

No. **39**

■ **高砂熱学** ■

▼  
**2025**

■ **イノベーションセンター報** ■

 **高砂熱学**



# 高砂熱学イノベーションセンター報

No. 39 2025

## 目 次

### 【巻頭言】

熱エネルギーを「見える化」し、“地域で再設計する”

—— ライフサイクル思考で拓く熱マネジメント

(東京大学 菊池 康紀) 1

### 【技術論文】

1. 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  
— 夏期における天井型パーソナル空調機と放射パネルとの室内環境比較 —  
(齋藤雅浩・スレスタミサン・市川侑・木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦) 3
2. STUDY ON OPERATIONAL UPGRADING IN ENERGY SELF-SUFFICIENT INNOVATION CENTER  
(PART 1) PERFORMANCE EVALUATION OF PERSONAL AIR CONDITIONING SYSTEM IN SUMMER  
AND WINTER  
(Mishan Shrestha, Kentaro Kimura, Akihiro Shimizu, Katsuhiko Shibata,  
Yu Ichikawa, Masahiro Saito, Masanari Ukai, Sin-Ichi Tanabe) 11
3. スマートビルアプリケーションの市場調査とエミュレータを活用した次世代アプリケーション要件の提案  
(青山剛士・宮田翔平・村澤達・田中勝彦・赤司泰義) 23
4. FORMULATION OF A HIGHLY EXPLAINABLE MPC AND VERIFICATION BY ENERGY SIMULATION  
(Masanori Takahashi, Yuki Matsunami, Takuji Nakata, Kenichiro Katayama) 33
5. 体育館向け空調システムの開発と実証 — 天井面への遮熱シート設置による温熱環境改善 —  
(木村健太郎・スレスタミサン・平原美博・大内修一) 43
6. エネルギー自立型サステナブル研究施設 — ZWB 化の取り組みと試算評価 —  
(大迫孝輔・柴田克彦・田中健太・大塚雅之) 53
7. 吸着材蓄熱システムのスケールアップ試験計画におけるゼオライトエコボイラの設計検討  
(澁澤朱音・鎌田美志・松井一騎・馬場大輔・谷野正幸・川上理亮・青木温哉・中垣隆雄・藤井祥万) 61
8. 氷スラリーを用いた冷熱による廃プラスチックエネルギーの高度有効利用  
(谷野正幸・増田正夫・鎌田美志・染矢聡・小山寿恵・折田久幸・熊野寛之・森本崇志) 69
9. 小型自律分散型環境センサーを用いた実測とCFD解析による「きぼう」内キャビンの流れ場分析  
(柴田克彦・齋藤雅浩・永野秀明・阿部麻紀・友部俊之・木村真一) 83
10. 月面用水電解装置の開発結果と将来展望  
(津村柊吾・加藤敦史・馬場大輔・内田浩基・武田健太郎・岡堯志・森田健) 91

11. サーマルマイニングによる月面での水抽出（第四報）揮発性物質の分離方法の検討  
(内田浩基・加茂雅裕) 99
12. 二酸化塩素ガスによる種子クリーン化法の可能性評価  
(荒川宏樹・高橋秀人) 109
13. 排ガスからの CO<sub>2</sub>回収・施用システムのバラ栽培への実証  
(宮下真一・増田正夫・太田宗吾・吉屋康太) 117
14. チューブ型フォトバイオリアクターによる微細藻類の屋内連続培養と CO<sub>2</sub>固定性能の評価  
(鳴原亜土・三宅友香・増田正夫) 125

# 熱エネルギーを「見える化」し、“地域で再設計する” —— ライフサイクル思考で拓く熱マネジメント

東京大学 未来ビジョン研究センター  
教授

菊池 康紀

The University of Tokyo  
Yasunori Kikuchi



カーボンニュートラル（CN）を巡る議論は、再生可能資源からの電力の創エネ、蓄電や水電解によるエネルギー貯蔵、熱需要の電化、などといった「電力起点の転換」に関するものが多い。しかし、産業・民生を通じて社会が消費するエネルギーの多くは熱として利用されている。熱は、温度という“質”を伴う一方で、電力のように計量・融通されにくく、政策・制度設計や社会的合意形成において取り扱われにくい。結果として、熱需要の実態や温度レベルのミスマッチ、未利用排熱のポテンシャルといった論点が、十分に“見える化”されないまま今日に至っている。

私は、ライフサイクルアセスメント（LCA）——製品や技術を、その製造から廃棄・リサイクルまで一連の流れで評価する手法——や、マテリアルフロー分析（MFA）、産業連関分析（IOA）を軸に、将来技術の環境影響と社会実装の条件を定量的に捉え、当該技術を導入するプロセスシステム設計や、開発へのフィードバックを行う研究に取り組んできた。CNに向けた技術選択は、機器や技術単体の効率や性能だけで決まらず、技術が関係する“ライフサイクル”への配慮が必要である。電源構成、燃料調達経路、材料の質的量的投入状況、製造・施工、設備更新のタイミング、リサイクルを含めたライフサイクル全体で、物質とエネルギーの収支を把握し、気候変動に限らない総合的な環境影響の可視化や、規模としての実現可能性、地域経済・雇用への波及、といった多面的観点が必要不可欠である。

CNを強く志向するあまり、技術選択が単一の指標に偏ると、化石が支配的であったときに活用していた材料とは異なる質の材料需要を急増させ、「負荷の転嫁（burden shifting）」を引き起こしうる。例えば、熱需要の電化や、蓄電・電解の進展は、確かにCNへの効果が確認されているが、同時に希少金属への依存度を増加させうるものであり、適切な資源循環が同時に実現しなければCNな状態が持続不可能となる。一方、“熱”に焦点を当て、温度レベルに応じたエネルギーの質（エクセルギー）に基づく熱マネジメントは、高度な省エネを実現しうる。例えば、建物の暖房・給湯や、低温産業プロセスといった低エクセルギー需要は多く存在している。これに対し、重要なエネルギー源である太陽光や風力を、一度電力に変換し、さらに蓄電池や電解装置を経由して利用する場合、多くの希少資源と追加的なエネルギーを要する。低温熱需要に対してこのような高エクセルギー電力を用いることは、エネルギーの質の観点からみれば合理的とは言えない。温度帯別に需要を分解し、熱源・蓄熱・熱搬送・排熱回収を階層的に組み合わせる、“熱のカスケード設計”は、持続可能なCNに不可欠な観点といえる。もちろん、蓄電や水素化でなければ満たすことができないエネルギー需要も存在している。資源制約下におけるエネルギーシステムの設計は、熱と電力の形態を化石時代から再設計することといえる。

では、エネルギーシステム、とはどのような範囲で考えるものだろうか。第7次エネルギー基本計画は、2050年カーボンニュートラルに向けて、再生可能エネルギーの主力電源化、電化の推進、水素・アンモニアの活用、需要側の高度化などを柱として掲げている。国家レベルでの方向性を示す羅針盤として、その意義は大きい。しかし同時に、エネルギーシステムは本質的に地域資源と需要構造に依存するものであり、国全体の基本計画のみで具体的な最適設計を描き切ることにはできないという課題も内包しており、かつ、熱マネジメントの具体像までは十分に描き切れてい

高砂熱学イノベーションセンター報 No.39 2025.

ない側面もある。そもそも、再生可能資源の賦存量と供給ポテンシャルは地域ごとに大きく異なる。太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、さらには未利用排熱や地中熱など、いずれも空間的に不均一である。一方で、エネルギー需要の量と質もまた、気候条件、人口構成、産業構造、建物ストック、都市密度によって変わる。寒冷地では暖房需要が卓越し、温暖地では冷房負荷が支配的である。工業地域では高温熱需要が存在する一方、都市中心部では低温域の空調・給湯需要が中心となる。さらに重要なのは、設計を静的に捉えないことである。エネルギー需給は時間とともに変化する。人口動態、産業構造、建物更新、技術進歩、電源構成の変化は、エネルギーシステムの最適解へ影響する。設計を一度決めれば終わり、という時代ではない。単年度スナップショットではなく、将来シナリオを組み込んだ動的 LCA や、時系列需給シミュレーションと統合した評価枠組みが不可欠である。

日本はこれまで、エネルギーを全国一律のユニバーサルサービスとして供給してきた。しかし再エネ比率の拡大と地域分散型技術の普及は、その前提を揺さぶる。地域ごとの資源と需要に応じた個別最適設計を積み上げ、それを国全体の統合的なシステムへと統合する——この二層構造の設計思想こそが、次世代のエネルギー戦略に求められる。ただし、地域別設計を実装へつなぐには、環境性能だけでなく社会経済的な「推進力」や、地域側社会との対話が不可欠である。LCA や MFA、IOA といった技術の評価を“外部の専門家の報告”で終わらせず、対話の素材として創り直すことが、必要であり、専門知を有する産学と地域側と橋渡しができる公的機関の産学公連携により、取り組む必要がある。

熱は見えにくく、必ずしも社会全体で議論し尽されてきていないといえる。だからこそ議論と設計の余地が大きい。熱マネジメントは、単なる設備技術ではなく、社会のエネルギー構造を再設計する営みである。貴社が培ってきた空調・熱利用技術は、その最前線にある。本誌が、技術者・研究者・地域社会を結ぶ議論の触媒となり、日本発の持続可能なエネルギーアーキテクチャがここから生まれることを、強く期待している。

# エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証評価 ー夏期における天井型パーソナル空調機と 放射パネルとの室内環境比較ー※

齋藤雅浩・スレスタミサン・市川侑  
木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦

## Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center - Comparison of Indoor Environment between Ceiling Type Personal Air Conditioner and Radiant Panel in Summer -

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

高砂熱学イノベーションセンターの執務室は、外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機と放射空調で処理し、個人の行動などで変化する人体負荷に対しては天井型パーソナル空調機（DCFCU）などの個別空調によって処理を行うタスクアンビエント空調システムを採用している。しかしながら、放射空調は既存の空調システムと比較して快適性や省エネ性が高いものの、設置面積の大きさや吸音対策が必要であるなどの課題がある。そこで、放射空調に代わる省エネ空調システムとして、DCFCUを夏期のアンビエント空調として活用し、放射空調との室内環境の比較検証を実施した。その結果、放射空調よりも小さい設置面積と少ない必要水量で快適性が得られることが確認された。

### 1. はじめに

本施設<sup>2)</sup>の主執務室は、外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機と放射空調で処理を行い、個人の好みや行動などで変化する顕熱の不足分に対しては天井型パーソナル空調機（DCFCU）などの個別空調によって処理を行うタスクアンビエント空調システムを採用している<sup>3)</sup>。

本施設での検証で放射空調は既存空調システムと比較して、快適性、省エネ性に優れている結果を得たが<sup>4)</sup>、天井の専有面積が大きいことや吸音対策が別途必要になるなどの課題がある。そこで、放射パネルに代わる新たなアンビエント空調システムの提案に向け、一括制御を追加した DCFCU<sup>5)</sup>を夏期のアンビエント空調として活用し、放射パネルとの室内環境の比較検証を行った結果を報告する。

### 2. 機器仕様と設置状況

図1に本施設の主執務室である執務室 2-1 における機器設置状況と、表1に放射パネルと DCFCU の設計仕様を示す。放射パネルは、1set パネル 4 枚の定流量パネルと個別制御が可能な 1set パネル 6 枚の変流量パネルの 2 種類があり、定流量パネルは執務室の南北両端に計 40set、変流量パネルは内側に計 120set 配置している。DCFCU は執務室中央側に計 57 台配置している。

※本論文は、2025 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文<sup>1)</sup>を加筆修正したものである。

本検証では、DCFCU は稼働エリアと稼働台数の比較を行うため、東西側と中側での3分割のゾーン制御を追加した。

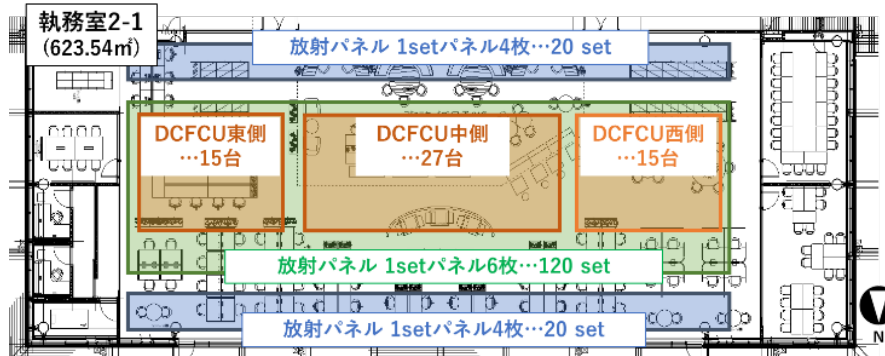


図1 執務室 2-1 の機器設置状況

表1 放射パネルとDCFCU仕様

放射パネル仕様				DCFCU仕様		
サイズ	600 mm × 600 mm (パネル1枚あたり)			吹出フェースサイズ	585 mm × 195 mm	
冷却能力	69 W/m <sup>2</sup> (夏期、送水温度18~20℃)			冷却能力	469 W	
流量	1.0 L/min (1set/パネル6枚あたり)			流量	2 L/min	
	0.7 L/min (1set/パネル4枚あたり)			風量	236 m <sup>3</sup> /h	
設置状況 執務室 2-1	set数	総枚数	専有面積	定格電力	3.1 W	
	120set (1set/パネル6枚) 40set (1set/パネル4枚)	880枚	314 m <sup>2</sup>	設置状況 執務室2-1	総台数	専有面積
					57台	6.5m <sup>2</sup>

### 3. 実測概要

表2に今回の検証パターンと図2に検証エリア及び実測状況を示す。本検証は、2024年8月5日(月)~8月30日(金)の夏季休業を除く3週間で、検証対象エリアは放射パネルとDCFCUを設置しているオフィス棟2階の執務室2-1とした。

検証条件としては、ケース①放射パネル全台稼働、ケース②DCFCU 東側のみ稼働、ケース③DCFCU 中側のみ稼働、ケース④DCFCU 全台稼働の4パターンを対象とし、DCFCU 西側については、什器の関係上長時間滞在する執務者がいないため今回の検証対象から除外した。また検証期間中、執務室2-1に設置しているパーソナル空調機(天井型、デスク型)の個人での操作は禁止とした。冷水の送水温度については、貯水した地下水を熱源として利用するため、いずれの検証パターンでも19℃に設定し、定流量パネルについては常時稼働とした。外調機の給気風量については、室内のCO<sub>2</sub>濃度によって可変するため、比較検証を行うデータは給気風量がほぼ同一となった検証日を対象とした。

表2 検証パターン

ケース	ケース① 放射パネル全台	ケース② DCFCU東側	ケース③ DCFCU中側	ケース④ DCFCU全台
運転時間	6:30~17:30			
送水温度	19℃			
稼働台数	880枚	15台	27台	57台
処理熱量	15.8 W/m <sup>2</sup> **	11.3 W/m <sup>2</sup>	20.3 W/m <sup>2</sup>	42.9 W/m <sup>2</sup>
必要水量	148 L/min	30 L/min	54 L/min	114 L/min
定格電力	—	47 W	84 W	177 W
外調機稼働時間	6:00~18:30			
外調機給気温度	12℃			
執務室2-1給気風量	2000 m <sup>3</sup> /h (室内CO <sub>2</sub> 濃度により可変)			

※放射パネルの処理熱量は既往の実験<sup>5)</sup>から、設計仕様に補正をかけて算出

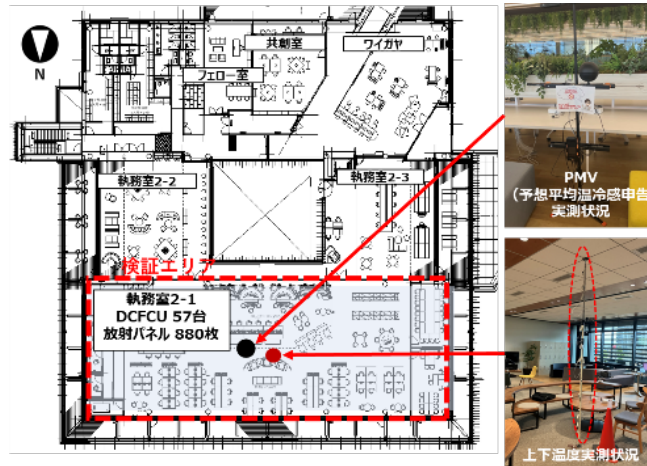


図2 オフィス棟2階平面図と実測状況

#### 4. 温熱環境評価

##### 4.1 外気温湿度

図3にケース別の外気温湿度の経時変化を示す。各ケースの代表日は、それぞれ最高気温が30℃を超え、かつ温湿度ともに各ケースで近い値となる日を選んだ。なお外気温湿度は、本施設の所在地に最も近い茨城県つくば（館野）気象庁のデータを利用した。

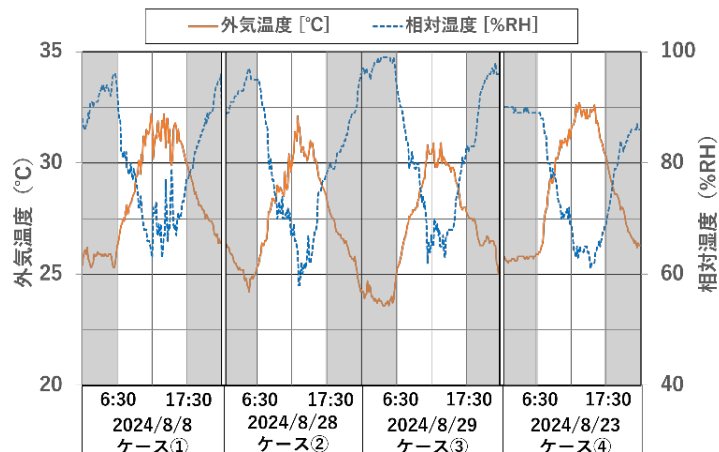


図3 ケース別外気温湿度の経時変化

##### 4.2 室内温度

図4にケース別の室内温度の経時変化を示す。温度はそれぞれ、グローブ温度、放射パネル表面温度、空気温度を比較して示した。なお、グローブ温度と空気温度については、室内代表点（FL+0.6 m）の温度を使用した。ケース①では、グローブ温度と空気温度がほぼ一致する結果となった。これは、外気温度の上昇による天井内および天井表面温度の上昇を抑えられた一方で、北側窓面からの熱放射を受けたためであると考えられる。また、全てのケースにおいて、12時以降には空気温度が26℃以下となることを確認したが、ケース③および④については最終的に24℃以下まで低下しており、DCFCUの稼働台数が多く冷却能力が過大であった可能性が示唆された。

図5にケース別の上下温度分布を比較して示す。なお、各ケースの外気温度が概ね近い温度となった14時頃を比較対象とした。このとき、外気温度は $31.3 \pm 1.0^\circ\text{C}$ であった。また、FL+0 mおよびFL+3 mのデ

ータについては、それぞれ床と天井の表面温度の実測結果である。

全てのケースで FL+0.1m と FL+1.7m の温度差が 0.5 °C 以内となっており、またケース①および②については平均温度が 26°C 前後と快適な範囲にあった。

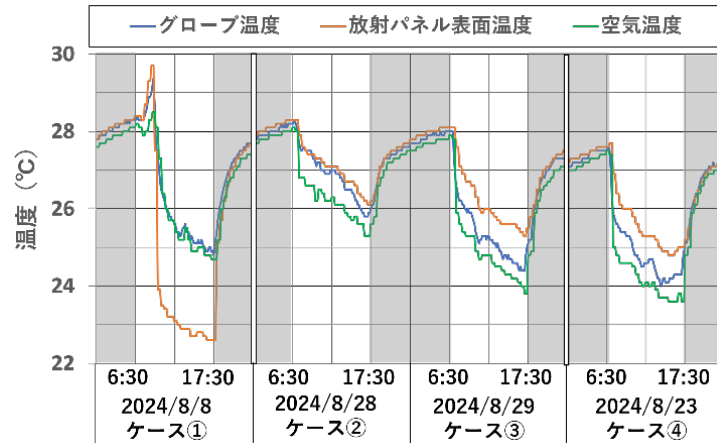


図 4 ケース別室内温度の経時変化

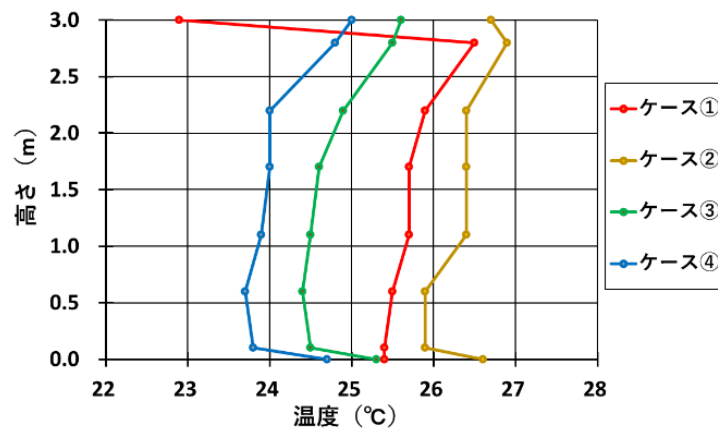


図 5 ケース別上下温度分布

#### 4.3 室下部表面温度分布

図 6 に室下部表面温度分布の一例を、什器位置を含めた平面図と共に示す。室下部表面温度の計測は、天井面に 1.8m 間隔で設置しているサーモパイルによって計測した。このサーモパイルは、赤外線センサによって床面レベルで直径約 2.4m の範囲の温度を計測している。計測温度は、床表面温度だけでなく執務者や PC などの発熱体の影響を受けるため、その部分は周囲に比べて高温となることが確認できる。

図 7 にケース別の 14 時頃における室下部表面温度分布を示す。表面温度は、各エリアの平均値と標準偏差で比較した。全てのケースで、東側での表面温度が中央・西側と比較して高い傾向が見られたが、これは東側に中央監視機器などの PC が集中していることや、執務者が密集しており発熱負荷が高かったことが影響していると考えられる。また、中央側の表面温度が低い傾向が見られるが、これは中央側に執務者が少なかったことが影響していると考えられる。ケース④の DCFCU 全台稼働では冷却能力が過大となり室温が全体的に低下した。一方、ケース②の東側稼働では各エリアの平均温度が東側 26.5°C、中側 26.1°C、西側 26.6°C と均一な環境となり、高負荷側の DCFCU を中心に稼働させることで、ケース①の放射パネル稼働よりも処理熱量が少ないながらも快適な環境を構築できることが確認できた。

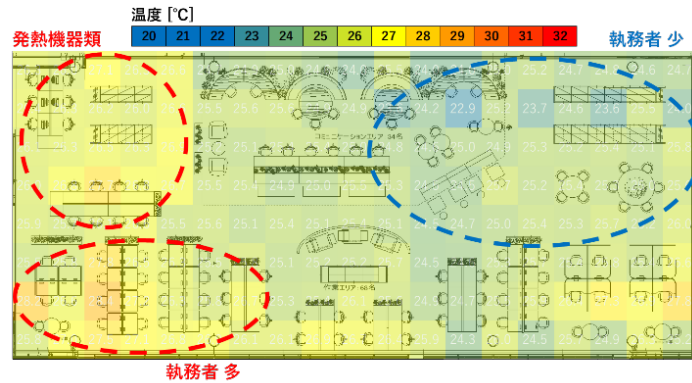


図 6 室下部表面温度分布の例

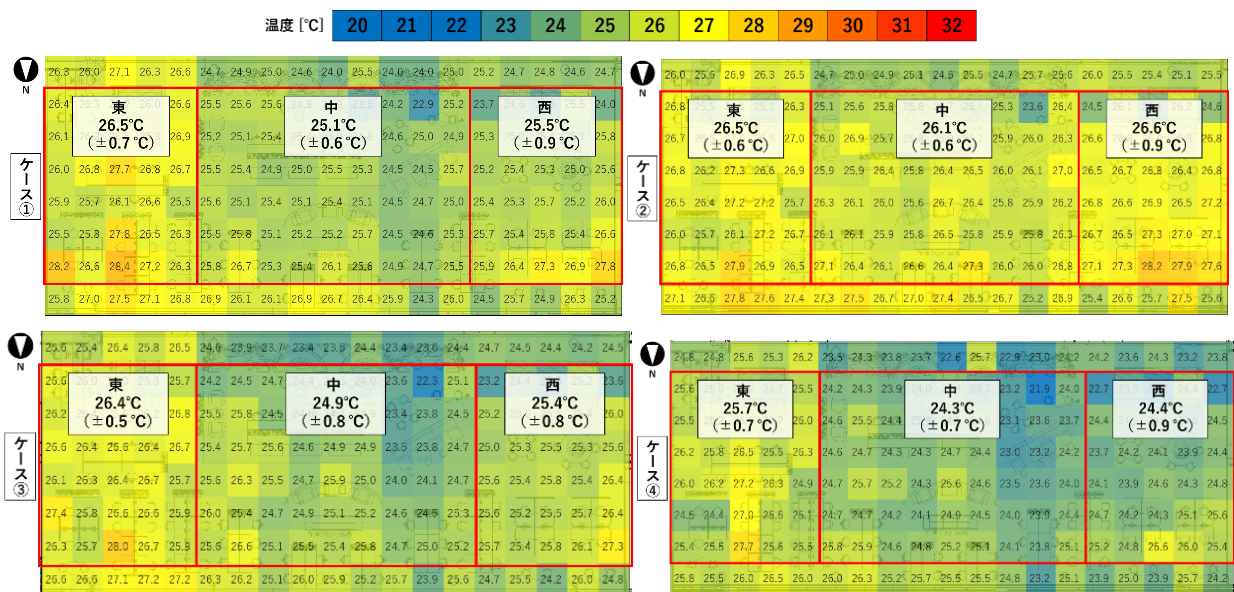


図 7 ケース別の室下部表面温度分布

## 5. 快適性評価

各ケースにおける室内環境の快適性を比較するため、PMV（予想平均温冷感申告）の測定と、検証エリアの執務者を対象に毎日アンケートを実施した。

### 5.1 PMV 評価

PMV は testo 社製のマルチ環境計測器を用いて FL +0.6 m の高さで測定を行った。PMV の決定に必要な平均放射温度は、グローブ温度、周囲空気温度、気流速度の測定値から計測器が自動計算を行っている。

図 8 に就業時間中（8:45～17:30）におけるケース別の PMV 測定値を比較して示す。なお PMV 算出にあたり、着衣量は 0.5 clo、代謝量は 1.1 met に設定した。なお着衣量については、別途サーマルマネキンを用いて作業着の clo 値を測定した。

各ケースの PMV 平均値はそれぞれ、ケース①：+0.2、ケース②：+0.5、ケース③：-0.1、ケース④：-0.2 と全てのケースで +0.5～-0.5 の範囲であった。DCFCU によるケース②の東側稼働ではやや暖かい側の PMV となったが、ケース③および④は PMV が 0（中立値）に近い値となり、DCFCU の稼働エリアや運転台数の調整により放射パネルと同等の PMV が得られることを確認した。

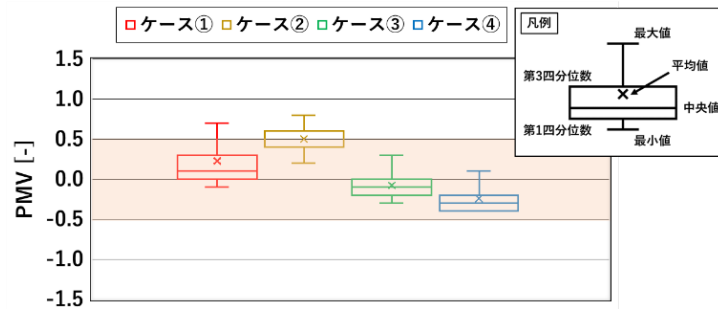


図8 就業時間中(8:45~17:30)におけるPMV測定結果

## 5.2 執務者アンケート調査

各ケースにおける室内環境の快適性について、毎日アンケートの結果から気流感満足度、温冷感、温熱環境満足度の3点で比較を行った。

図9に気流感に対する満足度アンケート結果を示す。ケース①および②では、「やや満足」～「非常に満足」の満足側の回答が60%得られた。一方で、ケース③では「やや不満」の回答がないが、ケース①および②では一定数みられた。これは、ケース①ではDCFCUの稼働がなく、ケース②ではDCFCUの稼働台数がケース③と比較して少ないことから、気流感を求める執務者が一定数居た可能性が考えられる。また、ケース④では「やや不満」の回答が全てのケースの中で最も多い結果となった。これは、DCFCUの稼働台数が多く不快な気流感となったことが考えられる。

図10に温冷感に対するアンケート結果を示す。ケース①～③では、「やや涼しい」～「やや暖かい」の中立側の回答が80%以上得られた。ケース④では「涼しい」～「寒い」の申告が多く見られた。

図11に温熱環境満足度のアンケート結果を示す。総合的な温熱環境満足度としては、「やや満足」～「非常に満足」の満足側の回答はケース①が最も多く67%となった。また、温冷感のアンケートでは寒い側の申告はあったものの、ケース④でも満足側の回答が50%得られた。ケース②では「やや不満」の回答が全てのケースで最も多くなってしまったが、これは前日までの検証にDCFCU 全台稼働などがあり、執務者が涼しい環境に慣れてしまったため、中立の回答が「やや不満」に寄ってしまった可能性が考えられる。

以上の結果より、ケース①の放射パネル稼働が最も高い温熱環境満足度が得られたが、ケース②～④のDCFCU稼働では、執務室全体の空気温度を低下することができ、同等の満足度が得られることが確認できた。また、本執務室においては、東側に発熱体となる機器類や執務者が集中していることもあり、ケース①、③、④では東側とそれ以外のエリアで温度差が生じてしまったが、負荷の大きい東側を中心に稼働したケース②では温度差が緩和されていたため、DCFCUの稼働台数や稼働エリアを調整することで室内環境を改善できる可能性が示唆された。

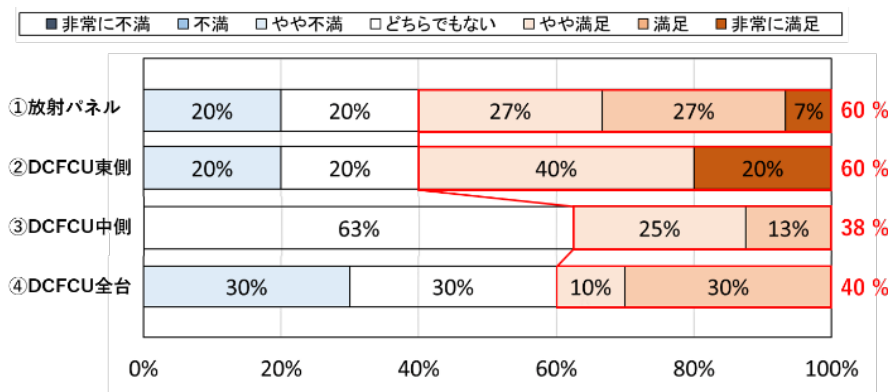


図9 気流感に対する満足度アンケート結果

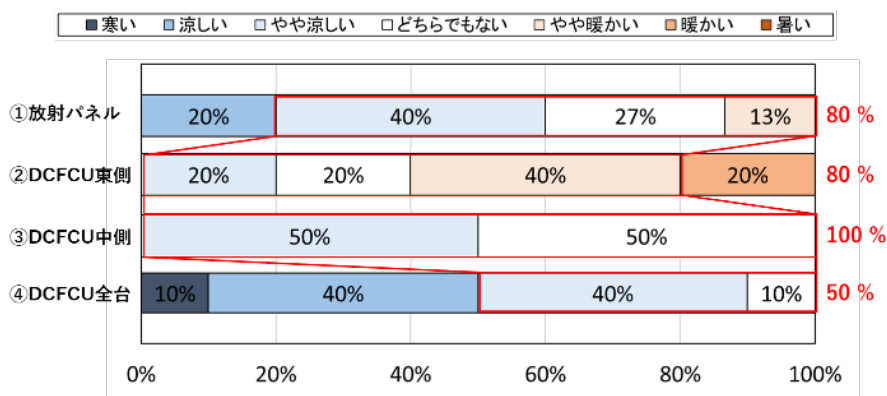


図 10 温冷感に対するアンケート結果

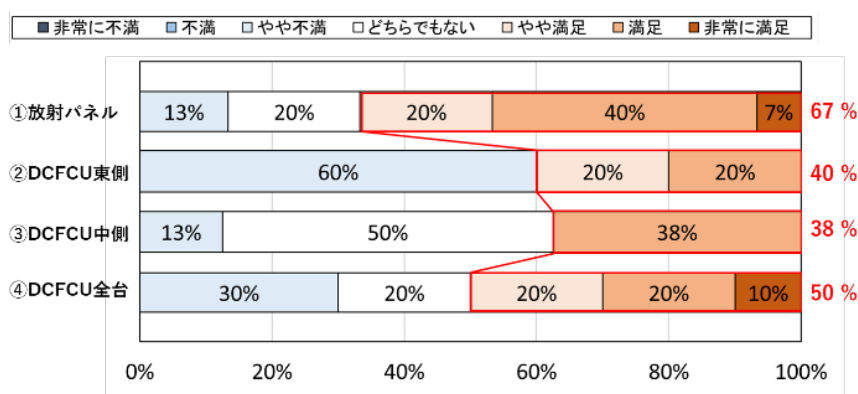


図 11 温熱環境満足度のアンケート結果

## 6. おわりに

本研究では、DCFCU を夏期のアンビエント空調として活用し、放射パネルとの室内環境の比較検証を行った。その結果、放射パネルよりも設置面積や必要水量が少ない DCFCU で、放射パネルと同程度の温熱環境満足度が得られ、室内を快適な環境に整えることができた。今後は、より最適な DCFCU の運転台数や配置等の運転方式を検証し、更なる環境改善と省エネ化に取り込んでいきたい。

## 文 献

- 1) 齋藤雅浩, スレスタミサン, 市川侑, 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計画 (第 39 報) 夏期における天井型パーソナル空調機と放射パネルとの室内環境比較, 空気調和・衛生工学会論文集, pp229-32 (2025. 9).
- 2) 武藤友香, 羽鳥大輔, 高西茂彰, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 牧野内絵里, 粕谷文: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証計画 (第 1 報) 全体計画及びコンセプト, 空気調和・衛生工学会論文集, pp185-88 (2019. 9).
- 3) 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計画 (第 5 報) 二次側空調機器の開発, 空気調和・衛生工学会論文集, pp161-64 (2020. 9).
- 4) 鈴木美穂, 相澤直樹, 柴田克彦, 清水昭浩, 武藤友香, 竹原大暉: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証計画 (第 23 報) 天井放射パネルの個別制御による省エネルギー性と快適性, 空気調和・衛生工学会論文集, pp215-18 (2022. 9).
- 5) 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

施設の計画と実証計画 (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・衛生工学会論文集, pp117-20 (2024. 9).

- 6) 柴田克彦, 平原美博, 清水昭浩, 羽鳥大輔, 武藤友香, 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計画 (第 10 報)潜顕分離空調の夏期性能評価とシステム最適化, 空気調和・衛生工学会論文集, pp197-200 (2021. 9).

### ABSTRACT

The office areas of our research facility use a task-ambient air conditioning system, where base loads are treated by an outdoor air handling unit and radiant air conditioning, while sensible heat load is treated by personal air conditioning systems, DCFCU. Although radiant air conditioning is more comfortable and energy efficient compared to conventional systems, it has challenges such as requiring a large installation area and the need for sound absorption measures. Therefore, as an energy-efficient alternative to radiant air conditioning, we used the DCFCU for ambient air conditioning during summer and conducted a comparative evaluation of the indoor environment. The results confirmed that comparable comfort could be achieved with less water supply than with radiant air conditioning.

---

# STUDY ON OPERATIONAL UPGRADING IN ENERGY SELF-SUFFICIENT INNOVATION CENTER (PART 1) PERFORMANCE EVALUATION OF PERSONAL AIR CONDITIONING SYSTEM IN SUMMER AND WINTER

Mishan SHRESTHA<sup>1</sup>, Kentaro KIMURA<sup>1</sup>, Akihiro SHIMIZU<sup>1</sup>, Katsuhiko SHIBATA<sup>1</sup>  
Yu ICHIKAWA<sup>1</sup>, Masahiro SAITO<sup>1</sup>, Masanari UKAI<sup>2</sup>, Sin-Ichi TANABE<sup>2</sup>

## ABSTRACT

We are developing a ceiling-mounted air conditioning unit (hereinafter referred to as DCFCU) using DC fan with the aim of reducing the environmental impact of office buildings. The DCFCU installed at the Takasago Thermal Engineering Innovation Center (hereafter referred to as “the facility”) was originally introduced as a personal air conditioning (PECS: Personal Environment Comfort System) for cooling purposes [1]. However, during peak periods in summer and winter, deterioration in the indoor working environment was observed. Therefore, DCFCU was repurposed as an ambient air conditioning to improve the working environment and reduce energy consumption. This study presents the results of improving the indoor thermal environment and reducing energy consumption in open office areas by supplying waste hot water to DCFCU discharged from a wood biomass gasification generator (hereafter referred to as biomass CHP, CHP: Combined heat and power) in winter. In summer, groundwater was utilized for cooling. These were implemented during early morning start-up and working hours.

## 1. INTRODUCTION

In the field of air conditioning systems, research on PECS is advancing from the perspectives of achieving ZEB (Zero Energy Buildings), improving thermal comfort, and energy saving [2-4]. IEA EBC Annex 87 is working to quantify the benefits of PECS in terms of comfort, health, energy performance, and cost, as well as to establish design criteria and operation guidelines. These efforts underscore that the integration of PECS with general ambient systems in space is an internationally significant research topic [5].

This facility has adopted and operates PECS to achieve reduced environmental impact and enhanced intellectual productivity. The PECS is localized air conditioning system developed to address individual thermal discomfort and preferences by directly cooling or heating the body without affecting the overall thermal environment. It provides low-power air supply, heating, and cooling near the user. Therefore, when the PECS is used as ambient air conditioning, it is expected to contribute more significantly to energy savings, particularly by reducing air transport power compared to conventional methods that distribute air from multiple outlets. An overview of the building, energy and heat source systems, and air conditioning systems is introduced first.

### 1.1 Architectural Overview

This facility is an energy self-sufficient that aims for off-grid operation by integrating solar power generation, biomass CHP, groundwater heat utilization, and large-scale batteries [6]. **Fig. 1** shows the exterior and interior views, and **Table 1** shows an overview of the facility. The facility primarily consists of office and laboratory wings. The energy-saving goal for the office wing is to achieve ZEB status, and the entire facility aims to achieve “ZEB Ready” based on actual performance [7]. During intermediate seasons such as spring and

---

This article is an update version of conference paper, submitted to the 18th Asia Pacific Conference on the Built Environment, Shaping a Sustainable and Healthy Built Environment held on November 7-8, 2025, in Singapore.

<sup>1</sup> Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

<sup>2</sup> Department of Architecture, Waseda University

autumn, natural ventilation is carried out by opening windows located at both high and low positions when outdoor climatic conditions are favorable.



Fig. 1 Exterior (upper) & interior (down) view of the facility

Table 1 Facility overview

Location	Ibaraki Prefecture, Japan
Facility Use	Office and Research facility
Number of floors	2 stories
Height	15.455m
Gross floor area	11,763.97 m <sup>2</sup>
Office wing area	4,757 m <sup>2</sup>
Completion date	January 2020

### 1.2 Energy and Heat Sources System for Air Conditioning

The schematic diagram in Fig. 2 shows an overview of the energy and heat source systems adopted in the facility. Groundwater is used for cooling, whose temperature ranges from 15~17°C throughout the year. It is used for various air conditioning systems, such as the desiccant outdoor air conditioning unit (DOAS) on the first floor, the PECS, and ceiling radiant panels. Two biomass CHP units are installed, enabling the extraction of both electricity and heat. The waste heat from the biomass CHP is utilized for the air conditioning systems, hot water supply, and biomass chip drying.

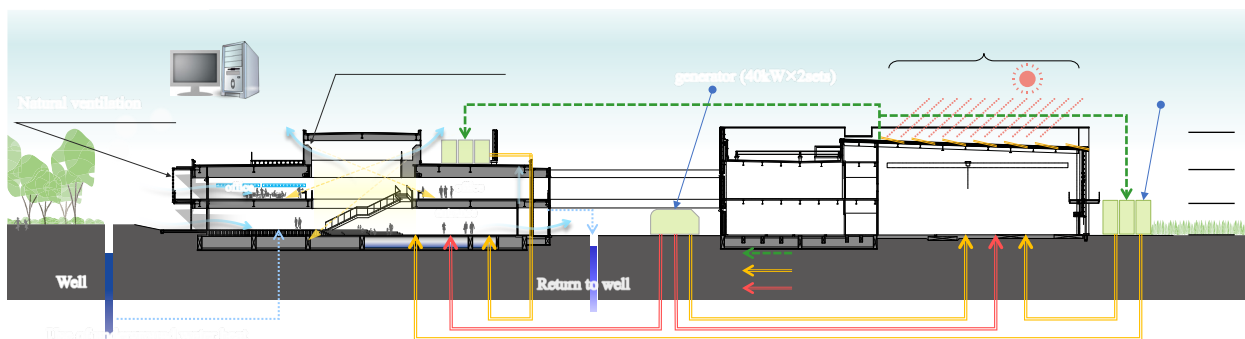


Fig. 2 Conceptual diagram of energy and heat source systems

### 1.3 Air Conditioning Systems

Fig. 3 shows the concept of the air conditioning system adopted for the office area. The office area on the second floor is designed based on the Activity-Based Working (ABW) concept, enabling a flexible environment. This environment consists of ambient air treated by a reheat-type outdoor air handling unit (OHU) and personal environments controlled by human centric PECS units.

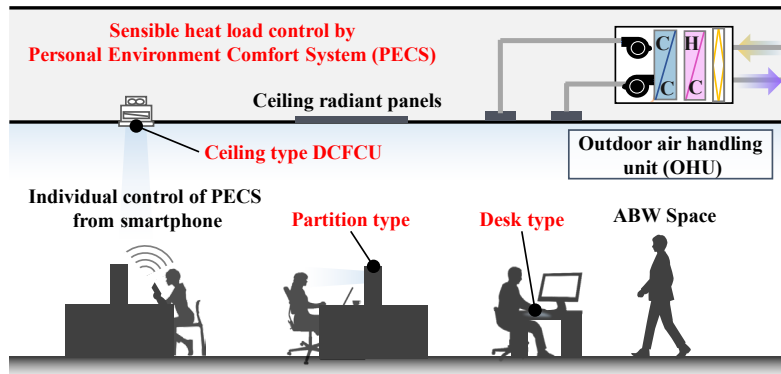


Fig. 3 Conceptual diagram of PECS uses in office area

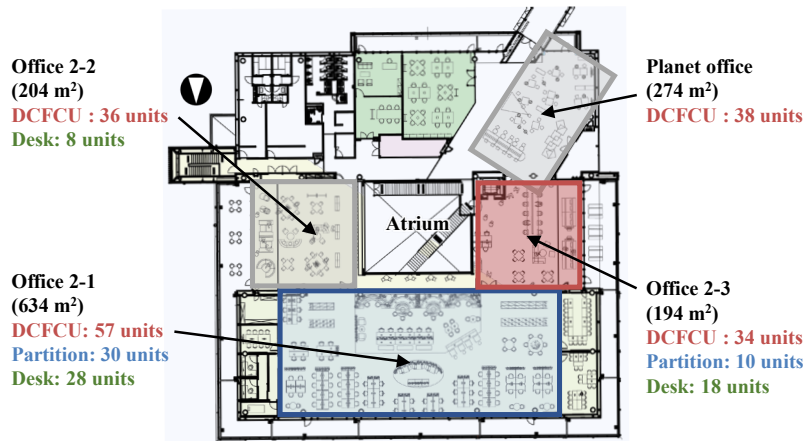


Fig. 4 2F plan view of the office area indicating PECS installation areas, Closed area: Office area 2-1, Open area: Office area 2-2,2-3

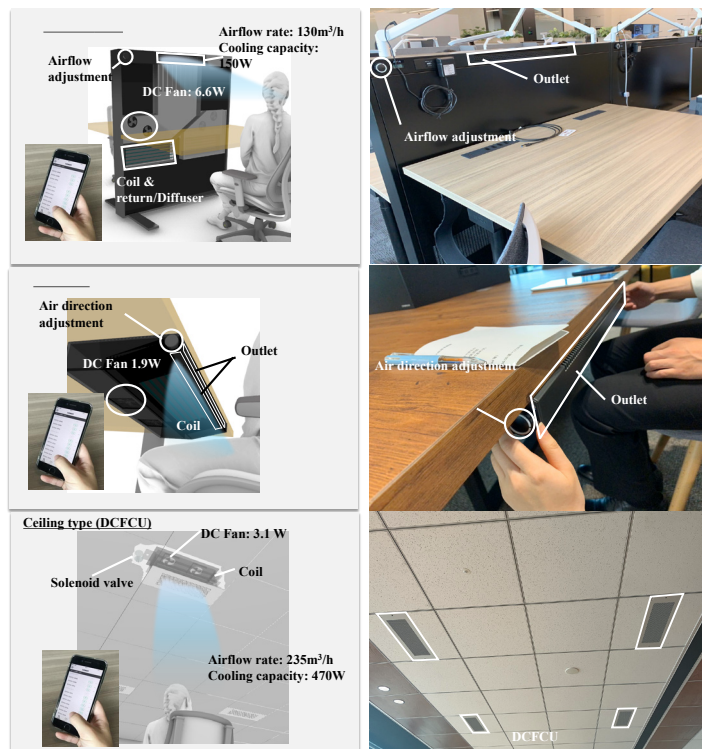


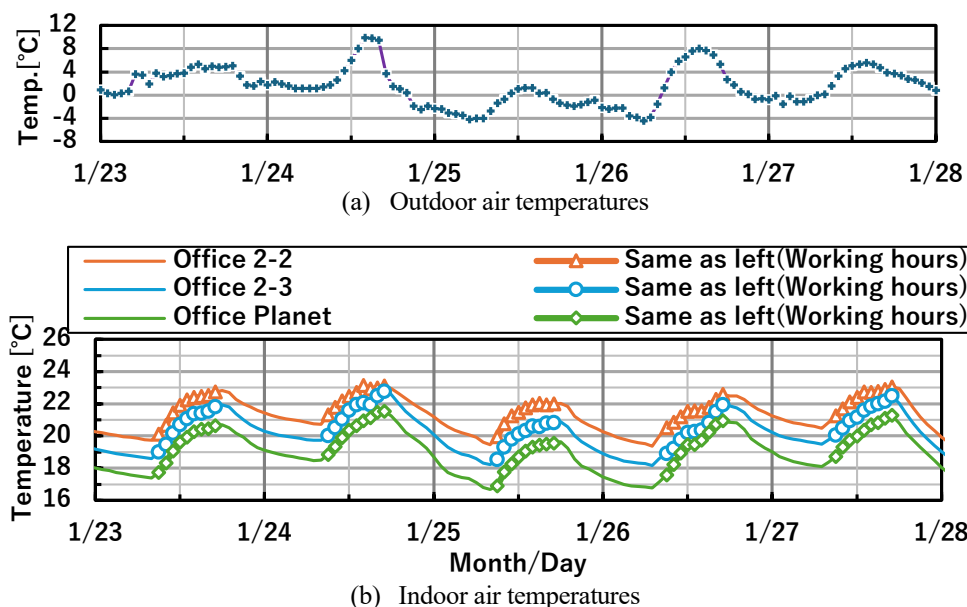
Fig. 5 Specifications of PECS: Application image (Left), Installation image in the facility (Right)

**Fig. 4** shows the office area, which is mainly divided into two different areas: a closed area named Office 2-1 and an open area which consists of Office 2-2, Office 2-3, and Planet Office. The installation areas for PECS are also indicated. **Fig. 5** shows three types of PECS: partition type, desk type, and ceiling-mounted DCFCU, installed in the office area along with their specifications. These units can be turned ON/OFF using smartphones according to occupant preferences. The DCFCU uses DC fans and operates with very low power consumption.

## 2. PERFORMANCE EVALUATION IN WINTER

The open office area is air-conditioned using OHU and PECS. During the winter, the OHU starts preheating approximately two hours before the start of work; however, there was an issue where the indoor temperature took a long time to rise, and even by the afternoon, it did not reach the required temperature of 22°C. **Fig. 6 (a)** shows the outdoor temperature and **Fig. 6 (b)** shows the indoor temperature variations in the open area during a representative week in January 2023. Although there were variations depending on indoor and outdoor temperatures, the room temperature ranged from 17~ 21°C at the start of work and gradually increased, reaching approximately 22°C by the end of the working hours.

Therefore, in order to improve thermal comfort in the open area, the piping system was upgraded so that hot water prepared by the exhaust heat of the biomass CHP could be supplied to the DCFCU. Additionally, new functions were added to enable batch scheduled operation of the DCFCUs, which were originally installed for personal air conditioning, so they could be used for ambient air conditioning as well. Specifically, a method was adopted where all DCFCUs are operated in batch before the start of working hours to preheat the open area. To evaluate the effectiveness of these operational improvements, verification study was conducted under three conditions: without preheating (Case 1), and with preheating (Case 2 and Case 3). The verification methods and results are presented below.



**Fig. 6 Variations of temperatures (Jan. 2023)**

### 2.1 Methodology

**Table 2** shows an overview of winter measurements. **Fig. 7** shows an overview of thermal environment measurements in the office area. During preheating operation, the hot water supply temperature to the DCFCUs (hereafter referred to as  $T_{HS}$ ) was set at: 45°C (Case 2) and 35°C (Case 3). The preheating operation was carried out from 5:30~7:30, prior to the operation of the OHU, which operated from 8:00~18:00.

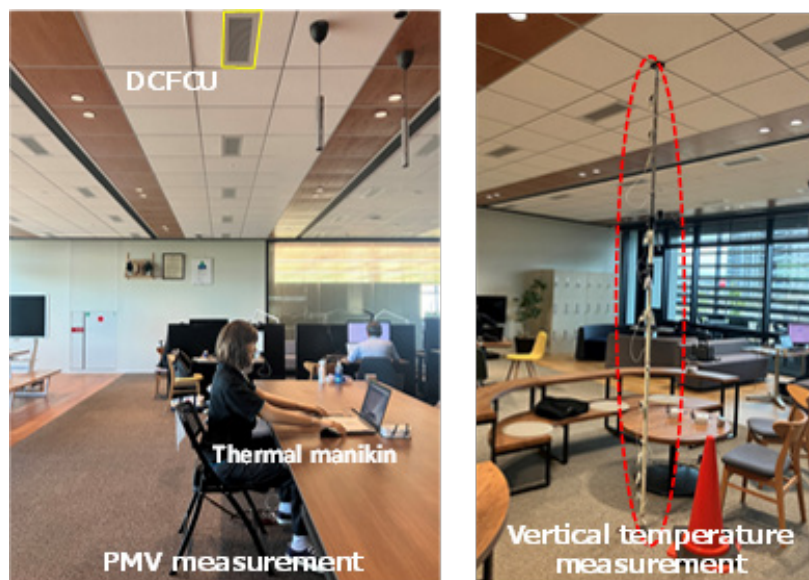
A questionnaire survey was conducted once a day via an online format targeting office occupants. **Table 3** shows the scales used in the questionnaire survey for the thermal sensation vote (TSV) and thermal satisfaction vote. TSV is evaluated using a seven-point scale based on the PMV, ranging from “Cold” (-3) to “Hot” (+3). Thermal satisfaction is also assessed using a seven-point scale, ranging from “Very dissatisfied” (-3) to “Very satisfied” (+3), and both are used for evaluation.

**Table 2 Measurement overview in winter**

Survey period	Winter (2024/1/8~1/31)
Area	Office 2-2 and 2-3 (open area)
Purpose of DCFCU use	Preheating
DCFCU operation time	Case 1: all units OFF Case 2, Case 3: 5:30~7:30
OHU operation time	Case 1: 7:00~18:00 Case 2, Case 3: 8:00~18:00
Heat source	Waste heat of biomass CHP

**Table 3 Scales used for questionnaire survey**

Survey period	Winter (2024/1/8~1/31)
Area	Office 2-2 and 2-3 (open area)
Purpose of DCFCU use	Preheating
DCFCU operation time	Case 1: all units OFF Case 2, Case 3: 5:30~7:30
OHU operation time	Case 1: 7:00~18:00 Case 2, Case 3: 8:00~18:00
Heat source	Waste heat of biomass CHP



**Fig. 7 Thermal environment measurement in the office area**

## 2.2 Outdoor and Indoor Temperatures

**Fig. 8** shows the variations of outdoor air temperature and indoor temperature for a representative week in January 2024 after the implementation of operational improvements (Case 3,  $T_{HS}$ : 35°C). On January 22, the first workday after a holiday, the indoor temperature was below 20°C at 9:00, the start of work. However, thereafter, it remained generally between 20~24°C, indicating the effectiveness of preheating by the DCFCU.

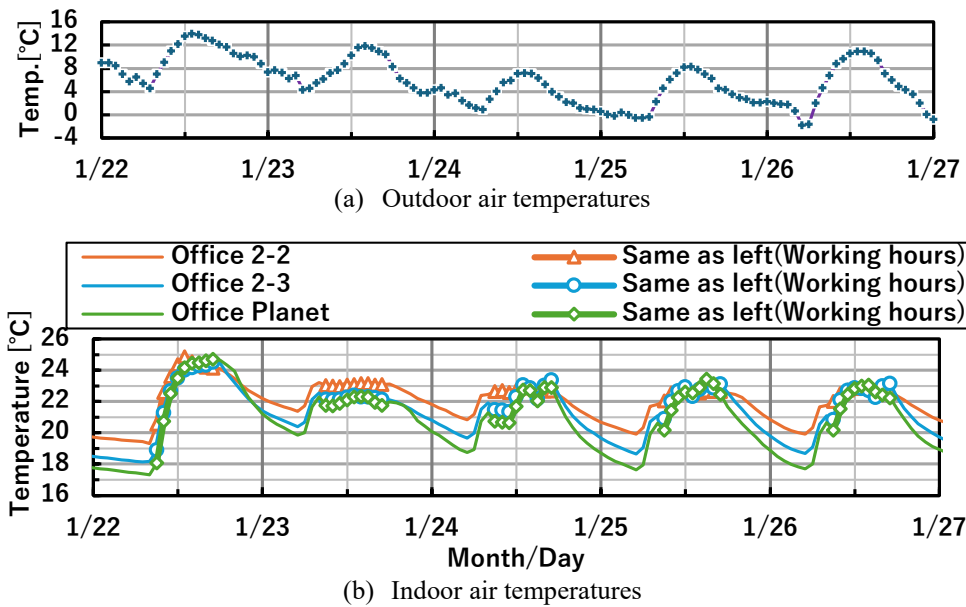


Fig. 8 Variations of temperatures (Jan. 2024, Case 3)

### 2.3 Vertical Temperature Distribution

Fig. 9 shows the vertical temperature distribution before and after preheating in the Office 2-3 on a representative day. In Case 2, during preheating, the air temperature near the ceiling rises to as high as 30°C, but gradually decreases after the DCFCUs stop, with the air temperature maintaining around 20-21°C in the occupied zone. Subsequently, the OHU starts the operation, and by 9:30 (⑦ in the Fig.9), the air temperature near the ceiling start to increase again. This is because the DCFCU was operated again after the preheating operation was ended. On the other hand, in Case 3, the temperature rise near the ceiling during preheating operation was smaller compared to Case 2. At the end of preheating operation, the air temperature in the occupied zone was maintained at around 22°C, indicating that the air is sufficiently mixed throughout the room. Fig. 10 shows the thermal images taken at the end of the preheating operation. As shown in Fig. 9, in Case 2, only the ceiling area becomes hot, and warm air did not reach the occupied zone, whereas in Case 3, the vertical temperature distribution is smaller.

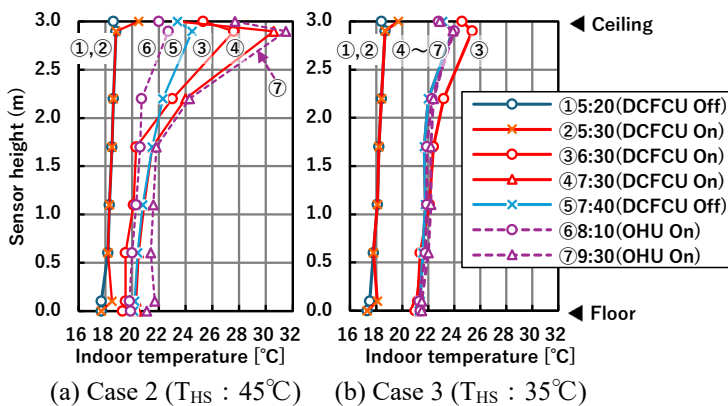


Fig. 9 Representative vertical temperature distribution

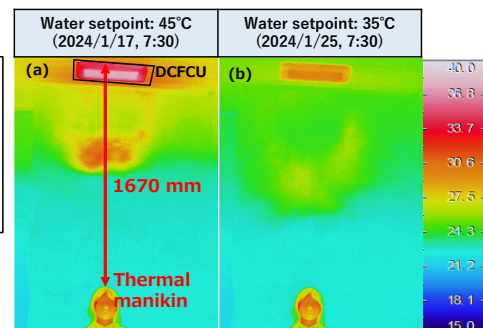


Fig. 10 Thermography image at the end of preheating

### 2.4 Evaluation by PMV

Fig. 11 shows a comparison of PMV during core working hours. PMV was calculated using measured values of air temperature, globe temperature, and relative humidity at a height of 600 mm from the floor. The clothing insulation was set to 0.73 clo, metabolic rate to 1.2 met, and air velocity to 0.1 m/s. In Case 1,

the PMV was -1.0, indicating a cold thermal sensation. In contrast, in Case 2 and Case 3, the PMV remained within the range of approximately -0.5 to 0.5, confirming the effectiveness of the preheating operation.

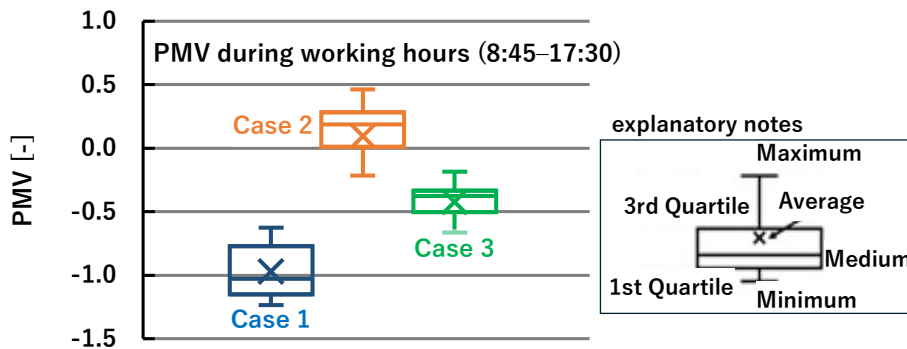


Fig. 11 Representative PMV in winter

### 2.5 Evaluation by Questionnaire Survey

Fig. 12 (a) shows the TSV at the start of work (8:45), and Fig. 12 (b) shows the thermal satisfaction vote during working hours. In Case 1, where no preheating operation was conducted, 44% of occupants voted “Cool” or “Slightly cool” at the start of work. In contrast, in Case 2 and Case 3, where preheating operation was conducted, votes of cold sensations disappeared significantly, and approximately 70% of the occupants voted feeling “Slightly warm”~“Hot”.

Regarding the thermal satisfaction vote during core working hours, Case 1 showed that only 68% of occupants voted feeling “Neutral”~“Satisfied.” The votes increased to 81% in Case 2, and further to 94% in Case 3. The higher thermal satisfaction in Case 3 compared to Case 2 is considered due to some occupants who voted “Hot” in TSV also indicating dissatisfied in terms of thermal satisfaction. In addition, thermal comfort was found to be higher at  $T_{HS} = 35^{\circ}\text{C}$  compared to  $T_{HS} = 45^{\circ}\text{C}$ . This is likely due to the smaller difference between the indoor air temperature and the supply air temperature, which led to mixing of indoor air and reduced the vertical temperature difference.

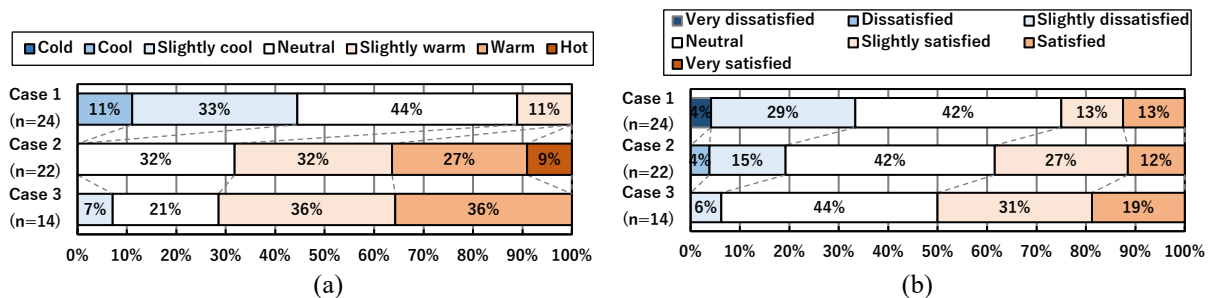


Fig. 12 Questionnaire survey results: (a) Thermal sensation votes at the start of work, (b) Thermal satisfaction during core working hours

### 2.6 Energy Efficiency Evaluation

To evaluate the energy-saving potential of the preheating operation, the power consumption of the OHU, hot water secondary pump, and DCFCU were analyzed. Fig. 13 shows the comparison of the daily cumulative power consumption on a representative day (January 24, 2024) when DCFCU preheating was conducted at  $T_{HS}35^{\circ}\text{C}$  with that on a similar day (January 25, 2023) in the previous year without preheating. During the preheating period, the OHU operating time was shortened by one hour, and the indoor temperature reached the specified temperature earlier during core working hours, making it possible to reduce the OHU supply airflow. As a result, daily power consumption was reduced by approximately 32% compared to the day without preheating. Furthermore, even with reduced supply airflow of the OHU, indoor  $\text{CO}_2$  concentration remained below 700 ppm.

A comparison of power consumption over the two-month period of January and February between 2023 (without preheating) and 2024 (with preheating) confirmed an energy reduction of approximately 25%, equivalent to about 1,070 kWh.

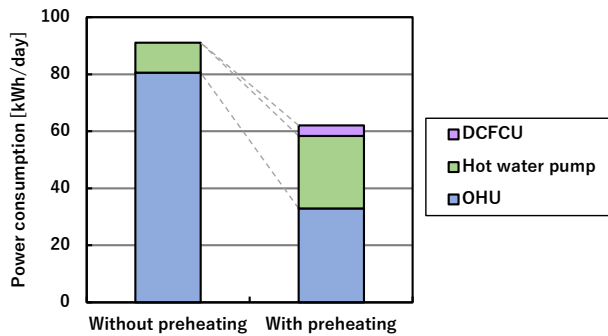


Fig. 13 Comparison of energy consumption

### 3. PERFORMANCE EVALUATION IN SUMMER

Using the ambient air conditioning function of the DCFCU system, which was upgraded during the winter survey, performance verification was also conducted during the summer, with the aim of improving thermal comfort and achieving energy savings. Specifically, the verification was conducted by changing the number of DCFCU operating in the open area. The verification methods and results are presented below.

#### 3.1 Methodology

Table 4 shows an overview of the summer measurements. The OHU operated from 6:00~18:00, including pre-cooling, while the DCFCUs operated from 8:00~17:30. The OHU operation was scheduled to start 2 hours earlier than the DCFCU operation in order to perform dehumidification during pre-cooling and prevent condensation on the surfaces of the DCFCU units during their operation. The survey was conducted once a day online, similar to the winter survey. Table 5 shows the operation patterns of the OHU and DCFCU. In Case 1, all DCFCUs were turned off, while in Cases 2~5, the number of operating DCFCUs varied. In Cases 1~5, the supply airflow of the OHU was set to the maximum airflow (design airflow rate). In Case 6, the supply airflow of the OHU was reduced by half, with all DCFCUs in operation.

Table 4 Measurement overview in summer

Survey period	Summer (2024/8/5~8/29)
Area	Office 2-2 and 2-3 (open area)
Purpose of DCFCU use	Zoned cooling
DCFCU operation time	8:00~17:30 (Case 2~Case 6)
OHU operation time	7:00~17:30
Heat source	DCFCU: groundwater, OHU: heat pump chiller

Table 5 Operation pattern of OHU and DCFC in summer

	Case 1	Case 2
OHU	Maximum airflow All 70 units OFF	Maximum airflow All 70 units ON
DCFCU	Office 2-2 (East side) Office 2-3 (West side)	
	Case 3	Case 4
OHU	Maximum airflow Alternative row 36 units ON	Maximum airflow Perimeter 2 row 24 units ON
DCFCU		
	Case 5	Case 6
OHU	Maximum airflow Perimeter 1 row 12 units ON	Half airflow All 70 units ON
DCFCU		

### 3.2 Outdoor and Indoor Temperatures

Fig. 14 (a) shows the variations in outdoor air temperatures while Fig. 14 (b) shows the variations in indoor air temperatures in the open area during the survey period in August 2024. In Case 1, the air temperature exceeding 26°C was frequently observed. However, in Case 2~6, the temperature remained generally below 26°C except for some periods in the morning hours at the start of work, suggesting that thermal comfort was maintained. Additionally, the indoor relative humidity during this period was generally between 50~60%, and the CO<sub>2</sub> concentration remained below 650 ppm in all cases.

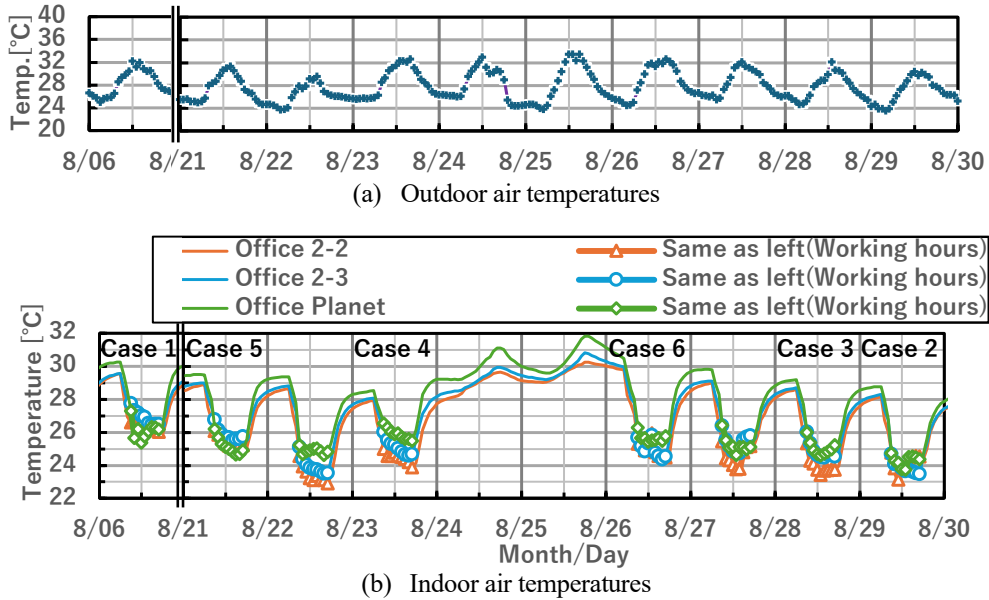


Fig. 14 Variations of temperatures (Aug. 2024)

### 3.3 Vertical Temperature Distribution

Fig. 15 shows a comparison of vertical temperature distributions around 14:00 PM during summer when the outdoor temperature was approximately 30~32°C, under six different operation patterns. In all cases, the vertical temperature difference in the occupied zone (height  $\leq 1.7$  m) was maintained below 1°C, but there are differences in the temperature range. In Case 1, where the DCFCU was not in operation, the indoor temperature approaches 26°C. In Case 2~5, the indoor temperature tended to decrease as the number of operating DCFCUs increased. In Case 6, all DCFCUs were operated with the OHU reduced supply airflow to approximately half. The indoor temperature was around 24°C, showing only about 1°C increase compared to Case 2, which operated at maximum airflow.

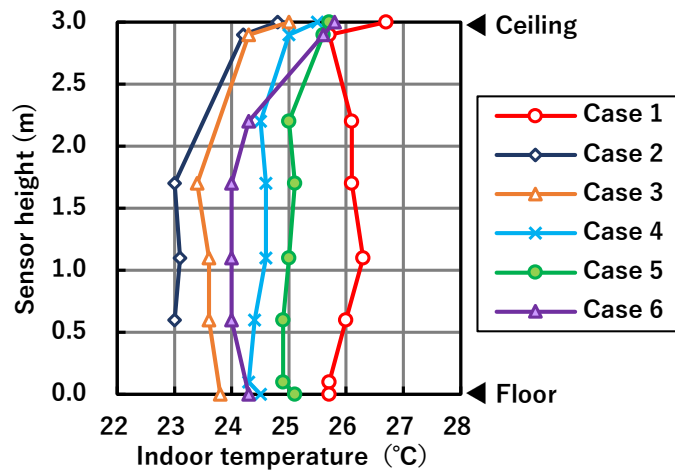


Fig. 15 Representative vertical temperature distribution

### 3.4 Evaluation by PMV

Fig. 16 shows a comparison of PMV during the core working hours. For the PMV calculation, the clothing insulation was set to 0.5 clo, while all other parameters were kept the same as in the winter survey. The PMV values showed a trend similar to the indoor temperature variations observed in Fig. 15, under the varying number of DCFCUs operations. The average PMV values for Case 1 and Cases 4~6 fell within the comfort range ( $PMV \leq \pm 0.5$ ).

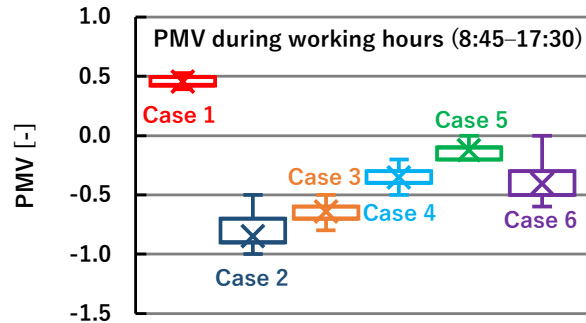


Fig. 16 Representative PMV in summer

### 3.5 Evaluation by Questionnaire Survey

Fig. 17 (a) shows the TSV results for each case during the summer. In Case 1, where no DCFCU was in operation, more occupants voted “Hot”, whereas in Cases 2 and Case 3, where a greater number of DCFCUs were in operation, high number of occupants voted “Cold”. On the other hand, in Cases 4 and Case 5, where a small number of DCFCUs were in operation, and in Case 6, where the OHU supply airflow was halved, a relatively high number of occupants voted “Neutral”.

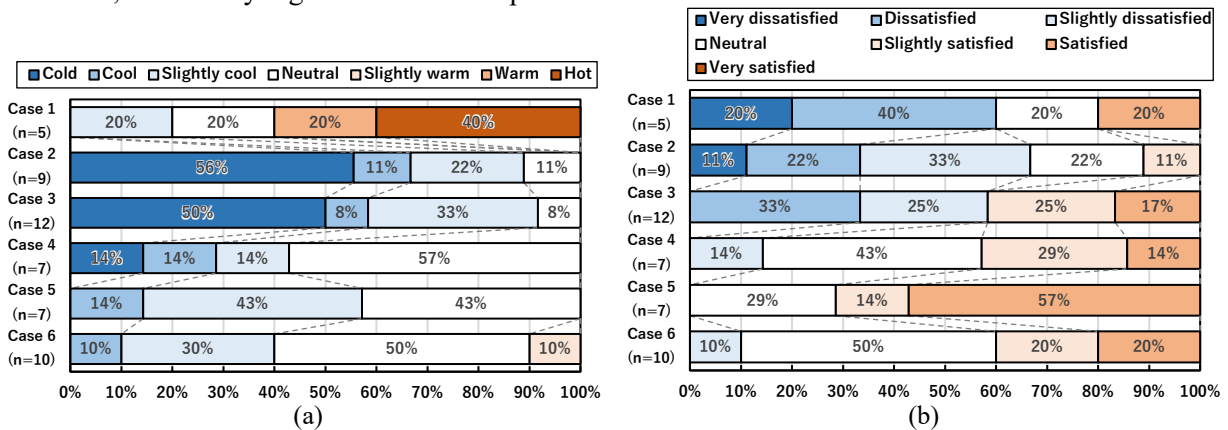


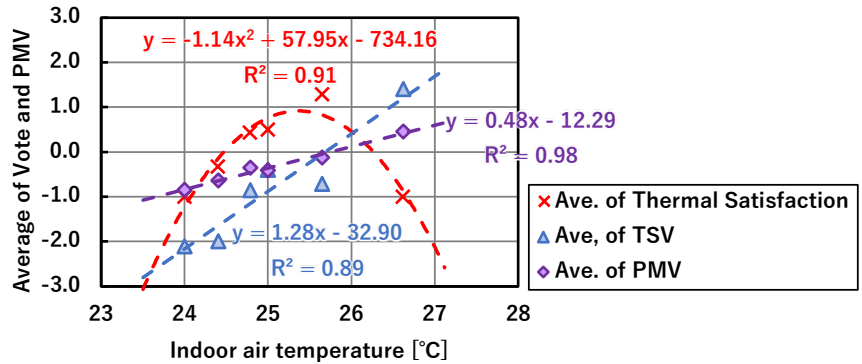
Fig. 17 Questionnaire survey results in summer: (a) Thermal sensation vote, (b) Thermal satisfaction vote

Fig. 17 (b) shows the results of the thermal satisfaction vote. Similar to the TSV results, Cases 1~3, the percentage of occupants who voted “Neutral”~“Satisfied” was below 50%, indicating low thermal satisfaction. On the other hand, in Cases 4~6, where “Neutral” votes were more frequent, over 80% of occupants voted “Neutral” to “Satisfied,” indicating high thermal satisfaction. Thermal satisfaction varies significantly depending on individual preference, but the results suggest that adjusting the operation of DCFCU and OHU can improve average TSV and thermal satisfaction of occupants.

Based on the results of PMV, TSV, and thermal satisfaction vote as shown in Fig. 16 and 17, Case 5 showed the best results. In this study, Case 6 showed slightly cooler evaluations, but reducing the number of DCFCUs could further enhance comfort. It was suggested that by controlling both the OHU airflow and the number of DCFCUs, the PMV could be brought even closer to zero.

Fig. 18 shows the relationship between indoor air temperature, questionnaire survey results, and PMV for each case in summer. The average values of TSV and thermal satisfaction votes were quantified using

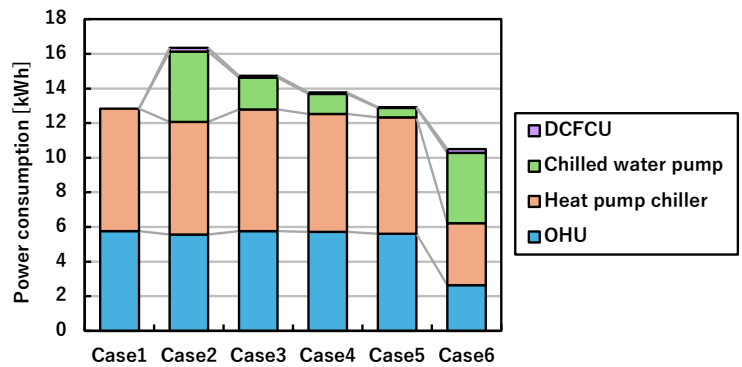
the scales shown in **Table 3** and average for each case. Compared to PMV, TSV showed a steeper slope, indicating higher sensitivity to indoor air temperature. Furthermore, both PMV and TSV were neutral around the indoor air temperature of 25.5°C, suggesting that the thermal comfort indicated by TSV is reliable. Since thermal satisfaction also peaked at around 25.5°C, this temperature appears to represent the optimal comfort condition under the present HVAC system.



**Fig. 18 Relationship between the indoor air temperature, questionnaire survey results, and PMV**

### 3.6 Energy Efficiency Evaluation

**Fig. 19** shows a comparison of the average power consumption per hour for each case. Compared to Case 1, where the DCFCUs were not in operation, Case 2~5 showed increased power consumption due to the operation of the chilled water secondary pump and DCFCUs. But the increase of power was relatively small in the context of total energy consumption. On the other hand, in Case 6, the power consumption of the OHU was significantly reduced, resulting in 18~36% reduction compared to the other cases. Based on a comprehensive evaluation of these results, Case 6, in which all DCFCUs were operated while the OHU supply airflow was halved, showed the best performance in terms of both thermal comfort and energy efficiency within the scope of this study.



**Fig. 19 Comparison of energy consumption in summer**

## 4. CONCLUSIONS

This study introduces the facility overview, energy systems, and air conditioning systems of the Takasago Thermal Engineering Innovation Center, an energy-self-sufficient research facility. It examines the ambient performance evaluation of DCFCU units, which were installed in the open office area as personal air conditioning. These units were operated and implemented for preheating in winter and zone cooling in summer, with the aim of improving indoor environmental conditions and enhancing energy efficiency. The major findings of this study are summarized as follows:

1. In winter, preheating operations using waste heat from the biomass CHP were conducted with two temperature settings,  $T_{HS}$ : 35°C and 45°C. The results showed that a  $T_{HS}$  setting of 35°C provided

higher occupant satisfaction in terms of thermal comfort. This is likely because the supply temperature of DCFCU being closer to the temperature in the occupied zone contributed to more uniform indoor temperatures and improved indoor thermal conditions. By preheating operation, 93% of occupants voted to the warm side at the start of work, and the overall thermal satisfaction vote reached 94%. From the point view of energy, preheating allowed for a reduction in the air transport power of the OHU, resulting in a 32% reduction in daily power consumption, and a 25% reduction over the two-month winter operation period.

2. In summer, performance evaluation was conducted in the open office area by operating DCFCUs as ambient air conditioning. A total of 6 cases were investigated and compared by changing the number of operating DCFCUs and the OHU supply airflow. In terms of thermal comfort, Case 5, where only one row of DCFCUs on the perimeter side was operated with full OHU airflow, provided the highest comfort level, followed by Case 6, where all DCFCUs were operated with half OHU airflow. On the other hand, in terms of power consumption, Case 6 achieved 18% reduction compared to the conventional operation in Case 1. Therefore, Case 6 showed the best overall results in terms of both thermal comfort and energy efficiency.

Based on the results of this study, the DCFCU system can be used for both PECS and ambient air conditioning purposes. Furthermore, by improving the operation method, it is possible to reduce power consumption and the improvement of thermal comfort. To achieve optimal operation, it is important to consider not only adjustments to the operation of DCFCU and OHU based on thermal load fluctuations, but also a multifaceted approach that includes whether the energy source for the heat supply is renewable or fossil based. At this facility, efforts to improve equipment operation and indoor environmental conditions will continue, with the aim of reducing global environmental impact and enhancing intellectual productivity.

## REFERENCES

- [1] Kimura et al, Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center (Part 11), Proc. SHASE, pp. 201–204, 2021 (Japanese).
- [2] Olesen and Kazanci, Energy and Indoor Environmental Quality Performance of Personalised Environmental Control Systems (PECS), AIVC Workshop, May 2023, Tokyo.
- [3] Khovalyg et al, Personalized Environmental Control Systems (PECS): Systematic Review of Benefits for Thermal Comfort, Air Quality, Health, and Human Performance, Building and Environment (2025), doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113541>.
- [4] UC Berkeley Center for the Built Environment (CBE), Using Personal Comfort Devices to Save Energy and Improve Comfort
- [5] IEA EBC - Annex 87 - Energy and Indoor Environmental Quality Performance of Personalised Environmental Control Systems, <https://annex87.iea-ebc.org/>.
- [6] Mutoh et al., Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center (Part 1), Proc. SHASE, pp. 185–188, 2019 (Japanese).
- [7] SHASE, Definition and Evaluation Method of Net Zero Energy Building, pp. 5, 2015 (Japanese)

## 要 約

我々は、オフィスビルの環境負荷低減を目的として、直流ファンを用いた天井型ファンコイルユニット（以降 DCFCU と称す）の開発に取り組んでいる。高砂熱学イノベーションセンター（以下、本施設）に導入した DCFCU は、当初冷房専用のパーソナル空調機（以下、PECS : Personal Environment Comfort System）として導入[1]したが、夏期と冬期のピーク時には執務環境の悪化が散見されたため、DCFCU をアンビエント空調機として活用し、執務環境の改善と消費エネルギー削減の両立を目指した。

本報では、吹抜け廻りのオープンエリアを対象とし、冬期には木質バイオマスガス化発電機（以下、バイオマス CHP、CHP : Combined heat and power）の排温水、夏期には地下水を DCFCU へ送水し、早朝の立上り運転や就業時間帯の運転に利用することで室内環境の改善と消費エネルギーの低減を実現した結果を報告する。

## 【技術論文】

本稿は、スマートビルシステム社会連携講座を通じて実施した研究成果として、  
空気調和・衛生工学会大会学術講演論文を加筆・再掲したものである。

# スマートビルアプリケーションの市場調査とエミュレータを 活用した次世代アプリケーション要件の提案※

青山剛士・宮田翔平\*1・村澤 達\*2  
田中勝彦\*3・赤司泰義\*1

## Market Research on Smart Building Applications and Proposal for Next-Generation Application Requirements Utilizing Emulators

Takeshi Aoyama・Shohei Miyata・Itaru Murasawa  
Katsuhiko Tanaka・Yasunori Akashi

近年、建物に対してエネルギー効率の向上やCO<sub>2</sub>削減など、より広範で持続可能な要求が高まっており、建物のインテリジェントな運用を実現するスマートビルが期待されている。本研究では、サイバー空間上にデジタルツインとしてHVACシステムを構築し、詳細にエミュレートする技術と、それを基盤としたアプリケーション開発について検討した。空調システムのアプリケーション市場調査の結果、AI技術の活用は最適制御など一部機能に限定されており、今後の拡大が見込まれることが明らかとなった。さらに、エミュレータを活用したアプリケーションの要件を整理し、現状とのギャップを分析した結果、AI技術とエミュレータ技術の組み合わせにより、従来は困難であった高度な最適制御、不具合検知・診断、試運転調整支援などの機能が実現可能となることを示した。

### 1. はじめに

近年、建物価値向上に対する要求は、エネルギー消費量削減だけでなく、CO<sub>2</sub>排出量削減、居住環境の質向上、デマンドレスポンスなど多様化している。これらの要求に応えるため、建物の効率的でインテリジェントな運用を実現するスマートビルが期待されている。しかし、スマートビルが提供するアプリケーション機能については様々な研究がなされているものの、技術的・構造的な課題により普及には至っていない<sup>2)</sup>。

本研究では、これらの課題に対する解決策として、サイバー空間に設備システムを構築し、物理的制約を受けることなくアプリケーションを開発する手法を提案する(図1)。筆者らは、空調設備を詳細にシミュレーションするエミュレータと、それを基盤としたアプリケーション開発に取り組んでいる。本稿では、現在の空調システムアプリケーション市場の調査分析と、エミュレータを活用したアプリケーションの要件整理を行い、次世代空調システムアプリケーションに必要な要件を提案する。

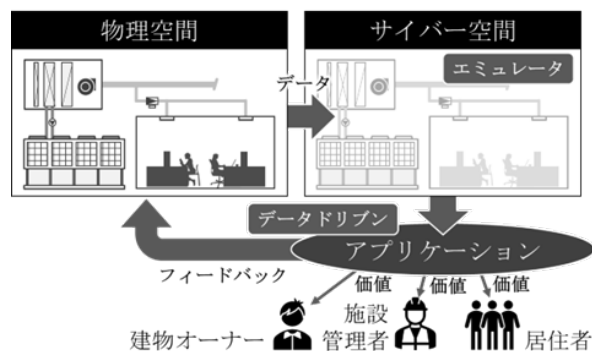


図1 デジタルツインによる建物サービス

※ 本論文は、2025年度空気調和衛生工学会大会講演論文<sup>14)</sup>を加筆修正したものである。

\*1 東京大学、\*2 東洋熱工業株式会社、\*3 東京電力ホールディングス株式会社

## 2. スマートビルに向けたアプリケーションの調査

エミュレータを用いたアプリケーションを検討するうえで、現在のスマートビルに向けたアプリケーションにどのようなものがあるかを調査した。その調査結果を世界の4つの地域に分けて、それぞれの地域の特徴を考察した。

### 2.1 調査方法

最初に、Web 検索エンジンおよび生成 AI (ChatGPT) を用いて、表 1 に示すキーワードまたはプロンプトに基づいてスマートビル向けに提供されているアプリケーションをリストアップした。次に、それらのアプリケーションについて、Web 上で公開されている情報を収集した。収集した情報を4つの地域に分類し、表 2 に示すように、提供価値、機能、事業形態、および AI の活用有無の観点から整理・分類した。

提供価値とは、各アプリケーションが提供するソリューションの内容を指す。一般に、省エネルギーは省 CO<sub>2</sub> やコスト削減にも寄与するが、本調査では、該当するアプリケーションにおいて提供価値として明示的に訴求されている内容のみを対象として整理した。このように提供価値を分類することで、各地域において重視されている価値の傾向を把握することが可能となる。

機能は、各アプリケーションが有する具体的な機能を指し、どのような機能が実用化され、普及しているかを把握することを目的として整理した。

事業形態については、アプリケーションの導入形態に着目し、クラウドベースのアーキテクチャを活用して設備の運転データを取得・解析し、エネルギー最適化や運用効率向上といった機能的価値を提供する「プラットフォーム事業」、設備の新設・更新に併せてアプリケーションを組み込む「設備エンジニアリング事業」、およびアプリケーションのソフトウェアを単体で提供する「ソフトウェア販売事業」の3類型を対象として整理した。

各分類項目については、該当するアプリケーション数の割合を算出し、定量的に整理した。

### 2.2 調査結果

#### (1) 調査対象

最初に、Web 検索エンジンと生成 AI によって 139 件のアプリケーションがリストアップされた。次に、それらのアプリケーションに関する公開情報を Web ベースで収集し、実際に提供されているアプリケーションに限定して絞り込んだ結果、最終的に表 3 に示す 99 件が対象となった。これらのアプリケーションを北米、欧州、日本、その他アジアの4つの地域に分類した。生成 AI (ChatGPT) は、Web 上の広範囲な公開情報をもとにアプリケーションを自動抽出できるというメリットがある一方で、実際には提供されていない構想段階のものや、誇張・虚偽を含む情報も混在するため、情報の事実確認をしながら整理することが不可欠である。その一方で、生成 AI は検索単語が曖昧でも広範に情報を提供可能であるため、スマートビルのアプリケーションという多義的な探索において有用と判断した。また、生成 AI (ChatGPT) の学習データの大部分が Web 上で情報量の多い英語圏由来となるため、欧米地域のアプリケーションが相対的に

表 1 検索条件

Web 検索エンジン	生成 AI (ChatGPT)
Keywords : Smart building, application	Prompt : Find out what services actually exist for smart building/AI applications in HVAC systems. Please research companies headquartered in "Area/Country". At least 20 services. Please output in Excel. Column A: Country Column B: Reference URL Column C: Company Name Column D: Service/Application Name Column E: Service/Application Description

調査時期：2024年8月～10月

表 2 調査結果の分類項目

提供価値	機能	事業形態
省エネルギー 省 CO <sub>2</sub> 快適性向上 生産性向上 安心・安全性向上 運用コスト削減	状態可視化、遠隔監視・操作、警報監視・アラート、エネルギー分析・レポート、デマンド等の予測、HVAC 最適制御、不具合・故障検知・予兆診断、電力デマンドピーク管理、デマンドレスポンス	プラットフォーム 設備エンジニアリング ソフトウェア販売

表3 地域別調査対象アプリケーション数

地域	調査対象数
北米	38
欧州	37
日本	15
その他アジア	9
合計	99

多く抽出される傾向が見られた。

(2) 提供価値

地域別のアプリケーションが市場にアピールしている提供価値を図2に示す。主な特徴は以下の通りである。

- ・全地域共通：省エネルギーが主要な提供価値
- ・北米：運用コスト削減と居住者快適性を重視
- ・欧州：省CO<sub>2</sub>への関心が高い
- ・日本：居住者快適性への関心が高い
- ・全体的に生産性向上や安心・安全性向上を謳うものは少ない

(3) システム機能

図3に調査したアプリケーションに実装されているシステム機能を示す。スマートビル向けのアプリケーション機能は状態可視化やHVAC最適制御が主流となっている。また、欧米では、遠隔監視・操作やエネルギー分析・レポートまで提供することが多い。北米では不具合・故障検知/予兆診断も実装されてきているが、世界的にはまだ少ない。不具合・故障検知/予兆診断について、秒単位で現実世界を再現するエミュレータによって、詳細な実データとエミュレータの理想的な運転データを比較することで精度の高い診断の実現の可能性がある、さらなる普及が期待できる。また、デマンドの予測や管理、レスポンスは世界的にもまだ少ない。日本としても制度として容量市場が開始されたばかりで、これから普及されていくと考えられる。

(4) 事業およびサービス

スマートビル向けのアプリケーションを提供している企業の事業形態として、図4に示すように、設備エンジニアリング事業だけでなく、プラットフォーム事業、ソフトウェア事業の大きく3つの形態について整理した。特に、通信を構築してデータのみを受領し、それを分析して付加価値を提供するプラット

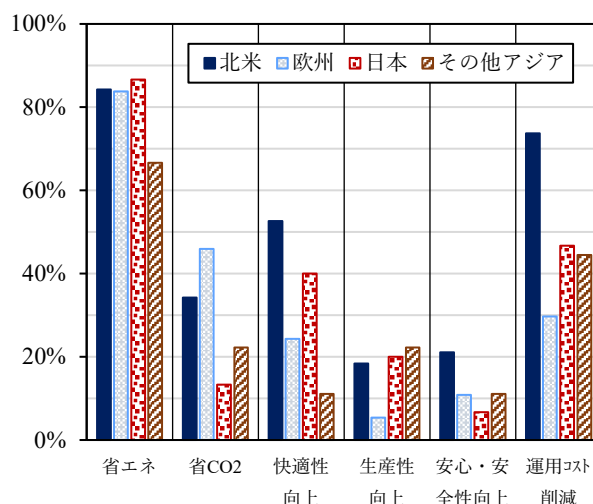


図2 地域別アプリケーションの提供価値

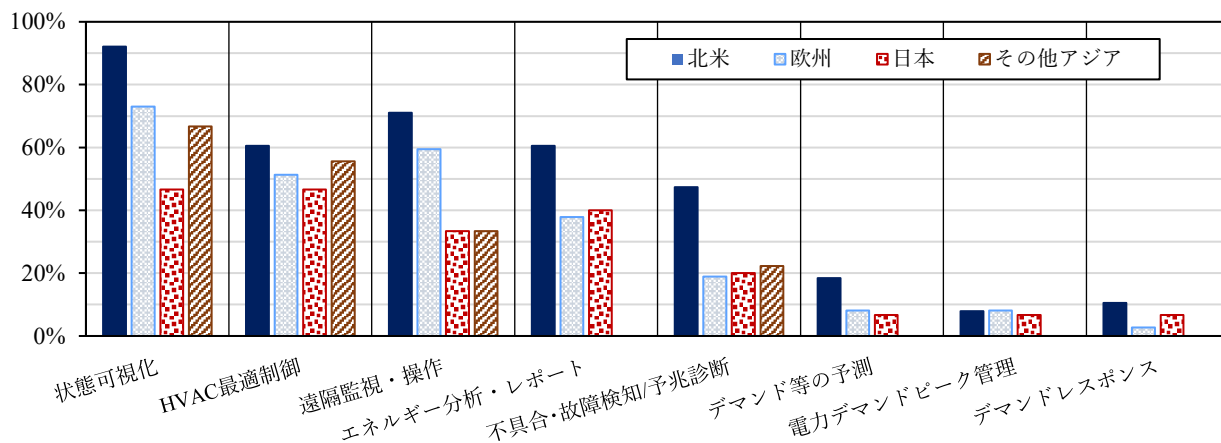


図3 地域別アプリケーションのシステム機能

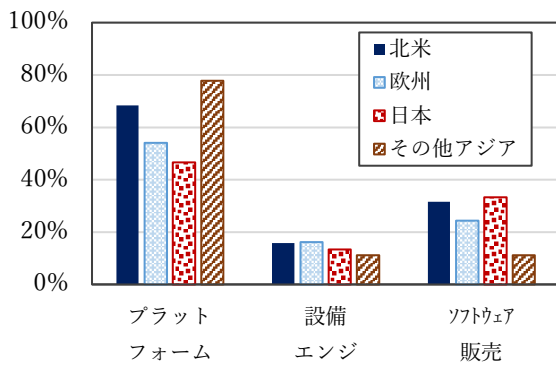


図4 地域別アプリケーションを導入する企業の事業形態

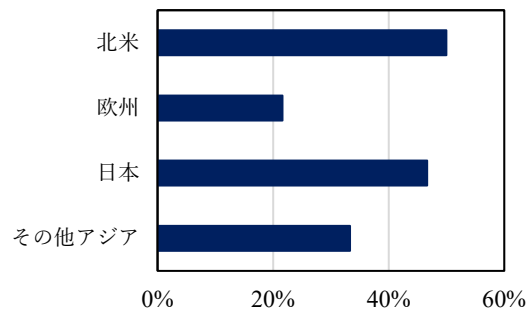


図5 地域別アプリケーションのAI活用率

フォーム事業のみの企業も多く、従来の監視設備と組み合わせることで建物全体の最適化、快適性と省エネルギーの両立などさらに建築価値の向上することをアピールしており、建物設備分野への新規参入が増えてきている。また、複数企業が共通のプラットフォームやソフトウェアを使って、それぞれサービス提供している事例も見られた。

### (5) AI の活用度

図5に、機械学習などのAIが活用されているアプリケーションの数の割合となるAI活用度を地域別に示す。AIの活用度は北米、日本が高く、欧州は低い。スマートビル向けの空調システムのアプリケーションを導入する企業について、北米はプラットフォームやITをルーツにもつところが多く、日本においても通信・IT系の企業の参入が見られ、一方で欧州は計装機器メーカーが多いことが考えられる。総じて、今回の結果では空調システム分野へのAI活用は現在のところ最適制御などの一部の機能に限定されていた。しかし、生成AIを用いたデータの分析支援が技術的に可能となっており<sup>3)</sup>、商業化もされていることから<sup>4)</sup>も、最適化や不具合検知・診断のアルゴリズムといった個別開発が必要なAI技術以外の分野も含めAIの活用普及がすすんでいくものと思われる。

## 3. エミュレータを活用したアプリケーションの要件

前章において、すでに市場に見られるスマートビル向けのアプリケーションについて整理した結果、省エネルギー制御や遠隔監視といった従来からのアプリケーションが多くみられた。現在の空調システムのアプリケーションは、省エネルギーや快適性といった社会的ニーズと、制御精度やコストといった技術的課題のバランスの中で設計されている。しかし、ここでは将来的に技術が進展し、空調システムの挙動を高精度に模擬できるエミュレーションが可能になると仮定する。このエミュレーション技術は、複雑な環境条件下での性能検証や異常時の挙動予測を可能とし、空調システムアプリケーションの高度化に大きく寄与する。その前提のもと、エミュレーション技術を導入した空調システムアプリケーションの高度化について検討した。

### 3.1 想定されるアプリケーション機能

ここでは、空調システムの挙動を秒単位で高精度に模擬できるエミュレーション技術を前提として、その技術を活用したアプリケーションの高度化について検討する。想定するアプリケーションは、エミュレータから得られる情報を単独で利用、または実設備のリアルタイムデータと組み合わせることで、新たな機能価値を提供するものである。表4にアプリケーションの

表4 想定されるアプリケーション機能

機能	概要
最適制御	空調システムを設定した目的に応じて最適に制御
不具合検知・診断	システムの異常や故障を早期に発見
試運転調整支援	机上検討により現地でのトライ&エラーを低減
建物性能評価	建物性能の認証における評価と乖離状況
執務環境評価	執務者の快適性や省エネ性評価、行動変容促進
データ活用	AIを用いたアプリケーションの学習データなど

様々な機能価値を想定し、それぞれの機能に対して必要な要件、望ましい要件を抽出して、エミュレータの可能性を検討した。本稿では、特に可能性がみられた最適制御、不具合検知・診断、試運転調整支援の機能について記述する。

### 3.2 アプリケーションに必要な共通の要件

本節では、まずエミュレータを活用したアプリケーションに共通して求められる基本的な要件について整理した。これらの要件は、個々のアプリケーションの機能に依存せず、すべてのアプリケーションに共通して必要となるものである。

個々のアプリケーションに共通して必要な要件を表 5 に示す。エミュレータの設定変更やフィードバックを行うためのエミュレータとの入出力、建物データやその他設備データなどのその他のアプリケーションとの入出力は共通に必要な要件である。また、アプリケーションとしての冗長性やフェールセーフ機能、履歴や関連するフィールド層の情報管理などはアプリケーション機能によらず必要となる。さらには、データの精度やデータへのアクセスの容易性、直感的でわかりやすいこと、ノーコードでの操作などの構築の容易性が望まれる。特に、エミュレータの構築は従来の建築プロセスではなく、構築の省力化は重要な課題のひとつである。

### 3.3 各アプリケーションに必要な要件

#### (1) 最適制御

空調システムの最適制御を行うアプリケーションは建物の運用コストに直結するため、従来から多くの研究開発がなされてきており、近年では IoT・AI 技術を活用してリアルタイムで最適化する制御技術が発達してきている。居住者に応じた室内環境の最適化<sup>5),6)</sup>や、再生可能エネルギー利用を最大化するためのエネルギーシステム制御の最適化<sup>7),8)</sup>、省エネ・脱炭素のための空調・熱源システムの最適化<sup>9),10)</sup>、AI による制御の自動化<sup>11),12)</sup>などが主な目的として定められている。これらは何らかの物理ベースのモデルやデータ駆動のシミュレーションと、最適化のアルゴリズムが組み合わせられており、モデルやシミュレーションが目的設定やその解決におけるボトルネックとなっている可能性がある。

エミュレータを活用した最適制御に必要な要件を表 6(a) に示す。システムオペレーションやエネルギー管理機能に対して、エミュレーションによりそれぞれのサブシステムが連携して有機的に動作することで、設備の全体最適化がより詳細かつ高精度に実現できると考えられる。秒単位のエミュレーションにより、需要の急な変化に対応するために正確で迅速な予測を求められるデマンドレスポンスや機器の立ち上がり性能の最適化などの従来のアプリケーションではハードルが高い機能の実現が可能となると考えられる。

表 5 アプリケーション共通の要件

要件項目	
必要な要件	<b>エミュレータとの入出力</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>エミュレータの管理               <ul style="list-style-type: none"> <li>エミュレーションのタイムステップの変更</li> <li>機器特性の標準データやメーカーから提供されたデータの更新</li> <li>ラフなモデルに対する実データからの補正</li> </ul> </li> <li>エミュレータの自動精度向上               <ul style="list-style-type: none"> <li>現状の機器性能の実測値からのフィードバック</li> <li>フィールド層データを活用したエミュレータのチューニング</li> </ul> </li> <li>フィールド層とエミュレータのデータ比較</li> </ul> <b>外部との入出力</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>BIM/CIM データとの連携（既存建物データの読み込み）</li> <li>空調ドメインと照明などの他ドメインとの接続</li> <li>手動や他アプリケーションで行われた設定変更の反映</li> </ul>
	<b>フィールド層の管理</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>機器メンテナンスやセンサ校正などの状態管理</li> <li>各センシングデータの同期/変換/通信等による時間遅れの反映</li> </ul> <b>アプリケーション機能</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>サイバー攻撃に対する冗長性</li> <li>エミュレータやビル OS にエラーが発生した際のフェールセーフ機能</li> <li>パラメータ管理（チューニング履歴、定格値など）</li> <li>各アプリケーションのギャップ評価</li> <li>ケーススタディやフェーズによる情報管理</li> </ul> <b>操作性</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>改修対応の容易性</li> <li>操作しやすい直感的にわかる GUI</li> <li>ほしいデータへのアクセスの簡易性</li> </ul>
望ましい要件	<b>アプリケーション機能</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>エミュレータの計算誤差やセンサ誤差、機器の個体差を反映</li> <li>エミュレータの状態可視化               <ul style="list-style-type: none"> <li>設備の 3D 表示、フレキシブルに操作可能な可視化</li> <li>配管やダクト内流体のコンター化や簡易的な CFD 機能</li> </ul> </li> </ul> <b>操作性</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ノーコードでの操作</li> <li>センサの簡易な移動、追加</li> </ul>

表 6 個別のアプリケーションの要件  
(a) 最適制御アプリケーション

		要件項目	
必要な要件	システムオペレーション	エネルギー管理	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>運転モード選択 (省エネ運転/快適運転/省 CO2 運転/契約電力を抑えるなど)</li> <li>デマンド抑制要望に対する返答とデマンド指令</li> <li>個々のシステムと連携可能なデータ群による建物全体の最適制御</li> <li>立ち上がり性能/回復性能の最適設定</li> <li>システム運転の予測や事前動作確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>気象情報の読み込み</li> <li>消費エネルギーや CO<sub>2</sub> 排出量、コストの積算、年間の試算および予測</li> <li>ベースラインと削減量の算出、評価 (基準/設計/運用ベースライン)</li> <li>最適運転や運転モードごとの省エネルギー効果試算とリスクの評価</li> <li>設備更新/機器リプレースの効果予測</li> </ul>	
望ましい要件	システムオペレーション	エネルギー管理	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>運転モードや効率的な運転計画の自動作成</li> <li>リアルタイムでの運転計画の自動補正 (オートチューニング)</li> <li>機器トラブルや故障時における次善のシステム運転の自動作成</li> <li>リアルタイム負荷予測とそれに基づく省エネ AI 自動運転</li> <li>経年劣化による性能変化の可視化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>契約電力に基づく運用最適化/システムスペックから最適契約の提案</li> <li>室内環境を緩和した際の省エネルギー効果試算 (快適性 vs 省エネ)</li> </ul> <b>外部との入出力</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>人の位置や人数、室内 OA 機器類の位置や稼働状況などの室内状況データの活用</li> <li>人の服装、性別、体格、その他 (発汗など) のパーソナルデータの活用</li> </ul>	

(b) 不具合検知・診断アプリケーション		(c) 試運転調整支援アプリケーション	
		要件項目	
必要な要件	不具合検知・診断	必要な要件	システム設定のチューニングと評価
	運用支援		システム設定のチューニングと評価
望ましい要件	不具合検知・診断	望ましい要件	システム設定のチューニングと評価
	運用支援		システム設定のチューニングと評価

さらには、従来の流量や熱収支、所要動力といったシステムの物理的指標だけではなく、室内状況や居住者のパーソナルデータに対する最適化を求められている。居住者の位置や人数、服装、性別、体格、さらには発汗量や活動量などの情報を活用することで、個々の居住者にとって快適かつ効率的な空調制御が可能となり、省エネルギーと快適性の両立を図ることが可能となる。エミュレータを用いることで、こうした多様なパーソナルデータをリアルタイムに反映したシミュレーションが可能となり、従来の一律制御では実現困難であったきめ細かな環境制御が可能となる。

### (2) 不具合検知・診断

空調システムの不具合検知・診断は、不具合や異常を検知してその原因を自動的に診断し、適切な対策を提案する機能で、最適な制御パラメータ設定による効率的な運転や速やかな復旧によるダウンタイムの低減を可能とする。近年では、機械学習やディープラーニングなどの AI を活用することで、検知の精度が大幅に向上している<sup>13)</sup>。しかしながら、そのためには大量の高品質なデータが必要で、データの収集やクレンジングにかかる時間とコストが課題となっている。一方で、エミュレータを活用した不具合検知・診断では、表 6 (b) に示すように、不具合や劣化まで再現したり、理想的な動作のエミュレータと実設備の短周期の過渡データを比較してデータの乖離を分析したりすることによって、従来は対象にすることができなかった不具合をも検知可能となる可能性がある。具体的には、機器の目詰まりや汚れによる性能低下、ダクトや保温の劣化によるダクトリークや放熱ロス、インバータの加減速時間や PID 調節器のパラメータまで再現した短周期で詳細な動作データによるチューニング不足 (パラメータ不具合) などの検知・診断が挙げられる。設備運用におけるメンテナンスや機器更新、修繕での機能回復や性能低下の予測が可能となる。

### (3) 試運転調整支援

空調システムの試運転調整は、多くの作業者を配置してダンパやバルブ、制御設定などをトライ&エラー

を繰り返して調整する。システム動作を詳細に再現するエミュレータを用いた試運転調整では、実際には半日や1日かかる調整を、10倍速、100倍速で再現して試行錯誤を行っておおよその見当をつけることができるため、チューニングの省力化を実現できると考えられる(表6(c))。また、コストの大部分が人件費で構成される試運転調整における省力化、短工期化は、エミュレータ構築費用の採算を十分にとることができる可能性がある。さらには、従来の建築プロセスでは確認できないことの多い夏期や冬期のピーク負荷における運転チューニングも試運転調整段階で想定することが可能となる。

### 3.4 コミッショニングツールとしてのエミュレータ

前節において、エミュレータを活用したアプリケーション機能の高度化について考察した。エミュレータを活用すると、建築設備の初期性能の把握や設備運用におけるメンテナンスや機器更新、修繕での機能回復や性能低下の予測が可能となる。研究開発や実プロジェクトの各フェーズにおける、アプリケーションの種類とそれに活用されるエミュレータの情報粒度・情報量を図6に表す。実プロジェクトでの設計から運用までの各フェーズにおいて入手できる情報の解像度(情報粒度)は異なる。設計フェーズでは、主に概略的かつ低解像度の情報に基づいて省エネルギー効果などの初期の性能評価が行われる。施工フェーズおよび運用フェーズへと移行するにつれて、取得可能な情報粒度は次第に高まり、より精緻かつ実態に即した計算や分析が可能となる。また、エミュレータには様々なパラメータが必要となるが、既知のパラメータなどの情報量も設計から運用にわたって徐々に増加する。そして、フェーズが変化する瞬間に意思決定やデータの実測結果によって初期値や運転点などからパラメータが決定することにより、情報量がステップ的に増加する。これに応じてエミュレータ自身のモデル粒度も高められ、さらにフェーズの進んだアプリケーションの提供が可能となる。運用時に得られた情報は研究開発におけるエミュレータにもフィードバックがなされ、さらなる制御・システム開発に貢献し、それにより開発されたアプリケーションは実プロジェクトの各フェーズにさらなる価値を提供する、技術的および研究的な価値のスパイラルアップが期待される。

## 4. おわりに

スマートビル向け空調システムアプリケーションの市場調査を通じて、以下の知見を得た。

- 1) AI技術の活用は最適制御など一部機能に限定されており、今後の拡大余地が大きい
- 2) エミュレータ技術により、従来困難であった高度な機能(高精度な最適制御、不具合検知・診断、試運転調整支援など)の実現が可能
- 3) 次世代に向けたアプリケーションの高度化には、AI技術とエミュレーション技術の融合が重要

エミュレータに基づくアプリケーションの実装はほとんど例がなく、技術的な課題に加えてエミュレータ構築における実務的な課題も多いと考えられる。これらの課題解決に向けた検討を進める必要がある。

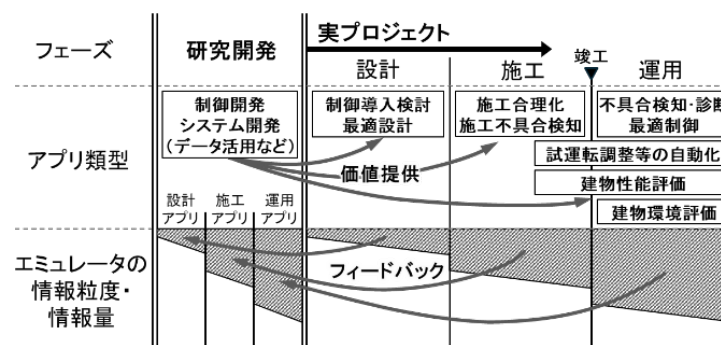


図6 フェーズごとのアプリケーションの種類と適用されるエミュレータの情報粒度・情報量

## 謝 辞

本研究は「スマートビルシステム社会連携講座」の一環として実施したものである。東京大学ならびに参画企業である株式会社関電工、株式会社九電工、新菱冷熱工業株式会社、株式会社大気社、ダイダン株式会社、高砂熱学工業株式会社、東京電力ホールディングス株式会社、東洋熱工業株式会社、および三菱重工サーマルシステムズ株式会社の皆様への謝意をここに期して表す。

## 文 献

- 1) Adrian Taboada-Orozco : Smart Buildings: A Comprehensive Systematic Literature Review on Data-Driven Building Management Systems, *Sensors* 2024, 24, 4405.
- 2) 宮田翔平ほか2名 : ZEBにおける建築設備分野の業務に関するヒアリング調査とスマートビル実現における課題提起, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, Vol. 10, pp.337-340 (2024)
- 3) Ya Bing Hou, et al.: Enhancing Building Services Management Systems with AI and Semantic Modeling: A Case Study on Improving System Efficiency through an AI-based Knowledge Library, *Proceedings of ASim Conference 2024: 5th Asia Conference of IBPSA*, pp.340-347, 2024.
- 4) <https://datafluct.com/news/bix6z8txjq6/> (2025年6月24日閲覧)
- 5) Lei, Yue, et al. "A practical deep reinforcement learning framework for multivariate occupant-centric control in buildings." *Applied Energy* 324 (2022): 119742.
- 6) 谷口景一朗, 石浦皓平, 宮田翔平, 赤司泰義, 室内温熱環境分布に基づく座席移動が在室者全体の熱的満足度に及ぼす影響, *日本建築学会環境系論文集*, Vol.88, No.808, pp.511-520, 2023.
- 7) Zhang, Yi, and Vic I. Hanby, Model-based control of renewable energy systems in buildings, *HVAC&R Research*, Vol.12, S1, pp.739-760, 2006.
- 8) 松浪佑宜, 宮田翔平, 高原, 川上理亮, 柴田克彦, 赤司泰義, 再エネと蓄電池を有する建築物エネルギーシステムにおける負荷平準化モデル予測制御 固定料金制に基づく蓄電池充放電による再エネの最大活用, *空気調和・衛生工学会論文集*, Vol. 48 No. 315, pp.1-11, 2023.
- 9) Xiupeng Wei, Andrew Kusiak, Mingyang Li, Fan Tang, Yaohui Zeng, Multi-objective optimization of the HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) system performance, *Energy*, Vol.83, pp.294-306, 2015.
- 10) 宮田翔平, 桑原康浩, 林鍾衍, 赤司泰義, 吉本尚起, 動的 CO2 排出係数に基づいたモデル予測制御による熱源機器の低炭素制御. *日本建築学会環境系論文集*, Vol.85, No.777, pp.827-835, 2020.
- 11) Khalil Al Sayed, Abhinandana Boodi, Roozbeh Sadeghian Broujeny, Karim Beddiar, Reinforcement learning for HVAC control in intelligent buildings: A technical and conceptual review, *Journal of Building Engineering*, Vol.95, 110085, 2024.
- 12) Chenxin Liao, Shohei Miyata, Ming Qu, Yasunori Akashi, Year-round operational optimization of HVAC systems using hierarchical deep reinforcement learning for enhancing indoor air quality and reducing energy consumption, *Applied Energy*, Vol.390, 125816, 2025.
- 13) CHEN, Zhelun, et al. A review of data-driven fault detection and diagnostics for building HVAC systems. *Applied Energy*, 2023, 339: 121030.
- 14) 青山剛士ほか4名 : スマートビルにおける建築設備の高度化に関する研究 (第2報) アプリケーションの市場調査とエミュレータを活用した次世代アプリケーション要件の検討, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, Vol. 10, pp.545-548 (2025)

## ABSTRACT

In recent years, higher and more sustainable demands on building values are expected to the smart buildings that enable more efficient and intelligent operation of buildings. We are developing emulators that builds HVAC systems in cyberspace and emulates them in extreme detail, as well as applications based on this emulator. Through research on the current air conditioning system application market, it has become clear that the use of AI technology is currently limited to certain functions such as optimal control, but its adoption is expected to expand in the future. Furthermore, we summarized the requirements for emulator-based applications and discussed the gaps from the current situation. This will enable the use of emulator technology in addition to AI technology in the future to provide advanced functions that have been difficult to achieve with conventional operation data alone — for example, advanced optimal control, fault detection and diagnosis, and support for TAB (Testing, Adjusting, and Balancing).— We confirmed that emulation technology is important for the sophistication of applications, as it makes it possible to perform these functions.

---



# FORMULATION OF A HIGHLY EXPLAINABLE MPC AND VERIFICATION BY ENERGY SIMULATION

Masanori Takahashi<sup>1</sup>, Yuki Matsunami<sup>1</sup>, Takuji Nakata<sup>1</sup>, Kenichiro Katayama<sup>1</sup>

## ABSTRACT

In this study, we aim to develop an Energy Management System (EMS) that uses model predictive control (MPC) to optimize photovoltaic and battery energy storage systems. In previous studies, we proposed an MPC formulation method based on mathematical optimization to address underlying issues. However, we identified additional issues related to the requirement for specialized expertise and inherent challenges in operational explanation and troubleshooting, which limit practical applicability. In this paper, we propose a novel control methodology based on a relatively simplified logic. In addition, we conducted case studies to compare its performance with conventional control strategies. Our simulation results showed that, when compared to a strategy that maximizes energy self-sufficiency, our method reduces annual electricity costs by approximately 20% and nearly half the simplified payback period. Furthermore, the evaluation indicators show that our proposed methodology performs similarly to that of a mathematical optimization control method.

## 1. INTRODUCTION

In this research, we aim to develop an energy management system (EMS) to maximize on-site renewable energy utilization and mitigate power supply from the grid. The operational objectives and evaluation indicators for equipment management differ according to each building, and stable operation requires consideration of equipment constraints and operational planning extending several days ahead. To address these issues, we have pursued the development of an EMS employing model predictive control (MPC) as an optimal control method.

Previous studies have reported various approaches to solving MPC optimization problems, including heuristic algorithms and mathematical optimization methods [1-5]. We have also reported an MPC formulation method applying mathematical optimization for power supply and demand control in a research facility, equipped with battery energy storage systems (BESS) and photovoltaics (PV) [2]. However, the application of mathematical optimization methods entails a need for specialized expertise and practice. Also, challenges remain regarding the difficulty of explaining system operations and investigating malfunctions. These factors may present both physical and psychological barriers to EMS deployment.

In this paper, we describe an initiative to formulate a more highly explainable MPC using a relatively simplified logic, with objectives of levelling grid power and enhancing energy self-sufficiency. The proposed control method, hereafter, is referred to as peak-cut control.

## 2. TARGET SYSTEM AND ENERGY SIMULATION

### 2.1 Overview of Energy System

In this report, system of Takasago Innovation Center (TIC) [1] was selected as the target for analysis. Main characteristics of the facility is shown in **Table 1**. The building is composed of an office, a laboratory and an equipment exhibition building. Regarding the purpose of this research, we focused exclusively on the office building.

---

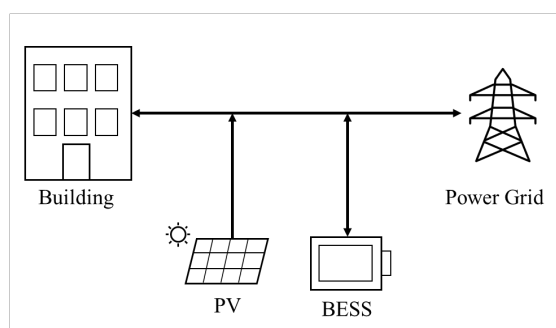
This article is update of “International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC 2025)”, November 29 - December 2, 2025, Tokyo, JP

<sup>1</sup> Research & Development Center, Research & Development Headquarters, Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

**Table 1 Facility overview**

Location	Tsukubamirai-shi, Ibaraki-ken, Japan
Site Area	22,746 m <sup>2</sup>
Total Floor Area	11,764 m <sup>2</sup> Office: 4,897 m <sup>2</sup> Laboratory: 6,058 m <sup>2</sup> Equipment exhibition: 809 m <sup>2</sup>
Building Height	15.455 m (2-story)
Structure	Steel structure (partially reinforced concrete structure)
Completion	January 2020

**Fig. 1** illustrates a schematic diagram of the target system's power configuration. Within TIC, photovoltaic (PV) systems are installed on the laboratory building rooftop, and large-capacity battery energy storage systems (BESS) are deployed both on the office building rooftop and site premises. However, in this report, only the office building is considered as the target of analysis. Therefore, BESS capacity is determined based on the office building's power demand, and PV capacity is determined from available rooftop area. The simulation conditions are summarized in **Table 2**. Notably, the simulation assumes that surplus electricity can be exported to the grid through reverse power flow.

**Fig. 1 Energy system diagram****Table 2 Simulation conditions**

Target period	2024/1/1-2024/12/31
Annual power load	22,3403 kWh (max.117 kW)
PV rated output	60 kW
BESS rated capacity	400 kWh (C-rate50%)
BESS rated output	200 kW
Prediction period	24 h (per 1 h)
Time step	1 h

## 2.2 Power Load of TIC

The annual power load of the office building is shown in **Fig. 2**, and weekly load with the highest peak is shown in **Fig. 3** (August 17–23). Throughout the year, power demand peaks during the summer and winter seasons, reaching its lowest levels during the intermediate periods. Within the selected week, load decrease is observed on weekends, with pronounced peaks occurring during daytime hours of weekdays. These patterns show that the office building has typical load fluctuations for standard offices.

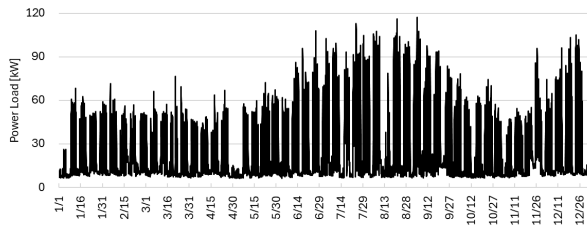


Fig. 2 Annual power load (2024/1/1-12/31)

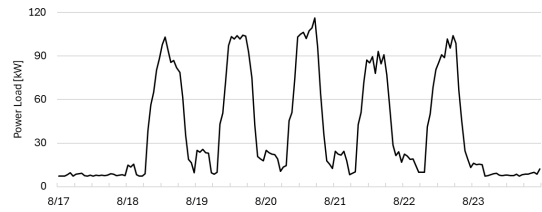


Fig. 3 Power load at 2024/8/17-8/23

### 2.3 Energy Simulation Flow

The flow chart of the energy simulation is shown in Fig. 4. First, the PV output is calculated using the specified solar irradiation data. Next, both the PV output and power load are used to determine the grid power target so that the operational constraints of BESS are met. Finally, values for BESS output, state of charge, and grid power are calculated. While MPC typically forecasts solar irradiation and power load from given conditions, this simulation assumes perfect prediction accuracy by utilizing actual measurement data from the office building. The PV and BESS models employed in this simulation are formulated based on methods proposed in a previous report [2].

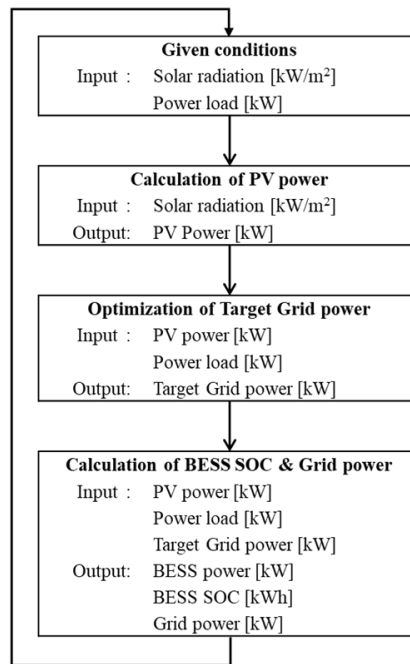


Fig. 4 Flow chart of energy simulation

### 2.4 Energy simulation flow

This subsection describes the methodology of the proposed peak cut control in this report. Additionally, the two control methods adopted for comparison is described: the energy self-sufficiency maximization control and the peak cut control using mathematical optimization.

#### 2.4.1 Common constraints for all control methods

The general constraints applicable to all control methods are specified in equations (1) and (2). These constraints specify that both the output power and state of charge for BESS must remain within their respective rated minimum and maximum values.

$$P_{BESS\_min} \leq \hat{P}_{BESS,k} \leq P_{BESS\_max} \quad (1)$$

$$E_{BESS\_min} \leq \hat{E}_{BESS,k} \leq E_{BESS\_max} \quad (2)$$

( $\hat{P}_{BESS,k}$ : Predicted BESS power [kW],  $P_{BESS,min}$ : Minimum BESS power [kW],  $P_{BESS,max}$ : Maximum BESS power [kW],  $\hat{E}_{BESS,k}$ : Predicted BESS SOC [kWh],  $E_{BESS,min}$ : Minimum BESS SOC [kWh],  $E_{BESS,max}$ : Maximum BESS SOC [kWh])

#### 2.4.2 Energy self-sufficiency maximization control (Basic method)

This method is designed to store surplus power generated by PV and, in response to power demand, preferentially supply the stored energy from BESS [2]. The calculation method of BESS output is shown in equation (3).

$$P_{BESS,t} = P_{load,t} - P_{PV,t} \quad (3)$$

( $t$ : Target time for control,  $P_{BESS,t}$ : BESS power [kW],  $P_{load,t}$ : Power load [kW],  $P_{PV,t}$ : PV power [kW])

#### 2.4.3 Proposed peak cut control (Proposed method)

Based on the proposed method, equations for determining target values of grid power are shown in equations (4) to (8). In this approach, two thresholds are introduced:  $P_{thr\_max}$ , which is designed to suppress the peak of grid power, and  $P_{thr\_min}$ , which is utilized to elevate the minimum value of grid power by pre-charging BESS.

$$0 \leq P_{thr\_max} \leq P_{demand} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{thr\_min} \leq P_{demand} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{grid\_basic} = \hat{\mathbf{P}}_{load} - \hat{\mathbf{P}}_{PV} \quad (6)$$

$$\hat{P}_{grid\_opt,k} = \begin{cases} P_{thr\_max}, & P_{thr\_max} < \hat{P}_{grid\_basic,k} \\ \hat{P}_{grid\_basic,k}, & P_{thr\_min} \leq \hat{P}_{grid\_basic,k} \leq P_{thr\_max} \\ P_{thr\_min}, & \hat{P}_{grid\_basic,k} < P_{thr\_min} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{minimize } f_{obj1} = \max(\hat{\mathbf{P}}_{grid\_opt}) \quad (8)$$

( $\hat{\mathbf{P}}_{grid\_basic}$ : Predicted grid power during the prediction period based on basic method [kW],  $\hat{\mathbf{P}}_{load}$ : Predicted power load during the prediction period [kW],  $\hat{\mathbf{P}}_{PV}$ : Predicted PV power during the prediction period [kW],  $\hat{P}_{grid\_opt,k}$ : Target value of grid power [kW],  $\hat{P}_{grid\_basic,k}$ : Predicted grid power based on basic method [kW],  $f_{obj1}$ : Objective function of proposed method,  $\hat{\mathbf{P}}_{BESS}$ : Predicted BESS power during the prediction period [kW])

The calculation procedure is outlined as follows. The threshold values,  $P_{thr\_max}$  and  $P_{thr\_min}$ , are each explored across the range from 0 kW to the demand power, divided into 20 segments.

1. Calculate the grid power based on basic method control ( $\hat{\mathbf{P}}_{grid\_net}$ ), given the PV output and power load as input conditions.
2. Determine the target value of grid power using equation (7), from  $\hat{\mathbf{P}}_{grid\_net}$  and the assumed values of  $P_{thr\_max}$  and  $P_{thr\_min}$ .
3. Run an energy simulation over the prediction period based on the target values of grid power determined in Step 2.
4. By repeating Steps 2 and 3, search for the optimal solution as the set of conditions that minimizes the objective function ( $f_{obj1}$ ).

**Fig. 5** shows a schematic of grid power and BESS SOC control results using the proposed method.

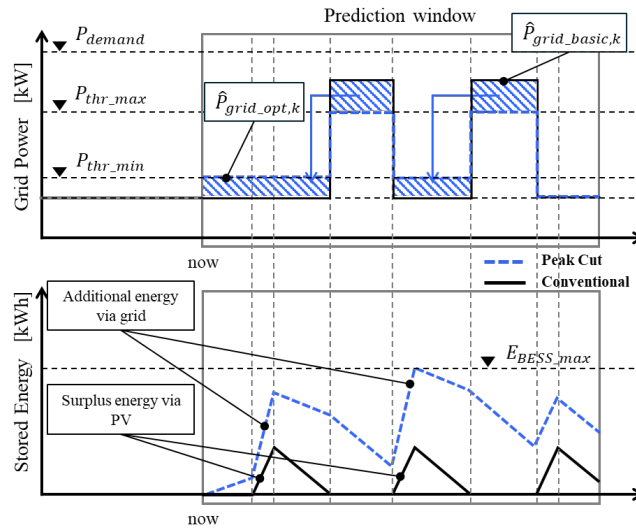


Fig. 5 Control results of grid power and BESS SOC

#### 2.4.4 Peak cut control by mathematical optimization (SQP method)

The objective function of the SQP method is shown in Equations (9) and (10). The root mean square of the grid power is utilized to minimize both the total amount and the variance of grid power over the prediction period. To facilitate the convergence of the optimization calculation, grid power is normalized by dividing it by the maximum value of the power load (demand power).

$$\text{minimize } f_{obj2} = \sqrt{\sum_{k=0}^{T-1} \hat{w}_{grid,k}^2} \quad (9)$$

$$\hat{w}_{grid,k} = \frac{\hat{P}_{grid,k}}{P_{demand}} \quad (10)$$

( $f_{obj2}$ : Objective function of SQP method,  $T$ : Number of prediction steps [-],  $k$ : Any number of steps within the prediction period [-],  $\hat{w}_{grid,k}$ : Normalized predicted grid power [-],  $\hat{P}_{grid,k}$ : Predicted grid power [kW],  $P_{demand}$ : Demand power [kW])

An algorithm based on Sequential Quadratic Programming (SQP) was adopted to solve the optimization problem. Specifically, the SLSQP solver from the Python library SciPy [6] was utilized. Furthermore, as SQP requires the use of differentiable expressions, a continuous approximation model for BESS, based on the method reported in a previous study [2], was employed to facilitate the optimization process.

### 2.5 Evaluation Method

The simulation results based on each control methods were evaluated based on the following indicators: electricity cost, CO<sub>2</sub> emission and payback period. These metrics were selected to provide a comprehensive assessment of the system's performance.

#### 2.5.1 Electricity cost

The calculation equations for electricity cost are presented in Equations (11) to (13). The unit prices for electricity charges are based on a typical high-voltage pricing structure in Japan [7].

$$COST_{all} = COST_E + COST_P \quad (11)$$

$$COST_E = U_E E_{grid} \quad (12)$$

$$COST_P = 12 U_P P_{grid\_max} \quad (13)$$

( $COST_{all}$ : Annual electricity cost [yen/year],  $COST_E$ : Annual electricity charge [yen/year],  $COST_P$ : Annual basic charge [yen/year],  $U_E$ : Electricity charge unit price [yen/kWh],  $E_{grid}$ : Annual amount of received grid power [kWh/year],  $U_P$ : Basic charge unit price [yen/kW-month],  $P_{grid\_max}$ : Maximum annual grid power [kW])

### 2.5.2 CO<sub>2</sub> emissions

The calculation equations for CO<sub>2</sub> emissions are shown in Equation (14).

$$C_{carbon} = U_{carbon} E_{grid} \quad (14)$$

( $C_{carbon}$ : annual CO<sub>2</sub> emission [t-CO<sub>2</sub>/year],  $U_{carbon}$ : CO<sub>2</sub> emission coefficient [t-CO<sub>2</sub>/kWh])

### 2.5.3 Simple payback period

The calculation equations for the simple payback period are presented in Equations (15) and (16). In this report, the simple payback period is defined as the equipment installation cost divided by the annual electricity cost reduction achieved. The reduction in electricity cost is calculated based on the annual electricity cost prior to the installation of equipment.

$$Y_{payback} = \frac{COST_{initial}}{COST_{reduced}} \quad (15)$$

$$COST_{reduced} = COST_{bare} - COST_{all} \quad (16)$$

( $Y_{payback}$ : Simple payback period [year],  $COST_{initial}$ : Equipment installation cost [yen],  $COST_{reduced}$ : Annual electricity costs reduced by equipment installation [yen/year],  $COST_{bare}$ : Annual electricity cost before installing equipment [yen/year])

The constant values adopted for each indicator are presented in **Table 3**. The electricity charges and the CO<sub>2</sub> emission coefficient are based on the published figures for fiscal year 2024 [7].

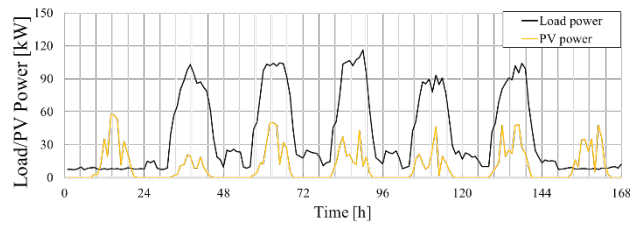
**Table 3 Constant values used for each indicator**

Electricity charge unit price	20.61	yen/kWh
Basic charge unit price	3,220	yen/kW-month
CO <sub>2</sub> emission coefficient	0.000434	t-CO <sub>2</sub> /kWh
Equipment installation cost	34.2	Millions of yen
PV system unit price	170,000	yen/kW
BESS unit price	60,000	yen/kWh

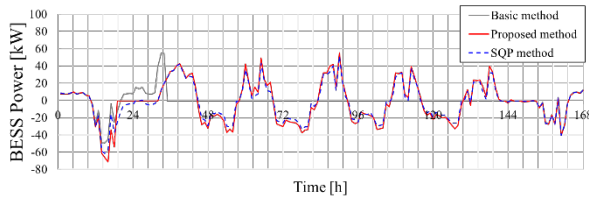
## 3. CALCULATION RESULTS AND EVALUATION

### 3.1 Qualitative Evaluation of a Representative Week

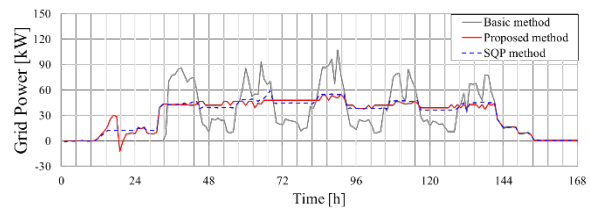
**Fig. 6–8** display the weekly profiles of power load, PV output, BESS power, and grid power for August 17–23, 2024, which had the highest load. With the Basic method, early depletion of BESS state of charge limits its discharge and causes higher daytime grid power peaks. In contrast, both the proposed and SQP methods optimize BESS usage, reducing grid power peaks to 40–60 kW. The similar patterns in BESS charge and grid power confirm the effectiveness of the proposed approach in peak reduction.



**Fig. 6 Power load and PV generated power**



**Fig. 7 Results of BESS power**



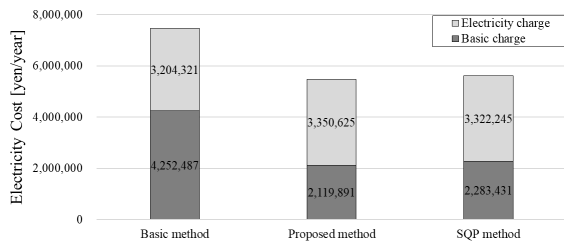
**Fig. 8 Results of grid power**

### 3.2 Quantitative Evaluation of Annual Simulation Results.

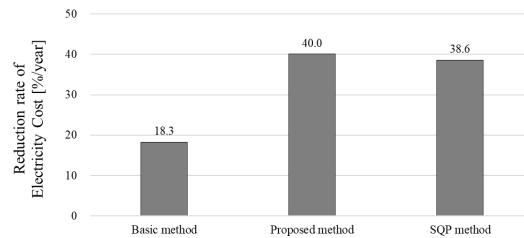
The evaluation indicators of electricity cost, CO<sub>2</sub> emissions, and simple payback period were calculated, and both the results and reduction rates were determined, respectively. The reduction rates for electricity cost and CO<sub>2</sub> emissions were calculated based on evaluation values prior to equipment installation, as well as the simple payback period.

#### 3.2.1 Results of Electricity cost

The results for electricity cost and its reduction rate are presented in **Fig. 9 and 10**. Compared to the Basic method, both the proposed method and the SQP method resulted in a comparable decrease in electricity costs. Notably, the annual basic charge was reduced to approximately half, demonstrating a significant effect of the grid power levelling achieved by the methods. The cost reduction rate for both the proposed and SQP method was approximately 20%, indicating the pronounced impact of implementing peak-cut control. Although the proposed method and SQP method differ in specific electricity cost reductions, their overall reduction rates were overall the same.



**Fig. 9 Results of annual electricity cost**



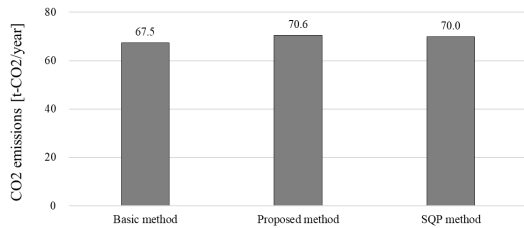
**Fig. 10 Results of reduction rate for electricity cost**

#### 3.2.2 Results of CO<sub>2</sub> emissions

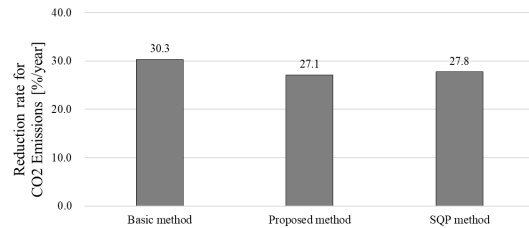
**Fig. 11 and 12** show that all control methods reduced CO<sub>2</sub> emissions by about 30%, mainly due to PV's effect on lowering grid power usage. It also shows that both the proposed and SQP methods produced similar CO<sub>2</sub> emission outcomes.

On the other hand, compared to the Basic method, both the proposed and SQP methods slightly increased CO<sub>2</sub> emissions due to greater annual grid power usage from BESS charge/discharge losses (see

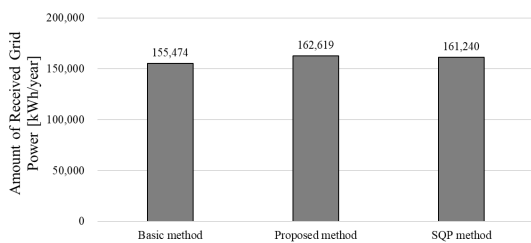
**Fig. 13).** This results from the increase in BESS cycles with the peak cut control versus Basic method. While further optimization of BESS operations could reduce CO<sub>2</sub> emissions, there is a trade-off between lowering electricity costs and CO<sub>2</sub> emissions. As PV and BESS adoption grows, it will be important to tailor solutions to each customer's needs.



**Fig. 11 Results of annual CO<sub>2</sub> emissions**



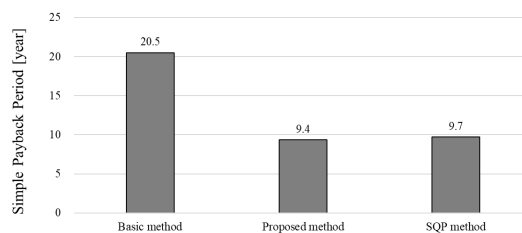
**Fig. 12 Results of reduction rate for annual CO<sub>2</sub> emissions**



**Fig. 13 Results of annual amount of received grid power**

### 3.2.3 Results of Simple payback period

The results for the simple payback period are presented in **Fig. 14**. In comparison to the Basic method, both the proposed method and SQP method achieved a reduction in the payback period to approximately half. Furthermore, the evaluation results for the proposed method and SQP method were essentially equivalent.



**Fig. 14 Results of simple payback period**

## 4. CONCLUSIONS

In this study, a control method for BESS with a relatively simplified logic was proposed for facilities equipped with PV and BESS, and its performance was compared with multiple control strategies through energy simulation. The findings for the proposed method are as follows.

1. Compared to the energy self-sufficiency maximization control, the proposed method achieved approximately a 20% improvement in annual electricity cost reduction rate and shortened the simple payback period to about half.
2. The annual CO<sub>2</sub> emissions reduction rate remained roughly equivalent at around 30% for all control strategies implemented.

3. The proposed method achieved the peak-cut control similar to that achieved through mathematical optimization method and resulted in evaluation values that were generally equivalent.

## REFERENCES

- [1] Matsunami, Y., Gao, Y., Miyata, S., Akashi, Y., Shibata, K., Katayama, K., and Hirahara, Y., “Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 1) Concept and problem identification from operational data”, *Technical papers of annual meeting SHASEJ*, vol. 9, IS-8, (2021). **Conference Proceedings**
- [2] Matsunami, Y., Miyata, S., Gao, Y., Kawakami, Y., Shibata, K., and Akashi, Y., “電力の変動料金制における建築エネルギーシステムの蓄電池モデル予測制御”, *Transactions of SHASEJ*, vol. 48, No. 315, pp. 29-39, (2023). **Journal Paper**
- [3] Groß, A., Wittwer, C., and Diehl, M., “Stochastic model predictive control of photovoltaic battery systems using a probabilistic forecast model”, *European Journal of Control*, vol.56, pp. 254-264, (2020). **Journal Paper**
- [4] Hou, J., Li, H., Nord, N., and Huang, G., “Model predictive control under weather forecast uncertainty for HVAC systems in university buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 257, article 111793, (2022). **Journal Paper**
- [5] Miyata, S., Kuwahara, Y., Lim, J., Akashi, Y., and Yoshimoto, N., “動的 CO<sub>2</sub> 排出係数に基づいたモデル予測制御による熱源機器の低炭素制御”, *Transactions of AIJ. Journal of Environmental Engineering*, vol. 85, No. 777, pp. 827-835, (2020). **Journal Paper**
- [6] The SciPy community, *SciPy documentation*, July 17, 2025, from <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.minimize-slsqp.html#optimize-minimize-slsqp>. **Webpages: Nonperiodical Web Document**
- [7] TEPCO Energy Partner, Inc., *Electricity rate plans for special high voltage and high voltage customers*, July 17, 2025, from [https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan\\_h/minaoshi\\_2025plan.html](https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan_h/minaoshi_2025plan.html). **Webpages: Nonperiodical Web Document**

## 要 約

本研究では、太陽光発電設備や蓄電池システムを最適制御する手段として、モデル予測制御(MPC)を採用したエネルギーマネジメントシステムの開発を進めてきた。既往の研究で、最適化問題の解法に数理最適化を適用した MPC を提案したが、専門知識の必要性や動作説明・不具合調査の難しさなど実用面において課題がある。本研究では、比較的簡易なロジックを用いて定式化した制御手法を提案し、ケーススタディを実施して他の制御手法と比較した。シミュレーションの結果、エネルギー自給率を最大化する制御と比較して、年間電力コストが約 20%削減され、単純投資回収年数が約半分に短縮された。また、本研究で用いた評価指標において、数理最適化を適用した制御と概ね同等の性能を確認できた。



# 体育館向け空調システムの開発と実証

## —天井面への遮熱シート設置による温熱環境改善—※

木村健太郎・スレスタミサン  
平原美博\*1・大内修一\*2

### Development and Demonstration of Air Conditioning System for Gymnasiums - Improvement of Thermal Environment in Gymnasium by Installing Thermal Barrier Sheet on Ceiling -

Kentaro Kimura・Mishan Shrestha  
Yoshihiro Hirahara・Syuuichi Oouchi

災害時に防災拠点となる学校や文化施設等の体育館は、避難所での生活環境を改善するため、国庫補助による空調整備が加速化している。2024年度より10年間の限定措置で開始された文部科学省の空調設備整備臨時特例交付金では、断熱/遮熱工事が交付金補助の要件となっており、多くの既存小中学校体育館で対応が必要となっている。本政策では、具体的な断熱/遮熱性能は求められていないものの、授業等への影響を考慮した短工期化に加え、自治体の財政負担を最小限に留める安価な断熱/遮熱工法が要望されている。

我々は、包括連携協定を結ぶ茨城県つくばみらい市の小学校体育館（以下本体育館と称す）にて、熱中症や防寒、感染症対策を兼ね備えた体育館向け空調システムの実証試験を2022年より開始した。初年度の検証では、冷房時と暖房時共に概ね良好な結果が示されたが<sup>1),2),3)</sup>、2023年以降の夏期では、外調機の設計外気温度（33℃）を超える酷暑日が続き、外調機の給気温度上昇と外皮負荷増大の影響によりアリーナの温熱環境悪化が散見された<sup>4)</sup>。

本報では、夏の日射による天井高温化や冬の放射冷却による天井低温化に対し、天井からの放射熱伝達の遮蔽による室内環境改善を目的とし、天井面の遮熱シート面積を可変させたときの夏期実測結果、および遮熱シート設置有無による冬期実測結果を示す。

## 1. 体育館の課題と対策

2023年7月28日の本体育館の天井部と床部のサーモグラフィを**写真1**、本体育館最寄りの気象庁観測データである茨城県つくば市館野の外気温度と日照率（太陽が地表を照らす時間の割合）の経時変化を**図1**に示す。外気温度 33.7℃、日照率 1.0 の晴天下において、天井表面温度は平均 41.4℃、床表面温度は平均 38.3℃となった。2019年に開校した本体育館は、標準的な断熱性能（天井熱通過率 2.1 W/(m<sup>2</sup>・K)）にて設計された施設であるが、天井からの放射熱伝達により床温度が上昇し、過大な空調負荷となっている。空調の消費電力低減と体育館内の快適性を向上させるためには、効率の良い空調方式の導入に加え、外皮負荷を低減させることが重要となる。体育館の断熱対策としては、屋根の遮熱塗料や天井部の断熱材設置、外壁面には窓への日射遮蔽フィルム貼りや遮光カーテンなどが提案されている。特に置換空調の環境下では、居住域温度に直結する床温度を低下させることが重要で、形態係数の大きい天井面からの放射量を抑

※ 本論文は、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2025.9.3～5（高松））を加筆修正したものである。

\*1 事業戦略統括部付（日本ピーマック株式会社出向）、\*2 文化シャッター株式会社

えることが有効となる。そこで、中空層を設けて屋内天井に遮熱シートを設置する工法に着目した。この工法は、天井方向への高反射により日射で高温となる天井からの放射熱伝達を抑えながら、床方向への放射熱伝達量の低減を図れる。さらに屋内設置のため紫外線による経年劣化を抑えられ、既存体育館に対し安価で長期間断熱性能を確保できる有用な断熱工法となる。

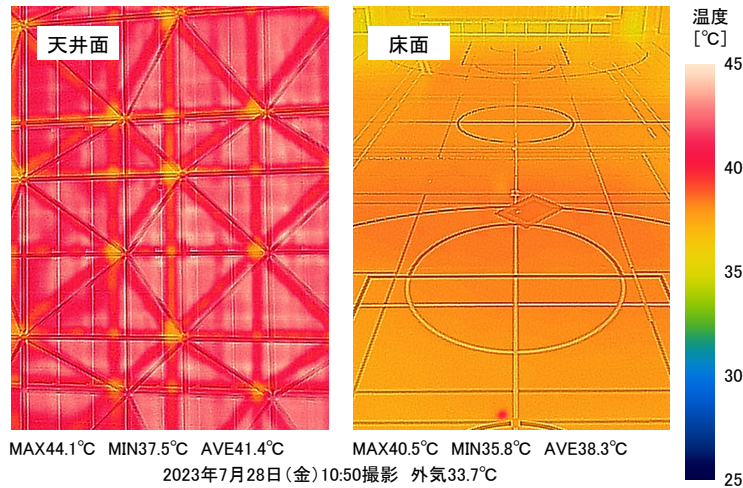


写真1 体育館天井部と床部のサーモグラフィ

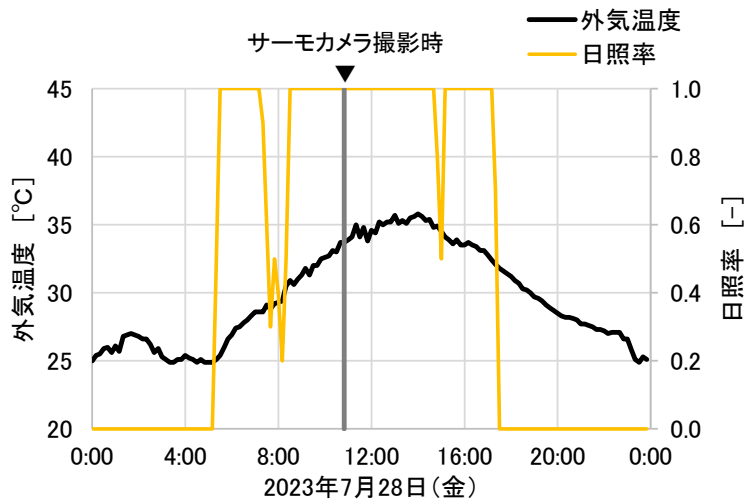


図1 外気温度と日照率の経時変化

## 2. 夏期検証

### 2.1 遮熱シート設置状況

図2に遮熱シートの設置位置、写真2に遮熱シートの設置状況を示す。遮熱シートは、厚さ5mmの気泡緩衝材の両面にアルミ箔をラミネートされたシートを利用した。設置方法は、トラス幅2.7mに合わせた25mの長尺遮熱シートを製作し、天井面から約2m下部に位置する水平トラスパイプの端部よりロープと長尺棒で横にスライドさせ、シートのたわみが少なくなるよう両端部からロープで引っ張り固定した。照明装置の下部には、夜間の照度確保のため600mm角の開口を設けた。

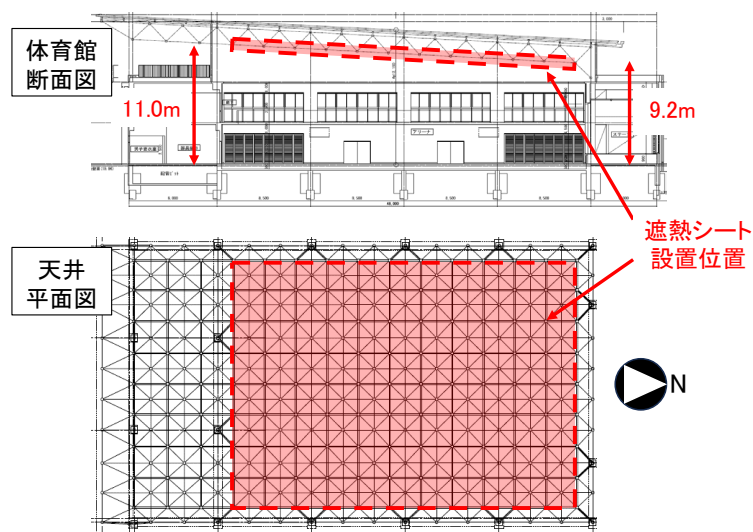


図2 遮熱シート設置位置

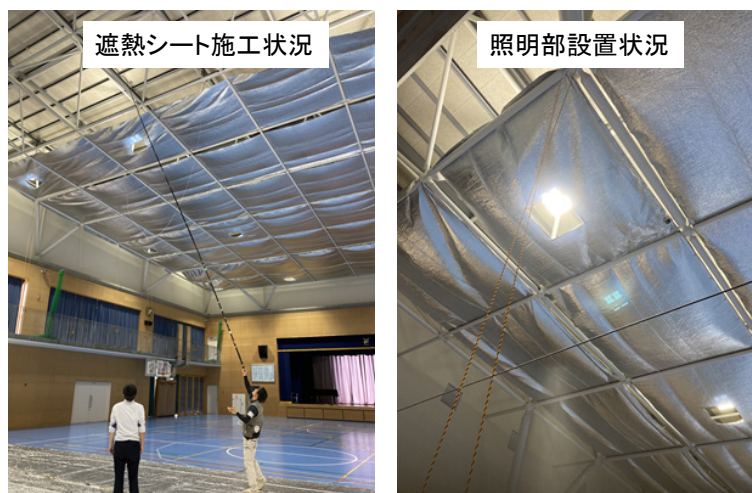


写真2 遮熱シート設置状況

## 2.2 測定概要

図3に測定ケースを示す。実測は2024年8月6日～8日に実施し、遮熱シートの設置面積による効果を比較した（ケース①③④）。給気は20℃とし、直達日射の影響を無くすため照明を全点灯し、窓カーテンは遮蔽した。また、室上部の高温空気を排気することによる室内環境のさらなる改善を期待し、遮熱シートとほぼ同じ高さに設置されている有圧扇の稼働／停止による影響を比較した（ケース①②）。図4に体育館内測定点を示す。FL+1mの平面温湿度を12か所、室中央2か所（地点A、B）ではFL+5mまで1mピッチにて垂直温湿度を測定し、それぞれ1分間隔の瞬時値を記録した。

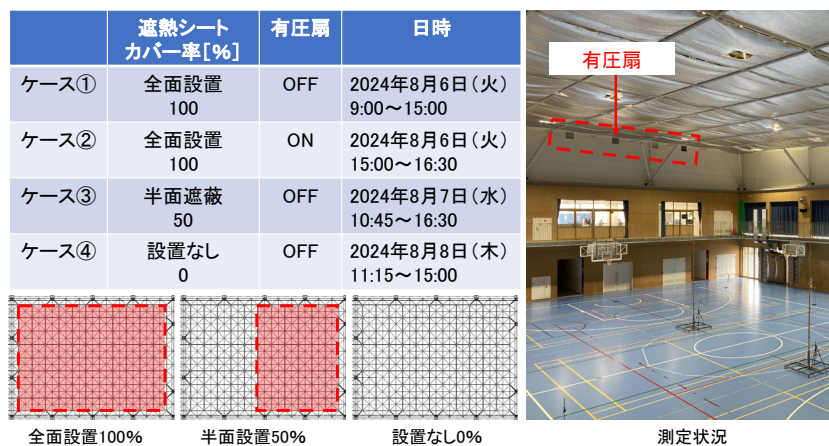


図3 測定ケース

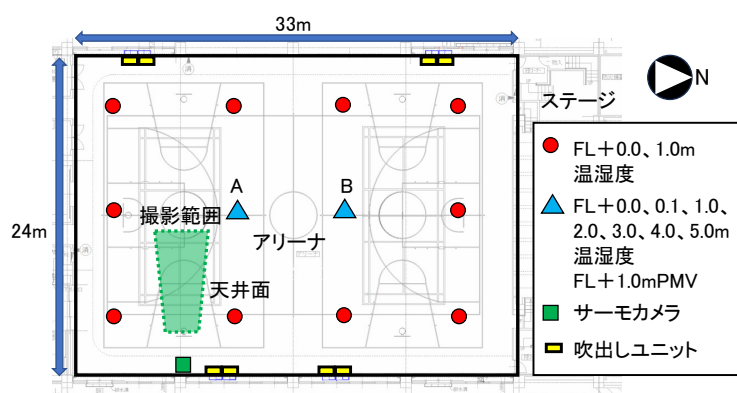


図4 体育館内測定点

### 2.3 実測結果

図5に実測期間中の外気温度、遮熱シート上下面に設置した温度、日照率の経時変化を示す。実測期間中は、日照率に差は見られるものの全ケースで外気温度が32℃を超える真夏日となった。FL+10mの高さに設置した遮熱シートの上下温度差は、南中となる正午付近にピークとなり、最大で3.5℃となった。

写真3に各ケースの室内サーモグラフィを示す。遮熱シートの設置場所は、天井からの放射熱伝達が軽減できている。図6にFL+1.0m平面温度分布を各ケースで比較して示す。各ケースで日照時間や風速などの条件が異なるため、ここでは外気温度が31℃±0.2以内となった時の瞬時値にて比較する。

遮熱シートの設置面積比較(ケース①③④)では、遮熱シートの設置面積が大きいほど室内温度が低下し、全面設置(ケース①)と設置なし(ケース④)の比較では、FL+1m平均で2.4℃低下する結果となった。アリーナの北側半面に遮熱シートを設置したケース③では、半面の遮熱でもFL+1mの温度低下は見られたものの、南北のゾーン平均で有意な温度差は見られなかった。これは冷気が密度差により拡がっていく置換空調の効果に加え、天井と床の離隔距離が10m以上あり、遮熱シートを設置していない天井部から遮蔽シート設置下部の床に放射熱伝達された影響により平面温度のばらつきが少なくなったと考えられる。

図7に地点A、Bの平均垂直温度と絶対湿度分布を各ケースで比較して示す。遮熱シートの設置面積に応じてアリーナ全体の温度帯が変化する結果となった。遮熱シート設置なし(ケース④)の絶対湿度が高い理由は、空調負荷の増加により室上部から吸いこむ還気温度が上昇したことで空調機コイルの除湿量が減少した影響である。また、有圧扇を稼働したケース②は、遮熱シートを全面設置しているにも拘わらず室温が上昇する結果となった。これは、室上部の絶対湿度が上昇していることから、有圧扇の稼働でアリーナが負圧となり、高温多湿の外気がアリーナへ流入したためと推察される。

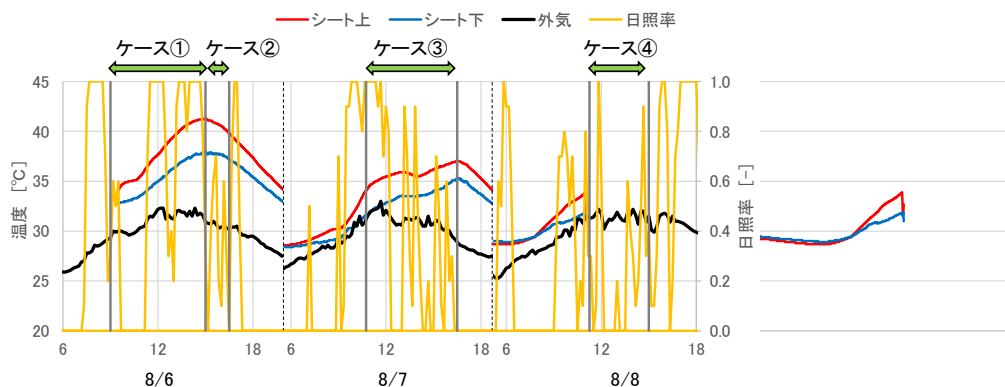
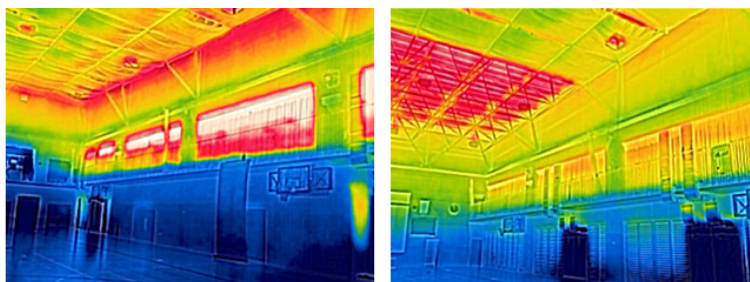
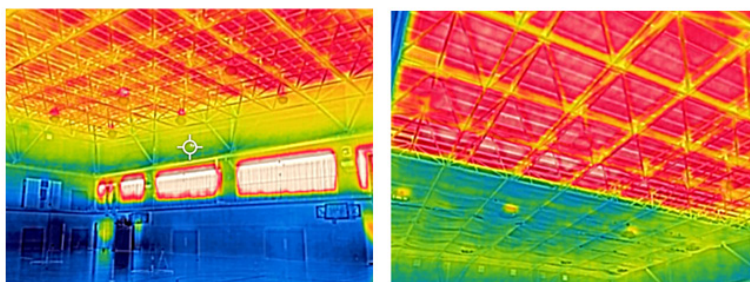


図5 外気温度・シート上下温度・日照率の経時変化



ケース①遮熱シート全面設置

ケース③遮熱シート半面設置



ケース④遮熱シート設置なし

ケース③遮熱シート半面設置

写真3 各ケースの室内サーモグラフィ



図6 各ケースの床上1.0m平面温度分布

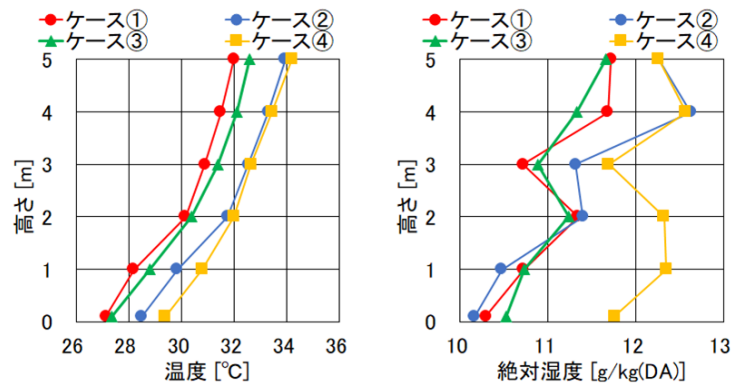


図7 地点A,Bの平均垂直温度と絶対湿度分布

### 3. 冬期検証

#### 3.1 遮熱シート設置状況

写真4に遮熱シートの設置状況を示す。本設利用として採用した不燃材で両面アルミ箔の遮熱シートは、厚さ0.24mm、熱伝導率0.19W/(m・K)、重量270g/m<sup>2</sup>と軽量な仕様となっており、固定治具の重量を含めても耐荷重で問題無いことを確認したのち、天井面の木毛セメント版から120~430mm下部に位置するH型钢フランジやトラスパイプに遮熱シートを固定した。



写真4 遮熱シート設置状況

#### 3.2 測定概要

実測は、遮熱シート設置前となる2025年2月5日~7日と設置後の12日~14日に実施した。表1に測定ケースを示す。冬期検証では、避難利用時を想定し日射が無く外気温度が低下する夜間を対象とし、遮熱シートの設置有無と空調稼働/非稼働をパラメータとして比較した。給気は45°Cとし、照明は全消灯、窓カーテンとステージ緞帳は遮蔽した。

写真5にサーモカメラによる天井表面温度の測定状況とサーモグラフィの一例を示す。夏期検証時の測定に加え、床表面温度 (FL+0m)、地点A、BのPMVを測定した。また遮熱シートによる効果を確認するため、サーモカメラを天井面に向けて10分のインターバル撮影し、図中エリアの平均値を天井表面の代表温度とした。

表 1 測定ケース

	遮熱シート カバー率[%]	空調	日時
ケース⑤	設置なし 0	OFF	2025年2月 5日(水)20:00 ～ 6日(木)08:10
ケース⑥	設置なし 0	ON	2025年2月 6日(木)21:07 ～ 7日(金)08:05
ケース⑦	全面設置 100	OFF	2025年2月12日(水)19:45 ～13日(木)07:55
ケース⑧	全面設置 100	ON	2025年2月13日(木)21:12 ～14日(金)08:00

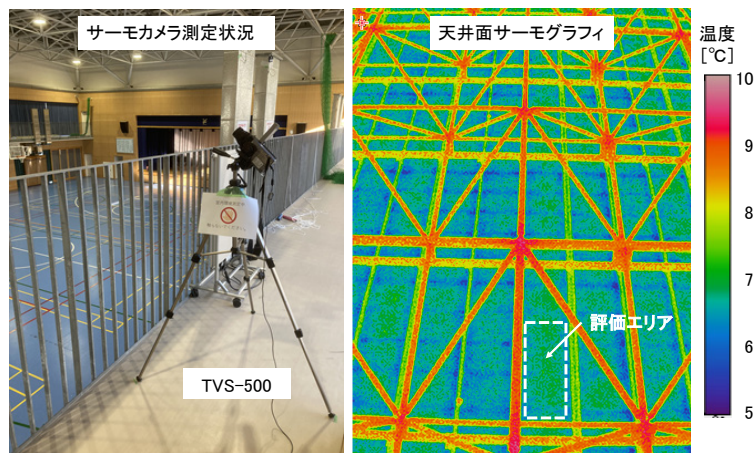


写真 5 サーマカメラ測定状況

### 3.3 実測結果

図 8 に実測期間中の外気温度と天井表面温度、地点 A、B の PMV 平均値の経時変化を示す。実測期間中は、全日共に日最低気温が 0°C未満となる冬日であった。PMV による快適性評価（計測器測定範囲-3～+3）は不快な値となったが、遮熱シートの設置により、天井表面温度とともに PMV 値も変化する結果が得られた。

図 9 に FL+1.0m 平面温度分布を各ケースで比較して示す。外部風速などの条件が異なるため、ここでは外気温度が 0°C±0.6 以内となった時の瞬時値にて比較する。遮熱シートの設置比較では、遮熱シートの設置により非空調時では FL+1m 平均値で 2.1°C、空調時は 0.8°C上昇する結果となり、空調の稼働／非稼働時共に良好な結果を示した。

図 10 に地点 A、B の平均垂直温度分布を各ケースで比較して示す。遮熱シートの設置により、室全体の温度帯が上昇する結果となった。この 2°C程度の温度上昇は、天井面の遮熱シートにより、天井からの冷放射の影響を遮ることができたためと考察される。

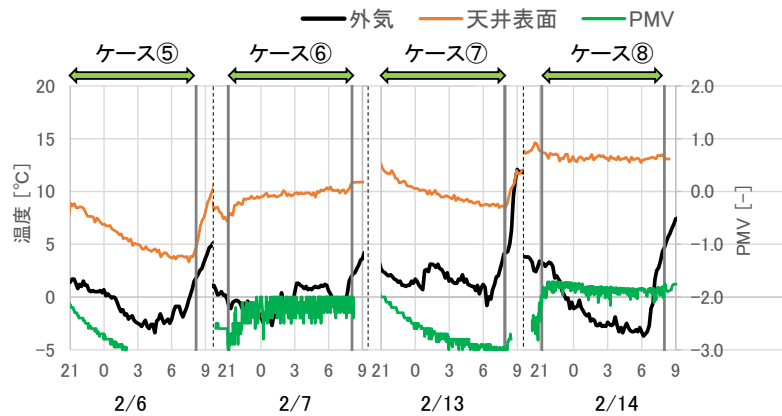


図8 外気温度・天井表面温度・PMVの経時変化



図9 各ケースの床上1.0m平面温度分布

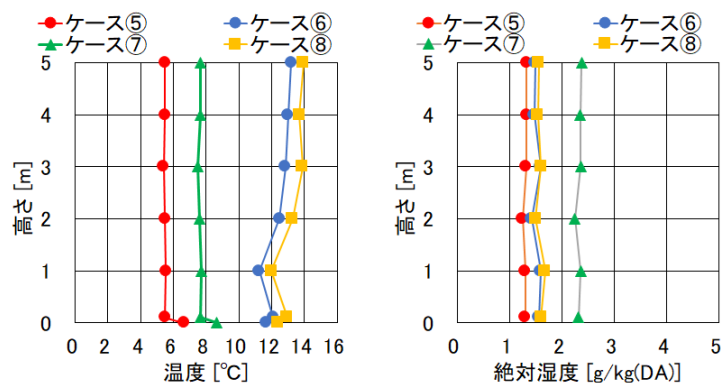


図10 地点ABの平均垂直温度と絶対湿度分布

#### 4. おわりに

天井面の遮熱シート設置は、冷暖房時だけでなく非空調時にも室内環境の改善に有効なことを確認した。PMV値は、厳冬期の夜間という条件もあり低い結果を示したが、避難所利用時は人体潜熱や加湿器等の利

用によりさらなる環境改善は見込まれる。また、屋内のサーモグラフィでは、冷暖共に天井を除く外壁面からの負荷流入も大きいことが確認され、天井遮熱だけでなく、他の断熱工法との併用が推奨される。本検証を通じて、負圧環境が室内環境に悪影響することが確認されたため、今後は第 2 種換気方式による検証を行い、さらなる環境改善を図っていきたい。

## 謝 辞

本研究は、つくばみらい市や富士見ヶ丘小学校の関係各位に多大な協力を頂きました。ここに謝意を表します。

## 文 献

- 1) 小山ら：体育館向け空調システムの開発と実証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.217-220，2023.
- 2) 木村：体育館向け換気機能付き空調機「フレッシュクール」，建築設備と配管工事 6 月号，pp.25-29，2024.
- 3) 木村：体育館向け空調システムの開発と実証，建築設備 6 月号，2025.
- 4) 木村ら：体育館向け空調システムの開発と実証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，（第 2 報）暖房効率改善と吹出し配置の影響，pp.449-452，2024.

## ABSTRACT

We have developed an air conditioning system for gymnasiums that combines measures for heat, cold, and infection control. Previous reports have shown the effectiveness of this air conditioning system for gymnasiums. However, as the outdoor air temperature increased and the indoor environment become worse, we focused on the use of thermal barrier sheets on indoor ceiling surface to reduce the air conditioning load. This report presents a comparison of the indoor environment in summer with varying thermal barrier areas on the ceiling and in winter with and without the installation of thermal barrier sheets.

---



# エネルギー自立型サステナブル研究施設 —ZWB 化の取り組みと試算評価—※

大迫孝輔・柴田克彦・田中健太\*1・大塚雅之\*1

## Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center - Efforts toward ZWB and Estimated Evaluation -

Kosuke Osako・Katsuhiko Shibata・Kenta Tanaka・Masayuki Otsuka

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、今後の建築はZEBだけでなく、Zero Water Building（以降、ZWBと記す）評価も含めたオペレーショナルカーボンの削減を考慮した総合的な取り組みが必要である。高砂熱学イノベーションセンターは、その実現に向け取り組んでいる施設である。本建物はエネルギー収支の実績においてネットゼロを達成しており、導入している井水を有効活用した水利用システムはその実現に貢献している。本報では、このような本建物においてZWB達成に向けた水利用の改善技術を事前に検討し導入した。設備運用の改善により地下水使用量の削減に取り組み、加えて既存の雨水貯留浸透槽を改造し雨水を地下浸透させた。雨水浸透量の把握には、雨水貯留浸透槽内の水位を実測する新たな浸透量の推定方法を検討した。一定期間の運用における実測データに基づいて試算した結果、ZWB評価値が大幅に改善されることを確認した。

### 1. はじめに

従来からの節水や水のリサイクルに加えて、近年では上下水道インフラへの負荷低減を考慮した新たな水資源自立循環型建物としてZWBへの関心が高まっている<sup>1)2)</sup>。建物のカーボンニュートラル実現に向け、今後はZEBだけでなく、ZWB評価も含めたオペレーショナルカーボンの削減を考慮した総合的な取り組みが必要である。高砂熱学イノベーションセンター（以下、本建物）は、再生可能エネルギーによるエネルギーの自立を目指し計画された研究施設であり、導入した地下水を有効活用した水利用システムは、ネットゼロエネルギーの達成に貢献している。既報<sup>4)</sup>において、米国グリーンビルディング協会が提唱するLEED Zero Water（以降、LEED-ZWと記す）認証のZWB定義に基づき、本建物に導入可能なZWB達成に向けた改善技術の効果を試算し、ZWB達成の可能性を確認した。本報では、前報で試算した改善技術を実際に本建物に導入して検証した結果について述べる。

### 2. ZWB 化の取り組み

#### 2.1 除鉄除マンガン装置逆洗排水量の削減

本建物では、揚水した地下水を無薬注ろ過方式の除鉄除マンガン装置により処理をしている。この装置の維持管理のために逆洗工程（以降、逆洗と記す）があり、その排水は下水放流している。この逆洗排水量は、本建物の下水量の約54%を占めており<sup>5)</sup>、これを削減できれば、ZWB化への効果は大きい。そこで、

※ 本論文は、2025年度空気調和衛生工学会講演論文<sup>3)</sup>を加筆修正したものである。

\*1 関東学院大学

除鉄除マンガン装置の逆洗水量削減へ向け、以下の2種類について取り組んだ。

- 1) 逆洗回数および逆洗時間の低減  
逆洗回数および逆洗時間の低減について、本建物の実設備により検証した。
- 2) 逆洗排水を地下浸透させ還元水とし下水量を低減  
小型浸透槽により、逆洗排水の地下浸透の際に、不具合がないか検証した。  
なお、今回の逆洗排水の地下浸透については、事前に行政から了解を得て実施した。

#### (1) 除鉄除マンガン装置の概要

図1に本建物の除鉄除マンガン装置のフロー図を示す。通常運転では、ろ過塔内に充填された担体で、地下水中の鉄・マンガンを除去する。逆流洗浄では、通常運転の逆方向から通水するだけで、除去した鉄・マンガンが逆洗排水と一緒に放出され、次の後洗浄工程では、逆流洗浄による塔内の残留物を洗い流す。

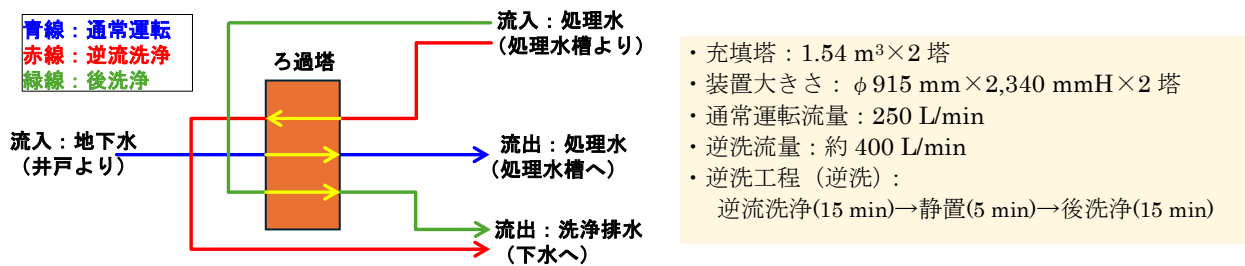


図1 除鉄除マンガン装置フロー図

#### (2) 除鉄除マンガン装置の逆洗水量削減の取り組み

##### 1) 逆洗回数および逆洗時間の短縮

当初は、メーカー指定の一般的な条件（装置稼働日は逆洗実施）に基づき5回/週の逆洗を行っていた。逆洗回数低減の検証では、この逆洗頻度を5→1回/週に段階的に低減し評価した。通常運転時の装置出入口の差圧と水質（鉄、マンガン）の評価結果を図2、図3に示す。図2の差圧については、逆洗頻度に関わらず一定であった。図3に示す除鉄除マンガン装置の入口（地下水）と出口（処理水）の水質については、鉄の出口濃度は入口濃度0.02~0.17 mg/Lに対して約0.02 mg/L付近で一定に分布していた。同様に、マンガンも、入口濃度0.03~0.042 mg/Lに対して、出口濃度は0.01 mg/L未満で安定していた。逆洗回数を低減しても、差圧上昇や出口（処理水）濃度に水質劣化が見られないことから、除去性能には影響がないことが分かった。

一方、逆洗洗浄中の逆洗排水の鉄濃度の変化を図4に示す。夏期は、冷熱利用のため地下水汲み上げ量が多い。そのため、1回/週の逆洗では、開始15minの逆流洗浄工程で鉄成分をとり切れない期間があった（例：図4の9/19）。一方、夏期以外の時期は、逆洗終了時に鉄成分を取り切れていた（例：図4の10/17）。このため、日常管理のしやすさと水質の安全を考え、地下水汲み上げ量が多い春期夏期(4~9月)は2回/週、汲み上げ量が少ない秋期冬期(10~3月)は1回/週という逆洗回数とした。

次に、逆洗時間の短縮について検証した。図1に示すように、逆洗工程は、1塔あたり、逆流洗浄(15min)→静置(5min)→後洗浄(15min)といった時間がかかるが、このとき逆洗排水の水質から逆洗時間を短縮できないか検討した。図4に示すように、後洗浄の水が非常に綺麗なため、後洗浄時間を短縮しても水質的には問題がないと考えられた。後洗浄時間を15分間から5分間〜10分短縮しても、塔内の残留物を洗い流す後洗浄の目的を損なわないと判断した。

以上の取り組みにより、年間を通して3,600 m³/年だった逆洗水量は、逆洗頻度の低減と後洗浄時間の短縮により1,240 m³/年になると試算された。

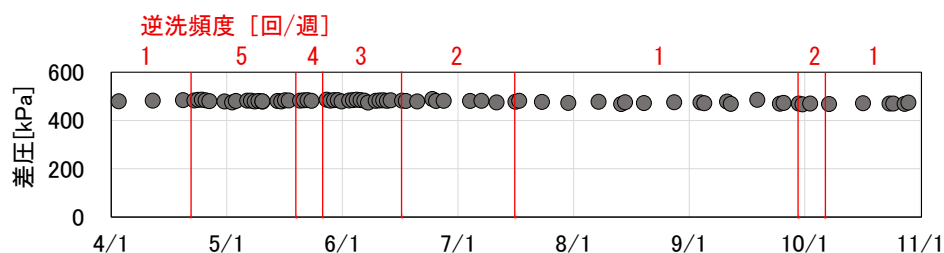


図2 除鉄除マンガン装置前後の差圧

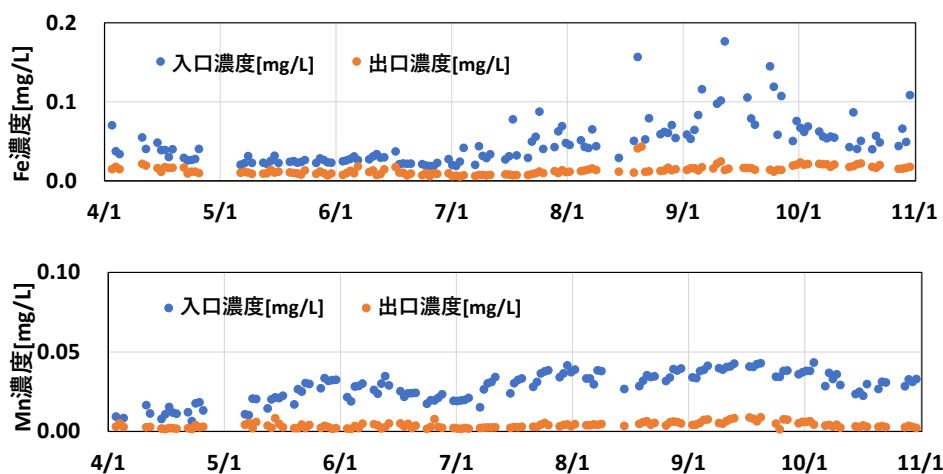


図3 除鉄除マンガン処理前後の水質(Fe, Mn)変化

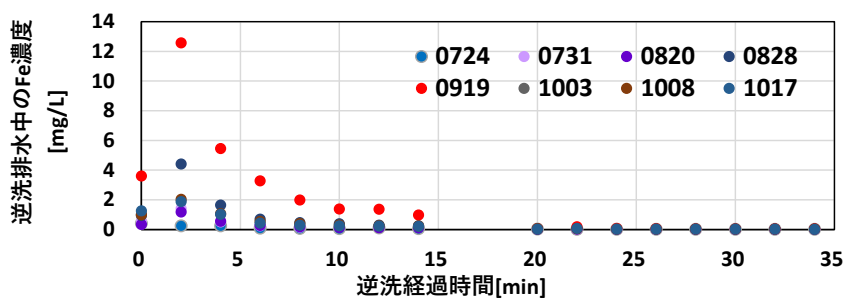


図4 除鉄除マンガン装置逆洗排水の水質変化

## 2) 逆洗排水の地下浸透

次に逆洗排水を地下に浸透させて還元水とすることで下水排水をゼロにできるか検証した。試験は、敷地内に新たに設置した小型の逆洗水浸透槽で行い、逆洗排水を投入して浸透速度を計測し浸透能力を確認した。図5に逆洗排水の浸透速度を示す。計測期間では、浸透速度が低下する傾向がわずかに見られた。これは水温が低くなると粘性が高くなり透水速度が低下するためであり、槽内の閉塞による速度低下はみられなかった。ただし、本件は引続き検証を行い水温との関係を明らかにし、一年を通じて問題がないか、引き続き検証する予定である。

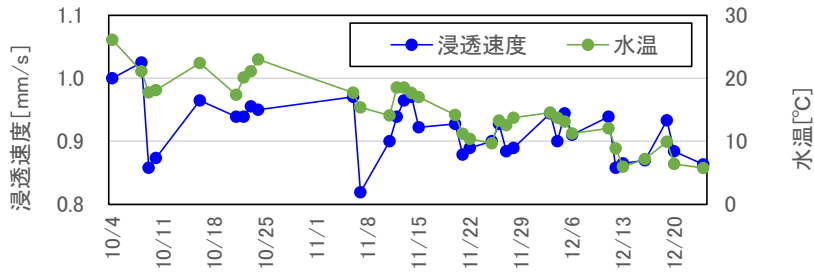


図5 逆洗水の浸透速度

## 2.2 改造した雨水貯留浸透槽による雨水の地下浸透

本建物の敷地内には、雨水の許容放流量を満たすための雨水流出抑制施設として、雨水貯留浸透槽が2槽ある。A槽は275 m<sup>3</sup>、B槽は211 m<sup>3</sup>の容積がある。本雨水貯留浸透槽は地下浸透性能を有しているが、雨水流出を抑制する目的で設置されていたため、浸透機能が十分に活かされていない。そこで、浸透機能を活かした還元水量への貢献を目的に改造し、雨水の地下浸透水量（還元水量）の増加を試みた。

### (1) 浸透槽の改造の概要

雨水貯留浸透槽Bの改造した放流接続管を図6に示す。放流接続管の先を900 mm立ち上げることで浸透槽内に雨水が貯留するように工夫した。また、浸透槽内の水位は2箇所計測した。浸透槽Aについても同様に改造し水位計を設置した。また、敷地内に設置した雨量計で降雨量を計測した。これら計測値から改修雨水貯留浸透槽A、Bによって見込まれる年間雨水浸透量を試算した。

### (2) 再現モデル式

雨量及び雨水貯留浸透槽の水位より、雨水貯留浸透槽の雨水の地下浸透量を以下のモデル式により算出した。

$$\frac{dH}{dt}(t) = \frac{Q_i(t) - Q_o(t) - Q_g(t)}{\lambda WL} \quad (1)$$

$$Q_i(t) = \frac{fA}{360} \left[ \frac{R(t) - R(t - 60t_c)}{t_c/60} \right] \quad (2)$$

$$Q_o(t) = C \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2g \left[ H(t) - H_0 - \frac{D}{2} \right]} \quad (3)$$

$$Q_g(t) = \alpha \lambda WLH(t) \quad (4)$$

$H$ : 水深 [m]、 $t$ : 時間 [s]、 $Q_i$ : 流入量 [m<sup>3</sup>/s]、 $Q_o$ : 放流量 [m<sup>3</sup>/s]、 $Q_g$ : 浸透量 [m<sup>3</sup>/s]、 $\lambda$ : 貯留槽の空隙率、 $W$ : 貯留浸透槽の短辺長 [m]、 $L$ : 貯留浸透槽の長辺長 [m]、 $f$ : 流出係数、 $A$ : 集水面積 [ha]、 $t_c$ : 洪水到達時間 [min]、 $R$ : 累加雨量 [mm]、 $D$ : 放流接続管の管径 [m]、 $C$ : 放流接続管の流量係数（標準値0.6）、 $g$ : 重力加速度(=9.8) [m/s<sup>2</sup>]、 $H_0$ : 放流接続管の立上高さ [m]、 $\alpha$ : 浸透能力係数 [s<sup>-1</sup>]

式(1)は平方根の演算を含む式(3)より非線形微分方程式になるため、数値計算によって近似解を解いた。流入量 $Q_i$ の式には、小流域の雨水流入モデルとして標準的に使用されている「合理式合成法」<sup>9)</sup>を用いた。放流量 $Q_o$ の式は、オリフィスの流量公式をもとに作成した。浸透量 $Q_g$ の式は、浸透槽内の水深の計測値から得られる浸透能力係数( $\alpha$ )を用いて作成した。流出係数は増水時の水深に着目した試行を繰り返して決定した。計算に供した雨量データは2024年7月1日0:00から2024年11月2日9:30までとし、起算時の水深はゼロとした。

図7に、降水量と浸透槽の水位の関係を示す。降水量に対応して貯留槽の水位の変動が確認できた。これらの計測値を再現モデル式に適用し再現計算を行った結果、図8に示すように、降水量から雨水貯留浸透槽の水位を計算で再現できることを確認した。上記再現モデル式から、浸透槽A、Bにおける年間の浸透量を算出した。2015年から2024年までの10年分の降雨データから1年ごとに浸透量を算出し、その平均値を年間の浸透量とした。敷地内に設置した雨量計は設置1年未満で年間データがないため、降水量は本建物に最寄りの気象庁つくば観測所(館野観測所)の10分雨量より与えた。計算の結果、雨水浸透量は、A槽では4,109 m<sup>3</sup>/年、B槽では3,991 m<sup>3</sup>/年、合計8,100 m<sup>3</sup>/年と算出された。

本取り組みにより、雨水貯留浸透槽の地下浸透量は、浸透槽の浸透能力係数 $\alpha$ により推定可能ということを示した。これは設計計画時に実施する現地浸透試験で得られる浸透能力係数を用いて、従来よりも精度の高い雨水貯留浸透施設を設計できる可能性があることを示している。今後も様々な建物についてデータを蓄積していきたい。

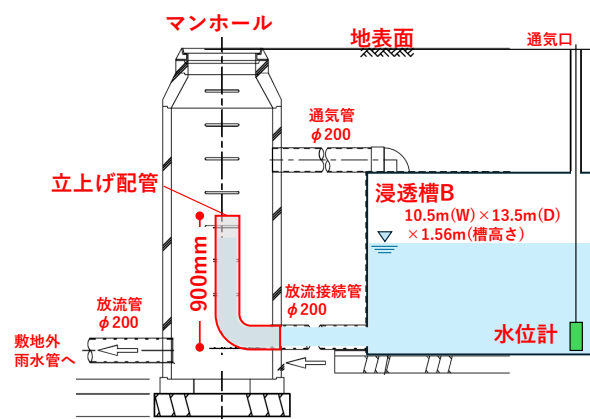


図6 放流接続管の改造

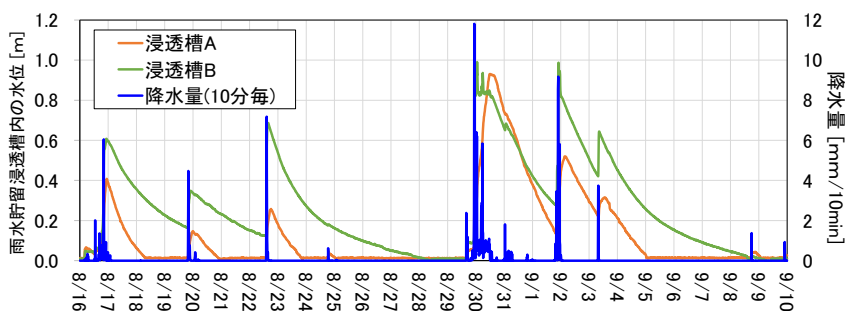


図7 降水量と浸透槽の水位変化

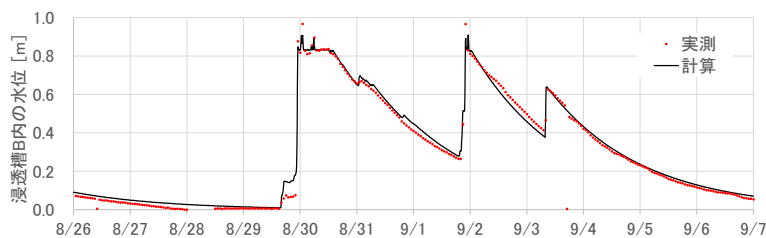


図8 再現モデルによる計算例(B槽)

### 3. ZWB 評価

本章では、LEED Zero Water が提示している ZWB 評価方法に基づいて、本建物における ZWB 化の検討前と検討後について試算した。

#### 3.1 ZWB の試算方法

前報<sup>4)</sup>と同様に LEED Zero Program Guide<sup>7)</sup>の ZWB に関する定義をベースに試算を行った。LEED-ZW の雨水浸透量は「Rainwater Management」<sup>8)</sup>に記載されている不浸透面からの雨水流出量に基づき計算されるが、本報では降水量と浸透槽内水位の実測値から得られた再現モデル式より算出した浸透量を用いた。

#### 3.2 本建物の ZWB 化の検討と達成の可能性

図 9 に 2023 年度に改修した時の水使用の試算値、図 10 に改修前後の本建物の LEED-ZW 試算値を示す。前述の 2.1 の除鉄除マンガン装置逆洗排水の削減実施で、改修前 2023 年度の逆洗排水量 3,600 m<sup>3</sup>/年から 1,240 m<sup>3</sup>/年に低減し、さらにそれを地下浸透させることで、還元水量 1,240 m<sup>3</sup>/年（図 10 では-1,240 m<sup>3</sup>/年）となった。雨水浸透の取り組みでは、改造した雨水貯留槽によって、雨水集水量 8,100 m<sup>3</sup>/年（図 10 では-8,100 m<sup>3</sup>/年）の地下浸透が可能と算出された。

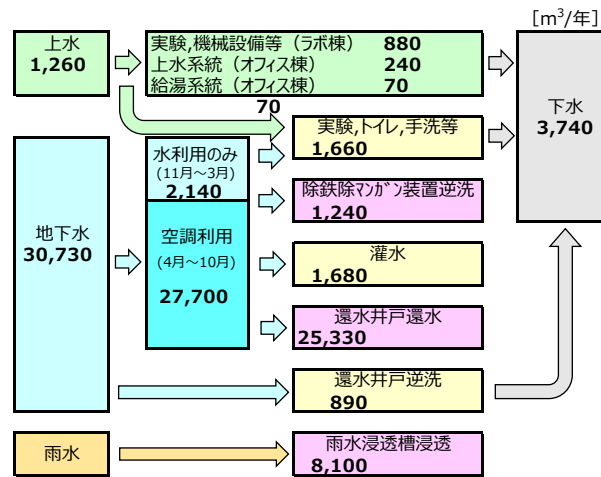


図 9 水使用の試算値(2023 年度)

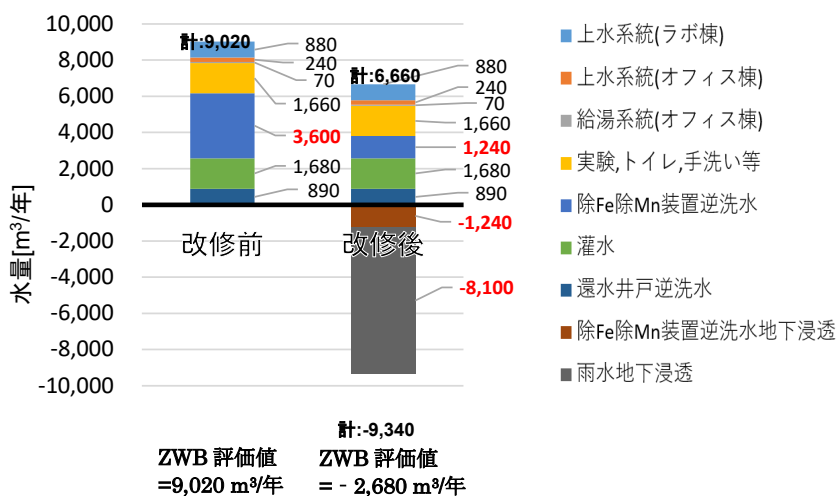


図 10 ZWB 化改修前後の試算結果(2023 年度)

図 10 に示すように、改修前の LEED-ZW の評価結果は、本建物の総使用水量 9,020 m<sup>3</sup>/年であったが、代替水および還元水については該当する水の利用がなかったため、ZWB 評価値は 9,020 m<sup>3</sup>/年であった。一方、前述した除鉄除マンガン装置の逆洗水量低減及び改修した雨水浸透槽による雨水地下浸透を行った場合、ZWB 評価値は-2,680 m<sup>3</sup>/年（=6,660-9,340）となり大きく改善が見られ、ZWB の条件を満たす結果となった。

以上より、本建物において逆洗排水量低減や逆洗排水及び雨水を地下浸透することにより ZWB への改修が可能で、よりサステナブルな建物に改善できる可能性を示した。その一方で、敷地が広く雨水の還元水量を確保しやすいことが ZWB 達成に大きく寄与したと考えられ、水資源の循環利用が目的の、ZWB の趣旨を十分に満足してはいない。現指標では、敷地が広いと還元水の評価が高水準になることがあり、特に郊外の大学キャンパス等では、容易に ZWB を達成できる可能性があるとの指摘がある。敷地サイズごとにカテゴリー分けし、適切な評価をするなど対策が必要と考える。

また、現状の ZWB 評価は水の使用量に関する指標であり、雨水利用や排水再利用に必要なエネルギーについては検討されておらず、多量のエネルギーで多量の水を代替、還元しても ZWB を達成することが出来る。カーボンニュートラル社会の実現を目指す現在においては、水利用だけでなく省エネルギーや脱炭素、快適性や生産性向上なども含めて多元化して評価することがより重要になると考える。例えば、空調の冷熱源として利用した地下水は、水の使用量に加算されない。多様な水の利用方法を持つ施設<sup>9)10)</sup>が今後さらに増えていくと考えられ、従来の給排水衛生での水使用量のみで評価するのではなく、水の熱利用などの資源としての利活用要素も加えつつ、日本の特質に合致した ZWB の定義について早急の議論が必要と考えられる。

#### 4. おわりに

再生可能エネルギーによるエネルギー自立を目指す本建物における ZWB 化に向けた取り組みと試算評価から、以下の知見を得た。

- 1) 除鉄除マンガン装置の逆洗排水低減の取り組みにより、逆洗水量は 1,240 m<sup>3</sup>/年と試算された。
- 2) 小型浸透槽による除鉄除マンガン装置の逆洗排水の浸透試験では、地下浸透の可能性が示された。
- 3) 降水量と雨水貯留浸透槽の実測水位により作成した水位再現モデル式から、地下浸透量は 8,100 m<sup>3</sup>/年と試算された。
- 4) 除鉄除マンガン装置の逆洗水量低減と雨水浸透槽改修を行った場合、LEED-ZW で試算すると、水収支の値は-2,680 m<sup>3</sup>/年と試算され、ZWB 達成の可能性が示された。
- 5) 日本の特質に合致した多面的に評価できる ZWB の定義について早急の議論が必要と考えられた。

## 文 献

- 1) 長谷川 巖：ゼロ・ウォータービルと環境配慮に関する最近の動向，空気調和・衛生工学会誌，92，pp.799-805，2018.
- 2) 大塚ら：特集「ネット・ゼロ・ウォーター」，空気調和・衛生工学会誌，99，pp.365-407，2025.
- 3) 大迫ら：自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価（第 38 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.225-228，2025.
- 4) 大迫ら：同上（第 33 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.113-116，2024.
- 5) 大迫ら：同上（第 29 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.173-176，2023.
- 6) 高島 英二郎：雨水流出に関する時間と空間のセンス(合理式を題材に)，下水道協会誌，Vol.55,No.663，pp.95-99，2018.
- 7) U.S. Green Building Council：LEED Zero Program Guide April 2020.
- 8) U.S. Green Building Council：LEED v4 Sustainable Sites credit Rainwater Management.
- 9) 桐山ら：RC 構造物における屋根散水システムの熱的効果に関する実測研究，空気調和・衛生工学会論文集 No.166，pp.11-18，2011.

- 10) 中曾ら：高性能大容量帯水層蓄熱システムの開発（その1）揚水・環水切換型熱源井の開発意義と運用実績，日本地下水学会秋季講演会講演予稿，pp.138-143，2022.

### ABSTRACT

To achieve carbon neutrality by 2050, future buildings must engage in comprehensive efforts that consider both the goal of achieving a zero energy building (also known as ZEB) status and operational carbon reduction, including zero water building (ZWB) assessments and achieving a ZWB status. The Takasago Thermal Innovation Center is working toward this goal. It has achieved a net-zero goal in energy performance and has established a water utilization system that effectively uses well water. This entails that water usage improvement technologies aimed at achieving ZWB were pre-evaluated and implemented in this building. Efforts were made to reduce groundwater usage through improved facility operations, while existing rainwater storage infiltration tanks have been modified to allow rainwater to infiltrate underground. To measure infiltration volume, a new estimation method was applied based on actual water-level measurements placed within the rainwater storage infiltration tanks. Calculations based on actual measured data over a fixed operational period confirmed a significant improvement in the ZWB assessment value.

---

# 吸着材蓄熱システムのスケールアップ試験計画における ゼオライトエコボイラの設計検討※

澁澤朱音・鎌田美志・松井一騎\*1  
馬場大輔・谷野正幸・川上理亮  
青木温哉\*2・中垣隆雄\*2・藤井祥万\*3

## Exploratory Design Study on Zeolite eco-Boiler through Scale-up Test Planning of Adsorption Thermal Storage System

Akane Shibusawa・Haruyuki Kamata・Kazuki Matsui  
Daisuke Baba・Masayuki Tanino・Yoshiaki Kawakami  
Haruya Aoki・Takao Nakagaki・Shoma Fujii

未利用熱の融通拡充を目的として、排熱発生地と熱需要地の時間的・空間的ギャップを解消する吸着材を用いた蓄熱輸送システムの構築を検討した。従来研究にて加圧蒸気の連続生成を可能にする移動床型の蒸気回生装置ゼオライトエコボイラ (ZeB) のベンチスケールでの基礎試験は完了している。本研究では、商用化へのステップアップとして商用モデルのおよそ1/10規模のZeBを数値解析により設計した。このとき、スケールアップによる数値解析結果と実試験結果の差を、商用化まで完了している固定床型の蓄熱輸送システム「メガストック®」の実証試験結果を基に予測し、ZeBの設計にフィードバックした。メガストック®において、充填槽内の吸着材厚さの不均一性が蓄熱/放熱時間に影響を与えることがわかっている。ZeBにおいてはゼオライト移動床の沈降速度分布が性能に関与することが推算された。

### 1. はじめに

2050年の脱炭素社会および持続可能な社会の実現に向けて、産業プロセス・バイオマス・廃棄物処理等に由来する排熱を地域内で有効に活用することが求められる。しかしながら、排熱(排ガス)の大部分を占める250°C以下の低温排熱は発生地での利用用途が限定され<sup>1,2)</sup>、さらに排熱の発生地と熱需要地の時間的・空間的ギャップによりその多くが未利用のままである<sup>3)</sup>。これらの未利用熱の融通を拡充するためには、これらの熱の時空間ギャップの課題を解決する技術が必要であり、本研究では長期保管可能であり蓄熱温度が比較的低い吸着材を、蓄熱材として採用する蓄熱輸送システムに着目した。

ゼオライトなどの吸着材は水分を吸着すると発熱する性質を持ち、未利用熱により吸着材を乾燥(蓄熱)させることで、繰り返し利用できる。この吸着熱を熱需要地に供給することで既存設備の化石燃料の削減が可能となり、これまでに吸着材を用いた蓄熱システムが多数研究されてきた<sup>4-8)</sup>。我々は、従来研究にて、蓄熱輸送システムの出熱過程において高温低湿空気の供給を可能にする吸着材蓄熱システム「メガストック®」を開発し、ベンチスケールから商用スケールまでのスケールアップが完了している<sup>9-12)</sup>。

一方で、蓄熱輸送システムの更なる適用拡大を目指して、出熱過程において蒸気生成を可能とするゼオライトエコボイラ(以下ZeB)を開発している<sup>13)</sup>。これまでに、ベンチスケールにおける数値解析モデルを確立し<sup>14)</sup>、加圧蒸気の連続生成を検証した。現在、商用化へのステップアップとして商用モデルのおよ

※ 本論文は、第29回動力・エネルギー技術シンポジウムの講演論文<sup>21)</sup>を加筆修正したものである。

\*1 関信越支店 埼玉営業所1課、\*2 早稲田大学、\*3 東京大学

そ 1/10 規模までスケールアップした ZeB を設計・製作している。吸着材を用いたシステムのスケールアップにおいて、ベンチスケールでは出現していなかった課題が発生することが多々あり<sup>15-18)</sup>、その課題を可能な限り予見した試験設計が求められる。

そこで本報では、商用化まで完了している吸着材蓄熱システムで見られたスケールアップの課題の一例から、ZeB のスケールアップにおける出熱過程の課題を抽出し、スケールアップ試験装置の設計へフィードバックすることを目的とした。

## 2. 吸着材蓄熱システムの概要

### 2.1 ゼオライトエコボイラ

ZeB の概要図を **図 1** にベンチスケールの試験装置を **写真 1** に示す。本システムでは、ゼオライトと熱媒である水との熱交換方式は、矩形タンクに内蔵したフィンチューブ式熱交換による間接熱交換方式を採用した。また、上部から蓄熱されたゼオライトが連続的に投入され、下部から放熱したゼオライトが定量的に排出される、移動床型を採用した。なお、本システムでは、装置自体は輸送せず、ゼオライトのみを輸送する機構を採用しているため、未利用熱の発生地に設置される蓄熱装置<sup>19)</sup>にて別途蓄熱されたゼオライトが ZeB に供給される。ZeB は既設ボイラとの協調運転を想定しており、既設ボイラが生成した蒸気の一部を ZeB に供給する。このとき、蒸気は大気圧まで減圧され、ZeB 上部からゼオライト移動床へ噴射され、水蒸気が吸着することでゼオライトが発熱し 200°C 以上まで温度が上昇する。そして、熱交換器下部から給水される熱媒水がゼオライトの吸着熱により沸騰することで、熱交換器の最上部から加圧蒸気として連続的に送られる。以上の構造により、ZeB 筐体全体を加圧させることなく、既設ボイラから噴射した蒸気量以上の 0.1 MPaG/120°C の乾き飽和蒸気を連続的に供給することで既設ボイラの燃料削減が可能となる<sup>20)</sup>。

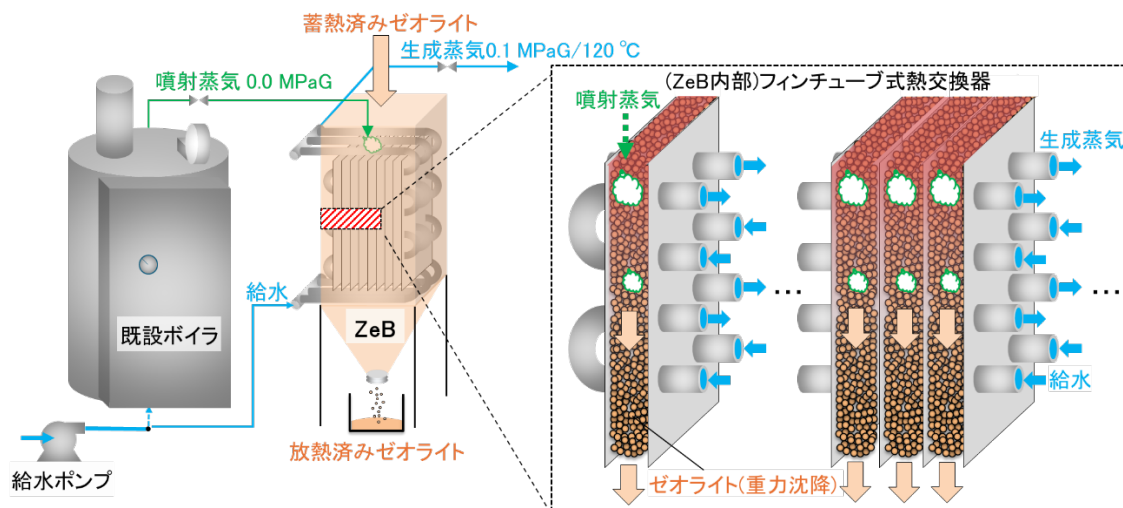


図 1 ZeB 概要図

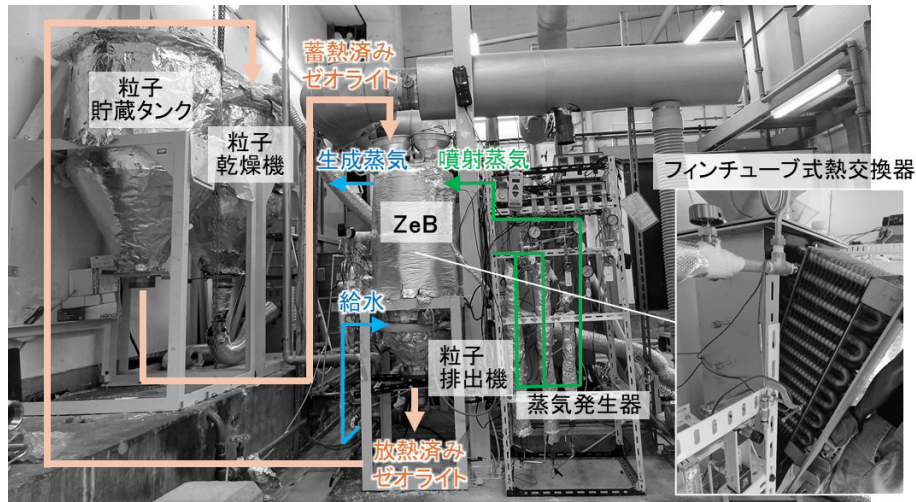


写真 1 ZeB ベンチスケール試験装置

## 2.2 メガストック®

メガストック®の概要図を**図 2**に示す。吸着材と熱媒である空気との熱交換方式は直接熱交換方式であり、矩形型容器に吸着材を充填する固定床型を採用している。吸着材充填槽の上部と下部には通気層となる空間が設けられており、この空間の壁側面に手動着脱式のダクト接続口が設置されている。このダクトを通じて吸着材充填槽に対して通気することで、同一槽において蓄熱と放熱が可能になっている<sup>10)</sup>。蓄熱運転時は未利用熱由来の高温空気を下部通気層から供給することで、吸着材を乾燥させる。そして、放熱運転時は湿潤空気を供給し、吸着材に水分を吸着させることで吸着材が発熱し、高温低湿空気が送出され、加温または乾燥工程に用いられる。なお、メガストック®では、吸着材充填槽ごと輸送する機構を採用しており、未利用熱の発生地および熱需要地へはトレーラーにて輸送する。商用機を**写真 2**に示す<sup>11)</sup>。

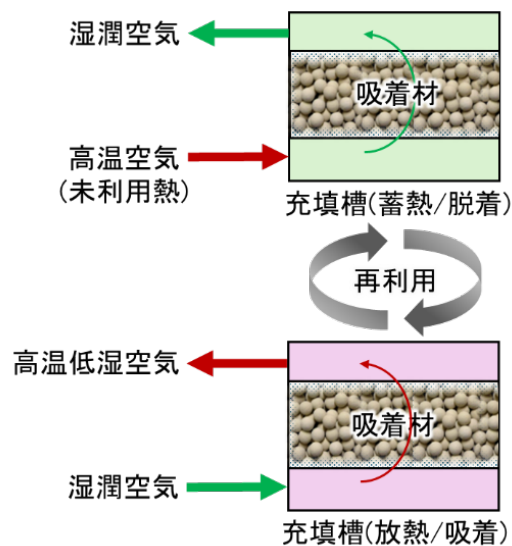


図 2 メガストック®概要図



写真2 メガストック®商用機

### 3. スケールアップ試験装置の設計

商用機の 1/100 規模であるゼオライト流量（ZeB 下部から排出される量）15 kg/h 級のベンチスケール試験において妥当性を確認した、ZeB の性能を予測するエネルギー・質量・化学種（蒸気）・運動量の各保存則を連成した一次元数値解析モデルを用いて、商用機のおよそ 1/10 規模のゼオライト流量 200 kg/h 級までスケールアップした ZeB の概念設計を実施した。数値解析モデルを構成するゼオライト・気体・水のエネルギー保存方程式を、それぞれ式(1)、(2)、(3)に示す<sup>14)</sup>。その結果、必定の噴射蒸気量は 30 kg/h であり、生成蒸気量は 45 kg/h が見込まれることがわかった。熱交換器の伝熱面積は上述の数値解析を用いて選定することとなる。

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_{zeo} u_{zeo} c_{p\_zeo} T_{zeo}) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff\_zeo} \frac{\partial T_{zeo}}{\partial x} \right) + \rho_{zeo} r_{ad/des} \Delta H + \dot{s}_{zeo-g} + \dot{s}_{zeo-w} + \dot{s}_{zeo-amb} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_g u_g c_{p\_g} T_g) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff\_g} \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \dot{s}_{zeo-g} + \dot{s}_{g-w} + \dot{s}_{g-amb} \quad (2)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w u_w h_w) = \dot{s}_{zeo-w} + \dot{s}_{g-w} \quad (3)$$

メガストック®は既にスケールアップを達成し、乾燥重量で吸着材 5.5 ton を充填した商用機が稼働している。スケールアップにおける課題は複数あるが、そのうち主要な 1 つの事例は充填状態の不均一性である。従来研究では、10 kg 級の試験において妥当性を確認した一次元数値解析モデル<sup>9)</sup>による予測と、5.5 ton の実証機の蓄熱運転結果を比較したところ、蓄熱完了時間は解析結果よりも 25%程度長い結果となった。これは実際の蓄熱槽内における充填高さの分布による通気分布が発生しているためと考えられ、数値解析において充填高さの分布を与えて蓄熱完了時間を予測したところ、実測値とほぼ一致した<sup>11)</sup>。

ZeB のスケールアップにおいても、同様な課題として、ゼオライト移動床の沈降速度分布が考えられる。そこで、1/10 規模の概念設計に対して本課題の解決手段を検討するため、各ゼオライト流量の筐体断面における温度分布を試算した。商用規模のゼオライト流量 1500 kg/h を基準として、ベンチスケール試験で確立した数値解析モデルにより、ゼオライト流量を基準から 0.5、0.9、1.1、1.5 倍した値を用いた。また、いずれのゼオライト流量においても噴射蒸気量は一定とした。その結果を図 3 に示す。図中凡例のカッコ内は 1500 kg/h に対する倍数を示す。装置上部で 200℃以上まで発熱したゼオライトは、水と熱交換しながら

下部へ移動し、100°C以下まで温度が低下した状態で排出される。図3より、ゼオライト流量が基準より1.5倍速い場合、装置下部のゼオライト温度が基準流量より高いことから、下部での熱交換が間に合わず、熱回収率が低下することがわかった。また、ゼオライト流量が0.9、0.5倍に低下した場合は、給水量に対して熱量が不足するため、熱交換器出口での生成蒸気の乾き度が低下する。この結果から、1500 kg/hで一様に重力沈降する場合と、沈降速度分布が発生した場合の既存ボイラの燃料削減量を試算し比較した。移動床を通過するゼオライトを、全流量を一定として二等分し、それぞれ1.1および0.9倍で沈降したと仮定した場合、一様な速度で重力沈降する場合とほぼ同程度を維持した。しかしながら、差異を拡大し、1.5および0.5倍として沈降する場合は、10%程度低下することがわかった。以上の結果から、沈降速度分布が発生した場合も性能を維持して運転できるように、1/10規模の概念設計に対して、伝熱面積においては数値解析で得た値から余裕率を考慮して90 m<sup>2</sup>とした。また、ZeB上部の噴射蒸気口は噴射蒸気量とゼオライト流量のバランスを調整できる構造とし、写真3のような商用機1/10規模のスケールアップ試験装置を製作した。この試験装置において、0.1 MPaG/120°Cの飽和蒸気の連続生成および噴射蒸気に対する増熱効果を確認した。今後、さらなるデータ取得および数値解析の妥当性確認を実施する予定である。

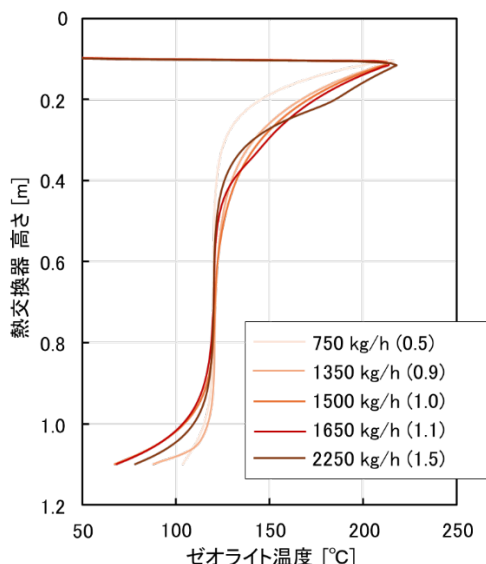


図3 各ゼオライト流量におけるゼオライト温度分布

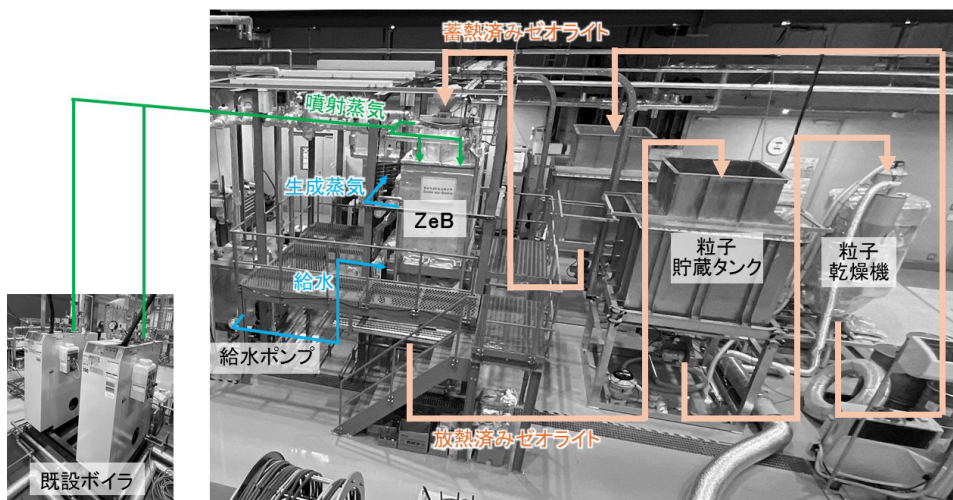


写真3 ZeB スケールアップ試験装置

#### 4. おわりに

数値解析を基にベンチスケールから約 10 倍スケールアップした ZeB を設計した。スケールアップにおける課題については、既に商用規模までのスケールアップを達成している吸着材蓄熱システムの実証試験結果から、ゼオライトの沈降速度分布が ZeB の性能に与える影響を推算した。沈降速度分布による性能低下を抑えるため、伝熱面積は数値解析結果から余裕率を考慮した値として、スケールアップ試験装置を設計し製作した。そして、スケールアップ試験装置にて加圧蒸気の連続生成を確認した。今後は、実験データを蓄積し、数値解析モデルと設計値の妥当性を評価、必要に応じて修正する。さらに商用規模の ZeB の設計および実証試験に取り組む予定である。

#### 謝辞

本研究は、環境省総合推進費（JPMEERF20243G01）、JST 共創の場形成支援プログラム(COINEXT:JMJPFF2003)、JST さきがけ（JPMJPR2278）、JSPS 科研費若手研究(22K18061)の成果を含んでいる。関係各位に御礼申し上げます。

#### Nomenclature

##### Symbols

- $c_p$  : 比熱 [J/(kg·K)]
- $h$  : 比エンタルピー [J/kg]
- $r_{ad/des}$  : 吸脱着速度 [ $s^{-1}$ ]
- $\dot{s}$  : 相間熱伝達項
- $T$  : 温度 [K]
- $u$  : 速度 [m/s]
- $x$  : 軸方向距離 [m]
- $\Delta H$  : 吸着/脱着熱 [kJ/kg]
- $\lambda_{eff}$  : 有効熱伝導率 [W/(m·K)]
- $\rho$  : 密度 [ $kg/m^3$ ]

##### Subscripts

- amb : 装置周辺環境
- g : 気体
- w : 水
- zeo : ゼオライト

#### 文献

- 1) 根津浩一郎, 下田學, 井口光雄: 排熱利用に関する実態調査 第1報—工場排熱の賦存量・利用可能量に関する調査研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.22, 79-87 (1983.6).
- 2) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター, 産業分野の排熱実態調査報告書, (accessed Jan. 14th 2026), <https://www.nedo.go.jp/content/100957934.pdf>.
- 3) 山田心治: オフライン熱供給システム普及に向けて～都市に賦存する未利用排熱の有効活用～, Best Value, 13,(2006).
- 4) Elham Abohamzeh, Georg Frey: Numerical Investigation of the Adsorption Process of Zeolite/Water in a Thermochemical Reactor for Seasonal Heat Storage, Energies, 15, 5944 (2022).
- 5) Henri Schmit, Simon Pöllinger, Tobias Schubert, Eberhard Lävemann, Stefan Hiebler: Application oriented material characterisation and simulation for adsorption thermal energy storage, Frontiers in Thermal Engineering, 5 (2025.5).
- 6) Christian Finck, Rongling Li, Rick Kramer, Wim Zeiler: Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy

- storage in the control of building heating systems, *Applied Energy*, 209, 409-425 (2018).
- 7) R. van Alebeek, L. Scapino, M.A.J.M. Beving, M. Gaecini, C.C.M. Rindt, H.A. Zondag: Investigation of a household-scale open sorption energy storage system based on the zeolite 13X/water reacting pair, *Applied Thermal Engineering*, 139, 325-333 (2018).
  - 8) Michelangelo Di Palo, Vincenzo Sabatelli, Fulvio Buzzi, Roberto Gabbriellini: Experimental and Numerical Assessment of a Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications, *Applied Sciences*, 10, 8517 (2020).
  - 9) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 鈴木正哉, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発 第1報—小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル, *空気調和・衛生工学会論文集*, 281, 9-17 (2020.8).
  - 10) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発 第3報—吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価, *空気調和・衛生工学会論文集*, 290, 39-46 (2021.5).
  - 11) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発 第5報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, *空気調和・衛生工学会論文集*, 301, 9-16 (2022.4).
  - 12) 高砂熱学工業株式会社, TDK(株) 国内最大規模の工場へ吸着材蓄熱システム「メガストック®」を納品, CO<sub>2</sub> 排出量削減に貢献～未利用の低温排熱(100°C程度)を蓄熱し, 離れた場所へ運び, 再利用～, (accessed Jan. 14th 2026), [https://www.tte-net.com/article\\_source/data/news/detail/2024/678.html](https://www.tte-net.com/article_source/data/news/detail/2024/678.html).
  - 13) 藤井祥万: 産業廃棄物由来等の未利用熱の蓄熱輸送による蒸気回生システムの開発, 環境省総合推進費, (accessed Jan. 14th 2026), [https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/db/pdf/kenkyu\\_gaiyou/3G-2401.pdf](https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/db/pdf/kenkyu_gaiyou/3G-2401.pdf).
  - 14) Shoma Fujii, Takao Nakagaki, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi: Prospective life cycle assessment for designing mobile thermal energy storage system utilizing zeolite, *Journal of Cleaner Production*, 365, 132592 (2022).
  - 15) Asnakech Lass-Seyoum, Dmitry Borozdenko, Thomas Friedrich, Timo Langhof, Simone Mack: Practical test on a closed sorption thermochemical storage system with solar thermal energy, *Energy Procedia*, 91, 182-189 (2016).
  - 16) Andreas Krönauer, Eberhard Lävemann, Sarah Brückner, Andreas Hauer: Mobile Sorption Heat Storage in Industrial Waste Heat Recovery, *Energy Procedia*, 73, 272-280 (2015).
  - 17) 中曾浩一, 深井潤, 中川二彦, 伊藤香澄, 安部義男, 川上理亮, 谷野正幸, 板谷義紀, 小林信介, 丸毛謙次, 青山俊之, 増井龍也: 吸着式蒸気生成器のスケールアップ性能試験, *化学工学論文集*, 44(1), 71-77 (2018).
  - 18) Asnakech Lass-Seyoum, Mike Blicher, Dimitry Borozdenko, Thomas Friedrich, Timo Langhof: Transfer of laboratory results on closed sorption thermochemical energy storage to a large-scale technical system, *Energy Procedia*, 30, 310-320 (2012).
  - 19) 藤井祥万, 宮川大河, 中垣隆雄, 兼松祐一郎, 菊池康紀, 濱田洋輔: 製糖工場の未利用エネルギーを蓄熱する向流接触式ヒートチャージャーのベンチスケール実証試験と設計, *化学工学論文集*, 47(6), 191-199 (2021).
  - 20) Shoma Fujii, Naoyuki Horie, Ko Nakabayashi, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, Takao Nakagaki: Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill, *Applied Energy*, 238, 561-571 (2019).
  - 21) 澁澤朱音, 馬場大輔, 鎌田美志, 谷野正幸, 青木温哉, 松井一騎, 中垣隆雄, 藤井祥万, 川上理亮: 吸着材蓄熱システムのスケールアップ試験計画におけるゼオライトエコボイラの設計検討, “第29回動力・エネルギー技術シンポジウム”, D133(2025).

## ABSTRACT

To expand the flexibility of utilization of unused heat, it is necessary to develop a mobile thermal energy storage system that can resolve the spatiotemporal gap between generating unused heat and heat demand. In the previous study, the adsorption thermal storage system named “Mega Stock<sup>®</sup>”, employing a fixed bed and direct heat exchanging system to supply high temperature and low humidity air, has already been commercialized. On the other hand, the steam generator called Zeolite eco-boiler, ZeB, employing a moving bed and indirect heat exchanging system combined with zeolite steam ad/desorption cycle, has been developed to expand the applicability of thermal energy storage system to industrial sectors. The demonstration test of ZeB had been conducted on a bench scale, and a developed numerical model had been experimentally validated. In this study, 10 times scaled up experimental setup of ZeB from the bench scale, was numerically designed and constructed based on previous scaled up experiences of the commercialized adsorption system. The discrepancy between simulated and experimental results because of scale-up of the adsorption system was examined from the demonstration results, and it was suggested that ununiform velocity of zeolite affected the performance of ZeB. The heat transfer area of heat exchanger, settled in the ZeB, was designed considering the margin ratio from the values obtained by the numerical model, so that the system can be operated without losing performance when ununiform velocity of zeolite might be generated.

---

# 氷スラリーを用いた冷熱による 廃プラスチックエネルギーの高度有効利用※

谷野正幸・増田正夫・鎌田美志  
染矢聡<sup>\*1</sup>・小山寿恵<sup>\*1</sup>・折田久幸<sup>\*2</sup>  
熊野寛之<sup>\*3</sup>・森本崇志<sup>\*3</sup>

## Advanced Effective Utilization for Cold Heat of Waste Plastic Energy by using Ice Slurry

Masayuki Tanino・Masao Masuda・Haruyuki Kamata  
Satoshi Some-ya・Toshie Koyama・Hisayuki Orita  
Hiroyuki Kumano・Takashi Morimoto

我々は 2020 年度からの 5 年間、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」において、エネルギーリカバリー・チームに参画してきた。廃プラスチック焼却施設から回収した熱を高付加価値の冷熱として利用するため、低温廃熱から 0°C 以下の冷熱を発生させる氷点下吸収冷凍機や氷スラリー利用の基盤技術の研究開発を行ってきた。本稿では主に、氷点下吸収冷凍機を用いた熱駆動型氷スラリー製氷システムの製氷・蓄氷試験の結果を説明した。さらに、開発してきた熱利用システム統合評価ツールを用いた、本提案システムのケーススタディを紹介した。

### 1. はじめに

廃プラスチックを含むプラスチックの資源循環は重大な社会課題であり、陸域から流出した廃プラスチックは海洋プラスチックごみの環境問題にも繋がる。そこで、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) では、2020 年～2024 年の 5 年間、委託事業「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」<sup>1)</sup>が実施された。

この委託事業では廃プラスチックの資源価値を飛躍的に高めるため、①廃プラスチック高度選別技術 (SR: Sorting for Recycling)、②材料再生プロセス技術 (マテリアルリサイクル MR: Material Recycle)、③石油化学原料化技術 (ケミカルリサイクル CR: Chemical Recycle)、④エネルギー回収・利用技術 (エネルギーリカバリー ER: Energy Recovery) の研究開発が LCA と連携して実施され、廃プラスチックの品質に応じた最適な処理システムを構築することによって、高度資源循環と環境負荷低減との両立を目指してきた。

我々はエネルギーリカバリー・チーム (ER チーム) に参画して、各種リサイクルがなされた後の廃プラスチックが最終的に廃棄・焼却・エネルギー回収される際の、伝熱管表面改質技術<sup>2-6)</sup>と低温排熱の有効利用技術<sup>7-9)</sup>の基盤研究を行ってきた。本報では、低温排熱を有効利用する技術の 1 つとして、氷スラリーによる冷熱の統合利用システムについて紹介する。

※本論文は、2025 年度空気調和・衛生工学会大会と 2025 年度日本冷凍空調学会年次大会の講演論文を加筆修正したものである。

\*1 東京電機大学、\*2 八戸工業大学、\*3 青山学院大学

## 2. 廃棄物処理施設の排熱利用／余熱利用の現状

まず、廃棄物のエネルギーリカバリー技術の現状把握のため、**図1**のように産業廃棄物処理施設において、発電利用や熱利用を実施している施設の調査結果<sup>50)</sup>を整理した。図の横軸は処理能力（施設規模）を、縦軸は「発電利用」、「熱利用（熱のみ）」、「熱利用なし」の件数を示す。図のように、発電利用されているのは大規模施設のみである。また、中規模・小規模施設の多くは熱利用なしの施設であることが確認できた。これらの原因の1つは、とくに小規模の発電設備の効率が悪いため、発電利用や熱利用の設備の経済性の問題であろう。とくに、中規模・小規模施設においては、発電効率の向上ではなく、今までの温熱需要に加えて冷熱需要を創出することなどで排熱需要を拡大する必要がある。

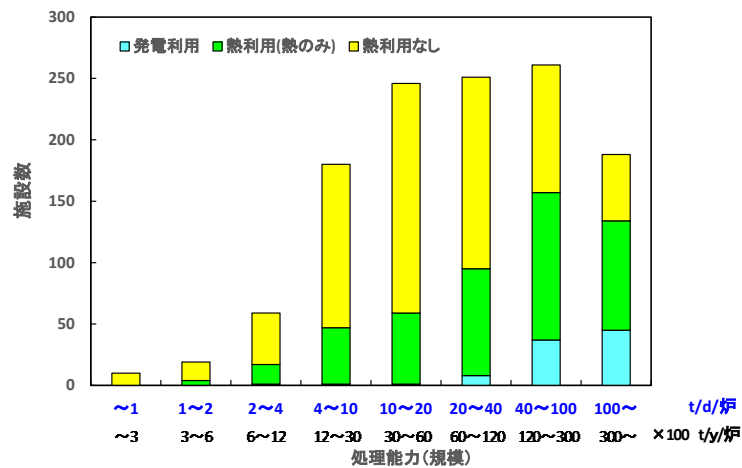


図1 産業廃棄物処理施設の排熱利用の現状

## 3. 低温排熱の有効利用の研究開発

温熱利用に加えて、物流業界・漁港などの冷熱利用によって排熱需要を拡大するために、**図2**のように未利用低温排熱から氷スラリーを製造して供給することを想定して研究開発を実施した。氷点下冷熱を発生する吸収冷凍機を開発し、熱供給によって-5℃のブラインを製造して、製氷機にて0℃以下の流動性の高い氷スラリーを製造し、冷蔵車や冷蔵庫に氷スラリーを供給する。廃棄物処理施設などの熱発生施設と吸収冷凍機や氷スラリー製氷機<sup>51-56)</sup>の両者が離れている場合には、吸着剤蓄熱などのオフライン熱輸送システム<sup>57-65)</sup>が必要になる。

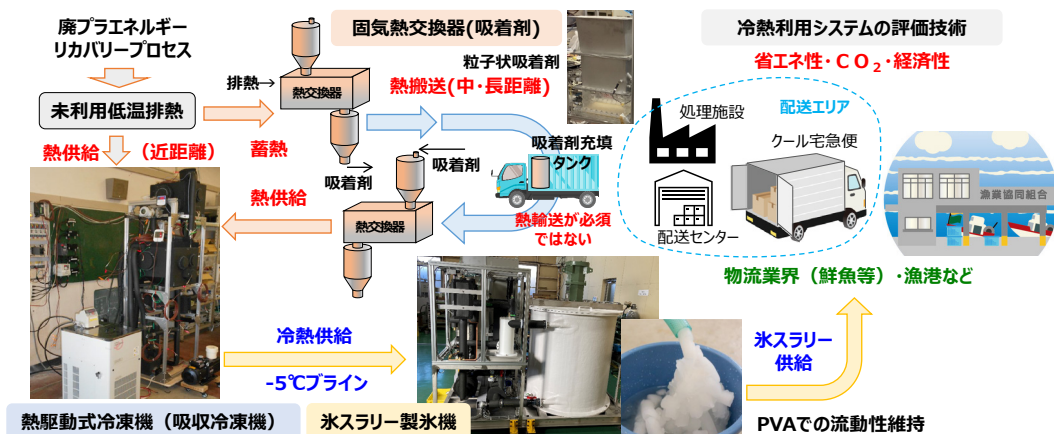
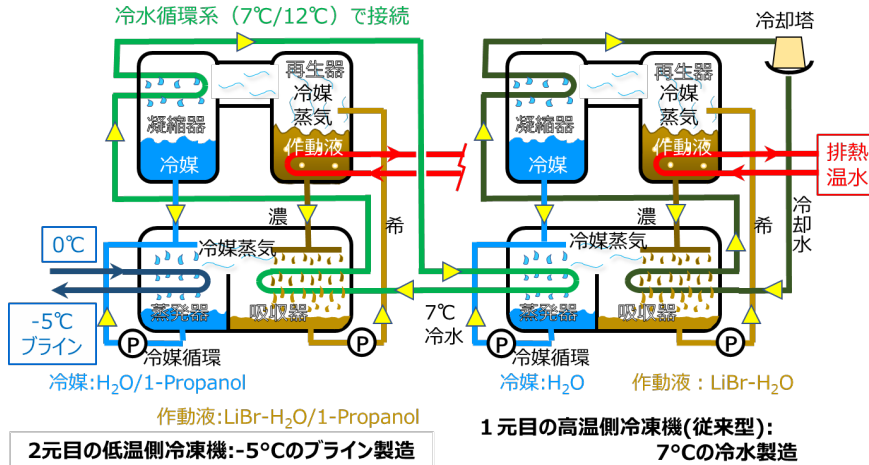


図2 低温排熱の有効利用のための冷熱利用の研究開発の概要(氷スラリーによる冷熱の統合利用システムの概要)

氷点下冷熱製造の吸収冷凍機は**図 3** のように、2 元吸収冷凍サイクルの構成で研究開発することにした。1 元目の高温側冷凍機は従来の LiBr-H<sub>2</sub>O を作動液体とし、低温側冷凍機の吸収器の冷却水を製造する。2 元目の低温側冷凍機は LiBr-H<sub>2</sub>O/1-Propanol を作動液とし、氷点下冷熱を製造する<sup>6, 9, 12-14, 21, 24, 26, 27, 31, 32</sup>。研究開発対象の低温側吸収冷凍機では、吸収器の作動液の結晶化を防止するため、通常の 32℃の冷却水ではなく 7℃程度の低温冷水が必要である。このように 1-Propanol の添加により、汎用の機器構成での氷点下冷熱の製造を可能にした。



**図 3 氷点下冷熱を発生する 2 元吸収冷凍機の模式図**

#### 4. 熱駆動型氷スラリー製氷システムの研究開発

氷点下吸収冷凍機と氷スラリー製氷機で構成される、熱駆動型氷スラリー製氷システムの試験装置を製作し、10 時間以上の製氷・蓄氷試験を実施した。

##### 4.1 試験装置と方法

**表 1** に、熱駆動型氷スラリー製氷機の試験装置の構成機器を示す。表のように 1 元目の冷凍機、2 元目の吸収冷凍機、排熱を模擬した加熱器、冷却塔、製氷機、ブライン配管などで構成されている。研究開発の対象ではない 1 元目の冷凍機は汎用の電動式冷凍機を使用し、加熱器は汎用の給湯器を使用した。また、製氷機は過冷却方式の氷スラリー製氷機である。主要機器である氷点下吸収冷凍機と氷スラリー製氷機は、**図 4** や**写真 1** の外観写真のようにブライン配管で接続されている。**図 4** のように吸収冷凍機は凝縮器/再生器、蒸発器/吸収器の高圧/低圧の容器で構成されている。また、過冷却方式の氷スラリー製氷機は貯氷タンク、予熱器、過冷却器、過冷却解除器で構成されている。研究開発の対象である吸収冷凍機の蒸発温度を下げずに氷スラリーの流動性を高めるため、ここでは 0.75wt% NaCl の低濃度塩水に 0.05 wt% の PVA (ポリビニルアルコール) を添加した製氷水を用いた<sup>7, 16-18, 30, 44</sup>。

**表 1 試験装置の構成機器**

構成機器	仕様	備考
1 1 元目 冷凍機	汎用/電動冷凍機	試験用の 1 元目の 冷凍機として使用
2 2 元目 吸収冷凍機	氷点下吸収冷凍機 冷凍能力：3~4 kW	開発対象 設計能力
3 加熱器	汎用/灯油炊き給湯器	排熱を模擬
4 冷却塔	汎用/小型冷却塔	1 元目冷凍機放熱
5 製氷機	過冷却方式 氷スラリー製造装置	製氷水は低濃度 塩水 (PVA添加)

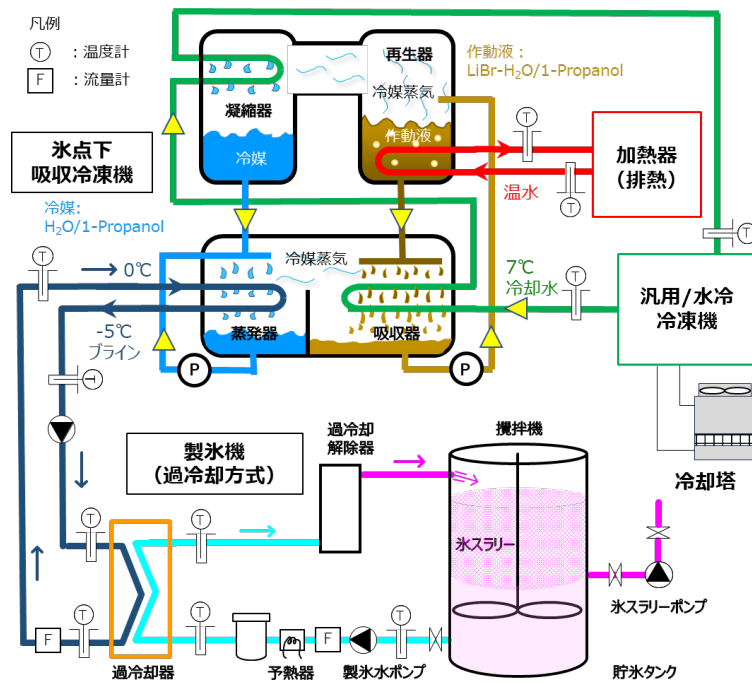


図4 熱駆動型氷スラリー製氷機の試験装置の系統図

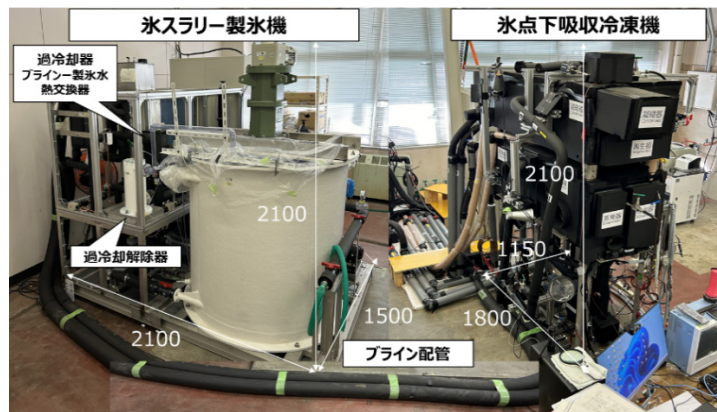


写真1 熱駆動型氷スラリー製氷機の試験装置の外観写真

#### 4.2 試験結果と考察

試験結果の1例として図5には、氷点下吸収冷凍機に送られる温水温度、冷却水温度、冷凍能力の経時変化を示す。装置起動から約0.5時間後には、上段図のように、排熱を模擬した加熱器からは約65℃の温水が氷点下吸収冷凍機に安定供給された。また、中段図のように、1元目の冷凍機からは約7℃の冷却水が氷点下吸収冷凍機に安定供給された。

図6には製氷機でのライン温度、氷スラリー中の氷の割合（製氷IPF）、貯水タンク内の氷充填率（貯氷IPF）の経時変化を示す。上段図のように装置起動から約0.5時間後には、ライン温度が低下して-5℃の定常状態に到達した。製氷機の過冷却器では過冷却状態が維持されるとともに、中段図のように、製氷IPFが約4%での約14時間の製氷運転を確認した。この製氷運転での冷凍能力は、図5の下段図のように約3.0~3.2kWであった。なお、冷凍能力や製氷IPFは、吸収冷凍機から製氷機の過冷却器に送られるラインの温度と流量から算出した。製氷開始から10時間後までは、氷点下吸収冷凍機の調整不足であったため、冷凍能力が約3.0kWと比較的、少なくなっていた。このときの過冷却度が小さいため、氷の成

長速度が遅くなって生成される氷の粒子が大きくなり、貯氷タンクへの配管での氷の閉塞が起こった。しかし、試験装置に組み込まれていた運転制御によって自動復帰して、製氷運転は継続した。

約 14 時間の製氷運転の間、貯氷タンク内に氷スラリーが蓄積され続け、**図 6** の下段図に示すように貯氷 IPF は 50wt%以上に達した。前述の**図 4** のような貯氷タンク内の攪拌により、タンク内の氷スラリーの流動性は維持されていることを観測した。また、連続製氷・蓄氷試験の終了の後、前述の**図 4** の氷スラリーポンプ（汎用ポンプ）によって貯氷タンク内の氷スラリーを取り出すことができた。このように、本研究では低濃度塩水に 0.05 wt% の PVA を添加することで、氷スラリーの流動性が維持できることを確認した。なお、この高 IPF での氷スラリーの流動特性については、別途の研究成果を参照されたい<sup>25, 33, 34, 36, 45, 47, 48</sup>。

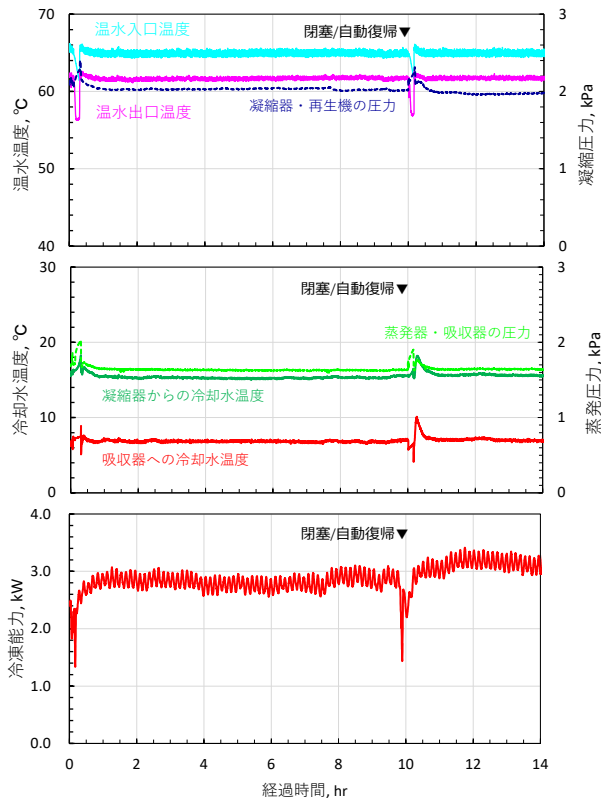


図 5 温水温度、冷却水温度、冷凍能力の経時変化

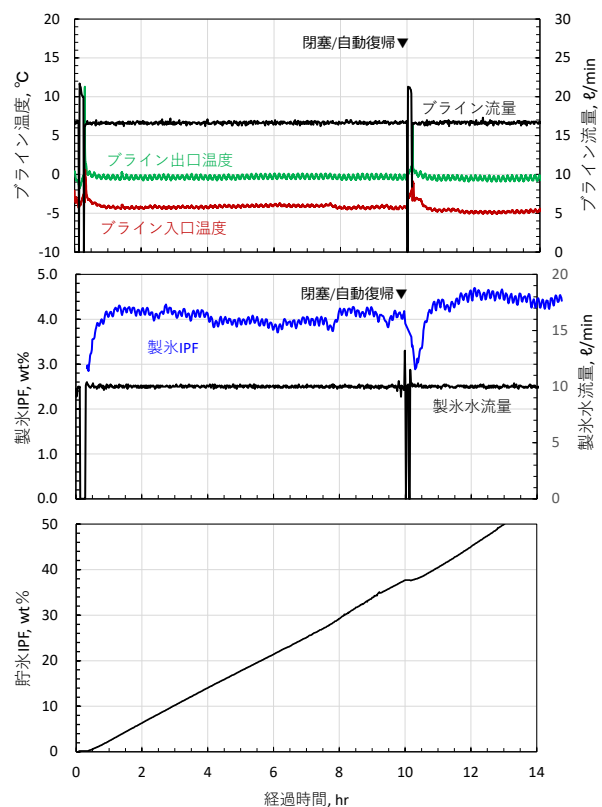


図 6 ブライン温度、製氷 IPF、貯氷 IPF の経時変化

## 5. 冷熱利用システムの評価モデルの研究開発

前述のような熱駆動型氷スラリー製氷システムの研究開発に加えて、提案システムの社会実装に向けて、その省エネ性、経済性、環境性を評価するモデルの研究開発を行うことにした。

### 5.1 評価モデルの概要

ここで研究開発してきた評価モデルは**図 7** のように、1)～8)の検討項目と Sub①～④のサブツールで構成した。1) 廃棄物処理施設（廃プラ焼却施設）と 2) 最終冷熱需要先の条件が入力条件であり、各々の熱量の最小値が熱利用システムの容量になる。つぎに、3) 乾燥吸着剤輸送の条件を想定し、4) 大型トラックの仮定、5) 熱駆動式冷凍機の設定、6) 廃プラ焼却施設・冷熱需要先の熱交換器・装置の仕様の決定、7) 冷熱需要先の月別代表日運転シミュレーションを行い、年間エネルギー消費量・運転費、CO<sub>2</sub>削減量、費用対効果等を算出して 8) システム評価を行う。なお、Sub①の 1 日間トラック輸送モデル、Sub②の吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションモデル、Sub③のイニシャルコスト試算ツール、Sub④の運転シミュレーション

評価ツールは、エクセルベースのサブツールである。ここでの氷点下吸収式冷凍機の COP は 0.3 として、比較対象の従来方式の製氷用電動冷凍機の COP は 3.0 とした。また、氷 1 トン当たり 0.5 万円を製氷の利益とし、トラック輸送人件費を含めずに評価した。

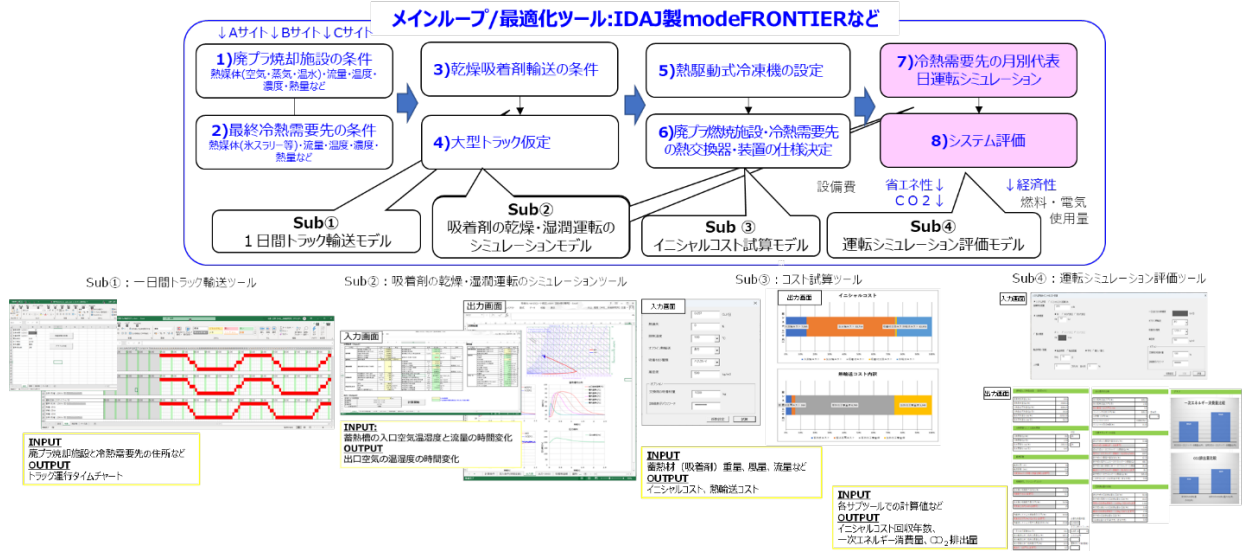


図 7 冷熱利用システムの評価モデルのフロー図

## 5.2 評価モデルの事例研究

評価モデルの完成度を高めると共に、提案システムの実証場所の探索に併せて、表 2 の 13 件の事例検討を行った。表のように大都市エリア、地方エリア、八戸湾岸などの中核都市エリアに分類・評価した。

表 2 評価事例

NO.	対象地域	モデル区分	備考
1)	東京、大阪、名古屋、福岡、北海道	大都市エリア	大都市の比較、オフライン熱輸送のスクリーニング
2)	東京/A清掃工場と某物流ベース	大都市エリア	廃熱発生と冷却需要(製氷需要)が近接
3)	東京/C清掃工場と某物流支店	大都市エリア	廃熱発生と冷却需要(製氷需要)が近接
4)	東京エコタウン	大都市エリア	広域の物流冷蔵倉庫群の冷却需要(製氷需要)に対応
5)	神戸市	大都市エリア	一般廃棄物処理場と物流冷蔵倉庫が対象
6)	北海道	大都市エリア	産業廃棄物処理場と物流冷蔵倉庫が対象
7)	三宅島、大島、八丈島	地方エリア	離島の漁港の製氷需要に対応
8)	香岐島、下関	地方エリア	製氷需要が比較的多い地域
9)	山口県/冷蔵・冷凍倉庫	地方エリア	冷凍・冷蔵倉庫の製氷需要に対応
10)	福岡県宮若市・飯塚市	地方エリア	冷蔵庫の冷却需要(製氷需要)に対応
11)	宮崎県小林市	地方エリア	物流冷蔵倉庫の冷却需要(製氷需要)に対応
12)	八戸/小売り施設	中核都市エリア	小売の製氷需要に対応
13)	八戸/漁港	中核都市エリア	漁港の製氷需要に対応

### 5.2.1 大都市エリアの評価事例

ここでは、Sub①の一日間トラック輸送ツールを検証することを目的にして、大都市エリアの物流業界を対象にしてオフライン熱輸送システムが必要な場合と不要な場合をスクリーニングすることを試みた。図 8 のように(1)のオフライン熱輸送システムを必要とする場合は、配送エリア外に廃プラスチックを焼却する処理施設があり、オフライン熱輸送を必要とする。これに比較して(2)のオフライン熱輸送システムが不要な場合では配送エリア内に処理施設があり、配送トラックが配送センターに戻る前に処理施設に設置さ

れた氷スラリー製氷機に立ち寄って、輸送トラックの冷蔵庫に氷スラリーを供給することが可能になると考えた。

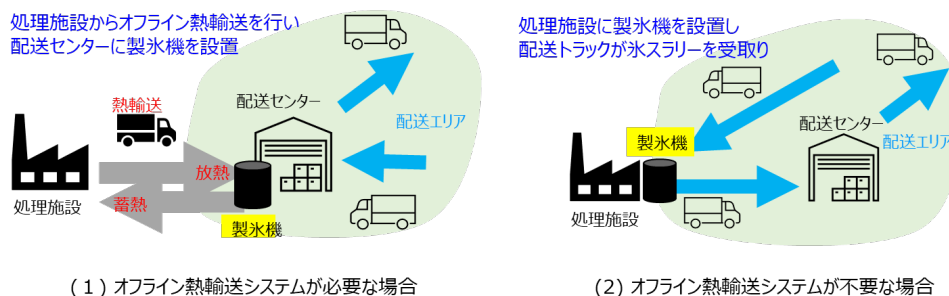


図 8 オフライン熱輸送のスクリーニング

廃プラスチックの焼却設備としては(a)産業廃棄物処理施設と(b)一般廃棄物処理施設の2種類について、(1)東京都、(2)大阪府、(3)愛知県、(4)福岡県、(5)北海道の5地域において、複数の配送センターとの間の移動時間を Sub①を用いて取得した。表 3 には処理施設と配送センターの件数を、(1)東京都、(2)大阪府、(3)愛知県、(4)福岡県、(5)北海道の地域について纏めて示す。処理施設と配送センターの件数の積が移動時間の評価計算数であり、移動時間の最小値・最大値・平均値を表 3 に示す。

この最小値より、産業廃棄物処理施設と一般廃棄物処理施設とも、また何れの地域でも、概ね1~2分以内の移動時間に配送センターがある場合があることがわかった。各地域において近年、郊外の自動車道のインターチェンジの近くに建設されてきた配送センターが元々、郊外に設置されてきた廃棄物処理・焼却設備に隣接しているものと考えられる<sup>19)</sup>。

表 3 大都市エリアの移動時間の評価結果(Sub①1日間トラック輸送モデルによる計算条件と結果)

(a) 産業廃棄物処理施設					(b) 一般廃棄物処理施設								
	産業廃棄物 処理施設数	配送センター	計算数 N	移動時間(min)				一般廃棄物 処理施設数	配送センター	計算数 N	移動時間(min)		
				最小値	最大値	平均					最小値	最大値	平均
東京都	222	71	15,762	0.03	88.3	40.3	東京都	41	71	2,911	0.73	86.2	43.2
大阪府	229	72	16,488	1.17	83.8	32.7	大阪府	43	72	3,096	0.42	99.0	35.9
愛知県	473	52	24,596	0.83	132.6	46.6	愛知県	43	52	2,236	2.43	133.9	52.0
福岡県	425	41	17,425	0.47	160.0	56.6	福岡県	23	41	943	2.15	143.9	60.2
北海道	621	59	36,639	0.07	695.2	183.9	北海道	64	59	3,776	0.12	690.7	214.4
	合計		110,910					合計		12,962			

以上のようなスクリーニング評価の結果から、東京都のような大都市エリアでは、冷熱需要の配送センターと排熱発生処理施設が隣接するケースが多く存在することが確認できた。

そこで、東京都の某清掃工場と隣接する配送センターの実例を評価対象として、熱の需要と供給が隣接するケースでは配管接続ができる場合もあるので、ここでは配送トラックで氷スラリー熱輸送する「Case①」、需要側と供給側を配管接続して熱搬送する「Case②」、吸着材でオフライン熱輸送する「Case③」の3種類のケースで評価した<sup>37)</sup>。

図 9 のようにイニシャルコスト回収年数は Case①で 10 年、Case②で 12 年、Case③で 22 年であった。また、図 10 のように一次エネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量は Case①と Case②で 30%、Case③で 66%であり、従来方式よりも有利になった。このように熱の需要と供給が隣接するケースでは、従来方式に比べて一次エネルギー消費量・CO<sub>2</sub> 排出量を 30%まで低減できることが、提案システムの大きな魅力であると確認できた。

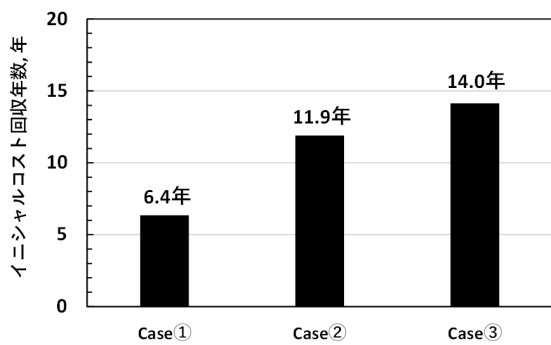


図9 回収年数

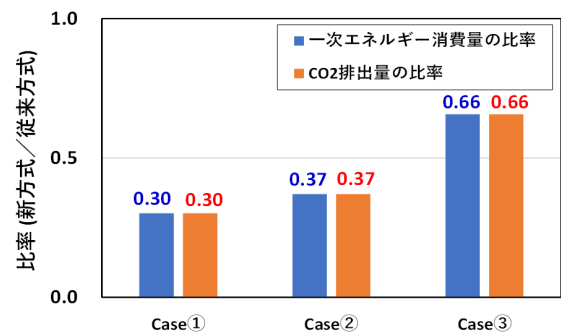


図10 エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量

### 5.2.2 地方エリアでの評価事例

伊豆諸島にある伊豆大島（東京都大島町）、三宅島（東京都三宅村）、八丈島（東京都八丈町）の3島を対象に、離島エリアについてイニシャルコスト回収年数、一次エネルギー消費量・CO<sub>2</sub>排出量という観点で評価し、八丈島が最も適したエリアであるとの評価結果が得られた<sup>20)</sup>。これは排熱発生側と冷熱需要側の距離が比較的近いという離島エリア独自の特性に加えて、八丈島が他の島よりも比較的冷熱需要が大きいという特性のためである。したがって八丈島のように、熱融通エリアが比較的コンパクトで、かつ冷熱需要（製氷需要）の大きいエリアでは、提案システム適合性は高くなる可能性がある。

そこで、地方エリアでの冷熱需要の比較的大きな地域として、山口県の2つの冷蔵・冷凍倉庫、「A倉庫」と「B倉庫」を対象に評価した<sup>37)</sup>。排熱の調達場所は最寄りの廃棄物処理場とした。図11のようにイニシャルコスト回収年数は「熱輸送なし」で6～7年、「熱輸送あり」で13～15年であった。また、図12のように、一次エネルギー消費量・CO<sub>2</sub>排出量は「熱輸送なし」で従来方式に比べて41～44%、「熱輸送あり」で71～74%であった。このように冷熱需要の比較的大きな地域では熱輸送の有無にかかわらず、従来方式よりも有利になった。

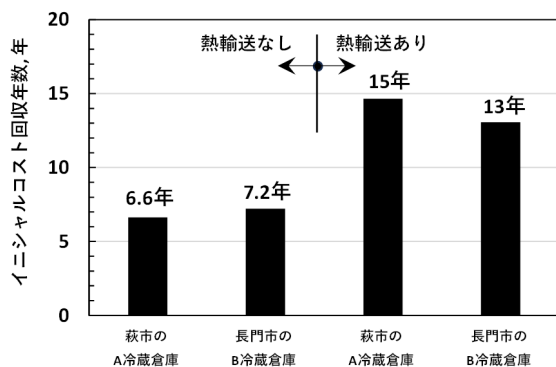


図11 回収年数

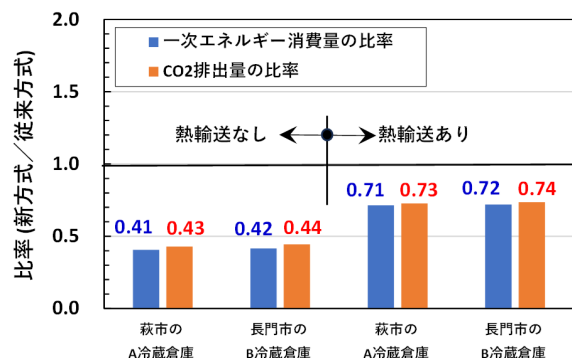


図12 エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量

### 5.2.3 中核都市エリアの評価事例

八戸市は青森県内で第1次・第2次産業の総生産が第2位の市町村であり、農業・水産業・製造業がバランス良く盛んであり、排熱発生量と潜在的熱需要の両方が見込める中核都市である。八戸湾岸エリアには排熱供給が可能なリサイクル工場エリアと、漁港などの氷スラリー消費エリアが隣接している。そこで八戸市内で最も氷需要が大きいと予想される八戸港を氷需要先として評価した。排熱発生施設からは7kmの距離に位置する。

八戸港での年間の魚種別水揚げ量の推移を図13に示す。図のように、八戸港で水揚げされる主要な魚種

はイカ、サバ、イワシであるが、近年イカ・サバが不漁傾向であり、2022年のサバ水揚げ量は2018年の1/20と激減している。2022年の水揚げ量は2.9万トン（全国14位）、水揚げ金額は100億円（全国15位）であった。八戸港での氷の需要量として、2022年の月別製氷販売実績を図14に示す。漁船用は出漁する漁船に積載するもので、その氷需要は魚種や漁獲量に左右される。7～12月はサバ漁の期間であり氷需要が大きくなる。図のように、出荷用は水揚げ時や出荷時に保冷用に使用されるものであり、年間を通して安定した需要がある<sup>38)</sup>。

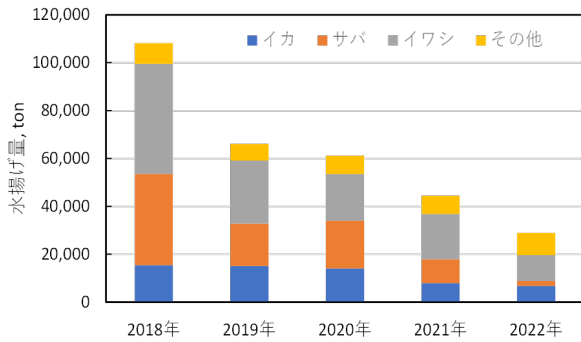


図13 年間の魚種別水揚げ量の推移

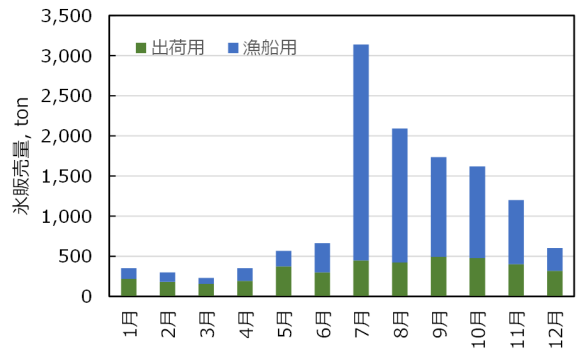


図14 月別製氷販売実績(2022年)

このような氷需要に対して、製氷機の容量は「Case①」の101 USRt、「Case②」の16 USRt、「Case③」の20 USRtの3種類のケースで評価した。Case①は需要量全量（漁船用＋出荷用）、Case②は出荷用全量の製氷を供給できる製氷機の容量である。また、Case③は年間を通して出荷用を賄い、月によっては漁船用にも供給する想定である。Case①では7月のピーク需要に合わせた製氷機の容量となる。なお、いずれのケースにおいても1～6月では過剰な製氷能力となるが、需要を超えた製氷はしない。

評価結果を図15と図16に示す。図15のように投資回収年数を熱輸送なしで比較した場合、Case③のケースが最も良い結果となった。Case①では製氷容量が過剰であり、Case②ではCase③よりも製氷能力が小さく相対的に機器コストが割高となったためである。「熱輸送あり」の場合も、相対的には「熱輸送なし」の場合と同様である。月別氷需要の変動に対応するためには、過剰な製氷能力に設定せず、可能な限り安定的な氷需要に対応できる適切な製氷能力を設定する必要があることがわかった。図16のように一次エネルギー消費量・CO<sub>2</sub>排出量の評価結果では、いずれのケースにおいても60%以上削減された。この大幅な削減量の可能性は、本システムの大きな魅力の一つと考える。

近年、サバの不漁に伴って氷需要が減少しており、今後漁獲量に戻った際にはさらなる氷需要の増加が見込め、八戸市はまさに排熱量と氷需要量が共存する都市と考えられる。

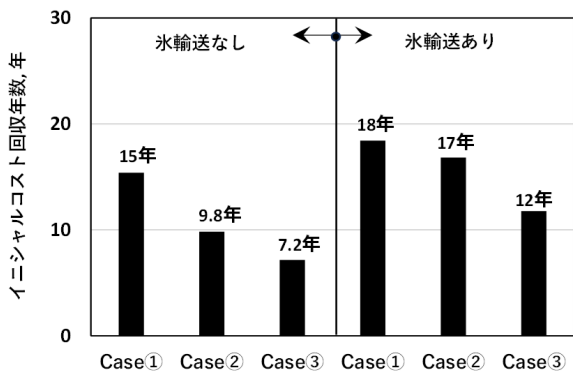


図15 回収年数

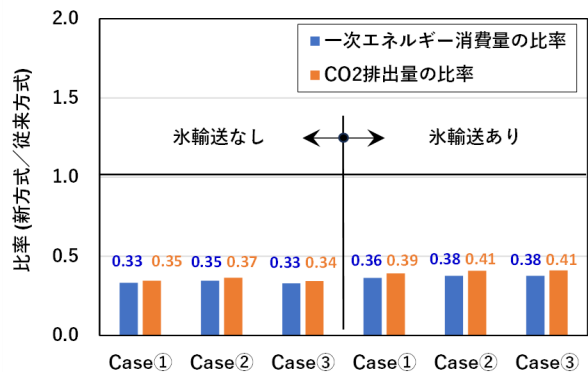


図16 エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量

## 6. おわりに

以上のように、2020年～2024年の5年間に渡ってNEDO委託事業のERチームで取り組んできた排熱の冷熱利用の研究開発の概要を紹介し、冷熱利用システムの評価モデルの研究開発の概要と事例研究を説明した。今までの温熱需要に加えて、漁港や物流業界などの冷熱需要により、廃プラスチックの焼却時の排熱利用を拡大できる。

2050年のカーボンニュートラルに向けて、電化・水素化とともに省エネルギーが重要であり、排熱利用の拡大はCO<sub>2</sub>排出量の削減に直接的に寄与できる。今後、廃プラスチックの焼却熱とともに、各種の未利用熱・排熱が有効活用されるよう、本技術の実証・実用化を進めたい。

## 謝辞

この成果は、2020～2024年度の国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」（JPNP20012）の結果、得られたものである。ここで、関係の皆様に感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）HP：  
[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100179.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100179.html)（最終アクセス日：2026.1.8）
- 2) 長沼宏，成瀬一郎，堀田幹則，幡野博之，野田英彦，稲田孝明，谷野正幸：廃棄プラスチックスエネルギーの高度有効利用，- I - 高温排熱の有効利用，化学装置，1月号，工業通信，43（2022）。
- 3) 成瀬一郎：高効率排熱回収技術の開発～伝熱管表面改質・回収熱量増大・長寿命化～，NPO 法人循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」，八戸プラザホテル，（2022）。
- 4) 堀田幹則：高効率エネルギー回収・利用システム開発 ～リサイクル困難な廃プラスチックからの高効率なエネルギー回収と冷熱利用～，第37回新産業技術促進検討会シンポジウム「NEDO『革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発』プロジェクト進捗報告会～プラスチック資源循環を実現する技術とは～」，（2022）。
- 5) 森岳人，長沼宏，堀田幹則，成瀬一郎：廃棄プラスチックエネルギーの高度有効利用 第1報：伝熱管の表面改質技術，化学工学会第89年会，E213（2024.3）。
- 6) 成瀬一郎，堀田幹則，長沼宏，小林佳弘，熊野寛之，折田久幸，幡野博之，谷野正幸：高効率エネルギー回収・利用システム開発 ～リサイクル困難な廃プラスチックからの高効率なエネルギー回収と冷熱利用～，モノづくり日本会議、NEDO／第56回新産業技術促進検討会シンポジウム「NEDO『革新的プラスチック資源循環 プロセス技術開発』プロジェクト報告会，（2025.6）。
- 7) 小山寿恵，稲田孝明：III型不凍タンパク質の低濃度水溶液中で成長する氷結晶ベール面上のピット形成過程の観察，日本冷凍空調学会論文集，33（3），251（2016）。
- 8) 小田島聡，野田英彦，高橋晋：アルコール水溶液冷媒による氷点下冷熱製造の可能性，化学工学会秋季大会講演要旨，DA103（2017）。
- 9) 磯嶋将，野田英彦，正野孝幸：氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用動作流体 LiBr- H<sub>2</sub>O-1-propanol の結晶化温度，2020年度日本冷凍空調学会年次大会要旨集，E213（2020）。
- 10) 木村拓雅，幡野博之，野田英彦，稲田孝明，谷野正幸，長沼宏，堀田幹則，成瀬一郎：廃棄プラスチックスエネルギーの高度有効利用，- II - 低温排熱の有効利用，化学装置，1月号，工業通信，48（2022）。
- 11) 谷野正幸：排熱の高効率利用技術～工場排熱を利用する氷蓄熱技術～，NPO 法人 循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」，八戸プラザホテル，（2022）。
- 12) 正野孝幸，野田英彦，磯嶋将，片山正敏，折田久幸：氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用新作動液の飽和特性，2022年度日本冷凍空調学会年次学会（岡山），E321（2022）。
- 13) 磯嶋将，野田英彦，折田久幸，片山正敏，正野孝幸：氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用動作流体 LiBr-H<sub>2</sub>O/1-

- Propanol の蒸発特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会 (岡山), E321 (2022) .
- 14) 折田久幸：氷点下冷熱を生成する吸収冷凍機の研究歴史から学ぶカーボンニュートラルへのアプローチ, 第 60 回伝熱シンポジウム, 2023.5.
  - 15) 谷野正幸, 増田正夫, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 小林佳弘, 幡野博之, 村瀬和典：廃プラスチックエネルギーの冷熱による高度有効利用, 空気調和・衛生工学会大会, I-45 (2023.9).
  - 16) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 谷野正幸, 折田久幸, 野田英彦, 幡野博之：廃プラスチックエネルギーからの冷熱を用いる氷スラリー製造, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B232 (2023).
  - 17) 請川颯一, 小山寿恵, 小林佳弘, 谷野正幸, 稲田孝明：氷スラリー製氷機で製造した氷スラリーへの PVA 添加による氷粒子の成長抑制効果, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B233 (2023).
  - 18) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 熊野寛之, 森本崇志, 谷野正幸：氷スラリー中での氷粒凝集状態の評価方法の提案, 第 12 回潜熱工学シンポジウム, G09 (2023.11).
  - 19) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志；廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発～第 1 報 オフライン熱輸送の大都市エリアでの評価事例～, 第 40 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 18-3 (2024.1).
  - 20) 増田正夫, 谷野正幸, 鎌田美志；廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発～第 2 報 離島エリアでの評価事例, 第 40 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 18-4 (2024.1) .
  - 21) 折田久幸：南部地方のカーボンニュートラルに関する研究, 青森県新産業創造課主催研究シーズプレゼン会, (2024.2).
  - 22) 鎌田美志, 増田正夫, 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 幡野博之, 熊野寛之；廃プラスチックエネルギーの高度有効利用 第 2 報：排熱の冷熱利用技術, 化学工学会第 89 年会, E214 (2024.3) .
  - 23) 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵：氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機を用いた熱駆動型氷スラリー製氷機の研究開発, 日本冷凍空調学会誌 4 月号, 123 (2024).
  - 24) 折田久幸, 野田英彦, 馬淵勝美：アルコール水溶液冷媒を用いた氷点下冷熱発生技術, 日本冷凍空調学会誌 4 月号, 136 (2024).
  - 25) Yuta Komiya, Ryo Sakamoto, Takashi Morimoto, Hiroyuki Kumano, Toshie Koyama, Yoshihiro Kobayashi, Masayuki Tanino: Effect of pipe shape on flow characteristics of ice slurry with dilute agglomeration inhibitor, The 11th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, (2024,4).
  - 26) NEDO ニュースリリース “温水を使用した氷スラリー製造の連続化に成功 —未利用熱を活用し、高い熱利用効率を実現—”, : [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101748.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101748.html) (最終アクセス日：2026.1.8).
  - 27) 折田久幸：八戸工業大学のカーボンニュートラル教育, 化学工学会東北支部ニュースレター, (2024.7).
  - 28) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 折田久幸, 小山寿恵, 熊野寛之：廃プラスチックエネルギーの氷スラリーによる冷熱での高度有効利用, 令和 6 年度 空気調和・衛生工学会大会, F-10 (2024.9).
  - 29) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 折田久幸, 小山寿恵, 熊野寛之： 廃プラスチックエネルギーの高度有効冷熱利用 第 1 報：熱駆動型氷スラリー製氷機の開発, 2024 年度日本冷凍空調学会年次大会, E211 (2024.9).
  - 30) 小山寿恵, 染矢聡, 小林佳弘, 谷野正幸, 折田久幸, 森本崇志, 熊野寛之：廃プラスチックエネルギーの高度有効冷熱利用 第 2 報：氷スラリー中の氷粒子の凝集に対してポリビニルアルコールが与える影響, 2024 年度 日本冷凍空調学会 年次大会, E212 (2024.9).
  - 31) 千葉祐聖, 正野孝幸, 佐藤恵, 折田久幸：3kW 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機実験, 化学工学会第 55 回秋季大会, (2024.9).
  - 32) 佐藤恵, 正野孝幸, 千葉祐聖, 折田久幸：氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機の冷媒循環挙動の検討, 化学工学会第 55 回秋季大会, (2024.9).
  - 33) 石垣匠, 小宮佑太, 森本崇志, 小山寿恵, 谷野正幸, 熊野寛之：氷粒子の速度分布に基づくアイススラリーの流動様相の分類, 水蒸気性質シンポジウム —日本の GX と水素・アンモニア利用技術 の最前線—, (2024.10).
  - 34) 渡辺拓登正, 森本崇志, 小山寿恵, 谷野正幸, 熊野寛之：アイススラリー中における氷粒子の凝集力評価, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2024, (2024.10).

- 35) 折田久幸, 小山寿恵, 谷野正幸, 小山俊隆: 低温排熱の温水から氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機と氷スラリー製氷機により構成される熱リサイクルパッケージ, クリーンエネルギー, 日本工業出版, 55 (2024.11).
- 36) Yuta Komiya, Takumi Ishigaki, Takashi Morimoto, Toshie Koyama, Masayuki Tanino, Hiroyuki Kumano: Effect of Solute Concentration and Pipe Geometry on Flow Characteristics of Ice Slurry, The 3rd Pacific Rim Thermal Engineering Conference, (2024.12).
- 37) 増田正夫, 谷野正幸, 鎌田美志; 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発～第3報 地方都市エリア等での評価事例, 第41回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2025.1).
- 38) 鎌田美志, 増田正夫, 谷野正幸, 折田久幸, 小山寿恵: 廃棄プラスチックエネルギーの高度有効利用ー排熱による製氷技術の漁港への適用検討ー, 化学工学会第90年会, K308 (2025.3).
- 39) 渡辺拓登, 森本崇志, 熊野寛之, 小山寿恵, 谷野正幸: アイススラリー中の氷粒子の凝集力評価, 第62回日本伝熱シンポジウム (2025.5).
- 40) 石垣匠, 小宮佑太, 森本崇志, 熊野寛之, 小山寿恵, 谷野正幸: 水平円管内を流れるアイススラリーの流動様相と圧力損失, 第62回日本伝熱シンポジウム (2025.5).
- 41) 折田久幸, 谷野正幸, 小山寿恵: 書籍“熱、排熱利用に向けた材料・熱変換技術の開発と活用事例”, 第6章 産業排熱活用に向けた工場・生産設備での蓄熱、熱利用技術の応用事例, 第9節 未利用熱を活用できる温水を使用した氷スラリー製造の連続化技術の開発, 「未利用熱を活用できる温水を使用した氷スラリー製造の連続化技術の開発」, 技術情報協会発行, 2025年5月30日.
- 42) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 小山寿恵, 染矢聡, 折田久幸, 熊野寛之, 森本崇志: 廃プラスチックエネルギーの氷スラリーによる冷熱での高度有効利用, 空気調和・衛生工学会講演論文集, I-5 (2025.9).
- 43) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 小山寿恵, 染矢聡, 折田久幸, 熊野寛之, 森本崇志: 廃プラスチックエネルギーの高度有効冷熱利用 第3報: 氷スラリーの冷熱利用による排熱需要の拡大, 2025年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, E211 (2025.9).
- 44) 小山寿恵, 染矢聡, 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 折田久幸, 熊野寛之, 森本崇志: 廃プラスチックエネルギーの高度有効冷熱利用 第4報: 氷スラリー高度化研究に基づく熱リサイクルパッケージの実験的評価, 2025年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, E212 (2025.9).
- 45) 根倉悠, 小宮佑太, 森本崇志, 小山寿恵, 谷野正幸, 熊野寛之: 2025年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, E213 (2025.9).
- 46) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 小山寿恵, 染矢聡, 折田久幸: 廃プラ燃焼排熱の冷熱利用のための熱駆動型氷スラリー製氷機の開発, 化学工学会 吹田大会 (2025.11).
- 47) 渡辺拓登, 森本崇志, 小山寿恵, 谷野正幸, 熊野寛之: アイススラリー中の氷粒子の凝集力評価, 日本冷凍空調学会論文集, 42 (4), 1 (2025.12).
- 48) Takashi Morimoto, Yuta Komiya, Takumi Ishigaki, Toshie Koyama, Masayuki Tanino, Hiroyuki Kumano: Experimental investigation of the effects of solute concentration on flow patterns and rheological properties of ice slurry, International Journal of Refrigeration, 181, 23(2026).
- 49) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 小山寿恵, 染矢聡, 折田久幸: 氷スラリーによる冷熱での廃プラスチックの排熱エネルギーの高度有効利用, 日本化学会第106春季年会 (2026.3).
- 50) 産業廃棄物処理施設状況調査報告書, 平成30年, 環境省.
- 51) 三戸大介, 小澤由行, 谷野正幸, 稲田孝明: 水の過冷却解除に関する能動制御技術の開発, 日本冷凍空調学会論文集, 17 (2), 191 (2000).
- 52) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二: 氷スラリーによるチルド水供給設備に関する研究～蓄氷解氷同時運転での滴蓄制御と給水制御～, 日本冷凍空調学会論文集, 30 (3), 319 (2013).
- 53) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二: 乳製品加工工場における氷スラリーによるチルド水供給設備, 日本冷凍空調学会論文集, 30 (3), 331 (2013).
- 54) 万尾達徳: 過冷却解除方式製氷技術による水産業へのビジネス展開, 建築とエネルギー, 61 (2020).
- 55) 江崎功浩: 過冷却解除型製氷技術による水産向けシャーベットアイス製氷設備, 月刊 BE 建築設備 6月号, (2019).

- 56) 見上皓紀：シャーベットアイスを利用した水産物の高鮮度保持, 空気調和・衛生工学会誌, 92 (5), 31 (2018).
- 57) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 鈴木正哉, 松永克也, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 1 報—小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, 45 (281), 9 (2020).
- 58) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 2 報—低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着時の発熱量について, 空気調和・衛生工学会論文集, 45 (285), 1 (2020).
- 59) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 3 報—吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 46 (290), 39 (2021).
- 60) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 4 報—一定型蓄熱システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 46 (297), 31 (2021).
- 61) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 5 報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47 (301), 9 (2022).
- 62) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 6 報—塗装工程での除湿利用の実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47 (308), 11 (2022).
- 63) 谷野正幸, 大山孝政, 鎌田美志, 川上理亮：吸着材蓄熱システム“メガストック®”の実証・実用化, 第 14 回潜熱工学シンポジウム, (2025.11).
- 64) 谷野正幸, 大山孝政, 鎌田美志, 川上理亮：吸着材蓄熱システム「メガストック®」の紹介, 日本化学会コロイドおよび界面化学部会, (2025.12).
- 65) 谷野正幸, 大山孝政, 鎌田美志, 川上理亮：吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの紹介, 建設設備と配管工事 12 月号 (2025.12).

## ABSTRACT

We have participated in the Energy Recovery Team for the five-year period starting in fiscal year 2020, as part of the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) project "Development of Innovative Plastic Resource Recycling Process Technology". For utilizing the heat recovered from waste plastic incineration facilities as high value-added cold heat, we have studied and developed basic technologies for sub-zero absorption refrigeration systems that generate cooling energy below 0°C from low-temperature waste heat, and for ice slurry utilization. Mainly, the results of ice production and storage tests conducted using a thermally driven ice slurry ice-making system employing a sub-zero absorption chiller were described in this paper. Furthermore, a case study of the proposed system was introduced using a developed integrated evaluation tool for thermal utilization systems.



# 小型自律分散型環境センサーを用いた実測と CFD 解析 による「きぼう」内キャビンの流れ場分析※

柴田克彦・齋藤雅浩・永野秀明\*<sup>1</sup>  
阿部麻紀\*<sup>2</sup>・友部俊之\*<sup>2</sup>・木村真一\*<sup>3</sup>

## Analysis of the Air Flow inside the 'KIBO' using Measurement and CFD Analysis

Katsuhiko Shibata・Masahiro Saito・Hideaki Nagano  
Maki Abe・Toshiyuki Tomobe・Shinichi Kimura

我々は国際宇宙ステーション内の「きぼう」の室内環境を簡便に予測する環境評価モデルの構築に取り組んでいる。これまで、既往の文献等からキャビン形状や地上での実験データを参照しながら簡易 CFD モデルを構築してきた。本報では、小型自律分散型環境センサーによる軌道上実証データと CFD 解析のフィッティングを行い、代表断面における CO<sub>2</sub> 濃度の妥当性を検証した上で、キャビンの流れ場を推定した。

### 1. はじめに

国際宇宙探査協働グループ ISECG が定めた、国際協働による有人宇宙探査に関する国際宇宙探査ロードマップでは、2040 年代に数 10 人規模の月面上の活動を想定している<sup>1)</sup>。活動は、官需のみならず観光等の民需もあり、従来の生命維持に加え QOL (Quality of Life) 向上も満足する環境制御システム ECLSS への要求が高まると考える。

このような背景のもと、筆者らは現在稼働中の国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟 JEM、通称「きぼう」の室内環境の実態を予測するために、環境評価モデルの構築に取り組んでいる。これまでは、既往の文献等を参考に CFD 解析による温熱・空気質環境の予測モデルを構築してきた<sup>2)3)</sup>。本報では、小型自律分散型環境センサーの実測値を元にモデルを改良し、キャビン内の流れ場を推定したので報告する。

### 2. キャビン内環境の実測

#### 2.1 小型自律分散型環境センサー

キャビン内の温熱・空気質環境測定には、**写真 1** に示す小型自律分散型環境センサー（以降、TEM と呼ぶ）を用いた<sup>4)</sup>。TEM は、温湿度に加え CO<sub>2</sub> 濃度や 5 種類のニオイ成分など空気質の測定が可能である。主な仕様を**表 1** に示す。2025 年 4 月に ISS に向けて打ち上げ、その後「きぼう」キャビン内にて軌道上の環境を測定した<sup>5)</sup>。

---

※ 本論文は、2025 年度宇宙科学技術連合講演会論文<sup>9)</sup>を加筆修正したものである。

\*1 東京都市大学 理工学部 機械システム工学科、\*2 有人宇宙システム株式会社 宇宙システム開発ユニット、\*3 東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科



©東京理科大学 スペースシステム創造研究センター

写真1 小型自律分散型環境センサー(TEM)の外観

表1 小型自律分散型環境センサー(TEM)の仕様

外形寸法	本体 85mm×55mm×35mm
温度	0～65°C、精度±0.5°C
湿度	0～100%、精度±3%
CO <sub>2</sub> 濃度	非分散型赤外線式
ニオイ	標準選定5種類のニオイ
9軸	加速度・角速度・磁方位
画像	カメラモジュール

## 2.2 環境測定

今回は2台のTEMで測定を行った。1台はISS本体から「きぼう」に給気されるIMV (Inter-Module Ventilation)システムへの流出口近傍での定点測定、もう1台はクルーが船内に順次移設する多点測定である。

データのサンプリング周期は10秒で、センサー本体のSDカードに保存するとともに、無線にて準リアルタイムに地上で観測した。

図1に、キャビン断面でのセンサー設置位置と測定時のクルーの待機位置を概念的に示す。クルーは、センサー設置後センサー横のキャビン中央に移動し、データ収集の5分間程度静穏状態にて待機していた。

図2に、代表断面(実験ラック3列目)の天井(O)、床(D)、Aft(A)側実験ラック前とForward(F)側実験ラック前での測定結果を示す。値は、センサーを設置して測定値が安定した後の60秒間平均である。図より、O面、A面の濃度が多少高く、IMVシステムの流入口から流出口に向けて濃度勾配が見られる。

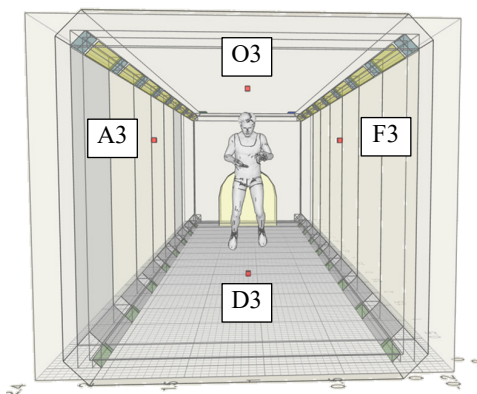


図1 センサーの設置位置とクルーの待機位置

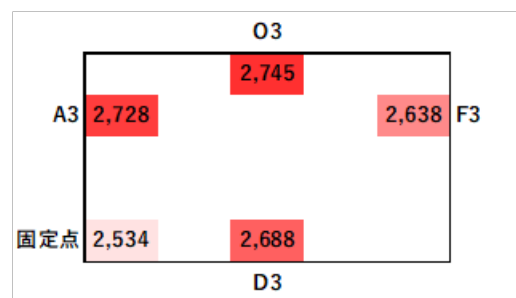


図2 代表断面のCO<sub>2</sub>濃度(ppm)

### 3. CFD 解析モデル

#### 3.1 既存モデルでの知見

XYZ 方向の重力加速度がゼロ（無重力）以外、地上と同じ条件で解析した既存モデルからは、これまでに次の知見を得ている。

- ・自然対流が生じないため、発熱や汚染物質の発生は強制対流と拡散に依存している
- ・クルーの位置による換気効率（SVE3：空気齢）への影響はほぼ無視できる
- ・キャビン内の壁面上部に設置されている温湿度調整のための循環系統吹出し口の羽根角度は SVE3 に影響を及ぼす

以上から、キャビン内の流れ場が環境制御に重要な影響を及ぼすことを認識した。なお、流れ場に寄与する境界条件としては、上記知見に加え IMV 系統の「吹出し噴流の風向」、「吹出し噴流の風速」、「流入量と流出量の風量収支」がある。これらの境界条件を加味しながら、今回の CO<sub>2</sub> 濃度測定結果から、解析モデルの改良点を検討した。

#### 3.2 実測値から推定するモデル改良のポイント

##### (1) IMV 系統流出口近傍 CO<sub>2</sub> 濃度の低減

図 2 に示したキャビン内代表断面の CO<sub>2</sub> 濃度に比べ、固定点の IMV 系統流出口近傍の濃度が低い。この要因として、隣接するノード 2 からの自然流入による希釈が考えられる。具体的には、IMV 系統の風量収支が、流入量より流出量が多いため、自然流入の流れ場が流出口近傍のセンサー周りで生じ、濃度が低下したと推定するのが妥当である。

##### (2) クルーの呼気と CO<sub>2</sub> 濃度

静穏状態にある人体の呼気の CO<sub>2</sub> 濃度は約 4% である。一方、今回の測定結果は数 1,000 ppm のオーダーであり、呼気に比べ桁低い。これは、呼気への誘引空気によって CO<sub>2</sub> が速やかに希釈されたと推定できる。ただし、呼気の CO<sub>2</sub> 濃度の分布に関する既往の研究が見当たらないため、今回の解析モデルでは、CO<sub>2</sub> 発生ノードの 0.9 m 四方（呼気の風速約 0.6 m/s、呼吸サイクルで安定した呼気の時間 1.5 秒<sup>6)</sup> から算出した呼気到達範囲）を評価の対象外とした。

##### (3) CO<sub>2</sub> 濃度の均一化

キャビン内の CO<sub>2</sub> 濃度分布が小さいことから、キャビン内循環系統による CO<sub>2</sub> の拡散および IMV 系統の換気による希釈が作用している。また、ISS の環境基準では壁面から 0.15 m 内側の風速が 0.035～1.02 m/s の範囲と規定されていることから、IMV 系統流入口からの噴流は、到達距離を延ばしてキャビン内を攪拌させるよりは、循環系統の流れ場と混合し、キャビン内を希釈させると考えた方が合理的である。

##### (4) 代表断面での濃度勾配

キャビン断面の温度勾配から、実験ラック 3 列目断面では、A 側、O 面への緩やかな流れ場が形成されている。

#### 3.3 CFD 解析モデルの改良

前節で示したポイントと「きぼう」の空調システムに関連する資料の見直しから、CFD 解析モデルについて次の改良を加えた。

##### Step1：循環系統吹出し口の羽根角度

実測時にクルーが撮影した循環系統吹出し口の写真から、羽根角度を観察し、実態に合わせて調整した。調整後の羽根角度を図 3 に示す。実態では、羽根が比較的正面を向き、キャビン奥ではエアロック方向を向いていた。

##### Step2：IMV の流入量、流出量の風量収支

流入経路、流出経路の各々に送風機が設置されていることから、両者の風量は必ずしも同量ではない。そこで、ノード 2 からの自然流入を 0.1 m/s とし、流入量と流出量の風量収支を取った。風量の妥当性については、濃度分布の再現性から検証した。

**Step3 : IMV 系統流入口の気流性状**

ダクトの収まりが厳しい中で送風機を設置しているため、流入口にて偏流が生じやすい。さらに、流入口からの噴流は、キャビン内にて循環系統の気流と混合するとの仮定から、流入口の気流を斜め下方向とした。

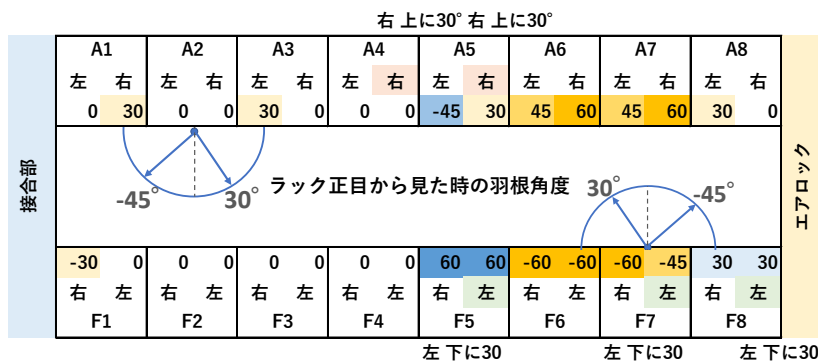
**Step4 : 循環系統の吹出し風量**

循環系統は 2 台の空調機からの送風が集合ダクトで合流し、各吹出し口に分流している。今回はダクトの動圧を考慮して、簡易的に送風機に近い両サイドと中央とで 20%の風量差を設けた。

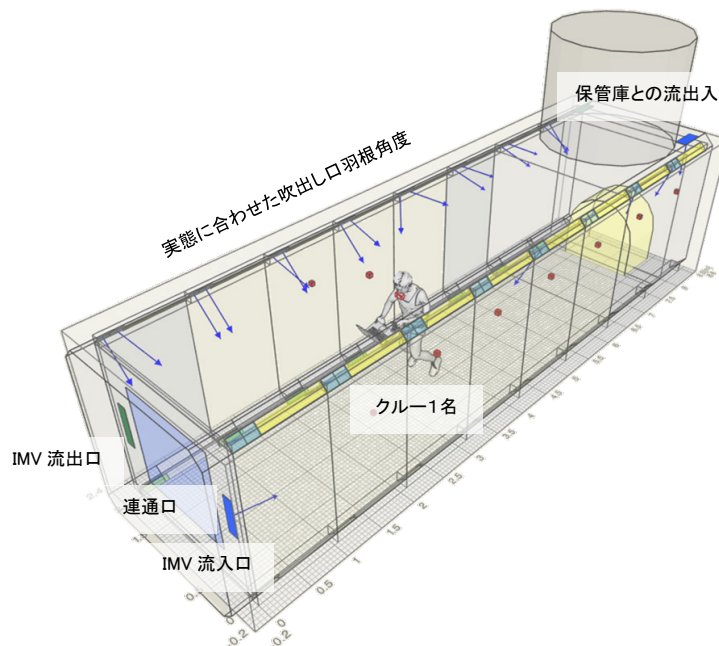
**Step5 : 保管庫の換気**

「きぼう」の空調システムに関連する資料から、IMV 系統の送風が、換気のために一部保管庫へ流入していることを新たに把握した。そこで、IMV 系統の風量をキャビン内（船内実験棟）と保管庫の容積比に応じて按分し、保管庫への流出入経路を設けた。

以上の改良を踏まえた CFD 解析モデルを **図 4** に示す。計算モデルおよび与条件は、従来の解析モデルを踏襲している。



**図 3 循環系統吹出し口の羽根角度**



**図 4 改良版 CFD 解析モデル**

#### 4. 実測と解析結果の比較による検証

##### 4.1 羽根角度による換気効率 SVE3 の改善

羽根角度が換気効率に影響を及ぼすことは前述のとおりである。図 5 に従来の羽根角度と今回の実態による SVE3 のヒストグラムを示す。図 5(a) から、換気効率の低下を示す SVE3 の増加がみられる。

この結果を踏まえ、ラック列前面の実験装置やケーブル類の抵抗をモデル化した模擬抵抗の厚みを削減し、IMV 系統の流入空気の流れ場を確保した。これによる SVE3 の改善効果は図 5(b) のとおりである。

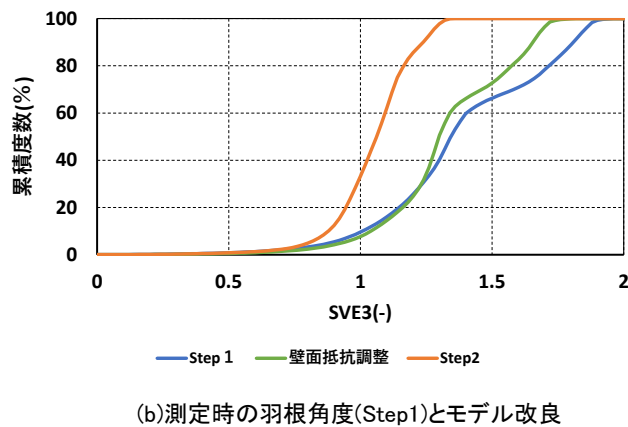
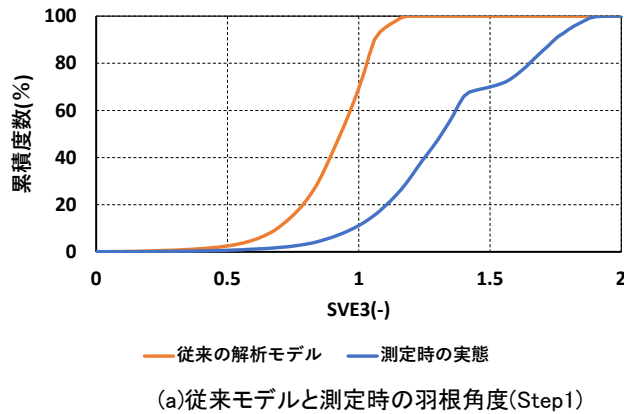


図 5 換気効率 SVE3 の比較

##### 4.2 CO<sub>2</sub> 濃度の代表断面比較

モデル改良の Step ごとによる代表断面の CO<sub>2</sub> 濃度のコンターを図 6 に示す。(a)Step1&Step2 の改良では中央から各面にほぼ同様な濃度勾配が形成されていたが、モデルの改良を進めることで、図 2 に示した測定値に近い A 側、O 面への濃度勾配が得られた。

##### 4.3 キャビン内の流れ場

代表断面の濃度勾配がほぼ再現できたことから、キャビン内の流れ場を図 7 の流線で推定する。JEM の流入口から吹出された新鮮空気はキャビン内を斜め下方向に進みながら、循環系統の吸い込み口を介して、キャビン上部の循環系統吹出し口から供給され、キャビン内の汚染物質を希釈する。また、一部は保管庫へと流入し、保管庫を換気する。

これらの流れ場が形成されることにより、キャビン内の環境が極端な滞留域を生成することなく、維持されていると考えられる。

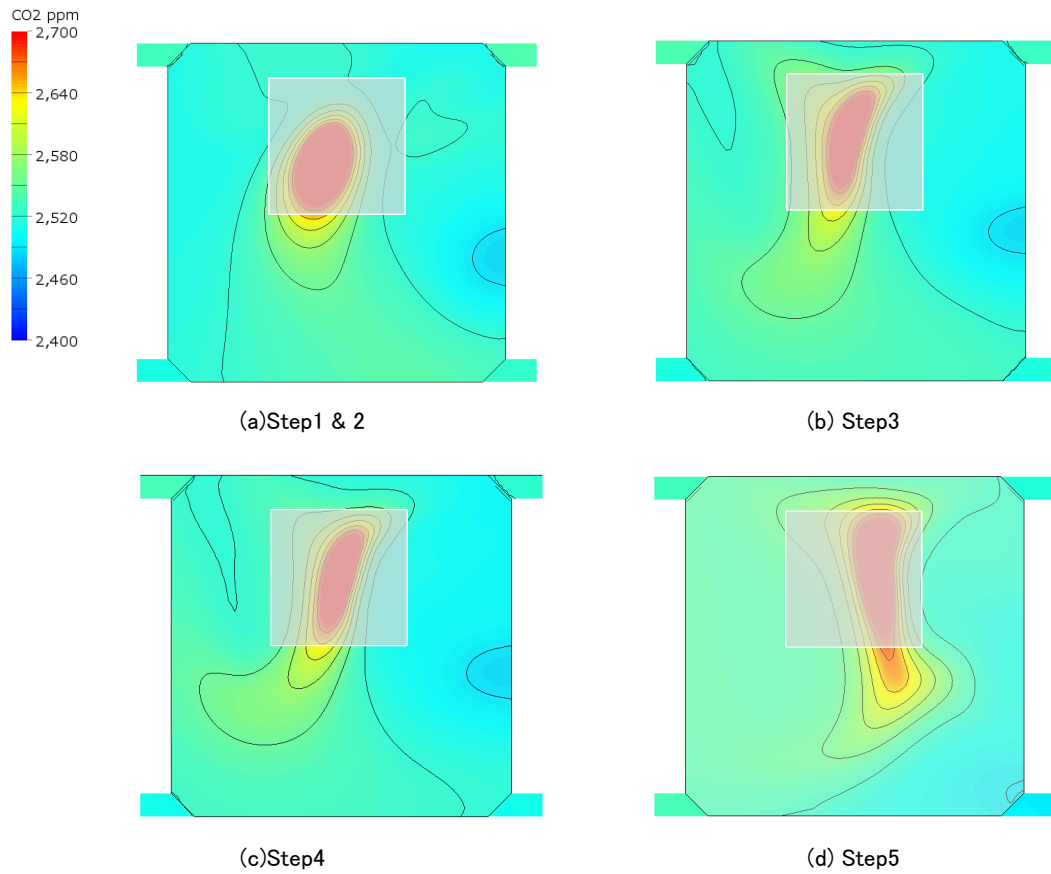


図 6 モデル改良と代表断面の CO<sub>2</sub> 濃度

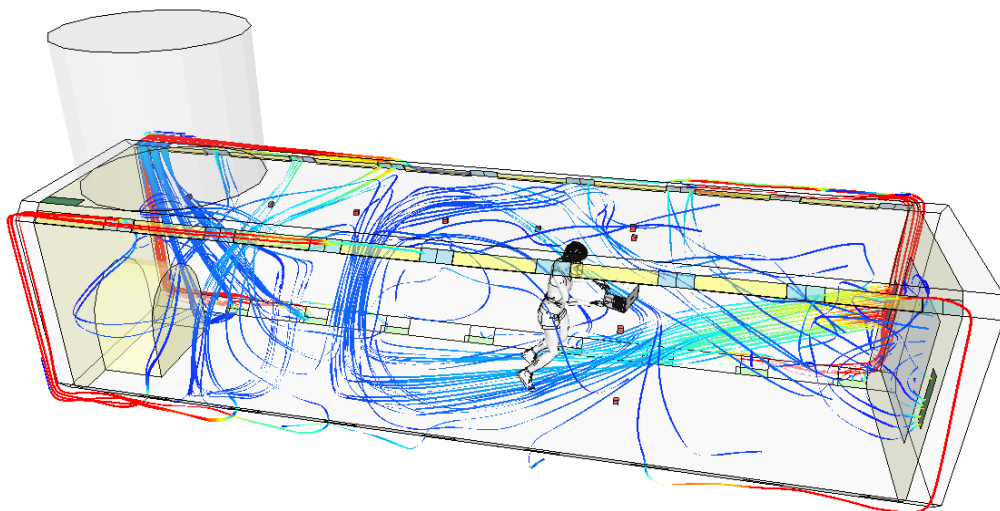


図 7 キャビン内の流れ場

## 5. おわりに

本報では、スモークやミストによる可視化が不可能なため、流れ場の実態を把握することができない。今回は CO<sub>2</sub> 濃度から二次的に検討したことで、影響因子を把握し、各項目が寄与することは濃度分布の再現性で確認できている。今後、さらなる適正解に向けて解析を進める。

## 謝 辞

本研究は、(株)バンダイナムコホールディングスが主催するガンダムオープンイノベーションの公認プロジェクト「TEAM SPACE LIFE」の活動の一環として行ったものである。ここに関係の皆様へ謝意を表す。

## 文 献

- 1) 日本の国際宇宙探査シナリオ（案）改訂の実施状況, JAXA, 2025.6
- 2) 柴田克彦, 斎藤雅治, 友部俊之, 木村真一: 国際宇宙ステーション内日本実験棟「きぼう」の室内温熱環境解析 第1報 CFD 解析モデルの構築と環境評価, 2024 年度空衛講論, I-48, pp. 425-428 (2024. 9)
- 3) 柴田克彦, 斎藤雅治, 友部俊之, 木村真一: 国際宇宙ステーション内日本実験棟「きぼう」の室内温熱環境解析 第2報 運用条件による環境の変化, 第68回宇科連, 1F13 (2024. 11)  
ガンダムカラーの環境センサー(TEM)が宇宙へ, [https://www.tte-net.com/article\\_source/data/news/files/20250422\\_1.pdf](https://www.tte-net.com/article_source/data/news/files/20250422_1.pdf) (2026. 1)
- 4) 木村真一, 植田国男, 福島広暉, 高久雄一, 柴田克彦, 黒住献, 瀧澤玲央, 天野健作, 福田美紀, 立花晃, 石井源久, 小野圭, 吉川敬, 石田周平, 友部俊之, 阿部麻紀: 自律分散環境センサを用いたきぼう実験棟での局所多点環境計測実験, 第69回宇科連, 4Q05 (2025. 11)
- 5) 柴田克彦, 斎藤雅治, 永野秀明, 阿部麻紀, 友部俊之, 木村真一: 小型自律分散型環境センサーを用いた実測と CFD 解析 による「きぼう」内キャビンの流れ場分析, 第69回宇科連, 4Q04 (2025. 11)
- 6) 朱晟偉, 林立也, 加藤信介, 村上周三: 可視化実験と数値解析による静穏室内の人体呼吸域流れの性状の検討, 日本建築学会環境系論文集, 第583号, pp. 37-41 (2004. 9)

## ABSTRACT

We have developed an environmental assessment model that can efficiently predict the indoor environment of the Kibo module on the International Space Station. A simplified computational fluid dynamics (CFD) model has previously been constructed based on reported cabin geometry and ground-based experimental data. In this study, we integrate on-orbit demonstration data obtained from small autonomous distributed environmental sensors with CFD simulations through a fitting approach. After validating the CO<sub>2</sub> concentration distribution at a representative cross-section, we estimate the global airflow field within the cabin.



## 月面用水電解装置の開発結果と将来展望<sup>※</sup>

津村 柊吾・加藤 敦史・馬場 大輔・内田 浩基  
武田 健太郎・岡 堯志<sup>\*1</sup>・森田 健<sup>\*2</sup>

### Development Results and Future Prospects of Lunar Water Electrolyzer

Shugo Tsumura・Atsushi Kato・Daisuke Baba・Hiroki Uchida  
Kentaro Takeda・Takayuki Oka・Ken Morita

我々は月面での技術実証を目的とした水の水電気分解装置を開発した。この装置は我々が地上向けに保有する固体高分子形の水電解技術を活用し、月面環境や宇宙機の制約に適用させたものである。装置は、株式会社 ispace による民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」Mission 2 の月着陸機に搭載され<sup>2,3)</sup>、2025 年 1 月 16 日に打ち上げられたが、同年 6 月 6 日の着陸失敗により月面での実証試験開始には至らなかった。しかしながら、およそ 5 か月にわたる軌道上運用では健全性が維持されていることを確認できており、一定の運用成果を得られた。将来開発においてはガス生成量の高出力化とプロセス間の連携が重要になると考えられる。

#### 1. はじめに

近年、月に水資源の存在可能性が示された<sup>4)</sup> ことから月面探査・開発が世界的に注目を集めており、我が国においても、持続的な月面探査の実現に向けて、月面のレゴリスから抽出した水から推薬（水素および酸素）を製造する月面推薬生成プラントが構想されている<sup>5)</sup>。国際宇宙探査の戦略を各国の宇宙機関間で調整するグループ (International Space Exploration Coordination Group: ISECG) が作るシナリオの中でも月探査の主要な目標として推薬を年間 50 t 現地製造することを掲げており<sup>6)</sup>、今後ますます月面推薬生成に関する技術開発が活発になると考えられる。

図 1 に月面の推薬生成における水利用プロセスを示す。ステップ 4 に示されている水の電気分解（以下水電解）は、月面の推薬生成において主要なプロセスの 1 つであり、また有人活動における酸素供給や還元剤（水素）生成のプロセスとしても重要である。

そこで我々は、保有する地上用の水電解技術を活用し、月面での技術実証を目的とした水電解装置を開発した。装置は、株式会社 ispace（以下、ispace）による民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」Mission 2 に貨物（以下、ペイロード）として搭載され<sup>2,3)</sup>、2025 年 1 月 15 日に打上げられた。しかしながら同年 6 月 6 日に月面への軟着陸に失敗し、月面での実証試験開始に至らなかった。

本稿では、開発した水電解装置のミッション概要と開発成果、軌道上運用成果及び次期開発における課題と展望について述べる。

※ 本論文は、第 69 回宇宙科学技術連合講演会の講演論文<sup>1)</sup>を加筆修正したものである。

\*1 エンジニアリング事業部、\*2 本社 経営企画部

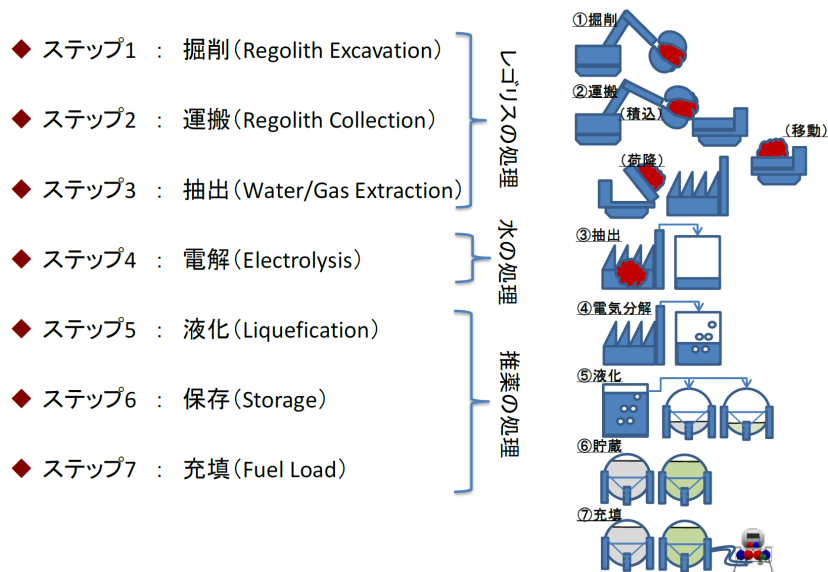


図1 月面の水利用プロセス<sup>4)</sup>

## 2. ミッション概要

### 2.1 水電解装置概要

月面用水電解装置 (Hydro Oxy Creator: HOC) は、民間月面探査プログラム Mission 2 (以下、着陸機) のペイロードとして開発された水電解装置である。写真1に着陸機に搭載されたHOCの写真、表1に主要諸元を示す。HOCは、高砂熱学工業が地上向けに開発した水電解装置をベースに設計・製作された。

図2にHOCの構成図、図3にHOCの運転データのイメージを示す。HOCは、通信系、制御・データ処理系、電源系、構造系、反応系、水素貯蔵系及び酸素貯蔵系から構成されており、反応系の水電解セルに電圧を印加することで、装置内の水を電気分解し水素と酸素を生成する。反応系、水素貯蔵系及び酸素貯蔵系で構成される密閉された系での水素、酸素ガスの発生により各系内の圧力を上昇させ、目標の生成圧力に到達させる。目標圧力に到達したら、間欠的に排気を行うことで各系内の圧力を一定の範囲に保った状態で連続運転することが可能である。加圧された水素及び酸素ガスは、最終的に系外に排出して1サイクルの運転を終了する。



写真1 着陸機に搭載されたHOCフライトモデル

表1 HOC 主要諸元

ミッション期間	最大 14 日
HOC 質量	約 8 kg
HOC 外形寸法	約 L: 300 mm×W: 440 mm ×H: 200 mm
ガス生成量 (定格)	水素: 2 NL/h 酸素: 1 NL/h
ガス生成圧力	MAX 1 MPa
許容温度範囲	+5~+60°C

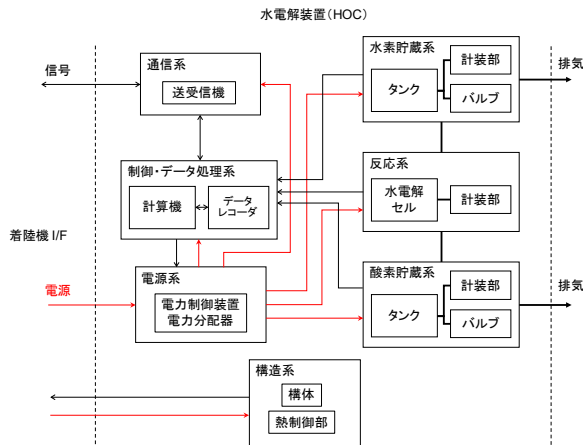


図 2 HOC 構成図

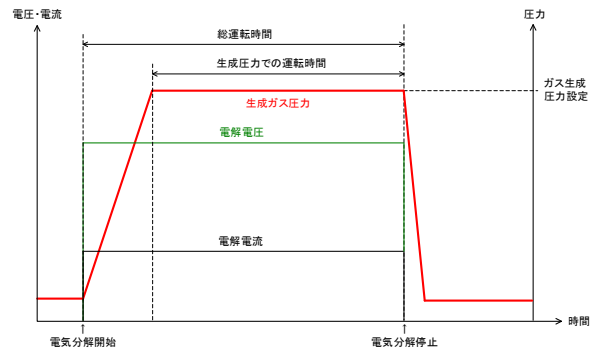


図 3 HOC の代表的な運転データのイメージ

## 2.2 水電解の方式・セルの構成

HOC の水電解方式には固体高分子 (Polymer Electrolyte Membrane: PEM) 形を採用した<sup>7)</sup>。図 4 に水電解セルの構造と反応の原理を模式的に示す。反応を担う PEM と電極触媒の接合体 (膜電極接合体) の両側に、電子の授受と流体拡散を担う集電体、反応流体 ( $H_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2O$ ) の流路形成を担うセパレータを配置して水電解セルを構成している。水電解反応では、反応流体流路の陽極側に純水を供給し、水電解セルに電力を供給すると、陽極の電極上で純水が電気分解され、陰極側に水素が、陽極側に酸素が発生する。

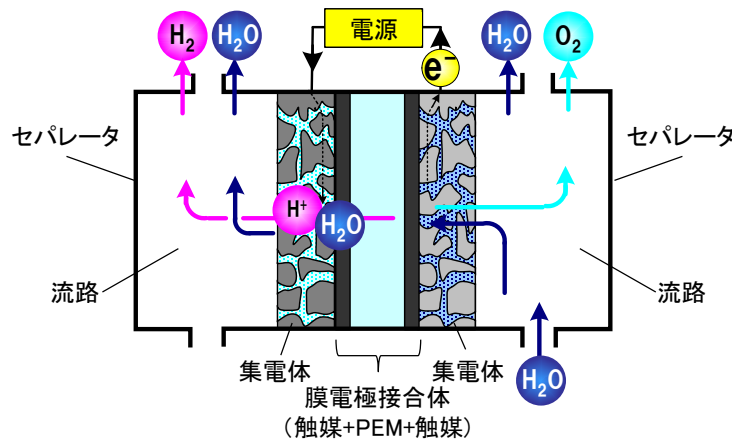


図 4 PEM 形水電解セルの構造と反応の原理

## 2.3 地上機との特徴的な違い(1/6G 環境下での水供給)

月面特有の環境として約 1/6 G の低重力環境がある。HOC においては、流体 ( $H_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2O$ ) の挙動がその影響を受ける可能性があるが、地上での検証が困難であるためシステムの重力依存性が小さいプロセスが望まれる。また衛星の軌道上故障のおよそ 20%は流体系で発生しているとの報告<sup>6)</sup>もあり、流体の制御方法について信頼性の確保が課題である。

そこで HOC では、通常、水電解セルへの純水供給に用いられる電動ポンプを排し、電力が不要で機械可動部が無く、動作の重力依存性が小さい毛細管力を用いた純水供給方法を開発した。図 5 にその概念図を示す。前項で述べた水電解セル内の集電体は多孔質材料で構成されている。この多孔質材料の形状を工夫

することで流体の駆動源となる毛細管力を発生させ、純水を水電解セルへ供給する。水電解セルに電力を加えられると、陽極側で酸素ガスが生成され、集電体のガス孔からガス排出管へ流動する。本方式は、集電体の多孔質材料で生じる毛細管力のみを駆動源とすることから、電力を用いることなく、水電解セルへ純水の供給が可能である。

本方式の副次的な効果として、気液分離の安定性が挙げられる。HOCの気液分離器は月の重力を利用した重力式を採用している。電動ポンプを用いた強制循環方式の場合、通常電気分解される量よりも多くの水が送り込まれるため、ガス排出管は酸素ガスと水の混相流となり、気液分離の安定性に影響を及ぼす懸念があった。本方式では始動時を除きガス排出管内はほぼ酸素ガスのみとなるため、気液分離器を兼ねる水タンク内上部に一定以上の気層を確保しておけば、想定運用環境において気液分離に影響が生じるリスクが低いことを数値解析等で確認している。他方、強制循環方式を排することで、電解における発熱がセル内に留まりやすくなり、セルの温度安定性が低下するという欠点もあり、今後高電流密度化やセルスタック化に向けては熱制御設計が主要な課題になると考えられる。

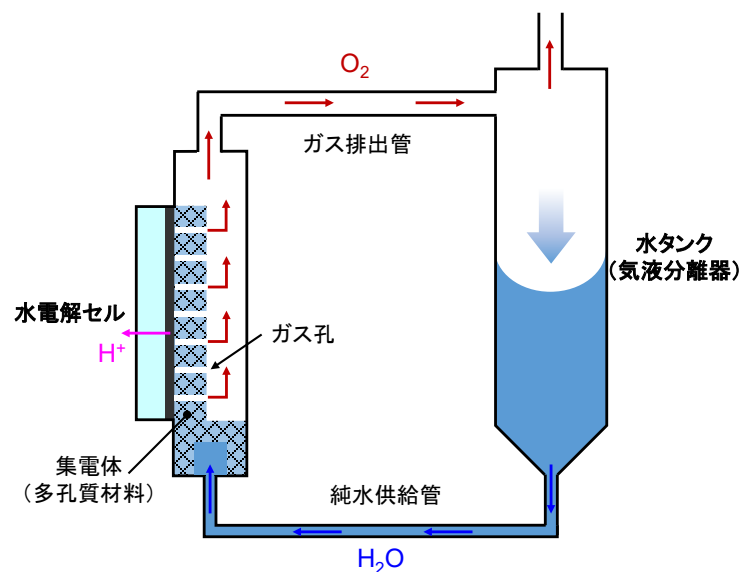


図 5 HOC のキャピラリーポンプ方式

### 3. 運用結果

#### 3.1 軌道上運用

月への軌道航行中は、HOCのヘルスチェック、環境モニタ等を行った。なお、軌道上運用においては着陸機の電力、通信制約から水電解運転の実証は計画されていなかった。

##### (1) インターフェース (I/F) 温度

図 6 に着陸機-HOC間のI/F温度のトレンドを示す。Lander I/F-1 及び 2 は、I/F面の着陸機側代表点 2 か所の温度を示し、Payload (FM) I/F-1 及び 2 は、I/F面のHOC側代表点 2 か所の温度をそれぞれ示している。HOCは、各I/F温度を参照して着陸機側に設置されたヒータをON/OFFすることで温度制御が行われた。

5月11日に着陸機側の運用の関係により許容温度範囲内で一時的に温度低下が発生したが、打上げから月の円軌道投入(5月29日)までの期間に亘って20~28℃の範囲で安定したI/F温度制御がなされていたことが確認できる。円軌道投入以降は、周期的に着陸機が蝕に入るため温度が低下したが、許容温度下限+5℃に対して十分な温度マージンを有している。

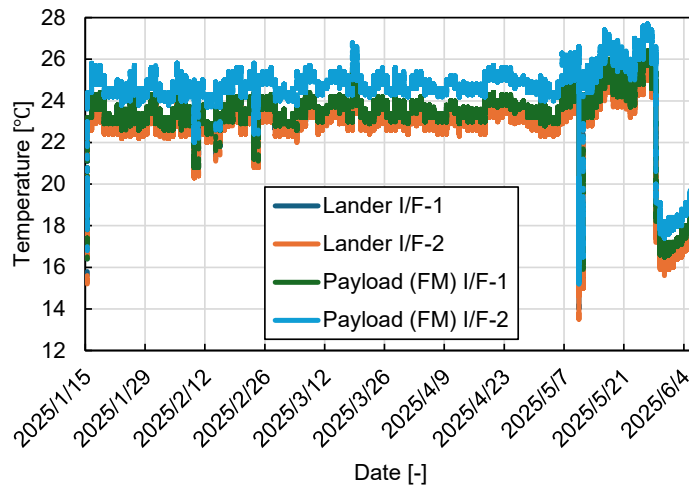


図 6 軌道航行中の I/F 温度トレンド

(2) HOC 温度

図 7 に HOC の温度のトレンドを示す。T-H1、H2 は水素貯蔵系、T-O1、O2 は酸素貯蔵系、T-O3 は水電解セル、T-E1 は電源系の代表点温度をそれぞれ示している。HOC の各温度は I/F 温度に追従しており、各点の温度差は熱平衡試験で検証した結果と傾向が一致していたことから、HOC の受動熱制御設計及び検証の妥当性を確認できた。

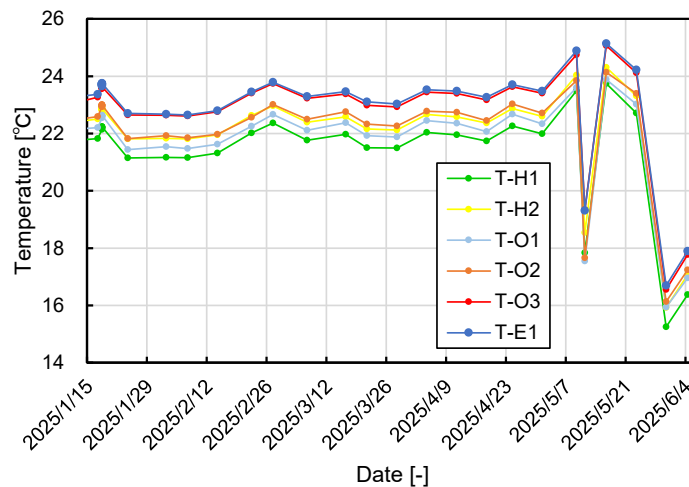


図 7 軌道航行中の HOC 温度トレンド

(2) HOC 圧力

図 8 に HOC の圧力トレンドを示す。P-H1、H2 は水素貯蔵系、P-O1、O2 は酸素貯蔵系の圧力をそれぞれ示している。P-H1、P-O1 及び P-O2 で圧力が低下傾向にあることが読み取れ、これは HOC の水電解セルに採用したゴム製のガスケットを介したガス透過によるリークと考えられる。P-H2 は水電解セルに直接接続されていないシステムの圧力であるため、圧力低下の傾向は見られない。HOC のガス透過によるリーク影響は設計時に織り込み済みであり、今回の低軌道運用での圧力低下は、地上検証による Worst Case 予測よりも十分に小さいことから月面運用には問題はないと考えている。一方、長期運用やプラント化を見据えた次期開発においては、製造ガスや水の経日的な漏洩は資源の損失に直結するため十分な対策が必要である。なお、5 月 11 日及び 5 月 29 日以降の圧力の低下は、前述の温度低下による影響である。



表 2 HOC 月面運用の運転プロフィール

運転条件	水素生成圧力 [MPa]	酸素生成圧力 [MPa]	運転時間 [min]
1	0.20	0.18	> 7
2	0.20	0.18	> 30
3	0.45	0.18	> 30
4	0.75	0.18	> 30
5	1.00	0.18	> 30
6	1.00	0.35	> 30
7	1.00	0.65	> 30
8	1.00	0.90	> 30
9	1.00	1.00	> 60

#### 4. 将来開発における課題と展望

今回開発した HOC は、様々な制約条件から水素・酸素の生成量が小さい設計となり、基本的な水電解機能の宇宙適用検証を予定するに留まった。そのため HOC で月面での年間推薬生成量のベースライン要求<sup>6)</sup>を満足することは困難である。次期開発では、まずはガス生成の高出力化を目標とした要求を定め、それに伴う技術課題の検討を行う必要があると考えている。

またプラント化に向けては、水電解の上流及び下流プロセスとのインターフェース開発も必須である。水電解は、月面推薬生成の中間プロセスであり、上流には氷含有レゴリスの採取、水抽出や精製等の一連のプロセスを得た純水供給の I/F が、下流には生成したガス精製、圧縮及び液化を行う推薬貯蔵の I/F それぞれ存在する<sup>5)</sup>。本ミッションでの HOC は、純水を充填した状態で打ち上げられ、生成した水素及び酸素ガスは月面へ放出予定であったが、今後はこれら I/F の仕様検討や検証、協調開発が重要になると考えられる。

さらに商業化に向けては、月離着陸機等、推薬のユーザの存在も欠かせず、資源探査及び実証機会の確保の観点でも継続した月面輸送の機会が望まれる。

#### 5. おわりに

本稿では、月面用水電解装置 (HOC) の開発結果と将来の展望について紹介した。HOC は着陸機の軟着陸失敗により水電解の実証には至らなかったが、開発した各技術は今後の月面推薬生成に資する要素技術として活用できるものと考えている。また非宇宙分野の民間企業として先駆的な挑戦であった本ミッションでは、宇宙分野における開発過程から運用計画、そして今回の失敗を経験し様々な知見が得られた。高砂熱学工業は本ミッションを端緒として引き続き宇宙分野での技術開発の推進に貢献していく所存である。

## 謝 辞

本成果は、経済産業省が実施する「令和3年度宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発（水電解技術開発）」の結果、得られたものである。関係各位に御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 津村ら: “月面用水電解装置の開発結果と将来展望”、第69回宇宙科学技術連合講演会、(2025).
- 2) 加藤敦史、森田健: フロンティアビジネス創出への挑戦-宇宙事業に関する取り組み-、高砂熱学工業イノベーションセンター報、No.34 (2020).
- 3) 津村ら: 月面実証用水電解装置の開発、高砂熱学工業イノベーションセンター報、No.38 (2024).
- 4) S. Li et al.: Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions、PNAS、115 (36) 8907-8912、(2018).
- 5) 宇宙航空研究開発機構: 日本の国際宇宙探査シナリオ (案)2021、279-307、(2021).
- 6) The International Space Exploration Coordination Group (ISECG): The Global Exploration Roadmap Supplement、Oct. 2022. Table 3 (2022).
- 7) S. Mekhilef、R. Saidurb、A. Safari.: Comparative study of different fuel cell technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16、981–989、(2012).
- 8) 齋藤宏文: 人工衛星の軌道上故障に関する二次分析、日本航空宇宙学会論文集 Vol. 59, No. 690 190-196、(2011).

## ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering has developed a water electrolyzer for technological demonstrations, with the aim of producing hydrogen and oxygen on the moon. The electrolyzer was integrated into the payload of the commercial lunar exploration program Mission 2 by ispace Inc., which was launched on January 15, 2025. However, due to the unsuccessful lunar landing on June 6, 2025, our mission was terminated. This paper describes the summary of the mission, development, in-orbit operational results and future prospects.

---

# サーマルマイニングによる月面での水抽出

## (第四報) 揮発性物質の分離方法の検討※

内田浩基・加茂雅裕

### Thermal Mining for Lunar Water Part 4 – Studies on Separation of VOCs from Water Systems

Hiroki Uchida・Masahiro Kamo

月の氷レゴリスを加熱して取り出した水蒸気の捕獲方法と水蒸気以外の揮発性物質の分離方法について検討した。月の水氷には水以外に多量の揮発性物質が含まれており、月の水氷を水電解装置などに利用する際には、これらの揮発性物質を水から分離して水のみを抽出する必要がある。コールドトラップの形状の違いによる蒸気の冷却性能を調査した結果、これまで世の中で検討されている逆円錐台型のコールドトラップの場合、水と水以外の揮発性物質を十分に分離できず、Flow-through 法により水以外の揮発性物質を月面の宇宙空間に放出した場合、水の回収率が著しく低下する可能性が考えられる。そこで月面の水抽出を二段階に分けて、一段階目に、例えばコイル型コールドトラップなど微細な流路構造を用いた水（液相）トラップにより水抽出を行う。その後、二段階目に逆円錐台型コールドトラップを使用した氷（固相）トラップにより、抽出水中に溶け込んだ不純物を取り除く方法を考案した。このような二段階抽出方法により、月面において水の回収率を下げることなく、抽出水中の揮発性物質を大幅に低減し、後工程の純水化处理の負荷を低減することが可能と考えている。

#### 1. 緒言

当社が開発した月面水電解装置を載せた ispace 社の月着陸船（ランダー）は 2025 年 6 月 6 日に月面着陸を試みた。しかし残念なことに、ランダーの不具合により月面着陸には至らず、世界初の月面での水電解装置を用いた水素と酸素の生成を実証することはできなかった。この結果を受けてもなお、当社は将来期待される月面エコシステムの一翼を担えるよう、引き続き環境クリエイター®として新たな環境への挑戦を続けていく<sup>2)</sup>。また今後、月面において水電解装置に使用する水資源の採掘と抽出に向けた技術実証を目指す<sup>3)</sup>。

月面において推薬である水素と酸素を生成する水電解技術は、ロケットの推薬生成プラント構想の後工程であり、この前段階として月面及び地下の氷の探査や採取、採取した氷のプラントへの輸送、水の純水化处理などの様々な工程が必要となる。これらの工程の内、当社では月面での水電解技術の開発に加えて、月に存在すると考えられている水資源の抽出方法を検討している（**図 1**）。本報では、月の氷を含むレゴリスを加熱して取り出した水蒸気の捕獲方法と水蒸気以外の揮発性物質の分離方法について検討した。

※ 本論文は、第 69 回宇宙科学技術連合講演会論文<sup>1)</sup>を加筆修正したものである。

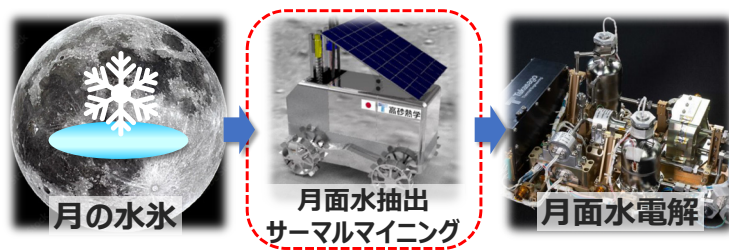


図1 月面水抽出サーマルマイニング技術の位置付け

## 2. 月面水抽出技術の動向

### 2.1 氷レゴリスの加熱方法

月の氷レゴリスを加熱してレゴリス粒子間に存在する氷を昇華させて水蒸気として取り出すサーマルマイニング（熱抽出）技術は Sowers によって提案された<sup>4)</sup>。Sowers の方法は、月面に太陽光を集光するドーム型の簡易テントを設営してテント内のレゴリス表層に集光した太陽光を照射し、この加熱によって発生した水蒸気を収集する方法である。しかし、月の極めて薄い大気（ $10^{-7} \sim 10^{-10}$  Pa）ではレゴリスの実効熱伝導率が非常に小さく数 cm 以上の深度にある氷を加熱できないことが問題である。そこで内田ら<sup>5, 6)</sup>はより深い地下のレゴリス層の氷を加熱するため、ドリルで月面から 1m～数 m の深さの小孔を掘削し穴の先端を加熱することで加熱部を中心とした氷壁に囲まれた与圧空間を形成、この氷壁の内側にあるレゴリスを加熱して水蒸気を取り込む方法を提案した。一方、Hab<sup>7)</sup>および Kiewiet ら<sup>8)</sup>は、Sowers の簡易テント内でレゴリス表層を加熱する方法に対して、機械採掘により氷レゴリスを容器（るつぼ）に密閉して加熱する方法を提案し、水抽出の簡便さや装置寿命、水回収率（レゴリスに含まれる氷の元量に対する抽出できる水の割合）、エネルギー効率などの評価項目について詳細に比較した。この結果によれば、テント内でレゴリス表層を加熱する方法に比べて、機械採掘により容器内で加熱する方法の方が水回収率やエネルギー効率の点で約 10 倍優れるが、機械的な摩耗による装置寿命の短さや方法の煩雑さが難点である。このように、氷レゴリスを加熱する方法については、現時点ですべての評価項目を満足する方法がなく、当社提案のレゴリス深層に氷壁を形成し内部の氷レゴリスを加熱する方法も含めて、引き続き模索していく必要がある。

### 2.2 水蒸気の捕獲方法

サーマルマイニングにより氷レゴリスを加熱して昇華した水蒸気を、コールドトラップ（CT）の冷却面で液相の水または固相の氷の状態に捕獲する方法が検討されている<sup>9, 10)</sup>。レゴリスに付着する氷の状態から CT を経て液相として抽出するまでの相変化における温度と圧力の関係と経路を図 2 に示す<sup>11)</sup>。図 2 中の A は極低温・極低圧に保たれたレゴリスの氷の固相であり、この状態の氷をレゴリスごと加熱し B の気相（水蒸気）の状態にレゴリスから抽出する。抽出した水蒸気（B）は、2a の経路で一旦、氷（C）である 2b の経路で水（D）に相変化させるか、あるいは 3 の経路で直接、水（D）に戻すかの二通りが考えられる。

3 の経路で液相の水としてトラップする場合（以下、水トラップ）と 2a-2b の経路で固相の氷としてトラップする場合（以下、氷トラップ）の CT の形状案を図 3 に示す。水トラップの CT 形状は、CT 表面で流動性がある液相として水蒸気を捕獲するため、図 3(a) のようにコイル状の銅パイプ内壁で水蒸気を凝縮させるなど、蒸气流路と CT 面の形状を微細化することができる。一方、氷トラップの場合は、CT 表面に流動性がない氷が付着（凝華）するため、微細な流路は氷結によって閉塞する。更に、CT 表面から氷を剥離（例えば、シートヒーターなどの加熱により）して採取する場合、CT 周囲に氷塊を落下するための物理的空間が必要となる。このため、氷トラップの代表的な CT 形状は図 3(b) のような単一または複数の逆円錐台形状であり、Kalis<sup>10)</sup>や Heitkamp<sup>12)</sup>によって検討されている。

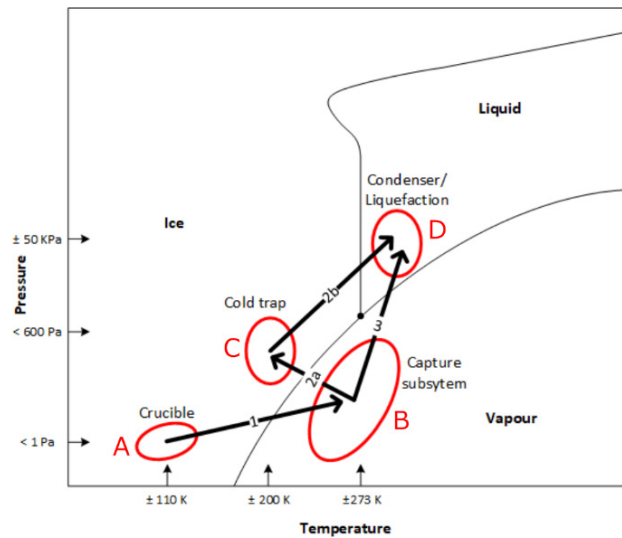


図2 月面水抽出における水の温度・圧力の相変化図<sup>11)</sup> (赤字のA~Dは著者が記入)

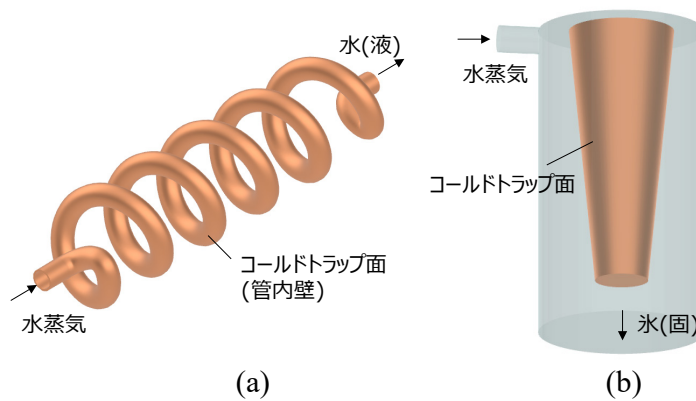


図3 水トラップと氷トラップの形状

### 3. 水蒸気捕獲と揮発性物質の分離方法の検討

月の氷には  $\text{H}_2\text{O}$  だけでなく水電解工程において装置の劣化や破損を引き起こす可能性がある有害な不純物 ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  等の揮発性物質) を 20~30 vol% 程度含む可能性が示唆されている<sup>13-15)</sup>。

図4に月の氷に含まれる揮発性物質の相図を示す<sup>14)</sup>。水以外の揮発性物質は水蒸気の凝縮・凝華が生ずる温度・圧力下において気体として存在する。このため、レゴリスの加熱により昇華する水以外の揮発性物質を含む蒸気をCTで捕獲する場合、水蒸気は凝縮・凝華し体積収縮するが、水蒸気以外の揮発性物質は凝縮・凝華しないNCG (Non-Condensable Gas) である。蒸発器と凝縮器からなる装置内において、水とNCGの昇華に対して、水のみ凝縮・凝華となるため、NCG分の気体モル量が増加し、装置内圧力が上昇する(ここでの現象は昇華と凝華であるが装置部品の呼称統一のため蒸発器、凝縮器とした)。この昇圧現象はNCGがCT表面で凝縮する圧力に達するまで継続するが、これにより蒸発器内において水が蒸発可能な圧力(飽和水蒸気圧)を超えるため、氷は昇華しにくくなると考えられる。

このような現象を避けるため、Holquistらは図5のFlow-through コールドトラップの概念を提案した<sup>14)</sup>。この概念では、凝縮器内にNCGが留まり装置内が昇圧した場合、凝縮部の下流において背圧弁を開放し月

面の真空中に NCG を放出することで、装置内圧を下げ、再び蒸発器内で氷を昇華しやすくすることができる。この概念においては、装置内の貴重な水蒸気が月面の真空中に NCG と一緒に放散されないよう、凝縮部の CT において確実に水蒸気を捕獲して、水蒸気と NCG を分離し、NCG のみ排出することが重要となる。

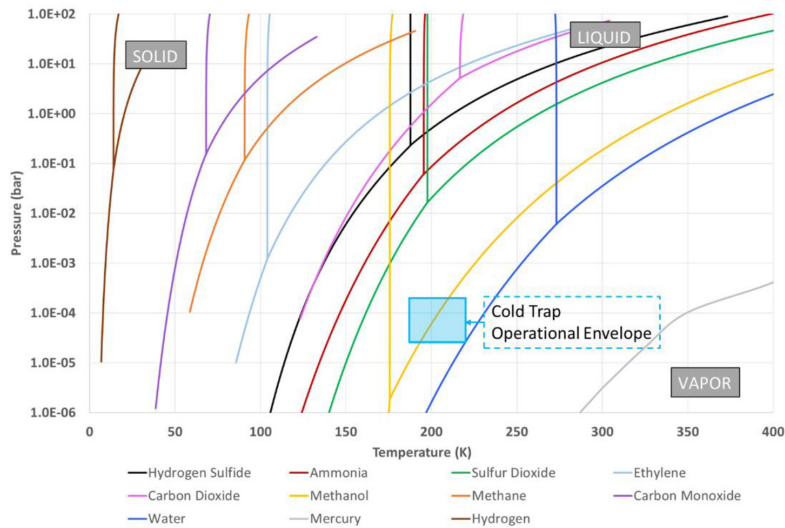


図 4 月の揮発性物質の相図と Holquist ら提案のコールドトラップ運用範囲<sup>13)</sup>

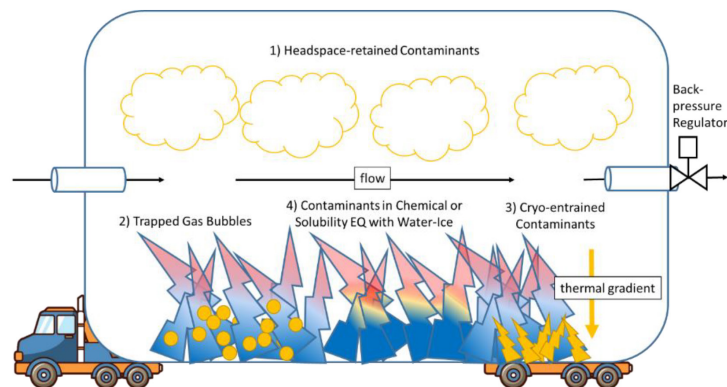


図 5 Holquist ら提案の Flow-through コールドトラップの概念図<sup>13)</sup>

図 3 の CT の形状の違いによる NCG を含む水蒸気の水の捕獲性能の違いを明らかにするため、図 6 の装置を用いた実験を行う。水以外の揮発性物質が含まれる蒸気の蒸発と凝縮の現象を定性的に理解するため、まずは月の氷の模擬物質として、安全で扱いやすく、水の凝縮・凝華点に比較的近いエタノールを選択した。凝縮器の CT 形状を図 3 のようにした場合の蒸発器と抽出液溜めのエタノール濃度を比較し水蒸気の回収効率について考察する予定である。

図 7 に、システム上流の蒸発器の温度から下流の凝縮器における温度変化とこれに対するアントワン式<sup>16)</sup>から求めた水とエタノールの飽和蒸気圧、および非理想系気液平衡計算<sup>16)</sup>による 20 vol%エタノール水溶液を蒸発させた際の凝縮器入口の水とエタノールの分圧を示す。この結果から、蒸発器から凝縮器に流れ込む蒸気は、凝縮器内において、水の場合は 2°C 以上、エタノールは 13°C 以上の冷却により凝縮すると考えられる。

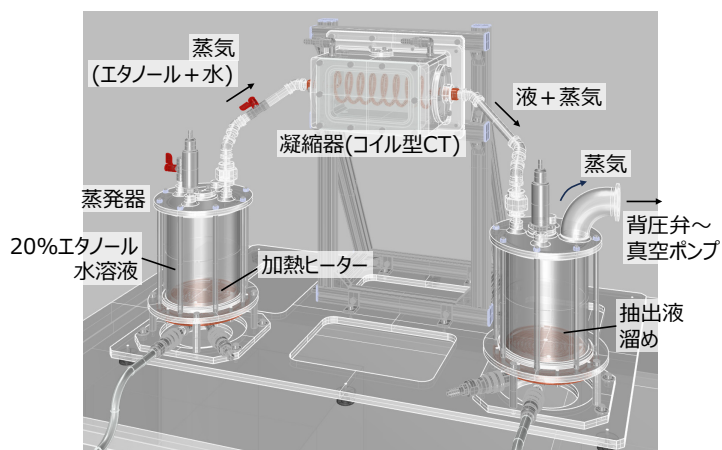


図6 揮発性物質を含む水蒸気の捕獲効率実験

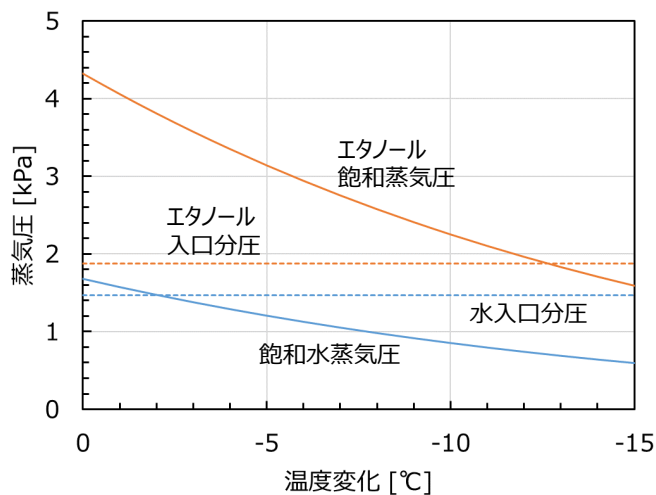


図7 水とエタノールの入口分圧と飽和蒸気圧

図8に、各CT形状の違い(図3)による蒸気の冷却性能の数値シミュレーション(相変化なし対流熱伝達のみ考慮)の結果を示す。ここでは、各解析モデルの入口と出口の境界条件(蒸気温度、圧力)、CT表面の温度や面積を等しくした。この結果から、図3(b)の逆円錐台型CTに比べて、図3(a)のコイル型CTは蒸気を効率よく冷却できることがわかった。コイル型CTは、出口付近の蒸気温度を入口温度から $-9^{\circ}\text{C}$ 程度冷却できるため、図7から水は凝縮するがエタノールは蒸気のまま凝縮器から排出されると予想できる。一方、図3(b)の逆円錐台型CTの場合は入口温度に対して、出口温度の降下は $-2^{\circ}\text{C}$ 未満であり、凝縮器からはエタノールだけでなくより多くの水が蒸気として排出される可能性が考えられる。今後、本シミュレーション結果について、図6の装置を用いて実験的に検証していく。

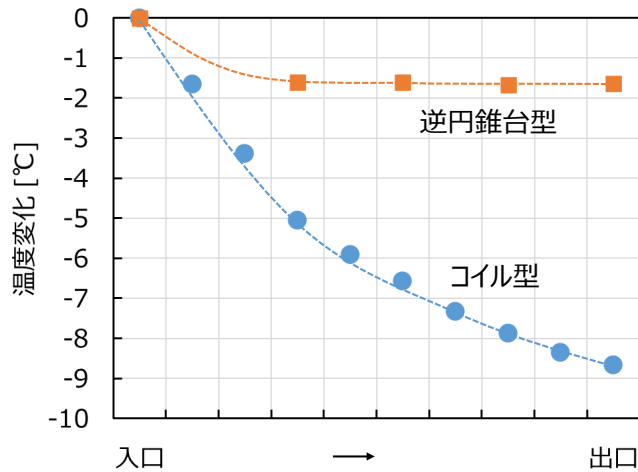


図8 各CT形状の蒸気冷却性能

#### 4. 月の水を二段階で抽出する方法の提案

図3(b)の逆円錐台型(例えばKalis<sup>10)</sup>、Kiewiet<sup>11)</sup>にて導入)のCTの場合、気相の水蒸気が液相の水よりも高い蒸気圧の揮発性物質を含む条件において、CT表面で水蒸気を捕獲できない可能性がある。このため、Flow-through法により月の真空中に蒸気を放出する際に、有害な揮発性物質と一緒に氷レゴリスから抽出した水蒸気も放出する可能性が考えられる。これにより、水の回収率の著しい低下が示唆される。そこで、我々は新たに図9に示すように月の氷レゴリスから二段階で水を効率的に抽出する方法を考案した。一段階目でコイル型などの微細な流路構造のCTを用いて水トラップを行い、蒸気に含まれる揮発性物質の大半を分離して、水以外の揮発性物質を月の真空中に放出する。その後、二段階目で氷トラップにより、更に抽出水に溶存する揮発性物質を取り除く。宮本ら<sup>15)</sup>によれば、高濃度の揮発性物質が混入する場合であっても氷トラップにより水蒸気を捕獲することで水に溶け込んだ揮発性物質を大幅に低減できる。このように二段階の水抽出を行うことで、水の回収率を下げることなく、抽出水中の揮発性物質を大幅に低減し、後工程の純水化処理の負荷を低減することができると考えている。

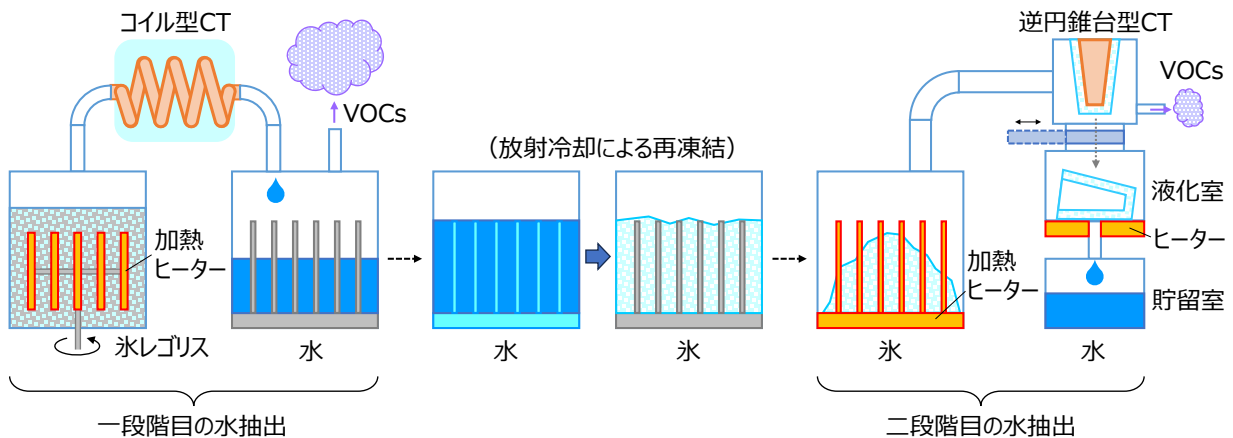


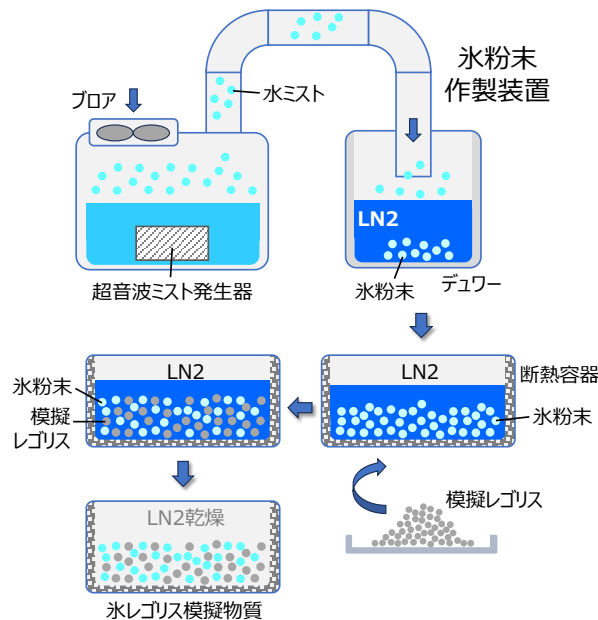
図9 月面における二段階式水抽出方法

## 5. 氷トラップによる月面水抽出技術

前節の二段階式水抽出法を実現するためには、①氷レゴリス加熱技術、②氷トラップによる水抽出技術、③氷トラップによる水抽出技術の要素技術が必要である。この内、②の技術については、3章の実験装置により実証実験を進める。①の氷レゴリス加熱については、月面水抽出装置への実装の容易さと実現性の観点から、まずは容器（るつぼ）内加熱を念頭に検討している。③の要素技術については、以下のようにエタノールを含む月の氷の各種揮発性物質とこれを含む氷レゴリスの模擬物質を製造し、①の氷レゴリスの加熱技術の検討と並行して氷トラップによる水抽出実験を行う。

### 5.1 氷レゴリス模擬物質の作成方法の検討

Wache<sup>17)</sup>により考案された霧状の水滴を含む空気流を LN2 液面に衝突させて、水を含む揮発性物質の水滴を急冷する方法により、月の氷を模擬した微細な氷粉末を作成する手法を試みる。氷粉末の作製装置の概略、および氷レゴリス模擬物質の作製手順を **図 10** に示す。氷粉末作製装置を用いて作製した氷粉末を含む LN2 懸濁液にレゴリス模擬物質（Exolith Lab 社 LHS-1 など）を添加し、極低温下の LN2 中で氷粉末とレゴリス模擬物質を攪拌して混合する。その後、LN2 を乾燥・除去することで、レゴリス模擬物質の粉末中に一様に氷粉末が分散した氷レゴリス模擬物質を作成する。



**図 10** 氷粉末の作製装置の概略、および氷レゴリスの模擬物質の作製手順

### 5.2 氷トラップによる水抽出装置の設計

現在、**図 3 (b)** の逆円錐台型の CT を用いて氷レゴリスの模擬物質から氷トラップにより水抽出する装置を設計している。本装置の概要図を **図 11** に示す。設計は DLR（ドイツ航空宇宙センター）で検討されている月面水抽出装置<sup>10-12)</sup>を参考にした。**図 11 (b)** の逆円錐台型 CT は、CT の内部に LN2 を流動させ CT 表面を氷点下以下に冷却する。蒸発器において氷レゴリスの模擬物質を加熱して発生した水蒸気は、凝縮器に流れ込み CT 表面で凝華して氷として捕獲される（現象は昇華・凝華であるが装置部品の呼称統一のため蒸発器、凝縮器とした）。CT 表面には捕獲した氷を剥離させるためのフィルムヒーターが設置されており、CT 表面で捕獲した氷が一定の厚さに成長した後、フィルムヒーターの加熱により、氷を CT 表面から剥離し、凝縮器の下方に設けた液化装置 (**図 11 (c)**) 内に氷塊を落とし込む。その後、**図 11 (c)** のゲート弁を閉じて、密閉した液化装置内を水の三重点以上に加圧・加熱し、氷塊を水に相変化した後、装置から水を取り出す仕組みである。

今後、本装置を作製し、前節の方法で作製した氷レゴリス模擬物質を用いて水抽出実証試験を行う予定である。

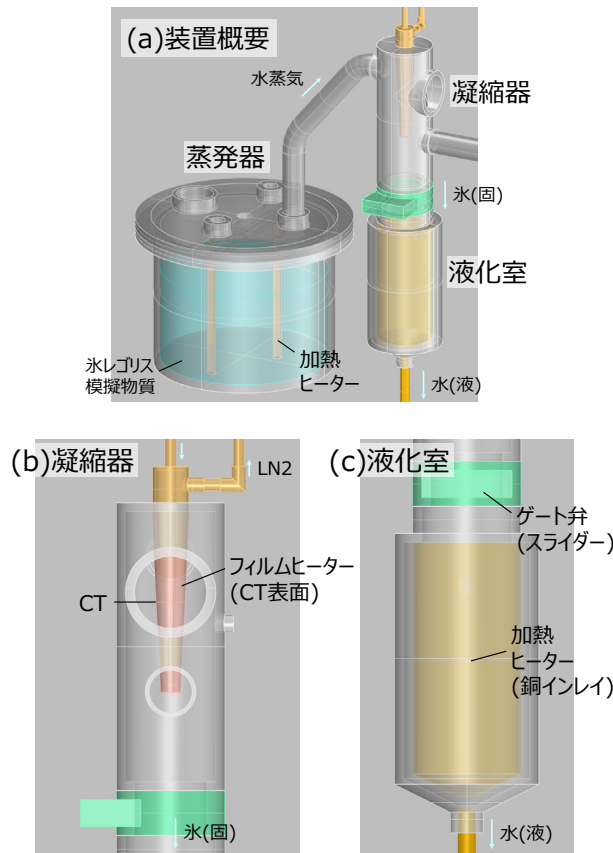


図 11 月面水抽出装置の概要図

## 6. まとめ

月の氷レゴリスを加熱して取り出した水蒸気の捕獲方法と水以外の揮発性物質の分離方法について検討した。月の氷には水以外に多量の揮発性物質が含まれており、採取した水氷を水電解装置などに利用する際には、これらの揮発性物質を水から分離して水のみを抽出する必要がある。CTの形状の違いによる蒸気の冷却性能について検討した結果、これまで先行研究で報告されている逆円錐台型のCTの場合、水と水以外の揮発性物質を十分に分離できず、Flow-through法により揮発性物質を月面直上の宇宙空間に放出した場合、水の回収率が著しく低下する可能性が考えられる。

そこで本研究では、月面の水抽出において一段階目に例えばコイル型CTなど微細な流路構造のCTを用いて水トラップにより水抽出し、二段階目に逆円錐台型CTなどを用いて抽出水中に溶存する不純物を取り除く氷トラップにより水抽出を行う、二段階式抽出方法を新たに考案した。本方法を用いることで、水の回収率を下げることなく、抽出水中の揮発性物質を大幅に低減し、後工程の純水処理の負荷を軽減することが可能と考えている。

今後、本報で提案した二段階式水抽出技術を実現するため、氷レゴリス加熱技術、水トラップによる水抽出技術、氷トラップによる水抽出技術の各要素技術について、実験的に検証を進めていく。

## 文 献

- 1) 内田浩基, 鹿山雅裕: 1N05 月面水抽出サーマルマイニング技術の開発 ～水蒸気の捕獲と揮発性物質の分離方法の検討～, 第 69 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2025).
- 2) 高砂熱学工業: 月面での水素・酸素生成への挑戦に関するご報告, 2025/6/9, [https://www.tte-net.com/article\\_source/data/news/detail/2025/749.html](https://www.tte-net.com/article_source/data/news/detail/2025/749.html)
- 3) ispace: ispace、高砂熱学工業と月面におけるサーマルマイニング技術実証に向けた 計画検討に関する覚書を締結, 2025/5/9, <https://ispace-inc.com/jpn/news/?p=7359>
- 4) George Sowers: Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, NIAC Phase I Final Report: Colorado School of Mines, 2020.
- 5) 内田浩基, 中田拓司, 川上理亮, et al.: サーマルマイニングによる月面水採取 (第二報) 再凝縮・凝固を考慮した氷レゴリスの伝熱解析, 高砂熱学イノベーションセンター報 vol. 37 (2023).
- 6) 内田浩基, 川上理亮, 河南治: 2L09 月面水採取サーマルマイニング技術の開発 ～氷水を含む月面レゴリスの熱解析～, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2023).
- 7) Niklas Hab: Modeling, Simulation and Comparison of Lunar Thermal Water Extraction Methods for Space Resource Utilization, Technical University of Munich (2022).
- 8) L. Kiewiet, N.M. Hab, F.M. Marchese, et al.: Trade-off and optimization for thermal Lunar water extraction system, 73rd International Astronautical Congress (2022).
- 9) Nathaniel Ian Jurado: Rarified Water Vapor Deposition From Icy Lunar Regolith On An Engineered Cold Plate, University of Texas at El Paso (2021).
- 10) Christoph Kalis: Design of a Water Capturing System for Thermal Extraction of Water on the Moon In the context of In-Situ Resource Utilisation (ISRU), Delft University of Technology (2024).
- 11) Luca Kiewiet: An overview of the LUWEX project, German Aerospace Center (DRL), Oberseminar Geo und Astrophysik (2024).
- 12) Mart Heitkamp: Lunar Water Extraction: Design, Optimization, and Development for Future Space Exploration, University of Twente (2024).
- 13) 内田浩基, 鹿山雅裕: サーマルマイニングによる月面での水抽出(第三報) 水蒸気捕獲方法の検討, 高砂熱学イノベーションセンター報 vol. 38 (2025).
- 14) Jordan B. Holquist, Patrick Pasadilla, Chad Bower, et al.: Analysis of a Cold Trap as a Purification Step for Lunar Water Processing, International Conference on Environmental Systems (2020).
- 15) 宮本真吾, 松本千誉: 2L11 月面におけるレゴリス抽出水の純水化处理, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会 (2023).
- 16) 化学工学協会: 化学工学便覧, 丸善 (1999).
- 17) Henning Wache: Thermal Conductivity Measurements of Dry and Icy Lunar Regolith Simulants, Technische Universität Braunschweig (2024).

## ABSTRACT

Method for capturing water vapor extracted by thermal mining from lunar icy regolith and for separating water from VOCs were studied. Lunar water contains a large amount of VOCs; therefore, it is necessary to remove the VOCs and extract only the water for electrolysis. As a result of studying the cooling performance of the steam due to differences in the cold trap (CT) shape, in the case of inverted cone shape CT, which has been widely studied, it may not be possible to sufficiently separate water and VOCs. Also, it is possible that when VOCs are released into space on the lunar using the flow-through method, the water extraction rate may decrease significantly. We have proposed a two-stage method of capturing water vapor: in the first stage, a CT with a fine channel structure is used to capture the water vapor as water on the CT surface, and in the second stage, an inverted truncated cone CT or similar is used to capture the water vapor as ice on the CT surface. This method makes it possible to significantly reduce the amount of VOCs in the extracted water without reducing the water extraction rate.

---

## 二酸化塩素ガスによる種子クリーン化法の可能性評価※

荒川宏樹・高橋秀人

### Evaluation of the Potential for Seed Cleaning Method using Chlorine Dioxide Gas

Hiroki Arakawa・Hideto Takahashi

従来、病原微生物に感染した種子の処理に用いられてきた乾熱処理や殺菌剤浸漬などの方法は、発芽率の低下などの悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、これまで培ってきた医薬・医療分野向けの二酸化塩素ガスを用いた除染技術を基に、病原微生物に感染した種子に対する新規クリーン化方法を、微生物数の減少効果と発芽率によって評価した。本報告では、アブラナ科黒腐病の病原菌である *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* に感染した種子を用い、二酸化塩素ガスを利用した種子クリーン化法の適用可能性について評価した。その結果、微生物数の減少効果は、人工汚染種子に対して目標を達成した。さらに、二酸化塩素ガス暴露直後の発芽率に有意な低下は認められなかった。以上の結果から、二酸化塩素ガスを用いた種子クリーン化法は、病原微生物に感染した種子に対して適用できる可能性が示唆された。

#### 1. はじめに

二酸化塩素は、微生物除染剤として高い殺菌消毒効果が一般的に認められており、欧米での水道水の殺菌消毒の実績や国内で食品添加物としてカット野菜やフルーツへの使用が認可されている<sup>1),2)</sup>。これらの効果と安全性を鑑み、我々はバイオハザード対策用クラスIIキャビネット<sup>3)</sup>や医薬医療分野の無菌製剤（注射剤、点眼剤、眼軟膏剤）を研究・開発・製造する無菌エリアで使用する二酸化塩素ガス除染技術の確立を目指して研究を行っており<sup>4)-9)</sup>、実績を積み重ねてきた。

本稿では、これまで培ってきた除染技術を基に、農業分野へ応用することを目的として、種子に付着または感染した微生物の処理方法として二酸化塩素ガスを利用したクリーン化法を検討した結果を報告する<sup>10),11)</sup>。

従来の微生物感染した汚染種子の処理方法には、乾熱処理や薬液浸漬処理がある。しかし、乾熱処理法は種子を72°Cで72時間高温環境にさらすため、種子へのダメージが大きく、発芽率が低下する問題があった。また、薬液浸漬処理法は種子を薬液浸漬した後に遠心乾燥と低温乾燥を行うため、発芽率低下に加えて作業工程の切り替えごとに種子を移動する手間がかかるといった課題があった。そこで、二酸化塩素ガスを用いた乾式での種子クリーン化法を試験評価し、前記課題解決の可能性を検討した。なお、クリーン化とは、ガス暴露装置を使って種子を乾式洗浄することを示し、薬液浸漬処理法や農薬処理法と区別するための表現である。

※ 令和7年度空気調和衛生工学会講演論文<sup>11)</sup>を加筆修正したものである。

## 2. 二酸化塩素ガスによる種子クリーン化処理の概要

### 2.1 二酸化塩素ガスの主な物理的性質と許容濃度

二酸化塩素の主な物性と許容濃度を表1に示す。二酸化塩素は沸点が11℃であり常温ではガス状態として存在する。米国の労働安全衛生局による許容暴露限界は0.1 ppmである。0.1 ppmの二酸化塩素ガスは、人の嗅覚で感知できるため、万が一処理中に僅かでもガス漏洩が発生したとしても、検知器など特別な分析機器を用いることなく臭気で危険を察知することが可能であり、実用に適している。

表1 二酸化塩素の主な物性と許容濃度

沸点	11 °C	
水溶解度	0.8 g/100mL (20°C)	
相対蒸気密度 (空気 = 1)	2.3	
爆発下限値	10 vol%	
許容暴露限界 (PEL)	0.1 ppm	
短時間暴露限界値 (STEL)	0.3 ppm	
安全性	ガスの色	数百 ppm 以上で目視確認可能 (赤色～黄色)
	臭い	安全濃度 0.1ppm (PEL)でも人の嗅覚で感知可能
菌数減少効果	酸化作用	

### 2.2 種子クリーン化装置

本稿で使用した種子クリーン化装置の概要を図1に示す。温湿度計 (Vaisala 社製、HMT120) と循環ファンを設置した種子暴露チャンバ (300mm×300mm×300mm) に、二酸化塩素ガス濃度計 (CSI 社製、EMS)、二酸化塩素ガス発生器 (以下、発生器)、二酸化塩素ガス分解器 (以下、分解器) と加湿器を配管接続して構成した。種子暴露チャンバ内の環境は、温度は周囲成行き、湿度は加湿器空気と周囲の低湿度空気のポンプ供給で制御した。二酸化塩素ガスは、発生器内の反応容器に25%亜塩素酸ナトリウム溶液と9%塩酸溶液をポンプ供給・攪拌して発生させ、このガスを種子暴露チャンバ内濃度に応じてポンプ供給した。種子へのガス暴露が終了後、分解器用ポンプを運転しながら種子暴露チャンバに接続した発生器用と加湿器用のポンプも運転し、装置内の二酸化塩素ガスが安全濃度に到達したことを確認した後、種子を取り出した。

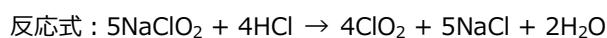
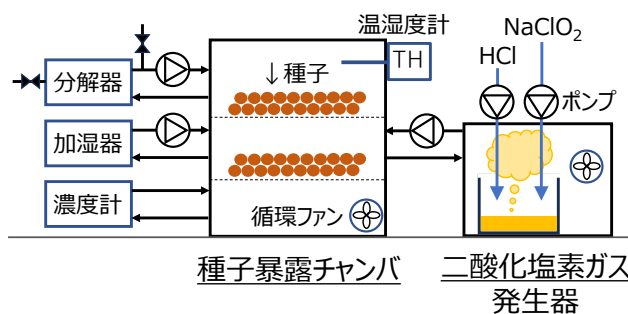


図1 種子クリーン化装置の概要

### 3. 二酸化塩素ガスによる種子クリーン化効果の評価

一般に、種子クリーン化効果は、クリーン化直後の菌数減少効果と発芽影響および貯蔵後の発芽影響などで評価される。また、二酸化塩素ガスを用いた種子クリーン化法は初めての取組みであり、暴露条件が不明である。そこで、まずは所定の病害菌で人工汚染させた種子を用い、二酸化塩素ガス暴露条件を変化させた時の菌数を測定することで、菌数減少効果の合格基準を満足する暴露条件を設定した。次に、設定した暴露条件で3種類の種子を二酸化塩素ガス処理し、暴露直後の菌数減少効果と発芽影響を測定することで、種子クリーン化効果の評価し、適用可能性を確認した。

#### 3.1 二酸化塩素ガス暴露条件の設定

菌数減少効果はガス濃度とその暴露時間に強く依存し、一般的にガス濃度 (C) と暴露時間 (T) の積 (以下、CT 値) が同じであれば同一の菌数減少効果が得られることが知られており、菌数減少効果は CT 値で管理される。また、既往研究において、我々はバイオロジカルインジケータの指標菌である *Bacillus atrophaeus* を用いた二酸化塩素ガスの微生物除染効果に対する相対湿度依存性を確認した<sup>6),7)</sup>。本節では、乾球温度、相対湿度、CT 値をパラメータとして、乾球温度と相対湿度を変化させた条件で菌数を1桁減少させるために必要な CT 値を測定比較し、二酸化塩素ガスによる病害菌汚染種子の菌数減少効果に対する相対湿度依存性について、さらに乾球温度の依存傾向について評価した。また、菌数1桁減少 CT 値の測定結果を基に、種子クリーン化の菌数減少効果の合格基準を満足させる CT 値を設定した。

##### 3.1.1 方法

試験に用いる病害菌汚染種子について、アブラナ科黒腐病は、キャベツ、ハクサイ、カブ、ダイコン、ブロッコリーなど多くのアブラナ科野菜に感染する世界的に重要な病害細菌の一つである。また、キャベツは、消費量が多く、国民の生活に欠かせない野菜として農林水産省が指定している野菜 (指定野菜) の1つである。そこで、アブラナ科黒腐病菌を人工汚染させたキャベツ種子を用い、暴露チャンバ内に設置後、所定の温湿度条件で二酸化塩素ガスを供給し、所定の CT 値で暴露した。試験菌数は、生理食塩水 (Tween20 添加) 100mL を入れたフラスコを滅菌して冷めたものに 40g の試験種子を入れ、ロータリーシェーカー (室温、125rpm) で 2.5 時間振とう洗浄し、その洗浄液の原液、10 倍、100 倍希釈液を2つの選択培地に塗布してコロニー数を計数した。生存菌数は1試験区3反復の平均値より求めた。菌数減少効果は、二酸化塩素ガス暴露前後の生存菌数の対数値の差である菌数減少桁数で評価した。

- ・ 乾球温度：23～43℃
- ・ 相対湿度：46～81%
- ・ 試験種子：キャベツ
- ・ 試験菌：アブラナ科黒腐病菌 (*Xanthomonas campestris* pv. *campestris*)
- ・ 培地：mFS 培地、mCS20ABN 培地
- ・ 培養条件：28℃、4～6 日

##### 3.1.2 結果と考察

各温湿度条件について、CT 値に対する菌数減少桁数を図 2 に示す。小さい CT 値で菌数減少桁数が大きいほど、つまりグラフの傾きが急なほど、菌数減少効果が高いことを示し、23℃×81%RH 条件の効果が高く、41℃×46%RH 条件の効果が低かった。本結果を基に、相対湿度と乾球温度に対する菌数1桁減少 CT 値を図 3、図 4 にまとめた。菌数1桁減少 CT 値が小さいほど、つまりグラフの下方にあるプロットほど菌数減少効果が高いことを示す。相対湿度は、高湿度ほど菌数減少効果が高い傾向であり、相対湿度依存性が認められた。ただし、相対湿度 70% と 80% では大きな差は見られなかった。一方、乾球温度は、低い方が菌数減少効果は高まる傾向を示した。次に、菌数減少効果の合格基準を、試験菌数 10<sup>5</sup>CFU/g が処理後に検出されなくなる時、つまり「菌数減少桁数 > 5.0」に設定した。目標とする菌数減少効果を達成できるのであれば、CT 値は小さい方がガス濃度を低く暴露時間を短くできるため運用上優位である。以上の結果から、実際の運用状況と安全率を考慮して、菌数減少効果の合格基準を満足する二酸化塩素ガス暴露条件を以下

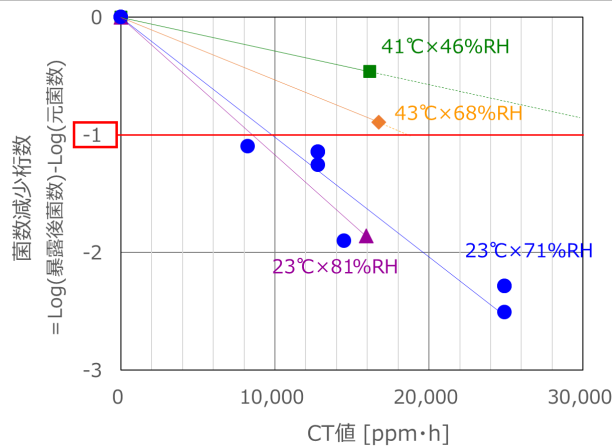


図2 各温湿度条件でのCT値に対する菌数減少桁数

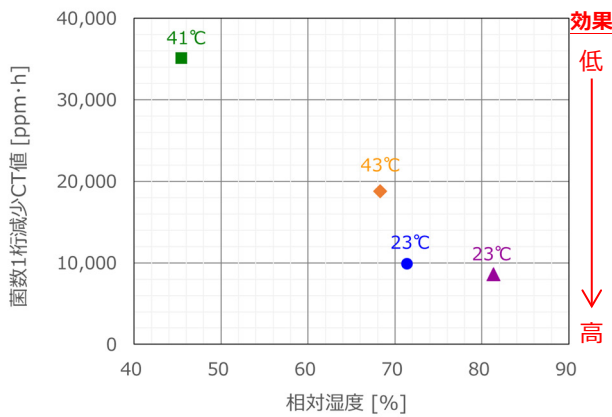


図3 相対湿度ごとの菌数1桁減少CT値

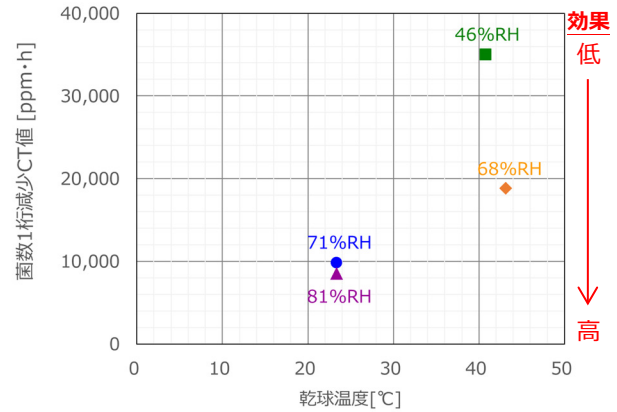


図4 乾球温度ごとの菌数1桁減少CT値

に設定した。

- ・ 乾球温度：23°C
- ・ 相対湿度：70 %
- ・ CT 値：66,500 ppm·h 以上

### 3.2 種子クリーン化効果の評価

種子クリーン化効果について、菌数減少効果は 3.1 節で設定した暴露条件で合格基準「菌数減少桁数>5.0」を満足できるかで、発芽影響は病害菌に汚染されていない健全種子に二酸化塩素ガスを暴露した直後の発芽率で評価した。

#### 3.2.1 方法

菌数減少効果は、アブラナ科黒腐病菌に  $10^5 \sim 10^6$  CFU/g で人工汚染または自然汚染された 3 種類の種子（キャベツ人工汚染種子、ブロッコリー人工汚染種子、コールラビ自然汚染種子）を、図1の種子クリーン化装置および3.1節の設定条件にて二酸化塩素ガスを暴露し、暴露前後の菌数減少桁数を測定評価した。

発芽率は、健全種子を3.1節の設定条件で二酸化塩素ガス暴露した後、蒸留水で湿らしたろ紙上に種子を100粒ずつ2ケース（合計200粒）播種し、7日間20～30°Cの変温環境で管理した後、正常発芽数と異常発芽数を計数した。発芽率の合格基準は、二酸化塩素ガス未暴露の健全種子の正常発芽率と比較して95%信頼区間内に収まる範囲に設定した。

### 3.2.2 結果と考察

菌数減少効果の測定結果を図5に、二酸化塩素ガス暴露前後の試験菌培養の様子を写真1に示す。二酸化塩素ガス暴露後の試験菌について、人工汚染したキャベツ種子とブロッコリー種子の場合は検出されずに検出限界以下で合格基準を満足したが、自然汚染されたコールラビ種子は試験菌が 1,087 CFU/g 検出され、菌数減少桁数は 2.5 であり合格基準を満足できなかった。人工汚染種子の場合、試験菌は種子表面近傍でほぼ均一に存在する状態で二酸化塩素ガスにさらされるため、設定 CT 値で目標通りの菌数減少効果が得られた。一方、自然汚染種子の場合、試験菌は種子表面以外の部位や菌数の濃淡の差が大きな状態で存在したため、合格基準を満足できなかったと考える。

発芽率の測定結果を図6に示す。今回試験した3種類の健全なアブラナ科種子は、二酸化塩素ガス暴露直後（貯蔵期間なし）の測定では発芽率の低下は認められず、合格基準を満足した。

### 4. まとめ

医薬医療分野の除染方法として研究開発してきた二酸化塩素ガス除染技術の農業分野への応用として、アブラナ科黒腐病に対する種子クリーン化効果を評価し、以下の知見を得た。

- ①二酸化塩素ガスによるアブラナ科黒腐病の菌数減少効果は、相対湿度が高いほど、また乾球温度が低いほど、高まる傾向を示した。

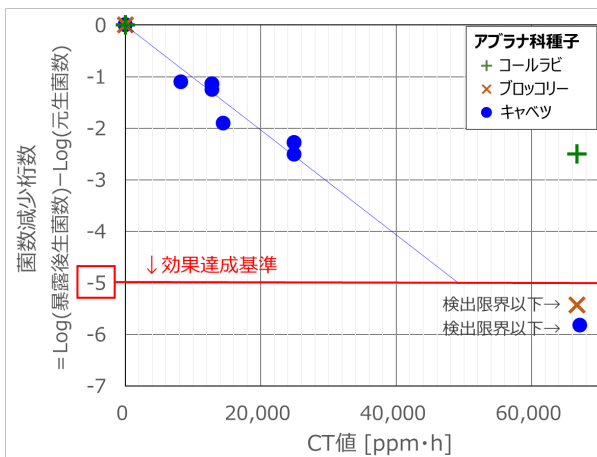


図5 菌数減少効果の測定結果

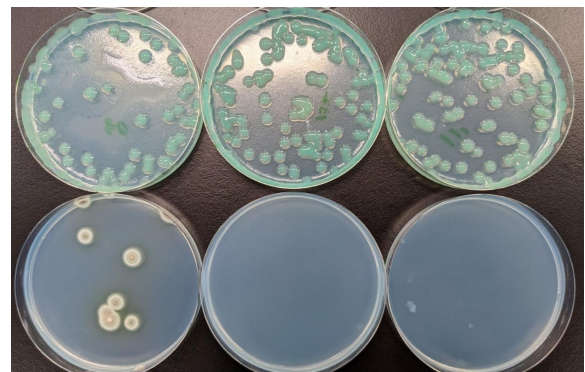


写真1 アブラナ科黒腐病菌の培地培養の一例  
(ブロッコリー種子、n=3)

上段: 元種子洗浄液\_100倍希釈

下段: CT 値 66,500ppm·h 暴露種子洗浄液\_原液

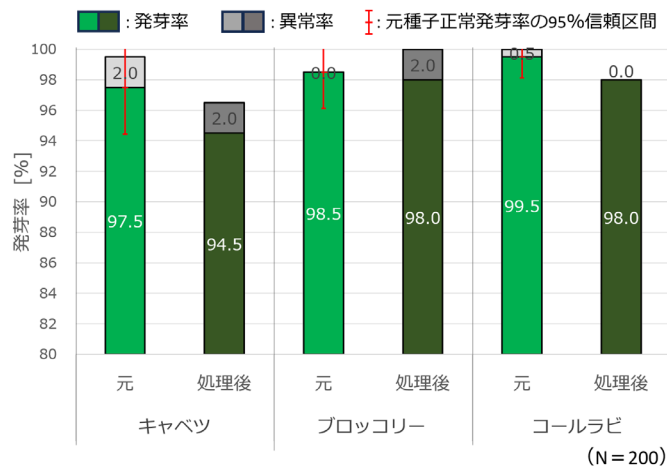


図6 発芽率の測定結果

②アブラナ科黒腐病の菌数減少に必要な温湿度およびCT値の条件を設定し、人工汚染種子を用いた試験にて菌数減少効果の合格基準を満足した。

③自然汚染された種子の場合、②条件での菌数減少効果は不十分であった。そのため、詳細な生菌の存在部位や汚染状況を把握して、効果を高める必要がある。

④今回試験したキャベツ、ブロッコリー、コールラビの健全種子の場合、二酸化塩素ガス暴露直後（貯蔵期間なし）の発芽率の合格基準を満足した。

二酸化塩素ガスによるクリーン化効果は極めて高く、従来の微生物に感染した汚染種子処理方法の代替として適用できる可能性が示唆された。

今後も二酸化塩素ガスによる種子クリーン化法の確立を目指し、自然汚染種子での条件設定、貯蔵後の発芽影響や他の種子病害菌に対するクリーン化効果について評価を行い、データを蓄積するとともに、クリーン化技術の拡充につなげていく予定である。

## 謝 辞

種子や病害菌に関する情報、ご助言、試験種子のご提供および菌培養や発芽などの測定評価についてご協力いただきましたタキイ種苗株式会社の草野様、青野様、塩見様および関係部署の皆さまに深甚なる謝意を表す。

## 文 献

- 1) 府食第 673 号，食品健康影響評価の結果通知について，平成 20 年 6 月 19 日
- 2) 公財 日本食品化学研究振興財団，各添加物の使用基準および保存基準
- 3) JIS K 3800 バイオハザード対策用クラスⅡキャビネット，付属書 B（除染）（2021）
- 4) 佐藤克己，阪田総一郎：二酸化塩素ガスによる殺菌消毒システムの開発，第 31 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集，167-168（2014）
- 5) 荒川宏樹，高橋秀人：二酸化塩素ガスを用いた微生物除染特性，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，125-128（2017）
- 6) 荒川宏樹，高橋秀人：二酸化塩素ガスを用いた微生物除染特性の把握その 2，第 35 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集，201-204（2018）
- 7) 荒川宏樹，高橋秀人：二酸化塩素ガスを用いた微生物除染特性の把握その 3，第 36 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集，173-176（2019）
- 8) 荒川宏樹，高橋秀人，朴民亀，田中萌，岩堀伸哉，坂井利：二酸化塩素ガスを用いた安全キャビネット除染方法の評価，第 41 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集，143-146（2019）
- 9) 荒川宏樹，高橋秀人：二酸化塩素ガス除染について，空気清浄，79-87（2022）
- 10) 青野昌彦，荒川宏樹，高橋秀人，草野新太郎，塩見寛：二酸化塩素ガスによる種子クリーン化の可能性”，日本植物病理学会報，91(3)，191（2025）
- 11) 荒川宏樹，高橋秀人：二酸化塩素ガスによる種子クリーン化法の可能性評価，その 1，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，117-120（2025）

## ABSTRACT

The conventional methods used to treat seeds infected with pathogenic microbes, such as dry heat treatment and biocide dipping, can have certain detrimental effects, including reduced germination rates. Therefore, based on the decontamination technology we have developed using chlorine dioxide gas for the pharmaceutical and medical fields, we evaluate the novel cleaning method for seeds infected with pathogenic microbe using the effectiveness of reducing the number of microorganisms and the stability of the germination rate. In this report, we evaluated the potential of seed cleaning method using chlorine dioxide gas on seeds infected with *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, the causative agent of black rot in Brassicaceae crops. The results confirmed that the reduction in the number of microorganisms achieved using the assessed method satisfied the designated target for artificially contaminated seeds. Moreover, we observed no significant reduction in the germination rate immediately after exposure to chlorine dioxide gas. These findings provide evidence for the potential utility of chlorine dioxide decontamination as an effective method for cleaning seeds.

---



# 排ガスからの CO<sub>2</sub> 回収・施用システムの バラ栽培への実証\*

宮下真一・増田正夫・太田宗吾  
吉屋康太\*<sup>1</sup>

## Demonstration of CO<sub>2</sub> Recovery and Supply System from Exhaust Gas to Rose Cultivation

Shinichi Miyashita・Masao Masuda・Sougo Ohta  
Kouta Yoshiya

CO<sub>2</sub> 施用は、バラやイチゴなどの作物の光合成促進による収量・品質の向上を目的に大規模施設園芸で広く行われている。しかし、化石燃料の燃焼ガス、あるいは製油所などから排出される副生ガスを圧縮・冷却し、エネルギーを消費して製造された液化炭酸ガスを用いた従来の CO<sub>2</sub> 施用方式は、地球環境には望ましくない。そこで筆者らは、従来よりも地球環境に対して優れたシステムを目指し、吸着材を用いて夜間にグリーンハウス内暖房用の加温機から排出される燃焼ガス中の CO<sub>2</sub> を回収し、日中に回収した CO<sub>2</sub> をグリーンハウス内に放出する CO<sub>2</sub> 回収・施用システムを開発した。今回、4.5 ヶ月間におよぶバラ栽培への実証試験を実施し、従来方式と比べて CO<sub>2</sub> 供給性能および切り花品質において遜色なく、エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量も約 40%削減でき地球環境に対して優れていることを明らかにした。

### 1. はじめに

CO<sub>2</sub> 施用は、バラやイチゴなどの作物の光合成促進による作物の収量・品質の向上を目的に、大規模施設園芸で広く行われている<sup>1-3)</sup>。例えば光合成が行われる日中の 6 時から 15 時までの間にグリーンハウス（以降、ハウス）内の CO<sub>2</sub> 濃度を 700~800ppm 程度にすることによって、バラ栽培においては増収率が 24.4%~38.5%に増加した事例が報告されている<sup>4)</sup>。一方で、一般的な CO<sub>2</sub> 施用には、化石燃料の燃焼ガス、あるいは精油所等から排出される副生ガスを圧縮・冷却し、エネルギーを消費して製造された液化炭酸ガスが使用されており、地球環境には望ましくない。

そこで筆者らは、従来よりも地球環境に対して優れたシステムを目指して、夜間にハウス内暖房用の加温機から排出される燃焼ガス中の CO<sub>2</sub> を回収し、日中にその CO<sub>2</sub> をハウス内に放出する CO<sub>2</sub> 回収・施用システム（以降、開発システム）を開発した。本報では、従来方式と比べて CO<sub>2</sub> 施用の性能および切り花品質において遜色ない CO<sub>2</sub> 施用ができ、地球環境に対して優れているかを確認するために、開発システム・従来の燃焼式施用・無施用でのバラ栽培への実証試験を実施したのでその結果を報告する。

---

※ 本論文は、令和 7 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文<sup>7)</sup> を加筆修正したものである。

\*1 茨城県農業総合センター

## 2. システムの概要

開発システムは、本来、排出されるはずだった加温機の排ガスから CO<sub>2</sub>を回収し、それを光合成促進に利用するシステムであり、加温機が暖房運転する冬季のみに使用する。図 1 に開発システムの概要を示す。開発システムは、主に CO<sub>2</sub>吸着材と充填用のタンク、送風機、それを接続する風洞で構成されている。使用した CO<sub>2</sub>吸着材は、CO<sub>2</sub>濃度の高い気体を通気させると CO<sub>2</sub>を吸着し、CO<sub>2</sub>濃度の低い気体を通気させると CO<sub>2</sub>を脱着する特性がある。CO<sub>2</sub>回収運転は、夜間、ハウス用の加温機の運転中に送風機を運転し、CO<sub>2</sub>濃度 7%程度の排ガスを CO<sub>2</sub>吸着材に通気させることにより CO<sub>2</sub>を吸着して回収貯蔵する。CO<sub>2</sub>回収後の排ガスは屋外に排気する。CO<sub>2</sub>施用運転は、日中の光合成の時間帯に、排ガスよりも CO<sub>2</sub>濃度の低いハウス内の空気を通気させることにより、夜間回収貯蔵した CO<sub>2</sub>を脱着し、ハウス内の CO<sub>2</sub>濃度が 700~800ppm になるように送風機を ON/OFF 制御し、ハウス内に放出する。

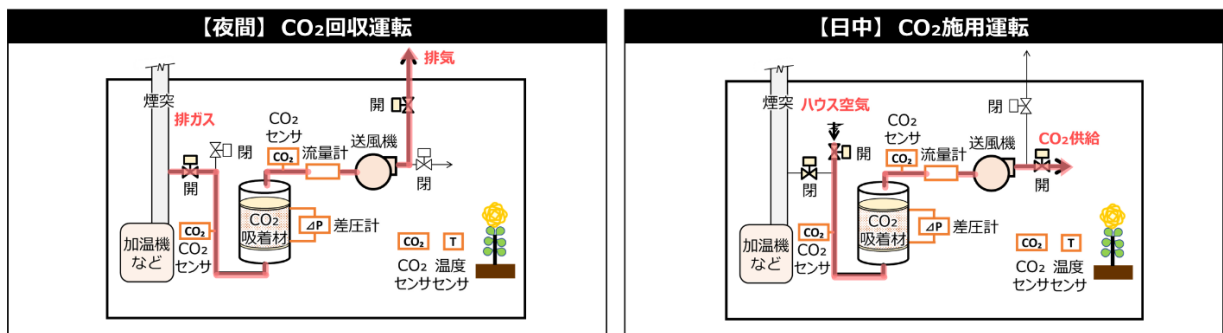


図 1 開発システムの概要

## 2. 実証試験の概要

### 2.1 試験方法

実証試験は、2023年12月16日～2024年4月30日の135日間、茨城県農業総合センター内（茨城県笠間市）にて実施した。表 1 に試験条件、図 2 に開発システムのシステムフローを示す。試験区は、試験区 1：開発システム（写真 1）、試験区 2：燃焼式施用（LPG 燃焼式 CO<sub>2</sub> 発生装置（写真 2））、試験区 3：無施用とした。ハウスの規模は、床面積 100m<sup>2</sup>×軒高 3m とし、試験区毎に 1 棟を使用した（写真 3）。バラの試験品種はアマダ+の 2 年生株を使用し、株数は 30 株/区とした。加温機の燃料は灯油とした。

CO<sub>2</sub> 回収運転は、試験区 1 で 15 時～翌朝 6 時とし、加温機の暖房運転中の運転信号により、開発システムの CO<sub>2</sub> 吸着材充填タンク入口および送風機出口の二方弁を切替して送風機を運転し、CO<sub>2</sub> 吸着材充填タンクに排ガスを通気させて CO<sub>2</sub> を回収し、回収後の排ガスは屋外に排気した。CO<sub>2</sub> 回収完了の判断は、CO<sub>2</sub> 吸着材充填タンクの入口と出口に設置した CO<sub>2</sub> センサにより、CO<sub>2</sub> 濃度差が 0.5%以内となった時点とした。

CO<sub>2</sub> 施用運転は、試験区 1、2 共通で光合成が行われる 6 時～15 時とし、ハウス内の平面中央(FL+2.0m)の CO<sub>2</sub> 濃度が 700~800 ppm になるように CO<sub>2</sub> 吸着材充填タンク入口および送風機出口の二方弁を切り替えて送風機を ON/OFF 制御した。CO<sub>2</sub> 施用は、バラ棚の末端から行い、ハウス付帯設備の循環ファンにて攪拌し、事前にハウス内の CO<sub>2</sub> 濃度の分布に偏りが無いことを確認した。ハウスの天井および側面に付帯している換気用窓（約 9m×約 0.7m×4 枚）は、バラの生育に適した温度になる様にハウス内の温度により開閉が制御されており、ハウス内の平面中央(FL+2.0m)の温度が 28℃以上で開放、26℃以下で閉鎖される。換気用窓が開放されると、施用した CO<sub>2</sub> が屋外に流出するため、開発システムもこの制御に合わせ、換気用窓が開放されると CO<sub>2</sub> 施用を停止し、換気用窓が閉鎖されると CO<sub>2</sub> 施用を再開し、無駄な CO<sub>2</sub> 施用を防止した。

表 1 試験条件

項目	試験区 1：開発システム	試験区 2：燃焼式施用	試験区 3：無施用
システム	CO <sub>2</sub> 回収・施用システム ・風量 : 80m <sup>3</sup> /h ・CO <sub>2</sub> 施用量 : 約 1.5kg-CO <sub>2</sub> /日 ・送風機出力 : 1.5kW	LPG 燃焼式 CO <sub>2</sub> 発生装置 ・型式 : KCH-20Z (桂精機製作所) ・CO <sub>2</sub> 発生量 : 0.25kg-CO <sub>2</sub> /h ・燃料消費量 : 1.67kg-CO <sub>2</sub> /h(LPG) ・消費電力 : 12W	—
CO <sub>2</sub> 施用方法	ハウス内への全体施用	—	—
CO <sub>2</sub> 施用時刻	6:00~15:00	—	—
CO <sub>2</sub> 回収時刻	15:00~翌日 6:00	—	—
CO <sub>2</sub> 濃度設定	ハウス中央の CO <sub>2</sub> 濃度が 700~800ppm になるように送風機を ON/OFF 制御。 換気用窓と連動し、換気用窓が開放で CO <sub>2</sub> 施用停止、閉鎖で CO <sub>2</sub> 施用再開。	—	—
ハウス付帯設備	加温機	型式 : KA-325 (ネボン)、風量 : 3,300m <sup>3</sup> /h、暖房能力 : 37.2kW、消費電力 290W、燃料消費量 : 4.4L/h (灯油)、温度設定 : 18°C (ハウス内中央の温度が 18°C未満で暖房運転開始、18°C以上で停止)	—
	換気用窓	ハウス内中央の温度が 28°C以上で開放、26°C以下で閉鎖	—

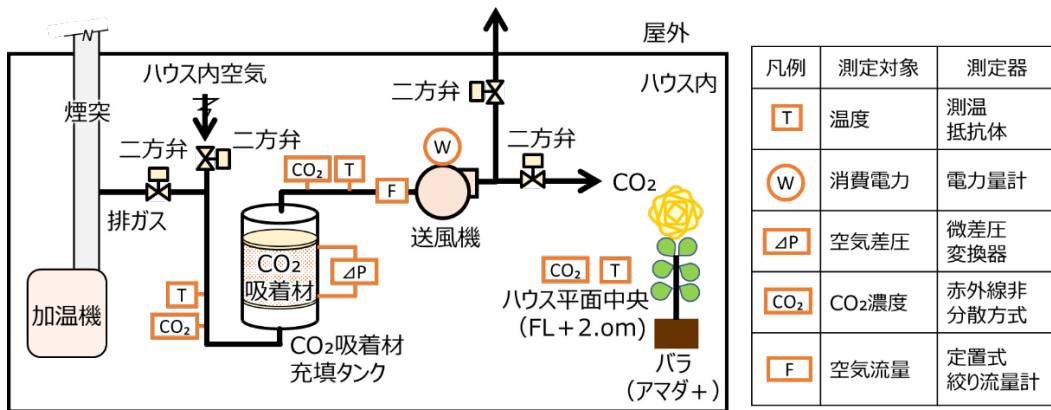


図 2 開発システムのシステムフロー(試験区 1)

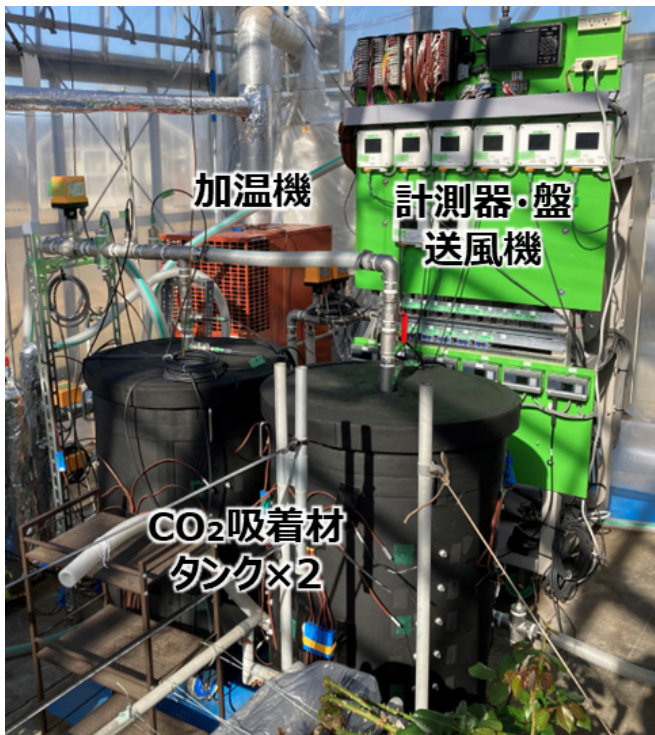


写真 1 開発システム(試験区 1)



写真 2 LPG 燃焼式 CO<sub>2</sub>発生装置(試験区 2)



写真 3 ガラスハウス(床面積 100m<sup>2</sup> × 3 棟)

## 2.2 試験結果

### 2.2.1 開発システムにおけるCO<sub>2</sub>濃度と温度

図3に開発システムにおけるCO<sub>2</sub>吸着材充填タンク入口・出口のCO<sub>2</sub>濃度の推移を、図4に試験区1~3の外気温度の違いによるハウス内のCO<sub>2</sub>濃度と温度の運転事例(上:晴天日、下:曇天日)を示す。図3下段と図4上段は同一日時の結果である。図3のCO<sub>2</sub>吸着材充填タンクの槽内差圧が0kPaの時は、開発システムが停止、約1kPaの時は運転している状態を示しており、CO<sub>2</sub>回収時の加温機からの運転信号やCO<sub>2</sub>施用時のハウス内のCO<sub>2</sub>濃度およびハウス付帯設備の換気用窓の開閉状態によって、ON/OFF運転を繰り返した。

CO<sub>2</sub>回収運転は、図3上段のグラフが示すように、17時頃から加温機が運転を開始し、加温機の運転状態に応じて送風機をON/OFF制御した。CO<sub>2</sub>回収運転直後は、約7%程度の排ガス中のCO<sub>2</sub>をCO<sub>2</sub>吸着材充填タンクに流入させてCO<sub>2</sub>を回収し、CO<sub>2</sub>回収後の出口空気は1%未満であった。その後、CO<sub>2</sub>を回収するにつれて出口空気のCO<sub>2</sub>濃度は徐々に上昇し、18時30分頃にはCO<sub>2</sub>吸着材充填タンクの入口と出口のCO<sub>2</sub>濃度が0.5%以内となり、CO<sub>2</sub>回収運転を終了した。

CO<sub>2</sub>施用運転は、図3下段のグラフおよび図4上段のグラフの試験区1のCO<sub>2</sub>濃度が示す様に、翌朝6時から開始し、ハウス内のCO<sub>2</sub>濃度が700~800ppmになるように送風機をON/OFF制御した。CO<sub>2</sub>施用開始直後は約6%程度のCO<sub>2</sub>を施用し、その後、CO<sub>2</sub>を施用するにつれて徐々にCO<sub>2</sub>濃度が低下し、12時頃になるとCO<sub>2</sub>濃度は1%未満になり、CO<sub>2</sub>施用が終了する14時頃には、0.4%程度まで低下した。

晴天日は、図4上段のグラフが示すように、6時~10時までの間、ハウス付帯設備の換気用窓が常時閉じており、試験区1、2共にハウス内のCO<sub>2</sub>濃度を700~800ppmに制御することができた。10時以降になると、日射の影響によりハウス内の温度が高くなり、28℃以上になると換気用窓が開放し、ハウス内のCO<sub>2</sub>濃度が外気相当まで低下した。開発システムは、換気用窓の開放と連動し、図3の下段グラフのCO<sub>2</sub>吸着材充填タンクの差圧が示す様にCO<sub>2</sub>施用を停止した。再び26℃以下になると、換気用窓の閉鎖に連動してCO<sub>2</sub>施用を再開し、ハウス内CO<sub>2</sub>濃度を700~800ppmに維持した。CO<sub>2</sub>施用を実施しない試験区3のCO<sub>2</sub>濃度は屋外と同程度であった。

曇天日は、図4下段のグラフが示すように、日中を通して、ハウス内の温度が28℃未満で換気用窓が常時閉鎖しており、ハウス内のCO<sub>2</sub>濃度を700~800ppm程度に維持することができた。

晴天日および曇天日ともに、ハウス内のCO<sub>2</sub>濃度や換気用窓の開閉に連動したCO<sub>2</sub>施用を実施し、換気用窓が閉鎖している間は、ハウス内のCO<sub>2</sub>濃度を700~800ppm程度に維持することができた。

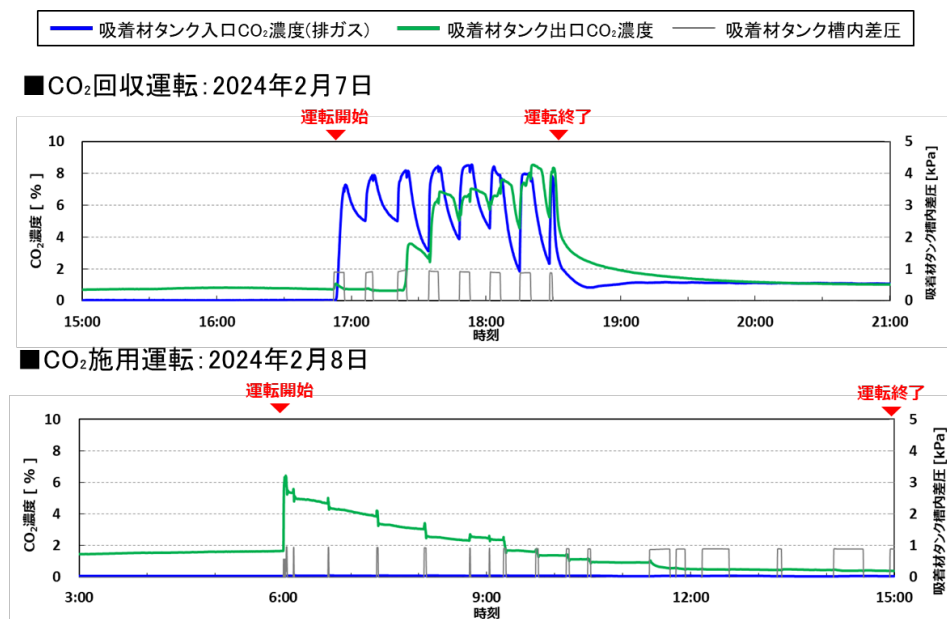


図3 開発システムにおけるCO<sub>2</sub>吸着材タンクCO<sub>2</sub>入口・出口濃度の推移

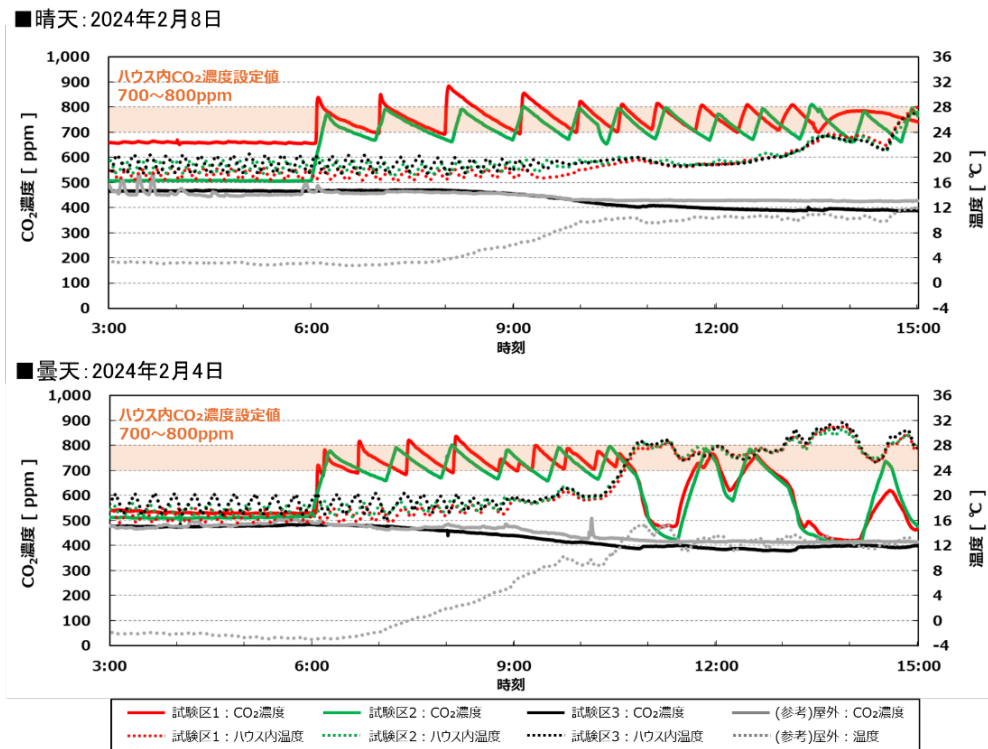


図4 ハウス内のCO<sub>2</sub>濃度および温度の運転事例

### 2.2.2 CO<sub>2</sub>施用量およびエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の比較

表2に試験区1、2におけるCO<sub>2</sub>施用量およびエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の比較を示す。試験期間中のCO<sub>2</sub>施用量の平均は、試験区1、2共に1.3kg-CO<sub>2</sub>/日と同程度であった。135日間の試験期間全体のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量は、試験区1は337kg-CO<sub>2</sub>（送風機効率0.2）、104kg-CO<sub>2</sub>（送風機効率0.65）、試験区2は175kg-CO<sub>2</sub>であった。実導入を想定している1,000m<sup>2</sup>程度以上の大規模ハウスでの送風機効率0.65の場合、試験区1は試験区2と比べてエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量を約40%削減できると想定される。

表2 試験区1、2におけるCO<sub>2</sub>施用量およびエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量の比較

		試験区1		試験区2	備考
		送風機効率補正前	送風機効率補正後		
CO <sub>2</sub> 施用量 <sup>※1</sup>	kg-CO <sub>2</sub> /日	1.3	—	1.3	試験区1はCO <sub>2</sub> 施用量、試験区2はLPG消費量より算出
エネルギー消費量 <sup>※1</sup>	電気 kWh	747	230 <sup>※2</sup>	0.07	※2 送風機効率を0.2から0.65に補正 747kW×0.2÷0.65=230kW
	LPG m <sup>3</sup>	—	—	29.2	
エネルギー起源CO <sub>2</sub> 排出量 <sup>※1</sup>	電気 kg-CO <sub>2</sub>	337	104	0.03	CO <sub>2</sub> 排出係数:0.438kg-CO <sub>2</sub> /kWh <sup>5)</sup>
	LPG kg-CO <sub>2</sub>	—	—	175	CO <sub>2</sub> 排出係数:2.99kg-CO <sub>2</sub> /kg-LPG <sup>6)</sup> 密度:2.0kg-LPG/m <sup>3</sup> -LPG
	合計 kg-CO <sub>2</sub>	337	104	175	

※1 CO<sub>2</sub>施用量は試験期間中の平均値、エネルギー消費量およびエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量は試験期間全体を示す。

### 2.2.3 切り花品質への影響

**表3**に試験区1~3における切り花品質の比較を示す。Tukeyの多重平均は、園芸分野を含めて、独立した3群以上の連続変数（長さなど）のデータを比較する際に用いられる統計解析手法の一つであり、有意差の有無によってアルファベットやn.s.を付与する。5%水準において、異なるアルファベット間（aとb）は有意差があり、同じアルファベット間（aとabもしくはbとab）およびn.s.は有意差がないことを示す。例えば、切り花長において、試験区1と試験区3は有意差があり、試験区1と試験区2は有意差がないことを示す。試験区3と比べて試験区1、2の切り花長、花高、切り花重、茎径が同程度増加し、有意差が見られた。試験区1~3において、奇形花や葉の褐色、斑点等の可視障害発生は確認されなかった。

**表3 試験区1から3における切り花品質の比較**

	切り花長 (cm)	花首長 (cm)	花高 (cm)	切り花重 (g)	節数 (節)	茎径※ (mm)
試験区1(開発システム)	81.9 a	12.8 n. s.	5.0 a	71.9 a	15.0 A	8.4 a
試験区2(燃焼式施用)	78.7 ab	12.6 n. s.	4.9 a	73.5 a	14.4 B	8.5 a
試験区3(無施用)	75.7 b	12.8 n. s.	4.7 b	59.1 b	14.0 B	7.6 b

※切り口から1cm上部を測定した。

### 3. まとめ

今回、4.5ヶ月に及ぶバラ栽培への実証試験により、以下が得られた。

- (1) CO<sub>2</sub>施用の性能に関して、開発システムはハウス内のCO<sub>2</sub>濃度変動や換気用窓の開閉と連動し、換気用窓が閉鎖している間は、CO<sub>2</sub>濃度を目標の700~800ppmに運転制御して維持することができた。
- (2) バラの品質・安全性に関して、開発システムは無施用と比べて切り花長・花高・切り花重・茎径は同程度増加し、従来燃焼施用と同等の有意差が見られた。
- (3) 地球環境に対して、開発システムは従来燃焼式施用と比べて試験期間全体のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量は約40%削減できる可能性を示した。

以上より、新たに開発したCO<sub>2</sub>回収・施用システムは、従来方式と比べてCO<sub>2</sub>施用の性能および切り花品質において遜色ないCO<sub>2</sub>施用を行うことができ、地球環境に対して優れていることを明らかにした。

### 謝辞

実証試験に関するご助言、バラの生育および品質の評価などについてご協力いただきました茨城県農業総合センターの関係部署の皆さまに深甚なる謝意を表する。

## 文 献

- 1) 農林水産省: 施設園芸をめぐる情勢(<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/sisetsu/attach/pdf/index-39.pdf>), (2025.10)
- 2) 独立行政法人: 施設園芸・植物工場をめぐる動向と課題  
([https://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/senmon/2303\\_chosa1.html#title3](https://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/senmon/2303_chosa1.html#title3)), (2023.3)
- 3) 農業総合センター園芸研究所: 「いばらキッス」は早期夜冷育苗・炭酸ガス局所施用・肥効調節で収量が増加する  
(<https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/enken/seika/yasai/ichigo/documents/18ichigo1.pdf>), (2018)
- 4) 茨城県農業総合センター園芸研究所: バラ栽培における日中の炭酸ガス施用は収益性を向上させる  
([https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/enken/seika/kaki/tanennsei/documents/h29kaki06bara\\_tansangas.pdf](https://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/enken/seika/kaki/tanennsei/documents/h29kaki06bara_tansangas.pdf)), (2017)
- 5) 環境省: 電気事業者別排出係数一覧 令和6年提出用  
([https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/r06\\_denki\\_coefficient\\_rev10.pdf](https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/r06_denki_coefficient_rev10.pdf)), (2024)
- 6) 環境省: 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 令和5年12月12日更新  
([https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/itiran\\_2023\\_rev4.pdf](https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/files/calc/itiran_2023_rev4.pdf)), (2023)
- 7) 宮下ら: 排ガスからのCO<sub>2</sub>回収・施用システムのバラ栽培への実証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.326-329, (2025).

## ABSTRACT

CO<sub>2</sub> application is carried out in greenhouses to improve crop yield and quality. However, conventional methods using fossil fuel combustion gases or liquefied CO<sub>2</sub> produced by compressing and cooling by-product gases are not good for the global environment. Aiming to develop a system that is more environmentally friendly than conventional methods, we developed a system that recovers and supplies CO<sub>2</sub> from exhaust gases using an adsorbent. In this study, a 4.5-month demonstration test was carried out on rose cultivation, and a comparison was made with combustion CO<sub>2</sub> application and no CO<sub>2</sub> application. As a results, it was confirmed that our developed system is able to supply CO<sub>2</sub> that is comparable to conventional methods in terms of CO<sub>2</sub> supply performance and cut flower quality, and it reduced energy-derived CO<sub>2</sub> emissions by approximately 40%, making it superior to conventional method in terms of the global environment.

---



# チューブ型フォトバイオリアクターによる微細藻類の屋内 連続培養とCO<sub>2</sub>固定性能の評価※

嶋原 亜土・三宅 友香・増田 正夫

## Evaluation of Indoor Continuous Cultivation and CO<sub>2</sub> Fixation Performance of Microalgae using Tube-type Photobioreactor

Ado Shigihara・Tomoka Miyake・Masao Masuda

建築物居室におけるCO<sub>2</sub>濃度の上昇は在室者の認知機能を低下させる要因であり、その抑制技術の高度化が求められている。本研究では高い光合成能を有する微細藻類を用いた屋内設置用チューブ型フォトバイオリアクター(TPBR)を構築し、CO<sub>2</sub>固定性能および培養特性を総合的に評価した。屋内環境下で得られたデータの解析により、TPBRのCO<sub>2</sub>除去効率は65～97%、CO<sub>2</sub>固定速度は0.33～0.48 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>と高い固定性能を示した。循環流量の増加は光環境と物質移動を改善し、比増殖速度の向上および倍加時間の短縮に寄与した。一方、ガラス管内壁に形成されるバイオフィームは光透過性を低下させ、比増殖速度の律速要因として作用した。また、溶存CO<sub>2</sub>濃度は光合成応答の変化を適切に捉え、運転状況の最適化の指標として有用であることが示された。さらに、TPBRは機能性のみならず視覚的な訴求性も備えており、環境インスタレーションとして建築空間への導入可能性が高いことが展示評価から確認できた。

### 1. はじめに

建物居室における温度・湿度、騒音、照度および空気清浄度は、在室者の健康および快適性に直接的な影響をおよぼす主要な環境要因である。特に空気清浄度は、室内環境の健全性を評価する上で代表的な指標であり、在室者の健康状態や快適性に直結する。これを維持するためには、汚染物質の発生源を制御することに加え、適切な換気によって室内空気を外気と入れ替えることが不可欠である。換気は、室内の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)や揮発性有機化合物(VOCs)、微粒子状物質(PM)などを希釈・排出する手段であり、空気清浄度の維持において中心的な役割を果たす。なかでもCO<sub>2</sub>濃度は換気状態の評価に用いられる主要な環境評価項目であり、その基準値は「建築物における衛生的環境の確保に関する法律(建築物衛生法、1970年公布)」により1,000ppm以下と定められている<sup>1,2)</sup>。この環境を保つのに必要な換気量の算出は、大気中のCO<sub>2</sub>濃度と人の代謝により体外に放出されるCO<sub>2</sub>量を基に行われている<sup>3)</sup>。温室効果ガス世界資料センター(WDCGG)が開示しているデータによれば、2023年時点における大気中CO<sub>2</sub>の世界平均濃度は約420ppmであり、産業革命前に280ppm程度であったCO<sub>2</sub>濃度は現在年間2ppm以上の速度で増加している<sup>4)</sup>。一方、人体の呼気に含まれるCO<sub>2</sub>濃度は、身体活動の程度に応じて変動する。例えば、換気を行わずに軽作業を実施した場合、室内のCO<sub>2</sub>濃度は約40,000ppmに達することが報告されており、これは先の大気中CO<sub>2</sub>濃度の約100倍に相当する<sup>5)</sup>。このため、多くの人が集う会議室のような気密性の高い空間において適切な換気量が設定されていなければ、建物居室内のCO<sub>2</sub>濃度は容易に基準値を超過する。CO<sub>2</sub>濃度が1,000ppmを超過すると、倦怠感や頭

※本論文は、日本農芸化学会 2025 年度大会講演論文を加筆修正したものである。

痛、集中力の低下などの症状が現れることがこれまで多数報告されており、これにより在室者の業務パフォーマンスなどに著しく影響をおよぼす可能性がある<sup>6-8)</sup>。厚生労働省が毎年度行っている特定建築物を対象とした立ち入り調査の集計結果によれば、室内のCO<sub>2</sub>濃度が基準値を超過した割合(不適率)は、1992年度から2017年度にかけて断続的に上昇傾向を示し、最大で27.7%に達した。特に学校や事務所では、不適率が他の用途に比べて高い傾向にあったが、新型コロナウイルス感染症の流行を契機に感染症対策の一環として換気を積極的に行うようになったこともあり、近年では減少傾向に転じている<sup>9)</sup>。高气密建築や省エネルギー設計が進む現代では、居室内のCO<sub>2</sub>濃度の適切な管理が健康維持と快適性確保の観点から不可欠となっている。

一方で、換気量の増大は空調機のエネルギー消費量の増大に直結することから、大気中や居室空間のCO<sub>2</sub>濃度の低減を目的とした回収・固定技術の開発が進められている。これらの技術には、物理化学的手法(固体材料を用いた吸着<sup>10)</sup>、アミン溶液による化学吸収<sup>11)</sup>)に加え、生物学的手法として高等植物<sup>12)</sup> やバイオフィリアクターを用いた微細藻類による光合成固定<sup>13)</sup>が採用されている。特に微細藻類は、陸上植物と比較して約10~50倍のCO<sub>2</sub>固定能を有することが知られており<sup>14)</sup>、光合成反応により生成される炭水化物は、近年では農業分野の肥料用途から食品分野(サプリメント等)、さらにはバイオオイルを介した熱・電力変換プロセスまで幅広く活用されている。また、CO<sub>2</sub>固定に伴って生成される酸素(O<sub>2</sub>)を含む空気は、換気用途としての利用が可能である。例えば、エアハンドリングユニット(AHU)を介して建物居室に導入することで、室内空気質の改善に寄与し得る<sup>15)</sup>。このため、建物居室空気由来のCO<sub>2</sub>を高効率に回収・濃縮し、それを微細藻類を用いた生物固定システム(フォトバイオフィリアクター)へ供給することで、O<sub>2</sub>リッチかつ低CO<sub>2</sub>濃度の空間を創出できれば、環境配慮型社会に資する新たな資源循環システムとなる可能性がある(図1)。さらに、フォトバイオフィリアクターは先端的な生物工学的機能を備えると同時に、都市空間における視覚的・環境調和的な付加価値を提供する「環境インスタレーション」として機能し得る点が特徴である。特に、微細藻類に由来する色彩動態と光の制御技術を組み合わせることで、居住者の心理的安定や癒し効果を誘発するこ

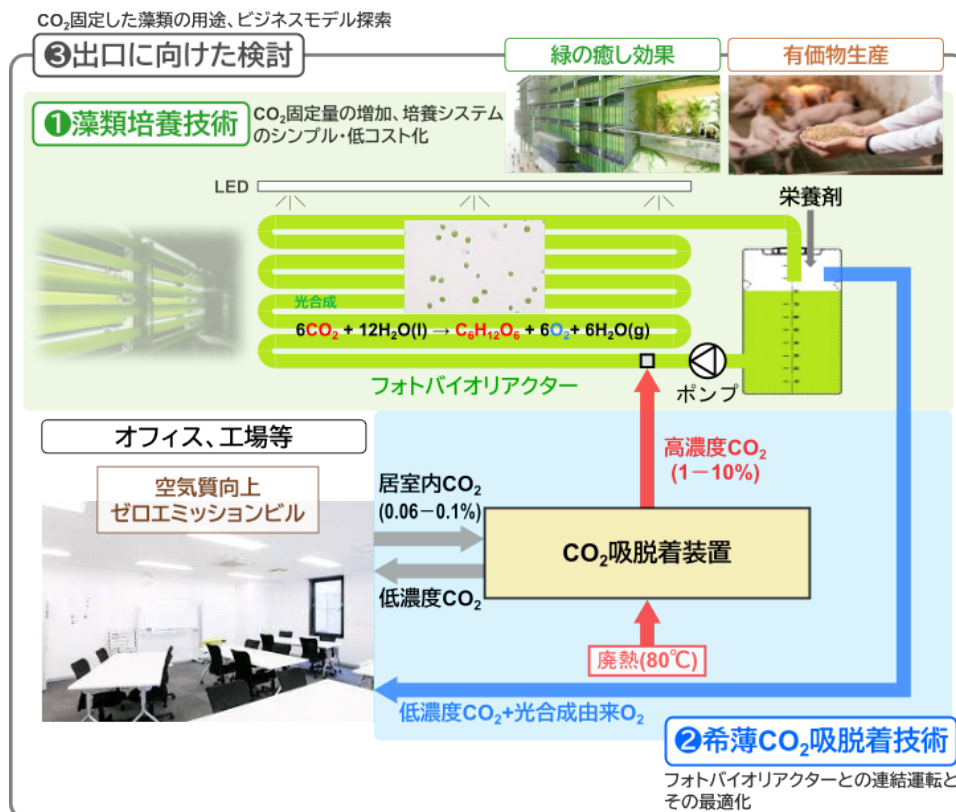


図1 システム概要図

とが期待され、Well-beingを志向した都市空間設計や室内インテリアに対して新たな価値を提供し得る。

本研究は、オフィス労働者の生産性およびウェルネスの向上と、カーボンニュートラルの達成を同時に実現する建築設備の開発を最終目的としている。現状における主要な技術課題としては、以下の三点が挙げられる。すなわち、(i)CO<sub>2</sub>固定量の増大と培養システムの簡素化・低コスト化を目指した藻類培養技術の高度化、(ii)CO<sub>2</sub>吸脱着装置とフォトバイオリアクターを連結運転するための希薄CO<sub>2</sub>吸脱着技術の確立、(iii)CO<sub>2</sub>を固定した藻類バイオマスの用途開拓および事業性を見据えた出口戦略の構築である。課題(i)に関して、前報では屋外(温室)に設置したチューブ型フォトバイオリアクター(TPBR)と高温耐性微細藻類を用いてCO<sub>2</sub>固定実験を実施し、3か月にわたる長期連続培養を達成したことを報告した<sup>16)</sup>。しかし、当該実験は温湿度・光環境・培養液水温に対する積極的な制御を行わず、太陽光の明暗サイクルおよび気象条件に依存した自然変動下で運転したため、微細藻類の倍加時間およびCO<sub>2</sub>固定速度は日々大きく変動し、安定した成長特性を得るには至らなかった。

上記課題を踏まえ、環境条件をより精密に制御可能な屋内培養へと移行し、屋外培養で顕在化した変動要因の排除を図った。屋内環境では、光強度・光スペクトル・明暗周期を任意に設定できるほか、培養液水温やCO<sub>2</sub>給気量を高精度に制御することが可能となる。これにより、微細藻類の成長特性に影響を及ぼす因子を個別に評価できるだけでなく、倍加時間およびCO<sub>2</sub>固定速度の変動要因を低減し、より安定的な成長特性の把握が可能となる。さらに、開発を進めているTPBRは、課題(iii)に関連して環境インスタレーションとしての利用も想定している。そのため、外観意匠への配慮、光環境への影響評価、室内空気質および心理的效果といった建築環境工学的観点からの検討も必要となる。したがって、屋内培養条件の確立は、微細藻類の成長管理の高度化に資するだけでなく、建築空間と調和する装置開発の基盤技術としても重要である。

本報では屋内設置用TPBRの開発に必要な基礎データを取得することを目的として、微細藻類の連続培養実験を実施し、気相CO<sub>2</sub>濃度や溶存酸素(DO)濃度、溶存CO<sub>2</sub>濃度、濁度、光量およびpHのリアルタイム計測結果から成長速度およびCO<sub>2</sub>固定速度などを算出・評価した結果について報告する。また、環境インスタレーションとしての可能性を広く紹介する目的で、2025年5月に開催された葉山芸術祭(神奈川県葉山町)においてTPBRの写真パネル等の展示を行ったので、その概要についても併せて報告する。

## 2. 試料と方法

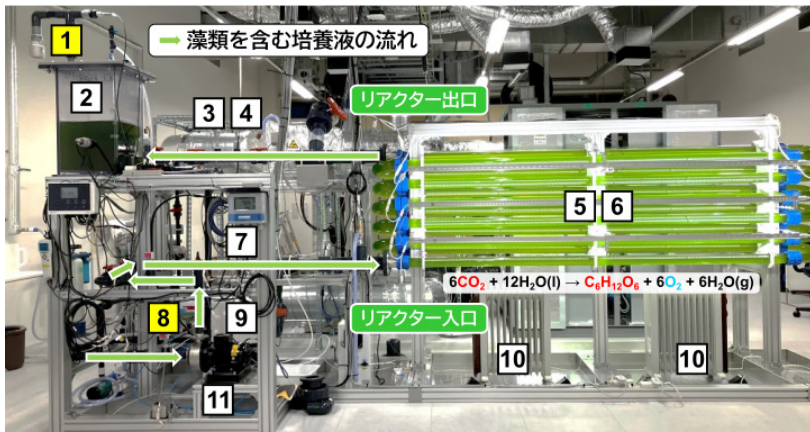
### 2.1 微細藻類株

供試微細藻類には、野外からの大規模探索により単離された*Chlorella sp.*株を採用した。本株は多様な環境条件下での培養が可能であり、かつ高効率にCO<sub>2</sub>を生物固定する能力を有する。また、光補償点が低く、強光照射を必要としない特性も有しているため、低照度環境下でも安定した光合成活性を維持できる。CO<sub>2</sub>固定化実験に必要な量の藻類培養液を確保するため、種藻の培養はオートクレーブにより滅菌処理したMC+培地(窒素、リン、硫黄およびマグネシウムを主成分とする緑藻の増殖に特化した培地)<sup>17)</sup>を用いて行い、LED照射下で滅菌フィルターを介した空気を供給しながら段階的にアップスケーリングした。

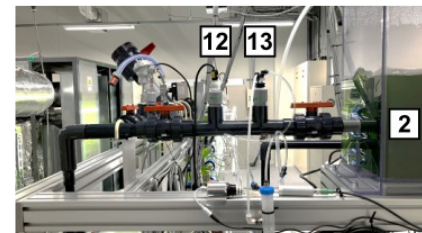
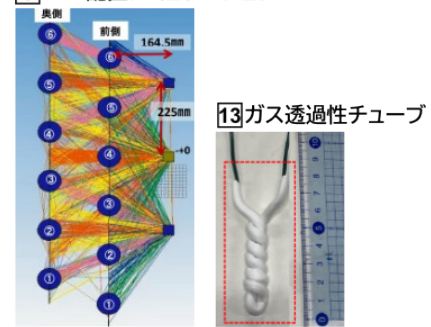
### 2.2 TPBRの製作

微細藻類の培養方法は、開放型であるオープンポンド方式やレースウェイ方式および閉鎖型である管状方式に大別され、各方式に基づくシステム設計に関する研究開発が進められている<sup>18)-20)</sup>。開放型システムは、閉鎖型システムと比較してコスト面や運用管理面で優位性を有している。その一方で、培養可能な藻種が限定されることや雑菌などの混入といったコンタミネーションリスクが高いこと、さらに曝気方式では供給したCO<sub>2</sub>の約99%が大気中に放出されるため<sup>21)</sup>、CO<sub>2</sub>利用効率が低いといった課題も存在する。現在開発しているTPBRは閉鎖型藻類培養システムの一つで、外来微生物によるコンタミネーションリスクや培養液の蒸散損失を大幅に低減できる点が特長である。また、都市部や屋内空間など設置面積に制約のある環境においても高い適性を有している。

入口 出口  
**8**と**1**の気相CO<sub>2</sub>濃度差: CO<sub>2</sub>固定量に比例



**6** LED配置シミュレーション



- |  |  |                 |  |  |
|--|--|-----------------|--|--|
| <b>1</b> 排気<br>CO <sub>2</sub> 濃度計 (CO <sub>2</sub> -outlet) | <b>2</b> 膨張タンク<br>濁度計、水位計  | <b>3</b> 培養液水温計 | <b>4</b> <b>7</b> 溶存酸素濃度計<br>4: DO-outlet. 7: DO-inlet | <b>5</b> フォトバイリアクター<br>ガラス管全長 (体積): 34 m (100 L) |
| <b>6</b> 高効率白色LED<br>24 h連続照射                                | <b>8</b> CO <sub>2</sub> / Air給気<br>CO <sub>2</sub> 濃度計 (CO <sub>2</sub> -inlet) | <b>9</b> 栄養剤タンク | <b>10</b> オイルヒーター                                      | <b>11</b> 循環ポンプ                                  |
| <b>12</b> pH計  | <b>13</b> 溶存CO <sub>2</sub> 濃度計  |                 |  |  |

図 2 屋内設置用 TPBR の構成

製作した屋内設置用 TPBR(培養液体積: 約 100 L)は、主に多段式ガラス管(外径: 65 mm、長さ: 34 m)、循環ポンプ、栄養剤タンクおよび膨張タンクから構成されており、高砂熱学イノベーションセンターのラボ棟居室内に設置した(図 2)。光源には、電力使用量が少なく植物工場において広く利用されている高発光効率型白色 LED を採用した。照度分布のシミュレーション結果に基づき、これらの LED をガラス管と平行に配置し、24 h 連続照射を行った。実験期間中の培養液水温は、主に室内空調、LED 発光熱、さらにガラス管下部に廃熱を模擬して設置したオイルヒーターからの熱供給に依存し、特別な温度制御は行わなかった。培養状況を監視するため、培養液流路および膨張タンクには図 2 に示す各種センサーを配置した。これらのセンサーから取得した連続データはプログラマブル・ロジック・コントローラー(PLC)により収集・記録され、制御プログラムに基づき培養から収穫(TPBR から培養した微細藻類を排出する工程)までのサイクル運転を自動的に繰り返し実施できるシステム構成とした。また、長運転においては、活性の低下した細胞や死細胞が核となり、ガラス管内壁面にバイオフィームが形成される傾向がある<sup>22)</sup>。このバイオフィームは管内への光透過を著しく阻害し、結果として光合成活性の低下を介して微細藻類の増殖速度を減衰させる。このような問題に対処するため、TPBR にはスポンジボールを用いた管内洗浄機構を導入した。スポンジボールは流体の圧力を利用して管内を移動しながら、内壁面に付着したバイオフィームや堆積物を物理的に除去することが可能である。この洗浄機構の実装により、ガラス管部の光透過性が維持され、培養環境の長期安定化が図られている。

### 2.3 TPBR による微細藻類の培養

TPBR と微細藻類によるCO<sub>2</sub>固定化実験は、2024 年 10 月から 2025 年 3 月にかけて実施した。培養システムの運転開始に先立ち、2.1 項で述べた種藻を所定の初期濁度となるよう純水とともに TPBR 内へ投入し、さらにホウ素や鉄などの必須微量元素を含む液肥(窒素:リン:カリウム=6:10:5)を添加して培養液とした。培養期間中は、建物居室空気からのCO<sub>2</sub>回収・濃縮を想定した約 2.5%(v/v)のCO<sub>2</sub>-空気混合ガス(入口側気相CO<sub>2</sub>濃度: CO<sub>2</sub>-inlet)を連続的に供給した。あわせて、培養液のpH、溶存酸素濃度(入口: DO-inlet

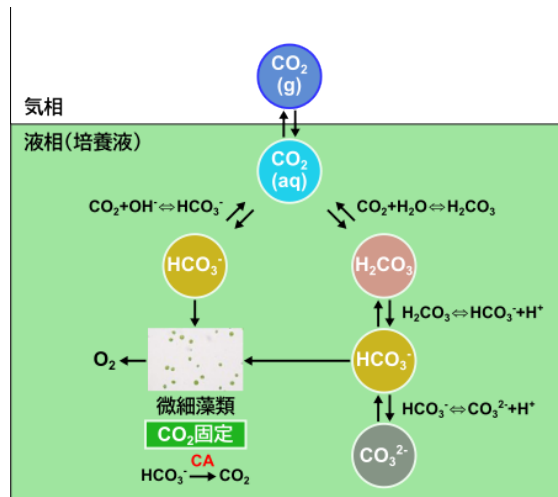


図3 微細藻類培養系におけるCO<sub>2</sub>の気液移行と無機炭素種の化学平衡モデル

／出口：DO-outlet)、溶存CO<sub>2</sub>濃度、濁度(微細藻類の増殖指標)、水温および光量、さらに膨張タンクから排出されるガスのCO<sub>2</sub>濃度(出口側気相CO<sub>2</sub>濃度：CO<sub>2</sub>-outlet)を連続的に測定した。取得したこれらのデータは、培養条件の最適化に加え、後述する溶存CO<sub>2</sub>濃度の算出およびCO<sub>2</sub>固定化効率の評価に関する基礎情報として活用した。

## 2.4 溶存CO<sub>2</sub>濃度の測定

微細藻類の光合成反応においては、培養液中に溶解しているCO<sub>2</sub>、いわゆる溶存CO<sub>2</sub>(CO<sub>2</sub>(aq))が炭素固定の基質として利用される(図3)。TPBRへ供給されるCO<sub>2</sub>ガスの濃度および流量はあくまで供給条件を示す指標に過ぎず、実際に微細藻類が利用可能な炭素量はCO<sub>2</sub>(aq)濃度によって規定される。

CO<sub>2</sub>(aq)は水和反応を介して炭酸(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)および重炭酸イオン(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)と平衡関係にあり、培養液のpHに応じて無機炭素種の分布が変化する。微細藻類はCO<sub>2</sub>(aq)の拡散的取り込みに加え、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の能動輸送(炭素濃縮機構、CCM)によりその細胞内へ無機炭素を取り込むが、いずれも最終的には炭酸脱水酵素(CA)の作用によってCO<sub>2</sub>に変換され、Rubiscoによるカルボキシル化反応に供給される<sup>23)</sup>。溶存CO<sub>2</sub>が不足すると光合成速度が律速となり、バイオマス生成速度の低下に加え、過剰光条件下では光阻害の発生リスクが増大する。そのため、CO<sub>2</sub>供給量の調整のみでは光合成の実態を適切に評価することはできず、培養液中のCO<sub>2</sub>(aq)濃度のリアルタイム測定が不可欠となる。

一般的に、CO<sub>2</sub>(aq)濃度の測定手法としては、炭酸系化学平衡に基づく計算により間接的に推定する方法<sup>24)</sup>と濃度センサーを用いて直接的に測定する方法<sup>25)</sup>の二つが広く知られている。しかし、前者は算出に必要な全炭酸濃度やアルカリ度を別途手分析によって求める必要があり、迅速な経時変化を把握するには適さない。一方、後者に関する取り組みとして、センサー部に気液平衡器を組み込み、気相と液相との間に気液平衡状態を形成した上で、平衡状態に達した気相中CO<sub>2</sub>を測定する手法が開発されている<sup>26-27)</sup>。この方法は、測定の応答性に優れ、培養プロセスにおけるCO<sub>2</sub>(aq)の動態をリアルタイムに評価する手段として有用である。そこで本手法を参考に、通気性撥水チューブ、エアポンプおよびCO<sub>2</sub>濃度計を組み合わせた閉鎖回路を構築した。撥水チューブを培養液中に浸漬すると、チューブ内部の気相と培養液との間で気液平衡が成立し、内部の気相中のCO<sub>2</sub>濃度は液相中のCO<sub>2</sub>濃度と等しくなる。この気相CO<sub>2</sub>を非分散赤外分析法(NDIR)センサーにより測定することで、液相側の溶存CO<sub>2</sub>濃度の連続的な把握が可能となる。

培養液中のCO<sub>2</sub>(aq)濃度は、気液平衡下において気相CO<sub>2</sub>の分圧( $p^*CO_2$  [Pa])に比例する(ヘンリーの法則)。TPBRのガラス管部において培養液を流動させつつ気液平衡を形成し、測定により得られた気相CO<sub>2</sub>の分圧から式(1)を用いて溶存CO<sub>2</sub>濃度(CO<sub>2</sub>(aq) [mol m<sup>-3</sup>])を算出した。

$$[CO_2]_{aq} = H \times p^*CO_2 \quad (1)$$

ここで、 $H$  [mol m<sup>-3</sup> Pa<sup>-1</sup>]はヘンリー定数であり、その値は水温( $T$  [K]、ここでは培養液の水温)の関数として知られているため、式(2)に示す経験式<sup>28)</sup>を用いて水温補正を行った。

$$\ln H = -58.0931 + 90.5069 \times \frac{100}{T} + 22.294 \times \ln\left(\frac{T}{100}\right) \quad (2)$$

なお、CO<sub>2</sub>濃度計の指示値は、湿潤ガス中のCO<sub>2</sub>モル分率に基づく湿潤ガス基準の表記上のCO<sub>2</sub>分圧( $pCO_2$  [Pa])であり、乾燥ガス基準の実効分圧とは異なる。したがって、ヘンリーの法則へ適用するためには、式(3)のように大気圧( $P$  [Pa])および飽和水蒸気圧( $e$  [Pa])を用いた補正が必要となる。

$$p^*CO_2 = (P - e) \times pCO_2 \quad (3)$$

ただし、 $e$ は $T$ に依存するものの、通常の培養条件(20~30°C)においては $P$ のおよそ1~3%程度にとどまるため、補正項としての寄与は相対的に小さい。したがって、式(3)中の $p^*CO_2$ は下記式(4)のように、

$$p^*CO_2 \approx pCO_2 \quad (4)$$

と近似することができ、これを式(1)に代入すると

$$[CO_2]_{aq} = H \times pCO_2 \quad (5)$$

が得られる。

## 2.5 微細藻類の生長測定

培養液中の藻体濃度は、懸濁物質による光散乱量として測定される濁度と正の相関を示す。本研究では、この関係を利用し、濁度測定値から藻体濃度を迅速に推定する手法を採用した<sup>16),29)</sup>。また、微細藻類の増殖特性を評価する上で主要なパラメータである比増殖速度( $\mu$  [h<sup>-1</sup>])は、対数増殖期における藻体量の指数関数的増加を前提とし、式(6)に基づいて算出した<sup>30)</sup>。

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}{t_2 - t_1} \Leftrightarrow N_2 = N_1 e^{\mu(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

ここで、 $N_1$ および $N_2$ はそれぞれ対数増殖期における時刻 $t_1$  (h)および $t_2$  (h)における藻体濃度(g L<sup>-1</sup>)である( $N_2 > N_1$ ,  $t_2 > t_1$ )。さらに、上式において藻体濃度が2倍、すなわち $N_2/N_1=2$ となるのに要する時間を倍加時間( $t_d$  [h])と定義すると、これを式(7)で表すことができる。

$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (7)$$

微細藻類培養における生産性を評価するため、バイオマス生産能力( $P_{Biomass}$  [g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>])をその指標として用い、式(8)を用いて算出した。

$$P_{Biomass} = \frac{N_t - N_0}{t - t_0} \quad (8)$$

ここで、 $N_t$ および $N_0$ はそれぞれ培養時間 $t$  (d)および培養初期時間 $t_0$  (d)における藻体濃度(g L<sup>-1</sup>)である。さらに、炭素固定能を評価するためのCO<sub>2</sub>固定速度( $FR_{CO_2}$  [g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>])は、式(9)のように表すことができる<sup>31)</sup>。

$$FR_{CO_2} = P_{Biomass} \times f_c \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_c}\right) \quad (9)$$

ここで、 $f_c$  [% (w/w)]は元素分析計で測定した藻体中の炭素含有率、 $M_{CO_2}$  [g mol<sup>-1</sup>]および $M_c$  [g mol<sup>-1</sup>]はそれぞれCO<sub>2</sub>および炭素の分子量である。なお、微細藻類によるCO<sub>2</sub>の利用特性を評価するため、TPBRのCO<sub>2</sub>-inletおよびCO<sub>2</sub>-outletを連続的に測定し、CO<sub>2</sub>除去効率( $RE_{CO_2}$  [%])を式(10)のように評価した<sup>32)</sup>。

$$RE_{CO_2} = \left(1 - \frac{CO_{2-outlet}}{CO_{2-inlet}}\right) \times 100 \quad (10)$$

## 3. 結果と考察

### 3.1 微細藻類の生長およびCO<sub>2</sub>固定

図4に、微細藻類の培養期間中に連続取得した各種モニタリング項目の経時変化の一例を示す。本検討

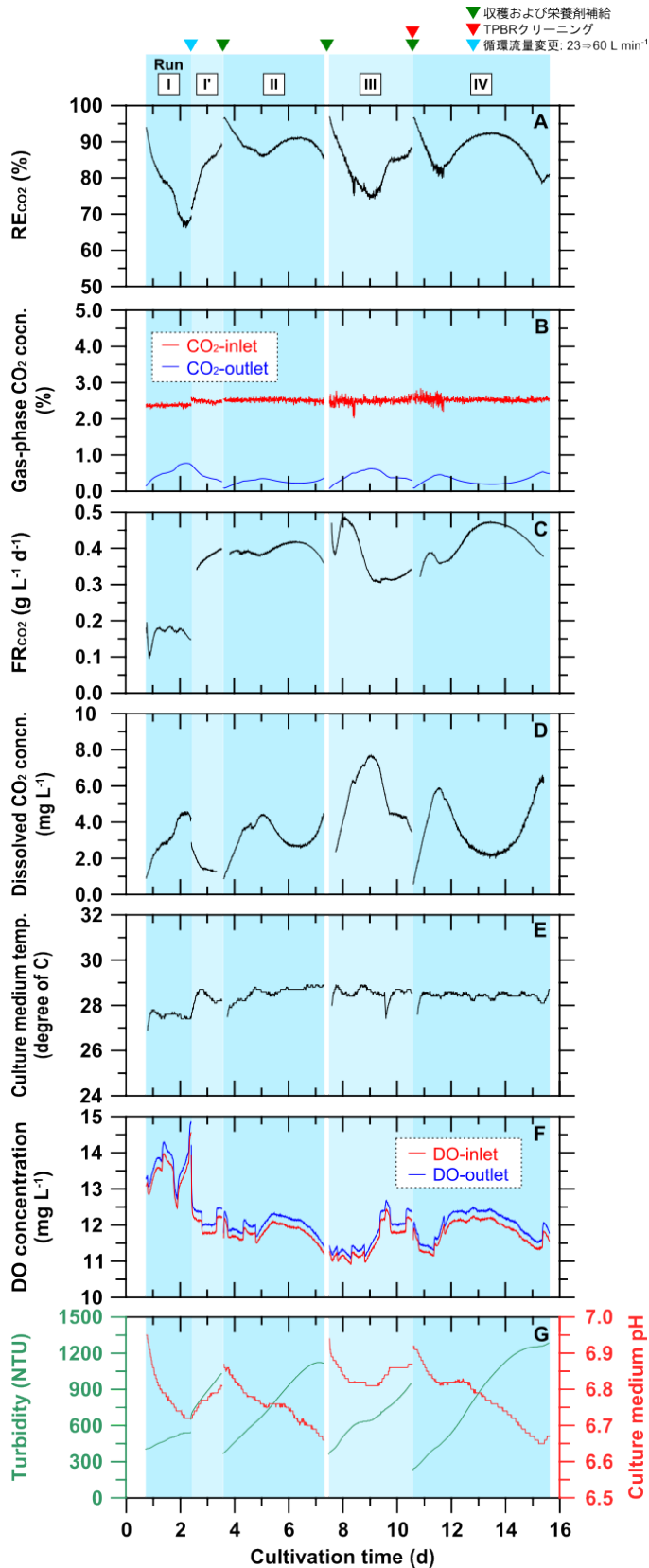


図4 培養期間中のCO<sub>2</sub>除去効率(A)、気相CO<sub>2</sub>濃度(B)、CO<sub>2</sub>固定速度(C)、溶存CO<sub>2</sub>濃度(D)、培養液水温(E)、溶存酸素濃度(F)、濁度および培養液pH(G)の変化

では、16日間で5系列(Run I、I'およびII~IV)のCO<sub>2</sub>固定実験を実施した。なお、Run Iを除き、各系列の実験終了時には、TPBRからの収穫および栄養剤の補給を実施した。図4Eより、いずれの実験系においても培養液の水温は期間を通じて大きな変動は見られず、およそ28±1°Cで安定して推移した。CO<sub>2</sub>-空気混合ガスを一定流量で連続給気した条件下では、気液二相流によるCO<sub>2</sub>自然溶解が進行するため、培養液pHは全系列で低下傾向を示した。一方、濁度は培養時間の経過とともに増加し、特に増殖期には指数関数的な上昇が確認された(図4G)。また、循環流量を23 L min<sup>-1</sup>で運転したRun Iでは濁度増加率が低く推移したが、流量を60 L min<sup>-1</sup>へ増加させたRun I'では増加率が明確に改善した。これは、循環促進によりTPBRのガラス管部における光強度分布が均一化され、細胞が高光領域と低光領域を高速に移動することで光阻害を回避しつつ光合成効率が向上したことが主要因と考えられる。さらに、流量増加により液側境界膜が薄くなり、CO<sub>2</sub>供給や溶存酸素除去、栄養塩輸送といった物質移動が改善され、光合成および代謝活動が阻害されにくくなったことも寄与している。これらの複合的効果により、循環流量の増加は培養効率向上に有効に作用したと考えられる。なお、TPBRにおける入口・出口間の溶存酸素濃度差( $\Delta C_{DO} = DO_{\text{outlet}} - DO_{\text{inlet}}$ )は一貫して正值を示したことから(図4F)、光合成反応に伴うO<sub>2</sub>生成が継続的に生じていたことに加えて、気液間のガス交換プロセスが良好に機能していたことが示された。

気相中のCO<sub>2</sub>濃度の変化から算出したRE<sub>CO2</sub>は65~97%と高く(図4A、B)、このことはTPBRへ給気されたCO<sub>2</sub>の大部分が微細藻類の光合成活性によりCO<sub>2</sub>が吸収、固定されたことを示唆している。また、藻体濃度と炭素含有率に基づくFR<sub>CO2</sub>は0.33~0.48 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>であり(図4C)、これはShaikhら(2016)による既報値<sup>33)</sup>と比べ3倍以上高い固定性能であった。

Run IIIにおいては、Run Iを除く他の系列と比較して濁度の増加が明らかに抑制されており、これに伴いFR<sub>CO2</sub>も相対的に低下した。実験後の目視による観察から、ガラス管内壁に形成されたバイオフィームが光透過を阻害しており、これが主たる要因であると判断された。光環境の劣化は微細藻類の光合成速度を直接的に制限するため、

表 1 各実験系列における比増殖速度および倍加時間

Exp. No.	$\mu$ (d <sup>-1</sup> )	$t_d$ (d)	$t_d$ (h)
Run I	0.20	3.4	82
Run I'	0.43	1.6	38
Run II	0.40	1.7	41
Run III	0.35	2.0	48
Run IV	0.53	1.3	31

増殖速度の抑制に寄与する<sup>34)</sup>。実際、Run IIIの比増殖速度は Run IIと比較して12.5%ほど低い値を示したが、ガラス管内壁の洗浄後に実施した Run IVでは増殖速度および濁度上昇挙動が顕著に改善した(表1)。これらの結果は、TPBR を用いた長期連続培養において光透過性の維持がCO<sub>2</sub> 固定性能の安定確保に不可欠であることを示唆するものであり、運転管理として定期洗浄の実施あるいは材料選定や流体設計による付着抑制機構の導入が必要であると考えられる。

### 3.2 溶存CO<sub>2</sub>濃度と増殖挙動の関係

Run IIおよびRun IVでは、培養液pHがそれぞれ6.76および6.82を下回った時に濁度が急激に上昇し、これと同時にCO<sub>2</sub>(aq)濃度が低下する挙動が確認された(図4Dおよび図5)。CO<sub>2</sub>(aq)は微細藻類の光合成における主要な無機炭素源であることから、当該時期には光合成活性が増大し、炭素同化速度がCO<sub>2</sub>の供給速度を上回った可能性が高い。このことは、CO<sub>2</sub>(aq)が増殖の律速因子となる局面が存在することを示唆している。一方、Run IIIでは同様の関係は明瞭に認められず、濁度増加とCO<sub>2</sub>(aq)の動態が一致しなかった。これは3.1項で述べたように、ガラス管内壁に形成されたバイオフィームによる光透過性の低下が光合成速度を制限し、CO<sub>2</sub>(aq)消費が頭打ちとなったためと推察される。以上の結果から、CO<sub>2</sub>(aq)を連続的に監視することは、光伝達阻害や増殖低下、炭素供給不足などの「サブオプティマル条件」を早期に検知する指標として有用であると考えられる。特に、光合成活性が高い条件ではCO<sub>2</sub>(aq)濃度の急減が増殖促進の兆候となり得る一方、光制限下では増殖遅延の兆候として読み取れるため、運転状態の把握および制御最適化において重要なパラメータとなる。

### 3.3 倍加時間

表1に示す通り、比増殖速度から算出した倍加時間は、Run IVにおいて最短値である31hを示した。一般的に、倍加時間が短い微細藻類は、単位時間当たりのCO<sub>2</sub>固定速度が高くなる傾向にある<sup>35)</sup>。これは、急速な細胞分裂に伴う炭素同化需要の増大に応じて、Rubiscoを含むカルビン-ベンソン回路関連酵素群およびCCMの発現が誘導されるためである。その結果、カルビン回路の炭酸固定反応の回転率が向上し、細胞あたりの無機炭素取り込みフラックスが増大する<sup>36)</sup>。本研究においてTPBRのCO<sub>2</sub>固定速度をより一層高めるには、倍加時間を20h、さらにはその先の10h程度へと短縮することが必要となる(図6)。倍加時間の改善に寄与する因子としては、ガラス管内径や循環流量、培養液水温などが挙げられ、照射分布の均質性、CO<sub>2</sub>の溶解・輸送プロセスならびに培養液の流れ方に直接的な影響をおよぼす。これらは、光合成速度および物質移動速度を規定する主要な操作因子であることから、適切な制御や設計変更により増殖環境の最適化が期待できる。今後は、各因子について定量的な感度解析を進め、システム応答を明らかにした

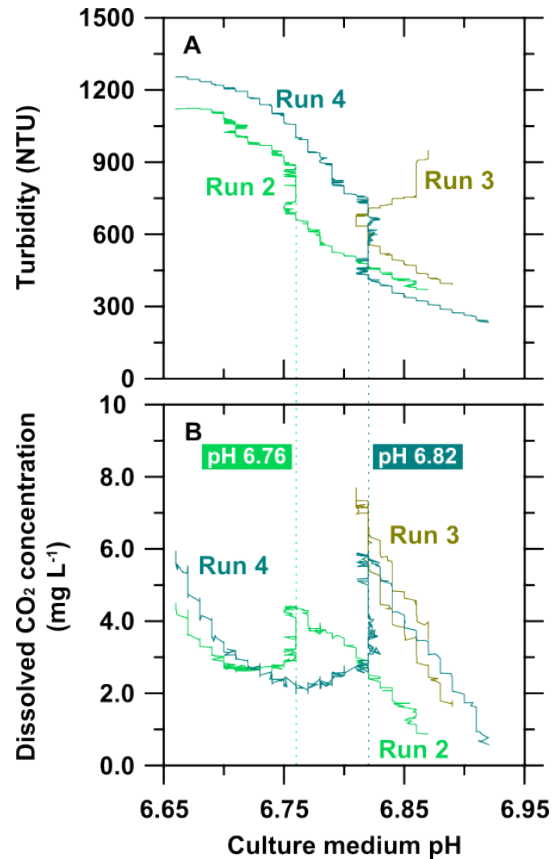


図5 培養液pHに対する濁度(A)および溶存CO<sub>2</sub>濃度(B)の関係

上で、運転条件と装置形状の最適組み合わせを探索する必要があり、このことが CO<sub>2</sub> 固定性能と運転安定性を両立した高効率バイオリアクターの構築につながると考えられる。

### 3.4 環境インスタレーション – 葉山芸術祭での展示 –

本研究で開発中の TPBR は、単なる機能的装置としての位置づけにとどまらず、空間的価値を付与し得る環境アートとしての潜在性も有している。そこで、2025 年 5 月 3 日から 6 日にかけて神奈川県葉山町で開催された「第 33 回葉山芸術祭」において、環境インスタレーションとして TPBR の写真パネルと動画展示を行った(写真 1)<sup>37)</sup>。その結果、来場者からは「観葉植物の代替として設置したい」「海外市場でも受容性が高いのではないか」など、意匠性や存在感に対する肯定的評価が多数寄せられ、TPBR が一般市民の美的感性にも訴求し得ることが確認された。また、来訪者の中には大学研究者を含む専門家もおり、学術分野との新たなネットワーク形成につながった点も成果として挙げられる。以上より、開発中の TPBR は環境技術と芸術性を融合させることで社会的受容性を高め、導入障壁を低減し得る多面的価値を有することが示唆された。

### 3.5 今後の課題

TPBR に関する今後の課題として、光環境や循環流量、CO<sub>2</sub> 供給条件といった主要な操作因子が微細藻類の生育挙動に及ぼす影響を整理し、長期的な培養性能を維持するための最適運転条件を確立することが挙げられる。また、ガラス管内壁に形成されるバイオフィームは光透過性を低下させ培養効率を阻害するため、付着抑制技術や洗浄手法の改良によって光学特性を安定して維持することも求められる。さらに、CO<sub>2</sub>(aq)を含む各種連続測定データを統合し、培養状態の変動を迅速に把握・対応できる監視・制御技術の構築が重要となる。

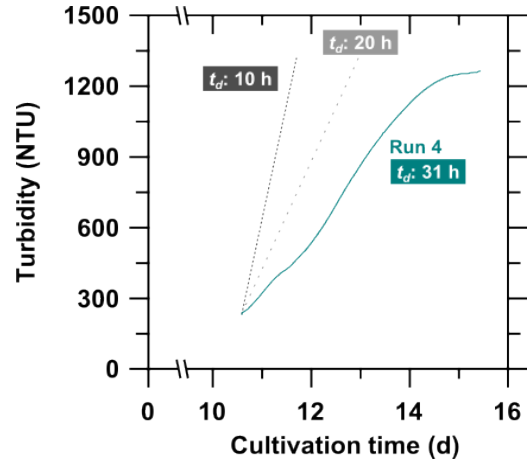


図 6 各倍加時間に対する藻類増殖曲線  
(倍加時間 10 h および 20 h は予測曲線)

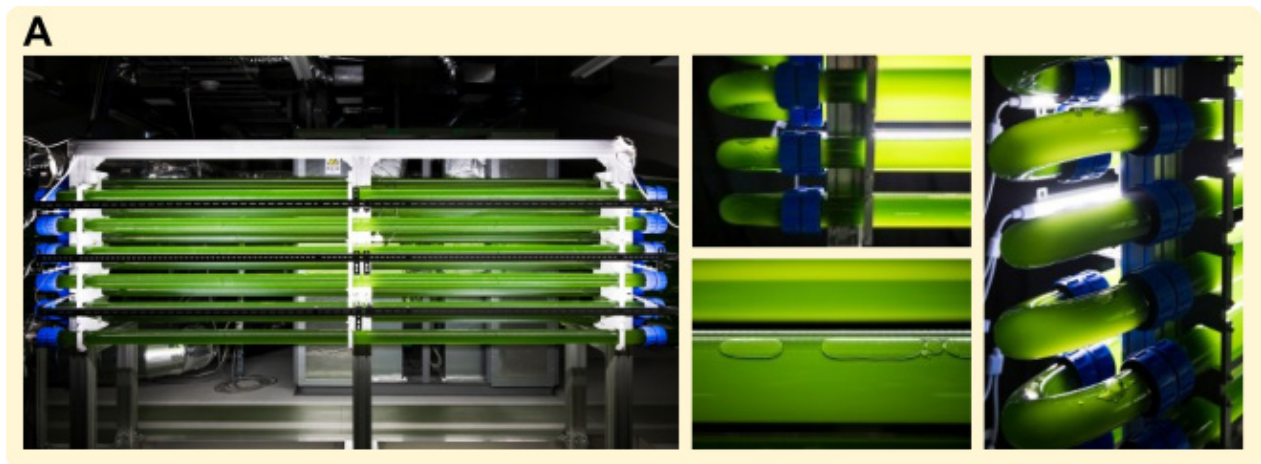


写真 1 葉山芸術祭における TPBR の写真(A)と微細藻類(B)の展示および動画の投影(C)

一方で、微細藻類によって固定される CO<sub>2</sub> 量を上回るエネルギーが培養工程やその後の脱水・濃縮工程において消費され、結果としてプロセス全体の CO<sub>2</sub> 排出量が増加するようであれば、本来の環境負荷低減という目的は達成されない。1990 年代以降、微細藻類を用いた高付加価値物質の生産を目的とした培養施設が世界各地で展開されており、これらは資源循環の促進およびバイオ産業の持続的な発展に資する重要な技術として位置づけられている。しかしながら、その評価指標は目的生産物の収率および経済性に偏重し、CO<sub>2</sub> 収支といった観点十分に考慮されていない場合が多い。したがって、今回のようなシステム全体の環境負荷低減効果を定量的に評価するためには、ライフサイクルアセスメント(LCA)の導入が不可欠である。特に、CO<sub>2</sub> 固定量とプロセス全体における CO<sub>2</sub> 排出量とのバランスを明確にすることが本システムを確立する上で重要な指標となる。このような背景から、CO<sub>2</sub> 収支の改善に寄与する培養工程におけるエネルギー源の選定(再生可能エネルギーの導入など)や脱水・濃縮工程における省エネ化についても、現在検討を進めている。さらに、収穫により得られた CO<sub>2</sub> 固定後の微細藻類バイオマスについては、低エネルギー消費での有効利用を目指し、具体的な用途の検討を進めている。その一環として、障壁の低い土壌改良材や肥料、さらには飼料への適用可能性に着目し、その有効性を評価する実験を計画、準備しているところである。一方で、環境インスタレーションとしての利用可能性が示唆された点を踏まえ、建築空間との調和性や意匠的価値を定量的に評価する枠組みを構築し、機能要件とデザイン性を統合した装置設計へ発展させることも重要な検討課題の一つである。

#### 4. おわりに

本研究では、オフィス労働者の生産性・ウェルネス向上とカーボンニュートラルを両立する建築設備の開発を念頭に、優れた光合成能を持つ微細藻類と独自設計した TPBR を用いて、屋内における連続培養および CO<sub>2</sub> 固定化技術の確立に必要な基礎データの取得およびその解析を行った。その結果、TPBR における CO<sub>2</sub> 除去効率は 65~97%、CO<sub>2</sub> 固定速度は 0.33~0.48 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> に達し、高い CO<sub>2</sub> 固定性能が確認された。また、循環流量の増加は光環境と物質移動を改善し、比増殖速度の向上と倍加時間の短縮に寄与した。一方で、ガラス管内壁に形成されるバイオフィームは光透過性を阻害し、成長および固定性能を著しく低下させることが示され、長期安定運転には適切な洗浄・付着抑制技術が不可欠である。さらに、CO<sub>2</sub>(aq)のリアルタイム測定により、光合成活性の変動や増殖律速の生じる条件を容易に把握できることが示され、運転最適化の有効な指標となることが明らかとなった。一方で、TPBR は環境インスタレーションとしての視覚的価値も有し、屋内・都市空間への意匠的統合が可能であることが展示評価により示すことができた。

以上の知見より、TPBR は微細藻類による CO<sub>2</sub> 固定の高効率化と、建築空間における環境価値の創出を同時に達成し得る技術基盤として有望であることが示された。今後はこれらの技術的課題を克服しつつ、設置場所を踏まえた運用モデルの構築や LCA に基づく環境負荷の定量的評価が実用化に向けた重要なステップとなる。本システム自体は、CO<sub>2</sub> 濃度の低い環境を求める建築用途、特に教育施設や宿泊施設などにおいて導入ニーズが見込まれており、国際的な動向を注視しながら開発と展開を進めていきたいと考えている。

## 文 献

- 1) 東賢一：室内環境中における二酸化炭素の吸入曝露によるヒトへの影響, 室内環境, 21(2), 113-120(2018).
- 2) 原史朗：室内 CO<sub>2</sub> 濃度を換気の指標として利用する研究, [https://www.caicm.go.jp/action/survey/covid19-ai.jp/ja-jp/presentation/2020\\_rq2\\_infection\\_prevention/articles/article010/index.html](https://www.caicm.go.jp/action/survey/covid19-ai.jp/ja-jp/presentation/2020_rq2_infection_prevention/articles/article010/index.html)
- 3) 公益社団法人空気調和・衛生工学会：室内空気質のための必要換気量, 換気設備委員会・室内空気質小委員会委員会成果報告書参考資料 4(2016).
- 4) 気象庁 HP : [https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2\\_trend.html](https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)
- 5) 落合のり子, 山下一也, 阪本功, 濱村美和子, 福澤陽一郎, 橋本由里, 松岡文字, 恩田 晴夫：講義室利用時の二酸化炭素濃度と空気環境改善対策, 島根県立大学短期大学部出雲キャンパス研究紀要, 4, 39-45(2010).
- 6) 高橋正好：二酸化炭素と人体, 安全工学, 37(5), 352-357(1998).
- 7) Allen J. G., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J., Spengler J.D.: Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of Green and Conventional office environments. *Environ. Health Perspect.*, 124(6), 805-812(2016).
- 8) 小崎智照, 松澤七海, 百岳香奈：高濃度の二酸化炭素が覚醒と精神作業能へ与える影響, 人間工学, 58(2), 76-83(2022).
- 9) 鍵直樹, 金勲, 下ノ蘭慧, 中野淳太, 海塩渉: 令和 5 年度厚生労働科学研究費補助金 (健康安全・危機管理対策総合研究事業) 分担研究報告書 1. 特定建築物の報告統計, 13-17(2024).
- 10) Wang J., Huang L., Yang R., Zhang Z., Wu J., Gao Y., Wang Q., O'Hare D., Zhong Z.: Recent advances in solid sorbents for CO<sub>2</sub> capture and new development trends. *Energy Environ. Sci.* 7(11), 3478–3518(2014).
- 11) Ooi Z.L., Tan P.Y., Tan L.S., Yeap S.P.: Amine-based solvent for CO<sub>2</sub> absorption and its impact on carbon steel corrosion: A perspective review. *Chin. J. Chem. Eng.* 28(5), 1357–1367(2020).
- 12) Shishegaran A., Shishegaran A., Najari M., Ghotbi A., Boushehri A.N.: Effect of plants on an environment with high carbon dioxide concentration. *Cleaner Eng. Technol.* 1, 100002(2020).
- 13) Alami A.H., Alasad S., Ali M., Alshamsi M.: Investigating algae for CO<sub>2</sub> capture and accumulation and simultaneous production of biomass for biodiesel production. *Sci. Total Environ.* 759, 143529(2021).
- 14) Batista A.P., Ambrosano L., Graça S., Sousa C., Marques P.A., Ribeiro B., Botrel E.P., Neto P.C., Gouveia L.: Combining urban wastewater treatment with biohydrogen production—an integrated microalgae-based approach. *Bioresour. Technol.* 184, 230–235(2015).
- 15) Do C.V.T., Dinh C.T., Dang M.T., Tran T.D., Le T.G.: A novel flat-panel photobioreactor for simultaneous production of lutein and carbon sequestration by *Chlorella sorokiniana* TH01. *Bioresour. Technol.* 345, 126552(2022).
- 16) 嶋原亜土, 三宅友香, 増田正夫, 増田篤稔：チューブ型フォトバイオリクターを用いた微細藻類による CO<sub>2</sub> 固定化技術の開発, 高砂熱学イノベーションセンター報, 38, 133-141(2025).
- 17) 瀧本善之, 村上仁一, 山田文博：特開平 10-155478(1998).
- 18) Borowitzka M.A.: Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *J. Biotechnol.* 70, 313-321(1999).
- 19) Richardson J.W., Johnson M.D., Outlaw J.L.: Economic comparison of open pond raceways to photo bioreactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Res.* 1, 93-100(2012).
- 20) Reboloso Fuentes M.M., Garcia Sánchez J.L., Fernández Sevilla J.M., Acien Fernandez F.G., Sánchez Pérez J.A., Molina Grima E.: Outdoor continuous culture of *Porphyridium cruentum* in a tubular photobioreactor: quantitative analysis of the daily cyclic variation of culture parameters. *J. Biotechnol.* 70, 271–288(1999).
- 21) Padhi D., Kashyap S., Mohapatra R.K., Dineshkumar R., Nayak M.: Microalgae-based flue gas CO<sub>2</sub> sequestration for cleaner environment and biofuel feedstock production. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 32, 13539–13565(2025).
- 22) Giuseppe Torzillo G., Zittelli G.C.: Tubular Photobioreactors in Algal Biorefineries, 187-212(2015).
- 23) Spalding M.H.: Microalgal carbon-dioxide-concentrating mechanisms: *Chlamydomonas* inorganic carbon transporters. *J. Exp. Bot.* 59(7), 1463-1473(2008).

- 24) 藤井智康, 駒井幸雄, 藤原建紀: 大阪湾沿岸域の二酸化炭素の挙動, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 67(2), 911-915(2011).
- 25) 須藤雅夫, 市川祥久, 居波永治, Irvan, 岡島敬一, 鈴木款, 皆川昌幸, 金森敏幸: 海洋二酸化炭素の連続計測のための光ファイバーセンサーの開発, 日本海水学会誌, 54(1), 21-29(2000).
- 26) 片山博之, 烏谷隆: 疎水性多孔質膜を用いた小型海洋溶存二酸化炭素分圧計測装置の開発, 九州大学応用力学研究所報, 17, 53-63(1999).
- 27) 遠藤徹, 田中俊之, 大谷壮介, 藤田哲朗, 矢持進: 通気性撥水チューブを用いた水中二酸化炭素濃度の計測手法の有効性検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 69(2), 1251-1255(2013).
- 28) Weiss R.F. Carbon dioxide in water and seawater. The solubility of nonideal gas. Mar. Chem. 2, 203-215(1974).
- 29) 工業用水・工場排水試験方法-第1部一般理化学試験方法 JIS K 0102-1 14.1, (2021).
- 30) 小西正朗, 堀内淳一: 細胞の増殖を捉えるー計測法から比速度算出までー, 生物工学会誌, 93(3), 149-152(2015).
- 31) Do C.V.T., Nguyen N.T.T., Tran T.D., Pham M.H.T., Pham T.Y.T.: Capability of carbon fixation in bicarbonate-based and carbon dioxide-based systems by *Scenedesmus acuminatus* TH04. Biochem. Eng. J. 166, 107858(2021).
- 32) Pruvost J., Le Gouic B., Cornet J.-F.: Kinetic modeling of CO<sub>2</sub> biofixation by microalgae and optimization of carbon supply in various photobioreactor technologies. ACS Sustain. Chem. Eng. 10(38), 12826-12842(2022).
- 33) Razzak S.A., Ali S.A.M., Hossain M.M., Nzila Mouanda A.: Biological CO<sub>2</sub> fixation using *Chlorella vulgaris* and its thermal characteristics through thermogravimetric analysis. Bioprocess Biosyst. Eng. 39, 1651-1658(2016).
- 34) Wang S.-K., Stiles A.R., Guo C., Liu C.-Z.: Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. Eng. Life Sci. 14, 550-559(2014).
- 35) Sanaye Mozaffari Sabet N., Golzary A.: CO<sub>2</sub> biofixation at microalgae photobioreactors: hydrodynamics and mass transfer study. Int. J. Environ. Sci. Technol. 19, 11631-11648(2022).
- 36) Hwangbo K., Lim J.-M., Jeong S.-W., Vikramathithan J., Park Y.-I., Jeong W.-J.: Elevated inorganic carbon concentrating mechanism confers Tolerance to high light in an arctic *Chlorella sp.* ArM0029B. Front. Plant Sci. 9, 590(2018).
- 37) 葉山芸術祭 HP : <https://hayama-artfes.com/?program=2025ep46>

## ABSTRACT

Elevated CO<sub>2</sub> concentrations in indoor environments impair the cognitive performance of occupants therein; therefore, advanced technologies that suppress such increases are required. Herein, utilizing microalgae with a high photosynthetic capacity, we developed an indoor tube-type photobioreactor (TPBR) and comprehensively evaluated of its CO<sub>2</sub> fixation performance and cultivation characteristics. Data analyses under indoor environmental conditions demonstrated that the TPBR achieves a CO<sub>2</sub> removal efficiency of 65–97% and CO<sub>2</sub> fixation rate of 0.33–0.48 g L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, indicating high carbon-fixation capability. Increasing the circulation flow rate yields improved light environment and mass transfer, resulting in enhanced specific growth rates and shortened doubling times. Conversely, biofilm formation on the inner surface of the glass tubes reduced the light transmittance and acts as a limiting factor for the specific growth rate. Moreover, dissolved CO<sub>2</sub> concentration effectively captured changes in the photosynthetic response, demonstrating the utility of the TPBR as an indicator for optimizing operational conditions. Finally, in addition to its functional performance, the TPBR exhibited strong visual appeal, and exhibition-based evaluations confirmed its high potential for integration into architectural spaces as an environmental design element.

高砂熱学イノベーションセンター報 No. 39 2025

発行日 2026年4月

発行所 高砂熱学イノベーションセンター  
〒300-2417 茨城県つくばみらい市  
富士見ヶ丘2-19

TEL：0297-55-1337

発行者 山本 一郎







# 高砂熱学

---

高砂熱学イノベーションセンター	〒300-2417 茨城県つくばみらい市富士見ヶ丘2-19	☎0297(55)1337
本社	〒160-0022 東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8212
東京本店	〒160-0022 東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8221
横浜支店	〒220-8126 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-2-1(横浜ランドマークタワー)	☎045(224)1570
関信越支店	〒330-0854 埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-10-16(シーノ大宮ノースウイング)	☎048(637)3500
東北支店	〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町2-4-1(青葉通パークビルディング)	☎022(227)9552
札幌支店	〒060-0003 北海道札幌市中央区北3条西4-1-1(日本生命札幌ビル)	☎011(261)2531
関西支店	〒530-0013 大阪府大阪市北区茶屋町19-19(アプローズタワー)	☎06(6377)2800
名古屋支店	〒450-6037 愛知県名古屋市中村区名駅1-1-4(JRセントラルタワーズ)	☎052(582)8400
九州支店	〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前2-19-24(大博センタービル)	☎092(431)8050
中四国支店	〒730-0017 広島県広島市中区鉄砲町10-12(広島鉄砲町ビルディング)	☎082(221)2871
エンジニアリング事業部	〒160-0022 東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8230