

エネルギー自立型サスティナブル研究施設 ー天井型パーソナル空調機による排熱利用の 冬期予熱運転検証ー※

スレスタミサン・市川侑
齋藤雅浩・木村健太郎
清水昭浩・柴田克彦
鵜飼真成^{*1}・田辺新一^{*1}

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center - Verification of Personal Air Conditioner Preheating Using Waste Heat in Winter -

Mishan Shrestha・Yu Ichikawa
Masahiro Saito・Kentarō Kimura
Akihiro Shimizu・Katsuhiko Shibata
Masanari Ukai・Sin-ichi Tanabe

高砂熱学イノベーションセンター（TIC）では、個人によって変動する人体負荷をパーソナル空調機で処理を行う、タスクアンドアンビエント空調システムを導入している。本研究では、地下水を冷熱源とした冷房専用機である天井型パーソナル空調機（DCFCU）を、バイオマス CHP 排熱による排温水を熱源としたアンビエント空調の予熱運転として活用し、温熱環境・快適性・省エネルギー性の評価を行った。その結果、外調機の立ち上がり負荷が軽減され、温熱環境と快適性、省エネルギー性が向上されることが示された。

1. はじめに

高砂熱学イノベーションセンターでは、再生可能エネルギーの地下水やバイオマス CHP（Combined heat and power）の排温水を外調機やパーソナル空調機で積極的に活用することで、消費エネルギーを抑えながら執務者個人の快適な温熱環境を作り出している²⁾。既報³⁾では、夏期や冬期のピーク負荷時に、本施設向けに開発された天井設置型の直流ファン付きコイルユニット（天井型パーソナル空調、以下 DCFCU と称する）を一括で複数台運転させることで、執務室におけるアンビエント環境改善と消費エネルギー削減の両立が可能であることを示した。

本報では、冬期における更なる暖房立上り負荷の削減を目指し、DCFCU や放射パネルの運転方法や送水温度などをパラメータとした運用検証を行い、室内環境や快適性、消費電力量を分析した結果を報告する。

2. 実測概要

図 1 に今回の検証対象エリア、表 1 に主な予熱運転を含む排温水利用時間を示す。実測は、DCFCU が 57 台設置された執務室 2-1、及び 38 台設置されたワイガヤを対象とし、バイオマス CHP の排温水を利用した

※本論文は、2024 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文¹⁾を加筆修正したものである。

*1 早稲田大学創造理工学部建築学科

予熱運転実験は2024年1月15～25日に実施した。本施設のメインオフィスとなる執務室2-1では、外調機運転に加え、①DCFCU+放射パネルの組合せ運転、②放射パネル単独運転、③DCFCU単独運転、④非稼働の計4条件、放射パネルの無いワイガヤでは、外調機運転に加え、①DCFCU一括運転、②DCFCU非稼働の2条件とした。DCFCUや放射パネルの運転日は、送水温度を45℃と35℃の2条件に設定し、予熱運転時間は外調機運転時間（8:00～18:00）前の5:30～7:30とした。

写真1に、熱画像の測定状況を示す。DCFCUからの吹出し気流を可視化し、到達距離を確認するため、DCFCU直下に天井から床まで垂直方向に3mのフィルタを設置した。DCFCUとフィルタの前面には、人体の模擬負荷としてサーマルマネキンを着座で設置し、頭部が画角に入るようにサーモカメラを設置し10分間隔で定点撮影した。なお、着衣量（clo値）に関しては事前に冬期の着衣状態で計測を行った。本検証の評価項目は、室内温度や熱画像、執務者アンケート、予想平均温冷感申告（PMV）に加え消費電力量とした。

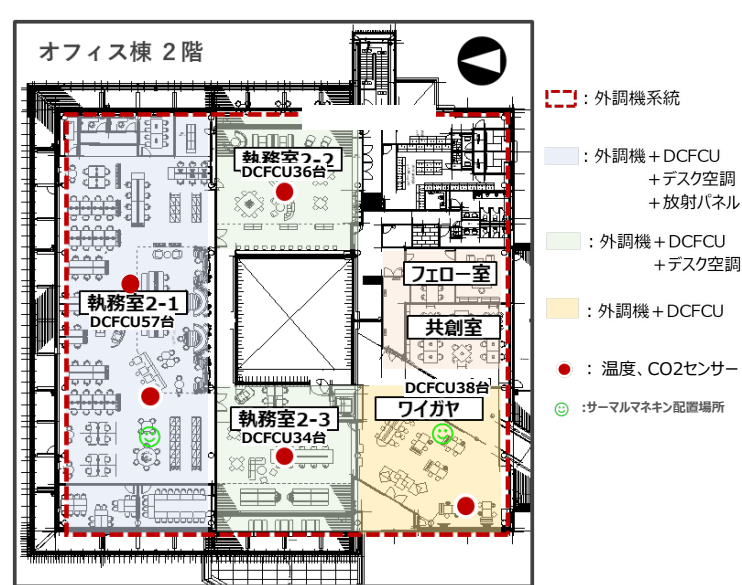


図1 検証対象エリア

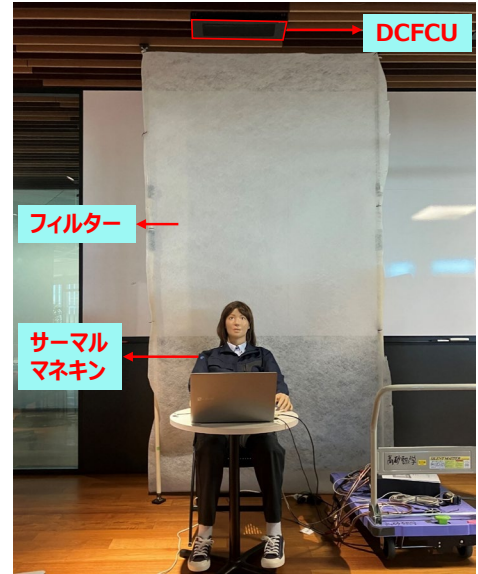


写真1 熱画像測定状況

表1 冬の送水温度と運転時間

2024年1月		17(水)	18(木)	19(金)	22(月)	23(火)	24(水)	25(木)
		送水温度：45℃			送水温度：35℃			
執務室2-1	DCFCU	5:30～7:30	-	5:30～7:30	5:30～7:30	5:30～7:30	-	5:30～7:30
	放射パネル		5:30～7:30	-	8:45～17:30		5:30～7:30	-
ワイガヤ	DCFCU	5:30～18:00	5:30～7:30	5:30～7:30	8:45～17:30	5:30～7:30	5:30～7:30	5:30～16:00

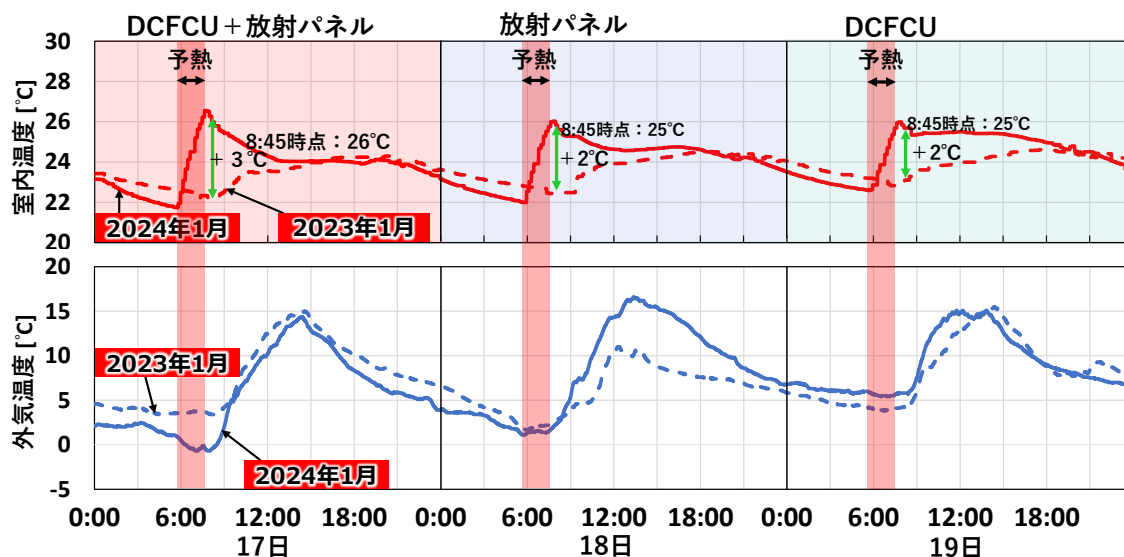
※5:30～7:30: 予熱時間、就業時間(コアタイム): 8:45～17:30

3. 実測結果

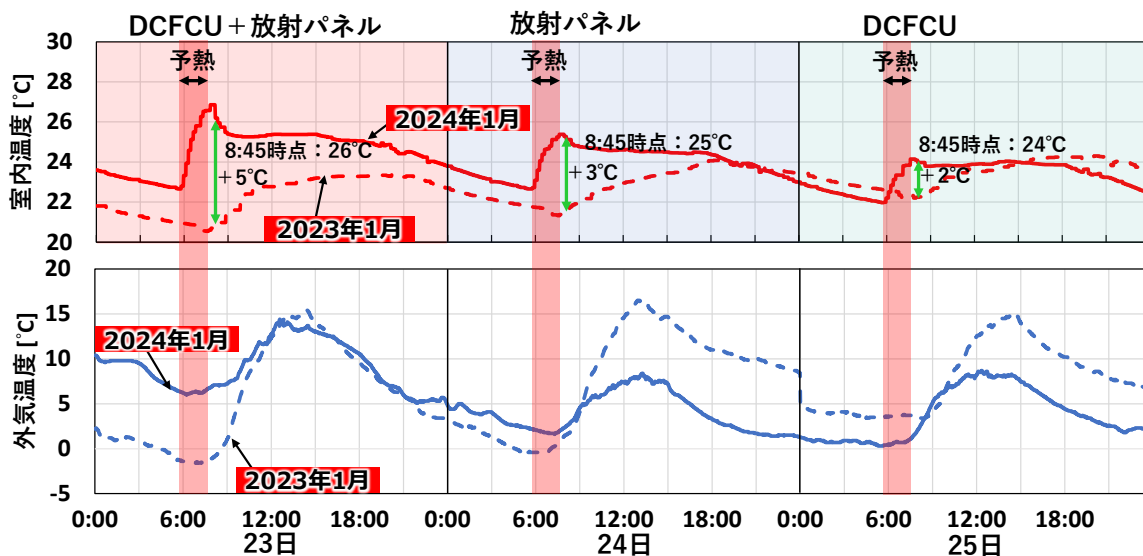
3.1 室内代表温度

図2に執務室2-1のDCFCU予熱運転による室内代表温度の経時変化について、予熱運転を行っていない2023年と予熱運転を行った2024年を比較して示す。2024年は予熱運転を行った条件で、(a)は送水温度45℃、(b)は送水温度35℃の結果を示す。2024年のデータは同じ日付の外調機運転のみの結果を示す。5:30～7:30の予熱運転を行った2024年は、各条件共に室内温度が上昇し、就業開始の8:45時点において、(a)の送水温度45℃の場合DCFCU+放射パネル運転時では約26℃、放射パネルのみとDCFCUのみでは約25℃とな

った。また、(b)の送水温度 35℃の場合、8:45 時点で DCFCU+放射パネルでは 26℃、放射パネルのみでは 25℃、そして DCFCU のみでは 24℃となった。DCFCU や放射パネルを運転していない 2023 年では、室温が 23℃程度まで上昇するのに時間を要していたが、DCFCU の予熱運転により就業開始時点で快適な温度域に達することが可能となった。



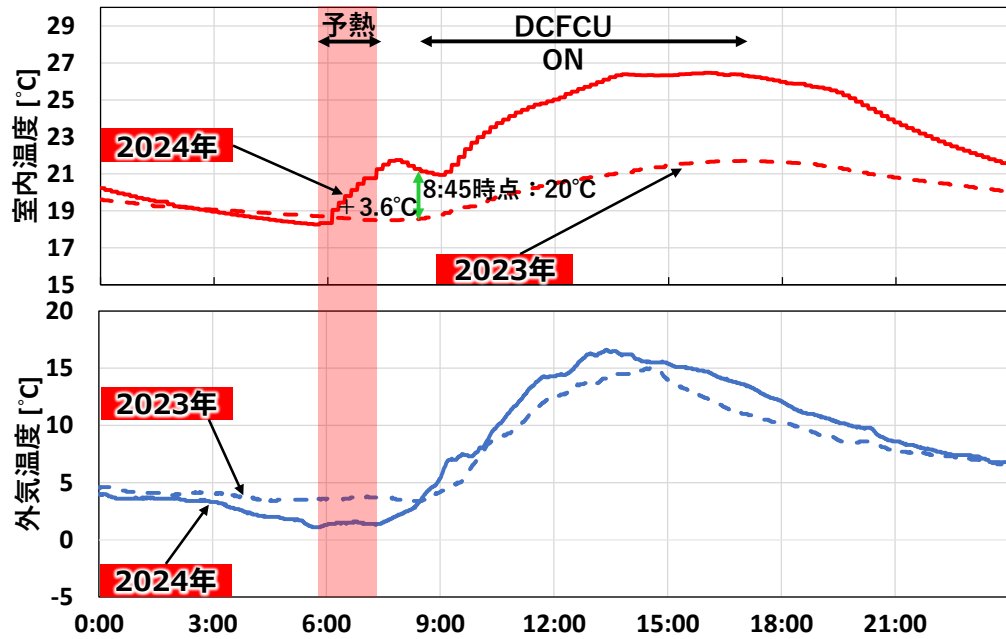
(a) 送水温度 45℃



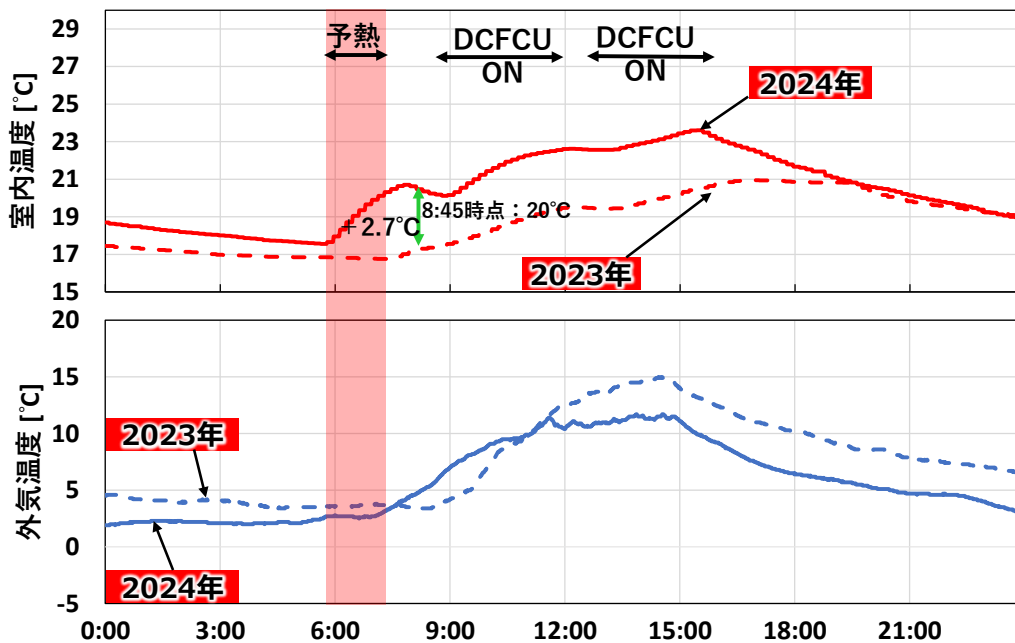
(b) 送水温度 35℃

図 2 執務室 2-1 の温度経時変化

図 3 にワイガヤの DCFCU 予熱運転による室内代表温度の経時変化を年度で比較して示す。5:30～7:30 まです予熱運転を行ったところ、就業開始の 8:45 時点で送水 45℃の場合は室温が 21℃、送水 35℃の場合は室温が 20℃程度となった。ここで、ワイガヤは吹抜けと同一空間のオープンエリアで、直天上のため外気の影響を受けやすい空間となっており、冬期の室内温度はクローズドエリアである執務室 2-1 より低い傾向にある。9:00 頃に室温が低下し DCFCU を再稼働したことで温度が徐々に上昇している。ワイガヤは予熱運転に加え、就業時間帯（コアタイム）に DCFCU を運転することで快適な執務環境が維持できること確認した。



(a)送水温度 45°C



(b)送水温度 35°C

図3 ワイガヤの温度経時変化

3.2 熱画像による給気到達距離

図4に執務室2-1における熱画像の温度変化を運転条件別に比較して示す。上段に示す送水温度 45°Cの時に、DCFCU+放射パネル及びDCFCU一括運転時は、給気された温度と周囲との温度差が大きいため室上部で熱が滞留する傾向が見受けられ、サーマルマネキンの頭部（FL+1300 mm）付近まで給気が到達しない傾向が見られた。一方、下段に示す送水温度が 35°Cの時では、給気と周囲との温度差が軽減し、サーマルマネキンの頭部（FL+1300 mm）付近まで給気が到達していることを確認した。DCFCUと放射パネルを送水温度 45°Cで運転した条件では、室内が非常に高温環境となり、執務者からの要望で外調機のみ

の運転に変更した。また、送水温度 35℃で運転した場合にも、室温が 24～26℃程度となっており、省エネルギーと快適性の両立には更なる送水温度の調整は必要であるが、クローズドエリアの執務環境改善に効果が大きいことを確認した。

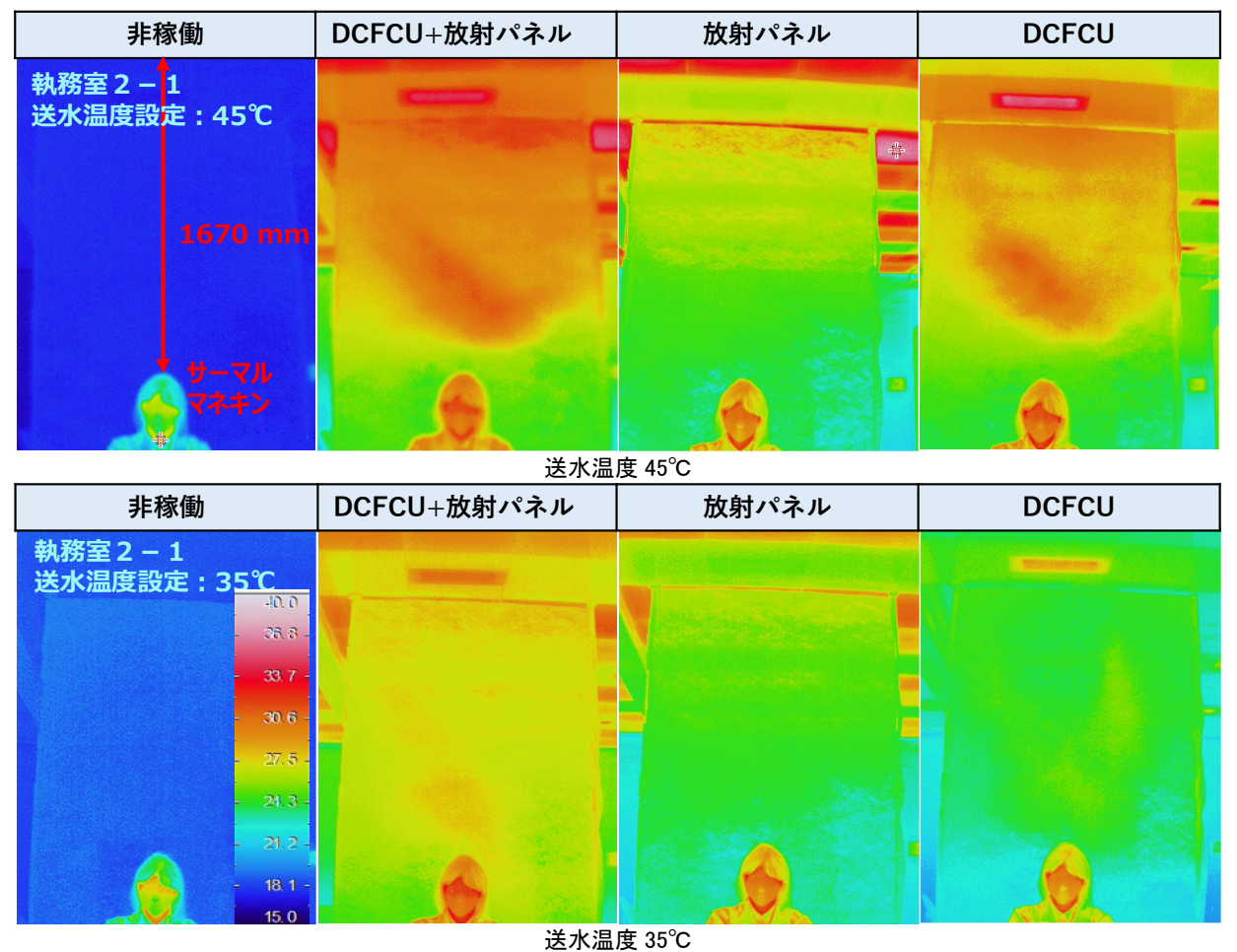


図 4 執務室 2-1 の各ケース別熱画像比較

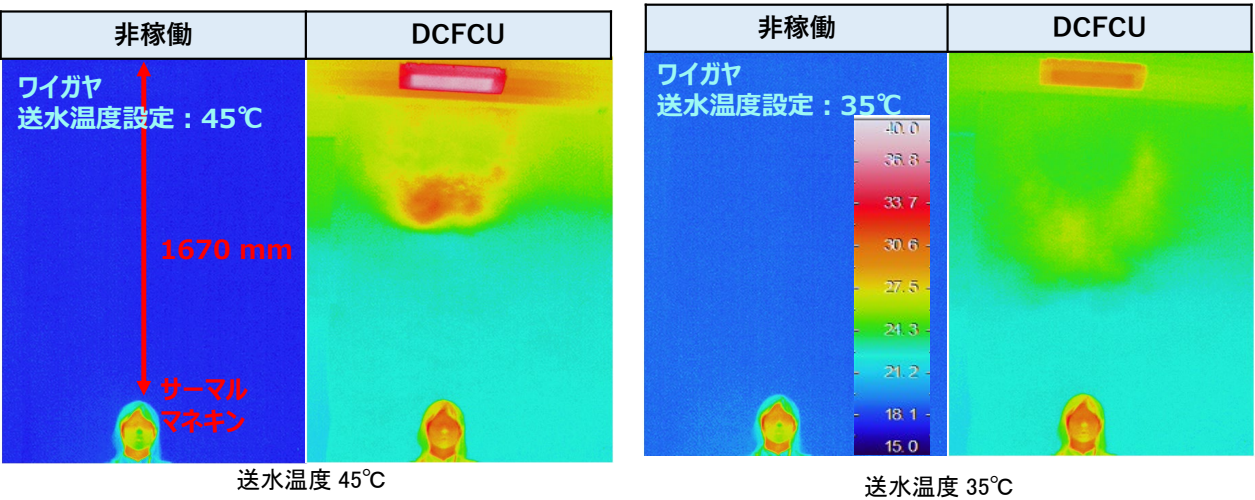


図 5 ワイガヤの送水温度別熱画像比較

図5にワイガヤにおける温度変化を熱画像により、運転条件別に比較して示す。執務室2-1と同様に、送水温度45℃時にDCFCUを運転した場合には熱が上部滞留する傾向が見受けられた。一方、送水温度35℃で運転した場合には、サーマルマネキンまで給気は到達しないものの、室中央高さ付近まで給気が到達していることを確認した。

3.3 空気質環境

これまで冬期のコアタイムの空調は、外調機を主体とし、室内の温熱環境に応じて風量を可変していたが、DCFCUは循環型空調機のためDCFCUを主体運転とした場合、室内の空気質環境の悪化が懸念された。そこで、外調機が必要最小風量で制御しながらDCFCUが運転した日において、室内の空気質を確認した。

図6に空気質の要因のひとつであるCO₂濃度について、経時変化を部屋別に示す。CO₂濃度は、各室共に1,000ppm以下で推移し、空気質環境に問題が無いことを確認した。

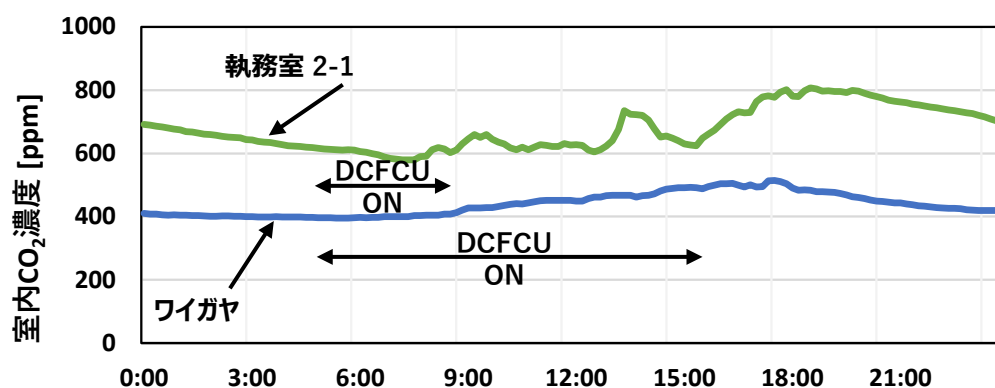


図6 DCFCU 予熱運転日のCO₂濃度経時変化

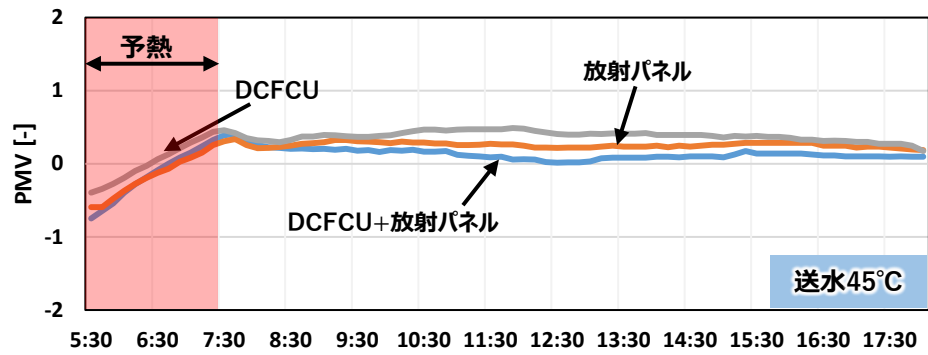
4. 快適性評価

4.1 PMV

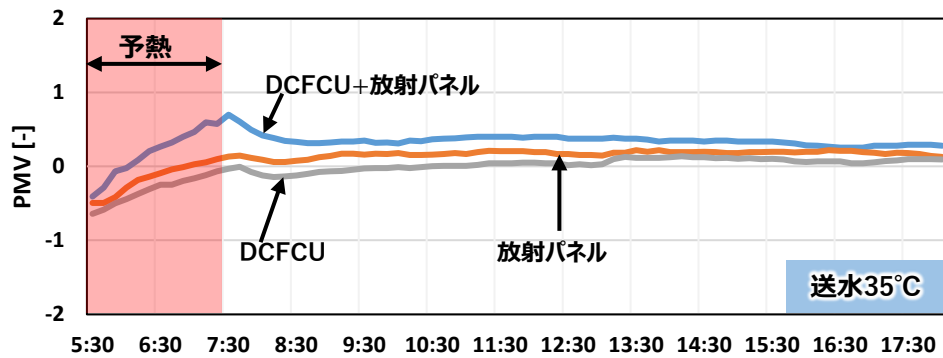
図7に、DCFCUによる予熱運転の実施日の執務室2-1のPMV経時変化を示す。ここでPMVは、空気温度、グローブ温度、相対湿度の着座高さ（FL+600mm）の実測値に加え、着衣量は0.73clo、代謝量は1.2met、風速は0.10m/sと仮定して算出した。DCFCUの予熱運転を開始すると、PMVが快適であるニュートラルゾーン（-0.5～+0.5）に向けて上昇する傾向が見られた。予熱運転完了後はPMVに大きな変動は見られず、送水温度45℃と35℃両設定において、コアタイムの平均PMVが-0.5～+0.5の快適範囲内で推移した。

図8にワイガヤのPMVの経時変化を示す。送水温度35℃の時は、午前中のPMVが快適範囲外となった。これは、始業後にDCFCUを停止したため室温が低下した影響と想定される。外気影響の大きい部屋において、厳冬期ではコアタイムにもDCFCUを運転させることで、室内温度が上昇し、PMVを向上させることが可能である。

表2に執務室2-1とワイガヤの各条件における予熱運転時とコアタイムのPMVの平均値を示す。外気影響の大きいワイガヤでは送水温度が高いほどPMVは良好な結果を示したが、執務室2-1では、送水温度によるPMVに大きな違いは見られなかった。これは、熱画像でも示されたように、給気と周囲との温度差が小さいほど給気が室下部まで到達し、PMVの向上に寄与した影響と考えられる。



(a) 送水温度 45°C



(b) 送水温度 35°C

図7 執務室 2-1 における PMV 評価

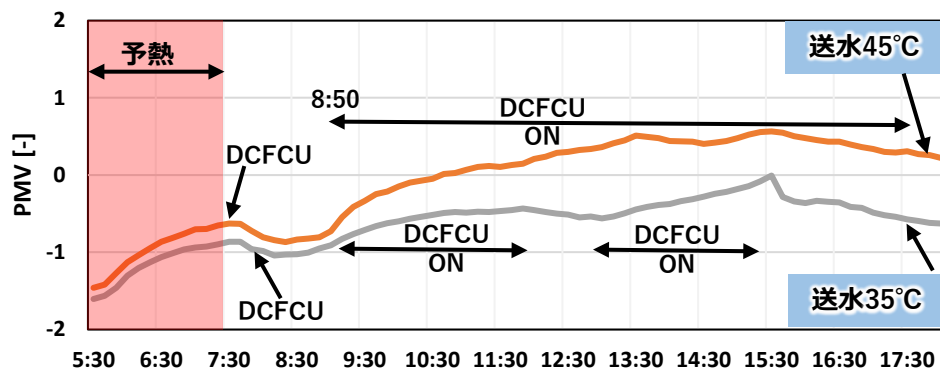


図8 ワイガヤにおける PMV 評価

表2 PMV 平均値

エリア	執務室2-1						ワイガヤ	
	45°C			35°C			45°C	35°C
実測代表日	17日	18日	19日	23日	24日	25日	17日	25日
PMV(5:30~7:30)	-0.1	-0.1	0.1	0.2	-0.1	-0.3	-0.1	-1.2
DCFCU	○	×	○	○	×	○	○	○
放射パネル	○	○	×	○	○	×	×	×
PMV(7:30~18:00)	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	0.0	0.1	-0.5
DCFCU	×	×	×	×	×	×	○	○
放射パネル	×	×	×	×	×	×	×	×

○:運転、×:停止

4.2 執務者アンケート調査の結果

予熱運転の効果を確認するため、執務者によるアンケート調査を実施した。図9に予熱運転未実施日と送水温度 35℃で運転実施日の就業開始時（8:45）での温冷感申告結果を比較して示す。予熱運転未実施日ではどちらでもない～暖かい側の申告が 55%とだったのに対して、予熱運転実施日では、93%に向上した。

図10にコアタイムの温熱環境満足度結果について、DCFCU 予熱運転の有無別に比較して示す。ASHRAE⁴⁾ 基準によると、少なくとも 80%の人が快適と感じれば、それが快適な熱環境とみなされるが、予熱運転を実施した日の満足度は全体で 94%となり、多くの執務者にとって快適性が向上したことを確認した。なお、図10における不快要因としては、執務エリアの違いや個人の着衣量や活動レベルが異なるためと想定される。

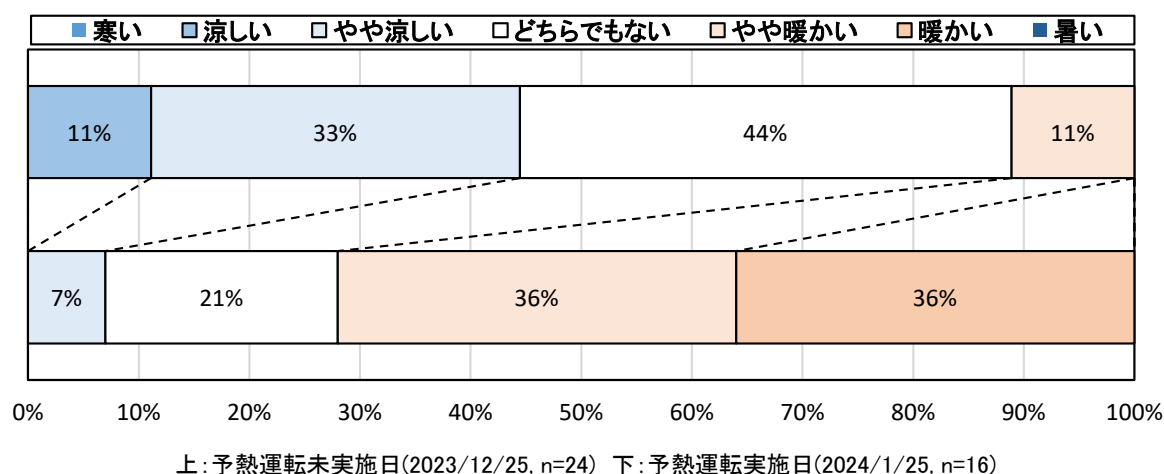


図9 就業開始時 (8:45)の温冷感

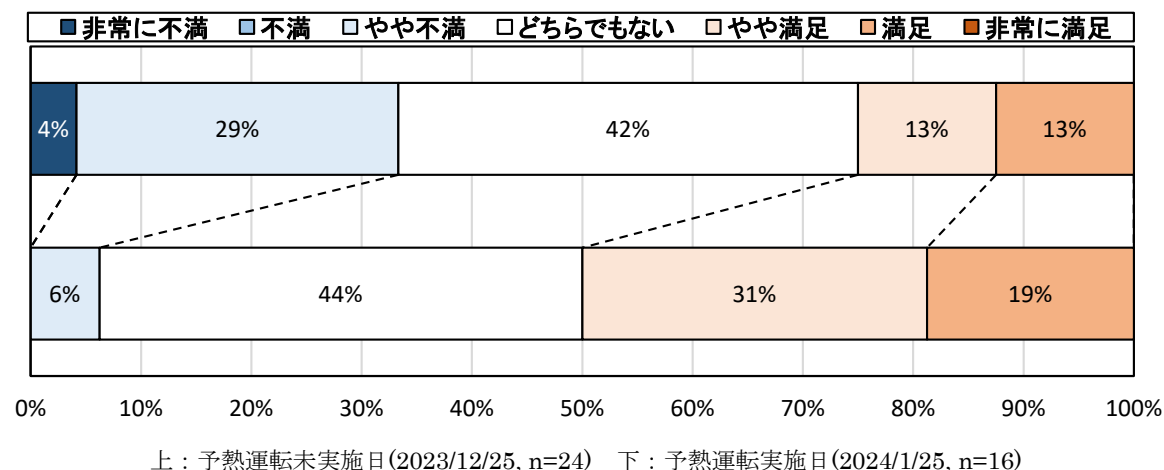


図10 コアタイムの温熱環境満足

5. 予熱運転の省エネ性評価

予熱運転による空調は、執務者の快適性だけでなくエネルギー消費量削減も重要な課題である。そこで、暖房期間（2023 年 1 月～2 月）において、中央監視データを用い、予熱運転の省エネルギー性について評価した。図11(a)に送水温度 35℃で DCFCU により予熱運転を実施した代表日（2024 年 1 月 24 日、5:30～

18:00) の消費電力量について、予熱運転を導入する前の 2023 年 (1 月 25 日、5:30~18:00) と比較して示す。予熱運転時間は、2023 年より消費電力量は増加するものの、コアタイムでは外調機の搬送動力が大幅に削減し、1 日の消費電力量が 2023 年と比較し約 32%削減した。従来は設定温度まで上昇させるため外調機を定格風量で運転する必要があったが、予熱運転によりコアタイムでも少風量で室内温度を維持できたことが主要因である。

図 11(b)に冬期 2 ヶ月間 (1 月、2 月) の積算の消費電力量を 2023 年と比較して示す。予熱運転を実施した 2024 年は、未実施年の 2023 年と比較し、ポンプの消費電力量は増加するものの、外調機の電力量が大幅に減少し、総合的には約 28%の電力量を削減できた。

以上より、循環型の DCFCU を主体的に暖房利用することで、外調機単独運転よりも省エネルギー性を向上できることが示唆された。

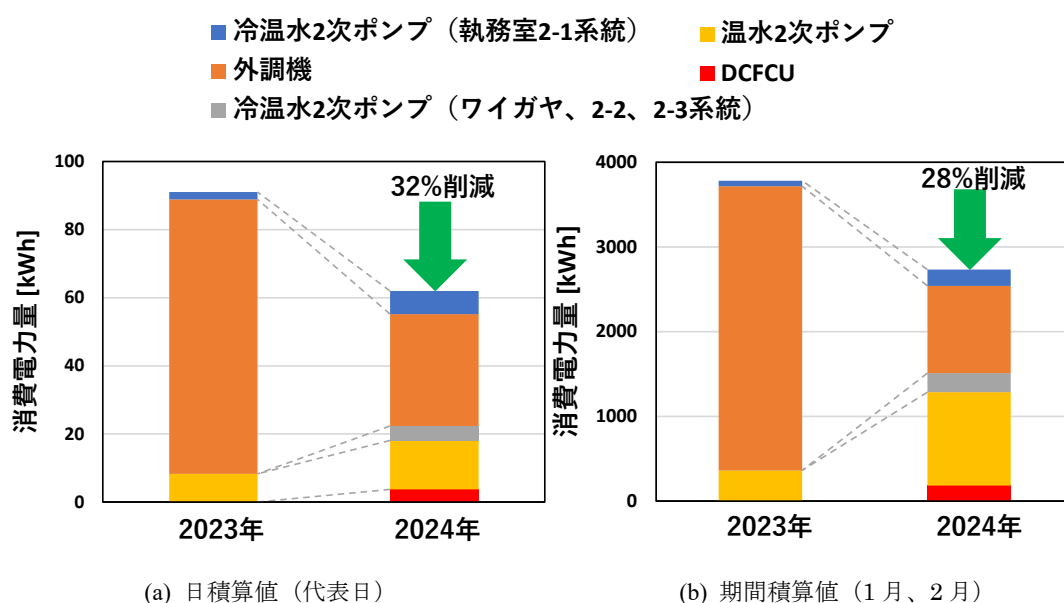


図 11 予熱運転による消費電力比較結果

6. おわりに

本報では、バイオマス CHP 排熱による排温水を利用した DCFCU による予熱運転の検証結果を示し、室内環境改善や外調機搬送動力の低減など、快適性と省エネルギーの両立が可能であることを確認した。一方で、本施設では再生可能エネルギーであるバイオマス CHP の排熱を使用しているが、ヒートポンプなどの電気や化石燃料等で暖房を行う場合には、送水温度の上昇は消費エネルギーの増加に繋がるため、送水温度の最適化を検証していきたい。

文 献

- 1) スレスタ ミサン,市川 侑,齋藤 雅浩,木村 健太郎,清水 昭浩,柴田 克彦,鵜飼 真成,田辺 新一: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価 (第 35 報) 天井型パーソナル空調機による排熱利用の冬期予熱運転検証,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp121-124, 2024.
- 2) 木村 健太郎,平原 美博,清水 昭浩,柴田 克彦,羽鳥 大輔,武藤 友香: エネルギー自立型サステナブル研究施設の

計画と実証評価（第 5 報）二次側空調機器の開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp161-164, 2020.

- 3) 市川 侑, スレスタ ミサン, 齋藤 雅浩, 木村 健太郎, 清水 昭浩, 柴田 克彦: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価（第 34 報）天井型パーソナル空調機のアンビエント空調利用, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp117-120, 2024.
- 4) ASHRAE; Thermal environmental conditions for human occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-2020, 2022.

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering Innovation Center (TIC) uses renewable energy to operate personal and ambient air conditioning systems. This study aims to evaluate the thermal environment, thermal comfort, and energy-saving in TIC equipped with a personal air conditioning system, DCFCU. Preheating was conducted under DCFCU operation, which uses the waste heat of biomass CHP and groundwater. The evaluation was then done under supply water temperature setting conditions of 35°C and 45°C. The results showed that the thermal environment and comfort were improved saving the energy effectively when the DCFCU was operated using the exhaust heat of biomass CHP.
