

# 水平方式地中熱ヒートポンプシステムの性能に関する研究 —夏期/冬期の実測結果の比較と運用方式の検討—

## Research on Horizontal Geothermal System —Evaluation of Summer and Winter Measurement Results and Study on Operating Methods—

中田 清\*  
Kiyoshi Nakata

### 要 約

水平方式地中熱ヒートポンプシステムを採用したテナントオフィスビル“NCO メトロ神谷町”について、冬期および夏期の実測調査を行い、その効果を実証した。コイルの敷設長あたりの地中熱交換器の日平均採熱量は、冬期において32.2~95.7 W/m、夏期において97.6~233.8 W/mとなった。採熱量はヒートポンプ2次側の熱負荷と強い相関が見られ、空調負荷に応じて変動していると考えられた。また、採熱量の日変動には低下していく傾向は見られず、運転停止後の地中温度の回復を上回る過剰な採熱には至っていないと思われた。しかし、夏期の平均地中温度の上昇推移が冬期の下降よりも早い傾向にあり、運用が長期間に渡る場合は地盤への熱負荷の蓄積が懸念される。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実測対象建築物の概要および測定概要
- § 3. 冬期におけるシステムの性能検証
- § 4. 夏期におけるシステムの性能検証
- § 5. まとめ

### § 1. はじめに

近年はZEBを目指した建築物の省エネルギーが求められる、自然エネルギーを活用した要素技術の開発/検討が推進されている。そうした技術の1つである地中熱ヒートポンプシステムは、外気と比較して温度の年較差が緩やかな地中を熱源とすることで、一般的な空冷ヒートポンプ熱源よりも熱源温度と利用温度の温度差を小さくし、ヒートポンプの運転を高効率化する省エネルギー技術である。また、大気に排熱を出さないという利点もあり、都心部の建築物に採用することでヒートアイランド防止の効果も期待できることから、昨今の多くの環境配慮型建築物で採用事例が増えている。しかし、多くの採熱が期待できる垂直型の地中熱交換器を計画した場合、設置費が高額となり工期が長期化するという課題があり、更なる普及への障壁ともなっている。

そこで、都心に立地するテナントオフィスビルの設計

/施工案件であったNCO メトロ神谷町において、コストに配慮した水平方式地中熱ヒートポンプシステムを採用した。本稿では、冬期および夏期の実測により地中熱交換器の性能を考察した結果について報告する。

### § 2. 実測対象建築物の概要および測定概要

#### 2-1 建物概要

名 称	NCO メトロ神谷町
所 在 地	東京都港区
竣 工 日	2018年11月30日
設 計	西松建設株式会社一級建築士事務所
構造規模	鉄骨造/地上8階/地下2階
敷地面積	875.26 m <sup>2</sup>
建築面積	680.63 m <sup>2</sup>
延床面積	6,349.32 m <sup>2</sup>

写真-1に建物外観を示す。建物構成は、地階が地下鉄の駅直結のサブエントランス、1階がメインエントランス及び軽飲食店舗、2~8階が偏心コアのテナントオフィスとなっている。

表-1に採用した環境配慮技術の概要を示す。オフィス部分の空調・照明エネルギー削減を重視して計画され、機構が複雑化しイニシャル/ランニングの両面でコストが上がることを防ぐ汎用技術を中心に構成された。設計BEIは0.49となり、ZEB Readyを達成した。設計1

\* 意匠設計部 ZEB 推進室

次エネルギー消費量の内訳を図一に示す。

### 2-2 地中熱ヒートポンプ設備概要

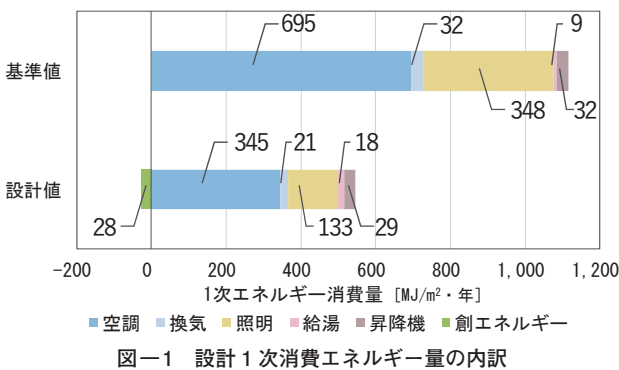
耐圧版下部の捨てコンクリート下に16Aの架橋ポリエチレン管を敷設し、クローズドループの地中熱交換器を計画した。配管は、標準長さ(200m)の把巻き品を水平に引き延ばしてスリンキーコイル状に広げる敷設方式とすることで、コスト削減と施工の簡略化を考慮した。



写真一 NCOメトロ神谷町外観

表一 採用した環境配慮技術の概要

採用技術 (建築)	3層銀膜Low-Eガラス+鉛直ルーバーの外装 屋上・壁面緑化
採用技術 (設備)	高APFビルマルチエアコン 2段スラット角ブラインド+昼光連動制御 明るさ・人感センサーによるLED照明自動制御 地中熱利用WHPによる補助空調



図一 設計1次消費エネルギー量の内訳

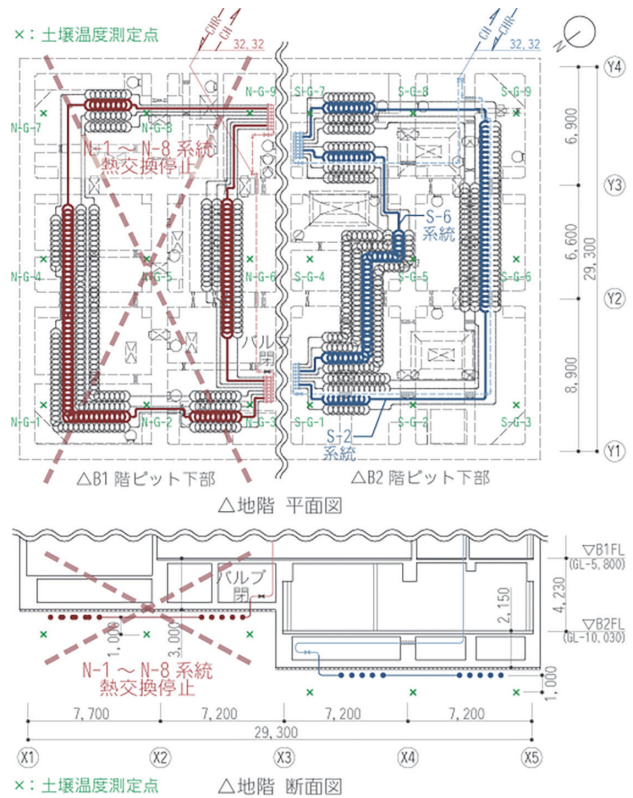


写真二 地中熱交換器の敷設状況

敷設状況を写真二に示す。X3通りを境に地下深さの異なる建物形状に合わせ、B1階ピット下部とB2階ピット下部にそれぞれ8系統ずつ配管を敷設した。敷設図面を図二に、各系統の配管総長及びコイル長を表二に示す。なお、配管総長は捨てコンクリート下の配管を引き延ばした場合の長さ、コイル長はコイル状部分を600mm幅の帯とみなした時の帯の長さとし、直管部分を含めない長さとする。地中熱交換器は1階EVホールに設置した水熱源ヒートポンプ(以降WHPとする)に接続し、風除室の補助空調を行う。機器表を表三に、システムの系統図を図三に示す。

### 2-3 運用概要

既報<sup>1)</sup>の2018年度末の性能検証では、地中からの採熱に余力があると考えられた。そこで今回の実測では、N-1~N-8系統の地中熱交換器のバルブを閉鎖し、S-1~S-8系統のみ水を循環させ熱交換する運用とした。熱交換の範囲を絞り、地中からの採熱の限度を探ることを意



図二 地中熱交換器敷設図面

表二 地中熱交換器配管長とコイル長

系統	配管総長[m]	コイル長[m]	系統	配管総長[m]	コイル長[m]
N-1	136.5	16	S-1	135	16.5
N-2	159	20.4	S-2 ★	133	16.5
N-3	151.5	19.2	S-3	122	14.4
N-4	139	18	S-4	121	14.4
N-5	55	5.7	S-5	109	15.7
N-6	57	5.7	S-6 ★	108	14.6
N-7	64	7.5	S-7	107	13.5
N-8	65	7.8	S-8	109	12.3

図している。WHPは設定温度24.0℃，風量：急の固定運転とし，平日の8～18時にONのタイマー制御で運用した。

2-4 測定概要

実測期間は冬期：2019年12月9日～2020年3月22日，夏期：2020年8月3日～2020年9月13日とした。T型熱電対を用い，地中熱交換器についてS-2およびS-6系統の捨てコンクリート出入口における配管表面温度を，土壌について地中熱交換器の1m下部の温度を図-2のS-G-1～9の9点において測定した。また，挿入型温度検出器によりWHPの1次側熱源水の行き還り温度を，ダクト用温度検出器によりWHPの2次側の吸込および吹出空気温度を測定した。測定間隔はいずれも10分間隔とした。

表-3 地中熱ヒートポンプシステム機器表

P-1 ラインポンプ	型式	PE2-325-0.4T	台数	1
	能力	32A×63L/min×14m	制御	WHP-1連動 定流量
WHP-1 水熱源 ヒートポンプ	型式	WDX150AA	台数	1
	冷房能力	15.0 kW	暖房能力	13.4 kW
	冷房消費電力	2.49 kW	暖房消費電力	3.91 kW
	定格冷房COP	6.02	定格暖房COP	3.43
	送風量	2,580 m³/h	発停制御	タイマー

§3. 冬期におけるシステムの性能検証

3-1 地中熱交換器全体の性能検証

外気温，WHPの1次側熱源水の行き還り温度，WHPの2次側吸込空気温度，平均地中温度の推移を図-4に示す。平均地中温度はS-G-1～9の9点における測定値の平均である。平均地中温度は測定開始時の22.7℃から実測期間を通じて緩やかに下降し，3月22日には18.0℃まで低下した。一方，熱源水行き温度に着目すると，2月10日頃までは平均地中温度と同様に緩やかな下降傾向

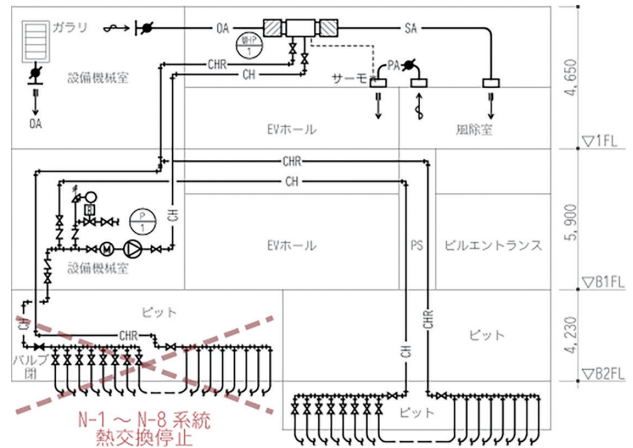


図-3 地中熱ヒートポンプシステム系統図

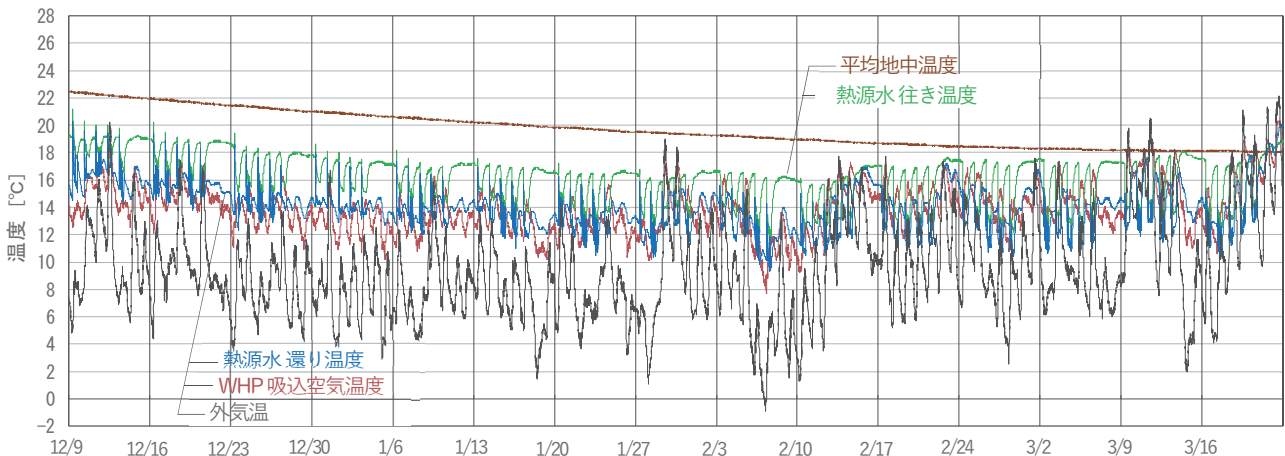


図-4 冬期の外気温，熱源水行き還り温度，WHP吸い込み空気温度，平均地中温度の推移

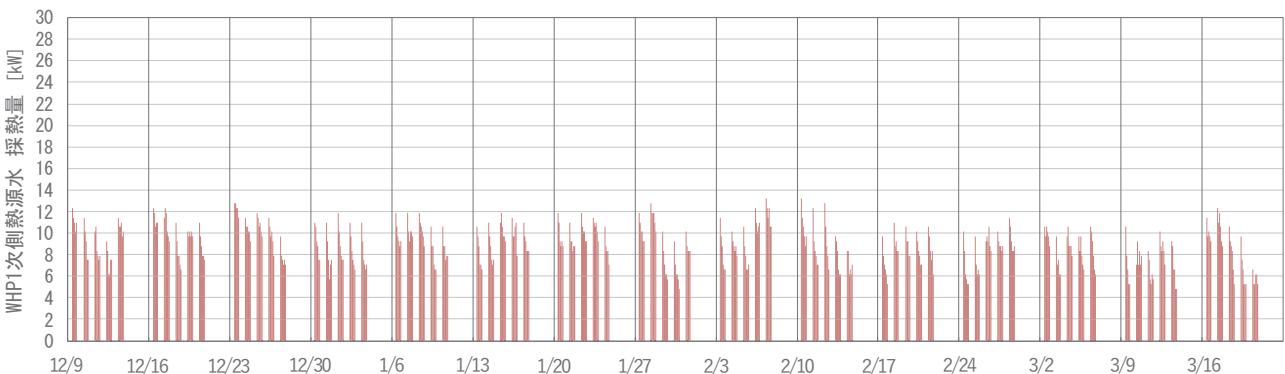


図-5 冬期のWHP1次側熱源水の採熱量

にあるが、以降は異なる推移を示した。2月10日以降は外気温が上昇傾向に転じており、暖房負荷が低下したためだと考えられる。

WHPの1次側熱源水の採熱量を図-5に示す。2月7日および2月10日に最大値の13.2kWを示した。実測期間の中で最も外気温が低くなった日であり、暖房負荷の増加に伴い採熱量が大きくなったものと考えられる。また、WHPの定格暖房能力の13.4kW以内の最大値となり、WHPの能力に対し適当な採熱量と考えられる。測定期間全体の推移は、必ずしも週初めの採熱量が多く週後半に少なくなる傾向とはなっていない。

代表週(2月3日~7日)における各所温度およびWHPの1次側熱源水の採熱量を図-6に示す。各日の推移と

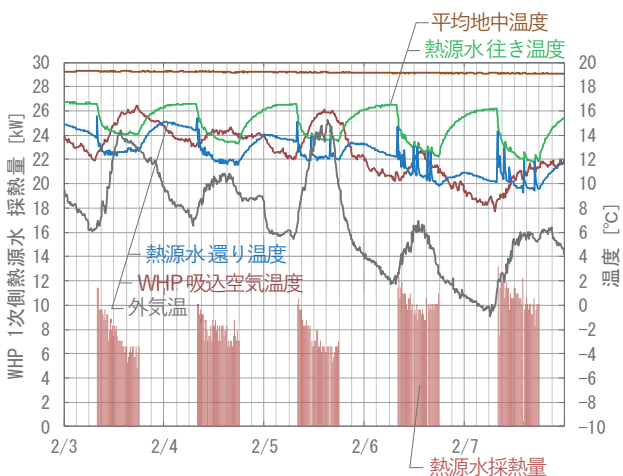


図-6 冬期の代表週における各所温度とWHP 1次側熱源水の採熱量

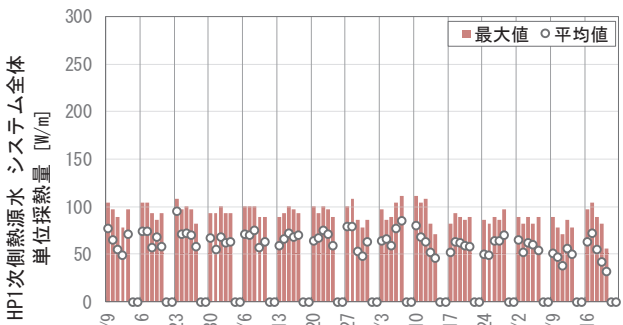


図-7 冬期のWHP 1次側熱源水の単位採熱量

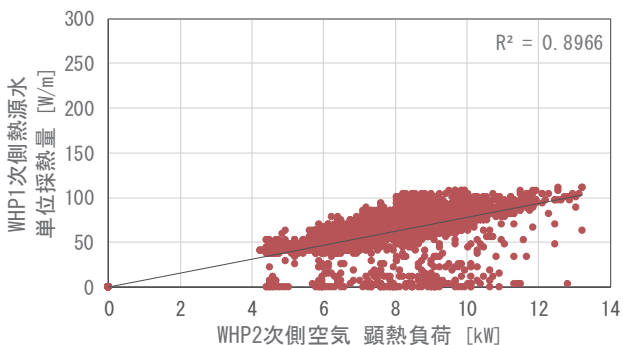


図-8 冬期のWHP 2次側空気の顕熱負荷とWHP 1次側熱源水の単位採熱量の相関

しては、運転開始する8時の直後に採熱量が最も大きくなる傾向にある。暖房の立ち上がり負荷に応じて採熱量が増加するものと考えられる。

WHPの1次側熱源水の採熱量をコイル長さで除した単位採熱量について、1日の平均値と最大値の推移を図-7に示す。平均値では32.2~95.7W/m, 最大値では55.9~111.9W/mの間で推移し、連続の採熱により徐々に採熱量が低下するといった傾向は見られなかった。

図-8にWHPの2次側空気の顕熱負荷とWHPの1次側熱源水の単位採熱量との相関を示す。R<sup>2</sup>=0.89と高い決定係数となり、強い正の相関が確認された。

以上より、今回の測定においては地中熱交換器の採熱量は暖房負荷の増減に応じて変化していると考えられ、運転停止後の地中温度の回復を上回る過剰な採熱には至っておらず、地中熱交換器の採熱可能容量にはまだ余力があると思われる。

### 3-2 地中熱交換器の系統ごとの比較

図-9にS-2系統, 図-10にS-6系統について、単位採熱量の1日の平均値と最大値を示す。S-2系統は平均値では16.8~55.7W/m, 最大値は26.4~61.5W/mで推移した。一方S-6系統は平均値では31.8~87.6W/m, 最大値では44.9~102.1W/mで推移し、S-2系統よりも採熱量が多い結果となった。配管総長はS-6系統の方が短い内部の抵抗が小さく、S-2系統よりも熱源水の流量が大きいためだと考えられる。

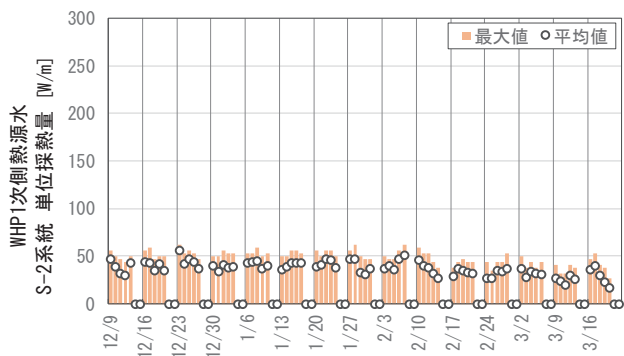


図-9 冬期のS-2系統の単位採熱量

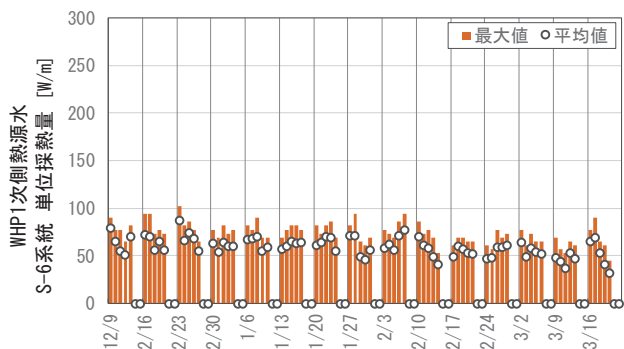
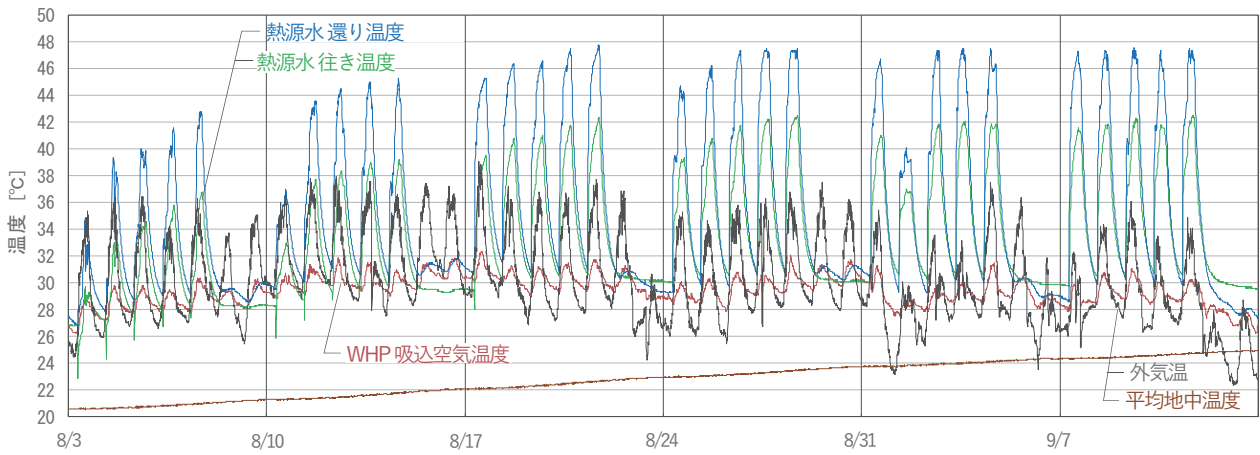
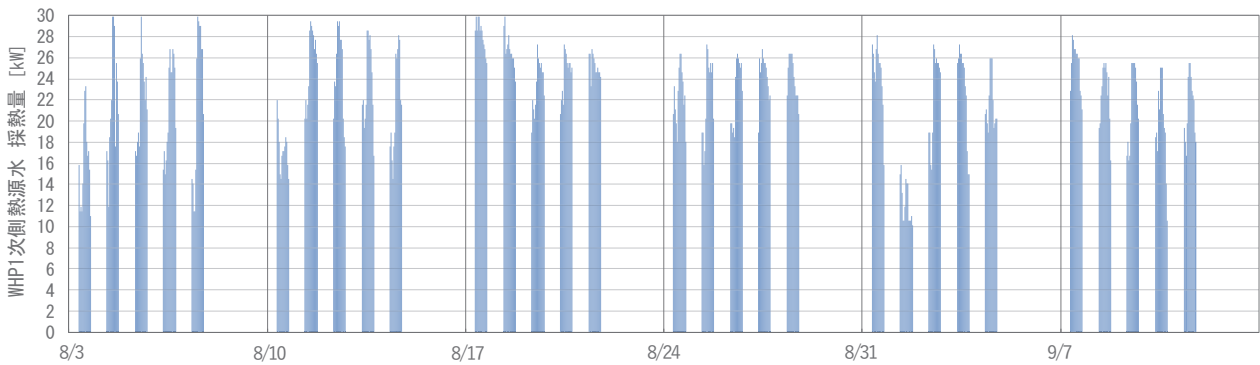


図-10 冬期のS-6系統の単位採熱量



図一11 夏期の外気温、熱源水行き還り温度、WHP 吸込み空気温度、平均地中温度の推移



図一12 夏期のWHP 1次側熱源水の採熱量

§4. 夏期におけるシステムの性能検証

4-1 地中熱交換器全体の性能検証

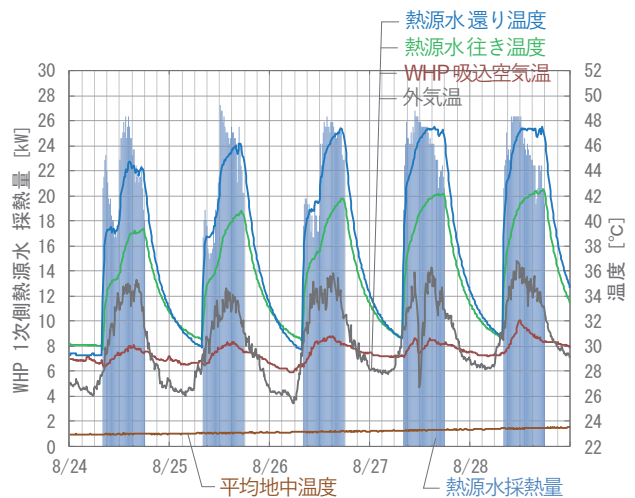
外気温、WHPの1次側熱源水の行き還り温度、WHPの2次側吸込空気温度、平均地中温度の推移を図一11に示す。外気温については冬期と同様に測定期間中の大きな変動は見られない。しかし、平均地中温度は測定開始時の20.6℃から継続的に上昇し、9月13日には25.0℃まで上昇した。変化が冬期よりも早い傾向が確認できる。

WHPの1次側熱源水の採熱量を図一12に示す。実測期間中の最大値は8月4日の29.9kWとなり、期間を通じて冬期よりも高い採熱量となった。

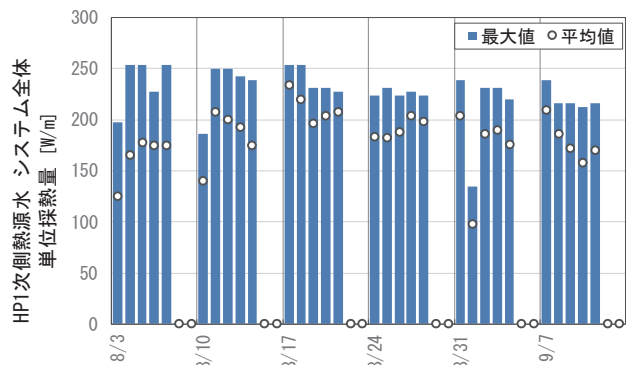
代表週(8月24日～28日)における各所温度およびWHPの1次側熱源水の採熱量を図一13に示す。各日の推移としては、12～15時に採熱量が最も大きくなる傾向にある。外気温が各日の最大値を示す時間帯と概ね一致しており、負荷に応じて採熱量が変化していると考えられる。

WHPの1次側熱源水の採熱量をコイル長さで除した単位採熱量について、1日の平均値と最大値の推移を図一14に示す。平均値では97.6～233.8W/m、最大値では134.1～253.4W/mの間で推移した。冬期と同様に、連続の採熱により徐々に採熱量が低下するといった傾向は表れていないと思われる。

図一15に代表週における外気の露点温度とWHP吹



図一13 夏期の代表週における各所温度とWHP 1次側熱源水の採熱量



図一14 夏期のWHP 1次側熱源水の単位採熱量

出空気温度の経時変化を示す。WHP 吹出温度は各日の稼働時間を通じて外気の露点温度を大きく下回っている。採熱の多くが潜熱処理に使われていると考えられる。

図一16にWHPの2次側空気の全熱負荷とWHPの1次側熱源水の単位採熱量との相関を示す。なお、WHPの2次側空気の全熱負荷はWHPの吸込空気と設定温湿度とのエンタルピーの差とした。算出にあたり、WHPの吸込空気の湿度は測定していないため屋上での現地測定データを代用した。また、湿度制御は成行のため、設定湿度は風除室で現地測定している湿度データを代用した。図一16のデータには強い相関が確認され、近似直線の傾向も概ね冬期の図一8と同様となっている。

以上より、夏期の測定においても地中熱交換器の採熱量は冷房負荷の増減に応じて変化していると考えられ、運転停止後の地中温度の回復を上回る過剰な採熱には至っていないと思われる。ただし、平均地中温度の上昇が冬期の温度下降よりも早く変化しており、現在の運用を長時間続けた場合、地盤中の熱負荷の蓄積と熱源効率の低下が懸念される。

4-2 地中熱交換器の系統ごとの比較

図一17にS-2系統、図一18にS-6系統について、単位採熱量の1日の平均値と最大値を示す。S-2系統は平均値では89.1~161.2 W/m、最大値は111.4~170.0 W/mで推移した。一方S-6系統は平均値では53.9~178.8 W/m、最大値では73.5~204.1 W/mで推移し、冬期と同様にS-2系統よりも採熱量が多い結果となった。本計画では各系統のヘッダーには開/閉のバルブしか設けられておらず流量の調整ができないが、調整バルブを増設し系統ごとの流量を最適化することで採熱効率を上昇させる余地があると考えられる。

§5. まとめ

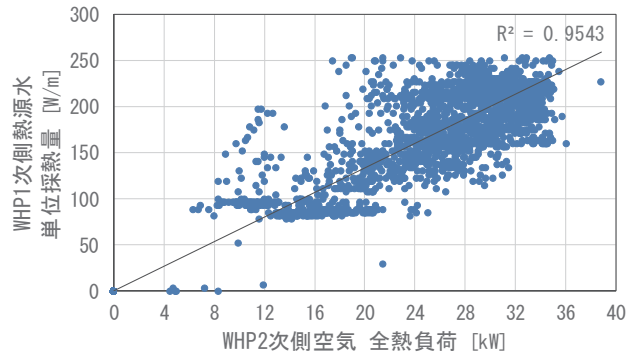
東京都のテナントオフィスに計画した水平方式地中熱ヒートポンプシステムについて冬期/夏期の実測を行い、以下の知見を得た。

- ① 地中熱交換器の長さあたりの採熱量の平均値は、冬期は32.2~95.7 W/m、夏期は97.6~238.8 W/mであった。
- ② 採熱量の推移から冬期/夏期ともに過剰な採熱には至っていないと思われるが、夏期については平均地中温度の上昇ペースが早く、運用が長期間に渡る場合地盤への熱負荷の蓄積が懸念される。
- ③ 系統ごとの採熱量には差があり、ヘッダーに調整バルブを設け流量を最適化できる設えとすることで採熱効率を上昇させる余地があると考えられる。

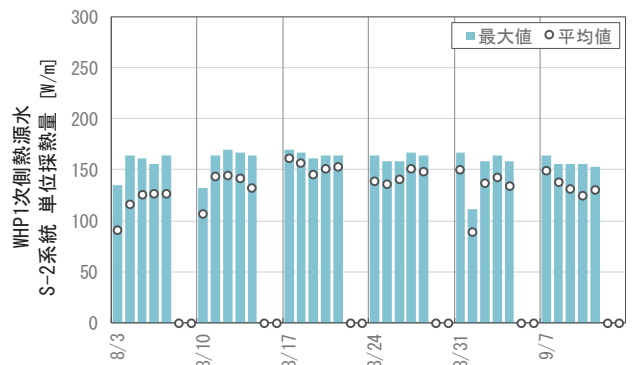
夏期の運用が次の冬期の採熱に影響を与えていないか等の観点を中心に今後も測定/分析を続け、設計段階での採熱量予測に資する知見の積上げに努める予定である。



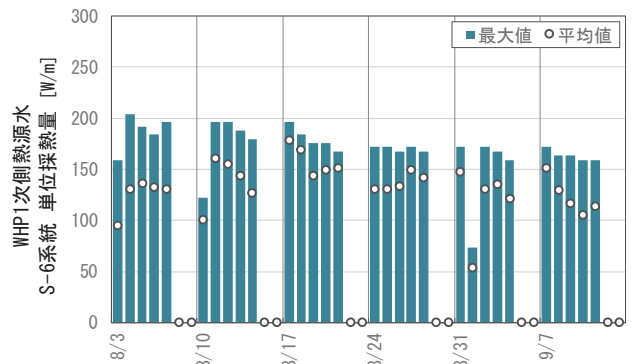
図一15 夏期代表週の外気露点温度とWHP吹出空気温度



図一16 夏期のWHP 2次側空気の全熱負荷とWHP 1次側熱源水の単位採熱量の相関



図一17 夏期のS-2系統の単位採熱量



図一18 夏期のS-6系統の単位採熱量

参考文献

- 1) 中田清：ZEB テナントオフィスの環境技術性能評価その1 水平方式地中熱利用の評価検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1073-1074, 2019.