熱空調システムの研究開発(そ

表-13 単純投資回収年

空調方式		通常システム [千円]	地中熱利用システム			
			施工実績値	杭施工費減	COP向上	HP価格ダウン
		[千円]				
期間成績係数	冷房/暖房	2.90/2.70	5.57/5.05	5.57/5.05	6.00/5.43	6.00/5.43
ランニングコスト		20,282	19,614	19,614	19,569	19,569
差額	通常システムと地中熱	-	668	668	713	713
空冷HP価格*	106 kW	6,020	-	-	-	-
水冷HP価格	高効率型 138千円/RT 27 RT	-	3,726	3,726	3,726	-
"	廉価機 122千円/RT 27 RT	-	-	-	-	3,297
熱源水ポンプ	7.5kW 65mm 多段 275.2 l/min	-	695	695	695	695
同上設置工事*		-	56	56	56	56
熱源水配管工事*		-	3,062	3,062	3,062	3,062
熱交換杭工事	¥14,564 20m 30本	-	8,738	-	-	-
"	¥7,875 20m 30本	-	-	4,725	4,725	4,725
純工事費計		6,020	16,277	12,264	12,264	11,835
一般管理費	15%	903	2,442	1,840	1,840	1,775
請負金額		6,923	18,719	14,104	14,104	13,611
差額	通常システムと地中熱	-	11,796	7,181	7,181	6,688
回収年数		-	17.7	10.8	10.1	9.4

\* 月刊建設物価 2005年2月号より算出

- の1) 実大実験システムによる性能検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2001), pp.345~348
- 8) 濱田靖弘・中村真人・落藤 澄・横山良太郎・長野克則・永坂茂之: 標準熱回収率による地下熱利用システムの評価方法および住宅への導入効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.71(1998-10), pp.53~62
- 9) 横井睦己・大岡龍三・加藤信介・関根賢太郎・黄錫鎬・宋斗三: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究(その1)システムおよび性能実験施設の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2004), pp.1379~1380
- 10) 関根賢太郎・大岡龍三・深尾仁・横井睦己・黄錫鎬: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究(その2)夏期および冬期性能実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2004), pp.1381~1382
- 11) 大岡龍三・関根賢太郎・黄錫鎬: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究(その4)地中採放熱量と熱源成績係数, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2004), pp.1655~1658
- 12) 大岡龍三・関根賢太郎・黄錫鎬・南 有鎮: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究(その6)冷・暖房実験による性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2005), pp.661~662
- 13) 関根賢太郎・大岡龍三・横井睦己・黄錫鎬: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究(その7)中規模ビルによる省エネルギー効果とコスト試算, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2005), pp.663~664
- 14) 柴 芳郎・大岡龍三・関根賢太郎: 場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システムの普及・実用化に関する研究(その12)水冷式ヒートポンプ高効率化のための性能計算プログラムの開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2005), pp.621~624

(2005年7月20日 原稿受付)

## Development of a Ground-Source Heat Pump System with Ground Heat Exchanger Utilizing The Cast-In-Place Concrete Pile Foundations of A Building

### Part 1 -The Performance and Feasibility Study on an Annual Experiment and the Real Construction Cost

by Kentaro SEKINE <sup>\*1</sup>, Ryozo OOKA <sup>\*2</sup>, Mutsumi YOKOI <sup>\*3</sup>, Yoshiro SHIBA <sup>\*4</sup>, Suckho HWANG <sup>\*5</sup>, Yujin NAM<sup>\*5</sup>

**Key Words:** Ground-source, Cast-in-place concrete pile foundation, Heating & cooling system, Experiment.

**Synopsis:** Ground-source (Geothermal) heat pump (GSHP) systems can achieve a higher coefficient of performance than conventional air-source heat pump (ASHP) systems. However, GSHP systems are not widespread in Japan because of their expensive boring costs. The authors have developed a GSHP system that employs the cast-in-place concrete pile foundations of a building as heat exchangers in order to reduce the initial boring cost. In this system, eight U-tubes are arranged around the surface of a cast-in-place concrete pile foundation.

The heat exchange capability of this system, subterranean temperature changes and heat pump performance were investigated in a full-scale experiment. As a result, the average values for heat rejection were 186~201 W/m (per pile, 25 W/m per pair of tubes) while cooling. The average COP of this system was 4.6 while cooling, rendering this system more effective in energy saving terms than the typical ASHP systems. The initial cost of construction per unit for heat extraction and rejection is ¥72/W for this system, whereas it is ¥300/W for existing standard borehole systems. The feasibility study model was the office building of medium scale. The cost pay back time was 17.7 years depending on cost increase of ground heat exchanger pile.

(Received July 20, 2005)

<sup>\*1</sup> Technology Center, Taisei Corporation, Member

<sup>\*2</sup> Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Member

<sup>\*3</sup> Design Division, Taisei Corporation, Member

<sup>\*4</sup> Development Dept., Zeneral Heatpump Industry Co., Ltd, Member

<sup>\*5</sup> Graduate School, University of Tokyo, Student Member