２０２４年度　新産業創出研究会「研究成果報告書」

「カーボンニュートラル時代のロバスト空調を実現する再エネバッファシステムの開発」

［広島大学・准教授］［金田一　清香］
［ミサワ環境技術株式会社・常務取締役］［田中　雅人］

1. はじめに

脱炭素社会実現に向けた世界的な取り組みにおいて、電源の脱炭素化に加え、需要側の電化の重要性が認知されており、特に建築部門では空調用ヒートポンプの導入促進が鍵とされている（IEA, 2021）。通常は、エアコンに代表される室外機方式による空調が採用されるが、外気より夏に低温／冬に高温な、地中熱などの未利用熱を用いることでヒートポンプの性能向上が期待できる。こうした空調用ヒートポンプは再生可能エネルギーのうち「再エネ熱」として注目されるが、実際のヒートポンプの性能は空調の「使い方」により強い影響を受けるため、建物毎に異なる空調使用の下で常に「再生可能」であるかは不明である。

申請者らはこれまで各種空調システムの運用実績を分析する中で、温暖地での地中熱利用の課題として、以下の 2 つの課題点を抽出した（Kindaichi et al,2018）（2022 年度 NEDO 助成事業）。一点目は、過大な冷房需要により年間の排熱バランスが不均衡となり、持続的な省エネ運転を妨げることが懸念される点である。これは通常の室外機空調では発生しない、蓄熱性を持つ地中熱特有の問題である。二点目に、地中配管系統のポンプ動力である。これも通常の室外機空調にはない熱源水ポンプの稼働に伴うものであり、特に低負荷状態での空調稼働が長いほど、相対的にポンプ動力が増加する点が課題であった。これら 2 つの課題はいずれも、地中熱という単独の再エネ熱を成り行きで使用するシステム形態に起因する。

そこで本研究では、想定（設計）と異なる空調の使い方に対してロバスト性を保ち、持続的かつ確実に再生可能な運用を可能とする「ロバスト地中熱空調システム」を開発することを目的とする。**図 1** のように、従来システムでは地中熱交換器とヒートポンプ（水熱源ビルマルチ）が直接接続されるの対し、本システムでは両者の間に「再エネバッファ」を導入することで、上記 2 つの課題を同時に解決する。

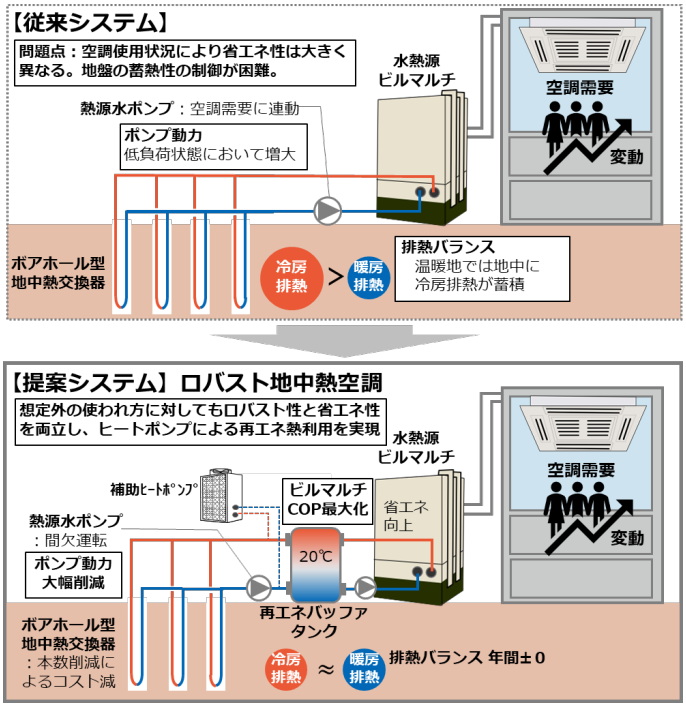

図 1　従来システムの課題点と提案システムの特徴

2.概要

温暖地における地中熱空調の課題として、地中配管のポンプ動力低減と、年間排熱バランスの改善がある。いずれも一般の室外機による空調にはない地中熱特有の課題であり、本研究ではこれらを同時に解決する「ロバスト地中熱空調システム」開発のため、実験と数値解析により基本性能を明らかにする。

3.研究成果および今後の課題

◆ ロバスト地中熱空調システムの基本性能評価

・ 実験システムの構築

図-2 に実験の外観写真、**表-1** に各構成機器の仕様を示す。システムは大きく地中熱交換器、地中熱

図-2　上：実験外観写真/下：地中熱交換器

表-1　構成機器仕様

地中熱交換器	ボアホールダブルUチューブ	
	深さ[m]	100
	本数[本]	1
地中熱ポンプ	流量[l/min]	32
熱源水蓄熱槽	ダイライトタンク	
	容量[l]	1000
	寸法[mm]	高さ 1,250 直径 1,060
水冷HP	冷房能力[kW]	5.4
	熱源側流量[l/min]	21
	冷温水側流量[l/min]	15
空冷HP	冷房能力[kW]	5.0
	流量[l/min]	8

ポンプ、熱源水蓄熱槽、水冷ヒートポンプシステム(以下、水冷 HP)、空冷ヒートポンプシステム(以下、空冷 HP)で構成される。各機器間は炭素鋼鋼管で接続し、ポリエチレングリコール(体積濃度約 20%)混合溶液を循環させた。各配管内部に測温抵抗体(Pt100)を挿入し、水温を測定した。熱源水蓄熱槽内部では上部、中部、下部の 3 点の水温を、地中熱交換器では地中深さ1m、2m、5m、10m、50m、100mの各地点でUチューブの往き・還り管の外表面温度をそれぞれ測定した。流量は電磁流量計により測定した。水冷 HP と空冷 HP にはポンプが内蔵されており、ヒートポンプとポンプの合計消費電力を計測する。

表-2　実験ケース

Case	地中熱ポンプ稼働率	室内側負荷	空冷HP稼働開始時間	実施日
50中	50%	中負荷	稼働なし	10月17日
50中-10時			10時	10月13日
50中-12時			12時	10月14日
50中-14時			14時	10月15日
50低		低負荷	稼働なし	10月16日
50低-10時			10時	10月3日
50低-12時			12時	10月10日
50低-14時			14時	9月30日
100中	100%	中負荷	稼働なし	10月11日
100中-10時			10時	10月6日
100中-12時			12時	10月8日
100中-14時			14時	10月9日
100低		低負荷	稼働なし	10月18日
100低-10時			10時	10月22日
100低-12時			12時	11月4日
100低-14時			14時	10月24日

主たる熱源機である水冷 HP には、熱源側に熱源水蓄熱槽を介して地中熱交換器(深さ 100 m ダブル U チューブ型)が接続された。空冷 HP は補助熱源として機能し、熱源水蓄熱槽の上部蓋に挿入された配管を通して冷水を供給する。水冷 HP で製造した冷水は実験室内に設置されたファンコイルユニット(FCU)に送られ、実験室の負荷(エアコン暖房運転による)を処理する。

・ 実験手順、実験ケース

実験は1日1ケース、10 時から 17 時までの 7 時間を空調時間、17 時から翌日 10 時までは地盤回復時間として、熱源水蓄熱槽内の水温が 20℃になるように調整した。**表-2** に実験ケースを示す。実験は 2024 年 9 月～11 月に行った。地中熱ポンプの稼働率は、30 分毎の発停運転を行う 50%と、連続運転を行う 100%の 2 条件とした。室内側負荷は、FCU の出力とエアコンの設定温度を調整し、冷房負荷を模擬した。中負荷・低負荷の各条件における水冷 HP の負荷率はそれぞれ、約 0.65、約 0.30 であった。空冷 HP の稼働条件は先行研究を参考に、空冷 HP の負荷処理量を推算して 1 日 1 時間運転を行うこととした。稼働開始時間を 10 時、12 時、14 時の 3 条件とし、空冷 HP を稼働しない条件を加えた計 4 条件について行った。以上のパラメータの組み合わせにより、計 16 ケースで実験を行った。

・ 実験結果

図-3 に地中放熱量と水冷 HP 入口温度の経時変化を示す。地中放熱量は地中熱交換器の出入口温度差に流量を乗じて算出した。地中熱ポンプの稼働率 50%の間欠運転条件と同 100%の連続運転条件では、いずれも空冷 HP が稼働する 12 時台に入口温度が低下し、地中放熱量も減少するのが見て取れる。両者の比較では、間欠運転条件の方がポンプ起動時に地中放熱量が大きくなることで入口温度が上昇する様子が確認でき、実験終了時の入口温度は約 2.3℃高くなった。

・シミュレーションモデルの構築

LCEM ツール Ver.3.10 を用いて従来地中熱と本システムのシミュレーションモデルを作成した。本システムの熱源水蓄熱槽のモデル化に当り、実験と同様の完全混合としたケースと、より高効率と予想される温度成層としたケースを検討した。**図-3** に示すとおり、完全混合モデルのシミュレーションによる水冷 HP 入口温度は概ね実験結果を再現し、良好な精度が得られたことから、これらのモデルを用いて連続稼働時の評価を行うこととした。このとき、ポンプの発停は先行研究を参考に、**図-4** のフローに基づき判定した。

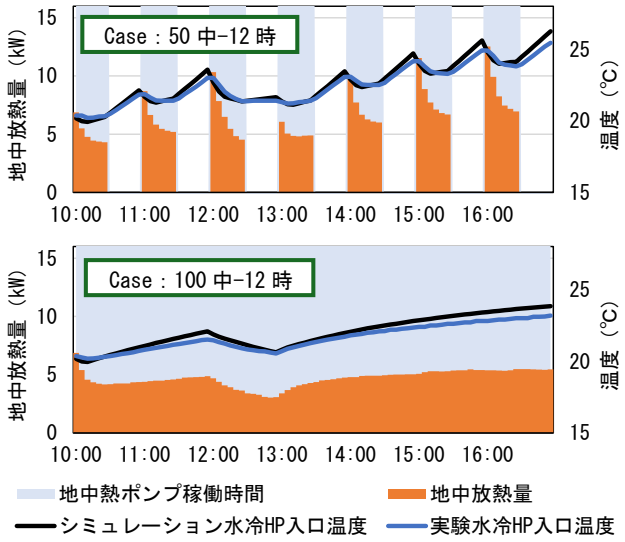

図-3　地中放熱量と水冷 HP 入口温度の経時変化

◆ ロバスト性・再エネ性評価

本システムのロバスト性を、負荷率によらず地中放熱量を低減できるか、を指標として評価する。**図-5** に各ケースの 1 ヶ月の積算地中放熱量を示す。中負荷時は、ポンプ間欠運転を行うロバストの 2 条件において、従来方式に比べ地盤放熱量は 36～38%削減した。ロバスト有では、温度成層モデルのほうが完全混合モデルより、熱源水蓄熱槽から地盤に供給される水温が高くなるため、地中放熱量としてはやや大となった。従来方式に比べた、ポンプ稼働時間の短縮は 7%程度と比較的小さかったことから、これらの地中放熱量の低減は空冷 HP の稼働による効果が大きいといえる。低負荷時は、中負荷の場合よりさらに、ロバスト有における地中放熱量の低減効果は向上した。これはポンプ稼働時間の短縮による効果が大きいといえる。特に、温度成層モデルの場合、ポンプ稼働時間は 72%短縮でき、空冷 HP の効果と合わせると地盤放熱量は 81%低減となった。これより、ロバスト性の観点では、熱源水蓄熱槽を介したポンプ間欠運転と空冷 HP の稼働の有用性が示された。

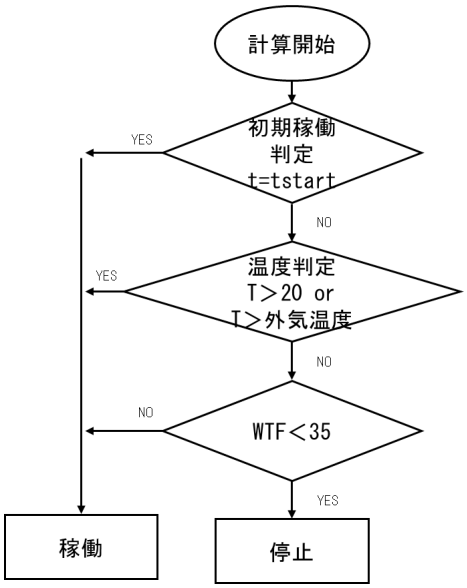

図-4　ポンプ発停フロー

続いて、再エネ性について、システム全体の消費電力量（**図**

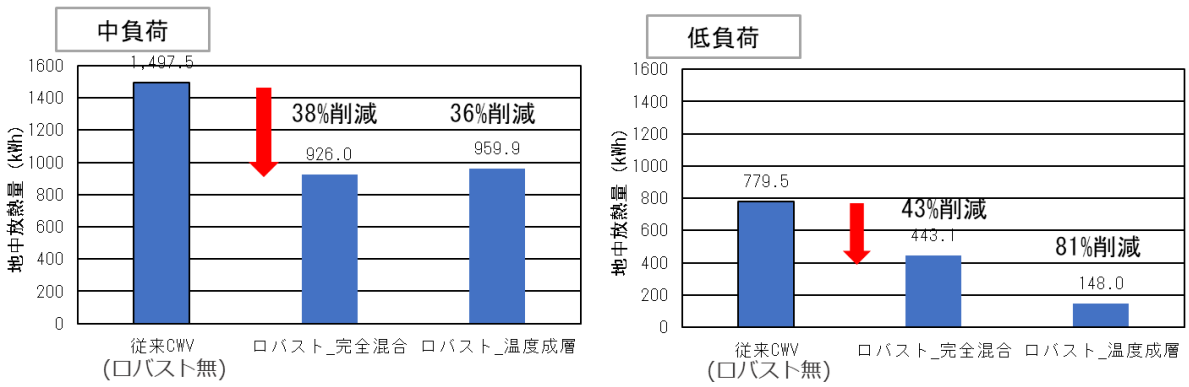

図-5　積算地中放熱量によるロバスト性評価

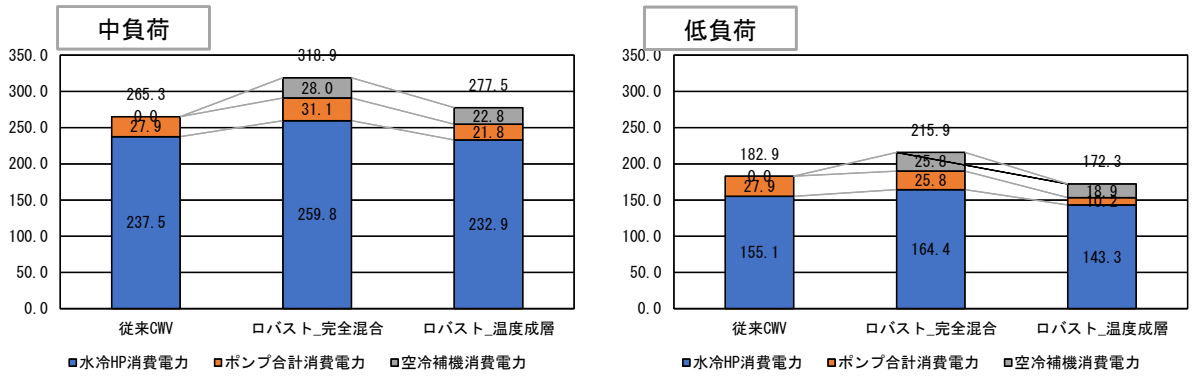

図-6　システム全体消費電力量の比較

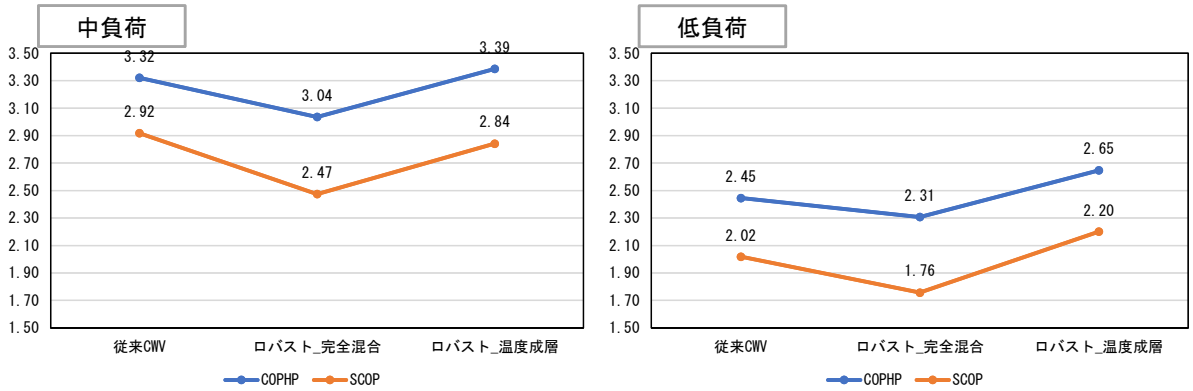

図-7　システム効率 SCOP による再エネ性評価

-6)とエネルギー効率(SCOP)(**図-7**)で評価する。消費電力量について、中負荷時にはロバスト_完全混合では従来方式に比べて、水冷 HP、ポンプ、空冷 HP のいずれもエネルギー増となり、混合損失の影響が大きかった。一方、ロバスト_温度成層では、低温の熱源水を水冷 HP に供給できるため、水冷 HP の電力量は減少した。しかし、空冷 HP の電力を含めると、従来方式より 4.6%増エネとなった。低負荷においても、ロバスト_完全混合では水冷 HP の電力量が増加となり、ポンプ稼働時間の短縮効果は相殺された。一方、ロバスト_温度成層では、水冷 HP、ポンプの両方で省エネ効果が認められ、システム全体としても従来方式より 5.8%の省エネを達成した。SCOP では、COP_{HP}、SCOP ともに、ロバスト_完全混合が最も低く、混合損失の影響と考えられる。ロバスト_温度成層では、低負荷時は従来方式より高い SCOP を達成した。以上より、再エネ性の観点では、電力の一次エネルギー換算係数を 2.4 とすると、SCOP で少なくともこれを上回る必要があるが、今回の結果はそこに至らなかった。最新機種のヒートポンプでは、低負荷時にも高い COP を発揮するため、システム設計の最適化により今後の再エネ性の向上は期待できるといえる。

表-3　初期費用試算結果

概算工事費(中負荷)

名　称	従来	ロバスト
(熱源設備)		
地中熱ヒートポンプ、補機類	3,500	3,500
地中熱交換器	11,200	10,600
補助ヒートポンプ、蓄熱タンク	0	2,500
設備工事	4,300	4,200
付帯工事、諸経費	6,000	6,300
小計	25,000	27,100

◆　コストパフォーマンス評価

コストパフォーマンス評価のため、水冷 HP の能力を 22kW、熱源水蓄熱槽を 3ton として初期コストを試算した(**表-3**)。従来システムと比べ、本システムでは補助 HP や蓄熱タンクが追加となるものの、地中熱交換器や熱源水配管工事、不凍液、土工事などの設備工事においてコスト低減の可能性が示された。しかしながら、今回の計算ではランニングコストの低減が充分でなかったため、地中熱交換器の本数がほとんど変わらず、当初想定した初期コスト低減には至らなかった。

◆ 今後の課題

以上より、今後の課題として、ひとつは熱源水蓄熱槽内の水温改善がある。実験では、内部がほぼ完全混合状態となったが、仕切り等の工夫により温度成層を促し、より低温な状態でヒートポンプに送れるようになり、結果として省エネ性の向上につながると考えられる。しかし、今回のシミュレーションでは温度成層モデルにおいても、低負荷時では省エネ効果が得られたものの、中負荷域では依然として従来システムより増エネとなった。今後はポンプ制御の見直しや、より長期間のシミュレーションでの検討が必要である。また、実験で用いたヒートポンプは低負荷時の効率が低かったが、近年の機器ではかなり改善されているため、今後はそれを踏まえた検討も必要である。

4. おわりに

本研究では、ロバスト地中熱空調システム開発に向けた基礎データを獲得した。空冷ヒートポンプによる補助運転は地盤への過大な放熱を抑制するのに有効である様子が示された。温度成層ができにくい、簡易な蓄熱タンクであっても、ポンプの発停制御が有効であったことは、地中熱ヒートポンプの搬送動力低減の観点からは意義が高いと考えられる。一方で、蓄熱槽内部が完全混合となることで、地中や空冷ヒートポンプによる低温の冷水が加温されてヒートポンプに供給され、そのことによるヒートポンプの COP に対する影響が大きかった。今後は熱負荷に対する槽容量の設計をより詳細に考えることで、ロバスト性のみならずシステム全体の省エネにも寄与するシステム構築につなげていきたい。

5. 本研究の今後の計画

熱源水蓄熱槽は、今後の再エネ普及により予想される、昼間の余剰電力を吸収するバッファとしての機能も期待できる。本研究では空冷 HP の稼働時間は 1 日 1 h としたが、電力料金が安価な時間帯に積極的に空冷 HP を稼働できれば、コストパフォーマンスの向上につながると考えている。

6. その他

(1)出願特許(タイトル・出願番号・発明者・特許権者など)

なし

(2)投稿論文(タイトル・学会名等)

地中熱ヒートポンプにおけるロバスト型熱源水蓄熱システムの有効性に関する検討・日本建築学会中国支部研究発表会、2025.3

(3)本研究会の参加企業・団体名

広島大学、ミサワ環境技術株式会社、呉工業高等専門学校