

エネルギー自立型サステナブル研究施設

—外調機の除湿性能評価—※

柴田克彦・平原美博・清水昭浩
羽鳥大輔^{*1}・武藤友香^{*1}・田辺新一^{*2}

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center The Dehumidifying Performance Evaluation of Dedicated Outdoor Air System

Katsuhiko Shibata・Yoshihiro Hirahara・Akihiro Shimizu
Daisuke Hatori^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}・Shin-ichi Tanabe^{*2}

高砂熱学イノベーションセンターの二次側空調は、外調機によりベース負荷を処理し、顕熱処理の不足分を放射パネルや個別空調機の組合せで処理するミニマム設計の潜顕分離空調システムである。本報では、外調機に導入した2種類の除湿方式の制御性とエネルギー効率について実測値と空調システムシミュレーションを用いて比較評価した。その結果、除湿制御性では冷却除湿方式が良好であることを確認した。また、エネルギー効率では凡そ15°C以上の中温冷水利用でのデシカント方式で高い省エネルギー効果が発揮できることを確認した。

1. はじめに

本研究は、地球環境負荷削減と知的生産性向上を両立したエネルギー自立型のサステナブル研究施設（以下、本施設と記す）を目指してシステム実証に取り組んでいる。これまでに、本施設の概要と設計計画、物理環境測定ならびにアンケート調査による環境評価結果とエネルギー消費実態によるZEBの達成状況等を報告した^{1)~13)}。本施設の二次側空調方式は、換気等必要機能を確保しつつ空調負荷に適正な処理能力とするミニマム設計として空気質の維持とベース負荷を処理する外調機、顕熱処理の不足分を放射パネルや個別空調機の組合せで処理する潜顕分離空調システムを採用している。特に、外調機には、バイオマスガス化発電機（CHP）の排熱が利用できることから、デシカント方式を積極的に導入している。一方、放射パネル系統には、CHPの運転に影響されることなく確実に除湿が行えるように冷却除湿方式を導入している。これにより、本施設で2つの除湿方式の同時評価が可能となっている。

本報では、ミニマム設計でのキーコンポーネントである外調機について、冷房時の運転を中心に除湿方式の違いによる制御性とエネルギー効率を比較評価し、さらに冷熱源の違いによる省エネルギー性をシミュレーションしたので報告する。

※本論文は、2022年度空気調和・衛生工学会大会講演論文¹⁴⁾を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計 *2 早稲田大学

2. 外調機の仕様

表1に本施設のオフィス棟に設置したデシカント外調機（OHU-101）と、冷却除湿外調機（OHU-201）の仕様を示す。外調機の温湿度制御は、温度制御が給気温度制御、湿度制御が冷房時には給気露点温度制御、暖房時には還気露点温度制御を採用している。なお、OHU-101のデシカントロータは、暖房時には運転を停止し、流路をバイパスしている。風量制御には、給気系統 VAV の要求風量の総和から求めた給気ファンの回転数に静圧補正のカスケードを加えた可変風量制御である。全熱交換器を通過する外気と還気は同風量として、交換効率の向上を図っている。交換効率については既発表にて評価している¹⁵⁾。図1に外調機と冷温熱源の系統を示す。OHU-101は冷熱源に地下水熱、温熱源に CHP の排熱を利用している。一方、OHU-201は、安定した低温冷水で十分に除湿できるような冷熱源に空冷チラーを利用している。なお、温熱源は、OHU-101と同様に CHP の排熱を利用している。

表1 外調機の仕様

機器記号		OHU-101	OHU-201
風量 (m ³ /h)	外気	9,000	6,850
	給気	9,000	6,850
	還気	9,000	6,850
コイル容量 (kW)	予冷	28	—
	冷水/温水	48/36	58/27
	再生・再熱	再生 70	再熱 14
全熱交換器		回転型	
	ロータ径 (mm)	1,500	1,200
交換効率 (夏期/冬期) (%)	顕熱	72.1/72.7	68.5/69.4
	全熱	71.4/70.7	67.3/67.0
	除湿方式	デシカント	冷却除湿
加湿方式		気化式	
中性能フィルタ		MERV 13	



3. 外調機の除湿制御性

3.1 運転状況

冷房時5月～9月の外気条件と各外調機の給気温度および給気露点温度の推移を図2に示す。OHU-101は、およそ給気温度設定21～22℃、給気露点温度設定11℃で運転していた。給気温度が露点温度に比べ高めなのは、冷熱源の地下水供給温度が17℃程度のためである。一方、OHU-201は、およそ給気温度設定18℃～13℃、給気露点温度設定11℃で運転していた。5月に比べ夏期の給気温度設定が低めなのは、外調機からの給気による顕熱負荷の処理を増やすことで省エネ運用としたためである。これは、冷却除湿による確実な除湿で吹出し口での結露の心配が少ないため低温吹き出しが可能となっている。また、OHU-201の給気温度は、室内温熱環境の検証に伴い日によって多少設定値を変更しているが、実測値は設定値に良く追従している。給気露点温度は、7月～8月のピーク時にもほぼ設定値通りの運転をしていた様子が見える。

3.2 除湿の制御性

冷房時の給気露点温度設定が、OHU-101とOHU-201でほぼ同じであったことから、制御偏差から除湿制御性の評価が可能と考える。図3に、横軸に除湿負荷率の代用として外気露点温度、縦軸に給気露点温度制御偏差（実測値－設定値）の相関を示す。なお、制御偏差のヒストグラムを相関図の右側に示す。相関図からOHU-101では外気露点温度と制御偏差に弱い正の相関が見られる。これは、外気露点温度によりデシカントロータ再生空気温度をカスケード制御しているため、再生空気温度のチューニング不足により十分に脱着できなかった可能性がある。しかし、除湿負荷が低い時には設定値を上回る除湿性能を発揮していた様子が見える。一方、OHU-201では、外気露点温度に関わらず、制御偏差が0～2℃の範囲に集中している。これらの除湿制御性の良さは、相関図右のヒストグラムからも確認でき、OHU-101では頻度分布が幅広いのに対して、OHU-201では0～2℃の範囲に集中し、制御性が良好であったことが分かる。

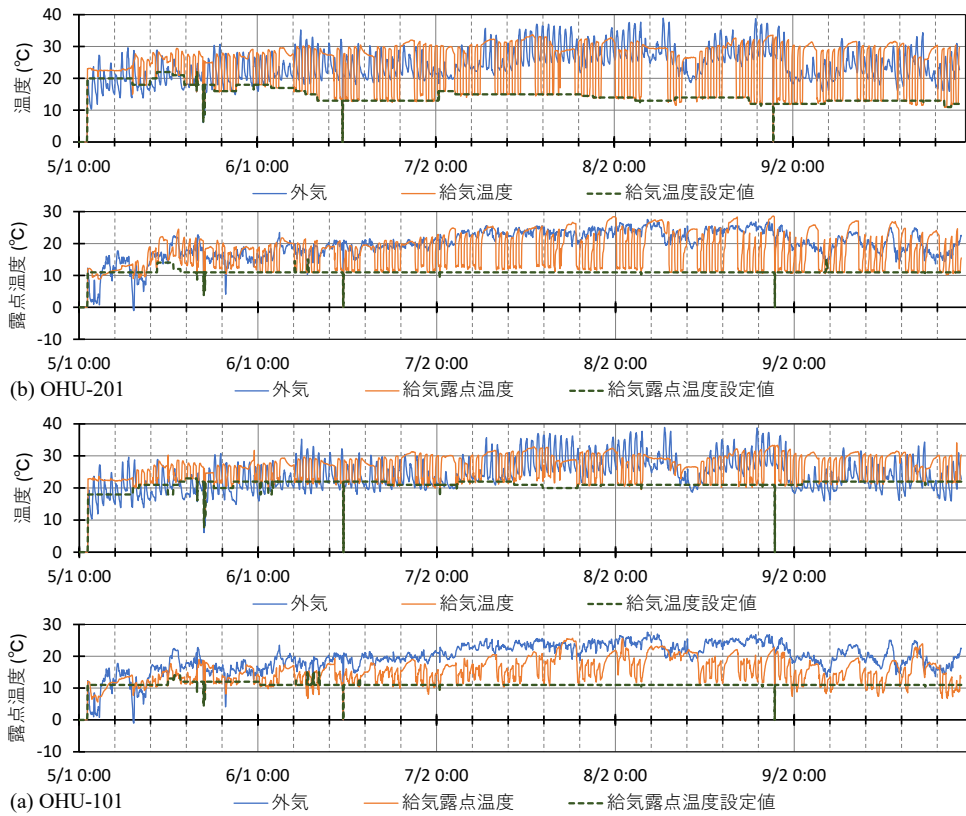


図2 外調機の除湿時運転状況(2021/5/1~9/30)

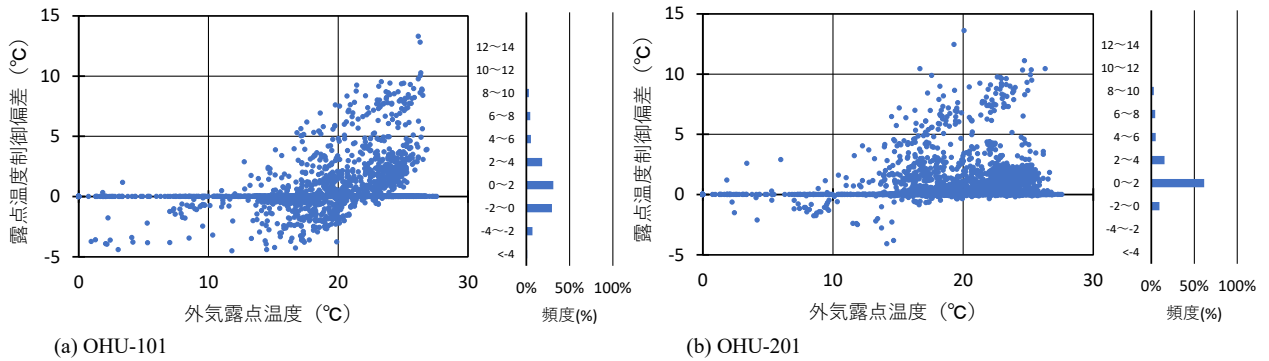


図3 外調機の除湿制御性

4. 外調機のエネルギー効率

4.1 消費熱量の比較

冷房時の冷熱、温熱の処理熱量の推移を図4に示す。OHU-101では、冷熱の凡そ30%がプレコイル、70%が冷水コイルであった。なお、冷熱量と温熱量はほぼ同量であった。5月に比べ夏期ピーク時の処理熱量が大幅に増加していないのは、次節で示す給気風量の違いによると思われる。また、OHU-201では、季節変動に応じた冷熱量の増加が確認できる。さらに、図2の給気温度で確認した通り、再熱コイルの温熱量も6月中旬以降あまり見られない。これは、2020年度の運転実績⁷⁾と大きく異なり、省エネ運用を狙いとした運転条件の設定による効果が表れている。

図5に除湿量と単位風量当りの冷熱、温熱の処理熱量の相関を示す。OHU-101では、除湿量に応じて冷

熱、温熱ともに増加している様子が分かる。しかし、OHU-201 では除湿量に応じて冷熱は増加しているものの、温熱は必ずしも増加していない様子が分かる。本施設では、**図 1** に示した外調機と熱源の系統から、温熱には排熱を利用しているため、温熱利用の増減による省エネ効果は搬送ポンプの電力消費量に限られる。一方、冷熱は空冷チラーと地下水熱搬送ポンプとの電力消費量の比較になるため、処理熱量の違いから電力消費量の省エネ効果が一概に判断できない。そこで、次節以降では、熱源機、搬送ポンプの電力消費量を加えて評価する。

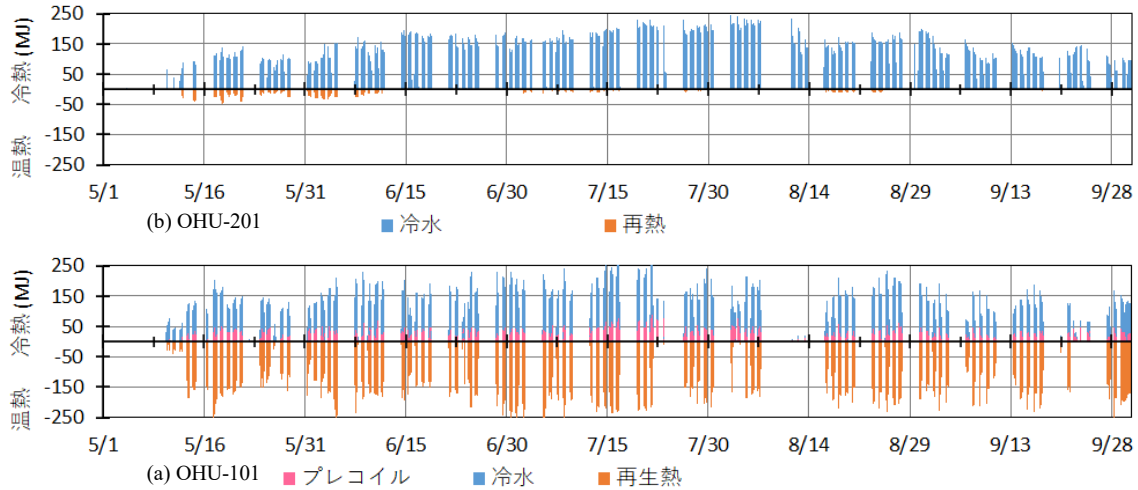


図 4 外調機の処理熱量

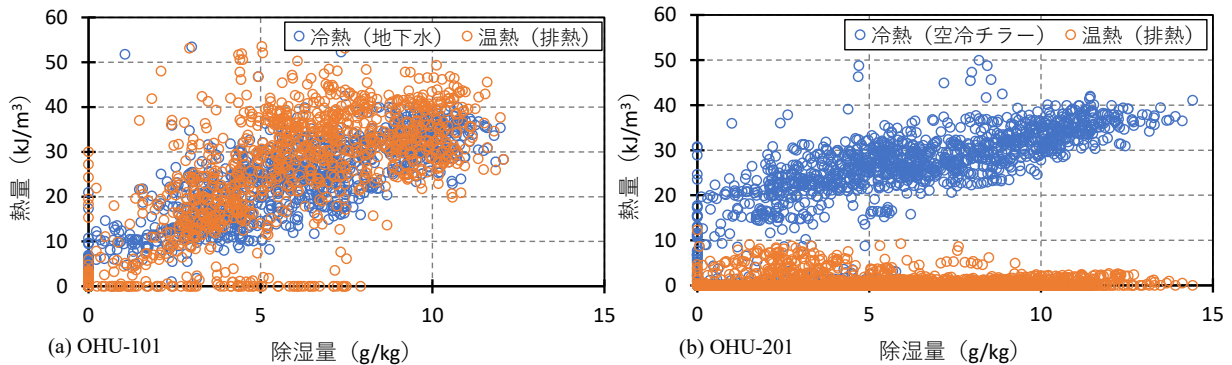


図 5 外調機の除湿量と処理熱量

4.2 電力消費量の比較

図 6 に、外調機の送風量、および送風機電力消費量、冷水チラーおよび冷熱、温熱の搬送ポンプからなる熱源電力消費量を示す。ここで、熱源電力消費量は、次の通り算出した。

・OHU-101 の熱源電力消費量

冷熱：地下水直接利用系統の全流量に対する OHU-101 の消費流量比で、冷水二次ポンプ、地下水供給ポンプ、揚水ポンプの合計電力消費量を按分

温熱：CHP の排温水二次ポンプの全流量に対する OHU-101 消費流量比で、排温水二次ポンプの電力消費量を按分

・OHU-201 の熱源電力消費量

冷熱：空冷チラーの全流量に対する OHU-201 の消費流量比で搬送ポンプを含む空冷チラーの電力消費量を按分

温熱：CHP の排温水二次ポンプの全流量に対する OHU-201 消費流量比で排温水二次ポンプの電力消費量を按分

図6より、送風量を比較すると、OHU-101では5月～6月上旬にはほぼ定格の風量であったが、それ以降徐々に減少していた。また、1日の風量にも変動が見られ居室の稼働状況に応じて風量制御していた様子が伺える。一方、OHU-201では8月上旬まで多少の変動はあったものの、ほぼ定格風量での運転で推移し、中旬以降は定格の60%～70%程度の風量で運転していた。1日の風量変動も少なく、安定した運転が継続していたことが分かる。

次に、電力消費量を比較する。OHU-101では、送風機電力消費量の割合が高くなっている様子がわかる。また、5月に比べ夏期ピーク時の7月～8月は運用条件の変更等で送風機電力消費量が少なくなり、風量制御による省エネ効果が伺える。一方、OHU-201では、冷水チラーの電力消費量の割合が高く、除湿負荷が大きな7月～8月に多くなっていた。OHU-201の運転は、夏期に再熱を少なくしたことで図5に示した通り温熱の消費量が少なかったが、温水ポンプの電力消費量は僅かに生じた。

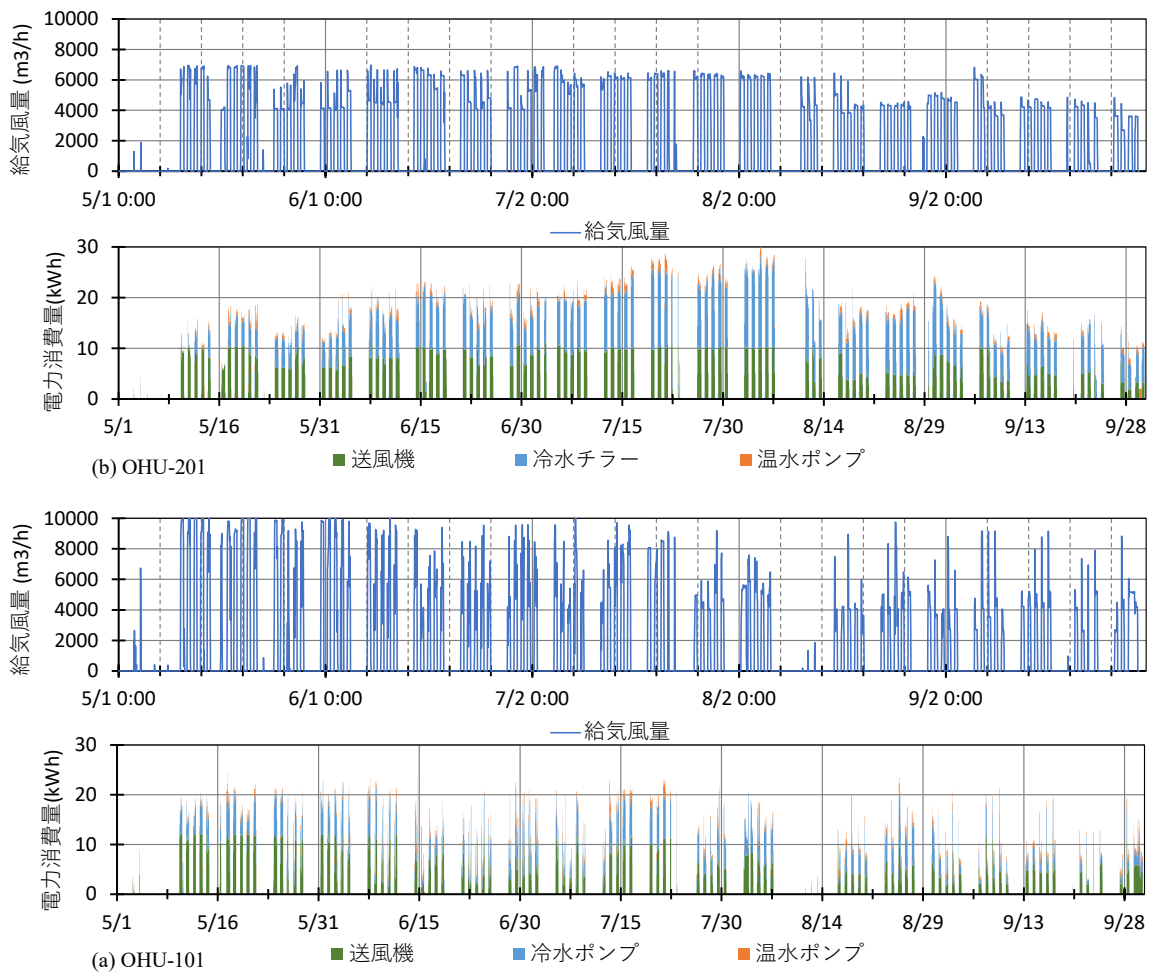


図6 外調機の給気風量と電力消費量

4.3 除湿量に対する電力消費量の比較

除湿制御性の比較については、3.2節で述べた通り冷却除湿方式が良好であった。しかし、空冷チラーを利用していることから、除湿量当たりの電力消費量を加味した場合の省エネ性について検討する必要がある。以下に、除湿量と電力消費量についての解析結果を示す。

図7に、外気と給気の絶対湿度差から算出した除湿量と電力消費量の相関を示す。図より、OHU-101では除湿量5 g/kg程度までは電力消費量がほぼ一定で、5 g/kg以降緩やかに増加している。OHU-201では低

負荷から除湿量の増加に応じて電力消費量が緩やかに増加し、高負荷では OHU-101 に比べ電力消費量が 1.5 倍程度多くなっている様子が分かる。つまり、除湿の負荷率が高くなるほど、冷却除湿方式では多くの電力を必要とすると考えられる。

除湿量に対する電力消費量の違いが、除湿方式の違いによるものか冷熱源の違いによるものかを明確にするため、システムシミュレーションを用いた解析を行った。

4.4 LCEM による冷熱源電力消費量の推定

冷熱源単体の空調システムシミュレーションとして、国土交通省からリリースされている LCEM ツール Ver3.10 を用いた。冷熱源のモデルには OHU-201 と同様に空冷チラーを選定し、現状の地下水熱利用と同じ送水温度 18℃での運転を仮定した。図 8 に LCEM の計算モデルに用いた空冷チラーの外気温度別部分負荷特性と冷水出口温度特性、図 9 に LCEM の解析モデルを示す。

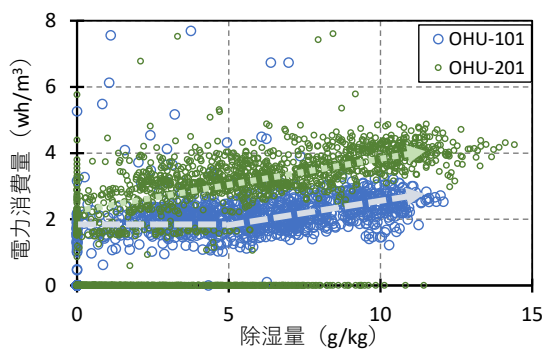


図 7 外調機の除湿量と電力消費量

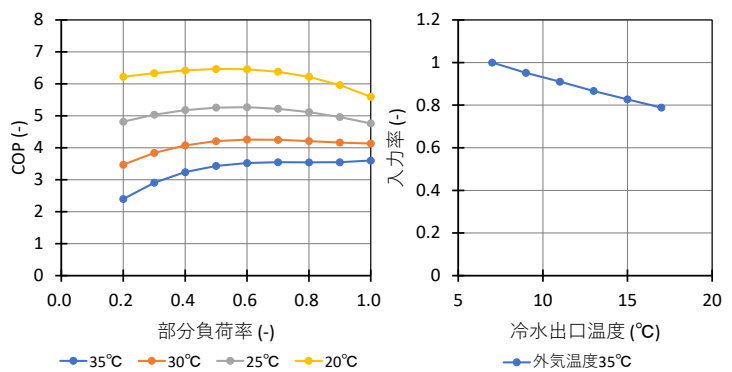


図 8 LCEM モデルでの部分負荷特性

中央監視指令		B-CO-Ctl-00			
中央監視指令		0:停止 1:冷房 2:暖房	0		
外気		B-O-2-00	空気熱源HPユニット(高効率)	RR-XX1-310H-118	冷水水一次ポンプ
外気乾球温度 °C	22.7	エラー状態	0	エラー状態	0
外気湿球温度 °C	22.5	運転状態 0:停止 1:運転	0	運転状態 0:停止 1:運転	0
		運転モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	0	運転モード 0:停止 1:冷房 2:暖房	0
		運転順位	0	運転順位	0
		定格冷凍/加熱能力 kW	0	水量 %/min	0
		冷水水流量 %/min	0	冷水水出口温度 °C	11.0
		冷水水出口温度 °C	11.00	冷水水入口温度 °C	11.0
		冷水水入口温度 °C	11.00		
		外気乾球温度 °C	22.7		
		外気湿球温度 °C	22.5		
		空気熱源ヒートポンプユニット制御			
		冷水出口温度設定値 °C	7.0		
		温水出口温度設定値 °C	45.0		
		運転順位(冷却)	1		
		運転順位(加熱)	1		
		運転順位	0		
		冷却/加熱量 kW	0		
		外気温度(能力・入力算定用)	22.7		
		冷却/加熱能力 kW : 外界条件下	0		
		全負荷運転入力 kW : 外界条件下	0.0		
		全負荷運転時COP : 外気条件下	0.00		→シート0より作成
		部分負荷率	0.00		→シート0より作成
		部分負荷率(COP変化率算定用)	0.00		→シート0より作成
		部分負荷運転時のCOP変化率	0.00		
		部分負荷運転時COP	0.00		
		電力消費量 kW	0.0		
		エラーコード(外気WB:負荷率:冷水水)	0		

図 9 LCEM の解析モデル

4.5 除湿のエネルギー効率

図 10 に、除湿期（5月～9月）の OHU-101 と OHU201 の電力消費量（実測値）と、OHU-101 の冷熱源を地下水熱から空冷チラーに変更した場合の LCEM での算出値を示す。図中の棒グラフが単位風量当たりの消費電力量、折れ線が単位風量・単位除湿量当たり消費電力量で、ここでは除湿原単位（Wh/g・m3）と呼ぶ。なお、この期間における外調機の稼働率は、OHU-201 が運転時間で 23%、風量で 8%ほど OHU-101 を上回っており、OHU-201 の送風機電力消費量および除湿量が多くなっている。

単位風量当たりの電力消費量を見ると、OHU-101 の電力消費量は OHU-201 に比べ 48%程少なくなっていた。これは、OHU-101 の冷熱源を空冷チラーに変更したと仮定した場合においても、OHU-201 より電力消費量が 31%程少なくなる。さらに、除湿原単位を見ると、熱源方式にかかわらず OHU-101 の電力消費量が小さくなるのが分かる。今回の結果では、デシカント方式における除湿原単位が、冷却除湿方式に比べ 8%削減する省エネ効果が得られた。

また、OHU-101 の顕熱負荷処理を増やした場合を想定して、空冷チラーの冷水出口温度を下げての試算では、凡そ 15℃までにおいて OHU-201 より除湿原単位が小さくなる結果を得た。これらの結果、中温冷水利用でのデシカント方式が冷却除湿方式に比べて高い省エネ効果を発揮できることを確認した。なお、精緻なエネルギー効率の検討には、排温熱利用と冷温水同時取出しヒートポンプとの比較、冷却除湿方式との給気温度の差異を加味すべきであり、これらは今後の検討課題とする。

5. おわりに

本施設に設置された 2 種類の除湿方式を持つ外調機の除湿性能、エネルギー効率について、実運転データを元に比較した。その結果、除湿制御性については、冷却除湿方式が良好であることを確認した。また、デシカント方式では、デシカントロータの再生を十分に行う事で除湿性能が発揮できることを確認した。さらに、実測値と LCEM ツールによる空調システムシミュレーションの算出値を用いて除湿方式の違いによる電力消費量を比較した結果、中温冷水利用のデシカント方式にて高い省エネ効果が得られることを確認した。さらに、今回の場合では、中温冷水の範囲が凡そ 15℃であることが分かった。

今回の除湿性能評価の事例を、今後の機器選定での目安として活用頂ければ幸いである。

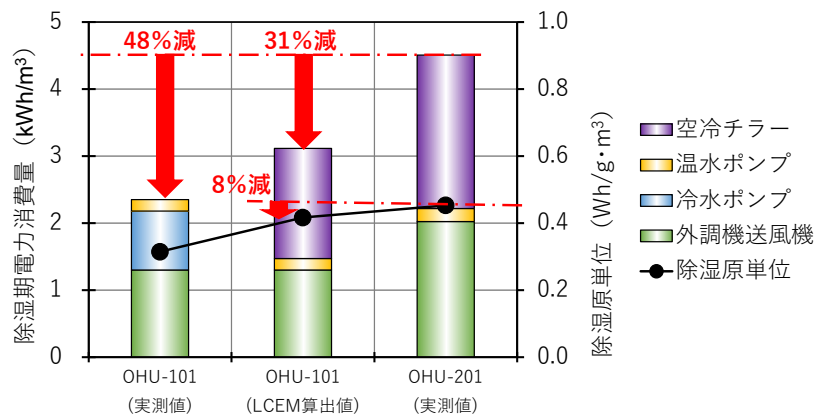


図 10 除湿方式、熱源方式と電力消費量

文 献

- 1) 武藤ほか、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 1 報)全体計画及びコンセプト、空衛学会講演、B-14、pp.185-188(2019.9).

- 2) 羽鳥ほか、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 2 報)ZEB に向けた建築・設備計画、空衛学会講論、J-31、pp.149-152(2020.9).
- 3) 元田ほか、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 3 報)木質バイオマスガス化 CHP を利用したエネルギー自立型自家消費システム、空衛学会講論、J-32、pp.153-156(2020.9).
- 4) 清水ほか、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 4 報)二次側空調システム及びセンシングシステムの概要、空衛学会講論、J-33、pp.157-160(2020.9).
- 5) 木村ほか、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)二次側空空調機器の開発、空衛学会講論、J-34、pp.161-164(2020.9).
- 6) 武藤ほか、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 9 報)建物環境性能の評価、衛学会講論、J-38、pp.177-180(2020.9).
- 7) 柴田ほか、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 10 報)潜顕分離空調の夏期性能評価とシステム最適化、空衛学会講論、J-49、pp.197-200(2021.9).
- 8) 木村ほか、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 11 報)置換空調とパーソナル空調機の性能評価、空衛学会講論、J-50、pp.201-204(2021.9).
- 9) 竹原ほか、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 12 報)夏季におけるパーソナル空調の使用状況と温熱環境満足度、空衛学会講論、J-51、pp.205-208(2021.9).
- 10) 渡邊ほか、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 13 報) 中間期の自然換気実施下における物理環境および執務者満足度、空衛学会講論、J-52、pp.209-212(2021.9).
- 11) 武藤ほか、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 14 報)冬期熱源、空調システムと室内環境の評価、空衛学会講論、J-53、pp.213-216(2021.9).
- 12) 相澤ほか、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 15 報) 再生可能エネルギーの活用状況および運用実績、空衛学会講論、J-51、pp.217-220(2021.9).
- 13) 清水ほか、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 16 報)ZEB 達成状況の評価と対策、空衛学会講論、J-55、pp.221-224(2021.9).
- 14) 柴田ほか、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 21 報) 外調機の除湿性能評価、空衛学会講論、C-49、pp.197-200(2022.9).
- 15) 柴田ほか、外気調和機の高性能化に関する研究(その1)全熱交換器の性能評価、空気調和・冷凍連合講演会、2、pp.15-18(2021.4).

ABSTRACT

The air conditioning system of Takasago Innovation Center follows a minimal design that maintains indoor air quality and processes latent heat load by supplying air from dedicated outdoor air system (DOAS), and the shortage of sensible heat is processed by radiant air conditioning and individual air conditioning systems. In this report, we compared and evaluated the dehumidification control accuracy and energy efficiency of two types of built-in DOASs using actual measurement data and air conditioning system simulation. The results showed that the cooling dehumidification method is efficient in terms of its dehumidification control accuracy. In terms of energy efficiency, it was confirmed that the desiccant system, which uses medium-temperature cold water of approximately 15°C or higher, can exert a high energy-saving effect.