

エネルギー自立型サステナブル研究施設 —天井型パーソナル空調機のアンビエント空調利用—※

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

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center - Ambient Air conditioning Using Ceiling-type Personal Air Conditioner -

Yu Ichikawa・Mishan Shrestha・Masahiro Saito
Kentaro Kimura・Akihiro Shimizu・Katsuhiko Shibata

オフィスの空調負荷は、夜間の非空調時に躯体へ蓄熱された負荷を処理するため、朝方の空調立ち上がり時が最も大きくなる。特に厳冬期となる正月休み明けでは、氷点下近い外気により冷えきった壁や床などの躯体に対し、熱容量の小さい空気では昇温させるのには非常に時間がかかり、本施設でも同様の傾向がみられた。そこで、本施設では、余剰で大気開放していたバイオマス CHP の排熱を 2 次側のパーソナル空調機や輻射パネルに適温で利用できるようにシステムを変更した。加えて、本施設向けの天井設置型パーソナル空調機として開発された直流ファン付きコイルユニット (DCFCU) を一括で全台運転させることで、アンビエント環境の早期改善を図った結果について紹介する。

1. はじめに

本建物の主執務室では、夏期には外調機と放射空調により除湿負荷と外皮負荷を処理しつつ、個人の行動や好みで変化する人体負荷に対してはパーソナル空調機で顕熱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、省エネと個人の知的生産性の両立を図っている^{2,4)}。一方、冬期の執務室では、内部発熱が暖房側に寄与することを想定し、外調機とペリメータ部の床暖房による空調を計画し運用していたが、想定よりも内部負荷が小さい影響もあり、省エネのために外調機の運転風量を削減することが困難な状況となっていた。また、厳冬期の長期休暇明けでは、天井裏の躯体に蓄えられた冷熱を外調機と床暖房にて昇温させるためには長時間要する状況となっており、就業開始時に所定温度に達するためには深夜時間帯からの予熱運転が必要となっていた。

そこで、冬期の室内環境改善と空調の更なる省エネを目指し、余剰となっていたバイオマス CHP (Combined Heat and Power) の排温水を適正な温度で 2 次側のパーソナル空調機や放射パネル等で活用できるようにシステム改良した。また、個人で操作する天井型パーソナル空調機 (DCFCU) を中央監視からも一括で制御できる仕組みに改良し、パーソナル空調機でアンビエント環境を整えることで室内環境を改善しながら外調機の立ち上がり負荷を軽減できた事例について紹介する。

※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。

1.1 運用状況

図1に執務室の空調システムを示す。執務室ではABW（Activity Based Working）を採用し、外皮や機器等のベース負荷は外調機と天井の放射パネルが処理する。フリーアドレスにより執務者の人数が変動する人体負荷に対しては、外調機で潜熱負荷を処理しながら、3種類のパーソナル空調機で個人の快適性を向上させている。放射パネルやパーソナル空調の配管系統は2管式となっており、任意のタイミングで冷暖の切り替えを行っている。

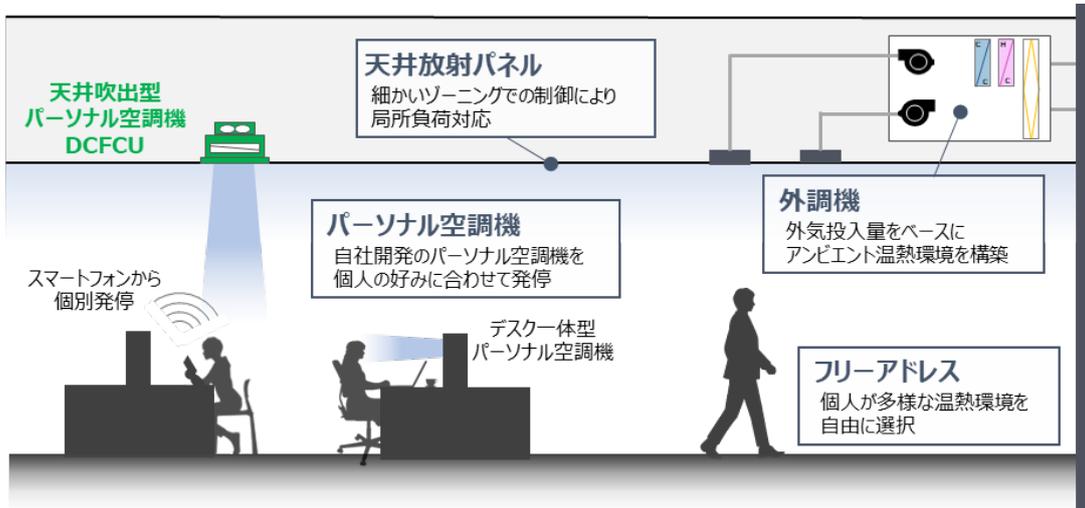


図1 執務室の空調システム

図2にオフィス棟2階の空調ゾーニングを示す。執務室2-2、2-3、ワイガヤの3室は吹抜けと一体化したオープンエリアとなっており、自然換気を長期間積極的に取り入れるため結露の恐れがある放射パネルは設置せず、外調機のみでアンビエント環境を整える仕様となっている。ここで、パーソナル空調機は冷房専用機として設計し運用していたが、冬期にバイオマス CHP の排温水を試験的に通水したところ、特にデスク型のパーソナル空調機では頭寒足熱により快適な環境が得られたため、竣工2年目以降の冬期にも排温水を通水し、通年で運用している。

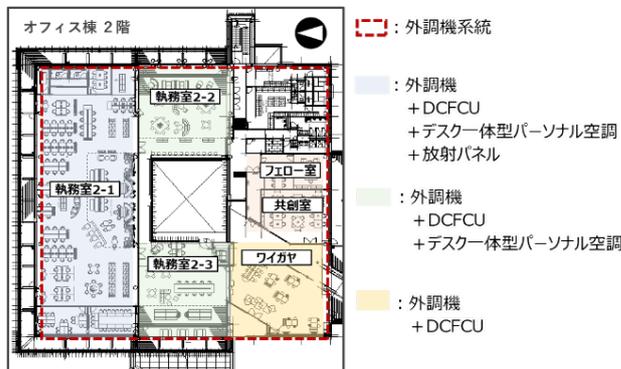


図2 オフィス棟2階空調ゾーニング

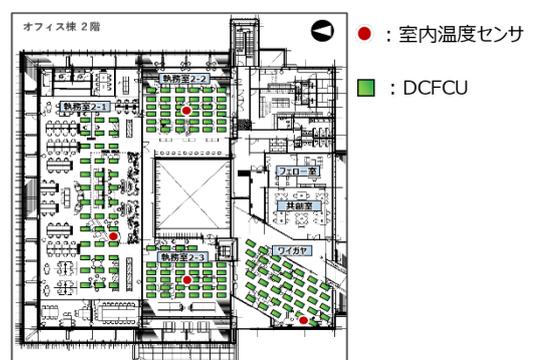


図3 オフィス棟2階DCFCU配置図

1.2 DCFCU

図3に、オフィス棟2階のDCFCU配置を示す。DCFCUは、天井ボード3枚分に当たる1.8mピッチで配置されており、執務者は、各自の端末でBluetooth信号により発停を行う。なおDCFCUは、消し忘れ防止のため30分間運転後、自動で停止するタイマー機能を有している。

表1と表2にDCFCU能力と各室DCFCU台数を示す。DCFCUの吹出しは、誘引を抑えた低速吹出し(0.9m/s)とし、周囲空気との密度差により冷気を直下の執務者に搬送し、冷涼感により快適性を高める仕様となっている。デスク型パーソナル空調機とは異なり、中間期から冬期にかけては非稼働となっていた。

表1 DCFCU能力

風量	235	m ³ /h
水量	2	l/min
定格電力	3.1	W
冷却能力	469	W
平均風速	0.9	m/s
発生騒音	37.7	dB

表2 各室DCFCU台数

系統	DCFCU台数	合計風量 m ³ /h	合計流量 l/min
執務室2-1	57	13,395	114
執務室2-2	37	8,695	74
執務室2-3	34	7,990	68
ワイガヤ	38	8,930	76
フェロー	13	3,055	26
共創室	19	4,465	38

2. 現状システムの課題抽出

2.1 長期連休後の暖房立ち上り

本建物が竣工した2020年から2022年までの冬期運用では、年始の業務開始日にはオフィス棟2階の天井躯体が長期間外気に暴露されて冷却されるため、始業開始時刻に快適な温度域まで暖房できない状況が散見された。そこで2023年1月の始業開始時では、業務開始日の前日より外調機によるウォーミングアップ運転を行った。図4に2023年1月9～10日の室内代表温度の経時変化を部屋別に示す。始業開始前日の9日11時より給気温度を40℃に設定し、各室へ約400m³/hの給気風量で運転を行った。日中は外気温度が16℃付近まで上昇したこともあり、夕刻の16時頃に空調起動時から平均で2.3℃上昇したが、外気温度の低下に伴い、外皮負荷が増大したことで18時以降室温は上昇しない結果となった。

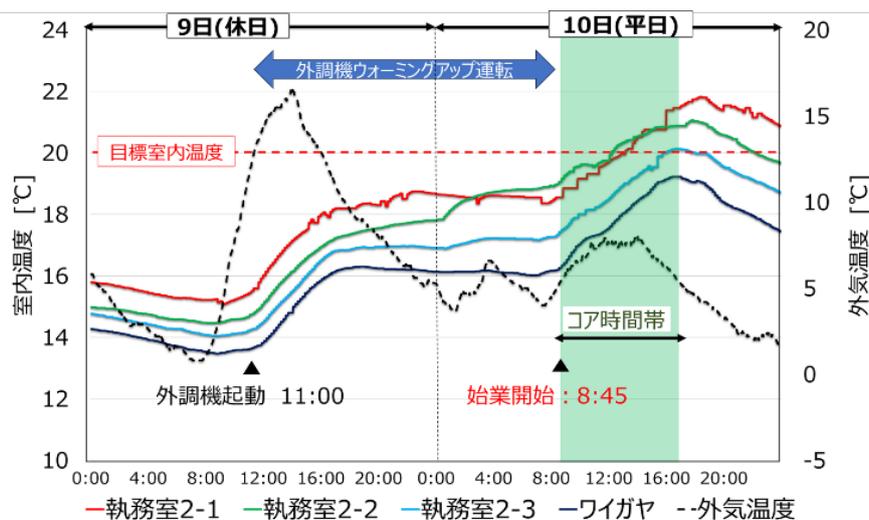


図4 年始業務開始日前後における各室温の経時変化

(2023年1月9～10日)

表 3 ウォーミングアップ運転前後の各室代表温度
(2023年1月9～10日)

各室	2023/1/9 11時 起動時	2023/1/10 8:45分 始業時	差
執務室2-1	15.5°C	18.6°C	3.1°C
執務室2-2	14.7°C	19.2°C	4.5°C
執務室2-3	14.2°C	17.5°C	3.3°C
ワイガヤ	13.6°C	16.4°C	2.7°C

表3にウォーミングアップ運転前の1月9日11時と始業開始時間である1月10日8時45分の代表温度と温度差を部屋別に示す。メインの執務室2-1では、外壁からの冷気流入を防ぐ目的でペリメータに設置した床暖房パネルに排温水を循環させていた影響で室内温度は各室より高いものの、始業開始時間である8時45分において、目標温度20°Cに対し、各室共に未達となっていた。

2.2 バイオマス CHP 排温水

図5に2023年度1月9日～10日のバイオマス排温水の空調用途利用率の経時変化を示す。当施設では、3連休以上の休業時には、無人運転であることに加え、チップ消費量を抑えるためバイオマスCHPは1台稼働としている。1台稼働時の製造熱量は約90kWで、熱交換器を介して給湯や空調系統で使用され、残りの熱は放熱FCUにて放熱している。2023年1月9日11時～10日8時45分までの排温水利用率は、空調のウォーミングアップ運転と床暖房として平均71.8%となり、排温水に余力があった。また、通常時のCHP2台運転時は放熱量が増え、更なる排温水の有効活用が望まれた。

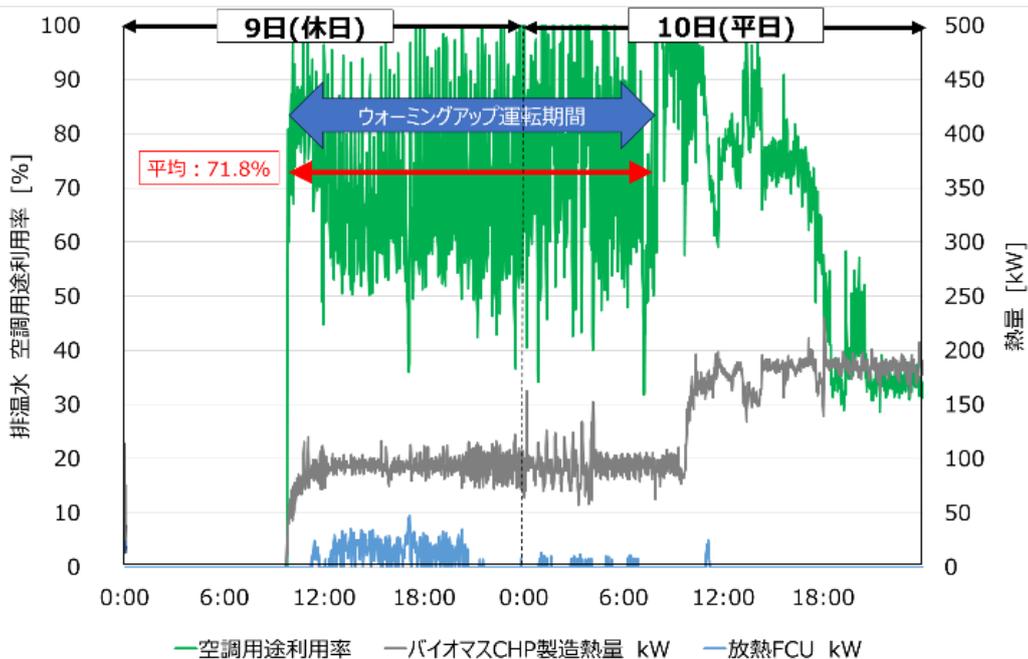


図 5 バイオマス排温水の空調利用率の経時変化
(2023年1月9～10日)

3. DCFCU のアンビエント空調利用

3.1 システム概要

現行システムを活用しながら課題解決を図るためには、パーソナル空調機として運用している DCFCU をアンビエント空調として活用することで、外調機の搬送動力を削減しつつ、能力不足を補って迅速な温度環境の改善を図れると考えた。また、バイオマス CHP の余剰排温水を有効利用のため、パーソナル空調システムへの排温水送水温度制御を導入することとした。

3.2 DCFCU 一括運転制御

図 6 に中央監視装置から DCFCU への運転信号フローを示す。執務室 2-1、2-2、2-3、ワイガヤに加え、フェロー室と共創室を含む 6 エリア計 198 台の DCFCU に対し、各エリアを一括運転できるように DCFCU の制御基板の改造を行い、それぞれの運転信号を受送信するためエリアコントローラを 6 台実装した。各コントローラは、執務室エリアの机の上に置き、対象エリアの DCFCU と無線で通信できる範囲に設置した。一括起動する方法としては 2 通り用意し、エリアコントローラ本体に付属している手動押釦か、運用管理者の PC で操作可能な中央監視装置からの指令で可能となる。また、運転管理者の無人化と手間を削減させるため、中央監視装置から RS232C ケーブルによるシリアル信号にて無線親機コントローラに起動指令を行い、その指令を受けて各エリアコントローラに対して運転指令をかける通信システムを構築することで、スケジュール運転を可能とした。

3.3 排温水送水温度制御

DCFCU や放射パネルには、当初より 17℃前後の地下水から 65～75℃程度の排温수에切替えが可能であったため、試行的に排温水を放射パネルに供給したところ、頭寒足熱とは逆に頭付近が高温の放射熱を受け、不快な環境と共に体が火照った状態となり知的生産性の低下が懸念される状況となった。そこで、冷房専用であったパーソナルシステムの熱交換器 (HE-102、HE-104) に冷暖切替機能を追加し、既存配管の切替バルブを用いて排温水を通水することで、パーソナルシステムの排温水送水温度制御を導入した。図 7 に排温水利用フロー図を示す。各システムで設定温度を変更でき、排温水利用時には 30℃～45℃の範囲での温度制御を可能とした。

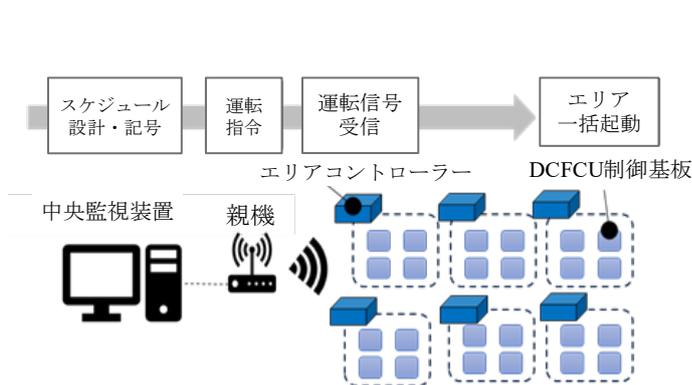


図 6 DCFCU 一括制御時の運転フロー図

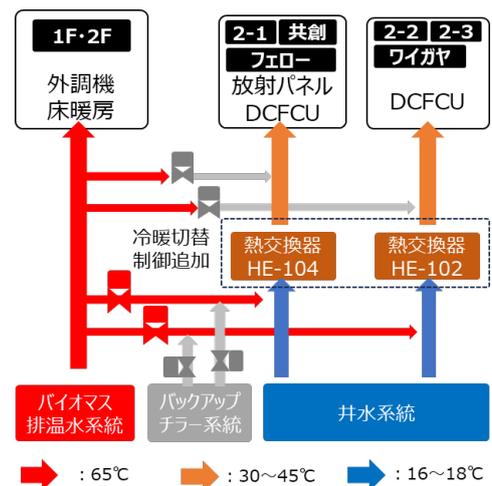


図 7 排温水利用フロー図

4. 夏期検証

DCFCU 一括運転制御の有効性を検証するため、2023 年夏期に先行してワイガヤにて一括運転機能を実装し、導入効果を検証した。図 8 に夏期冷房時に一括制御した時のワイガヤの室内温度経時変化を示す。外調機の運転条件は、給気温度 20℃、400 m³/h で一定とし、7 月 27 日 10～13 時の間、ワイガヤの DCFCU 全 38 台を一括運転した。送水温度は 18℃、DCFCU の合計風量は 8,930 m³/h となる。一括運転前の室内温度は 28℃程度であったが、一括運転後には急激に室温が低下し、起動開始から 3 時間後には 24℃まで低下した。

図 9 にワイガヤの床表面の平面温度分布を一括運転前後で比較して示す。床表面温度は、DCFCU に内蔵したサーモパイル（日本セラミック社製）による瞬時値で、天井高さ 3m の執務室では床面レベルで直径約 1.2m の範囲の平均放射温度となる。DCFCU の一括運転により、ワイガヤの全域において冷却できている。これまで外調機のみで室温制御を行っていたワイガヤは、天井が遮蔽されておらず、屋根躯体を通して外気影響が特に大きい空間だったため夏期ピーク負荷時に暑熱の課題を抱えていたが、DCFCU によるアンビエント空調利用により暑熱環境の改善を図ることができ、本システムの有効性を確認した。

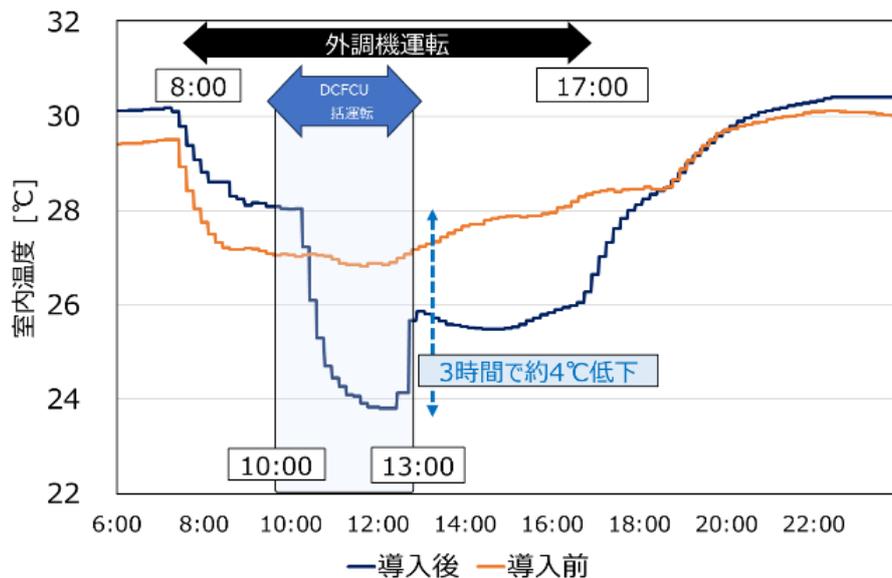


図 8 DCFCU 一括制御時のワイガヤ室内温度経時変化

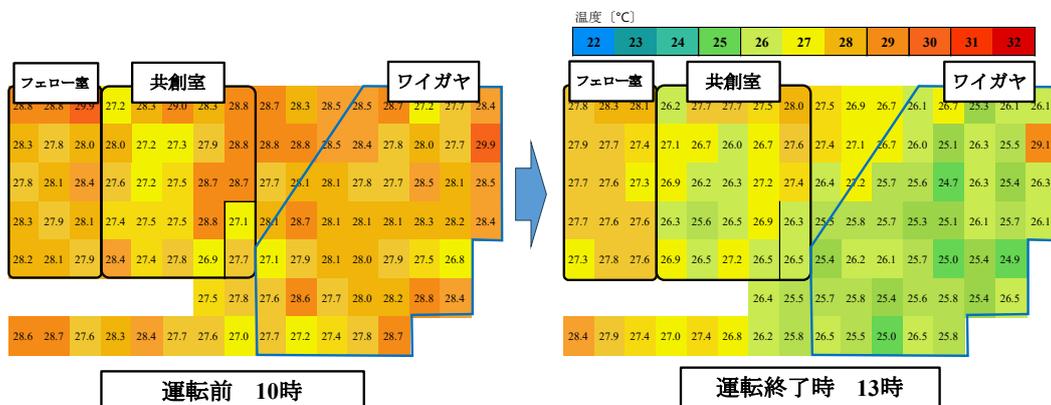


図 9 DCFCU 一括運転前後の床表面温度分布

5. 冬期検証

5.1 実験条件

冬期検証では、DCFCU 一括運転による暖房立ち上がり状況と排温水の有効利用について確認した。検証は、2024 年の業務開始日となる 1 月 9 日を対象とした。4 時 30 分から 8 時までの 3 時間 30 分間、送水温度を 45℃としてウォーミングアップ運転を行い、外調機は停止した。

5.2 実験結果

図 10 に DCFCU 一括運転時の各室の代表温度の経時変化、表 4 に各室の運転前後の代表温度を示す。前年度の 2023 年と比較し、2024 年のウォーミングアップ運転中の外気温度は約 9℃低かったが、迅速に室内温度が上昇し、始業開始時には目標の室温 20℃に達していることを確認した。これは、DCFCU により室内空気を循環させたことに起因しており、短時間での室内温度改善と同時に、外気負荷を低減できる可能性を示した。

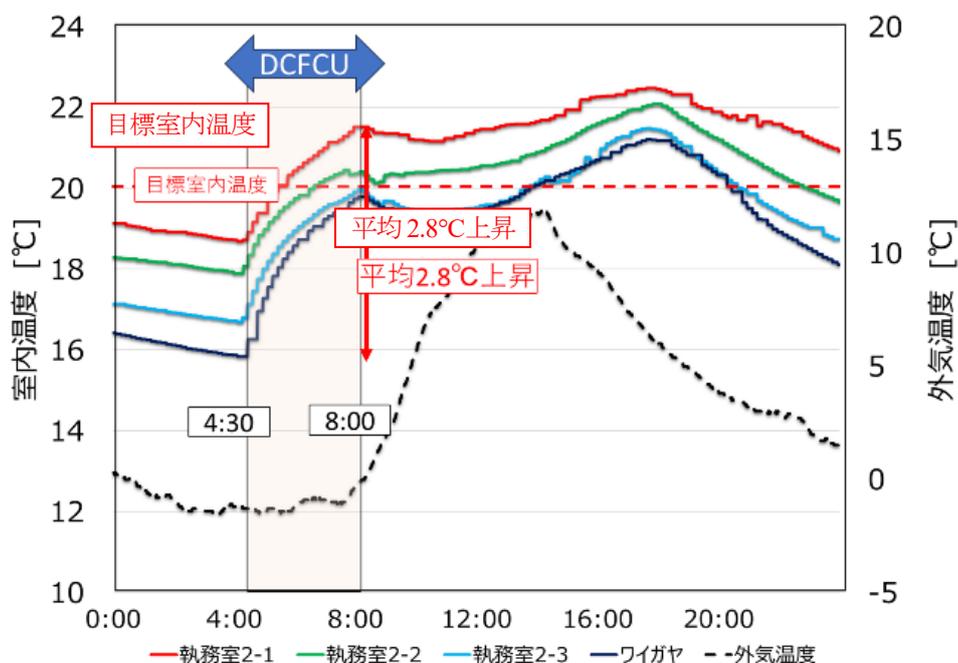


図 10 DCFCU 一括運転時の各室温度の経時変化

表 4 各室の DCFCU 一括運転前後の代表温度

各室	4:30時点	8:45時点	上昇温度
執務室2-1	18.7℃	21.4℃	2.7℃
執務室2-2	18.1℃	20.1℃	2.1℃
執務室2-3	16.8℃	19.7℃	2.9℃
ワイガヤ	15.8℃	19.6℃	3.8℃

表5にDCFCU一括運転前の2023年と運転後の2024年における運転状況、図11に各室の始業開始時の代表温度を比較して示す。2024年は、外調機を運転せずにDCFCU一括運転のみで各室平均2.8℃の改善が見られ、バイオマスCHPの排温水をほぼ100%活用できた。

表5 2023年と2024年におけるウォーミングアップ運転状況

項目		導入前	導入後
実測日		2023年1月9日	2024年1月10日
平均外気温度 (稼働時間中)		8.3℃	-1℃
外調機	起動時間	22時間	停止
	給気温度	40℃	-
	風量	400CMH	-
DCFCU	起動時間	停止	3時間30分
	送水温度	-	45℃
	吹出温度	-	38℃
	風量	-	8930CMH
バイオマス排熱空調利用率		71.8%	99.9%

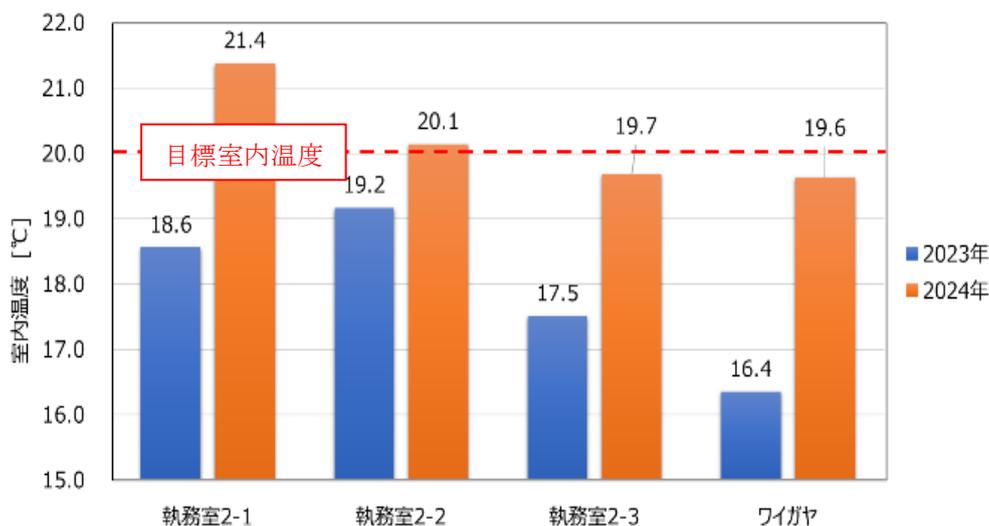


図11 各室の始業開始時の代表温度比較

6. おわりに

本報では、DCFCUの一括制御により暖房時の早期立ち上がりと排温水の有効活用を確認した。次報では、送水温度や外調機のパラメータを変更した検証結果を報告するが、DCFCUや外調機に加え、放射パネルの運転時間や送水温度など、今後省エネと快適性を両立した最適な運用方法について検討を進め、配信していきたい。

文 献

- 1) 市川侑ほか：エネルギー自立型サステイ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，p. 117-120（2024, 9）
- 2) 武藤ら：エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証（第 1 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp185-188，（2019, 9）
- 3) 木村ら：エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証（第 11 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，（2021, 9）
- 4) 武藤ら：エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証（第 14 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，（2021, 9）

ABSTRACT

In this building, it takes a very long time to raise the temperature of the cold stored in the ceiling frame using the outdoor air conditioner and floor heating after a long vacation during the severe winter season. Therefore, the operation of the air conditioner in the early morning is necessary to reach the prescribed temperature at the start of work. In order to improve the indoor environment and additional save-energy during the winter season, we have modified the system so that the excess biomass CHP waste heat can be used in the secondary side personal air conditioners and radiant panels at an appropriate temperature. In addition, the system was modified so that personal air conditioners operated by individuals can be centrally controlled from the central monitoring system.
