ISSN 2189-2792

No.38

2024

高砂熱学 イノベーションセンター報

小特集「宇宙への挑戦」

高砂熱学

高砂熱学イノベーションセンター報
No. 38　2024
目　　次

小特集「宇宙への挑戦」

【巻頭言】

熱学が宇宙のフロンティアを拓く　（宇宙航空研究開発機構　津田雄一）　1

【小特集　宇宙への挑戦】

1. 月面実証用水電解装置の開発
（津村柊吾・加藤敦史・馬場大輔・内田浩基・武田健太郎・岡尭志・森田健）　3

2. 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
（柴田克彦・齋藤雅浩・友部俊之・木村真一）　13

3. 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
（内田浩基・鹿山雅裕）　23

【受賞記念】

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
（谷野正幸・鎌田美志・川上理亮・大山孝政）　39

【技術論文】

1. エネルギー自立型サスティナブル研究施設　－竣工 4 年後の ZEB 達成状況の評価と対策－
（清水昭浩・相澤直樹・木村健太郎・羽鳥大輔・高椋敦士・田辺新一）　57

2. エネルギー自立型サスティナブル研究施設　－天井型パーソナル空調機のアンビエント空調利用－
（市川侑・スレスタミサン・齋藤雅浩・木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦）　65

3. エネルギー自立型サスティナブル研究施設　－天井型パーソナル空調機による排熱利用の冬期予熱運転検証－（スレスタミサン・市川侑・齋藤雅浩・木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦・鵜飼真成・田辺新一）　75

4. FEASIBILITY STUDY FOR ZWB ON A SUSTAINABLE OFFICE
(Kosuke Osako, Katsuhiko Shibata, Naoki Aizawa, Anna Fujita, Masayuki Otsuka)　85

5. 体育館向け空調システムの開発と実証　－暖房効率改善と吹出し配置の影響－
（木村健太郎・スレスタミサン・小山尚人・平原美博）　93

6. リキッドデシカントユニットの基礎試験とフィールド試験による加湿性能の検証
（澁澤朱音・馬場大輔・三宅友香・前田彩子・川上理亮・谷野正幸・原田政利）　101

7. 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・成瀬一郎・堀田幹則・長沼宏・折田久幸・小山寿恵・染矢聡・小林佳弘・幡野博之・村瀬和典・三苫好治・熊野寛之・森本崇志）111

8. チューブ型フォトバイオリアクターを用いた微細藻類による CO_2 固定化技術の開発
（鴫原亜土・三宅友香・増田正夫・増田篤稔）133

【導入事例】

低温排熱を利用した吸着材蓄熱システムの導入事例
（大山孝政・谷野正幸・川上理亮・鎌田美志・中田拓司・福島史幸・千場悠之介）143

熱学が宇宙のフロンティアを拓く

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構（JAXA）
教授

津田　雄一

Japan Aerospace Exploration Agency
Yuichi Tsuda

かつて人類初の人工衛星として打ち上がったスプートニクは、内部を 1.3 気圧の窒素で満たし、ファンによる対流で衛星内部の温度制御を行ったという。温度の状態により、送信電波の送信時間が変化する。そんな現代からすると極めて原始的なしかけにより発せられた信号に、世界が驚愕し、米国は深刻な危機感を覚え、そうして米ソの「宇宙開発レース」が始まった。

時代は変わって、現代。無人の人工衛星の温度制御に対流を用いることはまずない。電子機器は熱すぎても冷え過ぎても動かないが、そのために熱の出入りをうまくコントロールする基礎原理としては、伝導や輻射が利用される。対流に比べると熱輸送効率は極めて低いが、気密性が不要で、ただ適切な伝導材や表面材質を選ぶだけで、熱を伝えたり逃がしたりしてくれる。宇宙で気体や流体を扱うのは厄介であることの裏返しとも言えよう。

しかし、電子デバイスの高集積化、高出力化が進むと、そうも言っていられなくなった。伝導や輻射に頼るだけでは賄えないほどの熱を扱わなければならなくなったのだ。そのため、先進的な人工衛星では、熱を輸送する流体管路を設置したり、気化潜熱を利用することも行われている。ただ、これらはやりすぎると配管のお化けになり、重量が命の宇宙機でやれることには、まだまだ限界があるのが実情だ。

そのような特徴が特に顕著になるのが、深宇宙探査と月ミッションだ。

例えば、地球から土星へ飛行することを考えよう。地球の近くでは、1 平米あたり 1,360Wの熱入力を太陽光から受けるから、それをうまく逃がしつつ、探査機内部を適温に保つ必要がある。土星に行くということは太陽から遠ざかるということだ。土星距離から太陽を見ても、少し明るめの恒星程度にしか見えないであろう。そんな心許ない太陽から受け取る土星距離での熱量はたった 13.6W。だから、地球から土星へ飛行するということは、実に 1.3kW/m² 以上の入熱差に対して、探査機を適温に保温してあげる必要があることを意味する。宇宙工学のそれに対する解決策は、小型省電力化だ。小型なら表面積も減り、外界の変化を受けにくくなる。省電力ならそもそも大面積の太陽電池が不要で、内部発熱も緩和され、熱設計が楽になる。

月の夜は極低温（実に、-170℃以下）が 15 日も続く。JAXA の月着陸機 SLIM は、2024 年にこの月の“越夜”に成功したが、まだ実験的な参考結果に留まっており、世界的には研究段階から脱していないのが実情である。越夜のためには、機体を保温材で何重にもくるみ保温すれば良さそうなものだが、現実的にはそんなに重量の嵩むことはできない。だから、ここでも小型省電力が重要となるのだ。

米国は冥王星やその先にも探査機を飛ばしている。彼らが使っているのは原子力電池（RTG）だ。RTG は、ウランやプルトニウムの崩壊熱を熱電変換素子で電力に変換すると同時に、余剰の熱は機体の保温にも使う。太陽光が期待できない環境での半永久的な熱電力源として RTG は理想的だが、当然ながらその利用には慎重な技術と社会的コンセンサスが欠かせない。

つまり、敢えて大づかみに言うならば、人類が宇宙のフロンティアに乗り出す肝が、熱制御技術だということだ。

これは、深宇宙探査に携わってきた宇宙工学者としての私の強い実感でもある。小惑星探査機はやぶさ２は、高々地球と火星の間の太陽系空間を飛行しただけなのだが、それでも飛行中の熱環境の変化を吸収するために、大きな放熱面を装備して、太陽に近い時の熱を逃がし、その放熱面をヒーターでガンガンに温めることで、太陽から遠い時の保温を行っていた。そうすることで、人類未踏の小惑星と地球の間の往復航行を実現させたのだから、誇れる技術と言いたいところだが、もっと賢い方法がないの？あるべきだ！と思われないだろうか。

今、宇宙が民間ビジネスへどんどん開かれている。低軌道には大学やベンチャー企業の人工衛星が毎月のように打ち上がり、アルテミス計画では「月から火星へ」を合言葉に、火星圏までもが人類の経済活動の対象と捉えられ始めている。我が国においては、それらの技術的先導となるべき宇宙探査も「より遠方へ、より自在に」を合言葉に、より高度な宇宙探査を目指して様々な研究開発が進んでいる。

さて、そこで地上の熱学技術の出番である。宇宙で求められる課題に対して、熱制御技術が直接できることはないだろうか。熱環境制御の地上民間技術が本格的に宇宙転用されたとき、どのような驚きをもたらしてくれるであろうか。月面で酸素やロケット燃料を生成するにも、深宇宙や月での越夜には、能動的に対流・輻射・伝導を制御する技術が欠かせない。熱を制する 100 年超の技の蓄積が、宇宙という新たなフロンティアに新風となり温暖な熱流束を吹き込むことを期待します。

【小特集　宇宙への挑戦】

月面実証用水電解装置の開発※

津村柊吾・加藤敦史・馬場大輔・内田浩基
武田健太郎・岡堯志[*1]・森田健[*2]

Development of Water Electrolyzer for Technological Demonstration on the Moon

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。月面環境での水電解技術を確立することができれば、月での存在が示唆されている水資源 [2]を利用した推薬生成の主要な要素技術として、今後の持続的な月惑星探査へ大きく貢献すると考えられる。月面実証用水電解装置は、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 [3]、2025 年の月面運用を計画している。

1. はじめに

近年、月に水資源の存在可能性が示された [2] 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 [4]。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 [5]、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 [2]、2025 年の月面運用を計画している。本開発は、フロンティアビジネス創出活動の一環として取り組む宇宙事業開発の一つであり、2019 年 12 月に ispace との HAKUTO-R のコーポレートパートナー契約を締結したことを端に発して 2020 年より開発プロジェクトを発足、初期検討を経て 2021 年 6 月より基本設計を開始した。

本稿では、開発した水電解装置の概要と開発状況, 運用計画について述べる。

※ 本論文は、第 68 回宇宙科学技術連合講演会の講演論文 [1]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

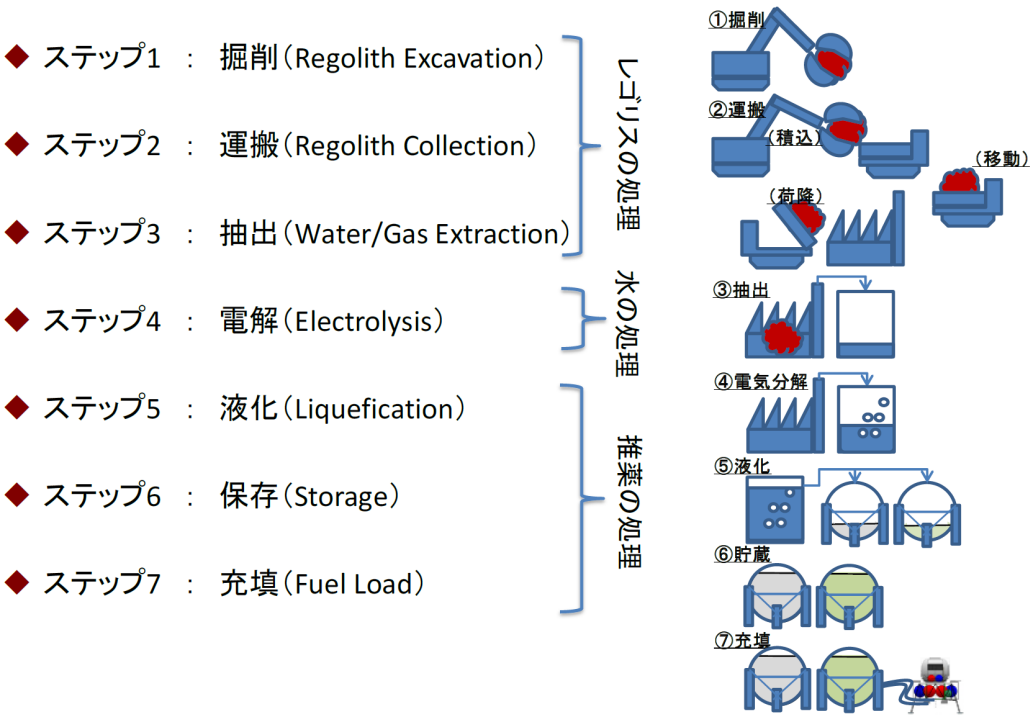


図 1 月面の水利用プロセス [4)]

2. ミッション概要

月面実証用水電解装置 (Hydro Oxy Creator: HOC) は、民間月面探査プログラム Mission 2 （以下「着陸機」）のペイロードであり、月面において水素と酸素を生成する水電解の技術実証ミッション（以下「本ミッション」）を担う。電気分解技術の他の実証事例として、軌道上では国際宇宙ステーションの酸素生成装置 (Elektron、Oxygen Generation System: OGS) が水電解を実施しており [6)]、地球以外の重力天体では火星探査車 (Perseverance) に搭載された火星酸素資源利用実験装置 (Mars Oxygen ISRU Experiment: MOXIE) が火星で二酸化炭素の電気分解を実施しているが [7)]、地球以外の重力天体での水電解は世界初の試みである。水電解は、月の水資源を活用するための重要な要素技術であり、本ミッションの実施により得られた成果は将来的な月面推薬プラント等の実現に寄与すると考えられる。

写真 1 に HOC フライトモデル (FM) の外観を、**表 1** に HOC の主要諸元を示す。

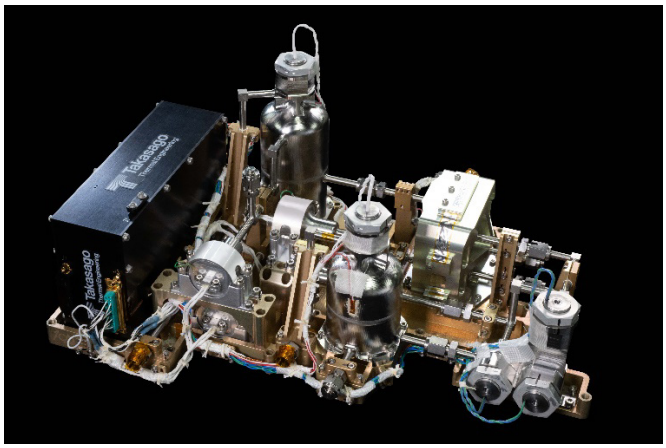


写真 1 HOC フライトモデル

表1 HOC 主要諸元

月着陸機	民間月面探査プログラム Mission 2
HOC 外形寸法	約 L: 300 mm×W: 440 mm ×H: 200 mm
HOC 質量	約 8 kg
ミッション期間	月着陸後～月の日の入り前（最大 14 日）

2.1 ミッション目標

本ミッションの技術実証目標を**表 2** に示す。目標のうち、①は本ミッションの根源的な要求に基づくミニマム目標であり、②および③は、将来的な貯蔵や信頼性等の観点から達成すべき機能および性能の要求に基づき定めた目標である。

表 2 技術実証目標

①	月面で水素と酸素を生成する
②	生成した水素および酸素を圧縮する
③	複数回の運転において上記を実証する

3. 水電解装置概要

図 2 に HOC の構成図を、**図 3** に HOC の運転データのイメージ示す。HOC は、通信系、制御・データ処理系、電源系、構造系、反応系、水素貯蔵系およ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、水素貯蔵系およ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運転することが可能である。加圧された水素および酸素ガスは、最終的に系外に排出して 1 サイクルの運転を終了する。以上の運転サイクルを繰り返すことにより、HOC は月面での技術実証目標の実現を目指す。

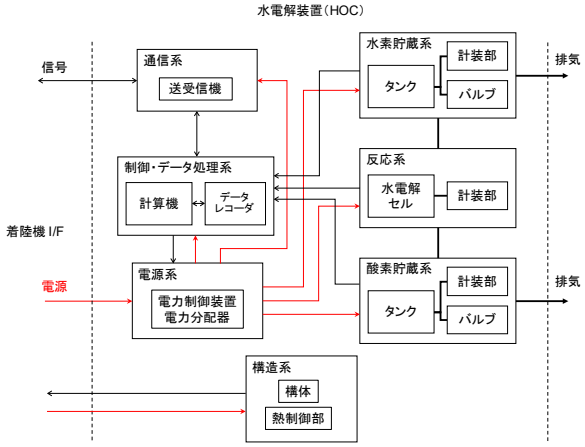


図 2 HOC 構成図

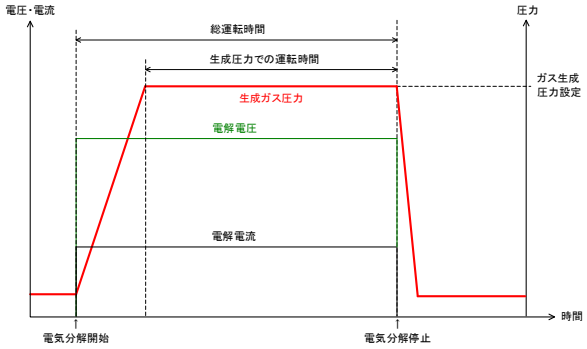


図 3 HOC の代表的な運転データのイメージ

3.1 水電解の方式・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。PEM 形水電解は、水素イオン（プロトン、H^+）伝導性の高い高分子膜を用いた方式で、他の方式と比較して耐久性が高く、動作温度が 100℃以下と低温で動作する特徴がある [8]。この動作温度範囲の特徴により、HOC ではコンポーネント間の断熱やヒータの削減を可能とし、熱制御系や構造系を簡素化することで、質量や電力等の制約に対して適合するシステムを実現している。

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。

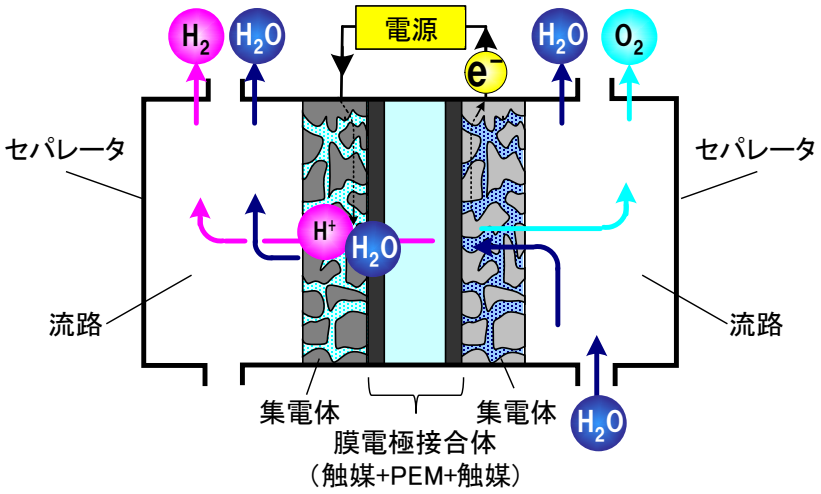


図 4 PEM 形水電解セルの構造と反応の原理

4. PEM 形水電解装置の宇宙適用における課題

HOC の開発では、地上向けに開発された PEM 形水電解装置をベースに宇宙適用における課題抽出を行った。以下に識別された代表的な課題を示す。

- 装置の小型軽量化
- 固体高分子膜の耐環境性
- 水電解セルの振動耐性
- 特殊重力環境（1/6G、微小重力）での気液分離
- 水素および酸素生成の検知
- その他着陸機搭載 I/F 条件、宇宙特殊環境条件への適合

本稿では、これら開発課題への対策や取り組みとして、以下 2 点について紹介する。

4.1 固体高分子膜（PEM）の耐環境性

HOC では、PEM にナフィオン膜を採用している。ナフィオンは、放射線への耐久性が低いことで知られるポリテトラフルオロエチレン (PTFE) [9]を骨格に持つため、将来的な長期的な運用を想定した場合、放射線による機械強度の劣化が課題となる可能性がある。また電気分解の性能に直結するイオン交換能についてもその影響を考慮する必要がある。

この対策として HOC では、ナフィオンの放射線照射よる機械強度の劣化は酸素の存在下で促進されることに着目し、放射線への暴露時間が最も長い航行中の劣化を抑制するために、水電解セルの両極を脱酸処理した超純水で一様に浸漬した状態で維持することにした。ナフィオンは、無酸素の浸漬状態であれば 1600 kGy 超の耐久性を見込めるとされており (**図 5**) [10]、HOC の PEM はそのばく露環境に対して 10 年間で 80%以上の強度を維持することができると見込んでいる。

イオン交換能については、線量による劣化は緩やかであり、1600kGy において 2 割程度のイオン交換能の低下とされているため (**図 6**) [10]、長期間の運用においても十分に性能を維持できると考えられる。

一方で、本ミッションは前例のない試みであるため、放射線等の要因に関わらず、想定以上に PEM の劣化が生じる可能性がある。そのような場合においてもミッションを継続するための対策として、HOC では負荷である電解電流値を任意の値に低減できる制御モードを電源系に実装した。

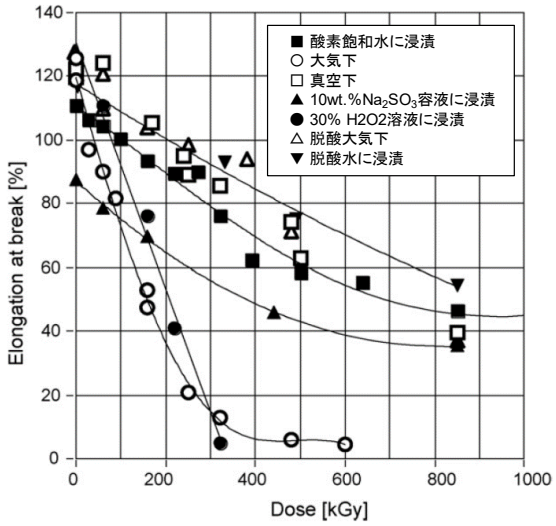


図 5 室温でのナフィオン™の放射線照射量に対する破断伸び [10)]

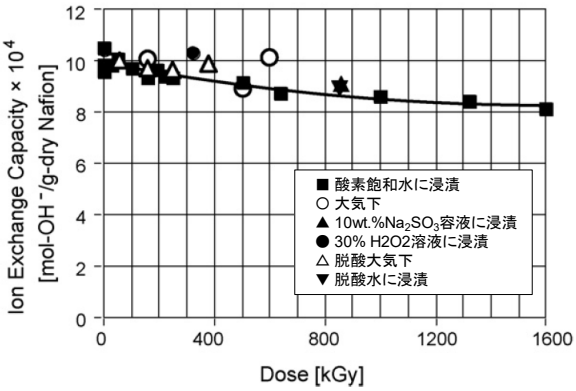


図 6 室温でのナフィオン™の放射線照射量に対するイオン交換容量 [10)]

4.2 水電解セルの振動耐性

水電解セルの開発課題の 1 つとして、打上げ時の振動環境に対する耐性が挙げられる。そこで水電解セルの試作モデルを用いて振動試験を実施し、振動負荷が電解性能に及ぼす影響を調査した。**図 7** に水電解セル初期試作モデル (BBM-1) の振動試験前後の電解効率を示す。BBM-1 の定格電流での電解効率は、生成ガス圧力 P_{we} = 0.1MPa で加振前 87.7%に対して加振後 84.6%、P_{we} = 0.9MPa で加振前 86.3%に対して加振後 81.6%と低下した。なお、ここでの電解効率は、作動電圧と熱的平衡電圧の比である。水電解セルは 3.1 項で述べたとおり複数の膜や部材から成る積層構造であり、面圧の均一性等、部品の積層状態が電解性能に大きく影響する。そのため振動負荷が水電解セルの積層状態を変位させ、電解性能の低下を引き起こしたと考えられる。

改良試作モデル (BBM-2) では、構造および内部部品に積層状態の変位を抑制するための改良を施し、改めて振動試験を実施した。試験の結果、BBM-2 の定格電流での電解効率は、常圧運転時 (P_{we} = 0.1MPa) で加振前 85.1%に対して加振後 84.9%、加圧運転時 (P_{we} = 0.9MPa) で加振前 83.9%に対して加振後 83.6%であり、効率の低下はみられなかった (**図 8**)。また複数回の振動試験を連続で実施し、累積的な負荷を与えた場合も同様に性能低下の傾向はみられなかった。

詳細設計では BBM-2 での改良に基づいてエンジニアリングモデル (EM) を設計、製造し、最大予測環境を上回る負荷にて振動試験を実施した。試験の結果、水電解セルの電解性能は加振の前後で変化がなく、かつ他の機能性能についても要求を満たすことを確認した。また FM についてもコンポーネント受入試験を実施しており、全ての要求を満たすことを確認した。**写真 2** に FM の試験実施の様子を示す。

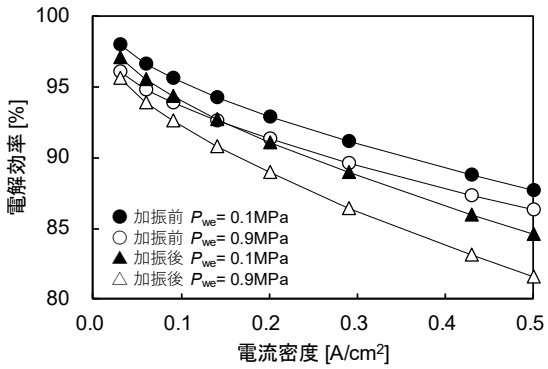


図 7 水電解セル（BBM-1）加振前後の電解効率

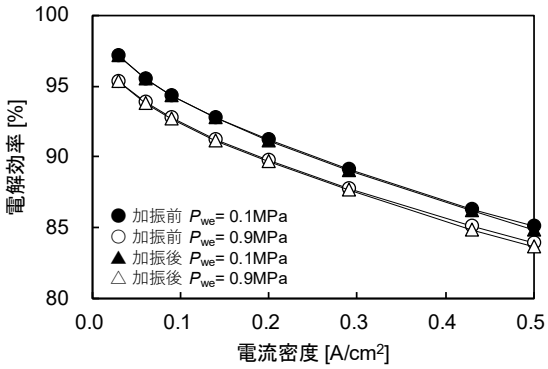


図 8 水電解セル（BBM-2）加振前後の電解効率

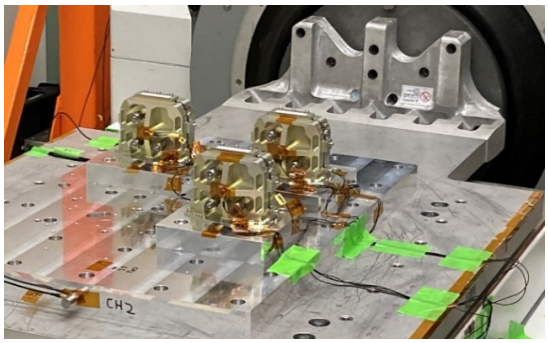


写真 2 水電解セル（FM）振動試験

5. 開発状況

HOC は 2022 年 6 月に基本設計審査[*3]、2023 年 3 月に詳細設計審査[*4] を通過、FM の製造および試験を経て 2024 年 1 月に出荷前審査[*5] を通過した。2024 年 3 月には着陸機へ搭載され、2024 年 8 月に着陸機の統合試験も完了している。着陸機は 2025 年 1 月 15 日に米国ケネディ宇宙センターより打ち上げられ、2025 年 2 月現在月～地球間の軌道を航行中である。

本項では 2023 年 5 月～同年 11 月に実施した HOC の FM の受入試験の代表的な実施内容について、その結果概要を述べる。

5.1 機能性能試験

HOC は、地上向けに開発された水電解装置を元に設計、製作されている。これまでの設計段階において、BBM や EM を用いて小型化や宇宙適用の改修、新規に製作された電子回路部との組み合わせ後も地上向けの既開発品と同等の性能を得られること、また環境試験の前後で機能性能の劣化がないことを試験検証した。

5.2 環境試験

HOC の環境試験として、熱真空試験、振動試験を実施した。**写真 3** に熱真空試験、**写真 4** に振動試験の実施の様子を示す。

HOC の水電解方式である PEM 形水電解は、液体の水を電気分解する性質上、水を液相に保てる温度環境条件を維持する必要がある。また固体高分子膜のイオン交換能は温度依存性が大きく、高温／低温ケースそれぞれの電解性能が仕様を満たすことを確認する必要がある。熱真空試験では、熱制御性能と電解性能、

*3 契約および技術仕様の各項目を満足する製品の実現性などを検討し、詳細設計に移行できることを確認する設計審査。
*4 製品の詳細な設計内容が契約・技術仕様の要求事項を満足し、フライトモデル製造に移行できることを確認する設計審査。
*5 製品の詳細な設計および製造内容が、契約・技術仕様の要求事項を満足し、引き渡しに問題がないことを確認する審査。

その他機能性能の評価を実施し、その全てで仕様を満たすことを確認した。また振動試験では、各加振の前後で構造や機能性能に劣化または不具合が無いことを確認した。

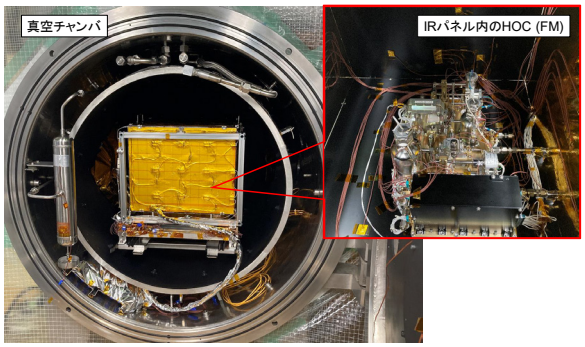


写真 3 HOC (FM) 熱真空試験

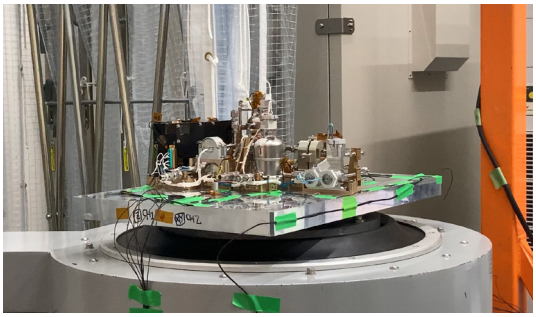


写真 4 HOC (FM) 振動試験

5.3 噛み合わせ試験

HOC は、着陸機との電気 I/F を介して電力の供給を受け、地上との通信も着陸機との通信 I/F を介してコマンドの送信、テレメトリの受信を行うため、各 I/F の噛み合わせ試験を実施した。噛み合わせ試験は、BBM、EM で実施した後、FM でも同様の試験を行い各 I/F の適合に問題ないことを確認した。

6. 運用計画

HOC 運用は、航行フェーズ、初期運用フェーズ、実証運用フェーズの 3 つに大別されている。本項では各フェーズの実施事項について概要を述べる。

6.1 航行フェーズ

打上機から分離した着陸機が通信を確立した後、航行フェーズに入る。航行フェーズでは、HOC のヘルスチェック、環境モニタ等を行う。**図 9** に Mission 1 着陸機の軌道を示す。着陸機は、小さい増速量で軌道投入できる遷移軌道を用いることから、打ち上げから月着陸まで 4〜5 か月の期間を要する [11]。そのためヘルスチェック等は着陸機が月軌道へ到着し、着陸シーケンスが開始されるまで定期的に実施する。

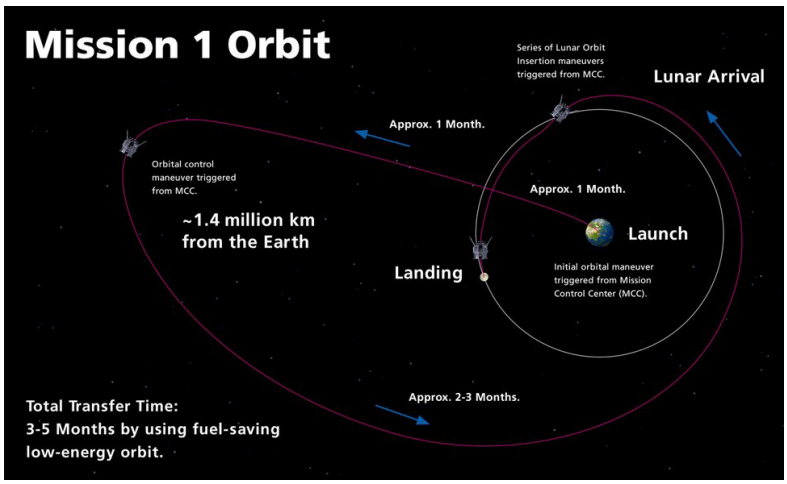


図 9 Mission 1 着陸機の軌道 [10]

6.2 初期運用フェーズ

着陸機の月面着陸後、初期運用フェーズに入る。初期運用フェーズでは、まず HOC の初期状態の確認を行い、次いでアクチュエータ (バルブ等) の操作により保管状態の解除を行う。その後、定格よりも低い電解電流条件にて水電解運転を短時間実施し、初期性能データを取得、確認する。このフェーズで技術実証目標①（**表 2** 参照）の達成を目指す。

6.3 定常運用フェーズ

初期運用フェーズ完了後、定常運用フェーズに入る。定常運用フェーズでは、着陸機側と取り決めた運用スケジュールに基づき、複数の運用スロットを設けており、各運用スロットでそれぞれ電解電流や水素、酸素の生成圧力、電解時間等の運転条件を変更して水電解の実証を試みる。本フェーズで技術実証目標②、③（**表 2** 参照）の達成を目指す。なお、HOC の水電解運転は原則として、リアルタイムモニタリング可能な地上局からの可視時間帯にのみ実施する。非可視時間帯のデータはデータレコーダに保存し、次の可視時間にまとめてダウンリンクする。

7. おわりに

本稿では、月面実証用水電解装置 (HOC) の開発状況、運用計画について紹介した。持続的な月面活動には現地資源利用が不可欠であり、水の電気分解は月面水資源を利用した水素および酸素製造の要素技術として重要である。また今後、非宇宙分野の民間企業の参入と地上技術の応用がますます重要になると考えており、高砂熱学工業も本ミッションを端緒として月面探査・開発の推進に貢献していく所存である。引き続き実証成功に向けて取り組んでいく。

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: 月面実証用水電解装置の開発, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, (2024).
2) S. Li et al.: Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, PNAS, 115 (36) 8907-8912, (2018).
3) 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).
4) 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).
5) The International Space Exploration Coordination Group (ISECG): The Global Exploration Roadmap Supplement, Oct. 2022. Table 3 (2022).
6) R. N. Schaezler and A. J. Cook: Report on ISS O2 Production, Gas Supply & Partial Pressure Management, ICES, 146 (2015).
7) M. Hecht et al.: Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE), Space Sci Rev., 217 (9) (2021).
8) S. Mekhilef, R. Saidurb, A. Safari.: Comparative study of different fuel cell technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 981– 989, (2012).
9) M. Dole: “The Radiation Chemistry of Macromolecules Vol. II”, Chap. 9, Academic Press, New York, (1973).
10) Y. Iwai et al.: Radiation deterioration in mechanical properties and ion exchange capacity of Nafion N117 swelling in water. Journal of Membrane Science 322, 249–255 (2008).
11) J. H. Ayuso et al.: “Flight Dynamics Operations for the First ispace Lunar Lander Mission M1”, 29th ISSFD (2024).

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering has developed a water electrolyzer for technological demonstrations, with the aim of producing hydrogen and oxygen on the moon. This technology could potentially contribute to a lunar propellant production in the future. This electrolyzer is installed on the payload of the commercial lunar exploration program Mission 2 by ispace Inc., and the operation is planned in 2025. This paper describes the overview, the development status and the operation plan of the electrolyzer.

【小特集　宇宙への挑戦】

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※

柴田克彦・齋藤雅浩・友部俊之[*1]・木村真一[*2]

Study on Indoor Environment Modeling of the JEM(KIBO) on the ISS

Katsuhiko Shibata・Masahiro Saito・Toshiyuki Tomobe・Shinichi Kimura

宇宙開発競争が激化する中、有人宇宙の環境制御に求められる要件が厳しさを増す。我々は、国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟 JEM の室内環境を予測するために、その環境評価モデルの構築に取り組んでいる。本報では、CFD による温熱、気流の解析モデルを構築し、既存の実測データを用いて妥当性を検証した。また、重力の有無による自然対流の影響について確認した。さらに、キャビン内の吹出し方向、クルーの位置、実験機材の有無など運用状態の違いによる温熱、空気質環境についてケーススタディし、キャビン内環境をまとめた。

1. はじめに

国際的な宇宙開発競争が激化する中、我が国では宇宙基本計画にて中核的宇宙開発機関である宇宙航空研究開発機構 JAXA の役割・機能を強化し、スペース・トランスフォーメーションの加速を目的に大型の基金が創設された[1)]。また、2019 年に発表されたアルテミス計画では[2)]、2020 年代に月面周回軌道にゲートウェイを建設し月面活動を行う計画で，日本人宇宙飛行士の月面着陸が予定されている。さらには、民間企業による宇宙旅行ビジネスも現実となり、一部で実現されている。これらの活動は、宇宙での滞在期間の長期化や長距離移動に加えて、非宇宙訓練者の滞在も伴うため、有人宇宙の環境制御に求められる要件が厳しさを増すと想定される。この対応策として、既存の生命維持に加え、QOL（Quality of Life）向上も満足する環境制御システム ECLSS の開発が進められている。

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。本報では、JEM の環境基準を概説した上で、CFD（数値流体力学）による温熱、気流の解析モデルを構築し、既存の地上実験データを用いて妥当性を検証した。さらに、無重力環境の解析結果を考察し、キャビン内の吹出し方向、クルーの位置、機材の有無など運用状態の違いによる温熱、空気質環境のケーススタディについて報告する。

2. きぼうの環境基準

有人宇宙の経験がない我が国では、JEM 建設時の要求仕様を NASA の環境基準に準拠してまとめた[3)]。**表 1** に環境基準の中から、空気に関連する代表的な項目を示す。なお、表中には、JEM と NASA の環境基準、および参考として地上での建築物衛生管理の環境基準を併記する。JEM の環境基準の妥当性については、既報にて NASA などの文献や関連資料を元に検証した[4)]。ここでは、代表的な環境因子である温度、CO_2 濃度について次に示す。

※ 本論文は、2024 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文[14)]、2024 年度宇宙科学技術講演会論文[15)]を加筆修正したものである。
*1 有人宇宙システム株式会社 ISS 利用運用部　*2 東京理科大学創域理工学部電気電子情報工学科

表1 ISS-JEM の環境基準の一部

項目	JEM規定範囲	U.S ECLS	ビル管法
全圧 (kPa)	97.9～102.7	97.9～102.7	―
O_2分圧 (kPa)	19.51～23.1	19.51～23.1	―
CO_2分圧 (kPa)	日平均 0.707 ピーク 1.01	日平均 0.705 ピーク 1.01	1,000 ppm
有害ガス濃度	個別成分ごとに最大許容濃度	―	―
温度 (℃)	18.3～26.7	17.8～26.7	17～28
露点温度 (℃)	4.4～15.6	4.4～15.6	―
相対湿度 (%)	25～70	25～70	40～70
微生物 (CFU/m^3)	＜1,000	―	―
微粒子	日平均 3,530,000個/m^3 ピーク 70,600,000個/m^3	日平均0.05mg/m^3 (100,000個/ft^3) ピーク1.0mg/m^3(2,000,000個/ft^3)	0.15 mg/m^3
循環空気風速 (m/s)	平均 0.067～0.203 最低 0.035 最高 1.02	平均 0.051～0.2 最低 0.036 最高 1.02	0.5 m/s以下
騒音	NC-50以下	―	―

2.1 温度基準

NASA などの公開写真からキャビンでの滞在の様子を推察すると、着衣量は地上における夏期着衣量と同等、代謝量は静穏状態と思われる。**図 1** に示す NASA-STD-3000 の温度基準[5]から、暴露時間を 8 時間とすると、許容温度 18℃程度、快適域は 25℃前後となる。これは、**表 1** に示した JEM の温度基準が許容温度の低温から快適域までの範囲であることが分かる。地上での代表的な基準 ASHARE Standard 55 と比較しても、JEM の温度基準は低温側に位置する。このような低温側の温度範囲で、かつ呼気からの CO_2 が顔付近に滞留しないように、吹出し噴流が人体に直接当たる気流性状を加味すると、現行の温度基準は特に東洋人にとって寒いと想定される。

2.2 CO_2 濃度基準

分圧標記の CO_2 濃度基準は、全圧 1 気圧で濃度換算すると約 7,000 ppm に相当する。これは、地上での建築物衛生管理の環境基準に比べかなり高濃度である。一方、既往の文献では[6,7]、健康への影響が現れ始める濃度について 7,000 ppm との記述があり、JEM の環境基準とほぼ合致する。**表 2** に示す地上での各国許容濃度からは[8]、労働環境で 5,000 ppm を上限とするが、執務環境では概ね 1,000 ppm、CO_2 単独の指標は 3,500 ppm となっている。

図 2 に、CO_2 濃度と不快者率の関係を示す[8]。図の実験は、生体発散物質により CO_2 濃度が上昇した時の不快者率であることから、キャビン内の環境も同様と考えられる。日本人の実験結果では[9]、外気 CO_2 濃度 370 ppm における居室内 CO_2 濃度が約 1,000 ppm で 20%の不快者率となり、JEM の現行基準 7,000 ppm では不快者率が 70%を超える。日本人と欧米人で感覚に多少違いがあるものの[10,11]、少なくとも不快者率を 50%程度に抑えるには、3,000 ppm～3,500 ppm を CO_2 濃度の管理基準とすべきである。

表 2 CO_2 濃度の各国ガイドライン

諸外国(公表年)	室内濃度の指針値	対象
ノルウェー厚生省(1999)	1,000 ppm(最大値) ※室内空気汚染の指標	居住空間
カナダ保険省(1995)	1,000 ppm ※換気の指標	オフィス環境
カナダ保険省(1987)	3,500 ppm以下 (許容可能な長期暴露範囲)	居住空間
シンガポール環境省(1996)	1,000 ppm(8時間平均) ※換気の指標	空調設備を有するオフィスビル
中国香港特別行政区(2003)	最良質： 800 ppm(8時間平均) 良 質：1,000 ppm(8時間平均)	機械換気や空調設備を有する建物や閉鎖空間
中国環境保護総局(2002)	1,000 ppm(24時間平均)	住宅とオフィス
韓国環境部(2003)	1,000 ppm	大規模店舗、医療機関等
台湾環境保護庁(2012)	1,000 ppm(8時間平均)	―

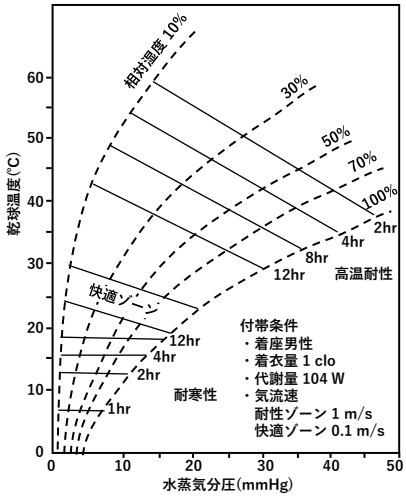


図 1 温湿度と暴露時間の環境要求基準(NASA)

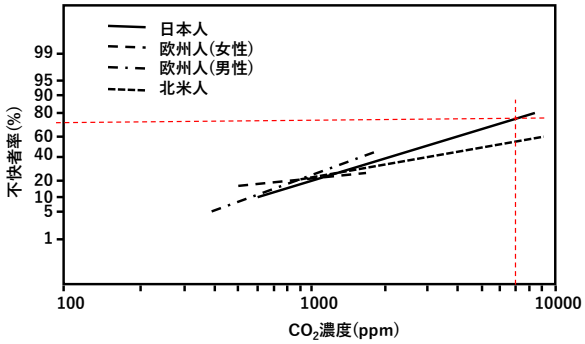


図 2 CO_2 濃度と不快者率

3. CFD 解析モデルの構築

3.1 解析モデルの形状

JEM は、船内実験室、船内保管室、船外実験プラットフォーム、ロボットアーム、船外パレットの５つのエリアで構成されている。今回解析対象とした一辺 2.2 m のほぼ正方形断面の空間からなるキャビンは、外筒 4.4 mϕ ×11.2 m の船内実験室にある。便宜上、視覚的に上下を決め、天井側に照明を配置している。キャビン断面の左右には実験ラック、上下には通信系・環境制御系の機器や保管庫が組み込まれている。CFD 解析モデルの形状作成には、CAD 図面が無いため NASA、JAXA の公開写真、筑波宇宙センターのスペースドームの実物大モデルを参照した。**図 3** に構築した解析モデルを示す。実験ラックの形状は発熱パネルとし、実験によるキャビンへの放熱を再現できるようにした。長手方向の片端には JEM に隣接する第 2 接合部「ハーモニー」との連絡口（空気は自然流出入)、もう一方の端部にはエアロック（断熱条件)、エアロック手前の天井面には保管庫との通路を設けた。

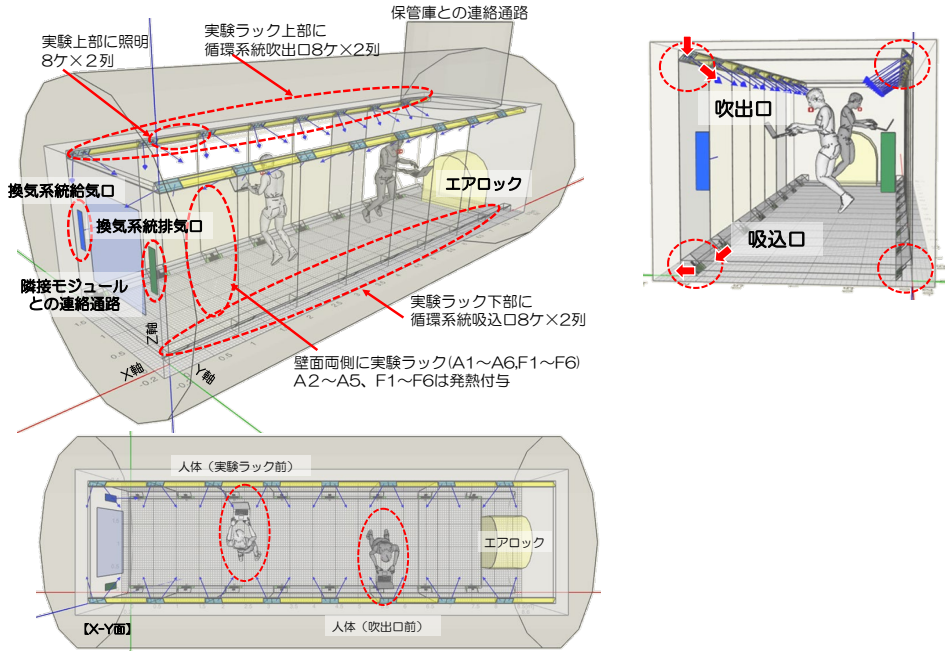


図 3 CFD 解析モデル

3.2 キャビンの空調方式

キャビンの空調は、IMV（Inter-Module Ventilation）にて再生された空気を供給する換気系統と、JEM に装備されている空気調和機でキャビン内の温湿度を調整する循環系統からなる。換気系統は、ハーモニー連絡口の左右に給気口と排気口があり、定格 238 m^3/h の再生空気をキャビン内に供給し、同量をキャビン外へ排出している。循環系統は、左右のラック上部に縦横の羽根角度が可変な角型の吹出し口、ラック下部にパンチングパネル形状の吸込み口がある。気流性状は、**図 4** に示すとおり、吹出し口からの気流がキャビン中央で対向し、吸込み口に流れ込む一方向流となる [12]。換気系統と循環系統の気流を組合わせることで、再生空気と循環空気をキャビン内で混合攪拌させている。

3.3 計算モデル

ISS は、地上 400 km の軌道を約 90 分で周回しているため、キャビン内には 10^{-6}G 程度の微小重力が働く。一方、キャビン内では淀みが生じないよう、壁面から 0.15 m を除く空間で平均風速 0.076 m/s～0.203 m/s の気流が規定されている。そこで、本解析では過大に評価しないよう自然対流が生じない強制対流のみの無重力空間とした。無重力空間の計算には、今回用いた CFD 解析の汎用ソフトウェア（アドバンスドナレッジ研究所製 FlowDesigner）の特殊コマンドから、xyz 方向の重力加速度をゼロと設定した。また、発熱体からの輻射は輸送方程式による輻射強度を用いて計算した。

3.4 解析条件の設定

キャビン内の室圧は 1 気圧に維持され、N_2/O_2 ガスがボンベなどから再生空気に添加されている。これにより空気の組成は地上と大差ないことから、空気の物性値は地上と同様とした。乱流モデルも標準的な高レイノルズ数型 k- ε モデルを用いた。

解析境界条件は、断熱された外筒の内側に装置が組み込まれているので、床、天井を断熱条件、壁面の実験ラックを発熱パネルとした。

人体からの負荷は、発熱と呼気による CO_2 発生とした。発熱は人体の表面温度を一律 33℃とした。CO_2 の発生量は平均的な呼吸頻度と呼気の CO_2 濃度 4%から 35 g/h とし、人体の口近傍を発生源とした。

キャビン内の表面は実験装置や機材、ケーブルなどで凹凸のある空間となっている。この形状を解析モデルに再現するのは困難であるため、壁面に抵抗体を付与し凹凸をモデル化した。

以上の要件を基に CFD 解析モデルを構築し、メッシュ分割数約 300 万（x:362 y:91 z:91、最大メッシュ幅 0.05 m）で解析を行なった。

3.5 解析ケースとパラメータ

運用状態の違いによる温熱、空気質環境のケーススタディとして複数の解析ケースを設定した。キャビンの運用状態は非公開情報であるため、発熱や流れ場など想定しにくい。そこで、実験の様子が紹介されている公開写真を参照に、流れ場に影響を及ぼす循環系統吹出し口の羽根角度、クルーの人数と位置、実験機材など障害物の有無を解析パラメータとした。**表 3** に解析ケースとパラメータを示す。

表 3 CFD 解析ケースとパラメータ

パラメータ / ケース	羽根角度（正面0°）		クルー位置（２人）			機材有無	
	左	右	A3※1	F6※2	A_L※3	A3※1	A_L※3
CASE-1	45	45	○	○	−	−	−
CASE-2	7	47	○	○	−	−	−
CASE-3	0	60	○	○	−	−	−
CASE-2 -2	7	47	○	○	−	○	−
CASE-2 -3	7	47	○	−	○	−	○
CASE-3 -2	0	60	○	○	−	○	−
CASE-3 -3	0	60	○	−	○	−	○

※1：A3ラック前、※2：F6ラック前、※3：エアロック前

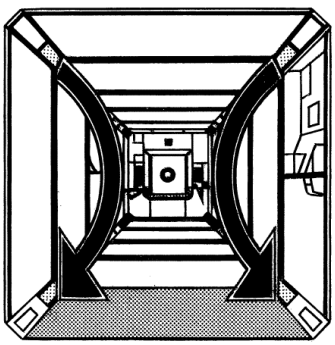


図 4 キャビン内の循環系統の流れ場

(1) 吹出し口の羽根角度

循環系統の吹出し口は縦方向、横方向とも羽根角度が調整可能である。クルーによる調整は不明であるが、横方向の羽根は水平位置で固定とし、縦方向の角度をパラメータとした。

(2) クルーの人数

JEM の定員は 4 名であるが、日常の業務を想定して 2 名とした。

(3) クルーの位置

クルーはラック前もしくはエアロック近傍に位置し静穏状態とした。クルーの移動に関しては、使用したソフトウェアでは移動体解析が不可能なため、移動中の遷移を省略し、クルーの位置ごとに解析モデルを作成し定常解析とした。

(4) 機材等の障害物

ラック正面には PC やケーブルなど流れ場の障害となる機材がある。しかしこれらをモデル化するのは現実的ではないので、操作盤など一辺 0.5 m 程度の装置の有無のみパラメータとした。

4. 解析モデルの妥当性検証

4.1 気流性状の検証

宇宙空間でのキャビン内実測データの入手が困難なため、本報では地上機の実験データ [13]を参照し、無人・発熱負荷なしの解析条件の結果から気流性状の妥当性を検証した。

図 5 に、実験値と CFD 解析結果の風速コンターを示す。なお、解析結果の断面位置は、実験の様子を撮影した写真から推定したものである。実験ではラックなどが未装着な状態であったため、解析対象としたキャビンの壁面と境界条件が異なることから、壁面近傍を除外して検討した。図より、両者とも左右の吹出し口から斜め下に吹出した気流が中央で対向し、下部の吸込み口へと流れる気流分布が見られた。壁面の境界条件が異なるものの、実験値で見られるラック近傍の低風速領域は、CFD 解析でも再現されている様子が見られた。

これらの結果から、本解析モデルはキャビン内循環系統の気流性状をほぼ再現しているものと考える。

4.2 無重力環境の検証

無重力環境で自然対流が生じないことの再現性を確認するために、鉛直方向の重力加速度 1G（地上）と無重力について計算した。なお、今回は両者の差が顕著に表れるように実験ラック 10 台中 1 台のみ発熱量 300 W の高発熱負荷ラックとした。**図 6** に、高発熱負荷ラックを組込んだ壁面近傍の速度ベクトルと温度コンターを示す。図より、地上では、発熱により壁面近傍にプルームが発生し、対流熱伝達が促進することでラック表面の温度上昇が 35℃程度に抑えられている。一方、無重力では壁面近傍のプルームが観察されず、放射による熱授受のみで表面温度が 50℃近くまで上昇している。高発熱負荷ラック近傍の上下平均温度では、無重力で 6.3℃高くなっている。これらの結果、今回作成した解析モデルでは、無重力において自然対流が発生せず、強制対流と放射で温度場が形成される様子を再現しているものと考える。

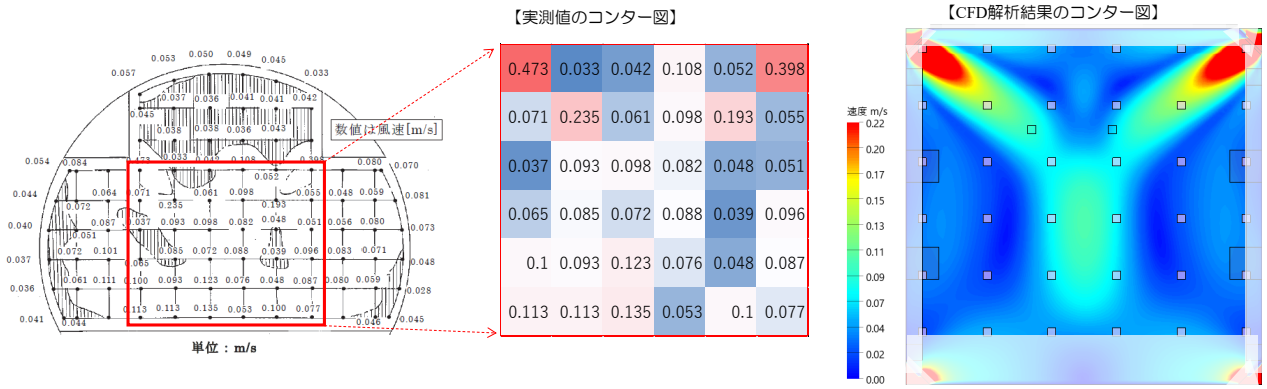


図 5 風速分布の実測値と CFD 解析との比較

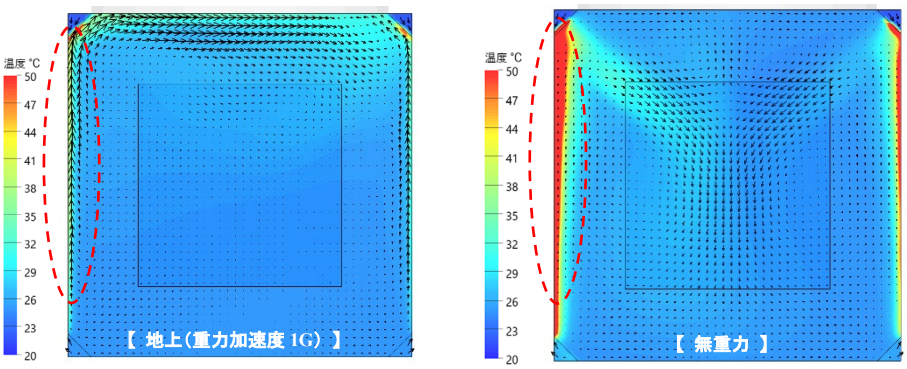


図 6 重力による壁面近傍の風速ベクトルと温度コンターの違い

5. 運用状態の違いによるケーススタディ

有人宇宙解析モデルの検証を踏まえ、**表 3** に示した運用状態の違いによるキャビン内環境の変化についてケーススタディした。

5.1 風速分布

解析結果の一例として、循環系統吹出し口の羽根角度が異なる CASE-1、CASE-2、CASE-3 の風速分布をベクトルとコンターで**図 7** に示す。図は、換気系統の給気と循環系統の吹出し気流が混合した状態が把握できるように、給気口中心の XZ 断面(Y=1.975 m)である。図の左側から噴出している換気系統の給気はキャビン中央まで到達し、以降拡散している様子がわかる。また、図の上部から吹出している循環系統の気流は、吹出し口の羽根角度によって気流の性状が異なる。吹出し口中央から左右に 45° で吹出す CASE-1 では、循環気流のプロファイルが小さいのに対し、吹出し角度が左右で異なる CASE-2、CASE-3 では吹出し気流のプロファイルが大きくなっている。特に CASE-3 は斜め方向の吹出し気流が途中でマージすることで到達距離が延び、換気系統の給気を下方へ押し下げている。この様子から、換気系統の再生空気が循環系統の吸込み口からダクトを介して吹出し口へと循環し、汚染物質の希釈促進が期待できる。次に、キャビン内部発熱と CO_2 発生量の拡散状況について考察する。

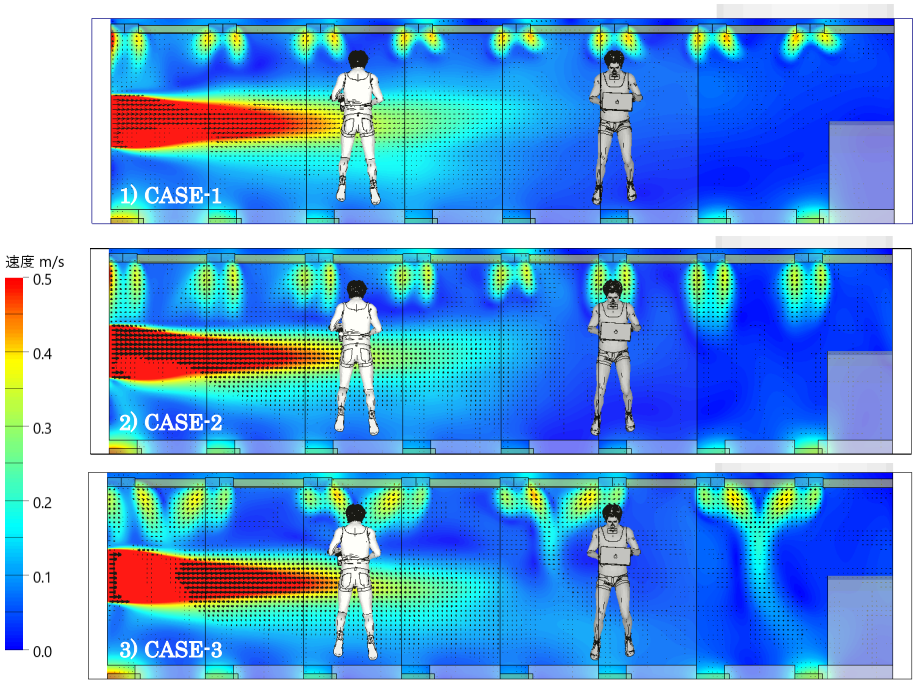
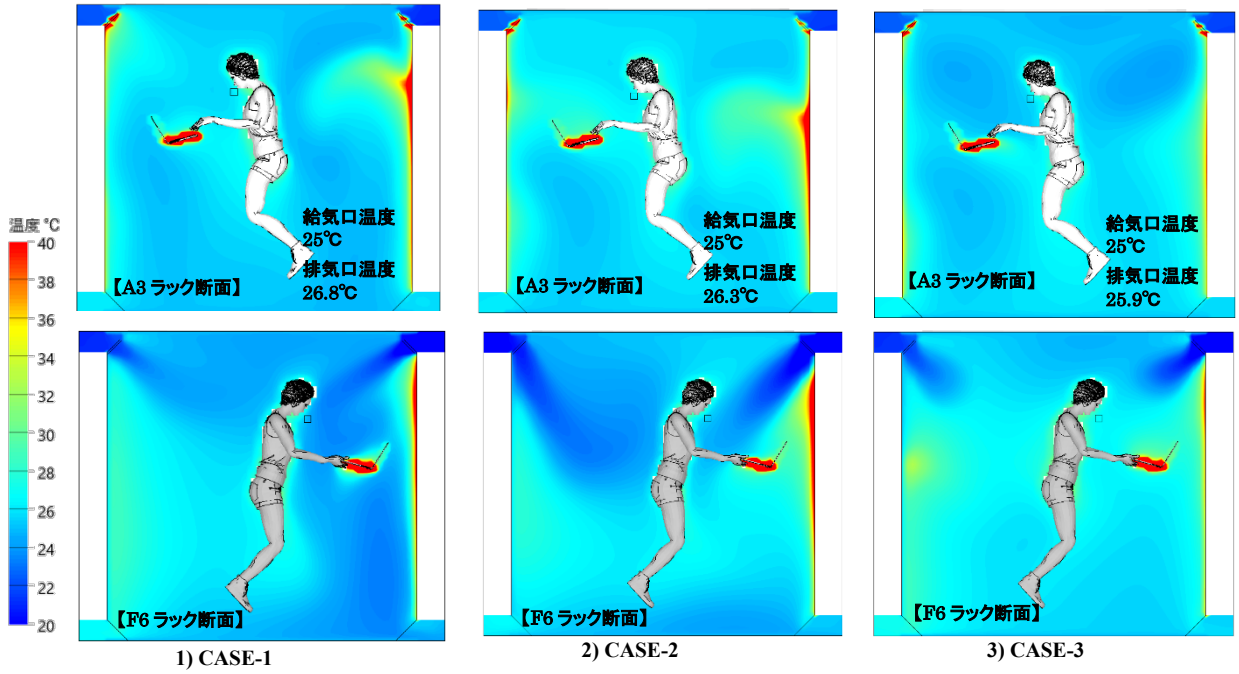


図 7 吹出口羽根角度による風速分布の違い

5.2 負荷の拡散状況

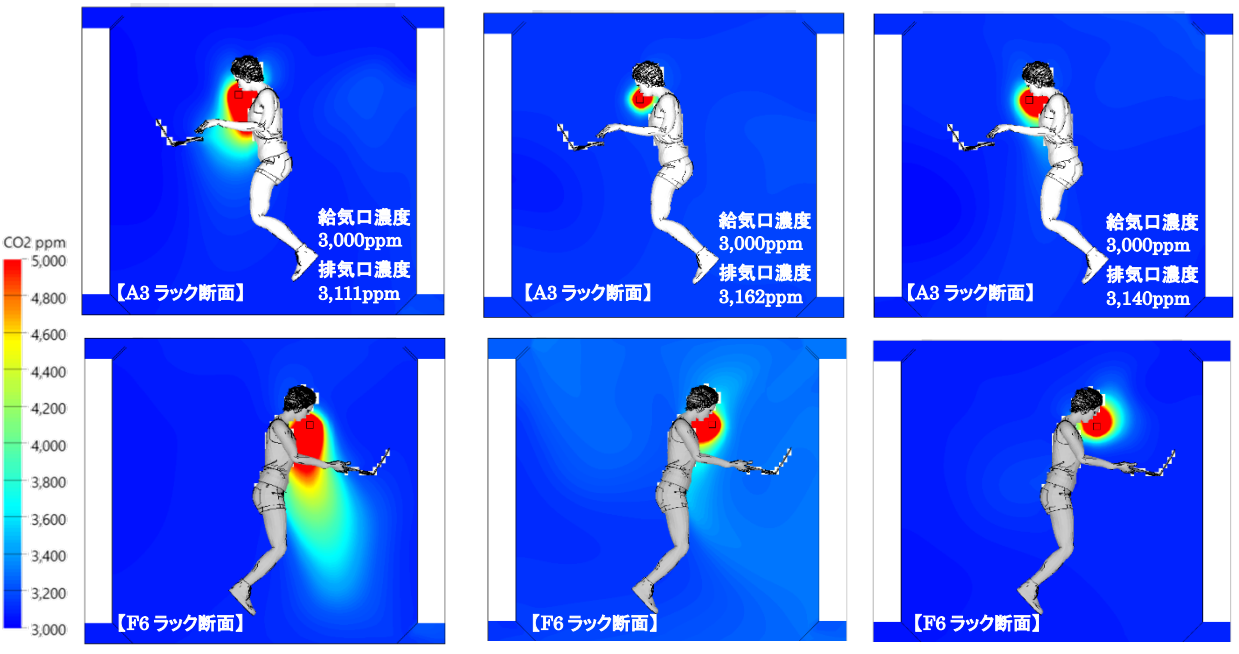
人体などの内部発熱と CO_2 発生の拡散状況をクルー位置断面における温度、CO_2 濃度を用いて**図 8**、**図 9** に示す。**図 8** より CASE-1、CASE-2 ではクルーに循環系統の気流が直接当たる様子がみられ、熱的不快感が想定される。しかし、CASE-3 ではクルーの居住域において顕著な温度ムラがみられなく、ほぼ均一な温熱環境が形成されることが分かる。また、**図 9** より CASE-1 では呼気の拡散が弱く、クルーの呼吸空気の汚染が懸念される。しかし CASE-2、CASE-3 では呼気が速やかに拡散されている様子が分かる。

これらの結果から、人体の温熱感、呼吸空気の CO_2 濃度の上昇抑制には循環系統の吹出し口の羽根角度が有効であることが示唆された。



1) CASE-1　2) CASE-2　3) CASE-3

図 8　吹出口羽根角度による温度分布の違い



1) CASE-1　2) CASE-2　3) CASE-3

図 9　吹出口羽根角度による CO_2 濃度分布の違い

5.3 キャビン内環境の評価

キャビン内環境の最大の懸案事項は、換気不良による汚染空気の滞留である。換気に関する国内基準としては公益社団法人空気調和・衛生工学会の換気規格 SHASE-S 102-2022 がある。本基準では、空気の滞留を評価する指標として空気齢 SVE3 を規定している。ここで、SVE3 とは IMV からの給気が届くまでの時間を表す基準化した値で、値が小さいほど給気口からの新鮮な空気に包まれているといえる。**図 10** に SVE3 の解析例として CASE-3 における代表面の分布を示す。図より、給気の主流では SVE3 が小さいものの、エアロックや IMV への排気口近傍では大きくなっている様子が分かる。そこで、各種パラメータによる SVE3 の空間分布について評価した。

JAXA の環境規定では壁面から 0.15 m 離れた空間について気流の許容範囲がある。これに準じ、壁面から 0.15 m 内側における空気齢の累積割合を**図 11**、**図 12** に示す。ここで、**図 11** は循環系統の吹出し口の羽根角度、**図 12** はクルーの位置、機材等の障害物の有無による違いを比較したものである。**図 11** より、前項に示した負荷の拡散状況の評価と同様に、CASE-3 が最も SVE3 が小さく、空間の 65%が完全混合に近い SVE=1 以下の状態であることが分かる。また、図 12 より、クルーの位置、障害物によって SVE3 は多少悪化するものの、その差は SVE3=1 において 10%以内であることがわかる。なお、図示は無いが CASE2-2、CASE-2-3 においても同様の結果が得られた。これは、**図 11** での循環系統の吹出羽根角度による差異が卓越していることから、羽根角度を再調整することで十分に改善可能な範囲と考えられる。また、IMV からの換気系統の給気をさらに効果的にエアロック近傍まで到達させることができれば、本解析で扱ったサイズの障害物による影響はさらに緩和できると思われる。

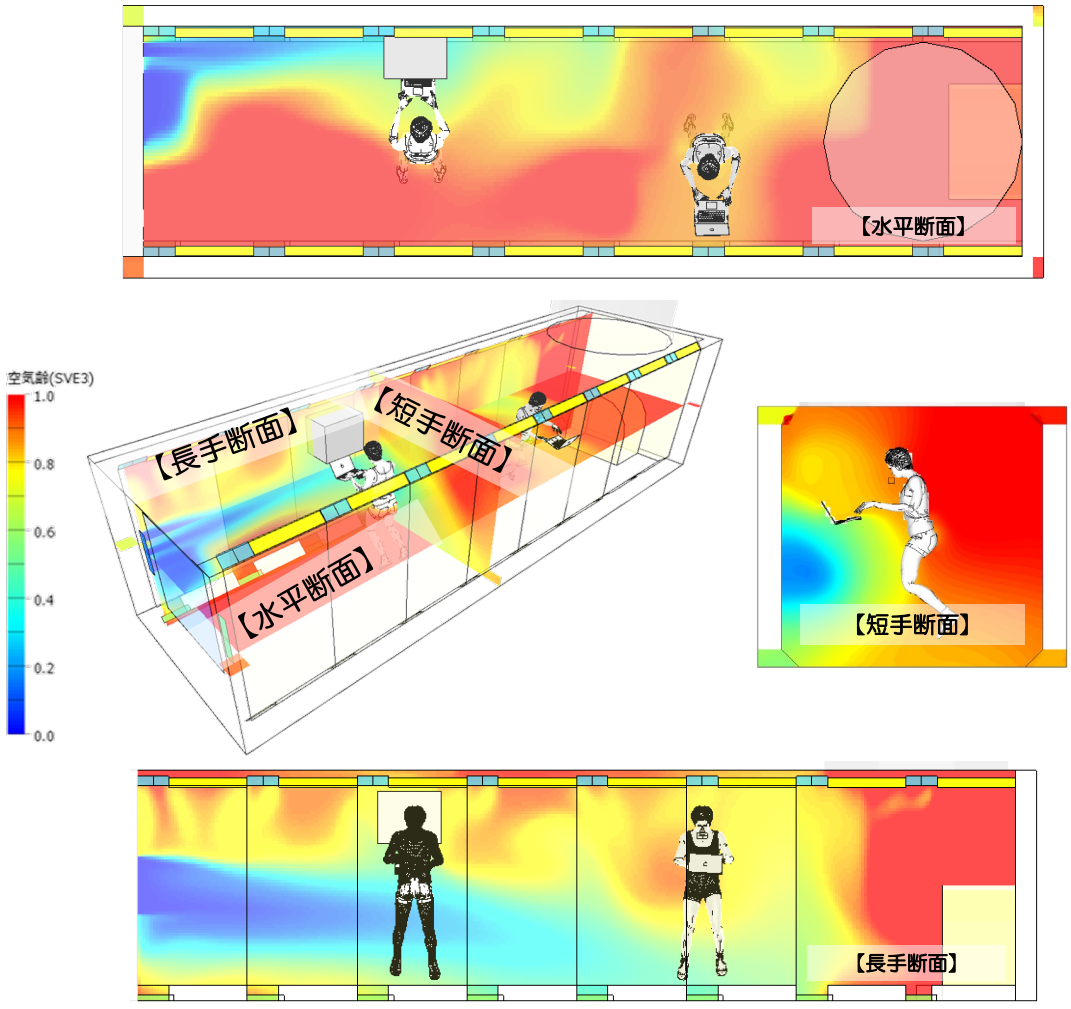


図 10 換気効率 SVE3 の分布例

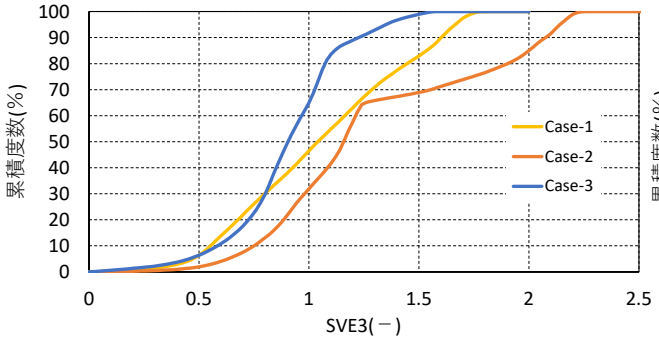


図 11 吹出角度による換気効率 SVE3 の違い

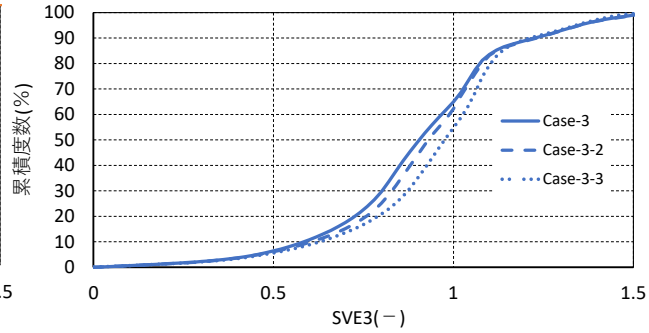


図 12 クルー位置，障害物による換気効率 SVE3 の違い

6. おわりに

2010 年から各種実験及び実測で活躍し続けている国際宇宙ステーション ISS の日本実験棟 JEM にあるキャビン内の温熱，空気質環境について，基準値を概説した上で、CFD 解析を用いた環境評価を行った。吹出し口の羽根角度、クルーの位置、機材の有無など運用状態によるケーススタディから、循環系統の吹出し口羽根角度による室内環境への影響と、クルーの位置やキャビン内の障害物に対して羽根角度による調整が有効であることが示唆された。

謝 辞

本研究は㈱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。ここに関係の皆様に謝意を表します。

文　献

1) 内閣府:宇宙開発基金の創設，https://www8.cao.go.jp/space/comittee/dai108/siryou3.pdf,(2025.1)
2) https://www.cnn.co.jp/fringe/35196185.html,(2025.1)
3) JAXA JEM 開発プロジェクトチーム:日本実験棟「きぼう」総合報告書～本編（第1巻）,p.232(2010.3)
4) 柴田克彦,中村泰:低重力下での快適環境に関する調査研究，第 66 回宇科連,4M11(2022.11)
5) NASA-STD-3000, NATIONAL AERONATUTICS and SPACE ADMINISTRATION
6) 空気調和・衛生工学会規格、SHASE-S102-2011 換気基準・同解説
7) Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health; Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality, p.8(1989)
8) SHASE，必要換気量算定のための室内二酸化炭素設計基準濃度の考え方,(2021.5)
9) 岩下剛,木村健一,田辺新一,吉沢晋,池田耕一: 人間の嗅覚に基づく室内空気質の評価に関する基礎的研究，日本建築学会計画系論文報告集，第 410 号,pp.9-19(1990)
10) Berg-Munch, B., Clausen G., and Fanger, P.O., Ventilation Requirements for the Control of Body Odor in Spaces Occupied by Women, Environment International, Vol.12, pp.195-199(1986)
11) Cain, W.S., Leaderer, B.P., Isseroff, R., Bergland, L.G., Ventilation Requirements in Buildings-I :Control of Occupancy Odor and Tobacco Smoke Odor, Atmospheric Environment, Vol.17(6),pp.1183-1197(1983)
12) 上妻充幸:宇宙ステーションの空調，空気調和・衛生工学会，vol.78，No.1，pp.45-51(2004)
13) JAXA:第9章 生命維持技術，JAXA 特別資料 JAXA-SP-12-015,pp.84-95
14) 柴田克彦,齋藤雅浩,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)

15) 柴田克彦,齋藤雅浩,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,IF-13(2024.11)

ABSTRACT

As the space race intensifies, the need for stringent environmental control in manned space missions has become increasingly critical. This study focuses on the development of an environmental assessment model designed to predict the indoor environment within the Japanese Experiment Module (JEM) of the International Space Station (ISS). The research involved developing analytical models of temperature, heat transfer, and airflow using computational fluid dynamics (CFD), which were subsequently validated against existing measured data. Furthermore, the impact of natural convection with and without the presence of gravity was examined. Case studies were also conducted to evaluate the thermal and air quality environments under varying operational conditions, including changes in the cabin air outlet direction, crew positioning, and the presence or absence of experimental equipment. The findings highlight the contributions of these factors to the overall cabin environment.

【小特集 宇宙への挑戦】

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

内田浩基・鹿山雅裕[*1]

Thermal Mining for Lunar Water
Part 3 – Studies on Cold Trap for Water Vaper

Hiroki Uchida・Masahiro Kayama

近年の探査により月の永久影には大量の水氷（H_2O）が存在すると考えられており、水素燃料や飲料水などの水資源としての活用が期待されている。我々は月面において水氷を抽出する技術として、月の砂（レゴリス）が含有する水氷をヒーターで直接加熱し、発生した水蒸気を抽出するサーマルマイニング技術の開発を進めている。本開発において、主な要素技術である“レゴリスに付着した氷水を効率よく加熱して水蒸気を発生する技術”の開発を進めてきた。この要素技術に加えて、もう一つの要素技術である“レゴリスから放出された水蒸気を氷、または（加圧容器内で）水として効率よく捕獲する技術”についても検討を開始した。サーマルマイニングによる月面水抽出は太陽光が届かず温度が極めて低い（数十 K 以下）永久影内で行うことが想定され、“レゴリスから放出された水蒸気を捕獲する工程”も省エネかつ短時間に行う必要がある。また、月面のレゴリスに含まれる氷の量は 0.1～5 wt%程度と推定されていることから、少量の水氷から発生した水蒸気の宇宙空間への放出を抑えて効率よく捕獲する技術の開発が必要である。さらに、月の水氷を水電解や飲料水として使用する上で有害である多量の不純物（硫化水素やアンモニアなど）が含まれている可能性があることも大きな課題であり、後工程の純水化処理に先立って水抽出の段階から可能な限り不純物を取り除いていくことが重要と考えられる。

1. 緒言

国際探査ロードマップ[1)]によると、宇宙経済圏の構築と将来の火星有人探査に向けて、月の探査・開発は極めて重要な足掛かりとされている。月面の永久影（PSR：Permanently Shadowed Region）に水氷が大量に存在する可能性が高いことが衛星観測や科学検証により示唆されている[2, 3)]。月面で資源活用に十分な量の水を抽出できれば、ロケットの推進剤や有人活動用の飲料水などとして利用でき、地球から月への水の輸送を最低限に抑えて、将来の宇宙ミッションのコストを大幅に削減できる[4)]。当社は 2025 年前半において、世界で初めて月に水電解装置を持ち込み、ロケット推進剤として利用できる水素と酸素を生成する実証実験を行う[5)]。月面における水電解は推薬生成プラント構想[6, 7)]の後工程であり、この前段階として月の現地での水氷の探査や抽出、抽出した水資源のプラントへの輸送、純水化処理などの工程が必要となる。さらに現地運用の際には、水電解で生成した水素の圧縮・液化や貯留が必要であり、今後各工程において確立すべき技術課題は多い。これらの工程のうち、当社では月面水電解技術の開発に加えて、その前工程である月面の水資源を効率よく抽出する方法を検討している。

月の水資源抽出において、水氷を含む月の砂であるレゴリスから水のみを抽出する最も簡単な方法は、

*1 東京大学大学院 総合文化研究会 広域科学専攻

レゴリスを加熱して付着する水氷を水蒸気として取り出すサーマルマイニング：Thermal Mining（または Thermal Extraction）である[8]。大気が 10^{-7}～10^{-10} Pa と超高真空～極高真空である月では、レゴリスから分離した水蒸気の分子は加熱地点から放射線状に離散する。その後、水蒸気は加熱地点から離れた昇華温度が低い領域において氷または加圧条件下で水(*)として捕獲（コールドトラップ）される。捕獲された氷または水は、氷であれば加熱して水に戻し、最終的には抽出水として貯留するか、あるいは純水化処理などの後工程に渡すのが一般的である。この一連の月面水抽出における主な技術要素としては、以下の 2 点と考えている。

① レゴリスに付着する氷を効率よく加熱して水蒸気を発生させる技術

② レゴリスから発生した水蒸気を水、または氷として効率よく捕獲する技術

要素技術①において、大気が薄い月ではレゴリスの熱伝導率が極めて低いため、隙間が多いレゴリスを広い範囲で一様に加熱することは困難である。そこで前報[9,10]において、月の地下のレゴリスを加熱して氷壁に囲まれた与圧空間を形成し、水蒸気を抽出する方法を提案した[9]。また、数値解析により氷が付着するレゴリスを加熱した際の伝熱の挙動や水蒸気の移動、氷壁の形成プロセスをシミュレーションした[10,11]。

本報告では、要素技術①：氷が付着するレゴリスを効率よく加熱する技術に関してレビューし、さらに、要素技術②：水蒸気を効率よく捕獲する技術に関しても検討を開始したので報告する。

2. 氷レゴリスの加熱方法

月面において氷を含むレゴリスから“サーマルマイニング”によって水抽出を行う方法は Sowers によって提案された[12]。月のレゴリス層は、砂（ソイル）の空隙が体積の半分以上を占める多孔質である[9]。サーマルマイニングは、氷が付着するレゴリスごと加熱して氷のみ水蒸気に相変化（昇華）させ、ソイル間の隙間を通して月面に水蒸気を放出させて抽出する方法である。

Sowers が提唱したサーマルマイニングは、月面にドーム状の簡易テントを設営し、テント内のレゴリス表層に太陽光を集光させて加熱して、氷から昇華した水蒸気を抽出する（**図 1**）。しかしレゴリス内の伝熱は、月の極めて薄い大気圧下では、砂の間のわずかな点接触による熱伝導と砂の表面からの輻射伝熱のみによるため、実効熱伝導率が極めて低いことが知られている[13-15]。このため、レゴリス表面からの熱流は表面から数 cm 程度の深さまでしか到達できず水抽出可能な範囲も表面から深さ数 cm までに限られる。そこで著者らは、ドリルで月面から深さ 1 m ～数 m 程度の小孔を掘削し、孔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し、氷壁内側のレゴリスを加熱して水蒸気を取り込む方法（**図 2**）を提案した[9-11]。現在も引き続き有効な氷壁形成方法について実験と数値シミュレーションの両面から検討を進めている。

レゴリスから氷を効率よく加熱する方法として、Hab[16]、および Kiewiet ら[17]は Sowers のドーム状テントによりレゴリスを加熱する方法と物理的な機械採掘により氷を含むレゴリスをるつぼ（Crucible）容器内に密閉し加熱する方法を比較している（**図 3**）。図中の In-situ Extraction がドーム状テントを用いてレゴリスを加熱する水抽出方法、Excavated Extraction が機械採掘により収集したレゴリスをるつぼ内で加熱する水抽出方法である。比較の結果、In-situ Extraction 法による水抽出は簡便さ（Complexity）や装置の長寿命化（Lifetime）に有利である一方、抽出率（Extraction Rate）やエネルギー効率（Energy Efficiency）はるつぼ加熱が優れることが示された（**表 1**）。In-situ Extraction 法とるつぼ加熱法はいずれも一長一短であり、個々のプロジェクトに適した水抽出方法を選択する必要がある。さらに、るつぼ容器内の加熱方法に関しては Heitkamp ら[18]によって氷を含むレゴリスを素早く均一に加熱する方法が提案されており、複数の棒ヒーターを用いてるつぼ内のレゴリスを機械的に攪拌する加熱機構が検討されている（**図 4**）。

(*) 月の大気圧（10^{-7}～10^{-10} Pa）は三重点以下であり液相の水は存在しないが、レゴリスに付着する氷を加熱することによる水蒸気の発生により加圧が生じ、蒸気圧が三重点を超える場合は水として存在する可能性が考えらえる。

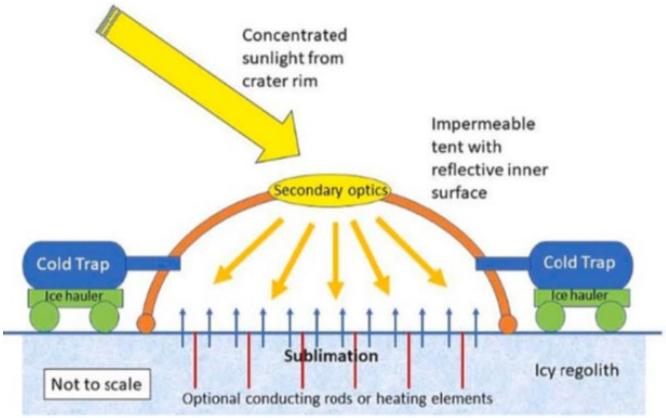


図 1 テントを設置し月面の水を収集する方法 [12)]

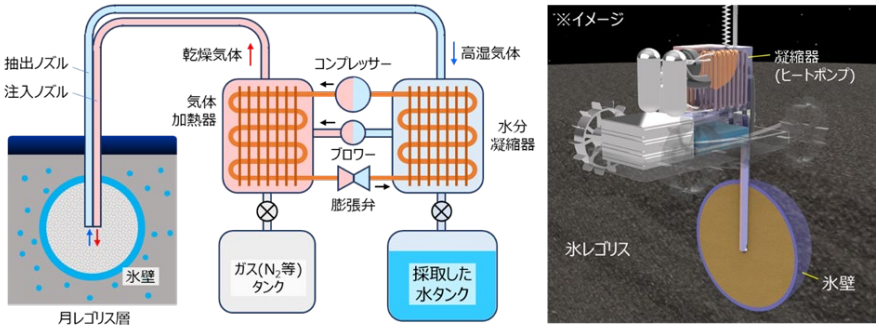


図 2 高砂熱学サーマルマイニングによる月面水抽出 [9-11)]

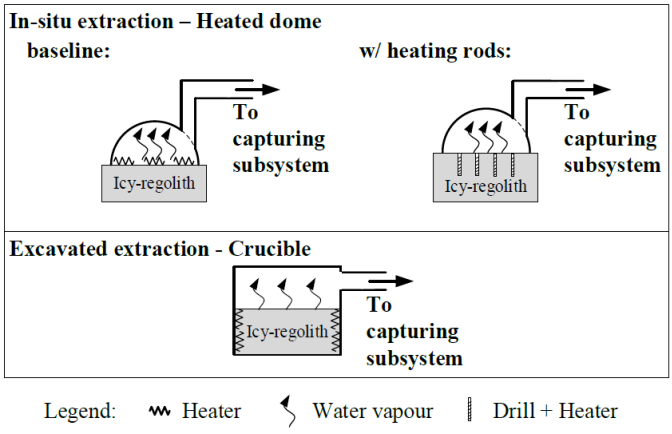


図 3 テント設置による月面加熱とるつぼ容器内加熱による水抽出の概略モデル [16, 17)]

表 1 テント設置による月面加熱とるつぼ加熱による水抽出の Trade-off 比較 [16)]

	Extraction Rate	Energy Efficiency	Complexity	Lifetime	Reliability	Development Cost	Accessibility
In-situ Surface Heating (1)	(C) Sublimation lag build-up	(C) High surface losses	(A) Mostly static design with no regolith manipulation	(A) Elements susceptible to moderate wear	(B) Tent structure; redeposition	(D) Low TRL	(D) Very shallow reach
In-situ Rod Heating (2)	(B) Possible difficulties in vapor outgassing	(B) Surface losses; drilling	(B) Few moving parts, partial regolith manipulation	(C) Elements susceptible to high-rate wear	(C) Tent structure, redeposition; drilling tool	(D) Low TRL	(B) Length of the rods; difficult outgassing
Crucible Heating (3)	(A) Heating from more sides	(A) Insulated, yet Excavation required	(D) Many moving parts, regolith manipulation, refilling &dumping	(D) Cardinal elements susceptible to high-rate wear	(C) Excavator; autonomous operations	(D) Low TRL	(A) Reach of the excavation system

(A)	Excellent
(B)	Good
(C)	Correctable Deficiency
(D)	Fundamental Deficiency

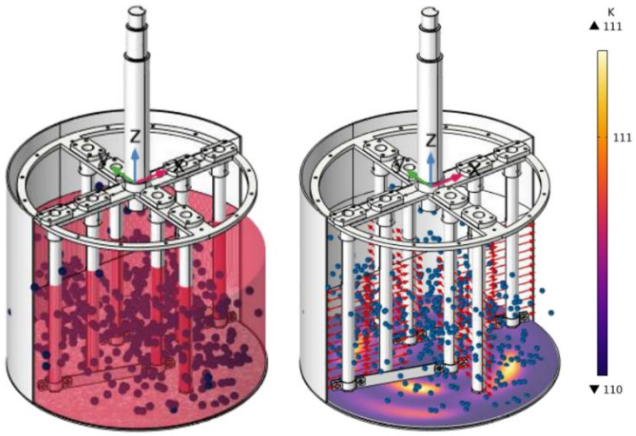


図 4 回転する複数の棒ヒーターによる氷レゴリスの攪拌、加熱シミュレーション [18)]

3. コールドトラップの方法

月面でのサーマルマイニングにおいて、月の水氷は最終的には液相（水）として貯留するか純水化処理などの後工程に渡すことを想定している。このため、レゴリスを加熱することで発生した水蒸気は、水または氷（液相か固相）の状態で捕獲・回収する必要がある。

レゴリスから発生した水蒸気を捕獲・回収する一般的な方法としては、凝華温度以下に冷却したコールドトラップで水蒸気から水、または氷に相変化させて捕獲する手法（Cold Trap 法、以下 CT）が考えられる。サーマルマイニングにより、レゴリスに付着する氷の状態から CT を経て液相の水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を**図 5** に示す [19)]。図中 A は極低温・極低圧に保たれたレゴリスの氷であり、この状態の氷をレゴリスごと加熱し B の気相（水蒸気）の状態で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）にして 2b の経路で水（D）に戻すか、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。

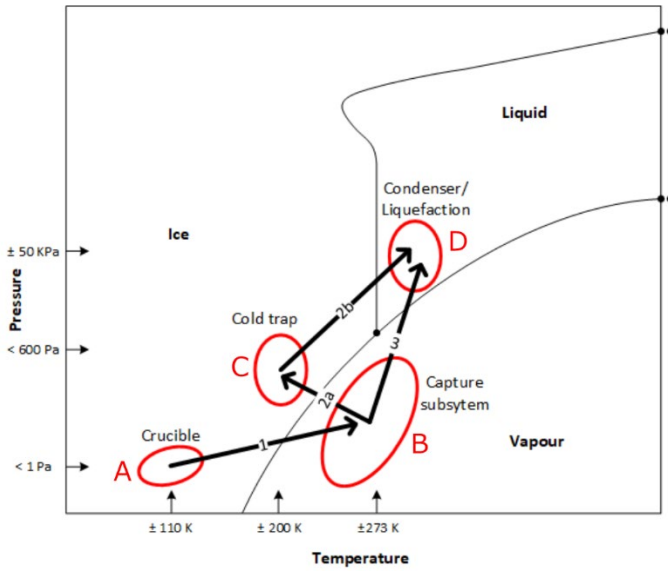


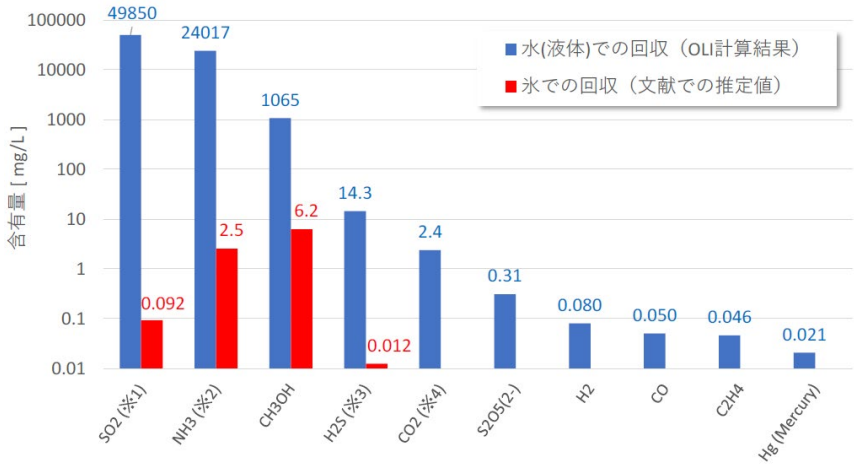
図 5 月面水抽出における水の温度/圧力の相変化図 [19)]

赤字の A～D は著者が記入

本報では、水蒸気から氷としてトラップした後に水に戻す経路（2a→2b）を「氷トラップ」、水蒸気から直接水としてトラップする経路（3）を「水トラップ」と呼ぶ。

ここで注意すべき点は、月の氷には H_2O だけでなく水資源活用において有害な多くの不純物が含まれることである [2, 19, 20)]。不純物をある程度含む抽出水を水電解する場合、電解効率の低下、装置の劣化や破損を引き起こす可能性があるため、水電解を行う前処理として抽出水から不純物を取り除く純水化処理が必要となる。

レゴリスに付着する氷からの水蒸気を CT にて捕獲する際、水トラップに比べて溶存率が少なく、より低温で水蒸気を捕獲できる氷トラップの方が水資源活用において有害な不純物を大幅に除去できることが報告されている [20)]（**図 6**）。水抽出の段階で水蒸気を氷トラップすることで不純物を事前に大幅に低減できれば、後工程（水電解の前処理）の純水化処理が容易になる。



青はコールドトラップにて 0.1 atm 下で液相（水）としてトラップした場合、赤はコールドトラップで氷としてトラップした後、水に戻した場合の抽出水に含まれる不純物の含有量

図 6 レゴリスからの抽出水に含まれる不純物の含有量予測値 [20)]

一方、月の氷に含まれている不純物の種類と量に関しては、得られている科学データが少ないため、具体的に氷トラップと水トラップのいずれの方式が実現的あるいは効率的であるかは現時点で結論付けられていない。

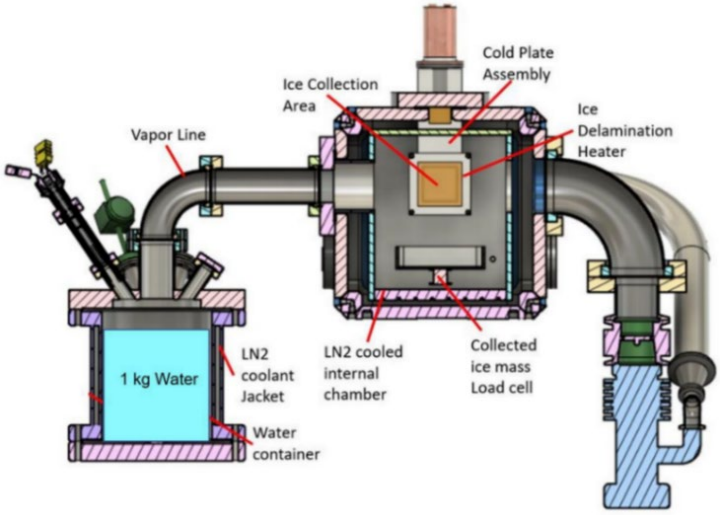
3.1 氷トラップの仕組み

月面の永久影などの極低温環境の水氷の抽出を想定し、拡散真空ポンプを用いた超高真空以下（10^{-6}～10^{-11} Pa）の圧力下において極低温に冷却した氷を加熱し、昇華した水蒸気を離れた位置に設置された CT 表面（液体窒素にて冷却）に着氷させる氷トラップの実験が行われている[21]（**図 7**）。**図 7** (a)の真空ポンプにより減圧された装置内で Water Container（WC）内の氷（－50 ℃）が昇華し、発生した水蒸気が CT（図中 Ice Collection Area、～－150 ℃）に移動および着氷する。蒸気の移動は WC と CT の温度差で発生する水蒸気圧差により、WC から CT への水蒸気の移動が生ずると考えられる。CT に接触した水蒸気は潜熱に相当する熱エネルギーを奪われ氷に相変化（凝華）して着氷する。CT 近傍の昇華温度における飽和水蒸気圧が、CT に着氷した氷表面の温度における飽和水蒸気圧より高い状態の場合、CT 表面の水蒸気は凝華して**図 7** (b)のように氷が成長して厚みを増すと考えられている[21]。しかし、CT 表面の氷（約 2 W/(m K)[22]）は CT の構成材料である銅（400 W/(m K)[23]）やステンレス（16 W/(m K)[23]）に比べて熱伝導率が低いため、氷が厚みを増すにつれて CT 表面の冷熱が氷最表面に伝わりにくくなる。厚みが増すごとに水蒸気の収集効率が低下すると考えられるため、水蒸気を効率よく捕獲するためには、氷がある程度の厚みまで成長した時点で氷を取り除き、低温がより保たれている CT 表面を露出する必要がある。氷は CT 表面に密着しているため、CT 表面に薄いフィルムヒーターを貼り付けて加熱することで、CT 表面と氷の間に“蒸気潤滑層”を形成し氷を剥離する手法を検討している（**図 7** (c) A, B）。氷を剥離するため、熱容量が大きい金属製の CT 全体の温度を上げるには長時間の加熱と大きな電力を要する。したがって、熱容量が小さく短時間で昇温可能なフィルムヒーターを CT 表面に張り付けることで、CT 最表面のみ省エネかつ短時間で昇温させ氷を剥離することが可能であると考えられる。

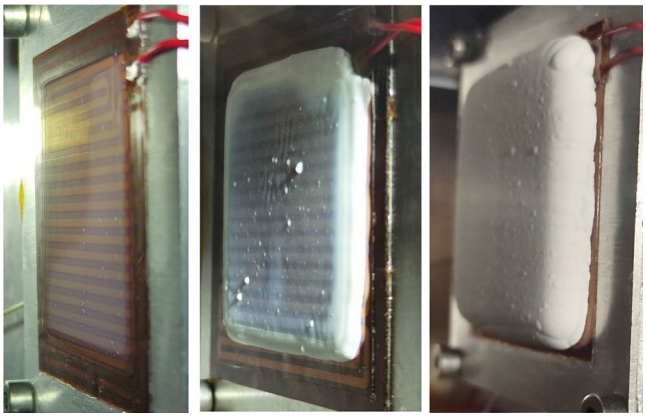
3.2 水トラップのメリット

CT の表面温度を 0 ℃以上に設定し、水蒸気を液相（水）として捕獲する「水トラップ」のメリットとして、氷トラップのように着氷後に CT 表面を加熱して氷を取り除く作業が必要ないため、連続的かつより効率的な水収集が可能であることが挙げられる。**図 8** に(a) 氷トラップと(b) 水トラップの工程モデルを示す。水トラップの場合は、CT の表面温度は 0 ℃以上であり、レゴリスから発生する水蒸気圧は 0 ℃の水蒸気圧、つまり三重点に相当する 611 Pa を超える必要がある。たとえば、CT の表面温度を 5 ℃、過冷却度を 10 ℃と仮定した場合、レゴリスに付着する氷を 15 ℃まで加熱する必要がある。氷レゴリスから発生した水蒸気の CT 表面への移動は、氷トラップと同様、飽和水蒸気圧差（レゴリスの温度である 15℃の飽和蒸気圧 1,704 Pa と CT の表面温度である 5℃の飽和水蒸気圧 872 Pa の差）による。CT 表面に接触した水蒸気は 0 ℃以上のため水に相変化するが、氷トラップのように固体（氷）の付着ではない点において、水トラップがより効率的に水収集できる可能性がある。水トラップの場合、CT 表面で凝縮した水滴は表面張力によって隣り合う水滴同士で連結し、粗大化すると考えられる。また重力がある場合、水滴は CT の下方に移動し表面から滴り落ちる。月のように重力が弱い場合でも、CT 表面近傍の気体（水蒸気）の流速を大きくすることで容易に水滴を移動できる。CT 表面から自律的に水滴を取り除くことにより、より低温を保持した CT 表面が露出し水蒸気と接触することができる。したがって、凝縮効率が低下することなく連続的な水収集が可能と考えられる。たとえば、地上の技術として一般的なコイル状の凝縮管やキャピラリー管を CT として利用し、管内に水蒸気を通過させ凝縮した水を収集する方法なども考えられる。

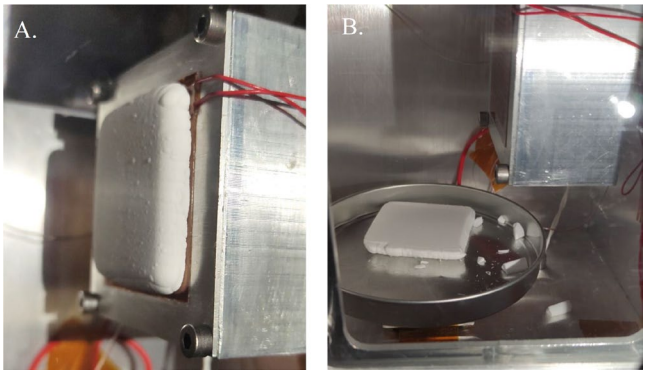
また、氷トラップの場合、少なくとも氷を付着させる CT 最表面の温度は冷却（着氷）と加熱（氷剥離）のサイクルを繰り返す運用が必要であり、昇温と降温のために CT の熱容量に応じた加熱と冷却の電力が必要である。一方、水トラップは CT 表面への水蒸気の付着（結露）による昇温を抑え表面温度を一定に保持するコントロールであり、氷トラップに比べて消費する電力に無駄がないと考えられる。



(a)真空中で氷を加熱し昇華した水蒸気を捕獲（コールドトラップ）する装置



(b)コールドトラップ表面において水蒸気が凝華し氷が成長する様子



(c) A：真空中でコールドトラップ表面に凝華した氷(左)、B：フィルムヒーター加熱により剥離、落下した氷片(右)

図 7 テキサス大学における真空中の水蒸気トラップ実験 [21)]

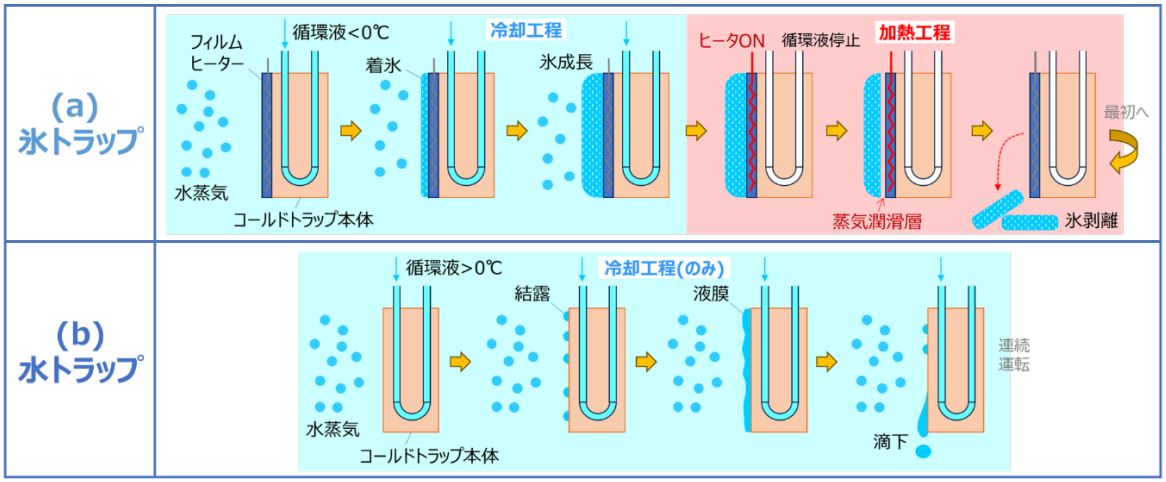


図 8 (a)氷トラップと(b)水トラップの水蒸気捕獲工程のモデル図

上述の通り水トラップは氷トラップに比べて消費電力に無駄がないと考えられるが、トラップ方式の選択において、水資源利用の観点から抽出水中の不純物の種類や量が純水化可能なレベルであることが必須条件である。すなわち、不純物の量が少ない、あるいは純水化工程において問題となりうる不純物がない場合、水トラップは成立する。一方で、水トラップでは抽出水中の不純物の量が多すぎる、または少量でも水電解においてクリティカルである不純物が存在する場合、抽出水中の不純物量が少ない氷トラップが成立解となる。水トラップか氷トラップかの選択において、今後十分な実験的検証が必要と考えられる。

3.3 非凝縮性ガスの影響

図 9 に月のレゴリスに付着する氷を加熱した際に発生する各種揮発性物質の相図と Holquist らが提案したコールドトラップの運用条件を示す [24]。ここで揮発性物質は、水と 3 章冒頭に記載した不純物に相当する気化ガスである。各種揮発性物質が昇華または凝縮、凝華する温度と圧力において、水銀（Mercury）以外は気体であり、CT 表面においては非凝縮性ガス（Non-Condensable Gas：NCG）として働く。一般的に（サーマルマイニングと同様に）冷媒の蒸発や凝縮などの相変化による伝熱を利用したヒートパイプや冷凍機は、数パーセントの NCG の混入により大幅に性能が低下することが知られている（たとえば、吸収冷凍機は数パーセントの NCG 混入により 80 %の性能低下）[25, 26]。これは、以下のメカニズムにより蒸発（昇華）－凝縮（凝華）のサイクルが滞るためと考えられる。

① CT 表面において水蒸気は冷却され凝縮（凝華）により体積が収縮する一方、NCG は凝縮せず体積は（ほぼ）一定で滞留する。このため CT 表面近傍において、空間に占める NCG の体積割合が増加し NCG が濃化する。

② NCG が CT 表面近傍で濃化すると逃げ場のない NCG は CT 表面で滞留する。これにより CT 表面が NCG に覆われ、CT 表面において水蒸気が凝縮（凝華）する実効面積が減少する。

③ CT 表面が NCG に覆われ水蒸気の凝縮（凝華）が妨げられるため、装置内の水蒸気は体積縮小せず、一方で氷レゴリスの加熱により水蒸気の発生が続く場合、装置内の圧力が高くなる。

④ 装置内の圧力が上昇するため、凝華・凝縮温度も上昇する。低い温度で蒸発部（氷レゴリス表面）から冷媒（水蒸気）が蒸発しなくなるため、過冷却度（CT 表面とレゴリスに含まれる氷の温度差）が大きくなる。

図 10 に CT 表面において NCG が濃化する①～②のモデルを図解する。装置内の多量の NCG の存在はサーマルマイニングにおいても水氷の相変化を妨げ、水抽出の効率の低下を招く原因となると推察される。このため、レゴリスを加熱した際に発生するガス中から水蒸気を残し、NCG のみを効率よく装置内から取り除き、CT 表面での NCG の濃化を防止する必要がある。

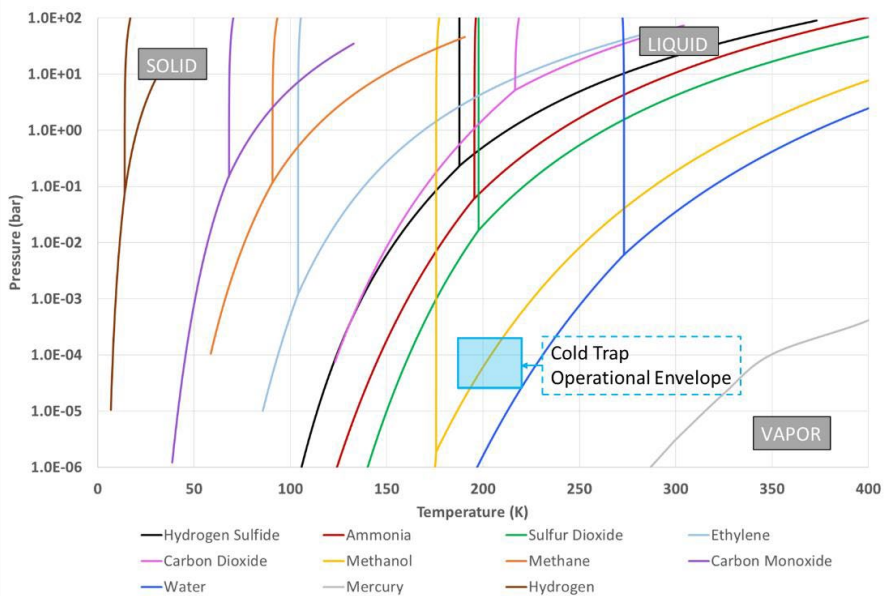


図 9 月の揮発性物質の相図と Holquist ら提案のコールドトラップ運用範囲 [24)]

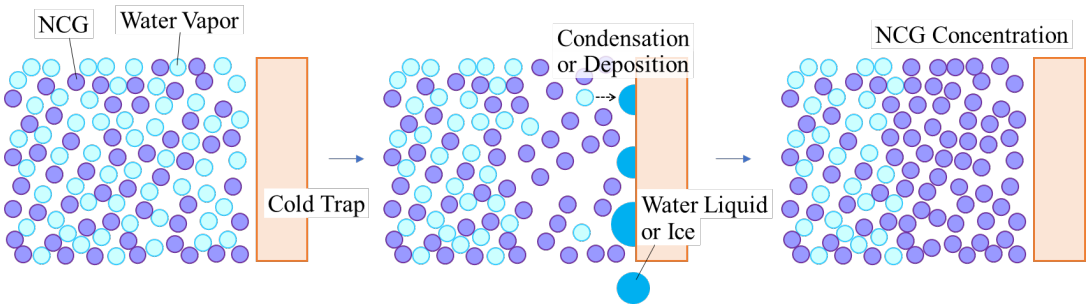


図 10 コールドトラップ表面近傍における NCG 濃化モデル

表 2 に月の氷を加熱した際に発生し得る揮発性物質の質量と体積の割合を示す。揮発性物質の質量は、Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS)の観測データ [2)]を元に月における水の存在形態の前提条件から算出された「水共存物質の質量」[27)]を参照にした。LCROSS の観測データに基づく水共存物質量は表中の B）ワーストケースであるが、地上の既存の水処理技術等を加味した場合、この条件設定は過剰と考えられた。そこで条件を緩和した A) 限定ケースも設定された [27)]。各揮発性物質の体積割合は、各成分の分圧から以下の式(1)により計算した。

$$V_x = \frac{P_x}{P_{Total}} \tag{1}$$

ここで、V_x：成分xの体積割合、P_x：成分xの分圧、P_{Total}：混合気体の全圧。各成分の分圧は以下の式(2)より計算される [24)]。

$$P_x = P_{H2O} \times \frac{n_x}{n_{H2O}} \tag{2}$$

ここで、P_{H2O}：飽和水蒸気圧力、n_x：成分xのモル数、n_{H2O}：水氷のモル数であり、各成分のモル数は**表 2** の各成分の質量をモル質量 [g/mol]で除すことにより求めた。またP_{H2O}は 0 ℃における飽和水蒸気圧（611 Pa）を用いた。

表 2 の各成分の体積割合から、A) 限定ケースであれば NCG は 0.14 vol%であり、効率低下は無視できる可能性がある。一方、B) ワーストケースの場合、17 vol%と水抽出の効率が大きく低下すると予想され

る。

さらに LCROSS のデータは人工物（セントールロケットと呼ばれる燃料タンク）を月面に衝突させた際に発生する高温・高圧下での揮発性成分のプルーム（ガス）を分析した結果であることから、月の元々の氷の揮発性成分を表していない可能性が指摘されている [20, 28]。月の氷の起源の一つである彗星衝突を仮定し、明確な化学組成が報告されている彗星の観測データ [20, 29]を用いて、月のレゴリスに含まれる氷を加熱した際に発生する揮発性成分の体積割合を上述の方法で計算した。その結果、C/1996 B2（Hyakutake 彗星）の場合、NCG は 26.6 vol%、C/1995 O1（Hale-Bopp 彗星）は 32.5 vol%であった。彗星のみを起源とする月の氷の場合、3 割近くの NCG が発生することとなり、水抽出の効率は大きく低下すると考えられる。

表 2 月の水氷に含まれる揮発性物質の質量と体積割合

	質量 [% Relative to H_2O]*		体積割合 [vol%]**	
揮発性成分	A) 限定ケース	B)ワーストケース	A) 限定ケース	B)ワーストケース
H_2O	100	100	99.859	82.903
H_2S	0.13	16.75	0.069	7.340
NH_3	0.05	6.03	0.053	5.288
SO_2	N/A	3.19	N/A	0.744
C_2H_4	N/A	3.12	N/A	1.661
CO_2	0.02	2.17	0.008	0.736
CH_3OH	N/A	1.55	N/A	0.723
CH_4	0.01	0.65	0.011	0.605

* 水 100g に対して共存する対象物質の質量 [27]、** 著者が計算

多量の NCG が発生する場合の対策として、Holquiest らは Flow-through コールドトラップ（**図 11**）を提案している [24]。発生した NCG を宇宙空間に放出することで装置の内圧を下げつつ、CT 表面で水蒸気を凝縮（凝華）する仕組みである。一方で、貴重な水蒸気の一部を不要な NCG と一緒に宇宙空間に放出してしまう。元々の月の水氷の含有率は LCROSS や LRO 等の各種月衛星探査の結果、0.1～5 wt%前後と推定されており [2, 27, 30]、貴重な水資源をなるべく宇宙空間に放出することなく活用することが望ましい。このため、NCG のみを放出できる装置や技術開発が重要課題の一つであると考えられる。

また、レゴリスから発生する NCG を低減する観点から、**図 4** の Heitkamp ら [18]のような方法でレゴリスに含まれる氷を均一に加熱（レゴリス内の温度差が 1 K 程度）することも重要と考えている。レゴリスは多孔質でありレゴリスの隙間である空間がそれぞれ連通しているとすれば、レゴリス内の圧力は均一と考えられる。レゴリス内の圧力が均一かつ温度差がほとんどなければ、加熱による昇温過程においてある瞬間（ある温度）のレゴリスに含まれる氷から発生する揮発物質は**図 11** に元づくとほぼ一種類であると考えられる。水氷が昇華する直前の温度までレゴリスを均一に加熱し（つまり、水の昇華温度以下ではあるが、他の揮発性成分の昇華温度以上である温度・圧力条件）、一旦装置を開放系にすることでレゴリスから発生し装置内に充満した NCG を宇宙空間に放出し、その後、装置を閉鎖系にした後であらためてレゴリスに残存する水氷から水蒸気を発生させることで、NCG をほとんど含まない水蒸気を発生できると考えている。このようにレゴリスを均一加熱する方法によっても、CT 表面近傍を（NCG を含まない）水蒸気のみとし理想的な凝縮（凝華）が可能になると予想している。

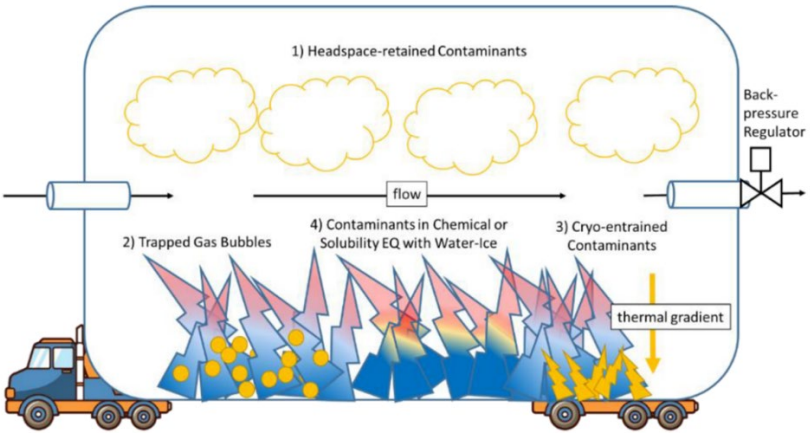


図 11 Holquiest ら提案の Flow-through コールドトラップの概念図 [24)]

4. 月面における水抽出の場所

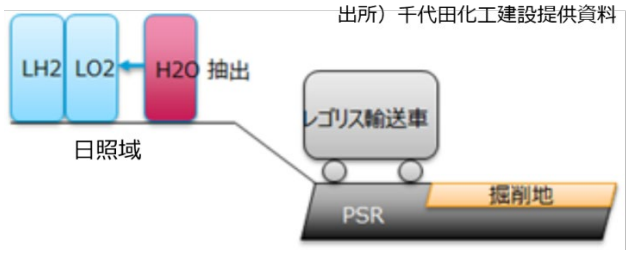
「月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理)」コンソーシアムの「水素 WG」（三菱総合研究所・日本宇宙フォーラム主催）において、水抽出を行う月面の「場所」と「適用方法」の組み合わせで生ずるメリット・デメリットの比較が行われた [7)]。巨大なクレーターの底部に位置する永久影は極めて低い温度環境であり、水氷が大量に存在すると目されているものの、ソーラーパネルなどから容易にエネルギーを得にくい地形である。このため水抽出の後工程であり多くの電力を使用する水電解は、PSR 外でもある程度温度が低い PSR 近傍のクレーター外縁の日照域で行うか、あるいは地下に埋蔵される水氷を対象に行うことが考えられている。

レゴリスに付着する氷からの水抽出工程は、**図 12** (a)のように日照域（クレーター外縁）で行う場合と **図 12** (b)のように PSR 内で行う場合が想定されている。水抽出を日照域で行う場合、太陽光などから水抽出に使用するエネルギーを得やすい反面、PSR 内と比べて水氷の量は相対的に少なく、鉱物重量が高いレゴリスを輸送する必要がある。輸送の難しさは、クレーターの大きさや形状によるが、たとえば VIPER[31)] の着陸地点候補となった Nobile Crater[32)]の場合、クレーター直径は約 79 km でありクレーター中央の PSR からクレーター外縁（日照域）までの距離は 40 km 程度、PSR とクレーター外縁部の高低差は 5,000 m 以上（クレーター深さ/直径比 [33)]を 0.07 と仮定の場合）と予測される。クレーターの外縁にあるリッジを超えるレゴリスの輸送は、上昇/下降のスロープがきつい悪路でありデメリットが大きい。このため水抽出後の鉱物を有効利用する技術が確立するまでは、PSR から日照域までのレゴリスの輸送の際には水氷のみを抽出するアプローチでの軽量化も必要になるかもしれない。

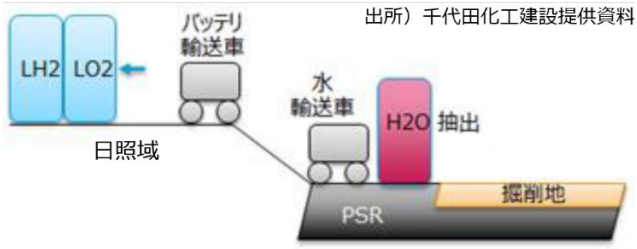
図 12 (b)のように水抽出を PSR 内で行うことで、輸送重量を 1/20（水氷含有率 5wt%の場合）に削減できる。当社の月面水抽出サーマルマイニング技術は、レゴリスからその場で水抽出すること、さらにはドーム状テントと異なり移動も可能であることからも極めて画期的な手法であり、水のみを日照域に運ぶため輸送エネルギーに関して効率性は極めて高い。一方で、日照域と PSR 間に送電線が設備されていない月の水資源開発における初期段階では、水抽出はバッテリー電力のみで行う必要があり、PSR 内で水抽出を行う場合は省エネ運転が必須と考えられる。

前章までのサーマルマイニングにおける水蒸気の捕獲方法の検討では、3 章冒頭において水トラップに比べて氷トラップの方が捕獲した水に含まれる不純物の量を大幅に除去できることを述べた。また、3-2 節では氷トラップと比べて、水トラップは省エネで水収集できる可能性を述べた。月面の水抽出の工程全体における消費エネルギーや水抽出の効率の詳細な見積もりは必要であるが、抽出水中の不純物量の低減と省エネ性を両立する水抽出の一方法として、**図 13** のように PSR 内で水トラップにより水抽出し、日

照域で氷トラップにより再抽出を行う方法を考えている。PSR 内においては、水トラップにより省エネ、かつ短時間でレゴリスの鉱物と水を分離して水抽出する（ただし、氷トラップに比べて不純物を多く含むと想定）。たとえば、輸送中に不純物を含む抽出水を再凍結し、その後、日照域にて氷を再度昇華して氷トラップすることにより不純物を大幅に取り除けることが期待でき、水抽出において省エネかつ不純物の大幅な除去が両立できると考えている。



(a)日照域抽出のイメージ図



(b) PSR 内固定抽出のイメージ図

図 12　月面水抽出における日照域と PSR 内での作業分割イメージ [7)]

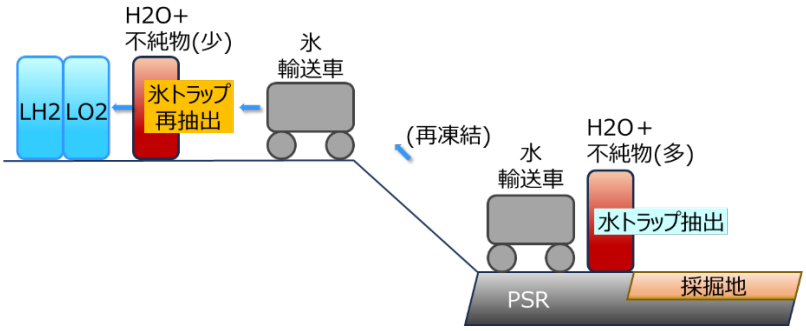


図 13　PSR 内での水トラップ抽出と日照域での氷トラップ再抽出のイメージ図

5. まとめ

月面で水抽出するためのサーマルマイニングにおける主な要素技術として、①レゴリスに付着する氷を効率よく加熱して水蒸気を発生させる技術、②レゴリスから放出された水蒸気を水（または氷）として効率よく捕獲する技術が考えられる。本報告では要素技術①：レゴリスに含まれる氷を効率よく加熱する技術についてレビューし、要素技術②：水蒸気を効率よく捕獲する技術に関しては、月面環境やレゴリスに含まれる氷の状態など現時点で得られる情報から課題を抽出し、以下のように考察した。

- サーマルマイニングにおいて、水抽出を行う月面の場所は容易に太陽光エネルギーが得られない永久影（PSR）の内部である。月の水資源開発における初期段階では、水抽出をバッテリー電源により行う

可能性が考えられるため、省電力かつ短時間で水抽出を完了する必要がある。

- 月のレゴリスに含まれる水氷の量は 0.1～5 wt%であると推定されている。この貴重な水資源を活用する上で、水抽出において不要な揮発性物質と一緒に宇宙空間に排出される水蒸気量を少なくし、レゴリスに含まれる水氷の量に対して高い抽出率が得られる水抽出技術の開発が必要である。
- 月面での水抽出における水の純度に関しては、後工程の純水化処理を容易にするため、可能な限り不純物を事前に除去する必要がある。

水抽出の電力効率や抽出率、抽出水の純度などの各性能は、装置の設計やレゴリスの加熱温度、コールドトラップの制御温度、装置内圧力などの各パラメータに影響を受けると考えられる。現状では、性能に影響を及ぼす各パラメータと水抽出の性能値のベースライン自体が不明であるため、今後は実験的な検討により明らかにしていく予定である。

文　献

1) ISECG（国際宇宙探査協働グループ）: 国際宇宙探査ロードマップ（Glocal Exploration Roadmap）改訂版, (2024).

2) A. Colaprete, P. Schultz, J. Heldmann, et al.: Detection of water in the LCROSS ejecta plume, Science vol. 330 (6003), pp. 463-8 (2010).

3) S. Li, P. G. Lucey, R. E. Milliken, et al.: Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) vol. 115 (36), pp. 8907-12 (2018).

4) Henning Wache, Luca Kiewiet, editors. Investigation on the Thermal Properties of an Lunar Icy Regolith Simulant. Space Resources Week 2024 (SRW); 2024 25-27 March 2024; Luxembourg.

5) 津村柊吾, 加藤敦史, 馬場大輔, et al.: 2D14 月面実証用水電解装置の開発, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会 (2024).

6) 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, EZA-2021001 (2021).

7) 三菱総合研究所, 日本宇宙フォーラム: 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 (技術課題整理)) 報告書, (2022).

8) Luca Kiewiet: Space Resources:Water Extraction Technologies on the Moon (and Mars), Management course - Space Exploration lecture Politecnico di Torino (2023).

9) 内田浩基, 川上理亮, 松風成美, et al.: サーマルマイニングによる月面水採取 (第一報) レゴリス内の伝熱解析と水採取方法の検討, 高砂熱学イノベーションセンター報 vol. 35 (2021).

10) 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).

11) 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).

12) George Sowers: Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, NIAC Phase I Final Report: Colorado School of Mines (2020).

13) P. T. Metzger: Modeling the Thermal Extraction of Water Ice from Regolith, Earth and Space 2018 pp. 481-9 (2018).

14) Naoya Sakatani, Kazunori Ogawa, Masahiko Arakawa, et al.: Thermal conductivity of lunar regolith simulant JSC-lA under vacuum, Icarus vol. 309 pp. 13-24 (2018).

15) Stephen E. Wood: A mechanistic model for the thermal conductivity of planetary regolith: 1. The effects of particle shape, composition, cohesion, and compression at depth, Icarus vol. 352 (2020).

16) Niklas Hab: Modeling, Simulation and Comparison of Lunar Thermal Water Extraction Methods for Space Resource Utilization, Technical University of Munich (2022).
17) 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).
18) Mart Heitkamp, Luca Kiewiet: Accurate modelling of ISRU technologies by CFD and DEM, Space Resources Week 2024 (2024).
19) Luca Kiewiet: An overwiew of the LUWEX project, German Aerospace Center (DRL), Oberseminar Geo und Astorphysik (2024).
20) 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処理, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会 (2023).
21) Nathaniel Ian Jurado: Rarified Water Vapor Deposition From Icy Lunar Regolith On An Engineered Cold Plate, University of Texas at El Paso (2021).
22) 福迫尚一郎, 田子真, 山田雅彦: 氷、 雪、 および海氷の熱物性, Netsu Bussei vol. 2 pp. 89-100 (1988).
23) 日本熱物性学会: 新編 熱物性ハンドブック, (株)養賢堂 (2008).
24) 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).
25) 鈴木洋, 永本渡, 杉山隆英: 吸収冷凍機における吸収器・蒸発器内の不凝縮ガスの挙動, 日本冷凍空調学会論文集 vol. 20 (3), pp. 333-40 (2003).
26) 大丸拓郎, 永井大樹: 自励振動ヒートパイプにおける非凝縮ガスの影響, 航空宇宙技術 vol. 13 pp. 17-24 (2014).
27) 岡本すず菜, 島田 潤, 目黒 裕章, et al.: 3D01 国際宇宙探査における水資源利用の役割, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会 (2024).
28) K. E. Mandt, O. Mousis, D. Hurley, et al.: Exogenic origin for the volatiles sampled by the Lunar CRater Observation and Sensing Satellite impact, Nat Commun vol. 13 (1), pp. 642 (2022).
29) J. Crovisier, D. Bockelée-Morvan: Remote Observations Of The Composition Of Cometary Volatiles, Space Science Reviews vol. 90 pp. 19-32 (1999).
30) A. B. Sanin, I. G. Mitrofanov, Maxim Litvak, et al.: Hydrogen distribution in the lunar polar regions, Icarus vol. 283 (2016).
31) Emily Certain: VIPER – NASA'S MOON ROVER, (2023).
32) USGS Astrogeology Science Center: MOON – Nobile, https://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/4321.
33) Bo Wu, Yiran Wang, Stephanie C. Werner, et al.: A Global Analysis of Crater Depth/Diameter Ratios on the Moon, Geophysical Research Letters vol. 49 (20), (2022).

ABSTRACT

We continue our research on the efficient collection of water ice that thought to exist in the permanent shadow regions (PSRs) of the Moon. In thermal mining, wherein water vapor is extracted by directly heating icy regolith layers, the technology required to heat the ice in the regolith and generate water vapor efficiently is an important element. In addition to this technology, we have started developing technology that efficiently captures the water vapor rising from the icy regolith in the form of liquid water or ice. As lunar water extraction through thermal mining is expected to be carried out in PSRs, where sunlight does not reach and energy generation is difficult, the process of capturing water vapor must also be energy-saving and rapid. In addition, as the amount of ice water contained in the icy regolith is estimated to be approximately 0.1–5 wt%, it is necessary to develop technology that can sublimate a small amount of ice water and capture all of the water vapor that is generated without any waste. Furthermore, the large amount of impurities (such as hydrogen sulfide and ammonia) contained in lunar water presents a major challenge to using it for electrolysis or as drinking water. It is important to remove as many impurities as possible at the water extraction stage preceding purification process.

【受賞記念】

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

谷野正幸・鎌田美志・川上理亮・大山孝政

Open-type Adsorption Thermal Storage Heat Pump System Applying HAS-Clay

Masayuki Tanino・Haruyuki Kamata
Yoshiaki Kawakami・Takamasa Oyama

当社の吸着材蓄熱システム「メガストック®」が、(公社) 空気調和・衛生工学会の第 62 回学会賞の論文賞／学術論文部門を受賞した。この受賞の対象は同学会／論文集に掲載された「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」の 6 連報である。そこで、ここでは論文掲載された技術内容の概要を紹介する。この「メガストック®」を市場展開して排熱利用を拡大し、我が国のカーボンニュートラルの実現に貢献したい。

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの利用とともに、さらなる省エネルギーが求められている。我が国における省エネルギー技術は、温室効果ガスの削減が社会問題となった 1990 年以降、革新的な技術発展を遂げており、排熱の利用はかなり進んでいる。しかしながら、100℃未満の低温排熱は発生場所における用途が限定されるために、その多くが捨てられているのが現状である [1-3]。

排熱の発生場所と熱の利用場所の時間的・空間的なミスマッチを解消するため、蓄熱やオフライン熱輸送の研究開発が行われきた [4-7]。また、省エネルギーやエネルギー有効利用の社会的要請を受けて、電力貯蔵や水素貯蔵の研究開発に加えて、熱エネルギー源の質である温度差やエクセルギーの観点からは高温潜熱蓄熱や化学蓄熱の高温熱利用の研究開発 [8-10] がなされてきた。

とくに、我が国のエネルギー需要の大きな割合を占める民生部門での大幅な省エネルギーなどを目的にて、地域冷暖房やエネルギーネットワークに関する研究も意欲的になされてきた [11-14]。さらに、地域社会の全体でのカスケード的なエネルギー利用と未利用エネルギー利用 [15] を推進し、ドイツのシュタットベルケ [16] のような自治体主導の広域熱利用システムを具現化することが必要である。また、太陽熱を利用したデシカント空調 [17-19]などの研究開発・市場導入の検討もなされてきた。

以上のような様々な研究課題を解決するためには、高密度蓄熱材と大容量蓄熱システムの導入が有効な選択肢の一つである。

そこで我々は、(国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいて、高性能吸着材ハスクレイをベースにした高密度蓄熱材を用いた、高効率な吸着材蓄熱システムの開発してきた [20-52]。本報では蓄熱材・蓄熱システムの製品化開発とともに、従来の潜熱蓄熱に対して 2 倍以上の蓄熱密度があり、温風・温水・除湿・冷風など多様な用途に利用できる、吸着材蓄熱システムの実フィールドでの実証の概要を説明する。さらに、ハスクレイだけでなくゼオライトも用いた、吸着材蓄熱システム「メガストック®」の市場展開の現状を紹介する。

2. 吸着材蓄熱システムの概要

本吸着材蓄熱システムは吸着式ヒートポンプの原理を応用した技術であり、**図 1** に吸着材蓄熱システムの蓄熱運転と放熱運転を模式的に示す。蓄熱運転時は熱（排熱）によって製造された高温空気を、粒状の吸着材が充填された蓄熱槽に供給し、吸着材を乾燥させる。放熱運転時は湿潤空気を蓄熱槽に供給し、吸着材に水分を吸着させて発熱させ、高温低湿空気を製造する。このように蓄熱運転時は水分の脱着であり、放熱運転時は水分の吸着であるため、蓄熱利用というよりは水分の移動に伴う発熱を利用したシステムである。

本システムの特徴は、①時間ギャップが解消できること、②空間ギャップが解消できること、③加温＋除湿利用ができること、④放熱空気が安定化できること、⑤省エネ・省 CO_2 が実現できること、⑥保管時の温度保持が不要であることが挙げられる。⑤については必要な補助動力は送風動力のみで、回収した排熱量分だけ利用側のエネルギーと CO_2 を削減可能である。また、⑥については水分の吸脱着反応を利用しているため、密閉状態を維持すれば、いつまでも熱の保管が可能であることが特徴である。

当社の「メガストック®」の市場展開において、吸着材蓄熱システムでの蓄熱材として使用する、吸着材造粒体の種類を**図 2** に示す。ハスクレイは非晶質アルミニウムケイ酸塩（HAS : Hydroxyl Aluminum Silicate）と低結晶性粘土（Clay）からなる複合体であり、2008 年に産総研が開発した無機系吸放湿材である。また、ゼオライトは結晶性アルミのケイ酸塩の総称であり、合成ゼオライトは化学・製薬産業等の脱水材・触媒用として利用され、人工ゼオライトは水処理・脱臭剤として幅広く利用されている。なお、本報の 7 章の実証施設までは、ハスクレイを蓄熱材として使用した NEDO 事業の内容の報告である。

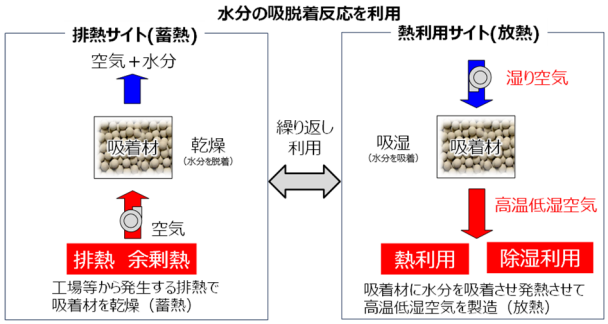


図 1　吸着材蓄熱システムの蓄放熱運転

図 2　吸着材蓄熱システムで採用している吸着材の種類

3. 吸着材蓄熱槽の計算モデルと吸着材の水蒸気吸着時の発熱量

ここでの計算モデルは、吸着材蓄熱槽や吸着材蓄熱システムの設計ツールの開発を第一の目的とした。そこで、物理的に妥当な範囲内で数値解析モデルの簡略・定式化を行い、計算結果と試験結果との比較を通じて、本数値解析モデルの工学的な妥当性と設計ツールとしての可能性を検討した。

解析対象は蓄熱槽の内の吸着材充填部とした。また、ここでは簡便な設計ツールや提案ツールを開発することを目的とし、充填部の円筒座標系での半径方向の熱・物質移動を考慮せず、**図 3** のような軸方向（z 方向）に対する 1 次元として、まずは下記を仮定した。

1)　空気中の吸着質は水蒸気のみを対象とする。
2)　吸着材内部での温度と水分の分布は考慮せず、各々は一様とする。
3)　蓄熱槽での通風の圧力損失は極めて小さく、空気の熱物性値には圧力依存性を考慮せず、温度依存性のみを考える。

蓄熱槽の圧力損失ΔP [Pa]は(1)式の Ergun の式[53]に示すように、充填部の空隙率 ε [-]、吸着材の粒径 d_s [m]と形状係数 Ψ[-]、通風の粘度 μ [Pa s]と流速 u [m/s]から計算される。

$$\frac{\Delta P}{L}=150\,\frac{(1-\varepsilon)^2\,\mu u}{\varepsilon^3\,\psi^2\,d_s^2}+1.75\,\frac{(1-\varepsilon)\,\rho u^2}{\varepsilon^3\,\psi\,d_s} \qquad \cdots\cdots(1)$$

実際の吸着材は円筒形であるが、ここでは球形として体積相当粒径 d_s と Ψ を与えた。高さ L が約 300 mm の蓄熱材を充填した蓄熱槽での通風の圧力損失は極めて小さいため、上記の仮定 3)のように、空気の熱物性値に圧力依存性を考えない。

ここで**図 3** のように気相（湿り空気）での支配方程式として、水分質量保存とエネルギー保存を考える。湿り空気の空塔速度 u は 1 m/s 以下の低速であり、L が 300 mm で ε が 0.5 程度の吸着材充填部の通過時間は極小であるため、非定常項（時間項）は考えない。また、一般に対流項に比べて拡散項（熱伝導項と物質拡散項）は小さく、本解析モデルの目的が設計ツールの開発であるため、ここでは拡散項を省略した。ここで、M は固相と気相の間での体積あたりの水分移動量（水分移動速度）であり、Q は固相と気相の間での体積あたりの熱移動量（熱移動速度）である。

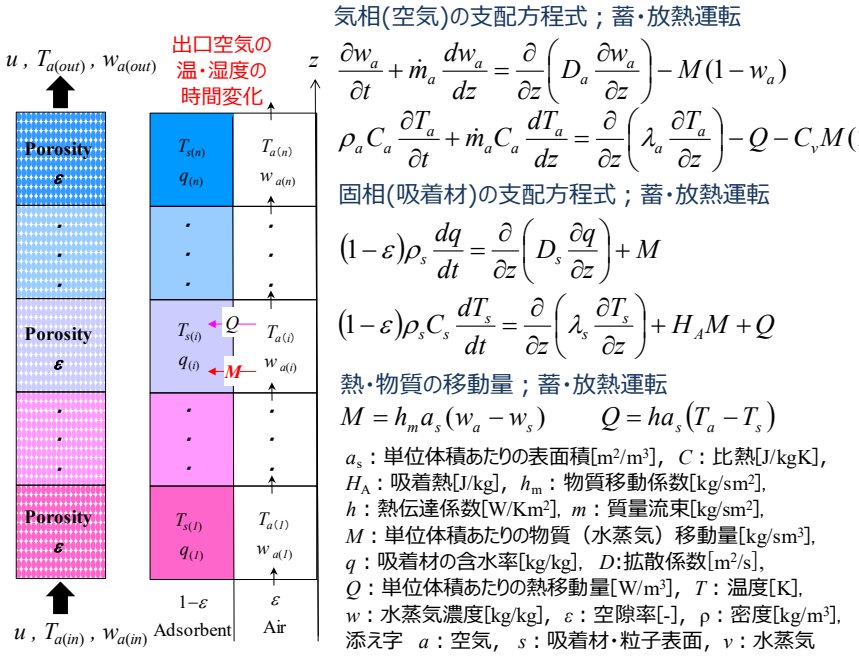


図 3 吸着材蓄熱システムの数値計算モデル

固相（吸着材）での支配方程式についても同様に、**図 3** のように水分質量保存とエネルギー保存を考える。気相と同様に拡散項を省略し、設計ツールの開発を目的に進めることにした。

つぎに、**図 3** の熱・物質の移動量としては、固相と気相の間での移動速度（M、Q）を、熱・物質移動の構成方程式として表す。ここで吸着材表面の水蒸気濃度は平衡状態として、吸着材の含水率と吸着等温線から、式中での表面の水蒸気濃度 w_s を算出することにした。これらの物質移動係数 h_m や熱伝達率 h には宮内の式[54]を採用し、Nu 数より h を定め、ルイス数を 1 として h_m を定めた。

なお、吸着材のハスクレイの物性値である、比熱、比重、吸着等温線、吸着熱は、**図 4** の断熱型水和熱測定装置などを用いて測定した。

これらの保存則と構成方程式から、吸着材の含水率と温度の軸方向の分布の時間変化を計算し、吸着材を

通過した空気中の水蒸気濃度（湿度）と温度の軸方向の分布を計算した。流入空気の温湿度と流量の条件は、実測値を与えた。また、計算での吸着熱は含水率によらず一定とした。計算結果と**図 5** のような 100φ×500mmH の蓄熱材充填槽の実験装置での出口空気の温湿度や充填槽内の温度の実測結果と比較して、計算モデルの妥当性を確認した。

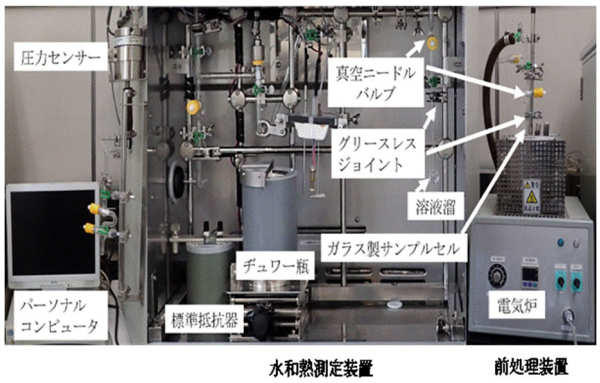


図 4 断熱型水和熱測定装置

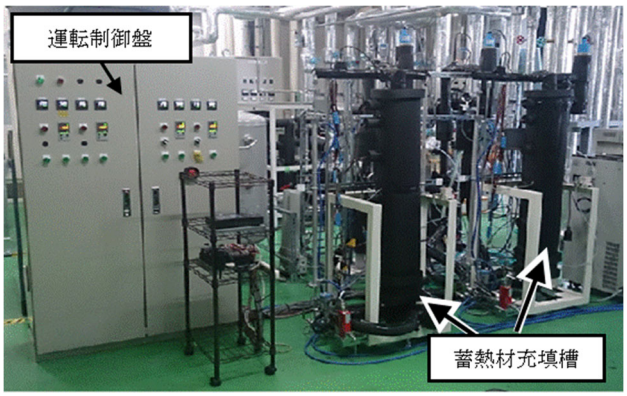


図 5 100φ×500mmH の蓄熱材充填槽の実験装置

4. 実際の工場での性能評価

日野自動車の工場における各種生産ラインを対象に検証試験を実施した。**図 6** に蓄熱／放熱特性の検証試験の概要フローを示す。蓄熱サイトは、日野自動車羽村工場（東京都羽村市）内にある塗装工程からの揮発性有機化合物（VOC）を燃焼処理する排気脱臭装置（RTO）からの高温排気を対象とし、間接熱交換器を介して高温空気を供給することで蓄熱検証試験を実施した。蓄熱完了後、図のように蓄熱槽を熱需要先へ搬送トラックで運搬し、放熱検証試験を実施した。放熱サイトは 2 箇所あり、それぞれ高温低湿空気と温水の供給方式について実施した。高温低湿空気の需要先は日野工場内にある樹脂ペレットの乾燥工程とした。ここでは乾燥空気製造用の加熱用電力の削減効果を確認した。温水の需要先は新田工場（群馬県太田市）にある鋳造部材の温水洗浄工程を熱需要先とし、温水製造用の加熱用電力の削減効果を確認した。

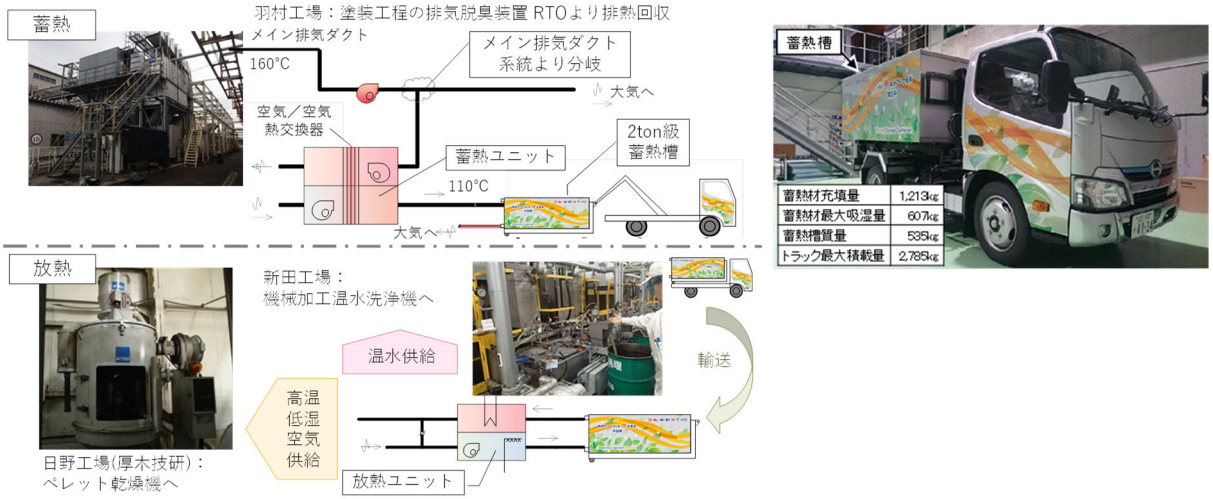


図 6 実際の工場での性能評価の概要図

4.1 樹脂ペレット乾燥工程での放熱試験の概要

図 7 にペレット乾燥工程での放熱検証試験の系統図を示す。本工程は自動車の樹脂部材を成型する前に、原材料の樹脂ペレットを乾燥機で加熱乾燥処理している。蓄熱槽の出口空気ダクトを乾燥機の外気取入口に接続し、図のように蓄熱槽からの高温低湿空気を供給することで、乾燥機内で空気を加熱するために必要な電気ヒーターの消費電力の削減効果を確認した。通常、生産状況に応じて複数種のペレットを複数台の乾燥機で適宜分担して乾燥処理するため、工程には乾燥機が複数台設置されている場合が多いが、今回は 1 台のみを試験対象とし蓄熱槽からの高温低湿空気の余剰分は排気した。この乾燥機 1 台の定格風量は 130 m^3/h であり、本試験での蓄熱槽からの供給空気風量は工場の運転時間の制約から 4,100 m^3/h と設定したため、乾燥機約 32 台分に相当する。また、乾燥機はバッチ式であるため、ペレットの乾燥完了時間（通常条件と同一で 2 h で完了）毎にペレットの入替作業（約 0.5 h）を行った。なお、蓄熱槽への供給空気は、工場内のプロセス排気や外気条件を模擬するため、図中の外調機で事前に所定条件（25℃/95%RH）に調整して供給した。また、蓄熱槽下部に質量計（ロードセル：精度±0.4%RS）を設置し、試験中の吸着水分量の変化を計測した。これらの計測データによって電気ヒーター消費電力の削減効果を確認し、蓄熱槽の出口空気温度の経過時間変化によって数値解析モデルの妥当性を確認した。

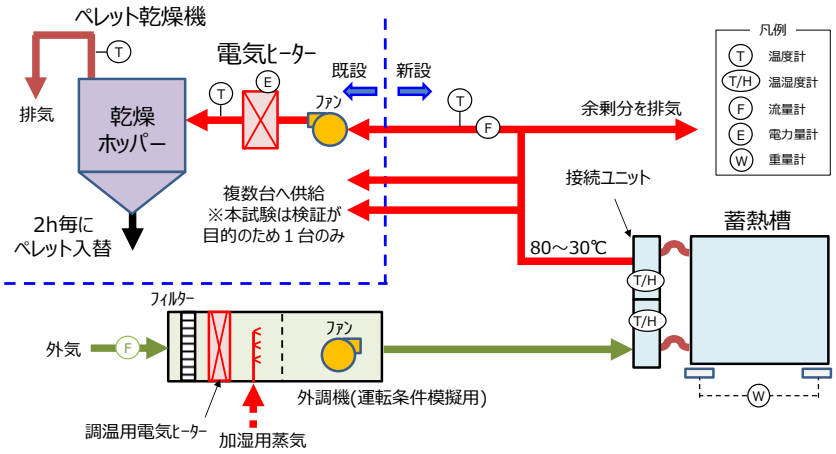


図 7　樹脂ペレット乾燥工程の放熱検証試験システム図

4.2 温水洗浄工程での放熱試験の概要

図 8 に温水洗浄工程での放熱検証試験の系統図を示す。本工程は自動車の鋳造部材の製造過程の一部であり、部材に付着した油分を除去するために約 50℃の温水で洗浄している。図のように温水槽上部にある排気フードから温水槽の湯気を含む約 35℃/85%RH の高湿空気を回収して蓄熱槽へ送り、高温低湿空気を供給した。この高温低湿空気で温水槽の温水を間接加熱することで、温水加熱に必要な電力（槽内の電気ヒーターで 50℃一定に加熱制御）の削減効果を確認した。なお、温水との間接加熱後に排出される低湿空気を温水洗浄の後工程にある部材の乾燥工程に供給利用すれば、さらなる付加価値が想定されるが、今回は温水供給までを対象とした。本試験での蓄熱槽からの供給空気の風量は、工程内の風量バランスの制約から 1,800 m^3/h 以下に設定した。熱交換のために温水槽から温水を取り出す循環ポンプの流量は、槽内の水位管理の制約によって一定制御とした。ここでの計測データによって電気ヒーター消費電力の削減効果を確認し、蓄熱槽の出口空気温度の経過時間変化によって数値解析モデルの妥当性を確認した。

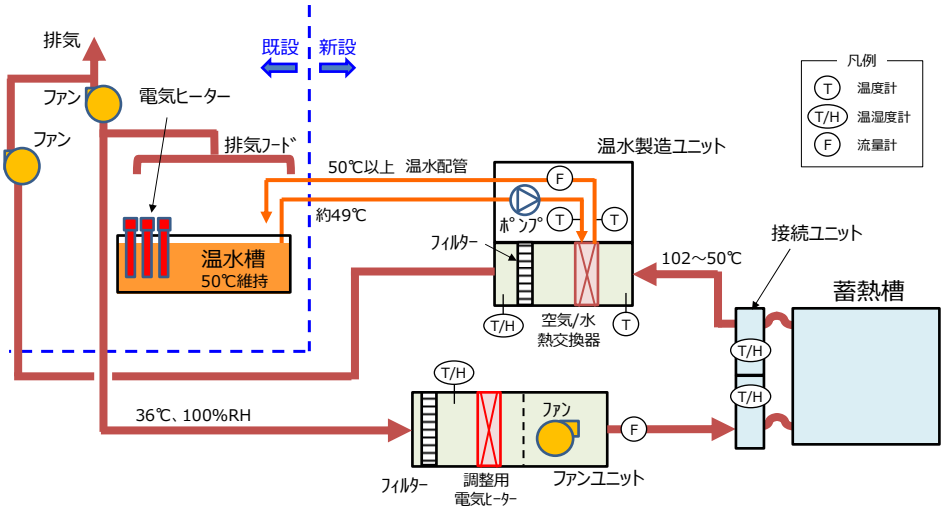


図 8 温水洗浄の放熱検証試験システム図

4.3 蓄放熱槽の熱収支の評価

ここでは、前述のような電気ヒーター消費電力の削減効果、蓄熱槽の出口空気温度の経過時間変化による数値解析モデルの妥当性とともに、温湿度の実測値に基づき蓄放熱量を算出して吸着材蓄熱槽の熱収支を評価した。実用化に向けて蓄熱量を再確認するとともに蓄熱量の計量方法を検討するため、ここでは**表 1** のように、工場内のトラックスケール（台貫）による搬送時毎のトラック質量の測定結果により、蓄放熱量を評価することにした。表のように蓄熱運転と放熱運転での開始前と終了後の質量差（除湿量・加湿量）に、吸着水蒸気量当たりのハスクレイ吸着熱（3,000 kJ/kg）を乗じて、吸熱量と発熱量を算出した。蓄熱量と放熱量は実測値の温度差に基づく熱量であり、蓄熱運転での熱収支の吸熱量/蓄熱量は平均 0.88 であり、放熱運転での熱収支の吸熱量/蓄熱量は平均 0.99 であった。また、蓄放熱運転の熱効率の放熱量／蓄熱量は、平均 0.93 であった。これらの値に加え、脱着操作が容易なアームロール方式での蓄熱槽の輸送に、特段の問題は発生しなかったことから、本吸着材蓄熱システムのオフライン熱輸送としての可能性を確認できた。

表 1 蓄熱放熱運転の熱収支と効率

蓄熱							放熱								熱効率
日付	重量（台貫）			蓄熱量	ファン	除湿量・q	日付	重量（台貫）			放熱量	ファン	加湿量・q	放熱量	放熱量
	開始前 [kg]	終了時 [kg]	除湿量 [kg]	温度差より [MJ]	消費電力 [kWh]	蓄熱量 [－]		開始前 [kg]	終了時 [kg]	加湿量 [kg]	温度差より [MJ]	消費電力 [kWh]	放熱量 [－]	消費電力 [－]	蓄熱量 [－]
2/13	2,460	2,060	400	1,361	15.8	0.88	2/14	2,060	2,500	440	1,263	76.9	1.05	3.78	0.93
2/15	2,500	2,060	440	1,444	15.4	0.91	2/16	2,060	2,490	430	1,267	85.4	1.02	3.49	0.88
2/20	2,490	2,050	440	1,404	15.0	0.94	2/21	2,050	2,490	440	1,210	45.4	1.09	5.56	0.86
2/22	2,490	2,060	430	1,399	19.1	0.92	2/23	2,060	2,430	370	1,144	31.2	0.97	6.32	0.82
3/13	－	2,080	－	636	8.0	－	3/14	2,080	2,270	190	682	14.3	0.84	8.50	1.07
3/15	2,270	2,070	200	806	9.2	0.74	3/16	2,070	2,370	300	913	55.7	0.99	3.91	1.13
3/20	2,370	2,070	300	1,021	11.5	0.88	3/21	2,070	2,350	280	868	27.8	0.97	6.13	0.85
3/22	2,350	2,060	290	1,033	12.3	0.84	3/23	2,060	2,280	220	640	5.7	1.03	9.87	－
註：ハスクレイ吸着熱 q ＝3000kJ/kg					平均	0.88							平均 0.99	平均	0.93

5. 定置型蓄熱システムの実証試験

石原産業の四日市工場の酸化チタン生産施設において、乾燥ラインからの 100℃以下の排気から排熱を回収・蓄熱し、乾燥ラインに必要な熱源の負荷低減のために、定置型の蓄放熱実証試験設備を設置してラインへの給気に蓄熱槽からの放熱空気を供給した。試験設備には 2 つの蓄熱槽を設置し、乾燥ラインの運

転と排熱の放出状態に合わせて、それぞれ蓄熱／放熱を切り替えるバッチ式の運転を行った。

図 9 に定置型の蓄放熱実証試験設備の系統図を示す。この図では、蓄熱槽 1 が蓄熱運転の状態、蓄熱槽 2 が放熱運転の状態を模式的に示している。図中の左側の排熱回収・熱供給先である酸化チタンの乾燥ラインでは湿潤状態で投入された酸化チタンが、ベルトコンベアによる搬送中に高温空気によって乾燥されて装置外に送出される。高温空気の加熱源は工場内のセントラル方式の蒸気であり、蒸気ヒーターにおいて室内空気を吸引・昇温している。また、酸化チタンを乾燥させた後の高温空気は、100℃以下の低温湿潤状態で室外に排気されている。

今回の実証試験のために設置した設備は、熱交換器、ファン、2 つの蓄熱槽、切替ダンパー、およびそれらを接続するダクト系から構成されている。乾燥ラインからの排気を分岐し、室内空気と熱交換させることで排熱を回収して、これを蓄熱用空気として蓄熱槽（**図 9** では蓄熱槽 1）に供給された。放熱用空気には外気を使用し、乾燥ラインから排熱回収した後の排気を一部混合して調整された湿潤放熱用空気が、蓄熱槽（**図 9** では蓄熱槽 2）に供給された。これは排気に含有する水分も回収利用することで、放熱用空気の相対湿度を上げて、蓄熱材の吸着熱の向上を図ることが目的である。それぞれの蓄熱槽の蓄熱・放熱運転を一定時間毎に切り替えることで、連続的に高温低湿空気を蒸気ヒーターに供給して、既設の加熱源である蒸気の使用量を削減可能にした。

写真 1 には蓄熱槽の外観を示す。2 つの蓄熱槽は、1.94 m×5.08 m×1.60 mH の直方体であり、各々内部に蓄熱材である吸着材ハスクレイの造粒体が乾燥質量で 2,190 kg 充填されている。

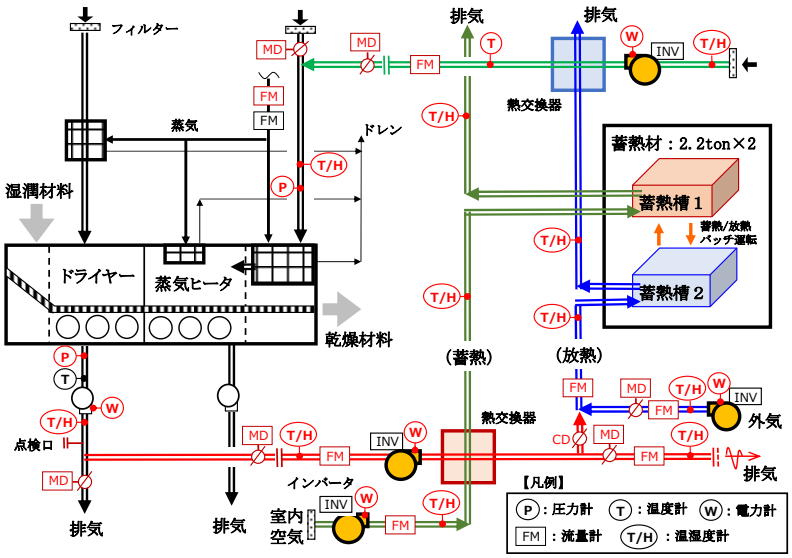


図 9　定置型システムの系統図

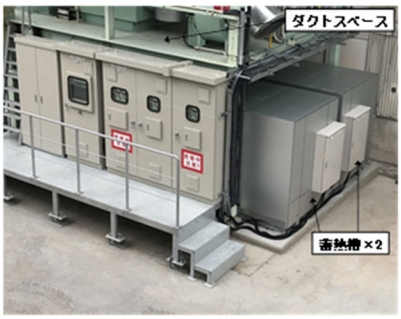


写真 1　蓄熱槽

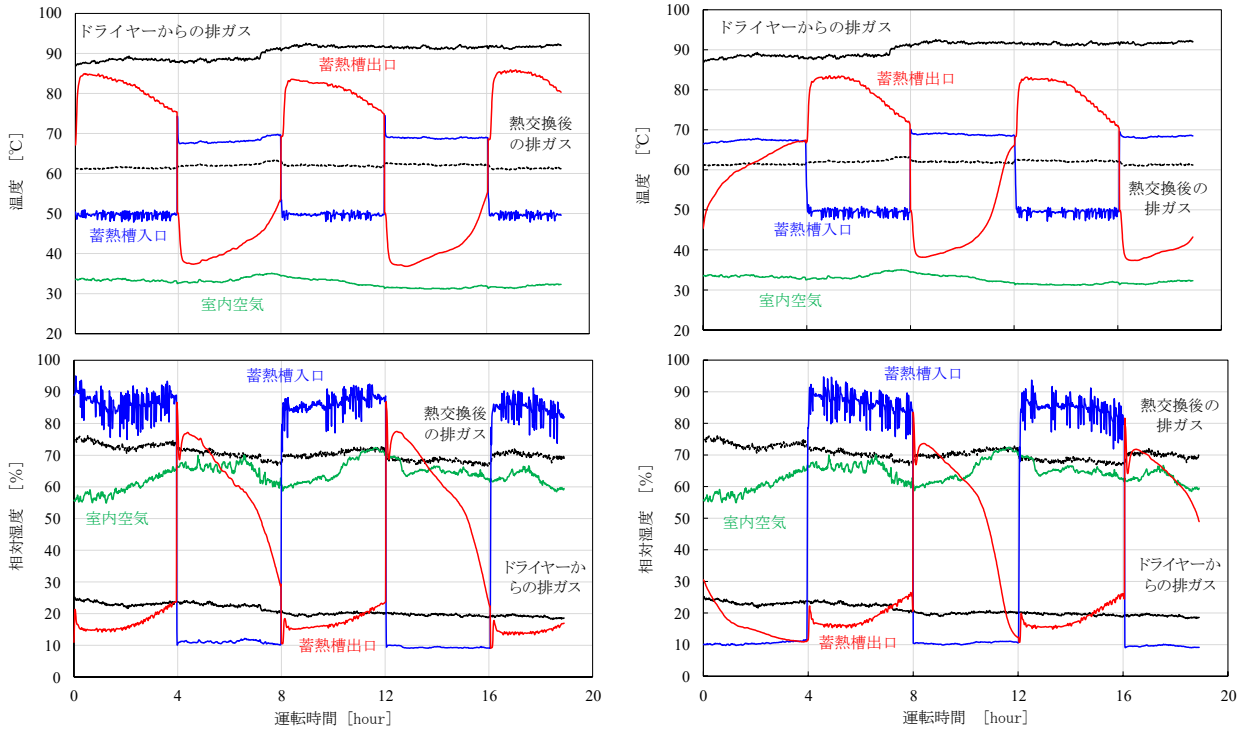
図 10 に運転切替えを 4 時間で行った時の、蓄熱槽廻りの運転に関わる各箇所における温度および相対湿度の経時変化の一例を示す。図の(1)が蓄熱槽 1 の出入口の値を示し、図の(2)が蓄熱槽 2 の出入口の値を示す。蓄熱槽 1 の場合は 0～4 時間が放熱運転で、4～8 時間が蓄熱運転であり、以降も同様に繰り返された。また、蓄熱槽 2 の場合は 0～4 時間が蓄熱運転で、4～8 時間が放熱運転であり、以降も同様に繰り返された。

蓄熱槽入口の温湿度は、蓄熱運転では排熱から回収した蓄熱用の高温空気の値であり、放熱運転では放熱用の湿潤空気の値である。放熱用の湿潤空気の温湿度は、外気と乾燥ラインからの排気とを混合して、所定の温湿度になるように制御されている。蓄熱槽出口の温湿度は、蓄熱運転では蓄熱後の排気であり、放熱運転では放熱空気（乾燥ラインへの供給空気）の値である。各々の図中には、乾燥ラインからの排気の温湿度と、室内空気の温湿度も示している。

この運転条件の場合、30～35℃の室内空気が 85～95℃程度の排ガスと熱交換され、約 65～70℃の蓄熱用空気として蓄熱槽に供給されている。放熱運転では温度が 50℃で相対湿度が 90 %RH の空気を蓄熱槽に供給することで、75～85℃で 17 %RH の高温低湿空気が得られている。このように吸着材蓄熱システムは、本実証試験のような運転条件の場合、蓄熱温度以上の放熱温度を得ることが可能であり、ヒートポンプのような昇温機能を持つことが確認できた。

なお、放熱運転において、蓄熱槽出口の空気温度が運転時間とともに低下するのは、蓄熱材ハスクレイの吸着等温線の特性に起因し、水分吸着量が飽和に近づいたことによるものである。また、蓄熱運転後半において、蓄熱槽出口の空気温度が上昇するのは、蓄熱材の乾燥が完了に近づいていることを示している。

このように定置型実証試験設備では、2 つの蓄熱槽での蓄熱運転と放熱運転が交互に繰り返されるような、蓄放熱運転が行われた。



(1)蓄熱槽1　　(2)蓄熱槽2

図 10　定置型実証試験の温湿度の経時変化

6. オフライン熱輸送型システムの実証試験

オフライン蓄放熱実証試験は**図 11** に示すように、日野自動車羽村工場周辺で実施された。蓄熱は羽村工場のコージェネレーションシステム（CGS）の排熱を利用し、放熱サイト(1)の羽村市スイミングセンターと、放熱サイト(2)の羽村工場の産業空調設備（塗装工程のリサイクル空調）に高温低湿空気を供給した。図のように、放熱サイト(1)では蓄熱槽は搬送トレーラーで運搬され、その実証試験は羽村市の支援を受けて実施した。また、放熱サイト(2)では羽村工場内で資材や完成部品の運搬用に使用されている小型牽引車を利用して蓄熱槽が搬送された。

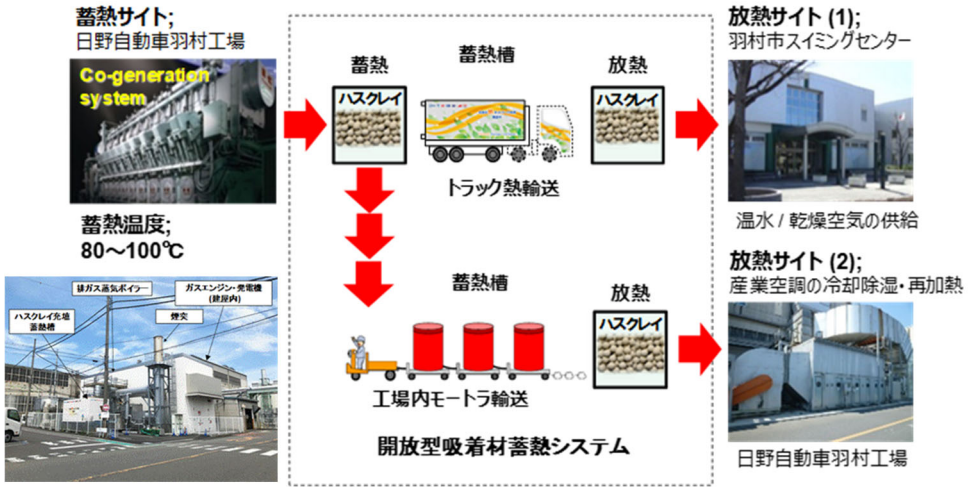


図 11　オフライン熱輸送型システムの概要

写真 2 に蓄熱槽と搬送トレーラーの外観を示す。蓄熱槽には、蓄熱材としてハスクレイ造粒体が乾燥重量で 5.5 ton 充填されている。この蓄熱槽を 20 フィート海上コンテナ用トレーラー台車に積載し、CGS 設備から約 2 km 離れた羽村市スイミングセンターへ大型トレーラーにより輸送した。トレーラーヘッドと台車は着脱可能であり、蓄放熱の運転中に車両が離脱できるため 1 台の車両で複数台の蓄熱槽も運搬可能である。ここでの蓄熱槽の内部には粒子対流の抑制法 [34] などの開発技術が採用された。

写真 3 に蓄熱槽と搬送用の小型牽引車の外観を示す。この蓄熱槽には、蓄熱材としてハスクレイ造粒体が乾燥重量で 2.2ton 充填されている。排熱源の CGS から数百 m 離れた塗装工程の空調設備までは、小型牽引車（トラクター）で運搬した。

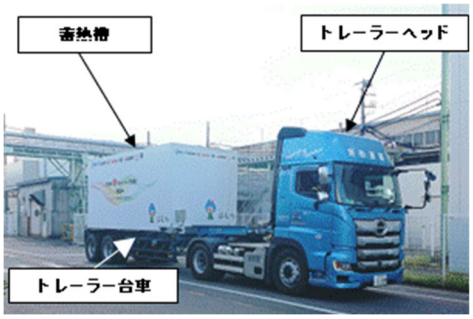


写真 2　蓄熱槽と搬送トレーラー

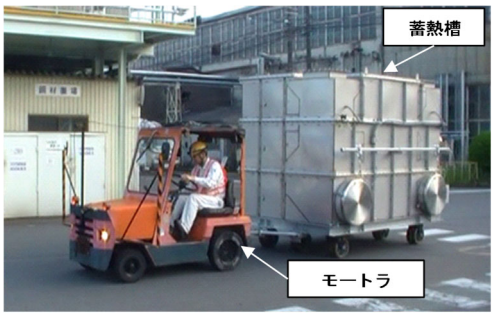


写真 3　蓄熱槽と小型牽引車（モートラ）

6.1 蓄熱実証試験

図 12 に蓄熱サイトの実証設備の系統図を示す。図の左側の系統が今回設置した熱回収・蓄熱設備であり、右側の系統が CGS の既存設備である。CGS の既存設備はガスエンジン、排ガス蒸気ボイラ、ポンプ、配管・ダクトなどから構成されていた。また、熱回収・蓄熱設備は、空気／水と空気／空気の熱交換器、ポンプ、配管・ダクトなどから成る蓄熱システム、接続ユニット、および蓄熱槽から構成された。

蓄熱運転では**図 12** の左上のファンによって外気が蓄熱システムに送られ、空気／水熱交換器で昇温され、さらに空気／空気熱交換器で昇温され、100℃程度の空気が蓄熱槽に供給された。空気／水熱交換器の温水は工場で熱利用後に、CGS 設備への戻り温水から分岐している。このように、通常の運転では使い切れない 88℃のジャケット温水と 100℃以上の排ガスから熱回収し蓄熱した。ここで、蓄熱槽への供給空気の温度などの蓄熱運転制御は、CGS の既存設備の蒸気や温水の需要を優先し、追従して各種の運転制御が行われていた。なお、蓄熱槽と蓄熱／放熱設備との着脱を簡便且つ速やかに完了できる接続ユニットを開発し、着脱作業から運転開始までの作業を 1 人で、15 分以内で行えることを確認した。

図 13 に蓄熱運転における各箇所の空気温度の経時変化の一例を示す。図のように、20℃を超えた状態の外気が温水との熱交換により昇温され、温水熱交換器出口の空気温度は 80℃以上を保持していた。また、排熱蒸気ボイラの排気との熱交換により、蓄熱運転中における蓄熱槽入口の空気の温度と相対湿度の平均値は、それぞれ 100℃と 1.3%RH であった。蓄熱運転開始後は、高温低湿空気によって、蓄熱槽内の吸着材の水分が脱着され、蓄熱槽出口の空気の温度と相対湿度は、約 40℃と 40%RH 以上で推移した。また、蓄熱槽入口と出口の絶対湿度の差は、約 20g/kg(DA)で推移した。運転開始 3 時間後から蓄熱槽出口の空気温度が上昇し始め、約 4 時間後に蓄熱槽出口の温度が蓄熱槽入口と同等の所定の温度に達して、蓄熱運転が終了した。

図中の破線は前述の数値解析モデルによる蓄熱槽出口の空気温度の計算結果である。実測結果と比較して、蓄熱完了となる時間が短くなっている。これは、実際の蓄熱槽内では通気分布が発生しているためと考えらえる。そこで、蓄熱材充填部で±5%の通風量の偏り [48] が発生していると仮定して、3 種類の風速（平均風速、平均風速＋5%、平均風速－5%）での蓄熱槽出口の計算結果を合成するような再計算を行った結果、図のように実測値とほぼ一致した。なお、通風量の偏りを考慮しない場合でも、安定に推移する蓄熱槽出口の温度レベルや蓄熱完了時間は推算できるので、本数値解析モデルは設計ツールとして活用できる。

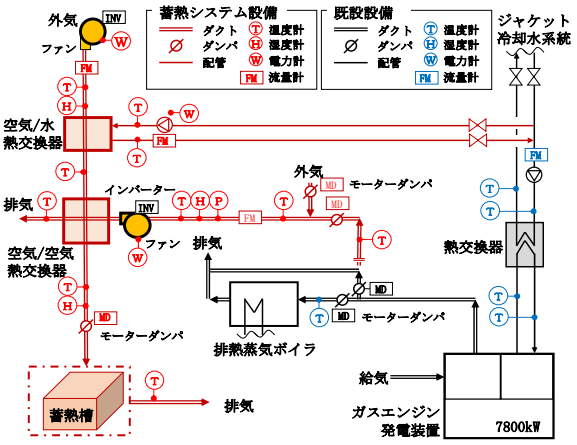


図 12　蓄熱サイト設備の系統図

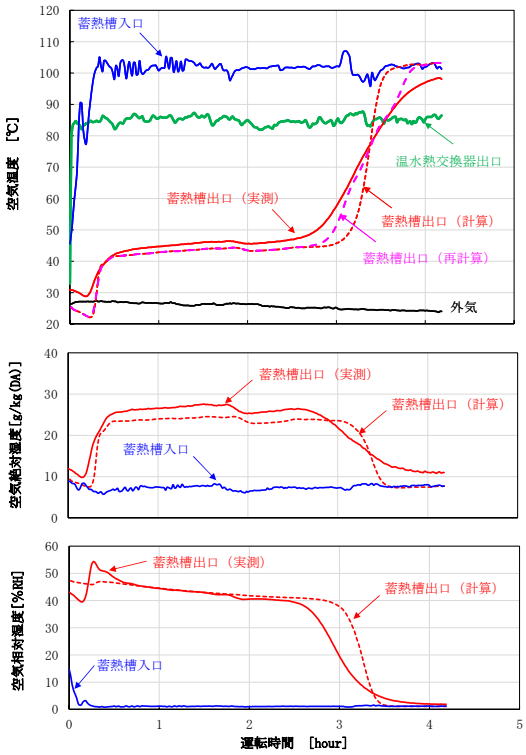


図 13　蓄熱運転の経時変化

6.2 スイミングセンターでの放熱実証試験

図 14 に羽村市スイミングセンター実証設備の系統図を示す。放熱設備は、蓄熱槽、空気／水熱交換器、ポンプ、配管、ダクトなどから構成された。図中では羽村市スイミングセンターの負荷側施設を、25m プール、プール天井内、プール室内、およびシャワー他に分けて模式的に示している。25m プールにはボイラにより、熱交換器を介して循環温水が供給される。浴槽などにはボイラや貯湯槽により温水が供給される。また、暖房時のプール天井内とプール室内には、ボイラや空調機・熱交換器により温風が供給される。放熱設備では図のように、蓄熱槽にプール室内の湿潤空気が供給されて、蓄熱槽内での吸湿・発熱反応で昇温した空気は、熱交換器を介してボイラ循環水やボイラ給水を昇温した。このように顕熱回収された空気は常温低湿状態になるため、プール天井内の換気やプール室内の暖房のために利用された。プール室内

とプール天井内では結露防止のためにも利用され、とくに施設運営者側より好評を得られた。

図 15 に放熱運転時の空気温度の経時変化の一例を示す。プール室内の排気が蓄熱槽に供給されるので、図のように、蓄熱槽入口の空気は常温高湿である。運転開始直後の蓄熱槽出口の空気温度は、80℃以上と高温になった。ここで、25～30℃の蓄熱槽入口の空気温度からの大幅な昇温は、蓄熱槽内の吸着材の水分の吸着熱によるものであり、蓄熱槽出口空気の相対湿度は、図のように約 0%RH で推移した。また。蓄熱槽入口と出口の絶対湿度の差は、約 10g/kg(DA)程度であった。運転開始 1 時間後以降は、蓄熱槽出口の空気温度は 55℃以上で推移した。図中の熱交換器中間の空気温度は、ボイラ循環水との熱交換後の放熱空気温度である。また、熱交換器出口の空気温度は給水との熱交換後の放熱空気温度であり、給水ポンプの起動停止により、熱交換器出口の空気温度は変動した。当日は外気よりも熱交換器出口の空気が高温であったため、プール室内の暖房用空気として供給された。

このように、施設の熱負荷が大きいタイミングで放熱運転を開始し、放熱空気をカスケード的に熱利用することで、放熱量を施設で有効利用することができた。また、図のように前述の数値解析モデルによる蓄熱槽出口空気温度の計算結果は、実測値とほぼ一致した。蓄熱試験と同様に、放熱試験においても本数値解析モデルが設計ツールとして活用できることを確認した。

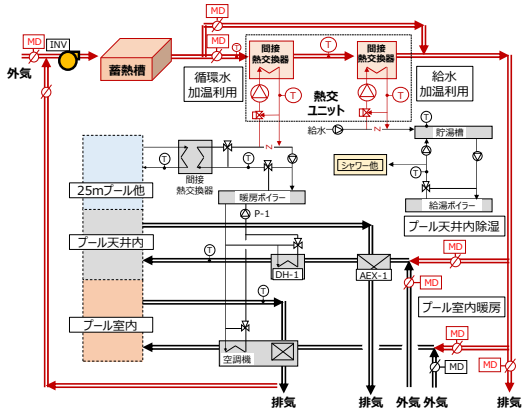


図 14 スイミングセンターの蓄熱サイト設備の系統図

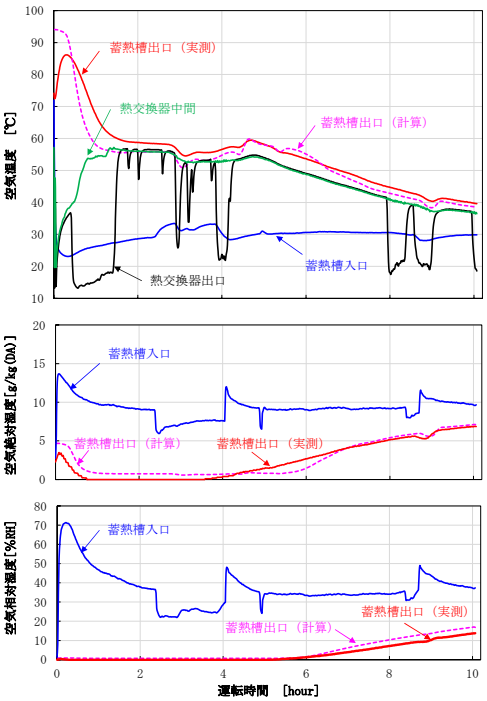


図 15 スイミングセンターの放熱運転の経時変化

6.3 オフライン熱輸送の季節間評価

図 16 に今回の実証試験における再生効率の結果を、左から試験の順番に示す。ここでの再生効率は、放熱量を放熱運転後の蓄熱量で除した割合と定義し、それぞれの熱量を蓄熱槽出入口の空気温度差から算出した。グラフ中の棒グラフ 1 つが、蓄放熱サイクル 1 回の再生効率を示している。再生効率の全体平均値は 91%であり、夏期、中間期、冬期における平均値はそれぞれ 91%、91%、90%であった。

今回の実証試験では蓄熱側および放熱側の都合上、蓄熱運転終了から放熱運転開始まで 6 時間以上経過しているが、90%以上の再生効率が確認できた。また、冬期に再生効率が低下しないことも確認できた。

なお、再生効率が 100%を大きく超えているのは、蓄熱温度の設定値を下げた時であるが、その後の設定値を上げた運転をしているため、平均値としては変わらない結果になった。

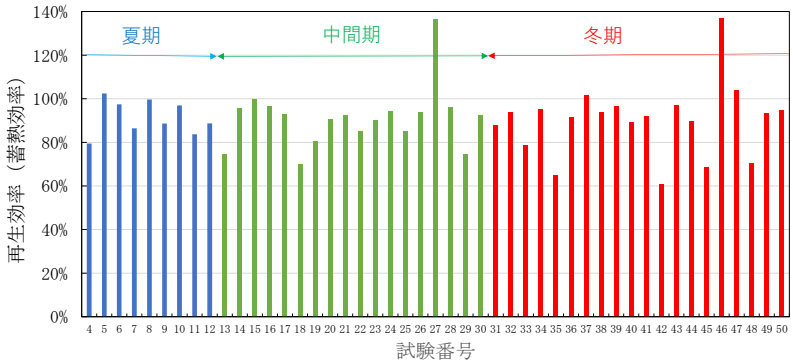


図 16　オフライン熱輸送の季節間評価

6.4 塗装工程での除湿利用の実証試験

前述の**図 11** に示すように羽村工場のコージェネレーションシステム（CGS）の排熱を利用し、羽村工場の産業空調設備（塗装工程のリサイクル空調）に高温低湿空気を供給した。

6.4.1 塗装工程での放熱利用

図 17 に塗装工程の空調設備および実証設備の系統図を示す。空調対象はフレッシュブースとリサイクルブースに分けられ、図では模式的に示している。外気を既設の空調機（外調機）で温湿度を調節し、フレッシュブースに給気する。このフレッシュブースの排気は、塗装ミスト等を除去するためにブース下部で散水され、相対湿度が 80～90%RH の高湿になっている。そのため、フレッシュブースの排気をリサイクル空調機で冷却除湿・加熱し、リサイクルブースに給気する。図のように今回設置した放熱設備では、高湿空気であるフレッシュブースの排気の一部を蓄熱槽に供給し、槽内で吸湿・発熱反応により昇温した高温低湿度の空気がリサイクル空調機に戻される。空調機での冷却除湿と加熱のための冷水と温水のエネルギー消費量は非常に大きく、ここではそのエネルギーの大幅な低減が見込まれた。

写真 4 に羽村工場内の塗装工程のリサイクルブース用空調設備の外観を示す。写真左側は CGS から輸送されていた、ハスクレイ充填の蓄熱槽である。写真右側の既設の空調機ユニットの内部には、各種フィルター、冷水コイル、温水コイルが設置されている。フィルター下流の高湿空気の一部を蓄熱槽に供給し、蓄熱槽からの空気を空調機に戻すための矩形ダクトが、写真のように増設された。

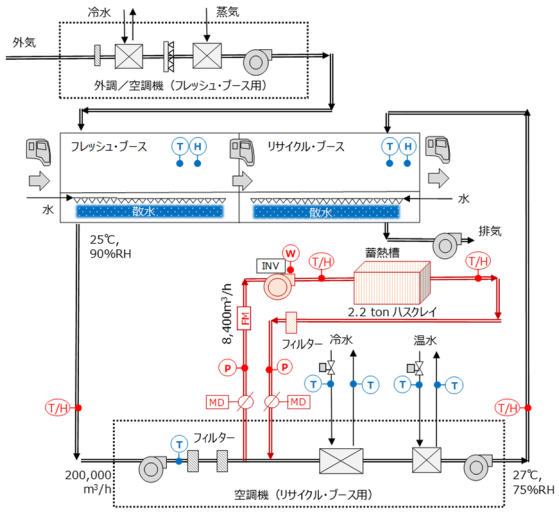


図 17　塗装工程の放熱サイト設備の系統図

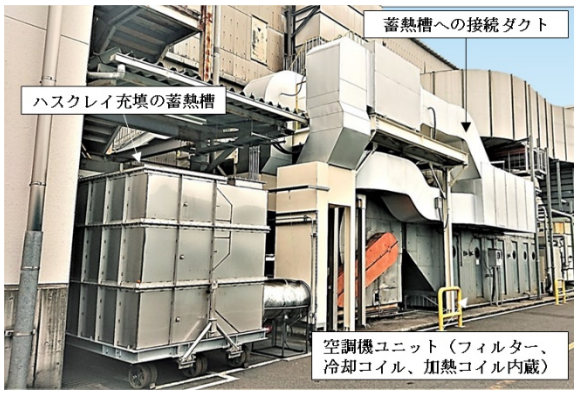


写真 4　リサイクルブース用空調設備

6.4.2 塗装工程での放熱実証試験

図 18 にリサイクルブース用空調機の冷温水熱量、蓄熱槽への給気ファンの回転数、リサイクルブースの温湿度、放熱運転時の蓄熱槽出口空気の温湿度の経時変化の一例を示す。図のように 17:32~21:00 の 3 時間半の放熱運転が行われた。リサイクルブース用空調機には常にフレッシュブース下で加湿冷却された空気が供給されるので、リサイクルブース用空調機の入口空気の温湿度に大きな変動はない。本蓄熱システムの放熱運転の開始時と運転停止時には、蓄熱槽に分岐する風量を徐々に立上げる制御と立下げる運転制御が必要である。このために蓄熱槽への分岐前と蓄熱槽出口の空気の温湿度を計測し、メインダクトへの合流後の空気の温湿度を演算して蓄熱槽に分岐する風量を自動制御するシステムを構築した。とくにハスクレイの特性として、**図 18** の下図のように、放熱運転の開始直後は急激に温度が上昇するため、少ない風量でも混合後の空気の温度上昇が起こり、温水負荷が下がって温水の消費熱量が先に減少し始めた。その後、**図 18** の上図のファン回転数が示すように蓄熱槽からの高温低湿空気の風量の増加に伴い、混合後の空気の湿度が下がり、冷水の消費熱量も減少し始めた。放熱運転開始後 30 分程の 18:00 頃に定常運転となり、温水流量はゼロとなって使用されたれた温水熱量もゼロとなった。また、冷水流量と冷水熱量は、極小で推移した。その約 2 時間後の 20:00 頃に、蓄熱槽出口空気の湿度が所定の値（20%RH）になったところで、本システムが停止動作に入り、**図 18** の上図のファン回転数が示すように、蓄熱槽に分岐する風量が減らされて行き、約 1 時間かけて 21:00 過ぎに本システムが停止した。このような放熱運転の後の通常運転時では、図のように冷水熱量は約 180 kW でほぼ一定であり、冷温水熱量の合計は約 400 kW でほぼ一定であった。本システムの放熱運転では定常時には、通常運転時の約 90%の省エネルギーが実現でき、システム立上げと立下げ期間を含めても通常運転時の約 70%の省エネルギーが実現できた。

図 19 に放熱運転における蓄熱槽廻りの空気温湿度の経時変化の一例を示す。空気流量は 65~210 m^3/min で平均 170 m^3/min（20℃換算）であり、前述の**図 18** の上図のファン回転数が示すように制御されている。フレッシュブース下の散水によって蓄熱槽入口の空気は、図のように約 22℃で約 80%RH の常温高湿の状態である。運転開始直後の蓄熱槽出口の空気温度は、80℃以上と高温になった。ここで、約 22℃の蓄熱槽入口の空気温度からの大幅な昇温は、蓄熱槽内のハスクレイ吸着材の水分の吸着熱によるものであり、蓄熱槽出口空気の相対湿度は図のように約 0%RH で推移した。また、蓄熱槽入口と出口の絶対湿度の差は約 12g/kg(DA)であった。運転開始 0.5 時間後以降は、蓄熱槽出口の空気温度は約 60℃から約 40℃に徐々に低下し、湿度は徐々に増加して放熱過程が推移した。約 3.3 時間後に蓄熱槽出口と蓄熱槽入口との温度差が所定の値（ここでは 15℃以下）に達して、放熱運転が終了した。図中の破線は前述の数値解析モデルによる蓄熱槽出口空気の温湿度の計算結果である。放熱運転の開始直後の蓄熱槽出口の最高温度などには実測値と計算値の相違が見られるものの、蓄熱槽出口の温度レベルや放熱完了時間は推算できるので、本数値解析モデルは設計ツールとして活用できることを確認した。

なお、図のように蓄熱槽の出口空気は極低湿であるため、メインダクトに比べて分岐ダクトが小口径でよく、既設設備を施工する上で、有利な点であると考える。

6.4.3 CO_2とコスト削減効果

図 20 に本システムが 1 回稼働した場合の CO_2 削減効果を示す。既設設備のみで稼働した場合のエネルギー消費を**図 18** の平均値とし、本システム稼働時間に相当する CO_2 排出量を 100%とした。本システム稼働における冷水および温水のエネルギー消費量に相当する CO_2 排出量は 28%までに抑制された。ただし、本システム稼働によるファンなどの消費電力や小型牽引車の燃料消費による CO_2 排出量は 15%に相当する。そのため、本システム稼働による正味の CO_2 削減効果は、既設設備のみが稼働している状態と比較して 57%となった。

また、エネルギー費用についても、同様に削減効果を試算した結果、本システムを場内運搬で除湿利用として導入した際の投資回収年数は 8 年以下になる見通しを得た。ただし、輸送に係る人件費は含まれていない。

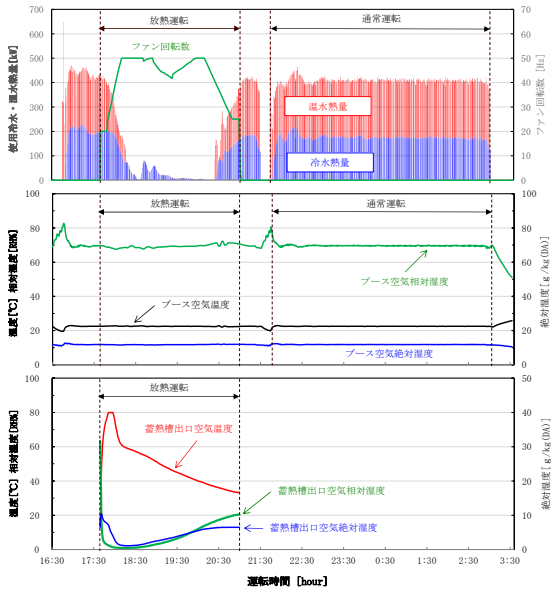


図 18 リサイクルブース空調機の消費エネルギーの経時変化

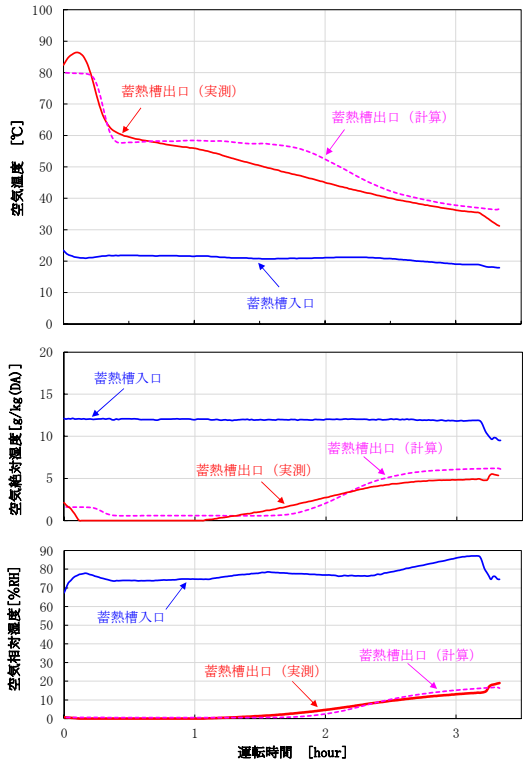


図 19 放熱運転の経時変化

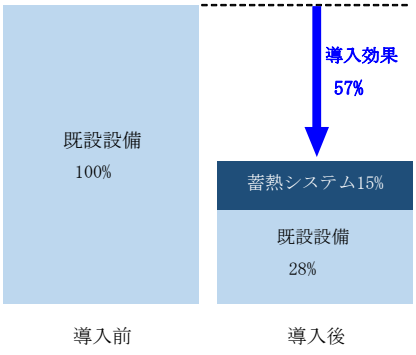


図 20 除湿エネルギーの省 CO_2 評価

7. おわりに

以上では、NEDO の戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいて開発・実証してきたハスクレイ吸着材蓄熱を対象に、(公社) 空気調和・衛生工学会の論文集に掲載された内容を中心にして紹介した。なお、この論文（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の 6 連報 [20-25]）は、空気調和・衛生工学会の第 62 回学会賞の論文賞（学術論文部門）を受賞した [55]。

NEDO プロジェクトの後に我々は、ハスクレイだけでなくゼオライトも用いた、吸着材蓄熱システム「メガストック®」として市場に展開してきた。その結果、電子機器で使用される積層セラミックチップコンデンサの主要製造拠点である TDK（株）本荘工場西サイト（秋田県由利本荘市）での実システムの導入に至った [56-58]。

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、吸着材蓄熱システム「メガストック®」による排熱利用の拡大は CO_2 排出量の削減に直接的に寄与できる。今後、各種の未利用熱や排熱が有効活用されるよう、吸着材蓄熱システム「メガストック®」の市場展開を進めたい。

謝辞

本報の成果の一部は、（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」の助成事業（JPNP12004）の内、「80℃以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材及びシステムの開発」、フェーズ：インキュベーション研究開発及び実用化開発、期間：2014 年 12 月 17 日～2018 年 3 月 31 日と、「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」、フェーズ：実証開発、期間：2018 年 7 月 18 日～2020 年 2 月 28 日の結果、得られたものである。NEDO をはじめ、関係の皆様に感謝申し上げます。

文　献

1) 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 Apr. 30th 2020)，https://thermatdb.securesite.jp/ HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf
2) 平野聡：工場における未利用熱の排出・活用状況，クリーンエネルギー，日本工業出版，2020.8.
3) 小原春彦：未利用熱エネルギーの革新的活用技術開発プロジェクトについて，冷凍，日本冷凍空調学会，96(1121)，201(2021).
4) 定塚徹治ほか：潜熱蓄熱材を用いたオフライン熱供給システムの開発，日本機械学会関東支部第 14 期総会講演会，59(2008).
5) 岩井良博ほか：潜熱蓄熱システムを活用した排熱利用技術，冷凍誌，88(1025)，191(2013).
6) 高橋和雄ほか：直接接触潜熱蓄熱技術を用いた熱輸送システムの開発，神戸製鋼技報，Vol. 56 No. 2，pp.10-14（2006.8）
7) 堀井雄介ほか：化学蓄熱材を用いたオフライン熱輸送システムの開発，クリーンエネルギー，33(1)，38(2020).
8) 畑田直行ほか：化学蓄熱・ヒートポンプシステムの実用化に向けて，冷凍，93（1094），834（2018.12）.
9) 加藤之貴：化学反応を用いた熱エネルギー貯蔵の基礎と応用，冷凍，92（1077），519（2017.7）.
10) 潜熱蓄熱・化学蓄熱・潜熱輸送の最前線，鈴木洋，シーエムシー出版，2016.11.18.
11) 稲田雄大，射場本忠彦，百田真史，宮良拓百，釼持尚紀：地域冷暖房に用いる氷水搬送技術の実用化に関する研究－配管設計用データの拡充および計測・制御技術の提案－，空衛論，227，19(2016).
12) 今成岳人，亀谷茂樹，加藤徹：街区における次世代エネルギーネットワーク評価ツールに関する研究，空衛論，228，1(2016).
13) 高貫悠右，新井研人，長井達夫，三原邦彰，小野永吉，荒井良延；地域熱供給システムにおける負荷特性と未利用エネルギーのマッチング評価指標の提案，空衛論，238，9(2017).
14) 池田伸太郎，大岡龍三：地域エネルギーシステムの最適化における学習的探索手法と機械学習の複合アルゴリズムの開発，第１報－蓄熱槽を含む地域冷暖房システムにおける最適運用計画決定手法－，空衛論，241，11(2017).
15) ハンドブック次世代技術と熱，矢部彰ほか，日本機械学会，技報堂出版㈱，1993.
16) コージェネ革命，柏木孝夫，日経 BP コンサルティング，日経 BP マーケティング，2015.
17) 児玉昭雄，大蔵将史：太陽熱利用デシカント空調システムにおける温水器集熱面積および循環水量の影響，空気調和・衛生工学会論文集，31，116，43（2007）.
18) 児玉昭雄，大蔵将史：太陽熱利用デシカント空調システムに対する室内空調負荷および喚起回数の影響，空気調和・衛生工学会論文集，32，127，11（2007）.
19) 鵜飼真貴子，篠田拓也，加藤和幸，田中英紀，吉永美香，奥宮正哉：事務所ビルにおける太陽熱冷暖房システム

の実証試験：冷暖房運転の解析と年間性能評価，空気調和・衛生工学会論文集 37，187，1（2012）.
20) 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 巻, 281 号, 9-17, 2020.
21) 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 巻, 285 号, 1-8, 2020.
22) 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 巻, 290 号, 39-46, 2021.
23) 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―定置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 巻, 297 号, 31-38, 2021.
24) 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 巻, 301 号, 9-16, 2022.
25) 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 巻, 308 号, 11-18, 2022.
26) 電気新聞「低温排熱で高効率蓄熱」，2016 年 8 月 17 日.
27) 山内一正，馬込英明，井守正隆，川上理亮，谷野正幸：100℃以下の廃熱利用が可能な吸着材蓄熱システムの開発，自動車技術，（公社)自動車技術会，2017.7.
28) 川上理亮，鎌田美志，大山孝政，鈴木美穂，谷野正幸，宮原英隆，平井恭正，川村正行，小室匠，名和博之，丸毛謙次，山内一正，馬込英明，井守正隆，鈴木正哉，森本和也，松田聡，鈴木善三，永井恒輝；100℃以下の廃熱を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システムの開発，クリーンエネルギー，日本工業出版，2017.8.
29) 川上理亮，鎌田美志，鈴木美穂，谷野正幸，大山孝政，宮原英隆，平井恭正，川村正行，小室匠，名和博之，丸毛謙次，山内一正，馬込英明，井守正隆，鈴木正哉，森本和也，松田聡，鈴木善三：100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発，建築設備と配管工事，日本工業出版，2017.8.
30) 鈴木正哉，森本和也，前田雅喜，犬飼恵一，宮原英隆， 平井恭正，川村正行，谷野正幸：蓄熱材ハスクレイの性能評価，化学工学会第 49 回秋季大会，EB114，(2017.9.20).
31) 松田聡，鈴木善三，名和博之，井守正隆，谷野正幸 : 蓄熱材粒子充填層の振動試験，化学工学会第 49 回秋季大会，EB115，(2017.9.20).
32) 鈴木美穂，大山孝政，鎌田美志，川上理亮，谷野正幸，松田聡，鈴木正哉，名和博之，山内一正，宮原英隆，川村正行 : 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実験による評価-第 1 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA101, (2017.9.20).
33) 大山孝政，鈴木美穂，鎌田美志，川上理亮，谷野正幸，松田聡，鈴木善三，鈴木正哉，名和博之，馬込英明，宮原英隆：低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの数値解析による評価-第 2 報，化学工学会第 49 回秋季大会，DA102，(2017.9.20).
34) 名和博之，松田聡，鈴木善三，井守正隆，川上理亮：搬送時における蓄熱材粒子充填層内の対流現象，第 23 回流動化・粒子プロセッシングポジウム／化学工学会，(2017.12.7-8).
35) 川上理亮，宮原英隆，川村正行，丸毛謙次，山内一正，鈴木正哉，陶昇，谷野正幸，低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発－第 1 報－システムの開発コンセプトと蓄熱材の検討，平成 30 年度空気調和衛生工学会大会，(2018.9.12-14).
36) 鎌田美志，川上理亮，森本和也，松田聡，鈴木善三，谷野正幸，低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発－第 2 報－吸着材蓄熱槽の蓄放熱特性と数値解析モデル，平成 30 年度空気調和衛生工学会大会，(2018.9.12-14).

37) 鈴木美穂，大山孝政，名和博之，井守正隆，馬込英明，川上理亮，井上正憲，谷野正幸，低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発－第 3 報－実際の工場・設備で蓄放熱特性の検証試験，平成 30 年度空気調和衛生工学会大会，(2018.9.12-14).
38) 名和博之，川上理亮，宮原英隆，川村正行，山内一正，鈴木正哉，松田聡，100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発，第 8 回潜熱工学シンポジウム，潜熱工学研究会，2018.12.3-4.
39) 松田聡，鈴木善三，鈴木美穂，鎌田美志，川上理亮，谷野正幸，名和博之：低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発～吸脱着の過渡特性，化学工学会第 84 年会，F302，(2019).
40) 川上理亮･鎌田美志･鈴木美穂･中田拓司･谷野正幸：100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発，「ヒートポンプとその応用」，ヒートポンプ研究会，11(2019).
41) 鎌田美志，川上理亮，鈴木美穂，中田拓司，谷野正幸，宮原英隆，平井恭正，松永克也，久保滋，原田浩司，柿内秀介，名和博之，山内一正，井守正隆，岩下真輝，鈴木正哉，松田聡，森本和也，鈴木善三：100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発，クリーンエネルギー，29(1)，38(2020).
42) 川上理亮，鈴木美穂，宮原英隆，鈴木正哉，谷野正幸，低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発（第４報） 産業プロセスに対する定置型蓄熱槽の蓄放熱特性の実証試験，2020 年度空気調和衛生工学会大会，(2020.9.9-30(オンライン)).
43) 鎌田美志，中田拓司，松永克也，名和博之，山内一正，松田聡，谷野正幸，低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発（第５報）トレーラー型蓄熱槽によるオフライン蓄放熱特性の実証試験，2020 年度空気調和衛生工学会大会，(2020.9.9-30(オンライン)).
44) 鎌田美志，鈴木美穂，川上理亮，谷野正幸，宮原英隆，松永克也，久保滋，名和博之，丸毛謙次，山内一正，井守正隆，鈴木正哉，松田聡，低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実証試験＜定置型蓄熱システムおよびトレーラー型蓄熱によるオフライン熱輸送の実証試験＞，建築設備と配管工事，日本工業出版，2020.9.
45) 谷野正幸，川上理亮，鎌田美志，宮原英隆，松永克也， 山内一正，井守正隆，名和博之，鈴木正哉，松田聡，ハスクレイを用いた吸着材蓄熱システムの開発，動力エネルギーシステム部門ニュースレター，日本機械学会，2020.9.15.
46) 川上理亮，鎌田美志，谷野正幸，山内一正，井守正隆，丸毛謙次，宮原英隆，松永克也，鈴木正哉，松田聡，100℃以下の低温廃熱を利用可能なハスクレイ吸着材蓄熱･オフライン熱輸送システムの実証開発，クリーンエネルギー，日本工業出版，2020.9.
47) 鎌田美志，中田拓司，川上理亮，谷野正幸，丸毛謙次，名和博之，宮原英隆，松永克也，山内一 正，松田聡，低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発－コンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験，化学工学会第 51 回秋季大会，J116，(2020.9.24(オンライン)).
48) 丸毛謙次，名和博之，谷野正幸，鎌田美志，宮原英隆，松永克也，井守正隆，松田聡：低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発－コンテナ型蓄熱槽の槽内熱挙動の検証，化学工学会第 51 回秋季大会，J117，(2020.9.24(オンライン)).
49) 川上理亮，鎌田美志，谷野正幸，宮原英隆，佐藤敦史，名和博之，山内一正，井守正隆，鈴木正哉，松田聡：100℃程度の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システム， BE 建築設備 2021 年 3 月号，建築設備綜合協会，(2021.3).
50) 中田拓司， 鎌田美志，川上理亮，谷野正幸，宮原英隆，佐藤敦史，名和博之，井守正隆，山内一正，松田聡，鈴木正哉：100 ℃程度の低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 - コンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験 - ，第 31 回環境工学総合シンポジウム 2021，日本機械学会，423，(2021.7.8-9).
51) 鎌田美志，川上理亮，佐藤雄，山内一正，名和博之，松田聡，佐藤陽一，谷野正幸：低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発（第 6 報）塗装工程の空調機での除湿利用， 2021 年度空気調和衛生工学会大会，2021.9.15-17(オンライン)).
52) 川上理亮：活用困難な低温排熱を 再 利用する 吸着材蓄熱システム「メガストック」 月刊省エネルギー Vol. 73 省エネルギーセンター，(2021.12).
53) 改訂五版化学工学便覧，化学工学協会，丸善，pp.242，昭和 63 年 3 月 18 日.
54) 改訂六版化学工学便覧，化学工学会，丸善，pp.376，平成 11 年 2 月 25 日

55) 谷野正幸：第 62 回 学会賞・論文賞受賞講演「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」，令和 6 年空気調和・衛生工学会大会，(2024.9).
56) 大山孝政，谷野正幸，川上理亮，鎌田美志，中田拓司，福島史幸，千場悠之介：低温排熱を利用した吸着材蓄熱システム，空気調和・衛生工学会誌令和 6 年 11 月号，98(11)，19(2024).
57) 高砂熱学ニュースリリース：https://www.tte-net.com/article_source/data/news/detail/2024/678.html
58) TDK ニュースリリース：https://www.tdk.com/ja/news_center/press/20240318_01.html

ABSTRACT

Our Mega Stock, an adsorbent thermal storage system, received the Best Paper Award (Academic Paper Division) at the 62nd Annual Conference of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE) Awards. The award was given to a series of six papers “Development of Open-type Adsorption Thermal Storage Heat Pump System Applying HAS-Clay” published in the Transactions of the SHASE. Here is an overview of the technical content of the papers. We would like to expand the use of waste heat by developing this Mega Stock in the market, thereby reducing CO_2 emissions, and contributing to the carbon neutrality of Japan.

【技術論文】

エネルギー自立型サスティナブル研究施設
－竣工 4 年後の ZEB 達成状況の評価と対策－※

清水昭浩・相澤直樹・木村健太郎
羽鳥大輔[*1]・高椋敦士[*1]・田辺新一[*2]

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center
- Evaluation of ZEB Achievement Status and Countermeasures Four Years after Completion -

Akihiro Shimizu・Naoki Aizawa・Kentaro Kimura
Daisuke Hatori[*1]・Atsushi Takamuku[*1]・Shin-ichi Tanabe[*2]

高砂熱学イノベーションセンターは、環境負荷低減と知的生産性向上を両立したエネルギー自立型研究施設を目指して、2020 年 3 月より運用を開始し、2024 年度で 5 年目となる。この間、系統に逆潮流できないという制約のもと、再生可能エネルギーを有効に活用するため、2021 年 4 月に大容量蓄電池を増設して運用を開始した。本報では、竣工後 4 年間の建物の供給／消費エネルギーの運用状況、ZEB の達成状況、CO_2 排出量の評価結果について報告する。併せて、オフィス棟でのエネルギー消費量の評価結果や蓄電池の運転状況の評価結果についても併せて報告する。

1. はじめに

本研究では、地球環境負荷低減と知的生産性向上の両立を目指して設立したエネルギー自立型のサスティナブル研究施設に関して竣工後も継続的にシステム実証に取組んでいる。本施設は、展示エリアやカフェレストランと執務スペースを持つオフィス棟（約 4,750 ㎡）と、研究開発のためのラボ棟（約 6,050 ㎡）の主に 2 棟で構成される。本施設では、既報[2,3]で報告したように発電機での余剰電力が逆潮流不可という制約の中、竣工後 1 年後に蓄電池を増設し、再生可能エネルギーを可能な限り有効活用するとともに、省エネルギーの推進と室内環境の快適性の向上に努めている。

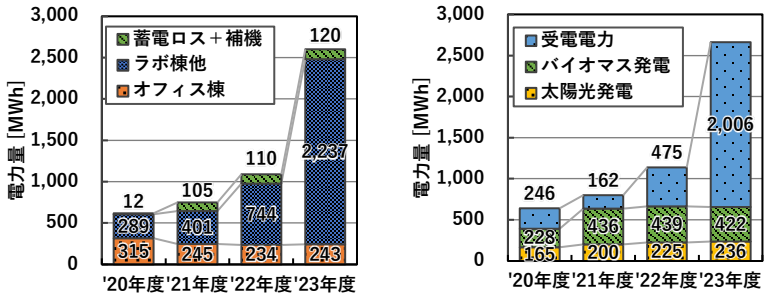
本報では、BEMS に蓄積された運用データを活用することにより、4 年間の建物の年間エネルギー需給の推移、ZEB の達成状況、CO_2 排出量の評価について報告する。さらに、オフィス棟でのエネルギー消費量の評価結果や蓄電池の運転状況の評価結果についても併せて報告する。

2. 年間供給／消費エネルギーの年間実績

2.1 年間受電電力及び供給電力量

図 1 に過去 4 年間の年間電力量の推移を示す。2022 年 12 月より大型実験装置が稼働を始めたため、2023 年度は前年度に比べて、実験装置のあるラボ棟他の消費電力量が約 3 倍に増加し、それに伴い受電電力量も大幅に増加している。その結果、電力自給率は 2021 年度の 80%、2022 年度の 58%に対して 2023 年度は 25%まで低下した。

※本論文は、2024 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文[1]を加筆修正したものである。
*1 株式会社三菱地所設計、*2 早稲田大学理工学術院創造理工学部



a）消費電力量　　b）供給電力量

図 1 過去 4 年間の年間電力量の推移

2.2 バイオマス CHP の運転状況

図 2 にバイオマスガス化発電（以下、バイオマス CHP、CHP：Combined Heat & Power（熱電併給システム）の略）の発電量の推移を示す。2023 年度は、熱需要の少ない中間期は 1 台運転として排熱の大気への放熱量を抑える熱主電従の運転として目標値を設定した。結果として 2023 年度の年間発電量は 421MWh で、前年度に対しては 3.8%の減、目標値 469 MWh に対しては 90%の出力であった。メンテナンスや中間期の計画的な停止を除くトラブルに起因する運転停止時間は、2 台平均で年間 650h 発生しており、発電量が目標値を下回る大きな要因となっている。

図 3 にバイオマス CHP のトラブル要因を示す。約 7 割がガス化炉系統とエンジン系統で発生しており、バイオマス CHP のガス化炉内のクリンカ（ガス化炉底部の温度低下によりタール等の溶融固化した塊状物）の発生や配管内のタール等の不燃物の固着等がその大きな原因となっている。2024 年度はクリンカ発生を抑制する方策を行い、トラブルの発生を削減していく予定である。

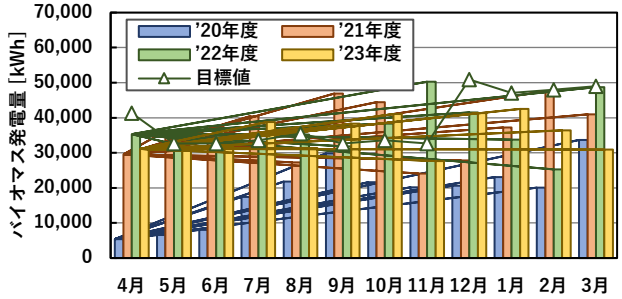


図 2 バイオマス CHP の発電量の推移

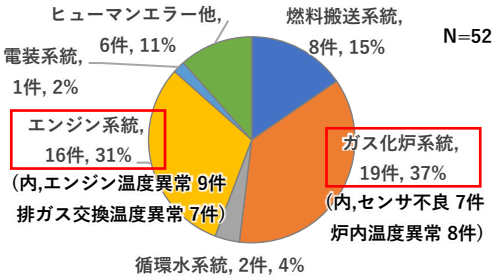


図 3 バイオマス CHP のトラブル要因

2.3 太陽光発電の運転状況

図 4 に太陽光発電の発電量の推移を示す。2023 年度の年間発電量は 235MWh で、前年度に対して 5%増で、目標値の年間 222MWh に対しては 108%となり目標を達成した。竣工 1～2 年目に発生していた、蓄電池満蓄電時の逆潮流防止のための太陽光発電の出力抑制はほぼ発生しなくなっている。

図 5 に本施設の近郊にあるつくば（館野）の気象庁観測データ [4]より取得した平均全天日射量と当該月の太陽光発電量の月積算値の関係を示す。図中の回帰直線は，太陽光発電の出力抑制がほとんどなかった 2022 年度及び 2023 年度のデータを一次回帰したもので、高い相関が見られる。これは、太陽光パネルが屋根勾配 2°のラボ棟屋上に設置されており水平面に近い形状であるためである。一方，2020 年度、2021 年度でこの回帰直線を大きく下回っている月では，前述の理由で出力抑制制御が起動している。

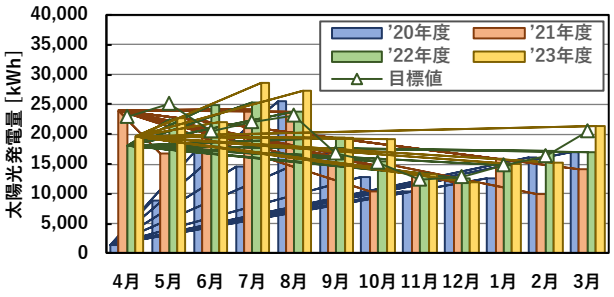


図 4 太陽光発電量の推移

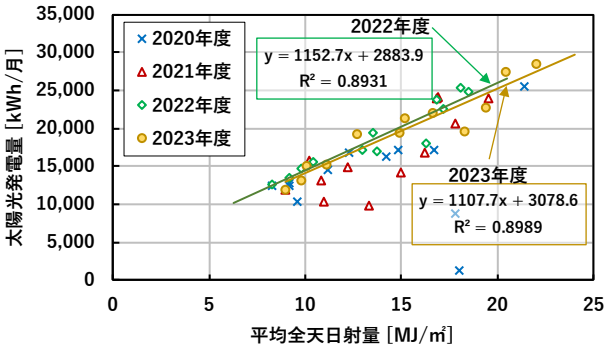
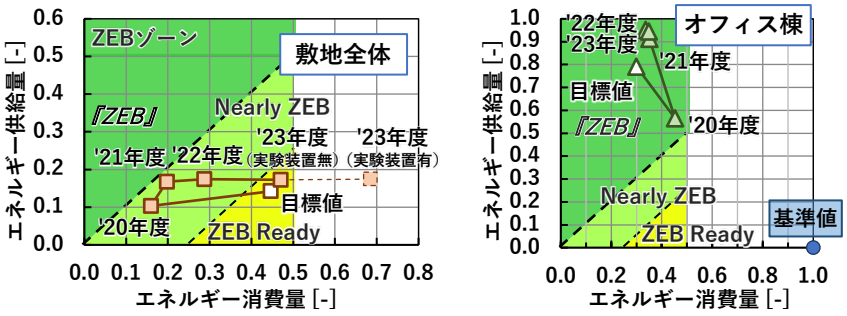


図 5 平均全天日射量と太陽光発電量の関係

3. ZEB の達成状況及び CO_2 排出量の評価

3.1 ZEB の達成状況の評価

図 6 に ZEB チャート[5]での達成状況の評価を示す。基準値は旧技術研究所の過去の実績値としている。敷地全体（**図-6 a)**）では、前述の大型実験装置の稼働に伴いエネルギー消費量が大きく増加し ZEB Ready も達成できなかった。大型実験装置は 2022 年 12 月から稼働しているが、2023 年 6 月からは 24 時間連続稼働となっており、これがエネルギー消費量を大きく押し上げる要因となっている。この装置の稼働に当たっては、専用の 750kVA 相当のキュービクルを増設しており、設計段階では予測できなかった負荷となっている。この大型実験装置でのエネルギー消費量を差し引くと、**図 6 a)**のエネルギー消費量は 0.47 となり、当初の目標値に近づき ZEB Ready となる。一方、オフィス棟（**図 6 b)**）では前年に引き続き 4 年連続で『ZEB』を達成している。



a）敷地全体 **b）オフィス棟**

図 6 ZEB の達成状況

3.2 CO_2 排出量の評価

図 7 に CO_2 排出量の基準値（旧技術研究所の実績値）と当施設の実績値の比較を示す。2020 年度は基準値に対しては 97%削減であったが、2021 年度以降は 100%削減となり、オペレーショナルカーボンゼロのカーボンフリーを達成している。図中のグリーン電力は東京電力より購入している水力発電由来の受電電力である。今後は、木質チップの搬送や上下水道利用に係る CO_2 排出量も算出し、そのインパクトを確認する予定である。

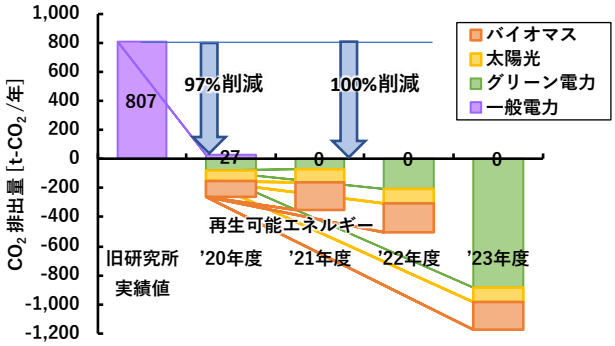


図 7 CO_2 排出量の削減状況の比較

4. オフィス棟のエネルギー消費量の評価

4.1 エネルギー消費原単位の推移

図 8 にオフィス棟の一次エネルギー消費量原単位の過去 4 年間の実績値と運用段階試算値（以降、試算値）、設計段階目標値（以降目標値）の比較を示す。試算値は、運用段階での空調運転時間等の運用実績をもとに BEST プログラムで試算した結果 [6]である。実績値は運用開始後年々減少しており、2022 年度では 467 MJ/(㎡･年)まで減少したが、2023 年度は増加し 485MJ/(㎡･年)となった。試算値では計算対象外とした給湯・衛生と展示設備を除くと、389MJ/(㎡･年)となり試算値の 405 MJ/(㎡･年)を下回る結果となった。

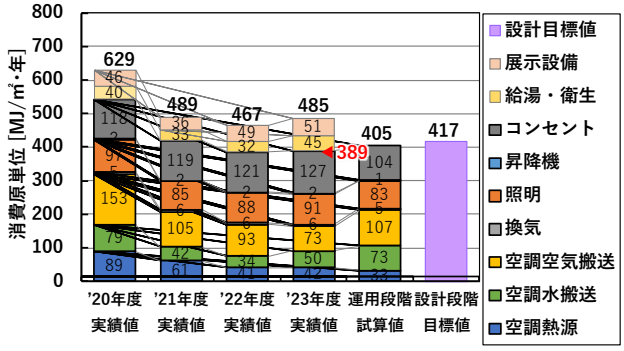


図 8 オフィス棟のエネルギー消費原単位の比較

4.2 系統別エネルギー消費原単位の推移

2023 年度に原単位が増加した要因を確認するために算出した用途別のエネルギー原単位の推移を**図 9** に示す。照明、コンセント及び展示施設に関しては在籍者数及び見学者数の増加が影響していると考えられる。それ以外の項目で、増加しているのは、空調水搬送と給湯・衛生である。

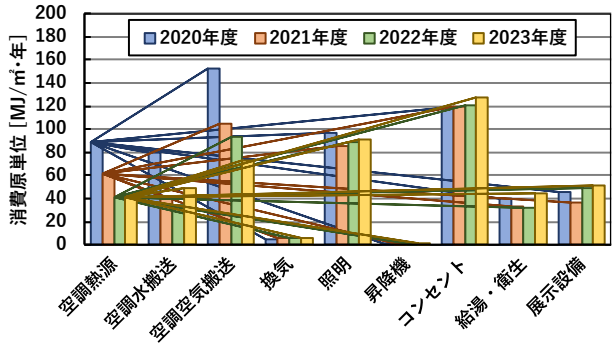


図 9 オフィス棟の用途別エネルギー消費原単位の推移

さらに詳細に分析するために空調水搬送と給湯・衛生の機器別年間電力消費量を比較したものを**図 10** に示す。この中で特に増加量の大きいのは給水ポンプ、温水二次ポンプ、井水汲上ポンプの順である。給水ポンプは、ラボ棟と兼用となっており、ラボ棟での実験用の水使用量の増加に伴い、電力消費量も前年に比べて約 4,620kWh 増加（原単位換算で 9.2MJ/(㎡･年) 増加）している（水の使用量の詳細に関しては文献 7）参照)。また、温水二次ポンプは、バイオマス CHP の排熱利用量の増加で約 3,810kWh 増加（同 7.6MJ/(㎡･年) 増加）している。井水汲上ポンプは、2023 年度は猛暑であったため地下水の利用熱量は若干増加しているが、それ以上に地下水揚水量が増加しポンプ動力の増加につながっている。この要因については、文献 7) で報告しているが、接続する熱交換器の送水温度設定値が低く設定していたためと考えられ、運用改善の余地があると判断された。**図 11** に温水二次ポンプ及び井水汲上ポンプの月別の電力消費量の比較を示す。温水二次ポンプでは冬季（10 月～3 月）に、井水汲上ポンプは夏季（6 月～9 月）に大きく増加している。

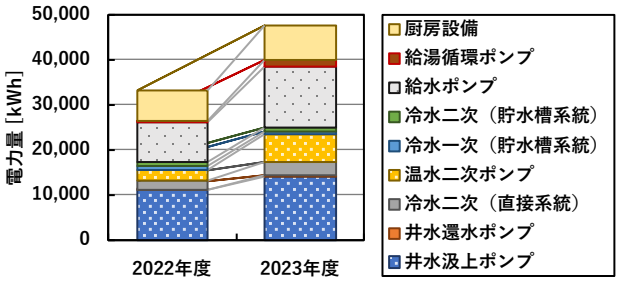


図 10 空調水搬送と給湯･衛生の機器別年間電力消費量

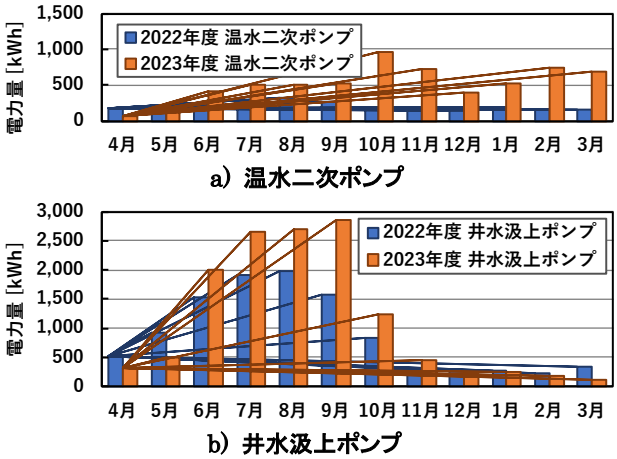


図 11 月別電力消費量の比較（温水二次、井水汲上ポンプ）

一方、大きく減少している空調空気搬送に関しては、**図 12** に示すように 1 階系統及び 2 階系統の外調機での削減が大きく、1 階系統では約 7,880kWh（原単位換算で 15.7MJ/(㎡･年) 減少）、2 階系統では約 4,720kWh（同 9.4MJ/(㎡･年) 減少）の減少となっている。1 階外調機系統では、使用していない会議室等での VAV のこまめな停止、2 階外調機系統では、文献 8),9)で報告したようにパーソナル空調機のアンビエント空調への利用により消費電力が削減された。**図 13** に空調空気搬送系統の月別電力消費量の比較を示す。冬季、特に 1 月から 3 月に大きく電力消費量が削減できていることが確認できる。

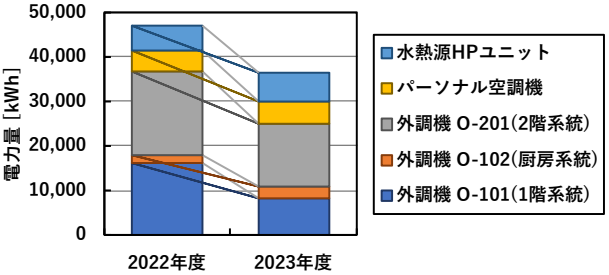


図 12 空調空気搬送における機器別年間電力消費量

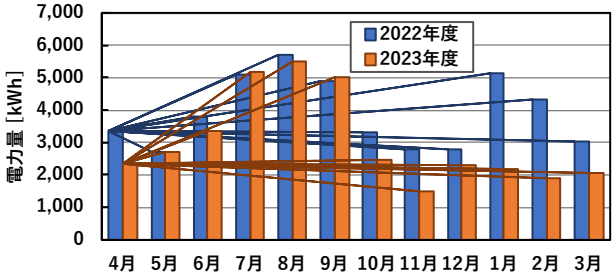


図 13 月別電力消費量の比較（空調空気搬送）

5. 蓄電池の運転状況の評価

5.1 蓄電池の充放電量の推移

図 14 にリチウムイオン電池の充放電量の推移を示す。年間の放電量を充電量で除した充放電効率で評価すると 77％となり、メーカ公称の充放電効率 90%を下回ってはいるが、前年度の効率 75％と比較すると若干上昇している。一方、NAS 電池は本体の充放電効率では 75%であるが、蓄電池のセルを 300℃以上に保つために必要な補機電力を含めると 33%と前年度とほぼ同様の結果であった。

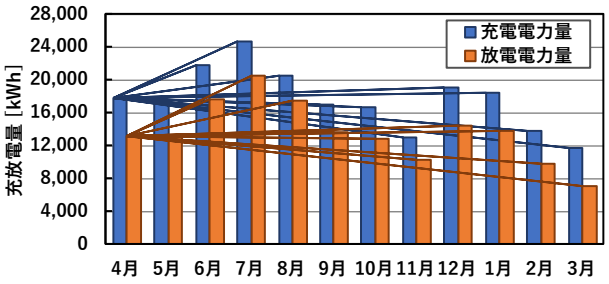


図 14 リチウムイオン電池の充放電量の推移

5.2 NAS 蓄電池の運転評価

蓄電池の運転は、基本的には週始めに満充電にして平日に放電し休日に充電を行う計画としているが、NAS 電池の充放電効率を評価するためにメーカの公表値と同じように 1 日で充放電を行う運用を行った。**図 15** に一日サイクルで充放電を行った 6 月下旬の運転結果を示す。このとき、リチウムイオン蓄電池は満蓄電にならないように受電電力量を昼夜で変化させて運用した。一週間での NAS 電池の単体の充放電効率は 78%、補機電力を含めた効率は 69%と前述の年間の充放電効率に比べて上昇することを確認した。リチウムイオン電池を含めた充放電効率で見ても 70%となり、現状の運転方法に比べて充放電効率は上昇することは確認できたが、受電電力量が昼夜で変動すること等を考慮して、現在は従来の 1 週間サイクルでの運用を行っている。

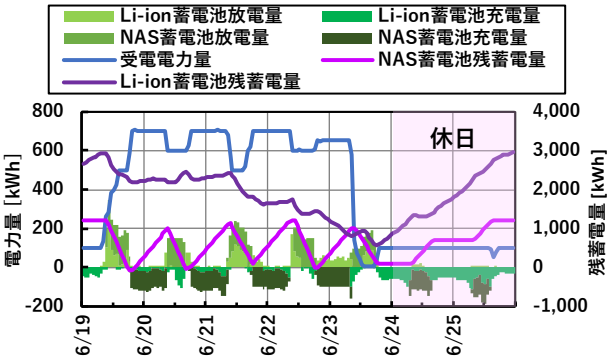


図 15 NAS 電池の運転方法を変更した場合の運転評価

6. おわりに

本報では、BEMS データを活用して竣工後 4 年の年間供給／消費エネルギーや再生可能エネルギーとして導入したバイオマス CHP や太陽光発電の運転状況、ZEB の達成状況や CO_2 排出量の評価を行った。さらに、オフィス棟での用途別消費電力量や蓄電池の運用状況についての評価を行った。今後も BEMS データを活用し運用段階での改善を行い、省エネルギーと室内環境の快適性の両立を図っていく予定である。

文　献

1) 清水昭浩ほか：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（第 32 報），竣工 4 年後の ZEB 達成状況の評価と対策，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.109-112 (2024.9)
2) 清水昭浩ほか：同上（第 16 報），ZEB 達成状況の評価と対策，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.221-224 (2021.9)
3) 清水昭浩ほか：同上（第 18 報），竣工 2 年後の ZEB 達成状況の評価と対策，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.185-188 (2022.9)
4) 国土交通省気象庁：過去の気象データ検索，https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php
5) 空気調和・衛生工学会：「ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の定義と評価方法」，p.5 (2015)
6) 武藤友香ほか：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（第 19 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.189-192 (2022.9)
7) 大迫孝輔ほか：同上（第 33 報），地下水熱利用システムの運用実績と水利用評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.113-116 (2024.9)
8) 市川侑ほか：同上（第 34 報），天井型パーソナル空調機のアンビエント空調利用，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.117-120 (2024.9)
9) スレスタミサンほか：同上（第 35 報），天井型パーソナル空調機による排熱利用の冬期予熱運転検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.121-124 (2024.9)

ABSTRACT

The Takasago Thermal Engineering Innovation Center began operations in March 2020, aiming to become an energy self-sufficient and sustainable research facility that balances reducing environmental impact and improving intellectual productivity, and will enter its fifth year in 2024. During this time, under the constraint of not being able to reverse power flow to the grid, in order to make effective use of renewable energy, a large-capacity storage battery was added in April 2021 and began operation.

This paper reports on the building's operation status of energy supply/consumption over the four years since completion, the achievement status of ZEB, and the evaluation results of CO_2 emissions. Additionally, we also report on the evaluation results of energy consumption in the office building and the operating status of the storage batteries.

【技術論文】

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

市川侑・スレスタミサン・齋藤雅浩
木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦

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

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

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

1. はじめに

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

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

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

1.1 運用状況

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

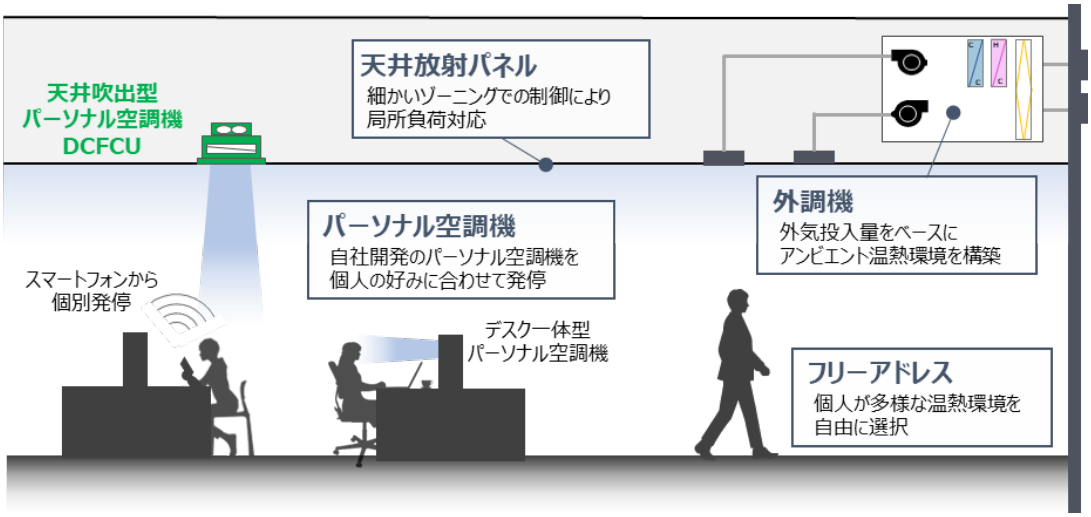


図 1　執務室の空調システム

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

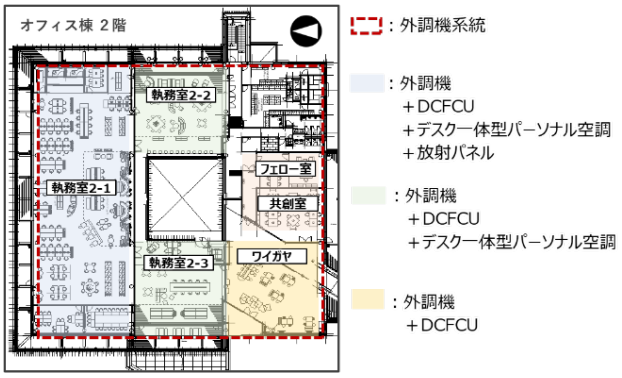


図 2　オフィス棟 2 階空調ゾーニング

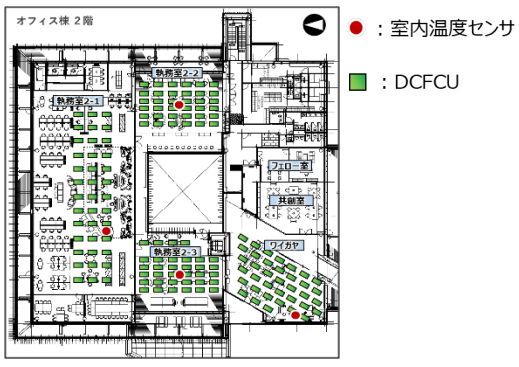


図 3　オフィス棟 2 階 DCFCU 配置図

1.2 DCFCU

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

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

表 1 DCFCU 能力

風量	235	m³/h
水量	2	l/min
定格電力	3.1	W
冷却能力	469	W
平均風速	0.9	m/s
発生騒音	37.7	dB

表 2 各室 DCFCU 台数

系統	DCFCU 台数	合計風量 m³/h	合計流量 l/min
執務室2-1	57	13,395	114
執務室2-2	37	8,695	74
執務室2-3	34	7,990	68
ワイガヤ	38	8,930	76
フェロー	13	3,055	26
共創室	19	4,465	38

2. 現状システムの課題抽出

2.1 長期連休後の暖房立ち上り

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

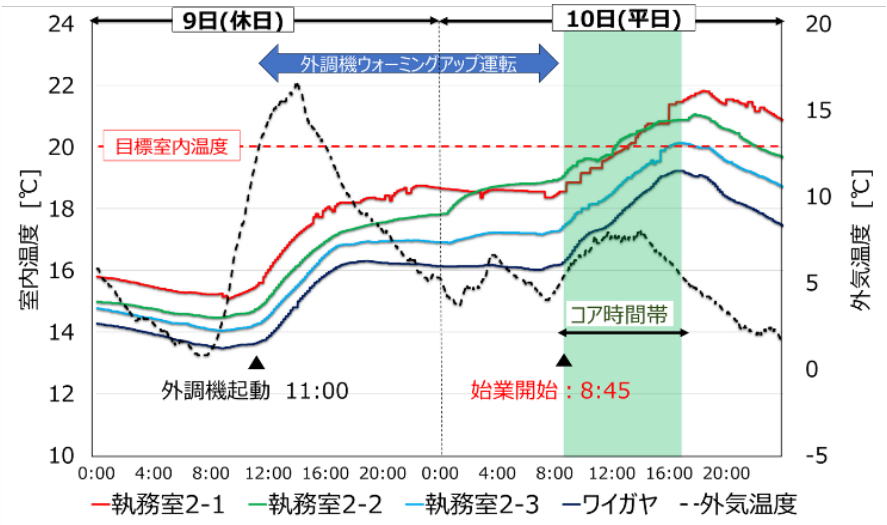


図 4 年始業務開始日前後における各室温の経時変化
（2023 年 1 月 9～10 日）

表 3　ウォーミングアップ運転前後の各室代表温度

（2023 年 1 月 9～10 日）

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

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

2.2 バイオマス CHP 排温水

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

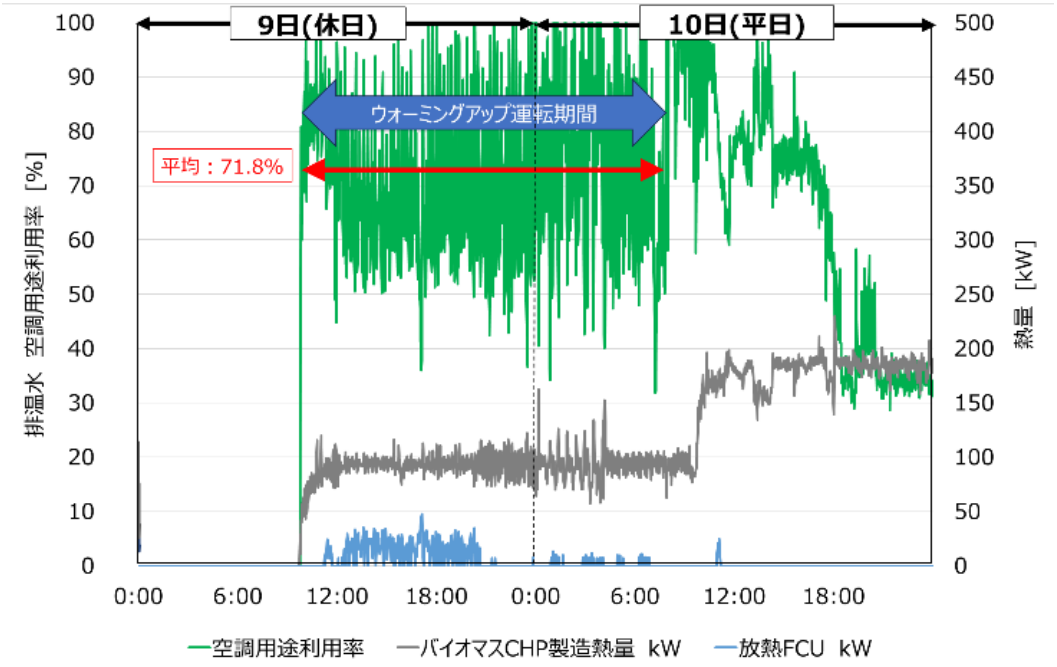


図 5　バイオマス排温水の空調利用率の経時変化

（2023 年 1 月 9～10 日）

3. DCFCU のアンビエント空調利用

3.1 システム概要

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

3.2 DCFCU 一括運転制御

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

3.3 排温水送水温度制御

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

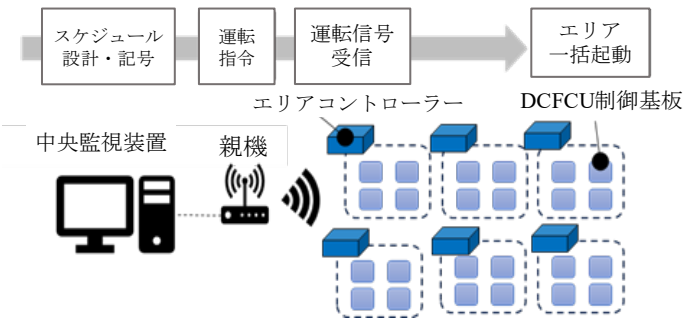


図 6 DCFCU 一括制御時の運転フロー図

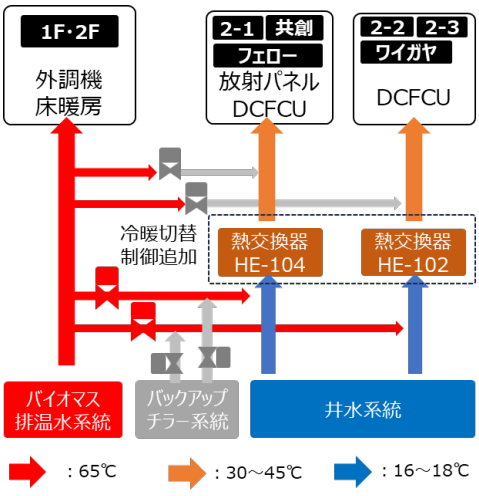


図 7 排温水利用フロー図

4. 夏期検証

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

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

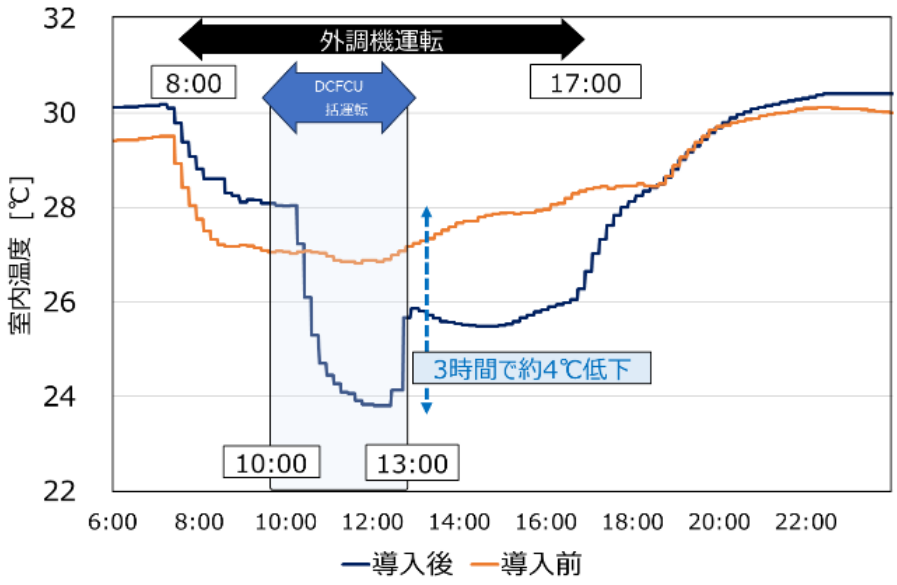


図 8 DCFCU 一括制御時のワイガヤ室内温度経時変化

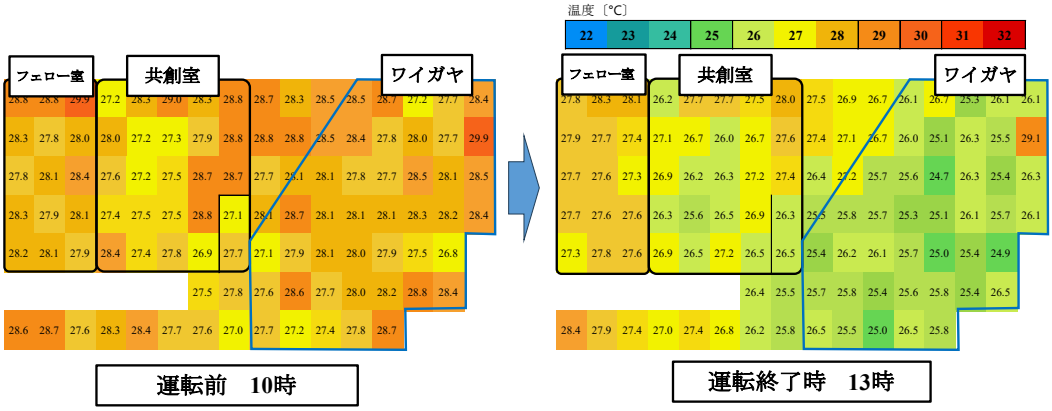


図 9 DCFCU 一括運転前後の床表面温度分布

5. 冬期検証

5.1 実験条件

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

5.2 実験結果

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

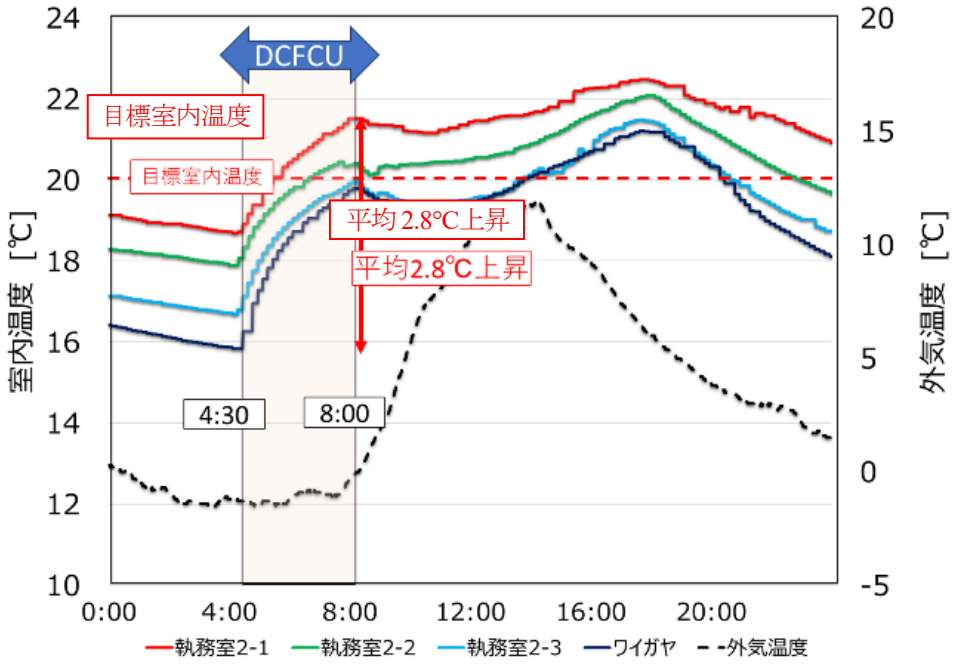


図 10 DCFCU 一括運転時の各室温度の経時変化

表 4 各室の DCFCU 一括運転前後の代表温度

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

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

表 5 2023 年と 2024 年におけるウォーミングアップ運転状況

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

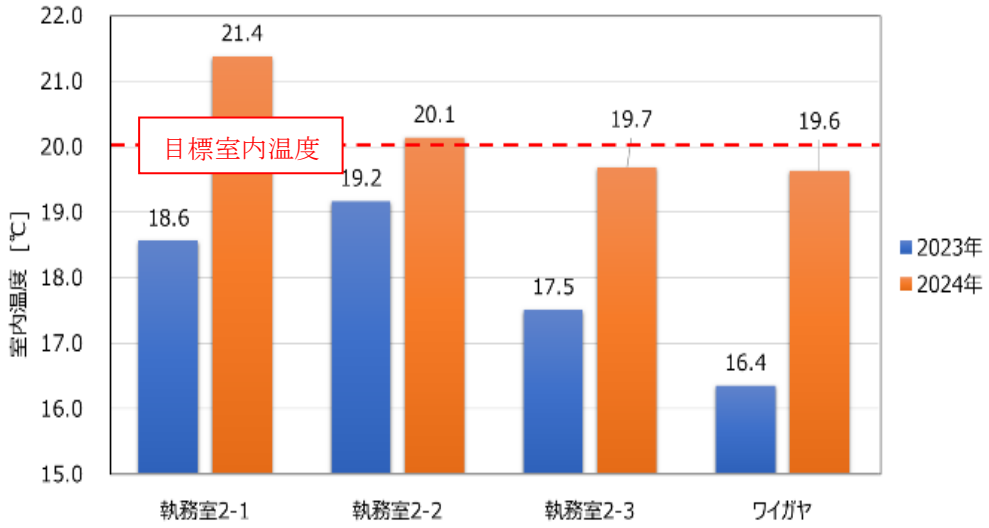


図 11　各室の始業開始時の代表温度比較

6. おわりに

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

文　献

1)　市川侑ほか：エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証評価（第 34 報）天井型パーソナル空調機のアンビエント空調利用，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p. 117-120（2024. 9）

2)　武藤ら：エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証（第 1 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp185-188，(2019, 9)

3)　木村ら：エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証（第 11 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，(2021, 9)

4)　武藤ら：エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証（第 14 報），空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，(2021, 9)

ABSTRACT

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

【技術論文】

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

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

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

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

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

1. はじめに

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

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

2. 実測概要

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

※本論文は、2024 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文 [1)]を加筆修正したものである。
*1 早稲田大学創造理工学部建築学科

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

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

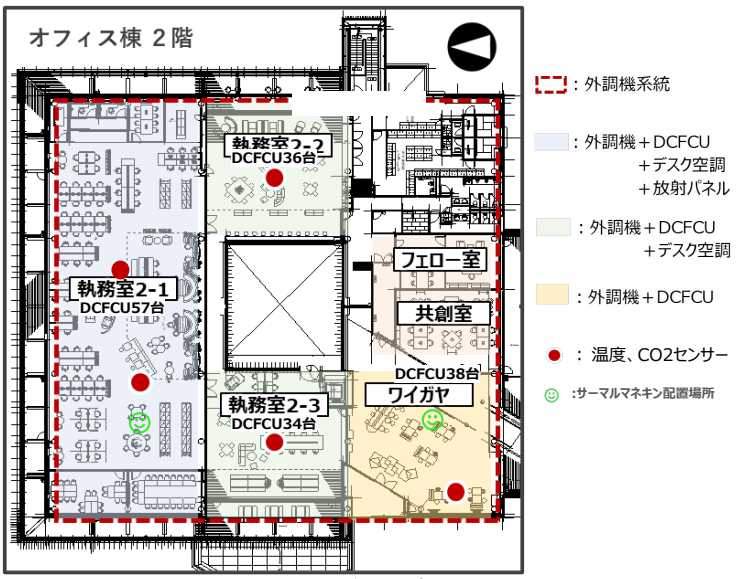


図 1　検証対象エリア

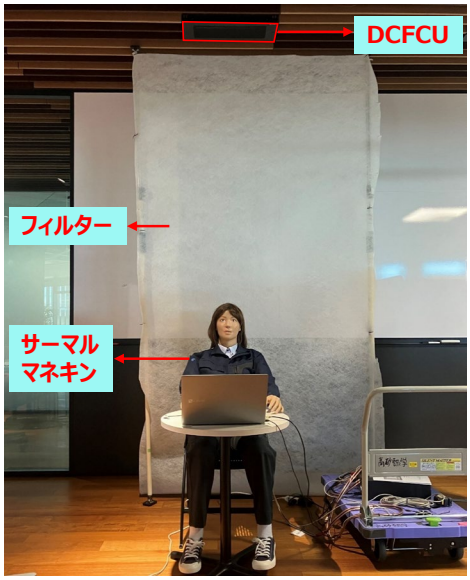


写真 1　熱画像測定状況

表 1　冬期の送水温度と運転時間

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

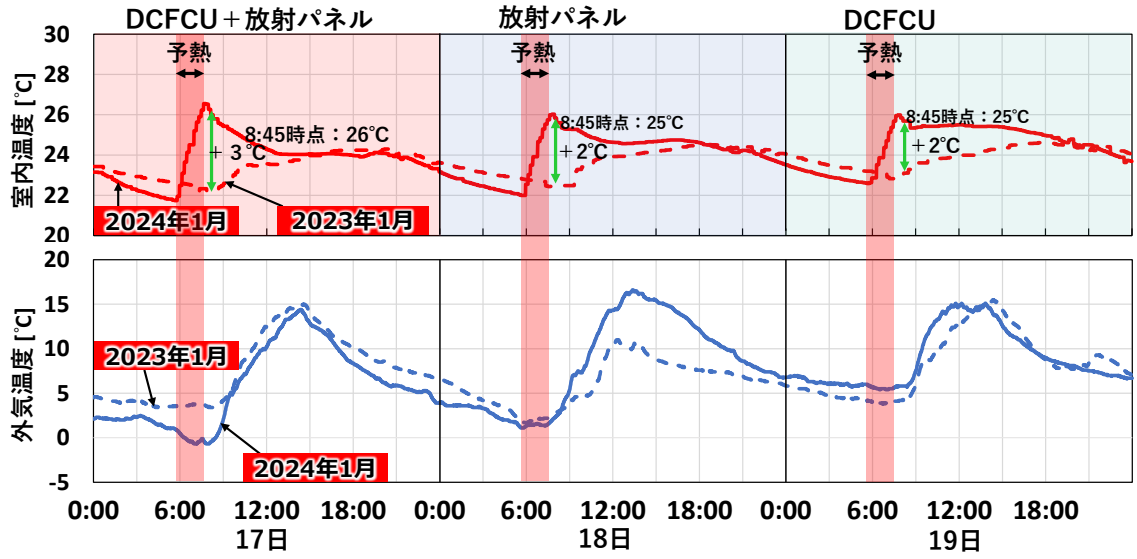
※5:30～7:30：予熱時間、就業時間（コアタイム）：8:45～17:30

3. 実測結果

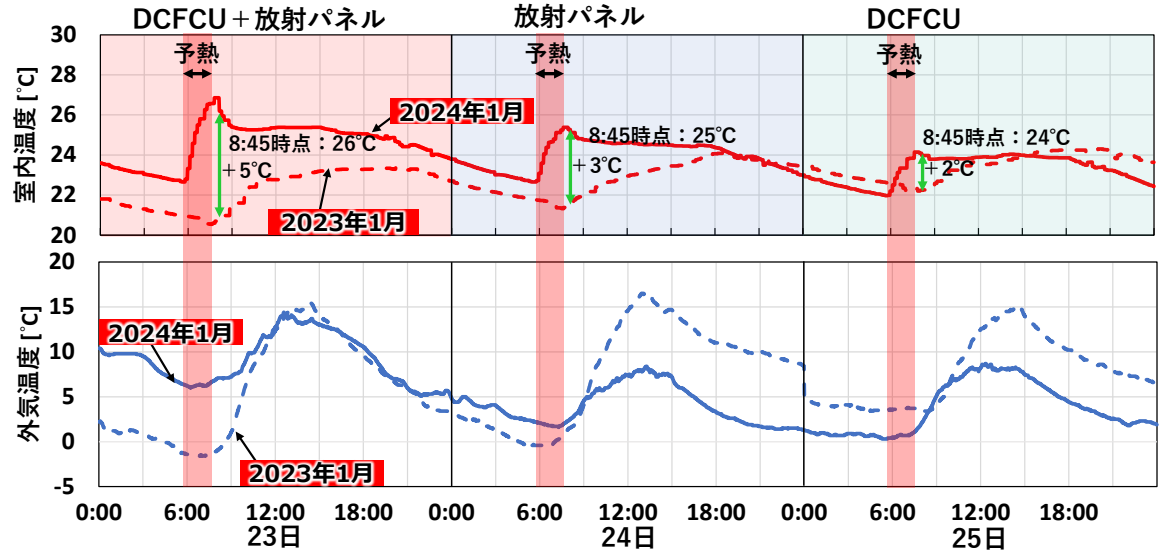
3.1 室内代表温度

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

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



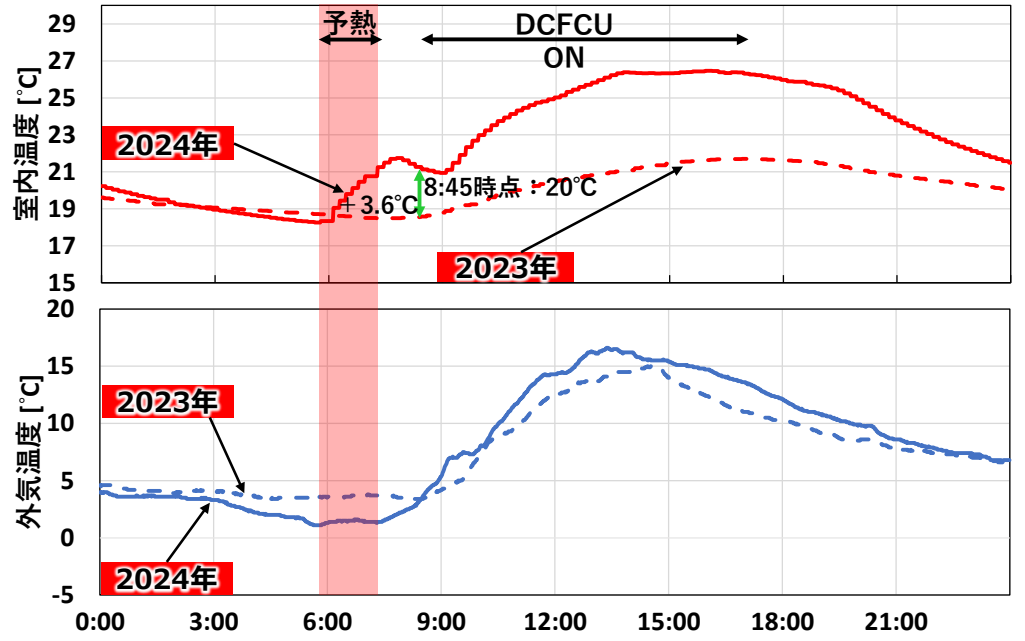
(a) 送水温度 45℃



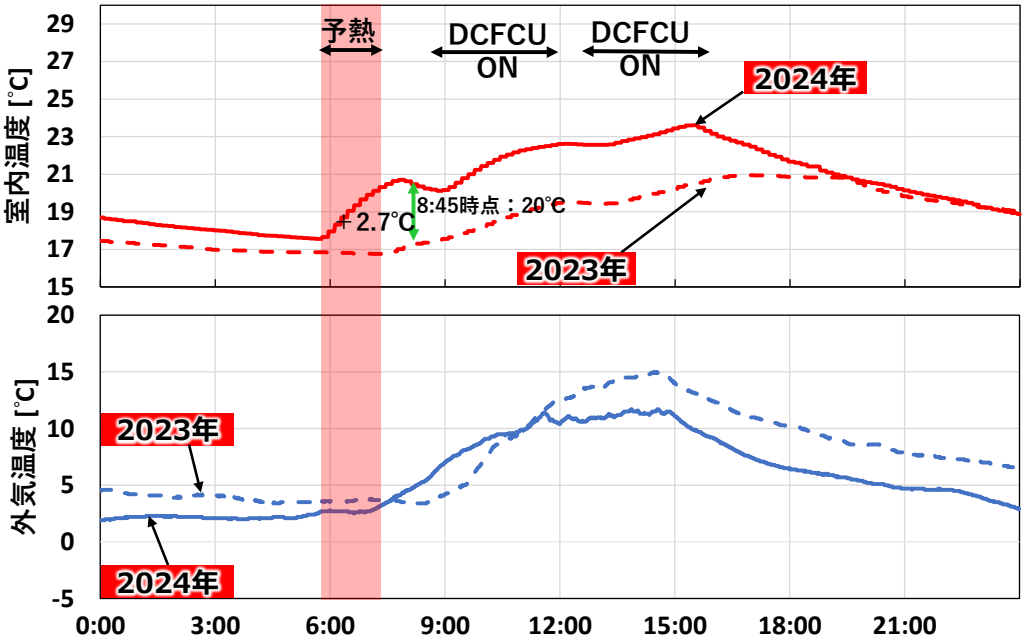
(b) 送水温度 35℃

図 2 執務室 2-1 の温度経時変化

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



(a)送水温度 45℃



(b)送水温度 35℃

図 3 ワイガヤの温度経時変化

3.2 熱画像による給気到達距離

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

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

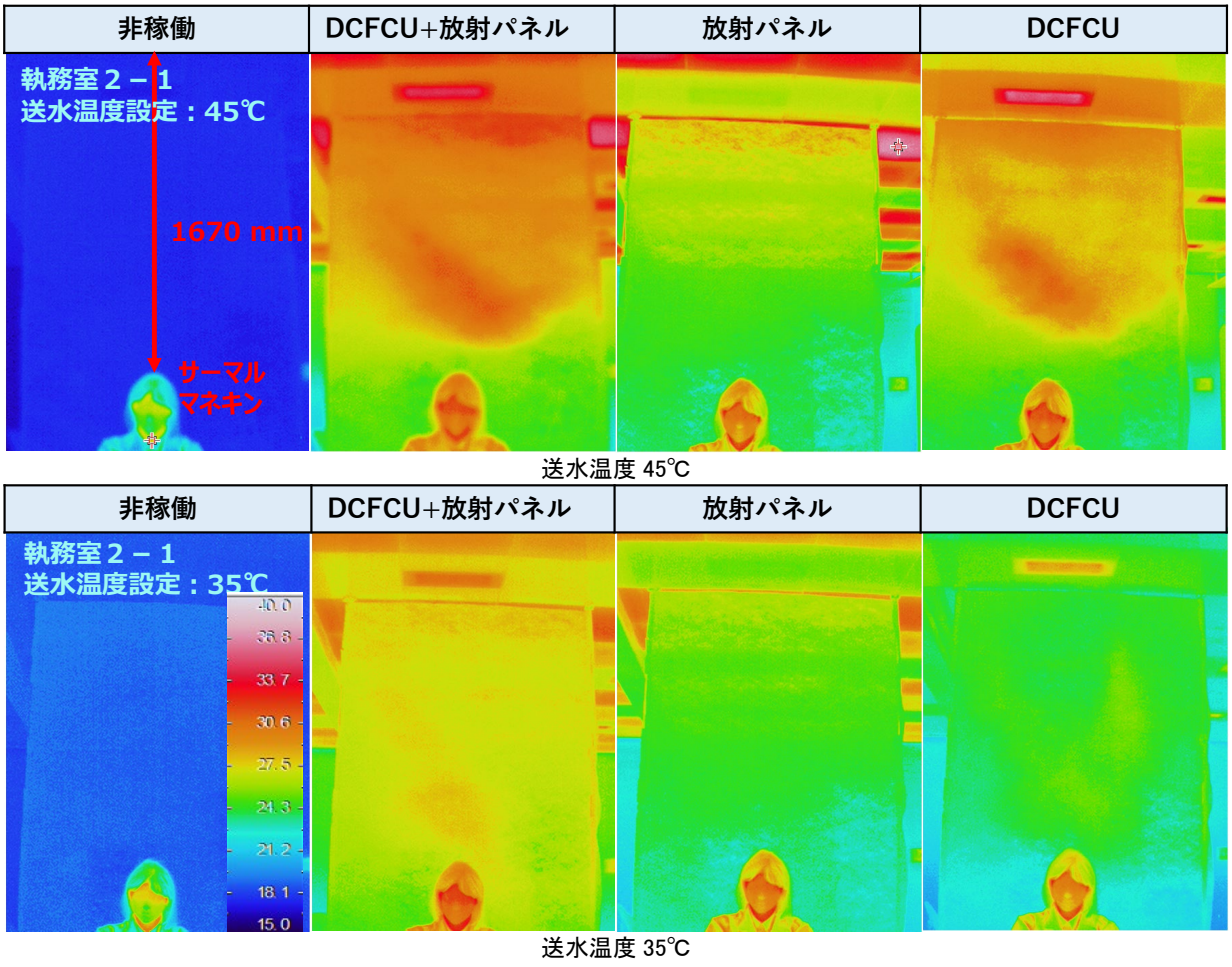


図 4　執務室 2-1 の各ケース別熱画像比較

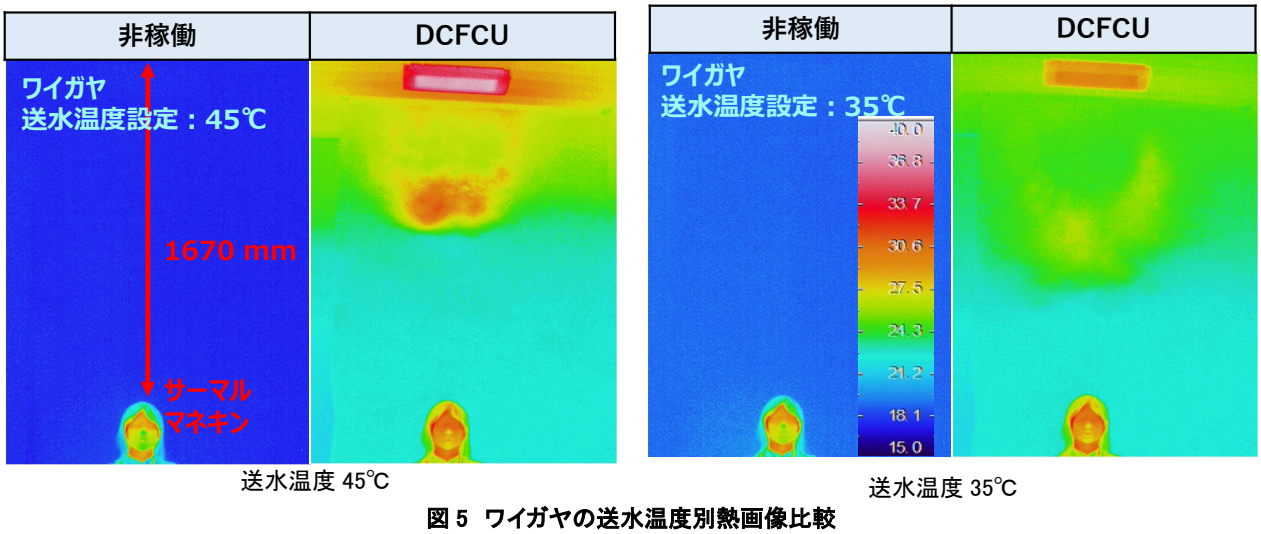


図 5　ワイガヤの送水温度別熱画像比較

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

3.3 空気質環境

これまで冬期のコアタイムの空調は、外調機を主体とし、室内の温熱環境に応じて風量を可変していたが、DCFCU は循環型空調機のため DCFCU を主体運転とした場合、室内の空気質環境の悪化が懸念された。そこで、外調機が必要最小風量で制御しながら DCFCU が運転した日において、室内の空気質を確認した。**図 6** に空気質の要因のひとつである CO_2 濃度について、経時変化を部屋別に示す。CO_2 濃度は、各室共に 1,000 ppm 以下で推移し、空気質環境に問題が無いことを確認した。

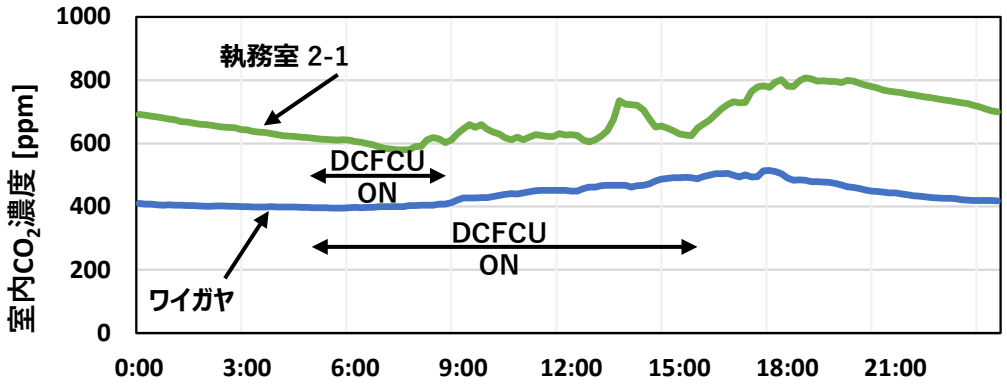


図 6 DCFCU 予熱運転日の CO_2 濃度経時変化

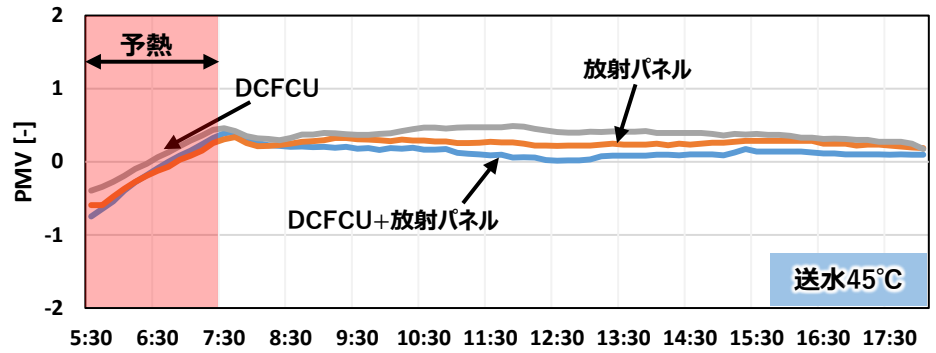
4. 快適性評価

4.1 PMV

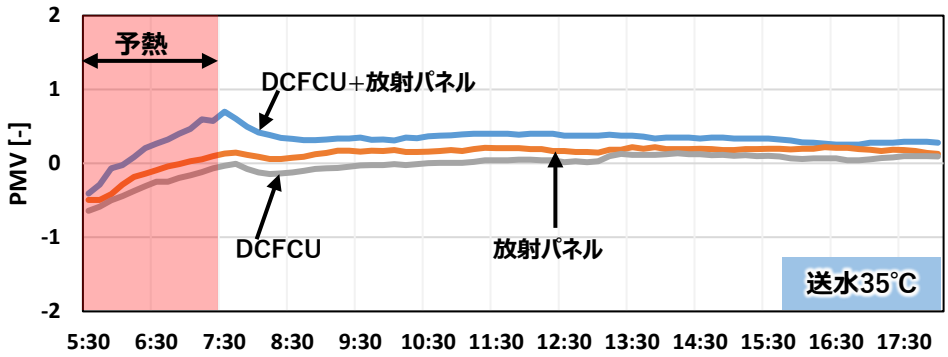
図 7 に、DCFCU による予熱運転の実施日の執務室 2-1 の PMV 経時変化を示す。ここで PMV は、空気温度、グローブ温度、相対湿度の着座高さ（FL+600 mm）の実測値に加え、着衣量は 0.73 clo、代謝量は 1.2 met、風速は 0.10 m/s と仮定して算出した。DCFCU の予熱運転を開始すると、PMV が快適であるニュートラルゾーン（-0.5～＋0.5）に向けて上昇する傾向が見られた。予熱運転完了後は PMV に大きな変動は見られず、送水温度 45℃と 35℃両設定において、コアタイムの平均 PMV が-0.5～＋0.5 の快適範囲内で推移した。

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

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



(a) 送水温度 45℃



(b) 送水温度 35℃

図 7 執務室 2-1 における PMV 評価

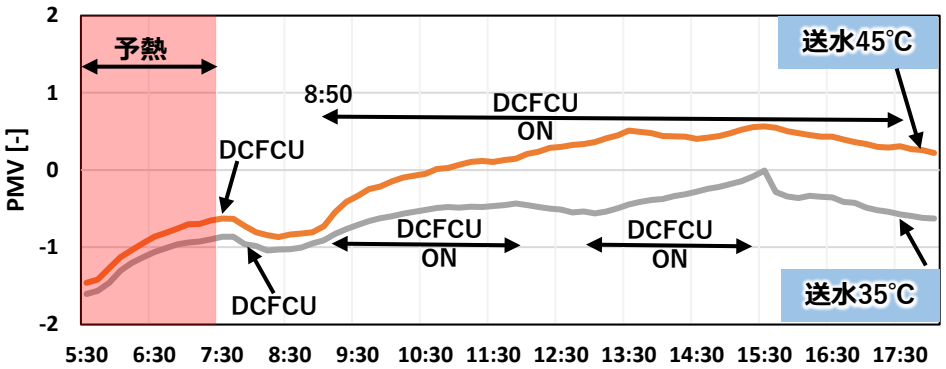


図 8 ワイガヤにおける PMV 評価

表 2 PMV 平均値

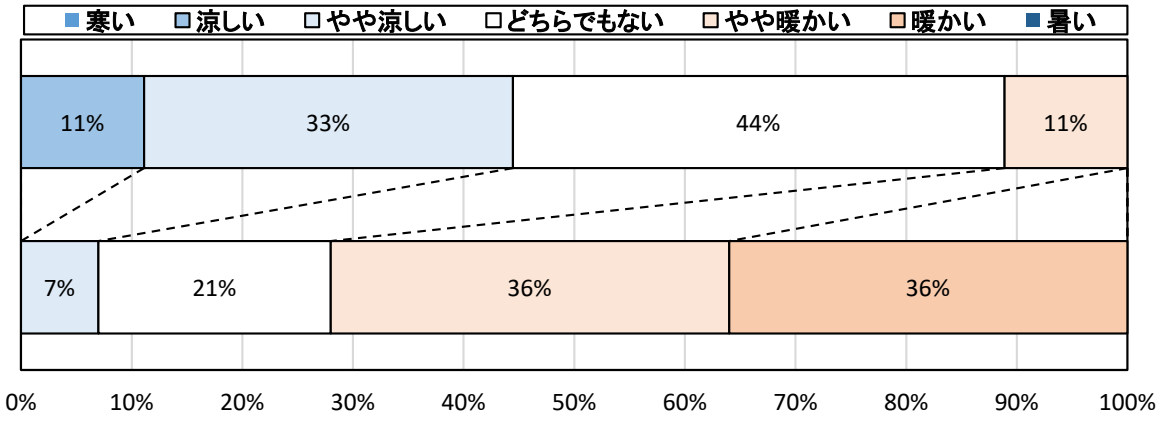
エリア	執務室2-1						ワイガヤ	
送水温度設定	45℃			35℃			45℃	35℃
実測代表日	17日	18日	19日	23日	24日	25日	17日	25日
PMV(5:30～7:30)	-0.1	-0.1	0.1	0.2	-0.1	-0.3	-0.1	-1.2
DCFCU	○	×	○	○	×	○	○	○
放射パネル	○	○	×	○	○	×	×	×
PMV(7:30～18:00)	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	0.0	0.1	-0.5
DCFCU	×	×	×	×	×	×	○	○
放射パネル	×	×	×	×	×	×	×	×

○:運転、×:停止

4.2 執務者アンケート調査の結果

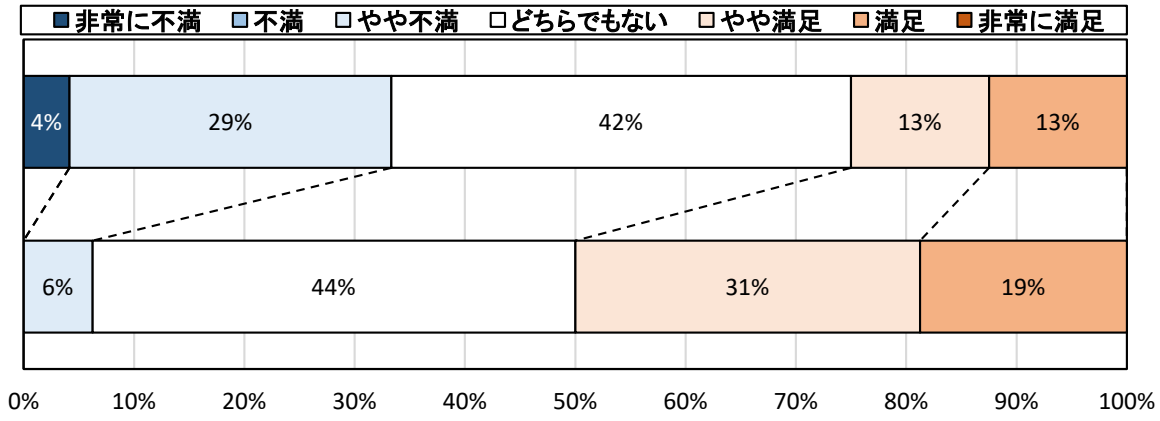
予熱運転の効果を確認するため、執務者によるアンケート調査を実施した。**図 9** に予熱運転未実施日と送水温度 35℃で運転実施日の就業開始時（8:45）での温冷感申告結果を比較して示す。予熱運転未実施日ではどちらでもない～暖かい側の申告が 55%とだったのに対して、予熱運転実施日では、93%に向上した。

図 10 にコアタイムの温熱環境満足度結果について、DCFCU 予熱運転の有無別に比較して示す。ASHRAE[4)] 基準によると、少なくとも 80%の人が快適と感じれば、それが快適な熱環境とみなされるが、予熱運転を実施した日の満足度は全体で 94%となり、多くの執務者にとって快適性が向上したことを確認した。なお、**図 10** における不快要因としては、執務エリアの違いや個人の着衣量や活動レベルが異なるためと想定される。



上：予熱運転未実施日(2023/12/25, n=24)　下：予熱運転実施日(2024/1/25, n=16)

図 9　就業開始時（8:45)の温冷感



上：予熱運転未実施日(2023/12/25, n=24)　下：予熱運転実施日(2024/1/25, n=16)

図 10　コアタイムの温熱環境満足

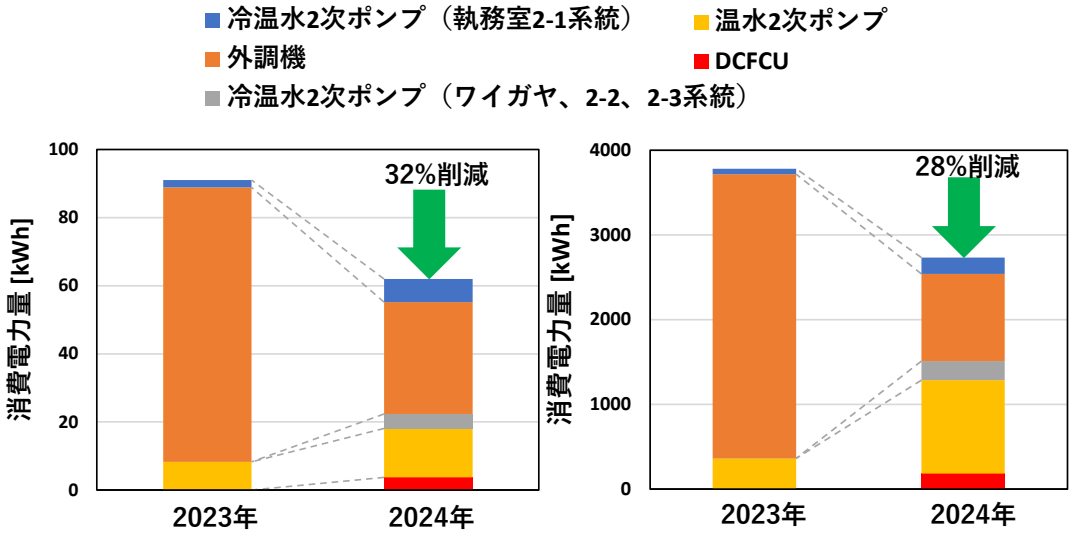
5. 予熱運転の省エネ性評価

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

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

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

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



(a) 日積算値（代表日）　　(b) 期間積算値（1 月、2 月）

図 11 予熱運転による消費電力比較結果

6. おわりに

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

文　献

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

2) 木村 健太郎,平原 美博,清水 昭浩,柴田 克彦,羽鳥 大輔,武藤 友香：エネルギー自立型サスティナブル研究施設の

計画と実証評価（第 5 報）二次側空調機器の開発,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp161-164，2020.
3) 市川 侑,スレスタ ミサン,齋藤 雅浩,木村 健太郎,清水 昭浩,柴田 克彦：エネルギー自立型サスティナブル研究施設の計画と実証評価（第 34 報）天井型パーソナル空調機のアンビエント空調利用，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp117-120，2024.
4) ASHRAE; Thermal environmental conditions for human occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-2020, 2022.

ABSTRACT

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

【*Technical Paper*】

FEASIBILITY STUDY FOR ZWB ON A SUSTAINABLE OFFICE

Kosuke Osako[1], Katsuhiko Shibata[1], Naoki Aizawa[1], Anna Fujita[2], Masayuki Otsuka[2]

ABSTRACT

Our innovation center (hereafter referred to as "the building"), designed as a sustainable building, achieved a net-zero energy performance. Additionally, the building incorporated a highly efficient water-usage system for resource conservation. As a result of evaluating the building according to net-zero water building (ZWB) as defined by the U.S. Department of Energy, the potential for achieving ZWB is suggested. However, there are ambiguous aspects when applying this definition to a building's water usage system, necessitating further discussion. Conversely, when evaluated based on the definition of LEED Zero Water (hereafter referred to as "LEED-ZW") certification proposed by the U.S. Green Building Council, our approach to heat utilization of groundwater differed from the certification definition, resulting in a value greater than zero. Therefore, we explored methods for improving water usage to achieve a ZWB according to the LEED-ZW definition. These methods include reducing groundwater usage through improved building operations and utilizing underground rainwater infiltration and groundwater.

1. INTRODUCTION

The building is a research facility designed for energy independence through the use of renewable energy. In previous reports,[1,2] we reported the operational status of the groundwater heat utilization system installed in FY2022. In this report, in addition to the operational results of the groundwater heat utilization system in FY2023, we focus on the effective use of water resources as a new perspective for transforming the research facility into a more sustainable one while making effective use of its location and other resources. We then report the estimation result based on the net-zero water building (ZWB) evaluation method.

2. Groundwater Heat Utilization System Operation Results

2.1 Groundwater heat

2.1.1 Groundwater heat utilization status

Fig. 1 illustrates a diagram of the groundwater heat utilization system. In this system, groundwater is extracted by pumping wells and is used for heat utilization. The system consists of two systems: a direct-use system in which groundwater is pumped during the day for air conditioning, and a cascade system in which groundwater is stored at night for cascading use. In the cascade system, groundwater is used to cool the upper floor of the reservoir (zero primary use), personal air conditioning and radiant air conditioning in offices (primary use), and as the heat source for a water source heat pump (secondary use). After heat utilization, a portion of the groundwater is reused as well water (gray water) and the remainder is returned to the ground through return wells.

This article is update of "The 49th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings (CIB W062), August 19-21, 2024, Northampton, UK."

1 Takasago Thermal Engineering Co., Ltd. 2 Kanto Gakuin University

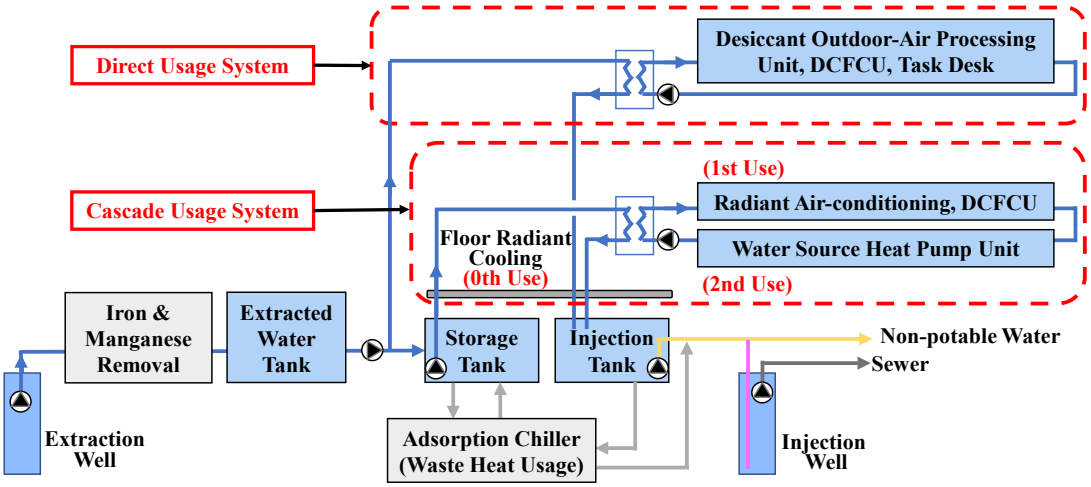


Fig. 1 Overview of the groundwater heat utilization system

Fig. 2 depicts the average groundwater and outdoor air temperatures for each month in FY2022 and FY2023 during the system operation. The groundwater temperature was not affected by the ambient air temperature and fluctuated approximately 3 °C throughout the year in FY2023, with an annual average of 16.6 °C. The groundwater temperature in FY2022 also displayed little fluctuation, with an annual average of 16.8 °C. This study will continue in anticipation of future changes in the usage and groundwater veins.

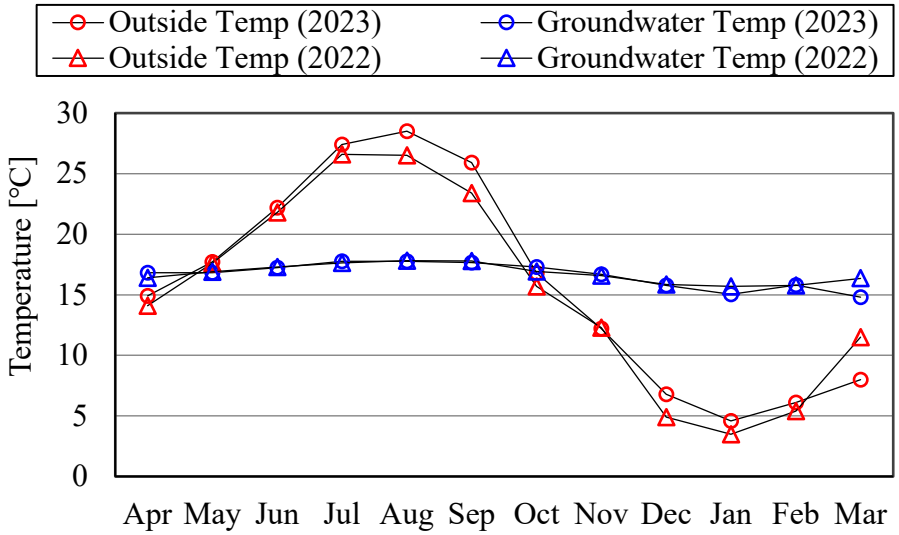


Fig. 2 Groundwater and outside temperatures for each month

In this building, groundwater heat is used according to the cold heat demand, contributing to energy conservation and the reduction of CO_2 emissions.[2] The monthly accumulated cold heat (illustrated in Fig. 3) is the sum of the cold heat from the direct groundwater heat and cascade utilization systems. The left side of the bar graph depicts the value for FY2022, and the right side depicts the value for FY2023. The total amount of cold heat accumulated in the cascade use system in August and September increased by approximately 5,000 kWh in FY2023 compared with FY2022 because the secondary side outlet temperature of the heat exchanger was set at a lower value than in FY2022.

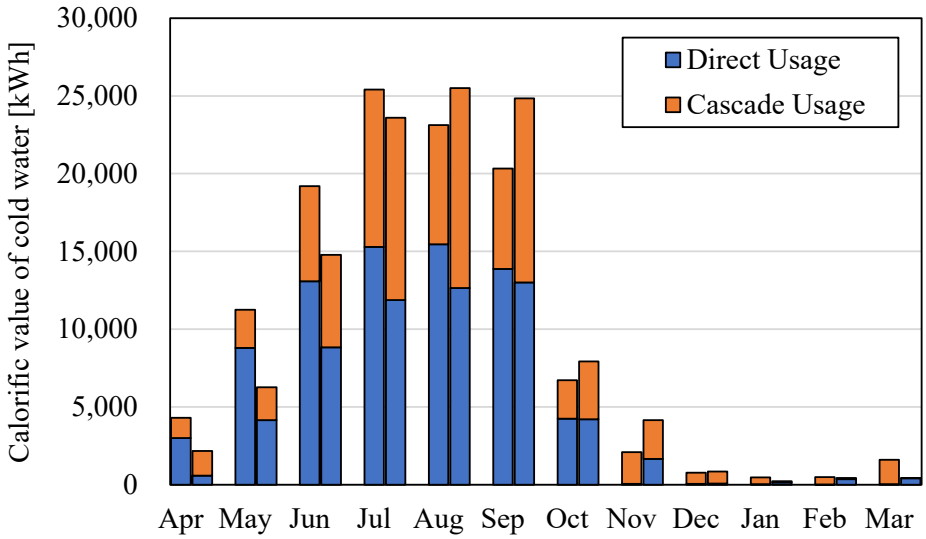


Fig. 3 Quantity of cold heat
(The left bar: FY2022, The right bar: FY2023)

2.2 Water consumption

2.2.1 Water and well water usage

In this building, a portion of the groundwater used for heating via air conditioning was also used as well water. Fig. 4 illustrates the usage of tap water and groundwater as well as the actual results. As presented in Fig. 4, tap water consumption doubled from 600 m^3/year in FY2022 to 1,260 m^3/year in FY2023, mostly because of an increase in the laboratory building supply system (620 m^3/year) for experimental use. Additionally, it is believed that an increase in the number of people in the building increases the volume of water used. The well water used for experiments, toilets, hand washing, etc. increased by 120 m^3, from 1,470 m^3 in FY2022 to 1,590 m^3 in FY2023. This is due to the increase in the volume of water used for experiments in the laboratory building as well as for drinking water. The backwash water for the de-ironing and de-manganizing equipment decreased by 900 m^3/year. This was a result of the reduced backwash frequency conditions during the demonstration test for the optimization of backwash conditions to reduce backwash water, which started in FY2023. The volume of groundwater restored to the return wells increased by 6,930 m^3, from 16,500 m^3 in FY2022 to 23,430 m^3 in FY2023, owing to an increase of 5,540 m^3 in groundwater pumped for air conditioning use, from 24,760 m^3 in FY2022 to 30,300 m^3 in FY2023, and a decrease in total well water (gray water) use.

Fig. 5 illustrates the water consumption for each month and the ratio of tap water to groundwater in the pie chart. Groundwater consumption in FY2023 was approximately 96 % of the tap water and groundwater used in the facility, and tap water consumption was approximately 4 % (1260/32450). Groundwater pumping, used as a source of cold heat for air conditioning, increased by 5,760 m^3/year, from 25,430 m^3/year in FY2022 to 31,190 m^3/year in FY2023. This was attributed to an increase in groundwater pumping because the outlet temperature of the heat exchanger operated at a lower set point. Approximately 23 % of the groundwater used for air conditioning was reused as well water.

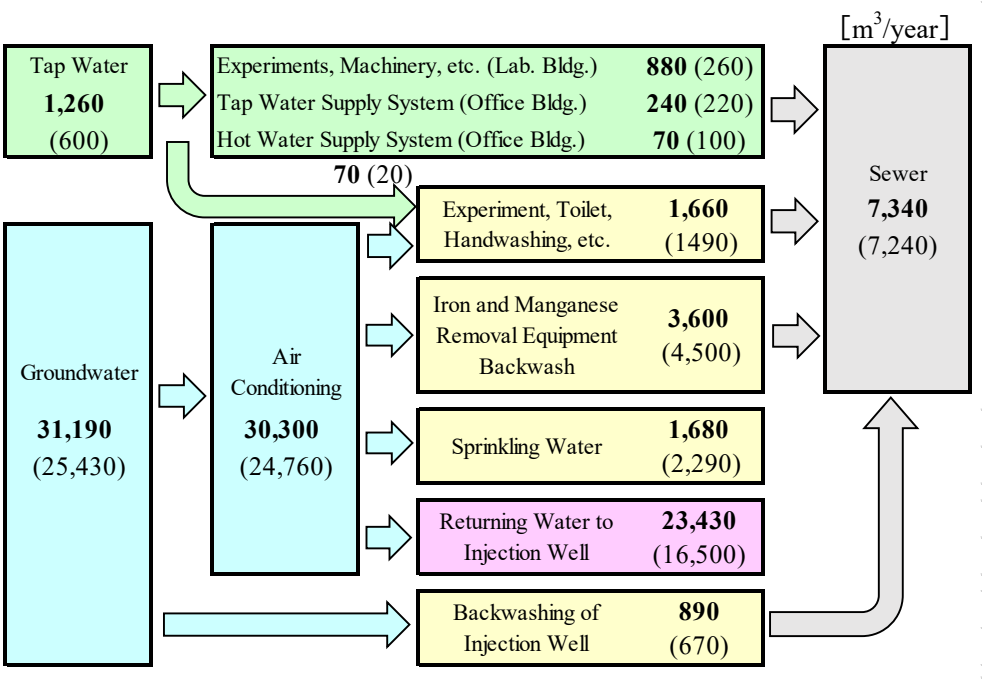


Fig. 4 Diagram of the flow of water usage in the facility [m^3/year]
(Bold: FY2023 results; In parentheses: FY2022 results)

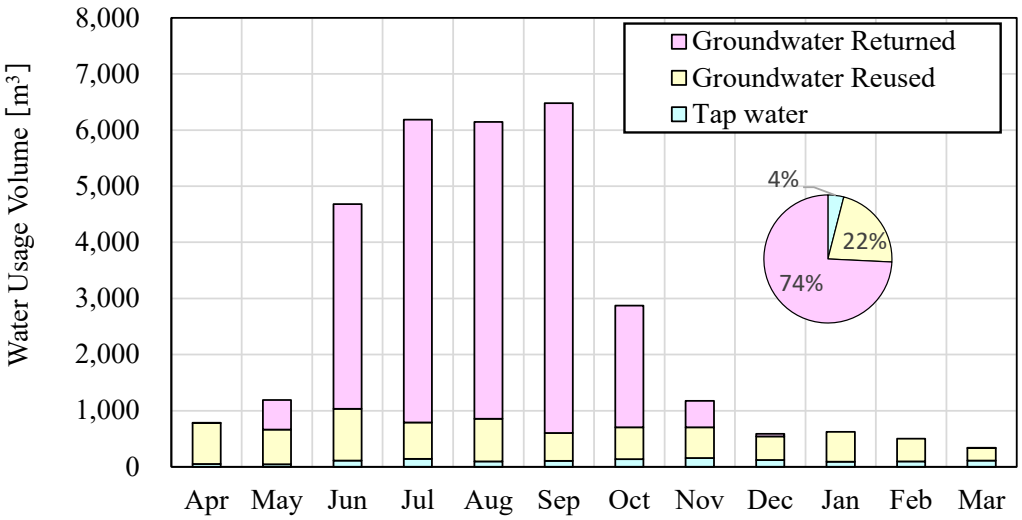


Fig.5 Monthly quantity of tap water and groundwater

2.2.2 Volume of sewage

As presented in Fig. 4, the sewage volume in FY2023 was 7,340 m^3/year, which is an increase of 100 m^3/year compared to FY2022. This was a result of 660 m^3/year increase in drinking water, 120 m^3/year in well water used for hand washing in experimental toilets, and 220 m^3/year in backwash water from return wells, for a total of 1,000 m^3 increase and 900 m^3/year decrease in backwash water from the iron and manganese removal equipment.

3. ESTIMATED EVALUATION BY ZWB INDEX

A growing interest in the ZWB as a new water resource recycling building goes beyond conventional water conservation and recycling to consider reducing the load on the water supply and sewage infrastructure. In this section, we estimate this building from the perspective of water resource recycling using the ZWB evaluation method.

3.1 ZWB trial evaluation

In this report, we estimate and discuss the ZWB evaluation method proposed by LEED Zero Water (LEED-ZW), a LEED Zero Certification.

3.1.1 Estimation method of ZWB

The definition of ZWB in the LEED Zero Program Guide[3] is presented in Table 1. LEED-ZW certification can be obtained if the difference (a-b) between the total water use (a) and the sum (b) of the volume of alternative water (①) used and the volume of reduced water (②) returned to the ground etc.; (b) is a negative value. However, the building must be LEED certified. In this estimation, the calculations were made not only for the office building area subject to LEED certification but also for the entire site, including the laboratory building area.

Table 1 Definition of ZWB by LEED-ZW

Item	Description
POTABLE WATER CONSUMED	
Water consumption	Total potable water consumed by the project
(a)Total Potable Water Consumed	
ALTERNATIVE WATER SOURCES(①) and WATER RETURNED(②)	
①-1 Off-site Water Sources	Reclaimed water delivered from municipality
	Municipally renovated wastewater
	Other off-site source – specify
①-2 On-site Water Sources	Captured rainwater (roof)
	Captured rainwater runoff (site)
	Captured rainwater overflow
	AHU Condensate
	Steam recovery
	Greywater reuse
	Other on-site water source – specify
② Water Returned	Water collected from building systems (e.g. green infrastructure, on-site treated wastewater) and returned to original water source
(b)Total Alternative Water Sources + Water Returned	(①-1)+(①-2)＋(②)
WATER BALANCE	
(a)-(b)	If difference is ≤ 0, project can submit for certification.

3.1.2 Current status of water use in this building

To estimate the ZWB, we examined the details of water use by checking with LEED certification organizations to determine which items were applied. Fig. 6 illustrates the results of the ZWB evaluation calculations. The total water consumption (a) in the building depicted in Fig. 5 is 9,020 m^3/year, which is the sum of tap water and groundwater used for the experiments, toilets, backwash water for hand washing, de-

ironing and de-manganizing equipment, return wells, and irrigation water. However, the total volume of alternative and reduced water was 0 m^3/year because such water was not used. The water balance (a-b) was estimated to be 9,020 m^3/year.

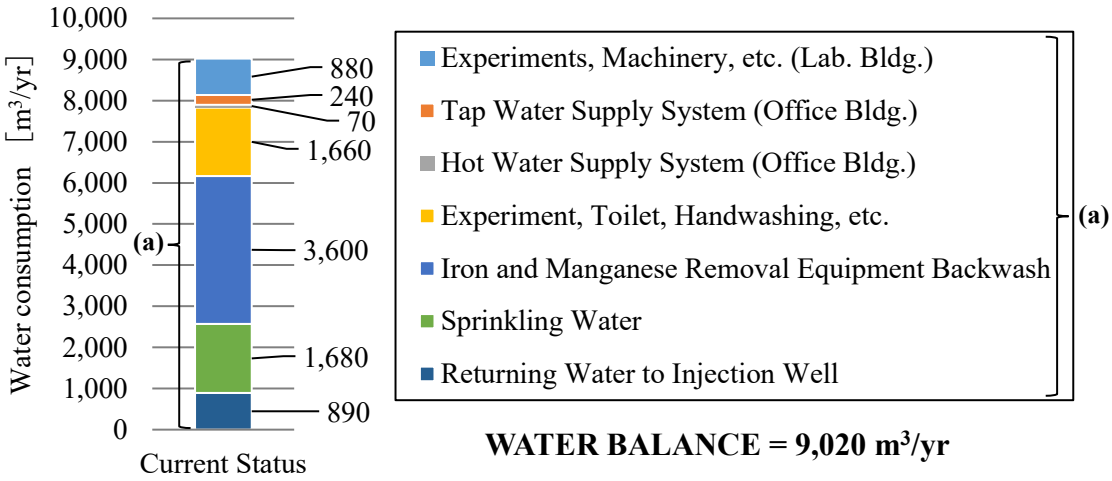


Fig. 6 LEED-ZW estimate for this building

3.2 Potential for ZWB with this building renovation

Based on the current values, studies and estimates were conducted for the ZWB conversion. To achieve this goal, the volume of water to be replaced and reduced was considered.

Efforts to reduce the volume of backwash water for de-ironing and de-manganizing that started last year are planned not only to reduce the volume of wastewater but also to eventually return it to the ground. In this estimation, the amount of sewage effluent could be reduced to zero by reducing the current volume of de-ironed and de-manganized backwash water by half (1,800 m^3/year) and by infiltrating this water into the ground.

The site also has a stormwater runoff control facility to meet the allowable discharge of stormwater, and two rainwater storage tanks (capacities: 261 m^3 and 200 m^3). This rainwater harvesting facility has an underground infiltration capacity, but it is built as a rainwater harvesting type structure; therefore, its infiltration function is not fully utilized, and there is a possibility that it can be improved through renovation. Therefore, we estimated the amount of rainwater infiltration that could be expected by retrofitting to improve the infiltration function, based on the calculation method outlined in “Rainwater Management”[4] in the LEED-ZW rainwater infiltration calculations; however, for the sake of simplicity in this calculation, we used the following formula: building roof area x rainfall x runoff coefficient (= 0.9). Rainfall data (Fig. 7) recorded by the Japan Meteorological Agency (Tateno Meteorological Station, Tsukuba City, Japan) were used. As a result, it was estimated that the renovated rainwater-harvesting tanks could infiltrate 7,760 m^3/year of rainwater collected from the rooftops of the office and laboratory buildings, as illustrated in Fig. 8.

The ZWB evaluation value was -2,340, a negative value, when the aforementioned reduction in the volume of backwash water from the iron and manganese removal equipment and renovation of the rainwater infiltration tank were implemented, and the trial calculation results satisfied the ZWB conditions. This result suggests that the ZWB, by securing reduced water through rainwater infiltration, is effective for facilities with large sites, such as this research facility.

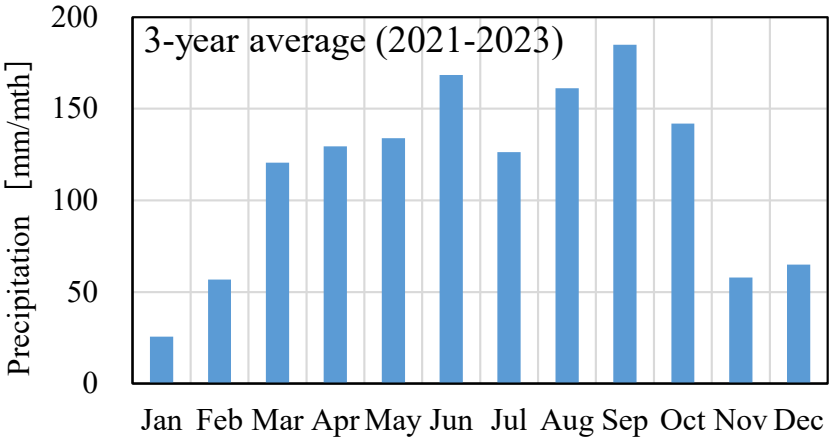


Fig.7 Precipitation (Tateno Weather Station, Tsukuba City)

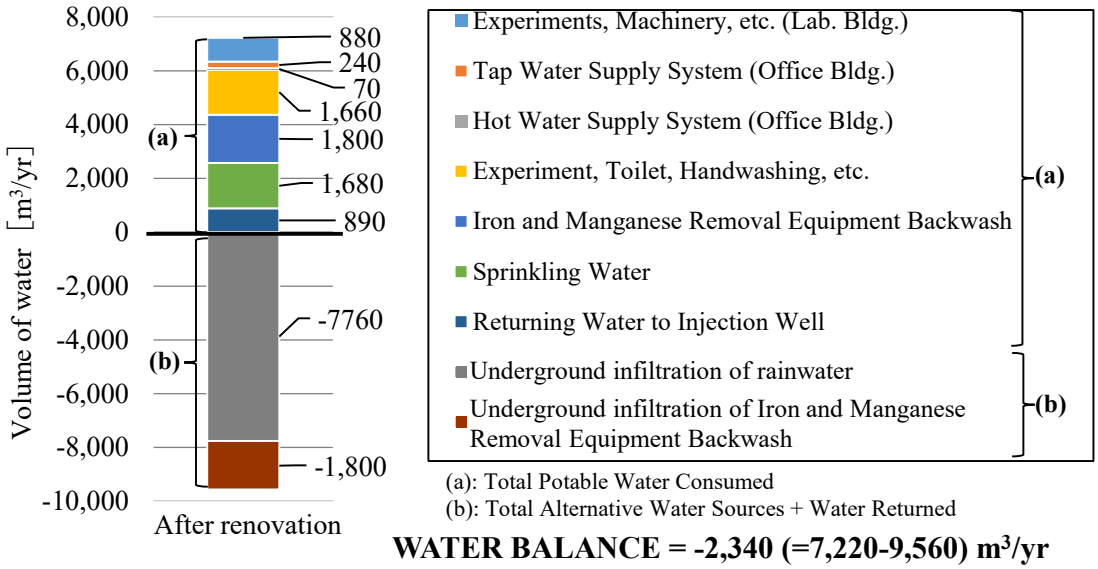


Fig.8 Estimated results after renovations for ZWB

4. CONCLUSIONS

The following findings were obtained from the operation of the groundwater heat utilization system in the building, which aims for energy independence through renewable energy in FY2023 and from the evaluation of water use through the ZWB evaluation method.

1) Of the water and groundwater used at the facility in FY2023, approximately groundwater usage was 96 %, and water use 4 %. Approximately 97 % of the groundwater usage was used as a source of cold heat for air conditioning and approximately 22 % of it was reused as gray water.
2) ZWB was estimated based on water consumption in FY2023, resulting in a water balance value of 9,020 m^3/year.
3) If the volume of backwash water from the de-ironing and de-manganizing equipment is reduced and the rainwater infiltration tank is renovated, the water balance is estimated to be -2,340 m^3/year,

indicating the possibility of a ZWB.

In this report, it is estimated that an existing ZEB facility can be retrofitted to a ZWB by rainwater infiltration, and the possibility of improving it into a more sustainable facility is demonstrated. In addition to the ZWB estimates, we would like to estimate and evaluate the energy and cost impacts of the improvements in the future.
In the ZWB evaluation by LEED-ZW, groundwater pumped underground and returned to the ground after heat utilization was not included in the water consumption. It is expected that an increasing number of facilities will have diverse water use methods, such as heat use. It is necessary to discuss a definition of ZWB that matches the characteristics of Japan as soon as possible while adding factors such as the use of heat from water as a resource, rather than simply evaluating water consumption in conventional water supply, drainage, and sanitation systems.

REFERENCES

[1] Kosuke Osako, Naoki Aizawa, Takeshi Aoyama, Uwais Roslan, Akihiro Shimizu, Daisuke Hatori, Yuka Mutoh, Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center (Part 29) Operational results of water use mainly from groundwater and renewable energy heat, Proceedings of Society of Heating, Air-conditioning, and Sanitary Engineers of Japan, pp173-176, 2023.

[2] Kosuke Osako, Uwais Roslan, Katsuhiko Shibata, Naoki Aizawa, Masayuki Otsuka, Advanced building facilities embodying the transition to carbon neutrality, 2023 Symposium CIB W062 – Leuven, Belgium, pp269-280, 2023.

[3] U.S. Green Building Council：「LEED Zero Program Guide April 2020.」

[4] U.S. Green Building Council：「LEED v4 Sustainable Sites credit Rainwater Management.」

要　約

サスティナブル建築として設計された高砂熱学イノベーションセンターは、運用データから ZEB の基準を達成した建物であることを報告した。この建物に対し、水資源の保全や水の再利用への関心の高まりから近年注目されている Zero Water Building(ZWB)について、地下水熱・水利用における評価を行った。米国グリーンビルディング協会が提唱する LEED Zero Water の定義に基づき ZWB 評価を行ったところ、評価が厳しい結果となった。そこで、LEED Zero Water の定義における ZWB 達成に向けた水利用の改善方法を検討し、設備運用改善による地下水の使用量削減や地下浸透の活用などを組み合わせることで、同定義における ZWB 達成への可能性を得た。今後は ZWB 値への効果だけではなく、改善によってもたらされるエネルギーやコスト面への影響についても評価していきたい。

【技術論文】

体育館向け空調システムの開発と実証
ー暖房効率改善と吹出し配置の影響ー※

木村健太郎・スレスタミサン
小山尚人・平原美博[*1]

Development and Demonstration of Air Conditioning System for Gymnasiums
-Improvement of Heating Efficiency and Impact of Air Outlet Arrangement -

Kentaro Kimura・Mishan Shrestha
Naoto Koyama・Yoshihiro Hirahara

被災時の防災拠点施設として計画される学校体育館は、通常利用時だけでなく避難所利用時への対応も要求される。我々は、これまでに取得した大空間空調の知見を生かし、運動時に衝突してもケガを防止する吹出しユニット仕様に加え、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開発を目指しており、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にて試作機の実証試験を 2022 年より開始した。

前報[1,2]では、本システムの概要と実証結果を示し、体育館に有効な空調システムであることを示した。本報では、実証試験や利用者アンケートにより得られた知見や課題を踏まえ、本システムの吹出しユニットや外調機の改良を実施し、更なる暖房性能の向上や設置制約緩和を目指した実証結果について示す。

1. 実証試験による課題抽出と改良

1.1 吹出しユニット

図 1 に改良したビニール風船型の吹出しユニットを示す。アリーナ壁面に設置する吹出しユニットは、低速給気のため吹出し面積を確保しつつ薄型化を図るため半楕円形断面とし、保護マットによる衝撃吸収構造として競技時の安全性を確保している。冷房時は、有孔ビニール（3mmΦ、開口率約 5%）から急拡大で吹出すことにより拡散され残風速を抑えつつ、奥行き寸法を上部 200mm から底部 50mm に減少させることで上下方向にも均一な低速吹出しを実現している。実用初号機（改良前）では、冷暖房の切り替えは、吹出し口下部に設置したファスナー開閉による仕組みを採用し、暖房時はファスナーを開けることで床面への高速給気を実現していた。しかし、暖房時は全給気量の 1/3 程度が冷房用の有孔ビニールから染み出され、暖房効率の向上には更なる改良が求められた。そこで、暖房時は保護マット背部に設けた奥行 110mm の流路を通り、乱流を防止するガイドベーンを経て 50mm 高さの開口より床面と平行に高速給気する構造に変更した。冷房と暖房の切り替えは、リモコンスイッチ操作に加え、給気チャンバの側面からレバーで風路を切り替える構造に変更したことで、冷暖切り替えの容易さに加え、柱等へ隣接設置する際の吹出し口の設置制約を軽減させる仕様とした。

※ 本論文は、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2024.9.11～13（佐賀））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）

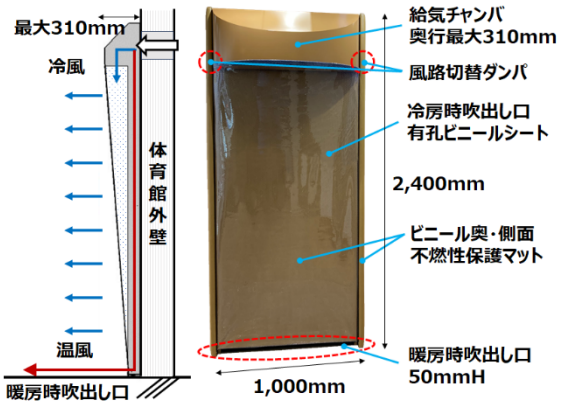
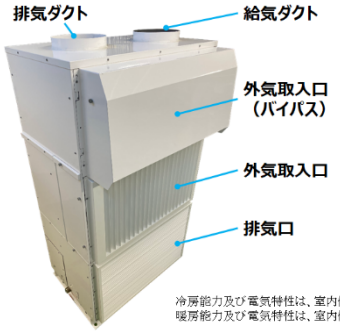


図 1 ビニール風船型吹出しユニット

1.2 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機

図 2 に室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の外観と機器仕様を示す。実用初号機では、給気風量を冷房時 1,000 m³/h、暖房時 1,500 m³/h としていたが、特に外気温度が氷点下となる厳冬期において、給気温度が 20℃程度までしか上昇せず、室内環境の改善には更に高い温度での給気が望まれた。また、搬送動力低減による省エネ化に加え、静穏環境が求められる卒業式等の式典での活用を想定し、暖房時も冷房時と同風量の 1,000 m³/h とすることで、冷暖房の処理能力を変えずに給気温度を上昇させる仕様に変更した。



項目			単位	仕様
性能	冷房能力		kW	15.0（～18.0）
	暖房能力		kW	12.0（～12.0）
電源			V/Hz	三相200V 50/60Hz
電気特性	冷房	定格消費電力	kW	4.6
		定格運転電流	A	14.4
	暖房	定格消費電力	kW	4.9
		定格運転電流	A	15.4
最大運転電流			A	22.0
給気	風量		m³/min	16.7
排気	風量（室内還気量）		m³/min	40.0（16.7）

冷房能力及び電気特性は、室内側吸込空気乾球27℃、湿球19℃、室外側吸込空気乾球33℃、湿球28℃時の値
暖房能力及び電気特性は、室内側吸込空気乾球20℃、湿球15℃、室外側吸込空気乾球7℃、湿球3℃時の値

図 2 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の外観と機器仕様

2. 改良前後の性能比較

2.1 測定概要

改良効果を確認するため、実証試験中のつくばみらい市立富士見ヶ丘小学校体育館に設置された吹出し口 8 台を全数改良型の吹出し口に交換した。また、外調機 8 台は、全台に対し処理能力は変えずに給気風量を変更する基板改造を行い、諸性能を比較検証した。

図 3 に体育館内の測定点、**写真 1** に測定状況を可視画像とサーモグラフィにより示す。改良前後の比較検証試験は、課題となっていた冬期に実施し、改良前は 2022 年 12 月 26～27 日、改良後は 2023 年 12 月 25～27 日の実測データを用いて比較した。測定点は両年共に同一箇所とし、高さ 1m の温湿度センサを 10 か所、室中央 2 か所の鉛直測定では、5m 高さを 1m ピッチで温湿度センサを設置し、1 分間隔の瞬時値を記録した。また，平面の風速測定と騒音値測定は、無指向性微風速計と小型普通騒音計を用い，全測定点（床上 0.1m・0.5m・1.0m）の移動測定（10 秒平均値）を行なった。また、避難利用時を想定し 2 名用の避難所テント（2.1mW×2.1mD×1.5mH）を実際の利用状況を模擬して 49 張配置した。

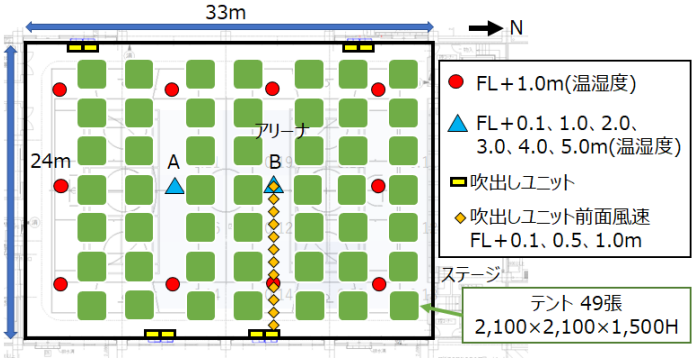


図 3　体育館内測定点

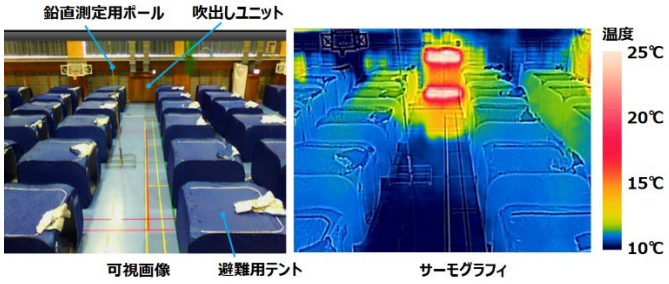


写真 1　測定状況

2.2 吹出し風速

図 4 に吹出しユニット正面における鉛直断面風速分布を改良前後で比較して示す。改良後の床面に沿った吹出し気流は、周囲の空気を誘引しながら徐々に低下し、吹出し面からの離隔距離が 6～8m ほどで浮力により上昇する流れ場となっている。改良後の風速は、改良前と比較し給気風量は 2/3 に減少し、給気と周囲の温度差が大きい条件であったが、離隔距離は 2m ほど延伸する結果となった。これは、吹出し近傍（離隔距離 3m 内、FL+0.5m と 1.0m）の風速が減少していることから、有孔ビニールからの暖気流出が抑えられたことに加え、吹出しユニット内部のガイドベーンにより吹出し気流の整流化が進み、床面のコアンダ効果が強まった影響と考えられる。

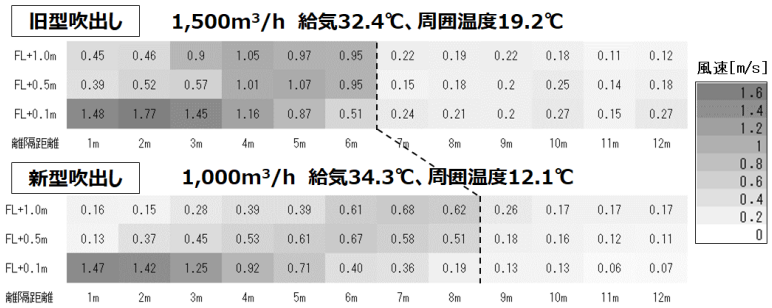


図 4　吹出しユニット正面の鉛直断面風速分布

2.3 平面温度分布

図 5 に暖房時の床上 1.0m 平面温度分布を改良前後で比較して示す。改良前と比較し、改良後は室内の温度ばらつきが小さく、室中央部でも良好な環境が形成されている。改良前後で外皮負荷が異なるため、外気と室内との温度差で比較したところ、改良前の Δt=3.8℃に対し、改良後は Δt=6.2℃となり暖房効率が向上した。外気と給気条件により試算した空調機処理負荷は、改良前で約 86.9kW、改良後で約 87.5kW と

ほぼ同等であることから、暖房効率向上は吹出し口の改良により暖気をコアンダ効果で室中央まで到達させた影響が大きいことが主因と想定される。

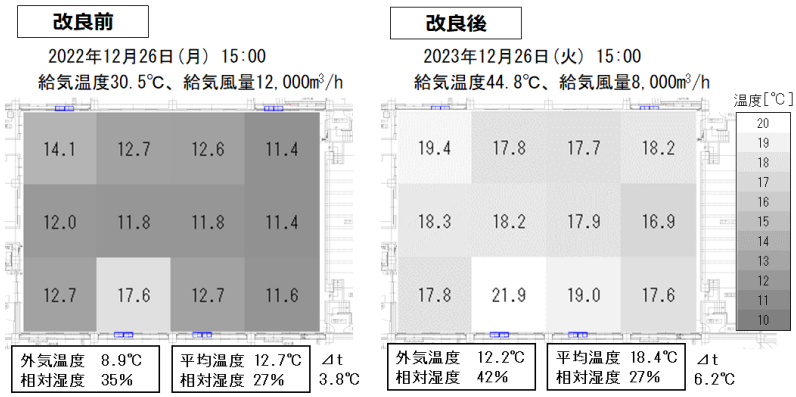


図 5　床上 1.0m 平面温度分布

2.4 室内騒音値

図 6 に外調機 8 台運転時の室内騒音値を改良前後で比較して示す。騒音値測定は、**図 3** に示す平面 12 点（FL+1.0m）の平均値で評価し、暗騒音に加え、天井付近に設置された 24 時間換気用有圧扇稼働時を参考に示す。改良後の吹出し口は、有圧扇と比較し高周波数帯で若干高いものの、給気風量が 2/3 に減少したことで改良前よりも 5dB ほど低下する結果となった。騒音値は、外壁ガラスと防護サッシ間の屋内に吹出し口一体型の外調機を設置した結果となるが、外調機を屋外設置することで更に騒音値は低下する。また、製品版では、高周波数帯で大きな騒音発生源となっていた基板用冷却ファンを無くし、還気チャンバ内に移設し冷却する仕様としており更なる省エネ化と騒音値低下が期待できる。

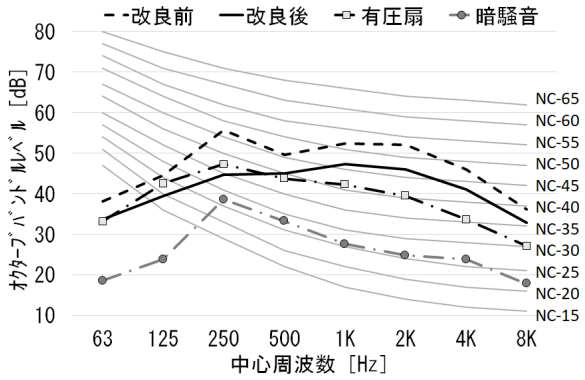


図 6　改良前後の NC 値比較

2.5 室内清浄度

体育館の被災利用時には、プライバシー確保のためパーティションやテントを設置する行政は増えているが、区画されたプライベート空間においても暑熱環境に加え、空気質環境の確保が要求される。そこで、置換空調を採用している冷房運転よりも換気効率の悪化が懸念される暖房運転時について、テント内の清浄度をパーティクルカウンターにて確認した。

写真 2 に清浄度測定状況を示す。測定点は、室中央付近のテントを選定し、テントの入口と天井は開放した。避難者の模擬負荷としてサーマルマネキンを 1 体着座にて設置し、FL+0.2m の粒子数を定点測定した。**図 7** に冬期実測期間中の浮遊粒子数の経時変化を粒子サイズ別に示す。0.5μm の粒子数は、測定開始時で外気と近い 15 万個/ft³ 程度であったが、徐々に外調機内の中性能フィルタで清浄な給気に置換され、

空調稼働から約 5 時間後に 5 万個/ft³ 程度まで減少した。暖房運転であってもテント内の換気効率が高いことを確認し、本システムは感染症拡大防止に有効であることが示された。

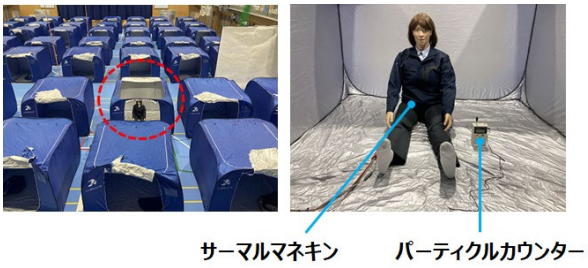


写真 2　清浄度測定状況

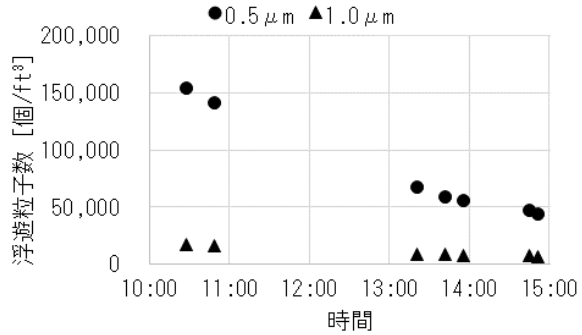


図 7　浮遊粒子数の経時変化

3. 吹出しユニットの配置影響

3.1 比較条件

本システムは、外調機を屋外設置し、外壁の貫通ダクトを介してアリーナ側の吹出しユニットへ接続するのが基本構成となる。また、吹出しユニットは、置換空調を採用しているものの室内環境の均一化を図るためには極力均等配置が望ましい。このため、本システムを導入する際には、多くの体育館で建屋長手方向の外壁 2 面に吹出しユニットを対向配置することが基本となるが、校舎と一体構造となっている体育館など吹出しユニットに設置制約のある物件では、ダクト延長による消費エネルギー増加や空調能力の低下を避けるため、壁 1 面のみに吹出しユニットを配置する状況が想定された。そこで、吹出しユニットの配置影響について実験検証した。

図 8 に吹出しユニットの配置条件を示す。実測は小学校の夏期休暇期間となる 2023 年 8 月 2 日～3 日に実施し、冬期と同様に**図 3** に示す測定点に温湿度センサを設置し、テント未設置の条件で比較検証した。条件設定は、通常配置を想定したケース①（基準 8 台）に対し、基準に近いケース②（千鳥 4 台）、各方位の壁面のみ吹出しユニットを配置するケース③～⑤の計 5 ケースにて比較した。

ケース	運転 [台]	外調機 ON/OFF	日時
①基準8台	8		2023年8月3日 9:00～10:15
②千鳥4台	4		2023年8月3日 11:45～14:30
③北側4台	4		2023年8月2日 15:00～16:30
④西側4台	4		2023年8月3日 14:30～16:00
⑤東側4台	4		2023年8月3日 10:15～11:45

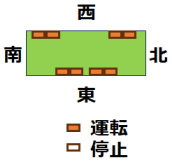


図 8　吹出しユニットの配置条件

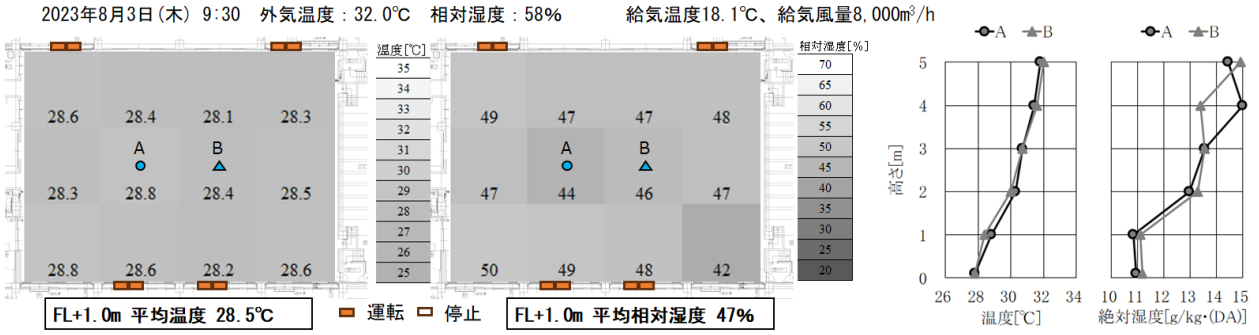


図 9　ケース①(基準 8 台)の平面･鉛直温湿度分布

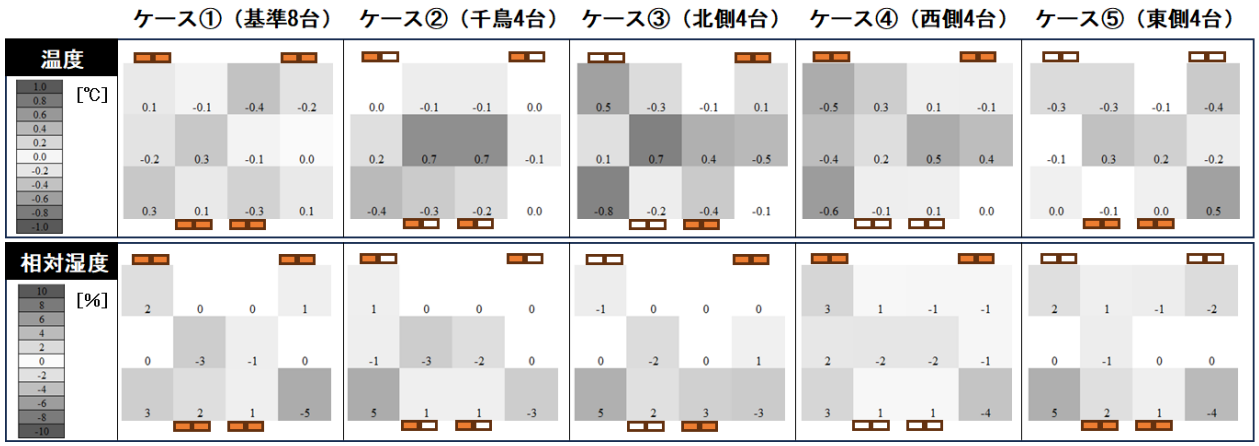


図 10　各配置条件の平面温度･相対湿度分布

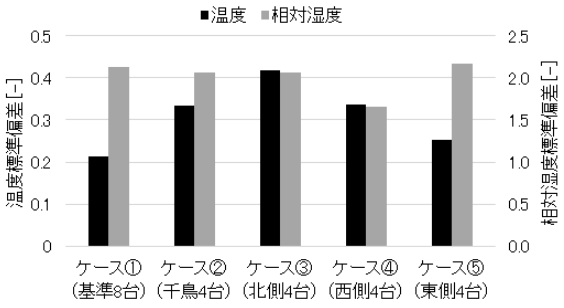


図 11　各配置条件の標準偏差

3.2 実験結果

図 9 にケース①（基準 8 台）の平面・鉛直温湿度分布を示す。8 台運転時は、温湿度共に平面ばらつきは少なく、垂直分布勾配から居住域を効率よく冷却除湿されている。ここで、ケース毎で外気負荷が異なることに加え、ケース②～⑤の 4 台運転時では、ケース①（基準 8 台）よりも給気風量が半減するため、平均値との偏差にて比較評価した。**図 10** に平面温度分布と平面相対湿度分布の偏差を各ケース別に比較して示す。温度分布では、室内中央付近で若干高い傾向が見られたが、全ケースにおいて、平均温度は±0.7℃以内、相対湿度では±5%以内と比較的良好な結果が得られた。

図 11 に各ケースの標準偏差を温度と相対湿度に分けて示す。各ケースで大きな違いが見られない相対湿度に対し、温度の標準偏差は、ケース①（基準 8 台）が最も小さく、ケース③（北側 4 台）が最も大きい値となった。これは、吹出しユニットの配置が非対称で、かつ全ケースの中で給気の到達距離が最も大きいことが主因と推察される。一方、建屋長手方向の片側給気となるケース④（西側 4 台）とケース⑤（東

側 4 台）では、両側給気のケース②（千鳥 4 台）よりも標準偏差が小さくなったことから、建屋長手方向 1 面での吹出し配置の影響は小さい傾向が示された。

4. おわりに

本報では、体育館空調の導入検証で得られた課題を基にシステム改良を図り、その効果や吹出しユニットの配置影響について示した。本システムは、暑熱や空気質環境の改善に有効であるが、非常時に長時間空調稼働させるためには更なる消費エネルギーの削減が求められる。今後は、本システムの普及展開に向け、外皮負荷削減や再エネ活用なども並行して検討を進めていきたい。

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，pp217-220，2023
2） 木村ら：体育館向け空調システムの開発と実証（第 2 報）暖房効率改善と吹出し配置の影響，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp449-452，2024

ABSTRACT

We have developed an air conditioning system for gymnasiums that has specifications for air vents that prevent injury even in collisions during exercise, as well as providing measures against heat stroke, cold protection, and infection control. In the previous report, we presented an overview of this system and its demonstration results, showing that it is an effective air conditioning system for gymnasiums. In this report, based on the findings and issues from the demonstration tests and user questionnaires, air outlets and external air conditioner systems have been improved, aiming for further enhancement of heating performance and reducing installation constraints.

【技術論文】

リキッドデシカントユニットの基礎試験とフィールド試験による加湿性能の検証※

澁澤朱音・馬場大輔・三宅友香・前田彩子
川上理亮・谷野正幸・原田政利[*1]

Verification of Humidification Performance of Liquid Desiccant Units in Basic and Field Tests

Akane Shibusawa・Daisuke Baba・Tomoka Miyake・Ayako Maeda
Yoshiaki Kawakami・Masayuki Tanino・Masatoshi Harada

脱炭素に資する新たな加湿システムの開発を目的とし、従来のリキッドデシカント空調システムから気液接触部のみを抽出し、小型で構造を簡素化したリキッドデシカントユニット(LDU)を開発した。前報[1)]では、調湿剤に金属腐食性を有するものの、コストが安く、調湿性に富む塩化リチウム水溶液を用いた加湿性能の報告をした。本報では、調湿剤に金属腐食性が極めて低いイオン液体水溶液を用いた試験を行い、調湿剤の違いによる加湿制御性と圧力損失を基礎試験機にて比較検証を行った。イオン液体水溶液は塩化リチウム水溶液と同程度の制御安定性を有するが、粘性が高いため、ファン動力が増加することを実験的に明らかにした。また調湿剤の液滴飛散しない面風速の検討として、塩化リチウム水溶液の飛散量の定量化を行い、実用上問題のない面風速を見出した。これらの結果に基づき、LDU の実建物への導入想定したフィールド試験機にて加湿制御性を検証し、基礎試験機と同様に高い制御安定性と追従性を示すことを確認した。

1. はじめに

地球温暖防止の観点から空調設備の省エネ化の重要性が高まっている。一方で感染症予防においては湿度維持と頻繁な換気が求められる。そのため、省エネと湿度維持を達成する新たな調湿システムの開発が望まれる。蒸気加湿器は化石燃料由来のエネルギー消費量が大きいという課題がある。気化式加湿器では省エネ性と加湿制御性を両立したシステム[2)]が開発されているものの、微生物によるエレメントの汚染が依然として共通課題にある。

そこで我々は、蒸気の供給が不要であり除菌作用を有する調湿剤により高い加湿制御性を実現するリキッドデシカント空調システム[3,4)]に着目した。一般的なシステム概要図を**図 1** に示す。調湿剤には金属腐食性を有するものの、コストが安く、調湿性に富む塩化リチウム水溶液（LiCl aq.）が一般的に用いられる。一般的なリキッドデシカント空調システムには主に 2 つの大きな課題があり、1 つ目は調湿剤の金属腐食性のため接液部を耐食材料にする必要があり機器コストが高くなる点である。2 つ目は、空気の温度制御のため、空気の加熱/冷却に必要な熱量を供給できる大量の調湿剤を気液接触部に流す必要があるが、一方で調湿剤は流量が多いほど飛散しやすいため、それを十分に制御可能な設計面風速は小さく（1.5 m/s 程）、機

※ 本論文は、令和 6 年度空気調和・衛生工学会大会の講演論文[5)] を加筆修正したものである。
*1 ダイナエアー株式会社 製品開発部門

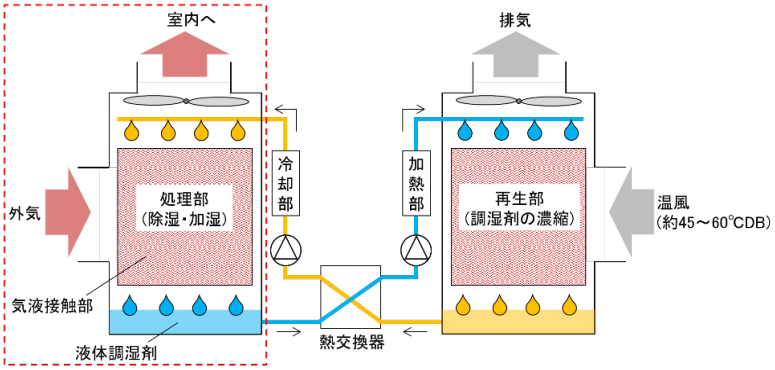


図 1 一般的なリキッドデシカント空調システムの概略図

器サイズが大きくなる点である。前報 [1]ではこれらを解決するため、**図 1** 赤枠内の加湿機能部のみ(リキッドデシカントユニット、LDU)を抽出し、空気温度は LDU 外で制御する新たなシステムを構築し、加湿性能を検証した。

本報では、調湿剤の種類にイオン液体水溶液（IL aq.）を加え比較検討し、調湿剤の違いによる加湿制御性と圧力損失の比較検証を行った。本検証で使用した IL aq.にはアルキルイミダゾリウム塩 IL aq.を採用した。IL aq.は LiCl aq.より金属腐食性が極めて低いため、漏水時における周辺部材の腐食リスクが比較的低いと言える。一方で粘性が高いという特徴も持つため、LDU に適用した際の加湿制御性と圧力損失を測定し評価した。また、調湿剤が液滴飛散しない設計面風速の検討として LiCl aq.飛散量の定量化を行った。これらの結果に基づき、LDU の実建物への導入想定したフィールド試験にて加湿制御性と圧力損失の比較検証を行った。

2. 検証試験の概要

2.1 試験装置

本試験装置の調湿方法を**図 2** の LDU 概要図を用いて示す。一般的なリキッドデシカントの調湿原理は、調湿剤を浸透させた気液接触部と通過する空気を接触させ、調湿剤と空気の蒸気圧差によって空気を除湿または加湿する。調湿剤の気液平衡水蒸気圧は濃度に依存するため、LDU への給水量で調湿剤の濃度を調整することで加湿量を制御できる [3]。また、調湿剤は濃度が一定の場合、調湿剤の温度変化に対して空気の相対湿度はほぼ一定となる。そのため、相対湿度は調湿剤の濃度により制御し、乾球温度は入口空気温度により制御される。この操作は、空気線図上で等エンタルピー変化となる。本試験装置では上記方法を応

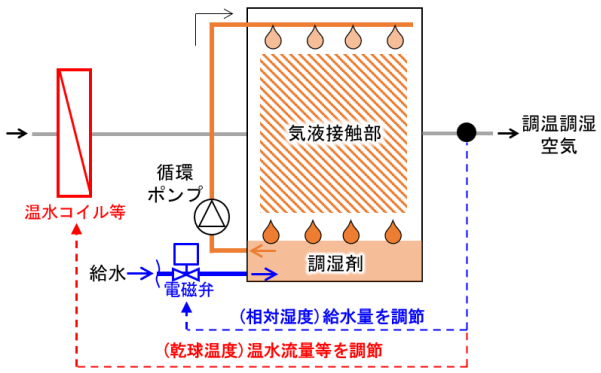


図2 LDU 概略図

用して、LDU 出口側の温湿度センサをもとに乾球温度は温水コイルの温水流量により制御し、相対湿度は電磁弁により LDU への給水量を調整することで、LDU の温湿度を制御した。

2.2 試験装置の概要

基礎試験機(定格風量 : 1,500 m^3/h、サイズ : 920W×850D×1,250H mm)にて調湿剤の基本特性を評価した。また、フィールド試験機(定格風量 : 10,000 m^3/h、サイズ : 1,300W×1,800D×1,600H mm)を高砂熱学イノベーションセンターの外調機系統に設置し調湿性能を検証した。LDU は気液接触部、循環ポンプ、給水配管から成り、導電率 0.1μS/cm 以下の純水を給水した。調湿剤の循環流量は圧力損失と物質伝達率を事前に確認することで決定した。

基礎試験機の系統図を**図 3** に示す。機器構成は前報 [1]と同様であり、ピトー管センサにより風量を測定した。飛散試験の際は HEPA フィルターを設置した。パーティクルカウンターの測定粒径区分は 0.3 / 0.5 / 1.0 / 3.0 / 5.0 / 10.0 μm 以上である。

フィールド試験機 [1]の系統図を**図 4** に、外観を**写真 1** に示す。外調機は回転型全熱交換機、冷温水コイルが内蔵され、LDU 通過後の空気は当該施設の各部屋に供給される。温湿度センサ、差圧計、流量計の精度は基礎試験機と同様であり、風速計の指示精度は±2.5%F.S.である。調湿制御システムも基礎試験機と同様に、LDU 出口側の温湿度センサをもとに、乾球温度は冷温水コイルの温水流量により制御し、相対湿度は電磁弁により LDU への給水量を調整することで制御した。

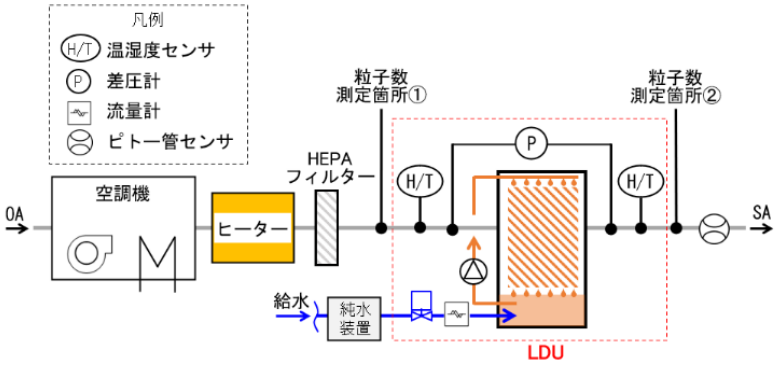


図3 基礎試験機 系統図

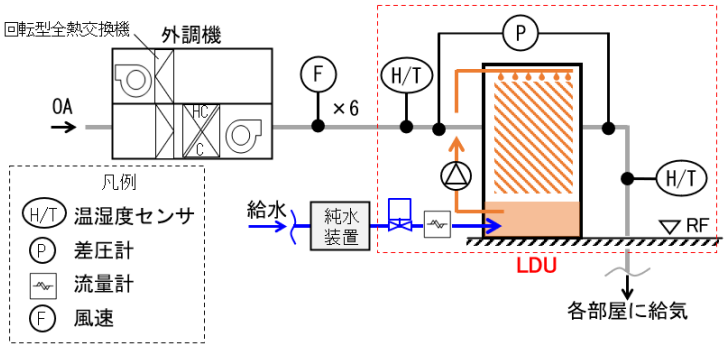


図4 フィールド試験機 系統図

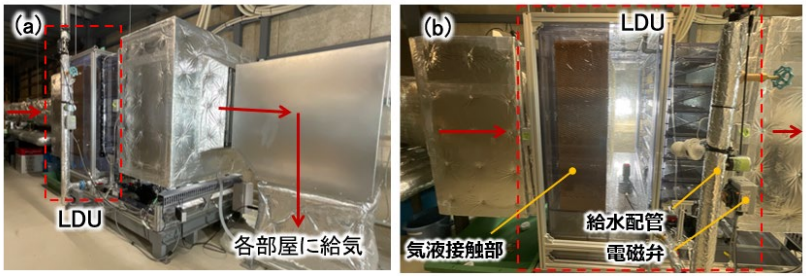


写真1 フィールド試験機 外観
(a) 全体、(b) 正面

2.3 試験方法

2.3.1 基礎試験による加湿制御性と圧力損失の検証試験

各加湿負荷と LDU 入口絶対湿度を変化させ、各加湿負荷における加湿制御性を評価した。 LDU 入口空気の設定値は 25℃DB、50%RH とし、最大加湿負荷の条件では 30℃DB、60%RH とした。風量は 1,500 m^3/h(面風速 1.5 m/s)とした。LDU 入口絶対湿度を調節し、LDU 入口空気の変動が±0.5℃DB、±2.0%RH 以内の定常状態に達した後、LDU 出口乾球温度と相対湿度を測定した。測定時間は 60 min、測定間隔は 1 sec とし測定時間全体の平均値と標準偏差を算出した。

圧力損失は、面風速を比較風速として調節し、LDU 入口空気の温湿度変化が定常状態に達した後に測定した。測定時間は 15min とし、測定時間全体の平均値を算出した。

2.3.2 基礎試験による飛散量の検証試験

LiCl aq.の飛散量を評価するため、面風速を一般的なリキッドデシカント空調システムよりも速い 3.0 m/s に調節した。LDU 入口空気が定常状態に達した後、測定箇所①②のダクトにパーティクルカウンターを接続し、LDU 入口・出口空気の粒子数を測定した。測定時間 1 min×5 回で実施し、平均値を算出した。

2.3.3 フィールド試験機による加湿制御性の検証試験

各加湿負荷におけるフィールド試験機と基礎試験機の加湿制御性を比較した。LDU 出口空気は 25℃DB、50%RH と設定した。試験条件を**表 1** に示す。風量は各試験機の定格値とし、フィールド試験機の測定間隔は 5 sec とした。2023 年 11 月～2024 年 3 月において LDU 入口空気が定常状態となっている 60 min 間を抜粋し平均値と標準偏差を算出した。そして、試験期間中にて LDU 入口絶対湿度が最も低い条件、最も高い条件、両者の中間となる条件において基礎試験機と比較した。また、外気変動に対する追従性を検証するため、2023 年 12 月 1 日～15 日において LDU 出口温湿度の時間変化を測定した。

表 1 基礎試験機およびフィールド試験機の試験条件

条件 No.	試験機	風量 [m^3/h]	LDU入口空気 絶対湿度[g/kg']
1	基礎	1,500	5.8
	フィールド	10,000	
2	基礎	1,500	7.4
	フィールド	10,000	
3	基礎	1,500	8.9
	フィールド	10,000	

表 2 各調湿剤の出口乾球温度，相対湿度，給水量の測定結果

No.	試験条件		出口空気 測定結果		給水量 [L/h]
	絶対湿度差 [g/kg']	液体調湿剤	乾球温度 [℃DB]	相対湿度 [%RH]	
			平均値±3σ	平均値±3σ	
1	12.5	LiCl aq.	29.0±0.4	59.9±1.0	9.1
		IL aq.	30.1±0.5	59.8±1.3	8.9
2	2.6	LiCl aq.	25.0±0.2	50.2±0.1	1.2
		IL aq.	25.0±0.2	50.2±0.1	1.0
3	0.9	LiCl aq.	25.0±0.3	50.4±0.3	0.07
		IL aq.	25.0±0.2	50.4±0.1	0.03

3. 基礎試験機による調湿剤の基本特性の検証結果

3.1 加湿制御性の検証

各加湿負荷における LiCl aq.および IL aq.の LDU 出口乾球温度、相対湿度、給水量を**表 2** に示す。**表 2** より、いずれの条件においても、LDU 出口乾球温度と相対湿度の平均値は調湿剤の種類によらずほぼ同じであり、LDU 出口温湿度の設定値と非常に近い値となった。加えて平均値に対する標準偏差 3σ はそれぞれ 0.5℃DB、1.5%RH 以下であることから、平均値で安定した温湿度を給気していることがわかる。また、給水量においても各調湿剤で非常に近い値となった。この結果から、LiCl aq.と IL aq.はともに高い制御安定性を示すことを確認した。

3.2 圧力損失の検証

各調湿剤の面風速と圧力損失の相関図を**図 5** に示す。**図 5** より、IL aq.の圧力損失は LiCl aq.と比べて大きく、送風機の軸動力に換算すると、面風速 1.5 m/s の場合、軸動力が 17%増加する結果となった。IL aq.の粘性係数は LiCl aq.より高く、LiCl aq.より気液接触部表面の液膜が厚くなる。これにより、気液接触部内の空気経路が狭くなるため、圧力損失が増加したと考えられる。この結果から、IL aq.を LDU に適用した場合、圧力損失による送風機動力の増加を考慮する必要があることがわかった。

3.3 飛散量の検証

面風速が 3.0 m/s における微粒子数を**表 3** に示す。試験を実施するに当たり、HEPA フィルターを LDU 上流側に設置しているため、入口側では微粒子がほとんど検出されない。これより出口側で観測された微粒子は LDU 由来であると言える。**表 3** の試験結果より、出口側では 5.0 μm 以上の飛散粒子は見られなかった。測定時間 1 min 間に検出された微粒子が全て LiCl aq.であると仮定して、単位空気体積に含まれる塩素イオンの質量を算出したところ 0.0029 μg/m^3 であり、ダクトへの飛散はごく少量であると言える。加えて、面風速 1.5～3.0 m/s にて約 18 ヶ月使用した基礎試験機の LDU 下流側のダクトを目視で観察したところ、腐食は見られなかった。一般的に鉄は水溶液中の溶存酸素と反応して酸化鉄の被膜を形成するが、疎な被膜のため腐食が進行する。この時、塩化リチウム（LiCl）水溶液が接触すると、塩化リチウム水溶液中の腐食促進成分である塩化物イオン（Cl^-）が、鉄イオンと容易に反応するため腐食が促進したと考えられる。一方、空調用ダクトで使用される亜鉛鉄板は、鉄の場合と違って、腐食進行は観察する限り認められない。これは、亜鉛鉄板表面は酸化亜鉛の被膜が形成されており、この被膜が腐食に対して保護被膜として働くためで、これらの要因が組み合わさることで、亜鉛鉄板に塩化リチウム水溶液が接触しても、腐食し難かったと考えられる。以上の結果から、LiCl aq.の飛散による腐食リスクは、少なくとも面風速 3.0 m/s までは極めて低いことが検証できた。一般的なリキッドデシカント空調システムの設計面風速は 1.5 m/s 程であるため、LDU は大幅な小型化が可能と言える。

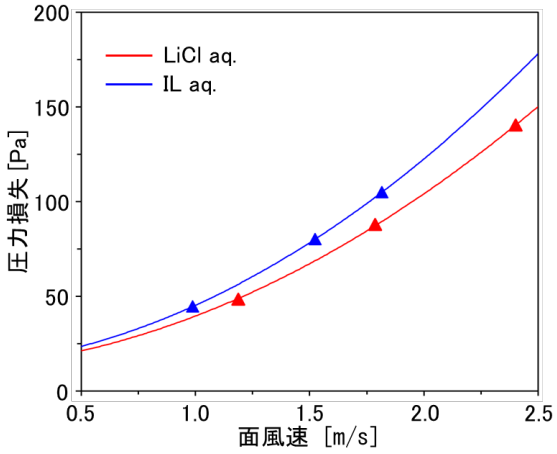


図 5 各調湿剤の面風速と圧力損失の相関図

表 3 LDU 入口出口の粒子数結果

粒径 [μm]	粒子数 平均値 [個]	
	LDU入口	LDU出口
0.3	1	17
0.5	0	6
1.0	0	2
3.0	0	1
5.0	0	0
10.0	0	0

4. フィールド試験機による加湿制御性の検証結果

3 章の結果を受けて、 フィールド試験機では LiCl aq.を採用し、面風速は 2.5 m/s (風量 10,000 m^3/h)とした。実建物における LDU の加湿性能を検証するため、基礎試験機とフィールド試験機の性能を比較し、装置規模が LDU の加湿性能に与える影響を評価した。加えて、外気の変動に対する追従性を確認した。

4.1 加湿制御性と給水量の検証

各条件における基礎試験機とフィールド試験機の LDU 出口乾球温度、相対湿度、単位風量当りの給水量を**表 4** に示す。また、LDU 入口出口空気の絶対湿度差と単位風量当りの給水量の相関図を**図 6** に示す。**表 4** より、LDU 出口温湿度の平均値は設定値とほぼ同じ値であり、標準偏差 3σ は 0.5℃DB、0.5%RH 以下であることから、設定値で安定した温湿度を給気していることがわかる。**図 6** より各試験機の給水量はほぼ同じ値であり、LDU 入口出口の絶対湿度差が大きいほど単位風量当りの給水量が増加することがわかる。この結果から、LDU は装置規模によらず給水量による LiCl aq.の濃度調整によって高精度な加湿制御が可能であることを確認した。

表 4 基礎試験機およびフィールド試験機の測定結果

No.	試験条件			出口空気 測定結果				入口出口 絶対湿度差 [g/kg']	給水量 [mL/m^3]
	入口空気 絶対湿度 [g/kg']	試験機	風量 [m^3/hr]	乾球温度[℃DB]		相対湿度[%RH]			
				平均値	標準偏差 (3σ)	平均値	標準偏差 (3σ)		
1	5.8	小型	1,500	25.0	0.2	50.1	0.2	4.12	3.32
		フィールド	10,000	24.8	0.2	50.0	0.4	4.09	3.26
2	7.4	小型	1,500	25.0	0.2	50.1	0.1	2.47	2.21
		フィールド	10,000	24.8	0.1	49.9	0.2	2.46	1.84
3	8.9	小型	1,500	25.0	0.3	50.4	0.2	0.98	0.82
		フィールド	10,000	24.8	0.2	49.9	0.2	0.87	0.80

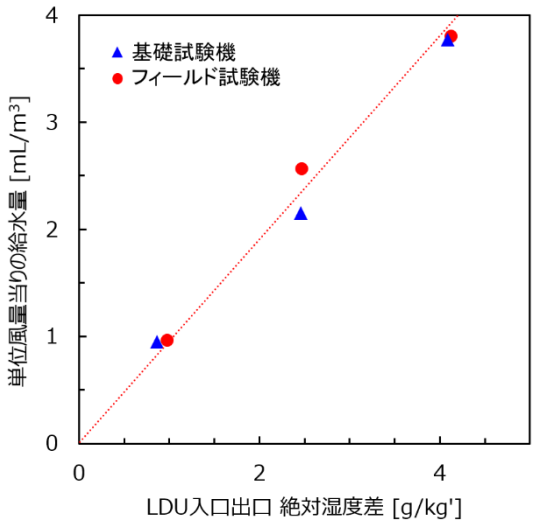


図 6 LDU 入口出口絶対湿度と単位風量当りの給水量の相関図

4.2 外気の変動に対する追従性

試験期間 2023 年 12 月 1 日～15 日における外気、LDU 入口空気、出口空気の乾球温度、相対湿度、絶対湿度の時間変化を**図 7** に示す。この時、外調機の回転型全熱交換器により外気は 2.5 g/kg'程加湿される。また、冷温水コイルにより LDU 入口乾球温度を調整することで、LDU 出口乾球温度を制御している。試験期間全体の LDU 出口乾球温度の平均値と標準偏差 3σ は 24.8±0.3℃DB、相対湿度は 50.0±0.4%RH であった。**図 7** より、LDU 入口空気の変動によらず LDU 出口空気の温湿度は設定値で安定していることがわかる。この結果から、LDU では乾球温度と相対湿度を個別に制御することが可能であり、高い追従性を有することを確認した。

以上の結果から、LDU は実建物規模の風量においても基礎試験機と同様に高い制御安定性を示すことを確認した。また、試験期間終了後、LDU 下流側ダクトを目視で観察したところ、LiCl aq.の飛散による腐食は見られなかった。

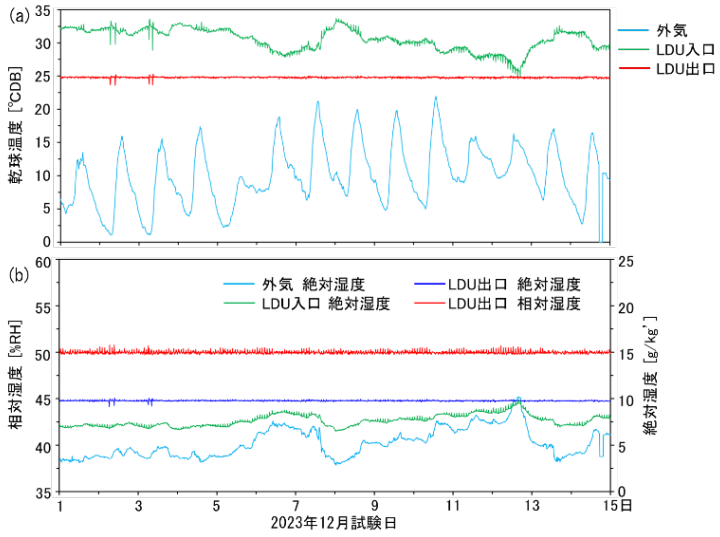


図 7 外気およびフィールド試験機 入口・出口空気の
(a)乾球温度と(b)相対湿度・絶対湿度の時間変化

4. おわりに

本報では、LDU におけるイオン液体水溶液(IL aq.)および塩化リチウム水溶液(LiCl aq.)の加湿制御性と圧力損失の比較検証を行った。また LDU の実建物への導入を想定し、定格風量 10,000 m^3/h のフィールド試験機にて加湿制御性を検証し、得られた結論を下記に示す。

・IL aq.の加湿制御性を LiCl aq.と比較した結果、LDU 出口温湿度の平均値は設定値とほぼ同じであり、標準偏差 3σ は 0.5℃DB、1.5%RH 以下であった。そのため IL aq.は LiCl aq.と同程度の制御安定性を示すことを確認した。
・IL aq.の圧力損失は LiCl aq.より大きく、面風速 1.5 m/s の場合、軸動力が 17%増加する。これは IL aq.の高い粘性によるものと考えられる。
・面風速 3.0 m/s において LiCl aq.の飛散量は 1min 間当り 0.0029 $\mu g/m^3$ であり、目視観察においてもダクトの腐食は見られなかった。この結果から、LDU は面風速 3.0 m/s までは飛散による腐食リスクが極めて低いことを確認し、一般的なリキッドデシカント空調システムからの小型化が可能である。
・LiCl aq.を採用し面風速 2.5 m/s にてフィールド試験機の加湿制御性を検証した。各加湿負荷において LDU 出口温湿度の平均値は設定値とほぼ同じ値となり、標準偏差 3σ は 0.5 以下であった。
・2023 年 12 月 1 日～15 日において、LDU 出口温湿度の時間変化を測定したところ、LDU 入口空気の変動によらず乾球温度は 24.8±0.3℃DB、相対湿度は 50.0±0.4%RH であった。

以上の結果から、LDU は実建物においても高い制御安定性と追従性を示すことを確認した。また市場展開をする上で、LiCl aq.飛散による金属腐食への安全性は極めて重要な課題であり、本検証にて実用上問題ないことを検証した。

文　献

1) 澁澤朱音, 馬場大輔, 川上理亮, 谷野正幸, 三宅友香, 前田彩子, 原田政利 : フィールド試験におけるリキッドデシカントユニットの加湿性能の検証, “イノベーションセンター報”, 37, 88-97(2023).
2) 間宮啓介, 田中英, 有村哲郎 : 制御性の高い滴下浸透気化式加湿方式に関する研究（第 2 報）二段加湿時の制御性の検証, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, 7, 161-164(2020).
3) 七尾龍一, 原田政利, 丹羽英治, 河野匡志 : 液式デシカント空調システムの高度化と適用性向上に向けた研究 液式デシカント空調機の概要と加湿時のエネルギー性能評価, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, 3, 193-196(2020).
4) 山田一樹, 原田政利, 丹羽英治, 河野匡志, 豊村幸毅, 七尾龍一 : 液式デシカント空調システムの高度化と適用性向上に向けた研究 (第 2 報)液式デシカント空調機の年間エネルギー性能評価, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, C-61(2021).
5) 澁澤朱音, 前田彩子, 三宅友香, 馬場大輔, 谷野正幸, 川上理亮, 原田政利 : リキッドデシカントユニットの基礎試験とフィールド試験による加湿性能の検証, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, A-46(2024).
6) 澁澤朱音, 馬場大輔, 川上理亮, 谷野正幸, 三宅友香, 原田政利 : リキッドデシカントユニットにおける加湿性能の基礎特性の把握, 高砂熱学イノベーションセンター報, 36(2022).
7) 澁澤朱音, 馬場大輔, 川上理亮, 谷野正幸, 三宅友香, 原田政利 : リキッドデシカントユニットにおける加湿性能の検証, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, J-72(2023).
8) M. R. Conde: Aqueous solutions of lithium and calcium chlorides－Property formulations for use in air conditioning equipment design, Int. J. Thermal Sciences, 43(367), (2004).
9) 山田治夫 : 液体吸収剤による除湿について, 化学工学, 22(8), 38-45(1958).

10) A. Ahlawat, A. Wiedensohler, S. K. Mishra: An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of
11) SARS-CoV-2 in Indoor Environments, Aerosol and Air Quality Research, 20, 1856-1861(2020).
12) L. Duo, Z. Yang, L. Zhang, S. Wang, T. Bai, Y. Xiang, E. Long: Systematic review of the effects of environmental factors on virus inactivation: implications for coronavirus disease 2019, International Journal of Environmental Science and Technology, 18, 2865-2878(2021).
13) 柚本玲, 田中辰明：デシカント空調機による浮遊真菌除去効果, “第 24 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”, 78-19(2006).
14) 田村一, 安井文男：気化式加湿方式を用いた空調機における微生物汚染の調査結果, 空気清浄, 50(5), 11-17(2013).
15) 武田尚吾, 古賀修, 熊田瑶子, 丹羽英治, 高橋直樹, 進藤宏行：次世代都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価研究（第 4 報）加湿方式によるエネルギー評価性能, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, 8, 345-348(2014).
16) 山中俊夫：自然換気と感染リスク評価, “空気調和・衛生工学”, 95(8), 11-17(2021).
17) ウェットマスター株式会社 HP：https://www.wetmaster.co.jp/product/vapor/vhr/.
18) S. Yamaguchi, J. Jeong, K. Saito, H. Miyauchi, M. Harada: Hybrid liquid desiccant air-conditioning system; Experiments and simulations, Applied Thermal Engineering, 31, 3741-3747(2011).
19) H. Fu, X. Liu: Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality, Building and Environment, 116, 158-172(2017).
20) A. giampieri, Z. Ma, A. Smallbone, A. P. Roskilly: Thermodynamics and economics of liquid desiccants heating, ventilation and air-conditioning－An overview, Applied Energy, 220, 455-479(2018).
21) X. Chen, S. Riffat, H. Bai, X. Zheng, D. Reay: Recent progress in liquid desiccant dehumidification and air-conditioning: A review, Energy and Built Environment, 1, 106-130(2020).
22) 安田直史, 山口誠一, 齋藤潔, 宮内彦夫, 原田政利：リキッドデシカントの除加湿メディアにおける熱物質移動特性に関する研究, “日本冷凍空調学会年次大会講演論文集”, 331-334(2011).
23) 山口誠一, 齋藤潔, 宮内彦夫, 原田政利：リキッドデシカント空調システム用除湿器の熱・物質移動特性の究明―第 1 報：実験による検討―, “日本冷凍空調学会論文集”, 29(1), 229-236(2012).
24) 山口誠一, 木村健, 大野慶祐, 齋藤潔, 原田政利, 宮内彦夫：リキッドデシカント空調システム用再生器の熱・物質移動特性, “日本冷凍空調学会論文集”, 31(4), 375-382(2014).
25) 山口誠一, 齋藤潔, 中山浩, 王新明：イオン液体を用いたリキッドデシカント空調システムのためのフィンチューブ型気液接触器の熱・物質移動特性, “日本冷凍空調学会論文集”, 36(3), 129(2019).
26) 小西雄大, 外山裕貴, 山口誠一：熱駆動型リキッドデシカント空調システムの除湿期間における性能評価, “環境工学総合シンポジウム講演論文集”, 31, 411(2021).
27) 山田一樹, 市橋弘茂, 原田政利, 丹羽英治, 河野匡志, 豊村幸毅：液式デシカント空調システムの高度化と適用性向上に向けた研究　(第 3 報)コージェネレーションの排熱を利用した液式デシカントのエネルギー性能評価, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, A-27(2022).
28) 山田一樹, 原田政利, 市橋弘茂, 丹羽英治, 河野匡志：液式デシカント空調システムの高度化と適用性向上に向けた研究　(第 4 報)住宅向け小型機の開発とエネルギー性能, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, J-6(2023).

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a new humidification system that contributes to decarbonization. By extracting the gas-liquid contact part from the conventional liquid desiccant air conditioning system, we developed a compact and simplified liquid desiccant unit (LDU). In a previous report, we evaluated the humidification performance using a lithium chloride aqueous solution as the desiccant. In this report, we compared and evaluated the basic properties of ionic liquid aqueous solutions in addition to lithium chloride aqueous solutions. Ionic liquid aqueous solutions have the advantage of being less corrosive to metals, thus reducing the risk of corrosion to surrounding materials in the event of a leak, although they have high viscosity. We measured and evaluated the humidification control and pressure loss when applied to the test apparatus. Additionally, we quantified the amount of dispersing lithium chloride aqueous solution as a consideration for designing face velocity. Based on these fundamental tests, we verified the humidification performance in a field test assuming the introduction of the LDU into an actual building.

【技術論文】

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
成瀬一郎[*1]・堀田幹則[*2]・長沼宏[*3]
折田久幸[*4]・小山寿恵[*5]・染矢聡[*5]
小林佳弘[*5]・幡野博之[*6]・村瀬和典[*6]
三苫好治[*6]・熊野寛之[*7]・森本崇志[*7]

Advanced Effective Utilization of Waste Plastic Energy

Masayuki Tanino・Masao Masuda・Haruyuki Kamata
Ichiro Naruse[*1]・Mikinori Hotta[*2]・Hiroshi Naganuma[*3]
Hisayuki Orita[*4]・Toshie Koyama[*5]・Satoshi Someya[*5]
Yoshihiro Kobayashi[*5]・Hiroyuki Hatano[*6]・Kazuo Murase[*6]
Yoshiharu Mitoma[*6]・Hiroyuki Kumano[*7]・Takashi Morimoto[*7]

2020 年度から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、我々はエネルギーリカバリーチーム（ER チーム）に参画してきた。そこでは、高効率な排熱回収のための伝熱管表面改質技術と低温排熱の有効活用のための冷熱利用技術の基盤技術を開発してきた。また、熱回収から氷スラリー利用先までの総合熱利用システムの評価技術を開発し、評価技術の検証とともに、基盤技術の実用化と社会実装のために、様々な地域での事例研究を行ってきた。本報では伝熱管表面改質技術の概要を説明した上で、低温排熱の冷熱利用技術と評価技術を中心にして、本年度までの ER チームでの技術開発の概要を紹介する。

1. はじめに

近年、陸域から流出した廃プラスチックなどが原因となる海洋プラスチックごみが、大きな社会問題となっている。また、中国の廃プラスチック輸入規制に端を発した、アジア諸国の廃プラスチック輸入規制の強化によって、国内での廃プラスチックの滞留が起こり、日本から輸出していた廃プラスチックを含むプラスチック資源について、リサイクルなどの適正な処理が急務となっている。これらを受けて、2019 年 5 月 31 日にはプラスチック資源循環戦略が策定され、革新的リサイクル技術の開発が我が国の重点戦略の一つとして掲げられた。そこでは、2035 年までに全ての使用済プラスチックをリユースまたはリサイクルすること、それが技術的・経済的な観点から難しい場合には熱回収を含めて 100%有効利用を実現することが目標とされている。

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）は、2020 年度から「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」のプロジェクトを開始した[1)]。本報では伝熱管表面改質技術の概要を説明した上で、低温排熱の冷熱利用技術と総合熱利用システムの評価技術を中心にして、NEDO プロジェクトとして取り組んできたエネルギーリカバリー技術の概要について紹介する。

※ 本論文は、日本エネルギー学会･第 61 回石炭科学会議[24)]、令和 6 年度 空気調和･衛生工学会大会[52)] 、第 41 回エネルギーシステム･経済･環境コンファレンス[75)]の講演論文を加筆修正したものである。
*1 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学、*2 国立研究開発法人産業技術総合研究所、*3 東北発電工業株式会社、
*4 学校法人八戸工業大学、*5 学校法人東京電機大学、*6 学校法人中央大学、*7 学校法人青山学院大学

2. NEDO 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」の概要

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、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」[1]において、社会で大量に発生している廃プラスチックに対して、高度選別技術や新しい材料再生技術などを用いることにより、環境負荷を抑制しつつ、高効率なプラスチック資源循環システムを実現するための基盤技術を開発している。**図 1** のように廃プラスチックの資源価値を飛躍的に高めるため、①複合センシング・AI 等を用いた廃プラスチック高度選別技術（SR: Sorting for Recycling）、②材料再生プロセスの高度化技術（マテリアルリサイクル MR: Material Recycle）、③高い資源化率を実現する石油化学原料化技術（ケミカルリサイクル CR: Chemical Recycle）、④高効率エネルギー回収・利用技術（エネルギーリカバリーER: Energy Recovery）の開発を連携させて行い、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の両立を目指している。その結果、図のように廃プラスチックの輸出と単純焼却・埋め立ては行わない。

我々は、エネルギーリカバリーの開発チームに参画している。図中の各種リサイクルの後に、最終的に廃棄・焼却される廃プラスチックに含まれるエネルギーを回収するエネルギーリカバリープロセスにおいて、高効率な排熱回収のために、伝熱管の表面改質技術を開発している。廃プラスチックの焼却処理時の塩素、硫黄や低融点灰を含む厳しい環境・条件下での伝熱管への灰付着量と耐食性向上を図り、エネルギーリカバリー施設の蒸気温度の高温化、発電効率の向上、および稼働率向上につなげる。加えて、低温排熱の有効利用を目的にして、回収した熱を付加価値の高い冷熱として利用するために、吸着剤蓄熱、低温排熱で 0℃以下の冷熱を発生する吸収冷凍機、および氷スラリー利用に関する技術の高度化を行っている。さらに、熱回収から氷スラリー利用先までの総合熱利用システムを対象にして、熱発生側と熱需要側の条件が合致しているか否かなどの熱マネジメントを行うために、総合評価技術を開発している。

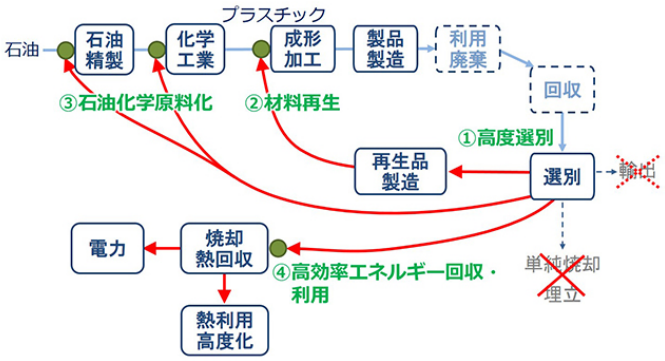


図 1　NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」の概要 [1]

3. 高効率な排熱回収のための伝熱管表面改質技術の概要

マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの開発を進める一方で、高い汚染度など、再生処理が困難な廃プラスチックに対しては、前述の**図 1** のように、エネルギー回収による手法が有効である。そこで、焼却時に発生する熱を回収して発電や熱利用をするような、小規模・分散型の電源としての重要性が見直されている。しかし、廃プラスチックの焼却時には塩素や硫黄を含むガスや低融点の灰が発生することがあり、ボイラなどの伝熱管表面に灰が付着して、伝熱管の高温腐食が問題になることが多い。とくに、他の再資源化技術の普及に伴い、エネルギー回収に投入される廃プラスチックの集合体は他のプロセスで忌避物質とされる物質が濃縮していることが想定できる。このような灰付着・高温腐食機構は多種多様かつ複雑であり、一般的な産業廃棄物処理施設や一般廃棄物処理施設では、安定かつ効率的な運転を維持するために一定期間プラントを運転した後、プラントを停止させて清掃作業を行っており、比較的低い稼働率とな

っているのが現状である。また、灰付着や高温腐食を抑制するために蒸気温度を低くせざるを得ない状況で、発電効率も比較的低く抑えられている。ここでは、その課題解決を念頭におきつつ、エネルギー効率向上に対して高温の排熱を回収し有効利用するための技術開発に取り組んでいる。

廃プラスチックに含まれる忌避物質等が濃縮した状態での燃焼を想定すると、焼却炉内での熱交換器の腐食と灰付着の対処等の耐久性の向上が重要となる。そこで、本開発では伝熱管表面に新規材料を用いて改質する技術開発に取り組んでおり、高濃度な HCl、SO_2 を含む高温ガスによる化学腐食と焼却灰付着を抑制可能な耐久性のある材料開発を実施している。**図 2** に示すように、溶射などのコーティング技術を用いて伝熱管表面に金属やセラミックなどの薄膜を形成して表面の改質を図り、プラント運転中の灰付着と腐食の進行を抑制することでプラントの運転期間を延伸化して、稼働率向上につなげることを目標としている。金属系とセラミック系の候補材料に対し、溶融灰との濡れ性もしくは腐食減量測定をラボスケールで評価するとともに熱力学平衡論を用いた理論解析を行うことで、実験と理論の両面から材料選定を進めており、表面改質技術の開発とともに模擬ガスを用いた適用可能性の検証を進めてきた [2-24]。

このような研究の成果を受けて、廃プラスチック焼却時の熱回収を安定かつ効率的に行うために、灰付着と高温腐食を低減しうる伝熱管表面改質技術の社会実装を目指している。

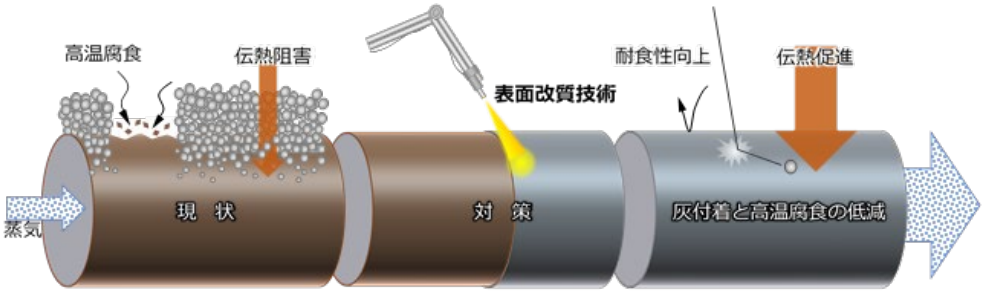


図 2 高効率排熱回収のための伝熱管表面改質技術の開発概要

本研究では、廃プラスチックを含む廃棄物由来の燃料を用いる焼却炉やボイラにおいて、高温および高圧な蒸気条件の実用化に向けて、熱力学平衡計算による溶融塩生成割合を理論計算して評価するとともに、各試料の高温接触角測定実験の実施ならびに電気加熱式ドロップチューブ炉による高温場での灰付着試験をそれぞれ実施した。

以上のような研究結果を受けて、建築廃材等の木質廃材から水素を生成する反応炉からの排ガスダクトにおいて、開発材料の耐食性と灰付着低減効果の実機検証試験を行った。試験片を設置する排ガスダクト内のガス分析を行ったのち実験を開始した。定常ガス温度は約 830℃（詳細は後述の**図 3** 参照）で、この試験片位置の後には排熱ボイラが設置されており、そのボイラ伝熱管の温度を考慮して、試験片温度を設定した（空冷）。試験片は φ27.2 - L145 mm で、開発した Ni-Cr-Mo 表面改質材（２本）と比較材として SUS310S（２本）をダクト内に設置し約 2 週間曝露した。試験片内部にコンプレッサーエアを通気し、試験片曝露中は常時試験片およびガス温度を測定した。熱抵抗となる灰付着層の成長によって試験片温度が変化することから、熱平衡計算を行い、試験片毎の付着量変化を評価した [24]。

各試験片・排ガスの温度測定結果、ならびに開発材 NiCrMo と SUS310S の試験片温度差を**図 3** 左に示す。なお、各試験片の温度は表面（排ガス前方よどみ点）から 1.8 mm 下で、排ガス温度は試験片から約 100 mm 離れた位置で測定した。図のように、プラント運転直後においては試験片温度差は小さいが、時間の経過と付着層の成長とともに温度差が大きくなっており、運転開始後 5,000min 以降では SUS310S の温度が開発材 NiCrMo よりも 10℃程度低くなっていることが分かる。これは SUS310S 上の灰付着層が開発材に比べて厚くなっており、その断熱効果の増大に伴った温度変化と考えられる。そこで、その付着層厚さの差を推定するために、非定常熱伝導方程式を用いて試験片表面温度を計算した。その結果を**図 3** 右に示す。本図より、SUS310S 温度の計測値とそれに ΔT（10℃）を足した開発材温度における灰付着層厚さを推

定すると（排ガス温度 830℃）、それぞれ約 5.5 mm（SUS310S）、約 2.2 mm（開発材）となる。なお、試験後、直ちに各試験片における付着層の差を目視で観察・比較したが、SUS310S において後述する腐食反応スケールが母材からプラント停止・冷却中に剥離し、付着層を確認することができなかった。

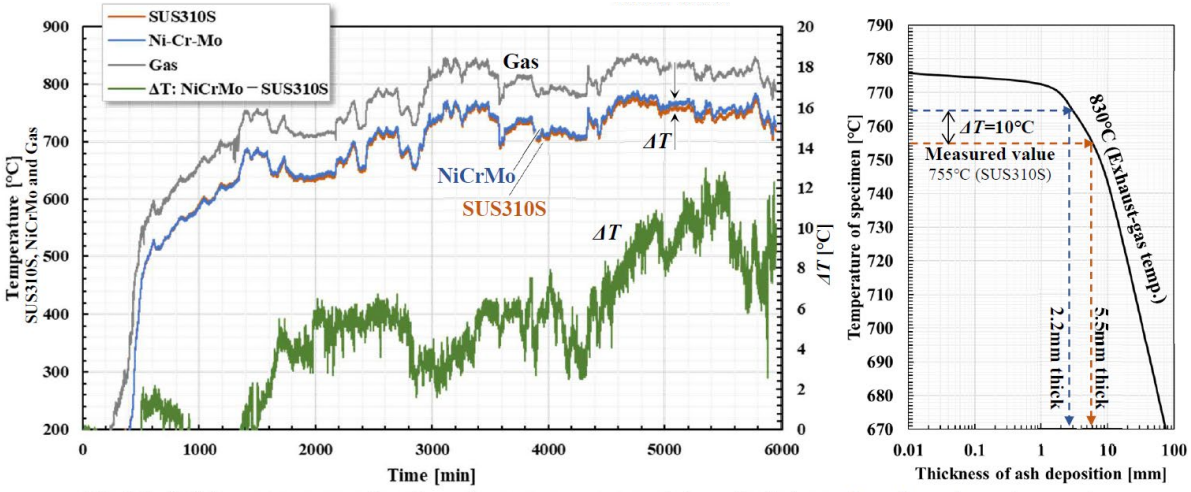


図 3 各試験片と排ガスの測定温度の試料温度の計算値 [24)]

プラント停止後、試験片を取り出し、樹脂固化した後にラボベースで切断、研磨し、分析を行った。その分析結果を**図 4** に示す。まず SUS310S においては、全面で腐食反応スケールが成長しており、大部分が母材から剥離していた。そのスケール厚さは 300～400 μm であり、付着層と強固に付着していた。付着層には Na、K および S が濃縮しており、アルカリ硫酸塩を主体とした溶融塩による腐食反応に影響しているものと考えられ、その点については別途、熱力学平衡計算（FactSage ver.8.1）でも確認した。熱力学平衡計算の結果では、炭酸塩も含まれていた。一方、開発材では腐食反応は軽微であり、スケール厚さは 35～95 μm であった。付着層も反応層による明瞭な固着は少なく、開発材の高い耐食性が示された [24)]。

なお、伝熱管表面改質技術における材料開発・評価等の研究内容の詳細については、参考文献 [2-24)]を参照されたい。

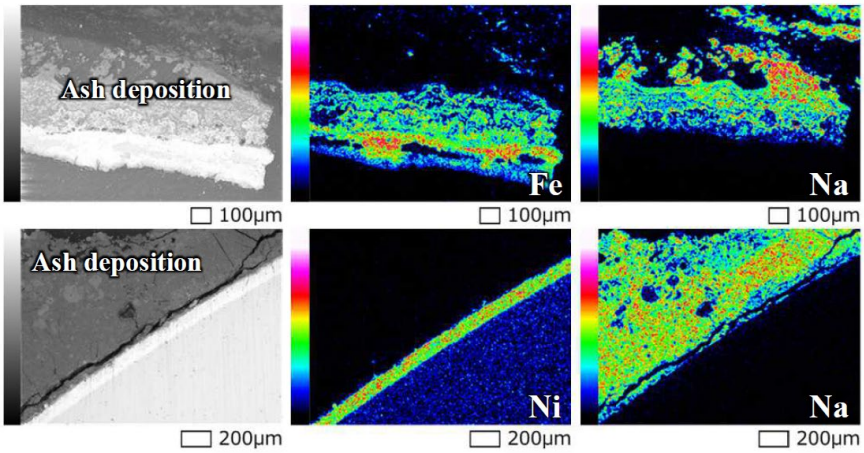


図 4 SUS310S（上段）と NiCrMo（下段）の断面の走査電子顕微鏡画像（左側）とマッピング分析（右側） [24)]

4. 低温排熱の有効活用のための冷熱利用技術

廃プラスチックエネルギーの有効利用には、前述の**図 1** のように、まずは発電して電力利用するとともに、熱利用を高度化して、排熱需要を拡大することが重要である。そこで、温熱需要に加えて、**図 5** のように物流業界などの冷熱需要の拡大のため、200℃以下の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た。図のように、0℃以下の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、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。熱発生施設と熱需要施設が近距離にある場合は、直接、氷スラリーを供給するネットワークを容易に構築できるが、廃棄物処理施設を熱発生施設と想定した場合は両者が離れていることが多く、吸着剤蓄熱などのオフライン熱輸送システム [25-30]が必要になる。この吸着剤蓄熱システムを高効率化するために、吸着剤の流動層乾燥などの研究を行っている。この研究内容の詳細については、参考文献 [31-40]を参照されたい。

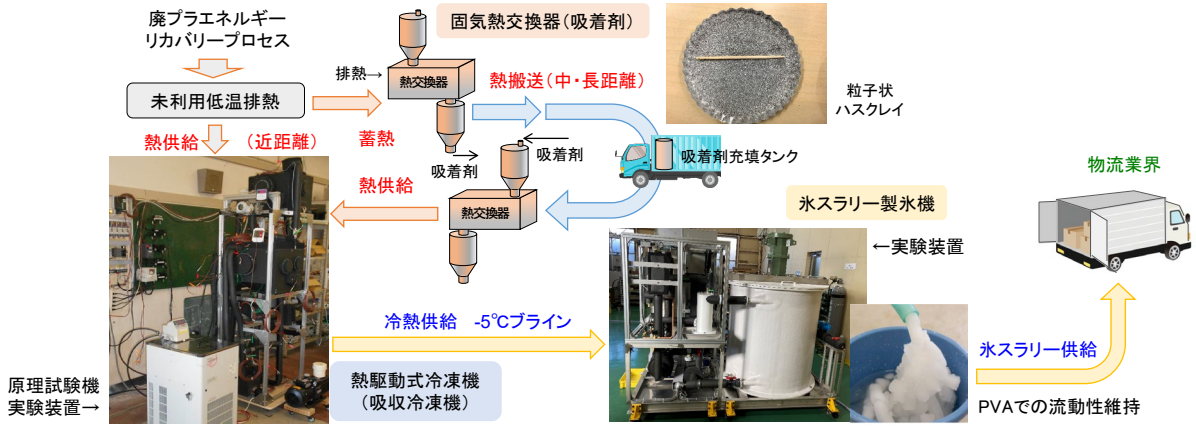


図 5 排熱の冷熱利用のための技術開発の概要図

4.1 氷点下冷熱の吸収冷凍機の開発

図 6 に示すように、氷点下冷熱製造の低温排熱駆動式冷凍機は、2 元吸収冷凍サイクルの構成で開発することにした。1 元目の高温側冷凍機は H_2O を冷媒とした従来型の吸収冷凍機であり、LiBr-H_2O を作動液体として、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 H_2O/1-Propanol を冷媒とし、LiBr-H_2O/1-Propanol を作動液として、氷点下冷熱を製造する。

開発対象の低温側吸収冷凍機は、**図 6** のように低圧に保たれた蒸発器でブラインが流れる管上に冷媒を流して蒸発させ、蒸発潜熱でブラインを冷却する。蒸発した冷媒は吸収器の作動液に吸収され圧力を保つ。蒸発器の圧力は冷媒の気液平衡関係で、吸収器の圧力は気相が冷媒、液相が作動液とする気液平衡関係で決まる。冷媒を吸収（凝縮）した作動液は稀釈熱によって温度が上昇するために冷却が必要であり、1 元目の高温側冷凍機では冷却塔からの冷却水で冷却するが、結晶化を防止するために、1 段目の高温側冷凍機が製造した 7℃程度の冷水で冷却する。冷媒を吸収して薄くなった作動液はポンプで再生器に送られ、排熱源からの熱で濃縮されて再び吸収器に戻る。再生器で蒸発した冷媒は凝縮器で凝縮し、蒸発器に流入して「蒸発、吸収・再生、凝縮」の冷凍サイクルを形成する。

これまでに作動液や冷媒の種々の物性値を解明して、本吸収冷凍機内の冷媒および作動液の循環挙動の検討を行ってきた [41-50]。種々の冷媒の凝固点温度を検討し、ここでの冷媒である H_2O/1-Propanol の H_2O モル分率を 0.9 以下にすることで、-10℃以下の蒸発温度での設計ができることを確認した。作動液の結晶化温度により、吸収器の最低温度を決定した。また、冷凍能力 1 kW 級の低温側吸収冷凍機の原理試験機を製作し、氷点下冷熱の製造を実験的に確認した。実験装置の概観は、前述の**図 5** 中の左側の写真を参

照されたい。なお、この原理試験機の再生器の模擬熱源には電気ヒータを用いた。

この 1 kW 級の原理試験機での成果を受けて、**図 7** のような 3～4 kW 級の氷点下吸収冷凍機を試作して、氷スラリー製氷機と接続した排熱駆動型氷スラリー製氷機（熱リサイクルパッケージ）での製氷試験を実施した [47]。

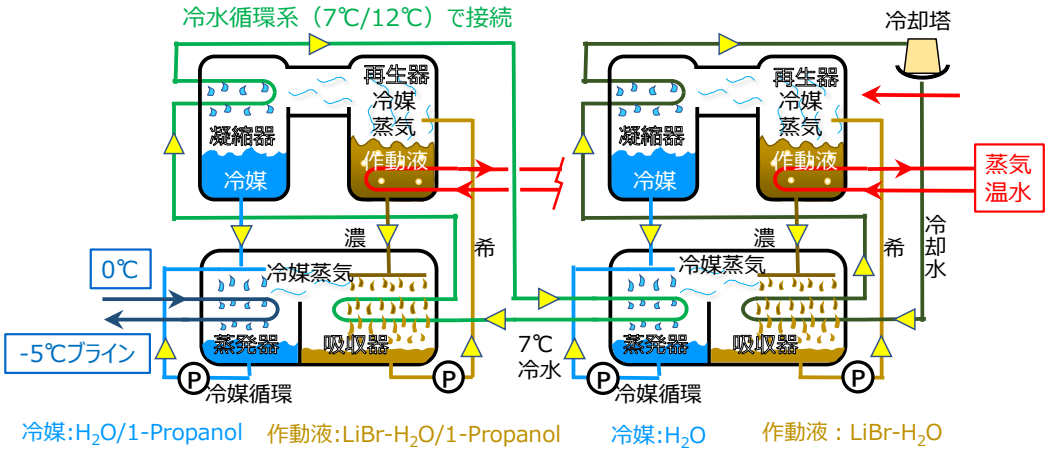


図 6 開発中の氷点下冷熱を発生する 2 元吸収冷凍機の模式図

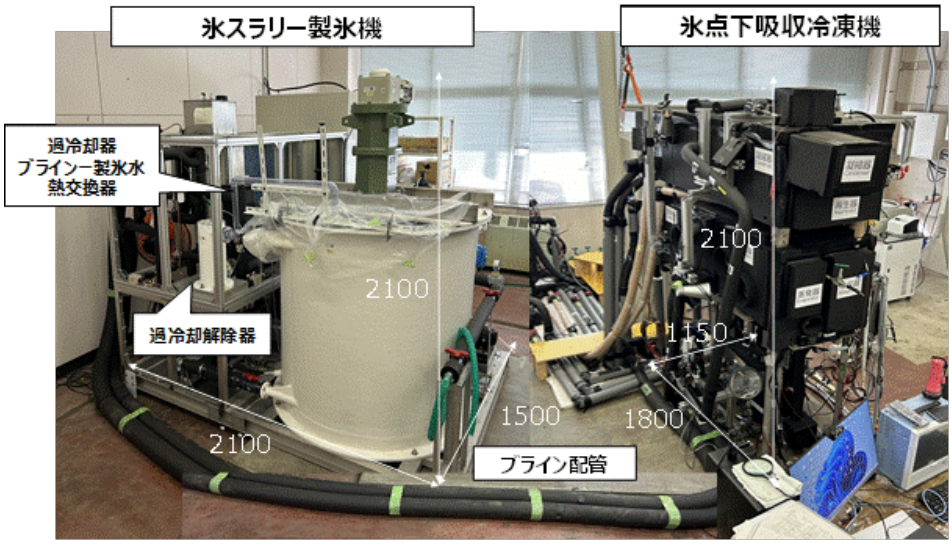


図 7 排熱駆動型氷スラリー製氷機（熱リサイクルパッケージ）の試験装置の外観

4.2 排熱駆動型氷スラリー製氷機（熱リサイクルパッケージ）の開発

排熱駆動型氷スラリー製氷機（熱リサイクルパッケージ）の製品化開発を目的に、主に氷点下吸収冷凍機と氷スラリー製氷機で構成される試験装置を製作して、約 8 時間の製氷試験を実施した [51-54]。

4.2.1 試験装置と方法

熱リサイクルパッケージの試験装置の構成機器を**表 1** に示す。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。開発対象ではない 1 元目の冷凍機には汎用の電動式冷凍機、加熱器に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 [55-60]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 8** のように、ブライン配管で接続されている。吸収冷凍機は主に凝縮器/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主に貯氷タンク、予熱器、過冷却器、過冷却解除器で構成されている。製氷水は 0.75wt% NaCl の低濃度塩水に、0.05 wt%のポリビニルアルコール（PVA）を添加したものである。本研究では不凍たんぱく質の水の凍結抑制効果の研究成果に基づき、PVA によって氷粒子の粗大化や凝集を抑制する技術の開発に取り組んでいる。氷粒子の粗大化抑制効果や氷スラリーの流動特性などについては、参考文献 [61-70]を参照されたい。

なお、氷点下吸収冷凍機と氷スラリー製氷機は単独運転を実施して、正常運転を確認済である。

表1　排熱駆動型氷スラリー製氷機（熱リサイクルパッケージ）の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/水冷冷凍機、冷凍能力：15　k W	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 k W	開発対象、設計冷凍能力：3～4 k W
3	加熱器	汎用/灯油炊き給湯器、出力：13.6 kW	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	過冷却方式の氷スラリー製造装置	製氷水は塩水（PVA 添加）

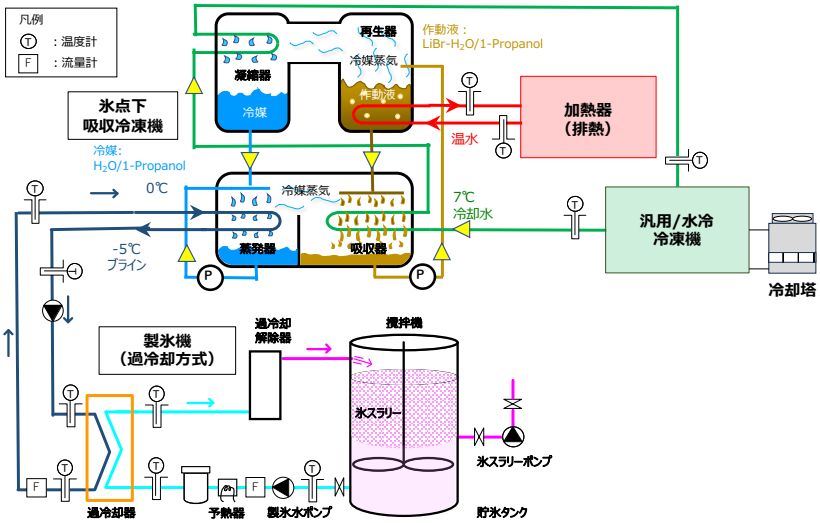


図 8 排熱駆動型氷スラリー製氷機（熱リサイクルパッケージ）の試験装置の系統図

4.2.2 試験結果と考察

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、製氷機の全ての機器を運転した後、時間の経過とともに系内の水温が低下して、過冷却器で過冷却状態まで冷却され、過冷却解除器で氷スラリーが製造された。この製氷開始から約 8 時間にわたって蓄氷運転を実施した。

試験結果の 1 例として**図 9** に、温水温度、冷却水温度、冷凍能力の経時変化を示す。図のように装置起動から約 0.5 時間後には、排熱を模擬した加熱器からは約 65℃の温水が、また 1 元目の冷凍機からは約 7℃の冷却水が吸収冷凍機に安定供給された。

図 10 には、製氷機でのブライン温度、氷スラリー中の氷の割合（製氷 Ice Packing Factor）、貯氷タンク内の氷の割合（貯氷 IPF）の経時変化を示す。図のように装置起動から約 0.5 時間後には、ブライン温度が低

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、図のように製氷 IPF が 3.5%での約 8 時間の連続製氷を確認した。この連続製氷運転での冷凍能力は**図 9** のように、約 3.2 kW であった。この冷凍能力や製氷 IPF は、吸収冷凍機から製氷機の過冷却器に送られるブラインの温度と流量から算出した。このような連続製氷運転の間、貯氷タンク内に氷スラリーが蓄積され続け、**図 10** に示すように約 8 時間後の貯氷 IPF は 38wt%に到達した。

また、前述の**図 8** のような貯氷タンク内の攪拌により、氷スラリーの流動性は維持されていることを観測した。連続製氷試験・蓄氷運転の終了の後、前述の**図 8** 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可能であり、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。

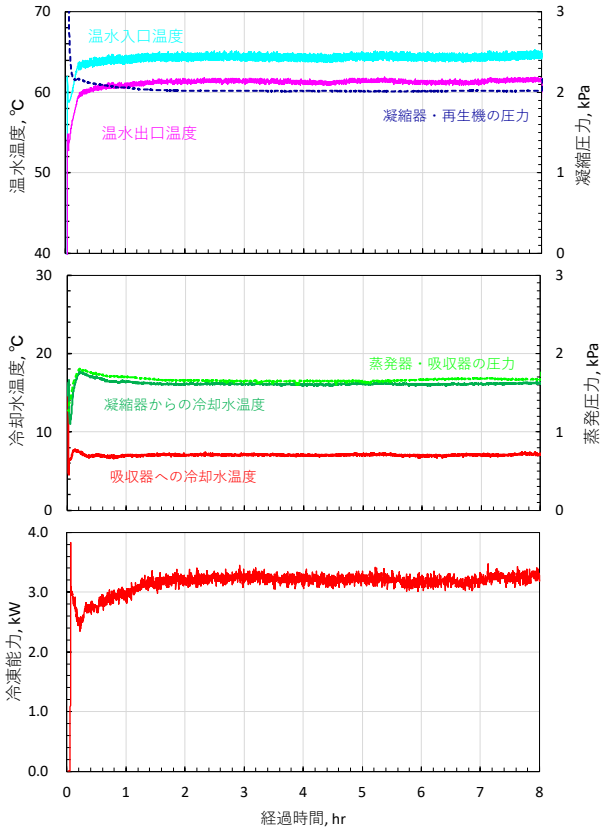


図 9 温水温度、冷却水温度、冷凍能力の経時変化

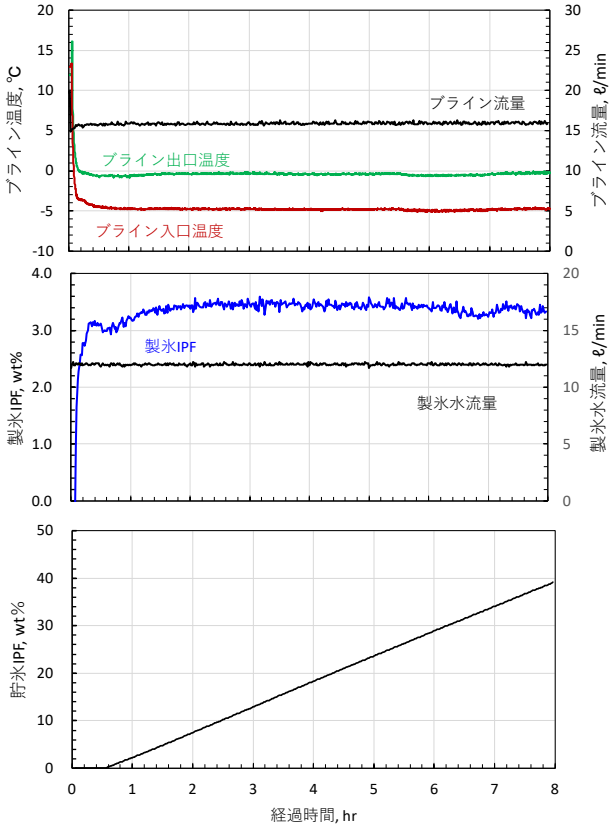


図 10 ブライン温度、製氷 IPF、貯氷 IPF の経時変化

5. 総合熱利用システムの評価技術

本研究では、排熱発生側の熱条件（温度、熱量など）と熱需要側の熱条件とが合致しているか否かなどの、熱マネジメントを行うために、冷熱利用システムの総合評価技術の開発を行ってきた [71-77]。

5.1 冷熱利用システムの評価モデルの概要 [71,72]

冷熱利用システムの評価モデルの概要を**図 11** に示す。図のように、評価モデルは 1)～8)の検討項目と Sub①～④のサブツールで構成した。1) 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、Sub①の一日間トラック輸送モデルによって輸送時間を計算する。4) 大型トラックの仮定を組合せ条件として、Sub②の

吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールによる計算を行う。これらの繰返し計算によって、吸着剤の充填量などの蓄熱槽の仕様が決定される。5) 熱駆動式冷凍機の設定として、熱駆動式冷凍機を含め、氷スラリーなどの熱媒体の種類や機器仕様・効率などを定めて、6) 廃プラ焼却施設・冷熱需要先の熱交換器・装置の仕様を決定し、Sub③のイニシャルコスト試算ツールを用いてコスト算出する。最後に、Sub②吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールを用いて、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、Sub④の運転シミュレーション評価ツールによって年間エネルギー消費量・運転費、CO_2削減量、費用対効果などを算出して 8) システム評価を行う。

図 11 中の下部は、エクセルベースのサブツールである。Sub①の一日間トラック輸送ツールでは、焼却場と配送センターの住所を入力して、それぞれの間の移動時間を Google Maps API より取得する。エクセル上において、Google Maps API[78]によって取得した移動時間とともに、蓄熱時間、接続時間、放熱時間を設定することで、図のようにトラック輸送のタイムスケジュール表が作成できる。初期値としては、各焼却場から最短時間の配送センターの間でのトラック輸送のタイムスケジュールが表示される。

Sub②の吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツール [25-30]では、蓄熱槽の形状やサイズを設定し、蓄熱・放熱運転における蓄熱槽の入口空気温湿度と流量の時間変化を入力して、出口空気の温湿度の時間変化を計算する。

Sub③のイニシャルコスト試算ツールでは、重量、風量、面積、排熱量、冷熱量あたりのモジュール値の単価より各々のコストを算出し、図中に示す表のように積算してイニシャルコストの概算値を算出する。このモジュール値自体が重量、風量、面積、熱量の関数であり、イニシャルコストのスケール効果が加味されている。

Sub④の運転シミュレーション評価ツールでは、運転条件や供給熱量などから、投資回収年数（費用対効果）や年間 COP の算出ができ、年間エネルギー消費量や CO_2 削減量を算出する。

以上のような評価ツールの完成度を高めることを主目的にして、首都圏ほかの大都市エリア、八戸湾岸などの中核都市エリア、地方エリアを対象に、評価モデルを適用し検討してきた。以下では、具体的な評価事例として、主に大都市エリアや地方エリア等の評価事例を紹介する。

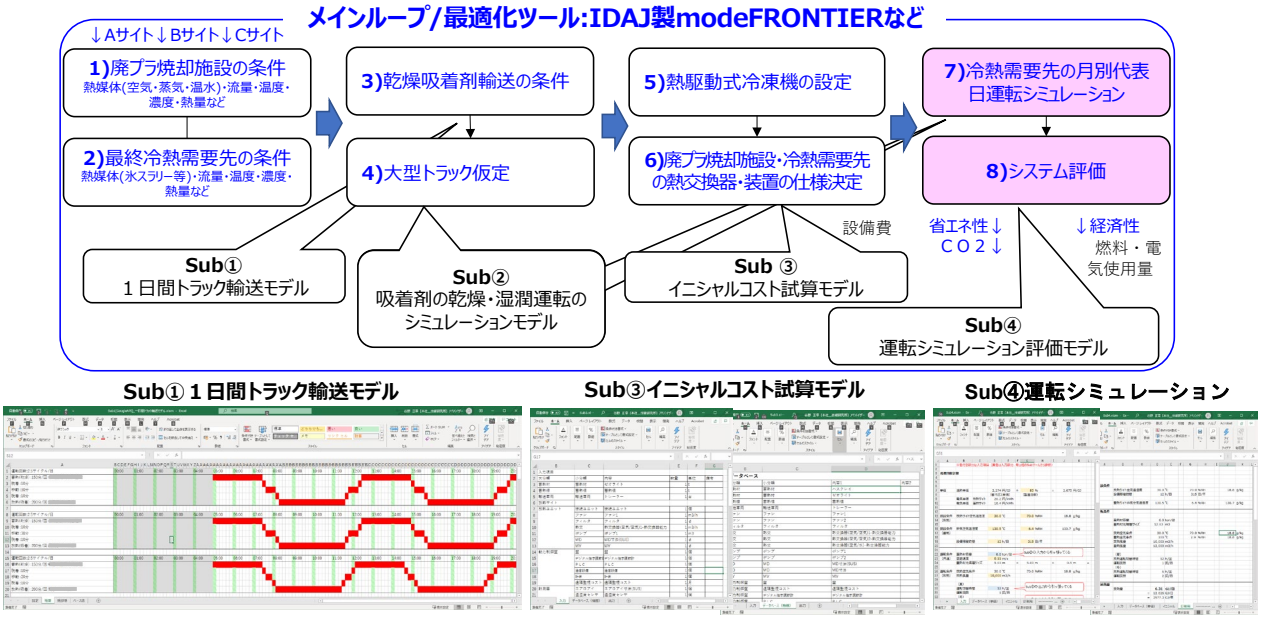
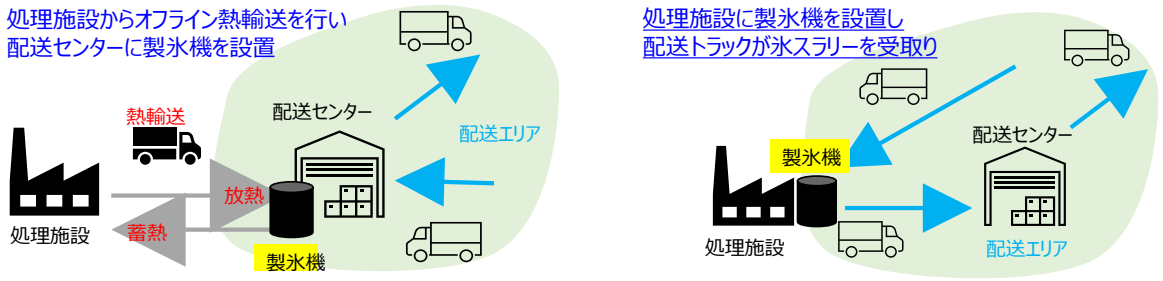


図 11 冷熱利用システムの評価モデルの概要化

5.2 大都市エリアでの評価事例 [73,75)]

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 12** 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。



(1) オフライン熱輸送システムが必要な場合　　(2) オフライン熱輸送システムが不要な場合

図 12 オフライン熱輸送システムのスクリーニング

5.2.1 評価対象

廃プラスチックの焼却設備としては産業廃棄物処理施設と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、および(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 2** には産業廃棄物処理施設、一般廃棄物処理施設、および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、および(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数の積が評価計算数（N）である。

表 2 計算条件と結果

	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) 最小値	最大値	平均
東京都	222	71	15,762	0.03	88.3	40.3
大阪府	229	72	16,488	1.17	83.8	32.7
愛知県	473	52	24,596	0.83	132.6	46.6
福岡県	425	41	17,425	0.47	160.0	56.6
北海道	621	59	36,639	0.07	695.2	183.9
		合計	110,910			

	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
東京都	41	71	2,911	0.73	86.2	43.2
大阪府	43	72	3,096	0.42	99.0	35.9
愛知県	43	52	2,236	2.43	133.9	52.0
福岡県	23	41	943	2.15	143.9	60.2
北海道	64	59	3,776	0.12	690.7	214.4
		合計	12,962			

5.2.2 計算結果と考察

Sub①を用いて計算・取得した移動時間の結果の概要として、前述の**表 2** には(1)東京都、(2)大阪府、(3)愛知県、(4)福岡県、および(5)北海道の地域について、移動時間の最小値・最大値・平均値を示す。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る。各々の地域において近年、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。

図 13 には東京都の産業廃棄物処理施設の場合について、配送センターへの移動時間の結果を詳細に示す。図の棒ブラフは 0～5 min、5～10 min、10～15 min と 5 min 刻みの移動時間帯における産業廃棄物処理

と配送センターの組合せ施設数であり、折れ線グラフは移動時間帯における累積施設数の全施設数（N=15762）に対する割合である。図のように、0～5 min の移動時間帯において 71 件であり、25～30 min の移動時間帯には 1993 件の最大件数であった。また、前述の**表 2** での最大値と平均値により、概ね、東京都・大阪府・愛知県、福岡県、北海道の順で移動時間の時間が長くなり、オフライン熱輸送が必要になるが、北海道の場合はその地域自体が広域であることを考慮したい。

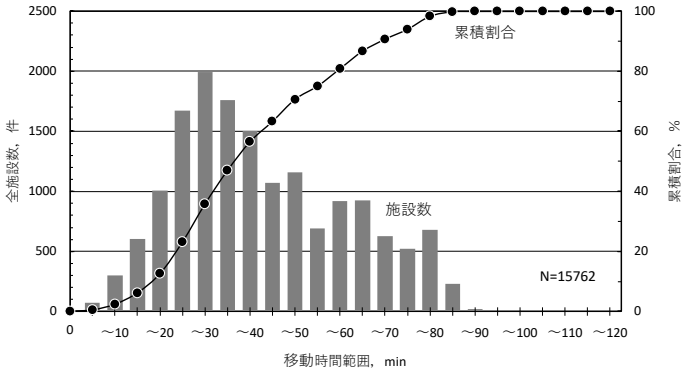


図 13 東京都の産業廃棄物処理施設と配送センターの移動時間の分布

そこで、産業廃棄物処理施設毎の、最短の配送センターまでの移動時間によって評価することにした。その結果を前述の**図 13** と同様に、棒ブラフと折れ線グラフで**図 14** に示す。図のように、例えば 10 min までの移動時間の累積割合は東京都では 54%であり、北海道では 34%であった。これら以外の地域での 10 min までの移動時間の累積割合については、大阪では 70%、愛知では 47%、福岡では 33%であった。このように、大阪府・東京都・愛知県、北海道・福岡県の順で累積割合が少なくなり、よりオフライン熱輸送が必要になる産業廃棄物処理施設が多くなることがわかった。

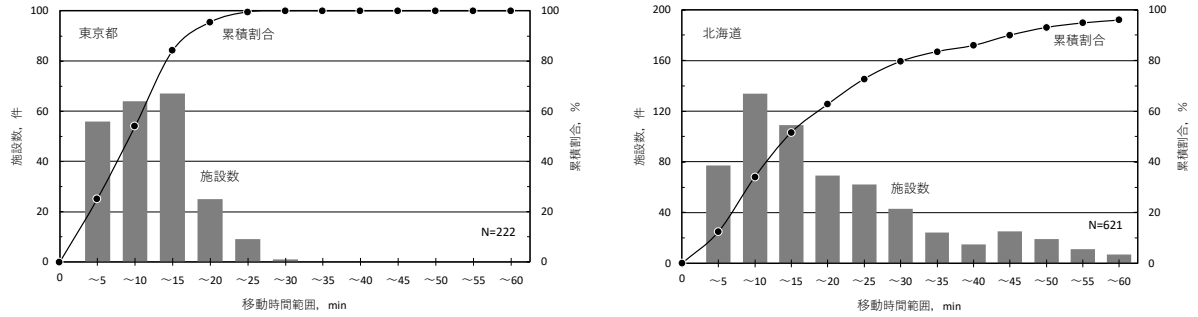


図 14 東京と北海道における産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

5.2.3 オフライン熱輸送システムの検証結果

オフライン熱輸送システムが不要な場合の閾値を 5min、10min、15min とした場合、それらの時間以内の移動時間の産業廃棄物処理施設の割合を**図 15** に示す。図のように、福岡県と北海道に比べて、東京都、大阪府、愛知県ではオフライン熱輸送システムが不要な産業廃棄物処理施設の割合が多いことが読み取れる。また、一般廃棄物処理施設についても同様に、北海道、福岡県、愛知県、東京都、大阪府の順でオフライン熱輸送システムが不要な割合が多くなった。そこで、本提案の冷熱利用システムの導入初期段階においては、福岡県と北海道に比べて、東京都、大阪府、愛知県の方が社会実装し易いエリアと考える。

なお、前述の**表 2** のように、産業廃棄物処理施設については 110,910 回の移動時間が計算され、一般廃棄物処理施設については 12,962 回の移動時間が計算され、その都度、計算ツールのバグ取りを行って、Sub①の一日間トラック輸送モデルの検証を行うことができた。

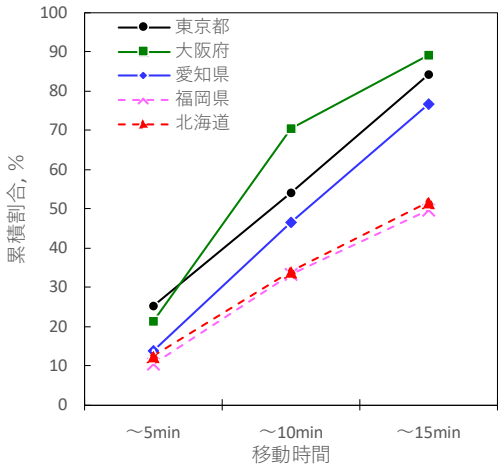


図 15 産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

5.2.4 隣接する場合の評価結果 [75)]

前述のように東京都のような大都市エリアでは、製氷需要地の配送センターと排熱発生地の処理施設が隣接するケースが多く存在する。ここでの評価対象の基本情報を**表 3** に示す。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 3 つのケースで評価を行った。氷スラリーで熱搬送するケースを「①配送トラック/氷」、需要と供給を配管で接続して熱搬送するケースを「②パイプライン」、吸着材で熱搬送することを「③オフライン熱輸送」とした。評価結果を**図 16** と**図 17** に示す。**図 16** のようにイニシャルコスト回収年数は、「①搬送トラック/氷」で 10 年、「②パイプライン」で 12 年、「③オフライン熱輸送」で 22 年であった。また、**図 17** のように一次エネルギー消費量と CO_2 排出量は、「①配送トラック/氷」と「②パイプライン」で 30%、「③オフライン熱輸送」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と CO_2 排出量を 30%まで低減できることが、本システムの大きな魅力の一つと考える。

表 3 東京都の清掃工場と某物流支店の基本情報

	東京都の事例
製氷需要地	某物流支店（東京都世田谷区）
製氷需要量	2,082 GJ/年
廃棄物処理場	千歳清掃工場
廃棄物処理量	132,000 トン/年
熱搬送距離	0.32 km

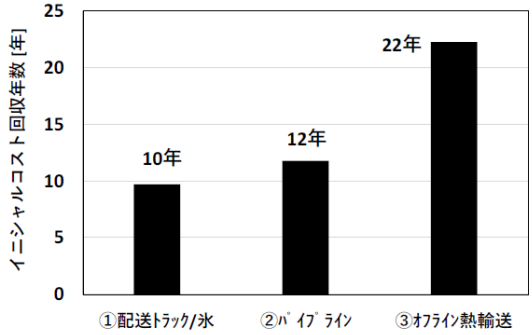


図 16 イニシャルコスト回収年数の評価結果

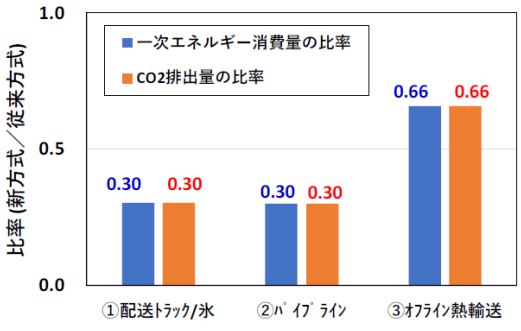


図 17 一次エネルギー消費量と CO_2 排出量の評価結果

5.3 地方エリアでの評価事例 [74,75)]

地方エリアのうち、ここでは、先ず離島エリアを対象に評価を行った。離島を対象にしたのは、離島の漁港では製氷需要が一年を通して安定的に存在すること、廃棄物処理場が地理的に島のほぼ中央に配置されることが多いこと等から、比較的に狭いエリアで、排熱発生側と冷熱需要側がバランスよく配置されている可能性が高いと考えたからである。

今回、評価対象としたのは、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 島である。**表 4** に各島の基本情報を示す。**図 18** には、各島における排熱発生場所である廃棄物処理場、並びに、主な冷熱需要である漁港の位置関係を示す。

表 4　伊豆大島，三宅島，八丈島の基本情報

	伊豆大島	三宅島	八丈島
面積	91.06 km^2	55.44 km^2	69.11 km^2
人口[注]	6,697 人 (大島町)	2,155 人 (三宅村)	6,768 人 (八丈町)
廃棄物処理場	大島町千波環境美化センター	三宅村クリーンセンター	八丈島クリーンセンター
主な漁港	波浮漁港，元町漁港，差木地漁港，野増漁港，岡田漁港，泉津漁港	阿古漁港，伊ヶ谷漁港，大久保漁港，湯の浜漁港，坪田漁港	神湊漁港，八重根漁港，中之郷漁港，洞輪沢漁港

注：2023 年 10 月 1 日における人口

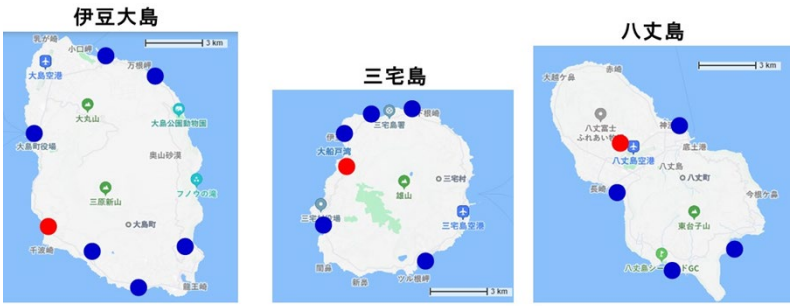


図 18　3 島における廃棄物処理場と冷熱需要(漁港)の位置

伊豆大島において、大島町全域から排出されるプラスチックを含む可燃ごみは、千波環境美化センターで焼却処理される。2019～2021 年度平均で年間 3,296 トンのごみ焼却量、運転時間は 8 時間/日、稼働日数は約 258 日/年、排ガス温度は 178℃である。冷熱需要に関しては、2017 年度の東京都の資料によると島全体で年間 189 トンの漁獲量がある。ヒアリング結果をもとに、年間 277 トンの製氷需要があることを推定した。三宅島において、三宅村全域から排出されるプラスチックを含む可燃ごみは三宅村クリーンセンターで焼却処理される。2021 年度の実績値で年間 1,039 トンのごみ焼却量、運転時間は 8 時間/日、稼働日数は約 200 日/年、排ガス温度は 163℃である。冷熱需要に関しては、2017 年度の東京都の資料によると、島全体で年間 206 トンの漁獲量がある。ヒアリング結果をもとに、年間 55 トンの製氷需要があることを推定した。また、八丈島において、八丈町全域から排出されるプラスチックを含む可燃ごみは八丈町クリーンセンターで焼却処理される。2021 年度の実績値で年間 2,616 トンのごみ焼却量、運転時間は 8 時間/日、稼働日数は約 239 日/年、排ガス温度は 170℃である。冷熱需要に関しては、2017 年度の東京都の資料によると、島全体で年間 895 トンの漁獲量がある。ヒアリング結果をもとに、年間 2,360 トンの製氷需要があることを推定した。

5.3.1 評価条件と方法

システム適合性を評価するに当たり、今回は一般的な廃棄物処理場を対象としたので、廃棄物処理量当たりの推定排熱量は一般的な値である 8.8MJ/kg とした。本 NEDO 事業で開発中の低温排熱対応型の吸収式冷凍機の COP（排熱量当たりの発生冷熱の割合）は暫定的に 0.3 として、比較対象となる従来方式の製氷用冷凍機の COP（消費電力量当たりの発生冷熱の割合）は 3.0 とした。氷の販売価格を氷 1 トン当たり 0.5 万円、電気料金を 25 円/kWh とした。吸着剤やシャーベット氷を輸送するトラックの燃費は、搭載重量毎に小型（3 トン未満）を 11km/L、中型（3 トン以上、6.5 トン未満）を 7km/L、大型（6.5 トン以上）を 4km/L に設定した。電力や軽油の原単位（一次エネルギー消費量原単位や CO_2 排出量原単位）は、離島独自の値を採用した [79]。

トラックによる吸着剤蓄熱槽とシャーベット氷の一日の輸送スケジュールは、Sub①で決定した。また、総合熱利用システムの導入で新たに必要な機器は、吸着剤によるオフライン熱輸送システム、低温排熱対応型の吸収式冷凍機、氷スラリー製氷機であり、それぞれのイニシャルコストとランニングコストは、これまでの実績等をもとに Sub②及び Sub③で試算した。

5.3.2 評価結果と考察

以上の調査結果や評価条件をもとに、Sub①～Sub④によりシステム適合性の評価を行った。評価結果の一覧を**表 5** に示す。いずれの島でも、排熱発生側と冷熱需要側の距離は近く、トラック輸送時間は島内平均で 7～10 分であった。そこで、廃棄物処理場の直近に吸収式冷凍機を設置して、そこで製氷を行って各漁港までシャーベット氷をトラックで輸送するケースを評価の基本とした。これを「熱輸送なし」と表記した。一方、吸着剤によるオフライン熱輸送システムを導入したケースは「熱輸送あり」として評価した。

表 5 評価結果の一覧

		伊豆大島 （熱輸送なし）	三宅島 （熱輸送なし）	八丈島 （熱輸送なし）	八丈島 （熱輸送あり）
1．焼却ゴミからの排熱量と製氷可能量					
焼却ごみ処理量	t/年	3,296	1,039	2,616	2,616
推定排熱量	GJ/年	29,005	9,143	23,021	23,021
排熱からの製氷可能量	t-ice/年	**26,083**	**8,222**	**20,702**	**20,702**
2．漁港の冷熱需要					
漁獲量(島全体)	t/年	189	206	895	895
氷の需要	t-ice/年	**277**	**55**	**2,360**	**2,360**
3．輸送距離（ゴミ焼却場から漁港）					
片道輸送時間(平均)	分	13	13.5	18	18
片道距離(平均)	km	6.9	7.2	9.6	9.6
4．氷の費用対効果					
イニシャルコスト回収年数	年	**16**	**43**	**6.1**	**14**
5．消費エネルギーの比較					
一次エネルギー消費の比率(新方式／従来方式)		**0.50**	**1.4**	**0.40**	**0.49**
6．CO_2排出量の比較					
CO_2排出量の比率(新方式／従来方式)		**0.50**	**1.3**	**0.39**	**0.49**

各漁港において従来方式の冷凍機で製氷する場合に比べて、総合熱利用システムを新設した場合の投資額に対するイニシャルコスト回収年数を試算した。その結果を**図 19** に示す。「熱輸送なし」の八丈島では、回収年数が 6.1 年になり最も良好な評価結果が得られた。それ以外のケースでは全て 10 年以上になった。これは、八丈島が他の島と比べて冷熱需要が大きいためである。一方、図表には示していないが、伊豆大島や三宅島の「熱輸送あり」の評価では、回収年数が数十年と極端に大きくなった。これは、システム規模に対する冷熱需要量が小さいために、導入システムのイニシャルコストが相対的に割高になったからである。

一次エネルギー消費量の評価結果を、従来方式に対する新方式の比率として、**図 20** の左側の青色の棒グラフで示す。「熱輸送なし」の伊豆大島と八丈島、並びに「熱輸送あり」の八丈島のケースでは、従来方式

に比べて一次エネルギー消費量を半分程度かそれ以下まで低減できる。一方、三宅島では「熱輸送なし」であっても、従来方式よりも一次エネルギー消費量が大きくなる結果になった。これは、三宅島は他の島に比べて冷熱需要量が極端に小さいために、削減できる冷熱量よりも、導入システムの補機電力等のエネルギー消費量の方が大きくなったことによる。

CO_2 排出量の評価結果を従来方式に対する新方式の比率として、**図 20** の右側の赤色の棒グラフで示す。「熱輸送なし」の伊豆大島と八丈島、並びに「熱輸送あり」の八丈島のケースでは、従来方式に比べて CO2 排出量を半分程度かそれ以下まで低減できた。一方、三宅島では「熱輸送なし」であっても、従来方式よりも CO_2 排出量が大きくなる結果になった。これは、一次エネルギー消費量と同様の理由による。

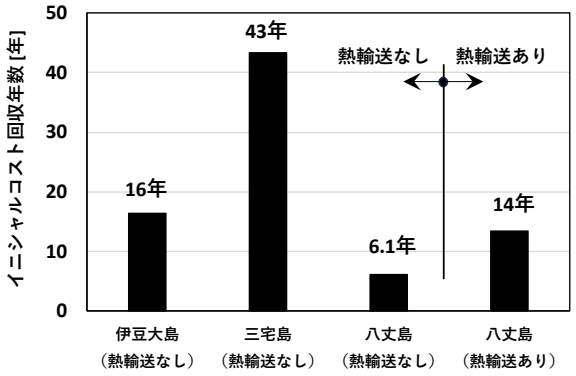


図 19 イニシャルコスト回収年数の評価結果

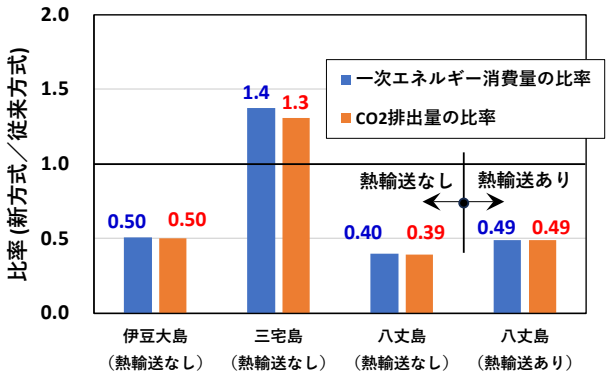


図 20 一次エネルギー消費量と CO_2 排出量の評価結果

5.3.3 総合熱利用システムへの適合性の考察

離島は、どこまでも陸が続いているエリアと違って、熱利用先の対象エリアが限定されるため、ほぼ島の冷熱需要特性によって、総合熱利用システムへの適合性が決まる。

本報で評価を行った伊豆大島、三宅島、八丈島に関しては、イニシャルコスト回収年数、一次エネルギー消費量、並びに CO_2 排出量という観点で、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。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、かつ八丈島よりも冷熱需要の大きいエリアが他にあれば、システム適合性はさらに高くなる可能性がある。

5.3.4 冷熱需要の大きい大規模漁港での適合性の考察 [75)]

地方エリアのうち、製氷需要の比較的大きな地域として、壱岐市の勝本町漁港と下関市の下関製氷協同組合を対象とした評価を行って、システム適合性の考察を行った。排熱を調達する場所は、最寄りの廃棄物処理場を想定して、前者は壱岐市クリーンセンター、後者は奥山工場とした。評価対象の基本情報を**表 6** に示す。

表 6 壱岐と下関の事例の基本情報

	壱岐市の事例	下関市の事例
製氷需要地	勝本町漁港	下関製氷協同組合
製氷需要量	3,655 GJ/年	10,800 GJ/年
廃棄物処理場	壱岐市 クリーンセンター	下関市環境部 奥山工場
廃棄物処理量	5,929 トン/年	79,942 トン/年
熱搬送距離	8.5 km	17 km

評価結果を**図 21** と**図 22** に示す。**図 21** はイニシャルコスト回収年数であり、**図 22** は従来方式に対する一次エネルギー消費量と CO_2 排出量の割合である。

イニシャルコスト回収年数は、「熱輸送なし」で 5.8～6.8 年、「熱輸送あり」で 11～14 年であった。

一次エネルギー消費量と CO_2 排出量は、双方とも、「熱輸送なし」で従来方式に比べて 37～43%、「熱輸送あり」で 69～73%であった。熱輸送の有無にかかわらず、従来方式よりも有利になることが分かった。

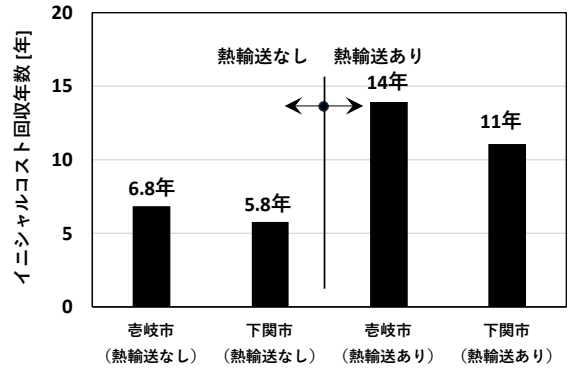


図 21　イニシャルコスト回収年数の評価結果

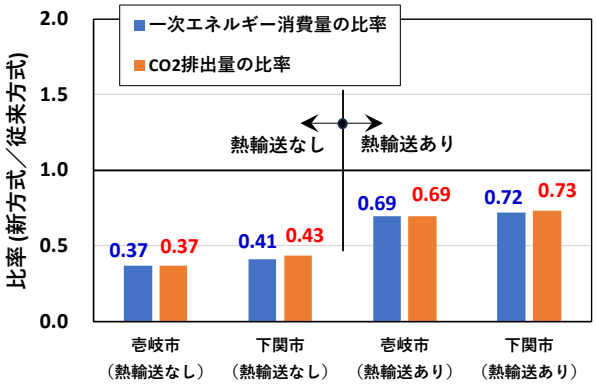


図 22　一次エネルギー消費量と CO_2 排出量の評価結果

以上の結果から、イニシャルコスト回収年数は、製氷需要の大きな地域ほど小さくなる傾向にあり、製氷需要の大きな下関の漁港の「熱輸送のなし」で 5.8 年程度であることが分かった。

一方、一次エネルギー消費量と CO_2 排出量は、殆どのケースで従来方式よりも有利になることが分かった。これは、本システムの大きな魅力の一つと考える。

5.4 中核都市エリアでの評価事例 [76,77)]

八戸港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おり、八戸湾岸エリアは総合熱利用システムや熱リサイクルパッケージの実証に好適な中核都市エリアである。ここでは、八戸工業大学での熱リサイクルパッケージの製氷試験のプレスリリース [47)]を通じて、八戸湾岸エリアのリサイクル工場の関係者との情報共有を行ってきた [10,71)]。

また、前述の大都市アリアや地方エリアと同様に、総合熱利用システムの評価技術のツールを用いて、氷スラリーを漁港へ供給するモデルケースを検討・評価して、関連学協会での発表を通じて公表する予定である。詳しくは発表論文 [77)]を参照されたい。

6. おわりに

本報では NEDO 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」での ER チームの技術開発として、以上のように伝熱管の表面改質に関する研究、低温排熱の冷熱利用に関する研究、および総合熱利用システムの評価技術の事例研究について説明した。2020 年度から開始された本 NEDO プロジェクトは 2024 年度が 5 年目の最終年度であったので、期初の研究目標の達成とともに、研究開発成果の関連学協会での公表と広報に努めてきた [2-80)]。

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_2 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や各種の未利用熱や排熱が有効活用されるよう、本基盤技術の実証・実用化を進めたい。

謝辞

この成果は、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。NEDO をはじめ、関係の皆様方に感謝を申し上げます。

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（最終アクセス日：2023.12.27）
2) 佐伯達哉, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎 : 産業廃棄物灰の溶融特性の解明とその制御, 日本燃焼学会第 59 回燃焼シンポジウム, 2021.
3) 小野田海人, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎：産業廃棄物灰からの溶融塩生成特性解明と灰付着制御, 日本燃焼学会第 60 回燃焼シンポジウム, 2021.
4) Kaito Onoda, Yasuaki Ueki, Ryo Yoshie, Ichiro Naruse: Molten Salt Formation Characteristics of Industrial Waste Ash and Control of Ash Deposition, International Conference on Materials and Systems for Sustainability, 2021.
5) Hiroshi Naganuma, Takehito Mori, Sho Watanabe, Akihiro Sawada, Taeko Goto, Yasuaki Ueki, Ryo Yoshiie, Ichiro Naruse: Ash deposition mechanisms in waste-to-energy plants, International Conference on Power Engineering (ICOPE-2021), 2021.
6) 長沼宏：固体燃焼における灰付着と高温腐食, 第 58 回石炭科学会議, 2021.
7) 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, 43-47, 2022.
8) 産業技術総合研究所, 名古屋大学, 東北発電工業 : 廃プラスチックからの高温熱回収に関する研究開発の紹介, 日本機械学会動力エネルギーシステム部門, ニュースレター, 2022/09.
9) 佐伯達哉, 義家亮, 植木保昭, 成瀬一郎 : 産業廃棄物処理炉内における灰付着制御, 第 31 回日本エネルギー学会大会, 2022.
10) 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.
11) 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.
12) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 邉章, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭 : NaCl による高温加速酸化機構の速度論的解析, 第 17 回バイオマス科学会議, 2022.
13) 澤田晃宏，長沼宏，後藤妙子，森岳人，渡邉章，成瀬一郎，義家亮，植木保昭：塩化物環境下における高温加速酸化機構の速度論的解析，日本エネルギー学会・第 59 回石炭科学会議, 2022.
14) 長沼宏，後藤妙子，澤田晃宏，森岳人，渡邉章，成瀬一郎，義家亮，植木保昭：廃棄物系バイオマス処理プラントにおける灰付着と高温腐食機構，日本エネルギー学会・第 59 回石炭科学会議, 2022.
15) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition mechanisms in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, vol.9, No.4, 21-00435, 2022.
16) 澤田晃宏，長沼宏，後藤妙子，森岳人，渡邉章，成瀬一郎，義家亮，植木保昭 : NaCl 存在下における高温加速酸化機構の速度論的解析，日本エネルギー学会・第 60 回石炭科学会議発表論文集，2-16，2023.
17) 長沼宏，後藤妙子，澤田晃宏，森岳人，渡邉章，成瀬一郎，義家亮，植木保昭：廃棄物燃焼条件における高温腐食機構の速度論的考察，日本エネルギー学会・第 60 回石炭科学会議発表論文集，2-17，2023.
18) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition and corrosion mechanisms of tubes in Waste-to-Energy plants, Proceedings of the International

Conference on Power Engineering (ICOPE-2022), 2023.
19) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSIIE, Ichiro NARUSE : Ash deposition and corrosion mechanisms of tubes in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, 11, 2, 2024.
20) 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, 2024.
21) 澤田晃宏，長沼宏，後藤妙子，森岳人，山崎拓矢，成瀬一郎，義家亮，植木保昭：塩化物存在下における高温加速酸化機構の解析，材料と環境 2024.
22) 長沼宏，後藤妙子，澤田晃宏，森岳人，山崎拓矢，成瀬一郎，義家亮，植木保昭：廃棄物燃焼条件におけるアルカリ塩化物による加速酸化機構，材料と環境 2024.
23) 長沼宏，森岳人，成瀬一郎：固体燃焼装置における灰付着・高温腐食の機構と対策，工業加熱，61, 4, 20, 2024.
24) 長沼宏，澤田晃宏，森岳人，後藤妙子，小坂祥枝，成瀬一郎：廃棄物処理プラントにおける灰付着・高温腐食の低減技術，日本エネルギー学会・第 61 回石炭科学会議，2024.
25) 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 巻, 281 号, 9-17, 2020.
26) 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 巻, 285 号, 1-8, 2020.
27) 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 巻, 290 号, 39-46, 2021.
28) 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―定置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 巻, 297 号, 31-38, 2021.
29) 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 巻, 301 号, 9-16, 2022.
30) 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 巻, 308 号, 11-18, 2022.
31) 王荀, 新井数馬, 幡野博之 : 十字流式移動層を用いた吸着剤蓄熱システム, 第 27 回流動化・粒子プロッセッシングシンポジウム, 2021.
32) 木村拓雅, 加藤貴大, 幡野博之：吸着剤の流動層乾燥, 第 27 回流動化・粒子プロッセッシングシンポジウム, 2021.
33) 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, 48-54, 2022.
34) 及川慈英, 新井一馬, 幡野博之：低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 53 回秋季大会, 2022.
35) 幡野博之, 新井一馬, 及川慈英：低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 53 回秋季大会, 2022, ST-29.
36) 大関泰知, 鈴木翔太, 王ジュエ, 及川慈英, 幡野博之, 村瀬和典 : 低温排熱有効利用に向けた吸着剤蓄熱システムの研究- 吸着剤特性と蓄熱性能，化学工学会，流動層に関する学生オンライン発表会 2023.
37) 王ジュエ, 及川慈英, 大関泰知, 鈴木翔太, 幡野博之, 村瀬和典 : 蓄熱システムにおける吸着剤熱発生特性に関する研究，化学工学会，流動層に関する学生オンライン発表会.
38) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之 : 蓄熱システムの吸着剤連続乾燥特性，化学工学会，流動層に関する学生

オンライン発表会.
39) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之：低温排熱有効利用のための蓄熱システム用吸着剤連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
40) 幡野博之, 王ジュエ, 及川慈英, 鈴木翔太, 村瀬和典 : 吸着剤蓄熱システムの熱発生特性に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
41) 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.
42) 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作動流体 LiBr- H_2O-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.
43) 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.
44) 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作動流体 LiBr－H_2O/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.
45) 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.
46) 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.
47) 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, 2024.5.29（最終アクセス日：2025.1.24）.
48) 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.
49) 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.
50) 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.
51) 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, 2024.
52) 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.
53) 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.
54) 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，55-59，2024.11.
55) 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, Vol.17, No.2, 191-201, 2000.
56) 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満蓄制御と給水制御～，日本冷凍空調学会論文集, Vol.30, No.3, 319-329, 2013.
57) 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, Vol.30, No.3, 331-339, 2013.
58) 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, Vol.61, 2020.
59) 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.
60) 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，第 92 巻，第 5 号, 31-36, 2018.
61) 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サ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, Vol.33, No.3 , 251-259, 2016.
62) 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.

63) 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.
64) 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.
65) 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.
66) 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，2024.9.
67) 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.
68) 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.
69) Hiroyuki Kumano, Takashi Morimoto, Kohta Tanaka, Toshie Koyama, Masayuki Tanino: Effects of solutes and additives on ice growth prevention in ice slurry production, International Journal of Refrigeration, 2024.10.
70) 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.
71) 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.
72) 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，(2023.9), I-45.
73) 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, (2024.1), 18-3.
74) 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, (2024.1), 18-4.
75) 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) , 3-2.
76) 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；廃棄ブ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, (2024.3), E214.
77) 鎌田美志，増田正夫，谷野正幸，折田久幸，小山寿恵：廃棄ブラスチックエネルギーの高度有効利用－排熱による製氷技術の漁港への適用検討－，化学工学会第 90 年会, (2025.3), K308.
78) Google Maps API ， https://developers.google.com/maps/apis-by-platform?hl=ja
79) 東京電力パワーグリッド株式会社；エネルギー状況報告書, 2022：https://www.tepco.co.jp/pg/company/environment/warming/（最終アクセス日：2025.1.24）.
80) 経済産業省ゼロエミチャレンジ企業リスト：https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/zero-emission_challenge/index_zeroemi.html（最終アクセス日：：2025.1.24）.

ABSTRACT

We have been participating in the Energy Recovery (ER) team of the project "Development of Innovative Plastic Resource Recycling Process Technology" supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) since FY2020. We have developed basic technologies for surface modification of heat transfer tubes for highly efficient waste heat recovery and for cold heat utilization for effective use of low-temperature waste heat. We have also developed evaluation technologies for integrated heat utilization systems from heat recovery to ice slurry utilization and have studied case studies in various regions for practical application and social implementation of the basic technologies, as well as verification of the evaluation technologies. In this paper, the outline of heat transfer tube surface modification technology is provided and the overview of technological development in the ER team up to this fiscal year is presented, focusing on the cold utilization of low-temperature waste heat.

【技術論文】

チューブ型フォトバイオリアクターを用いた微細藻類による CO_2 固定化技術の開発※

鴫原亜土・三宅友香・増田正夫・増田篤稔[*1]

Development of CO_2 Fixation Technology by Cultivated Microalgae Using Tubular Photobioreactor

Ado Shigihara・Tomoka Miyake・Masao Masuda・Atsunori Masuda

建物居室内における CO_2 濃度は、通常の呼気由来に加え昨今の大気中 CO_2 濃度の上昇に伴い増加傾向にある。濃度基準である 1000ppm を超過すると、倦怠感や眠気等の症状が増えることから、労働者の判断能力や集中力低下に著しく影響をおよぼす可能性がある。そこで、優れた光合成能を持つ微細藻類とチューブ型フォトバイオリアクターを用いて居室内の CO_2 を生物固定し、低濃度化するシステムを試作し、特に培養に関する基礎的な検討を行った。その結果、濁度の増加と共に CO_2 固定量の指標であるリアクター入口・出口の気相 CO_2 濃度差と CO_2 固定速度との間には正の相関が見られ、確実に生物固定されていることが示された。また、培養から収穫までのバッチ試験を繰り返し行ったところ、試験を重ねる毎に微細藻類の増殖は鈍化し倍加時間は増加傾向を示したが、当初目標としていた 3 ヶ月間にわたる長期連続培養を達成することができた。

1. はじめに

我が国では、建物居室内の空気質の管理指標の一つとして二酸化炭素（CO_2）濃度が用いられている。その濃度基準値は「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、1000ppm 以下と定められており [1]、これを維持するのに必要な換気量の算出は、人の代謝により体外に放出される CO_2 量と大気中の CO_2 濃度を基に行われている [2]。しかしながら、2023 年時点における大気中 CO_2 の世界平均濃度は約 420ppm と高く、産業革命前に 280ppm 程度だった CO_2 濃度は現在年間 2ppm 以上の速度で増加している [3]。それ故に、多くの人が集う会議室のような気密性の高い空間に適切な換気量が設定されていなければ、建物居室内の CO_2 濃度は容易に基準値を超過する。高濃度 CO_2 環境下では倦怠感や眠気が誘発されることが報告されており、業務パフォーマンス等に著しく影響を及ぼす可能性がある [4-6]。一方で、換気量を増やすことはエネルギー消費の増大に直接つながることから、大気中 CO_2 濃度を下げるべく、これを回収・固定するための技術開発が物理化学的（たとえば固体材料による吸着 [7]やアミン溶液による吸収 [8]）或いは生物学的な方法（たとえば高等植物 [9]や微細藻類の光合成による固定 [10]）を採用して行われている。特に微細藻類は陸上植物に比べおよそ 10～50 倍の CO_2 固定能を持ち [11]、式(1)に示す光合成反応によれば、電子供与体として水を用いることで酸素（O_2）を放出させるだけでなく、付加価値の高い炭水化物（CH_2O）を生産する特徴を有する [12]。

$$CO_2 + H_2O + 8\ \text{photons} \rightarrow (CH_2O)_n + O_2 \quad (1)$$

※ 本論文は、化学工学会第 89 年会講演論文を加筆修正したものである。

*1 玉川大学農学部

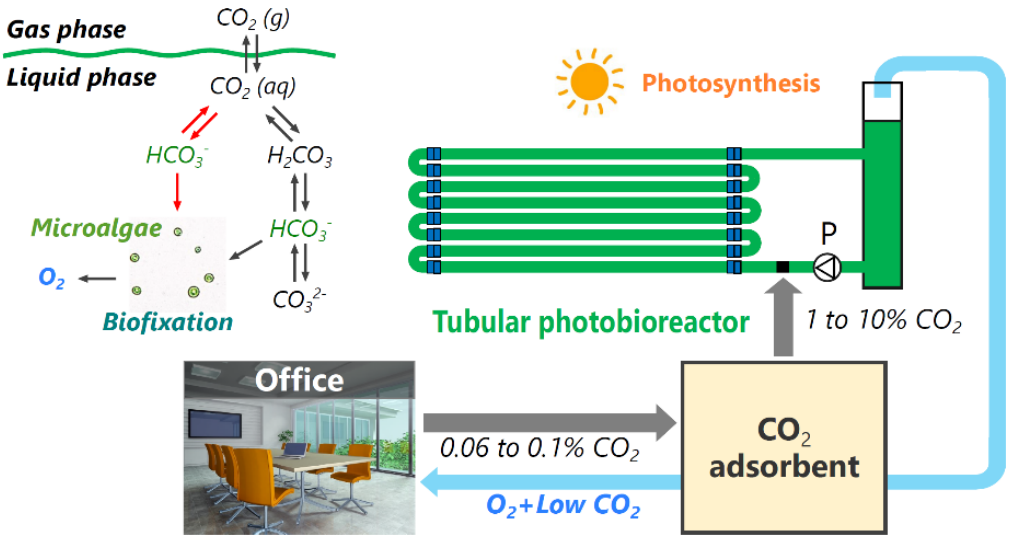


図 1 システム概要図

また、CO_2 固定に伴い生成された豊富な O_2 を含む空気は換気を目的に、例えばエアハンドリングユニットを介して建物居室へ導入することができる[13]。したがって、建物居室空気由来の CO_2 を高効率に回収・濃縮し、次いで藻類を使用した生物固定システムに供することにより O_2 リッチ／低 CO_2 濃度空間を創出できれば、環境配慮型社会に適した資源循環が生まれると考えられる（**図 1**）。

本研究は、オフィス労働者の生産性・ウェルネス向上及びカーボンネガティブを両立する建築設備の開発を最終目的としているが、現況の技術課題としては 3 つ、すなわち(1)微細藻類の長期安定培養、(2)建物居室空気中の CO_2 吸脱着および(3)CO_2 固定した藻体の有効利用法の検討が挙げられる。ここでは特に(1)にフォーカスし、高効率に CO_2 を固定する微細藻類と独自設計したチューブ型フォトバイオリアクター（TPBR）を用いて、3 ヶ月の長期運転を目標に、屋外環境下における微細藻類の連続培養および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。本稿では、培養状況を長期間にわたりモニタリングした結果を基に、微細藻類の生長速度や CO_2 固定速度等の評価を行い、併せて現状の課題についても整理したので報告する。

2. 試料と方法

2.1 微細藻類株

供試微細藻類には、様々な環境下において培養可能な *Chlorella sp.*株を採用した。加えて、光補償点が低く強い光を要しないことや培養時の発泡性が少なく大量培養に適しているといった優れた能力を有する。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）[14]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、各方式についてシステム設計に関する研究開発が行われている[15-17]。本研究で採用した TPBR は閉鎖型藻類培養システムの一種で、開放型システムに比べ雑菌等のコンタミネーションや培養液蒸散の抑制に優れており、屋外安定培養技術の構築に適している[18]。さらに、培養液体積当たりの受光面積の比率を高くし CO_2 の吸収経路を長くすることで高密度培養が可能となり、光合成による CO_2 固定量を飛躍的に向上させることができる。

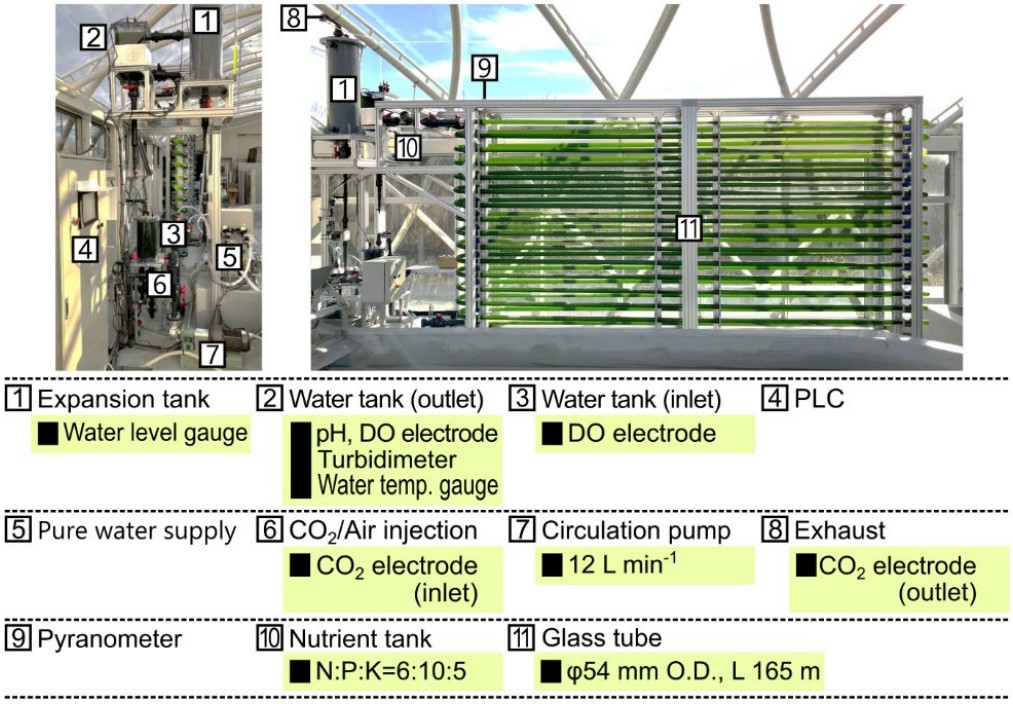


図 2 TPBR の構成

製作した TPBR（培養液体積：約 300 L）は、主に多段式ガラス管（外径：54 mm、長さ：165 m）、循環ポンプ、栄養剤タンク、水質監視タンク（入口／出口）及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藻類池棟（温室）に設置した（**図 2**）。棟内の温湿度、光環境および培養液の水温については特別な制御を行わず、太陽光の明暗サイクル及び気象現象による自然変動とした。

TPBR を構成するタンク内には、培養状況を監視する目的で**図 2** に示す各種センサーを設置した。センサーから得られた連続データは、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いて、培養から収穫までを繰り返すサイクル運転が可能となっている。また、運転が長期にわたるとガラス管内にバイオフィルムが付着し、それが原因で光の透過性が著しく低下するため、図示はしていないが管内洗浄機構を備えている。

2.3 TPBR による微細藻類の培養

TPBR と微細藻類による CO_2 固定化に関する実験は、2024 年 1 月から 3 月にかけて行った。培養システムの運転開始前には、所定の初期濁度となるように一定量の種藻と純水を TPBR に投入した。次いでホウ素や鉄に代表される必須微量元素を含む液肥（窒素：リン：カリウム=6：10：5）を一定量添加し、これを培養液とした。建物居室空気中の CO_2 の回収・濃縮によって得られる濃度を模した CO_2－空気混合ガス（約 4%（*v*/*v*），入口濃度, CO_2-inlet）を日の出から日の入り時刻まで培養液へ通気し、培養期間中は培養液の pH、入口／出口溶存酸素濃度（DO-inlet／DO-outlet）、濁度及び水温の他、日射量や膨張タンク内の CO_2（出口濃度, CO_2-outlet）を連続測定した。

2.4 微細藻類の生長測定

一般的に、微細藻類の増殖評価は細胞数の測定により行われるが、サンプリングを含め多くの手間や時間を要し、測定個人差も大きいという欠点がある。このため、バイオマス量の指標である藻体濃度と比例関係にある濁度を用いて、間接的に評価する手法が報告されている [19-20]。**図 3** に濁度(*T*, NTU)と藻体濃度(*N*, g L^{-1})の関係を示す。ここで、藻体濃度は JIS K 0102 14.1 にしたがい、培養液に含まれる懸濁物質として測定した [21]。これらの間には強い正の相関が認められ（*r*=0.973）、式(2)に示す関係式を用いれば、水質監視タンク内に設置した濁度センサーより得た測定データを藻体濃度に換算することができる。

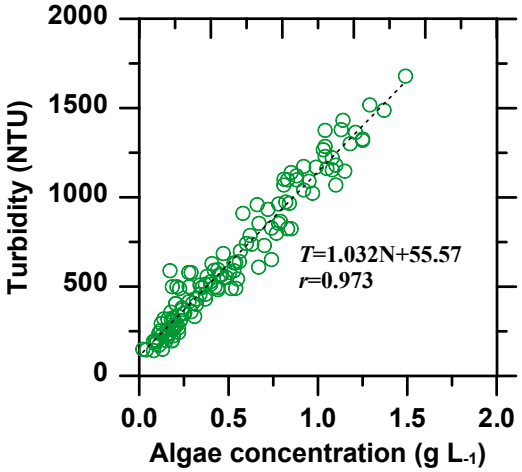


図 3 濁度と藻体濃度の関係

$$T = 1.032 \times N + 55.57 \tag{2}$$

また、微細藻類の増殖ポテンシャルを推定する上で重要なファクターとなる比増殖速度(μ, h^{-1})は、式(3)を用いて算出した。

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}{t_2 - t_1} \quad \Leftrightarrow \quad N_2 = N_1 e^{\mu(t_2 - t_1)} \tag{3}$$

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)で測定した藻体濃度(g L^{-1})であり（N_2>N_1, t_2>t_1）、培養条件が一定の範囲内にある場合、藻体濃度は上式の通り指数的に増加する [22]。なお、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)とすると、これを式(4)で表すことができる。

$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \tag{4}$$

微細藻類のバイオマス生産能力($P_{Biomass}$, g L^{-1} d^{-1})は、式(5)のように表すことができる。

$$P_{Biomass} = \frac{N_t - N_0}{t - t_0} \tag{5}$$

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)で測定した藻体濃度(g L^{-1})である。また、CO_2 固定量(F_{CO2}, g)と CO_2 固定速度(FR_{CO2}, g L^{-1} d^{-1})は、それぞれ式(6)と式(7)を用いて算出した [23]。

$$F_{CO_2} = (N_t - N_0) \times f_C \times V \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_C}\right) \tag{6}$$

$$FR_{CO_2} = P_{Biomass} \times f_C \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_C}\right) \tag{7}$$

ここで、V は TPBR の容積(L)、f_C は元素分析計で測定した藻体中の炭素含有率(%, *w/w*)、M_{CO2} および M_C はそれぞれ CO_2 および炭素の分子量(g mol^{-1})である。なお、CO_2 固定効率(E_{CO2}, %)は、式(6)により得られた F_{CO2} と TPBR に供給された CO_2 量(m_{CO2}, g)との比から、式(8)のように評価した。

$$E_{CO_2} = \left(\frac{F_{CO_2}}{m_{CO_2}}\right) \times 100 \qquad (8)$$

3. 結果と考察

3.1 微細藻類の生長および CO_2 固定

図 4 に、微細藻類の培養期間中におけるモニタリングデータの経時変化の一例を示す（2024 年 1 月 12 日～1 月 24 日）。日中の CO_2 通気時間帯において、培養液の pH は気液二相流に伴う CO_2 の自然溶解により中性域付近まで低下しており（**図 4F**）、この領域では化学平衡論により溶解した CO_2 のおよそ 80%程度が重炭酸イオン（HCO_3^-）として存在する。一般的に、微細藻類は光合成時に HCO_3^- を炭素源として細胞内に取り込み増殖するため[24]、藻体濃度の指標である濁度は降水が観測された培養 8～10 日目を除き、日射による水温上昇も寄与して増加傾向を示した（**図 4C**, **4D** および **4F**）。また、濁度の増加に伴い培養液中の DO 濃度も徐々に増加しており、TPBR の入口および出口間の DO 濃度差（ΔC_{O2}＝DO-inlet－DO-outlet）が大きくなる時間帯は、太陽放射量が最も高くなる時間帯と一致した（**図 4E**）。

図 4A は TPBR の入口および出口における気相 CO_2 の濃度変化を示しているが、これらの濃度差（ΔC_{CO2}＝CO_2-inlet－CO_2-outlet）は微細藻類に吸収された CO_2 量に等しい[25]。微細藻類の生長が速く藻体濃度も増加したため、培養期間中の平均 ΔC_{CO2} は 2.1%（*v*/*v*）と大きく、通気濃度に対して約 53%の CO_2 が吸収された。Chiu らは、本研究とは異なる *Chlorella sp.* を使用した連続培養における CO_2 吸収率を調査しており、2、5、10 および 15%（*v*/*v*）CO_2 の通気でそれぞれ 58、27、20 および 16%であったと報告している[26]。このことは、通気濃度が低いほど微細藻類への吸収がよく行われることを意味しており、本システムを設計する上で重要なファクターとなる。また、CO_2 の通気時間帯に限定すると、藻体濃度を基に計算した

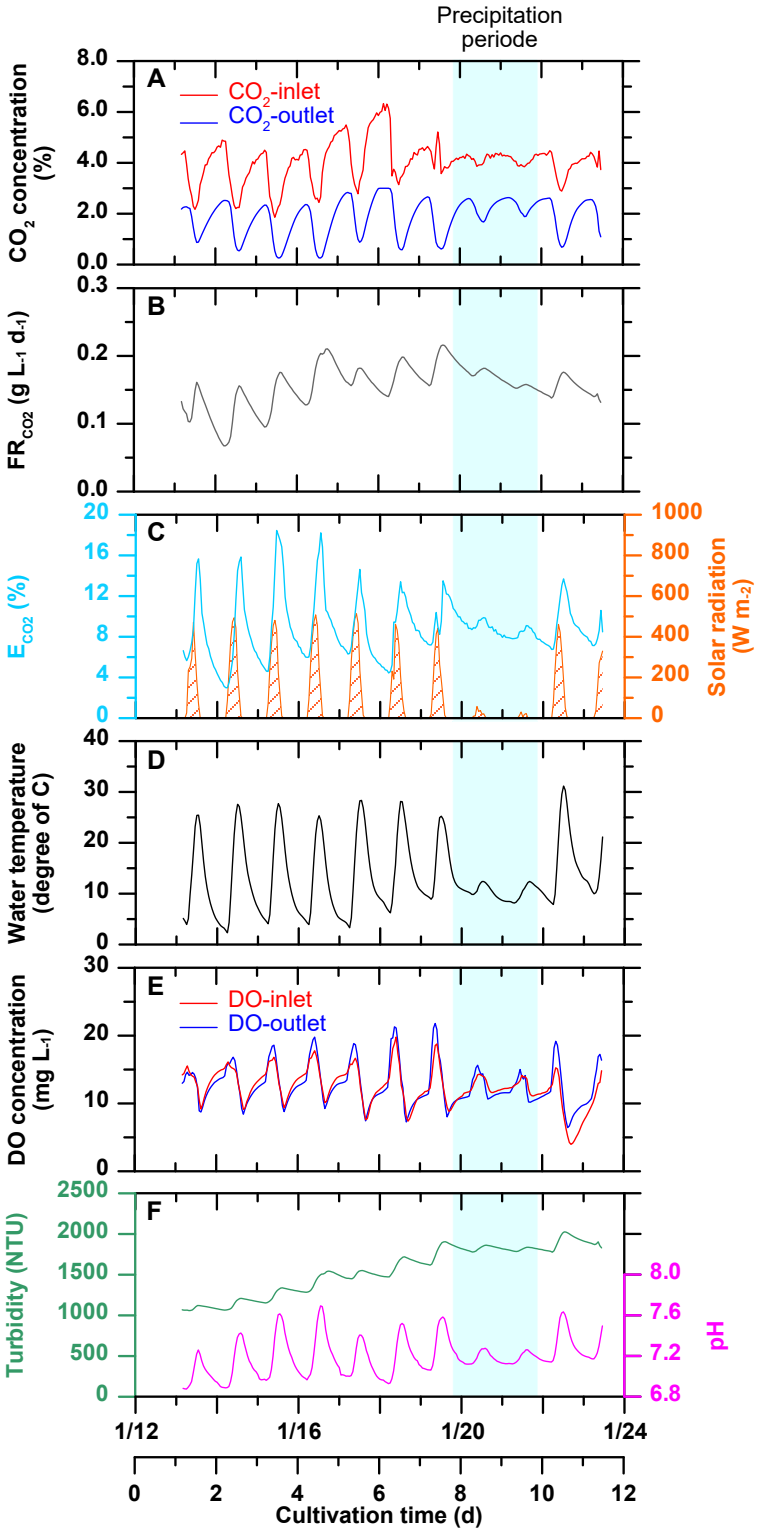


図 4　培養期間中の気相 CO_2 濃度(A)、CO_2 固定速度(B)、CO_2 固定率および太陽放射(C)、培養液の水温(D)、培養液中の DO 濃度(E)、培養液中の濁度および pH(F)の変化

CO_2 固定速度（**図 4B**）と ΔC_{CO2} との間には正の相関が認められることから（r=0.858）、今後実験を計画している居室空気中から回収・濃縮した CO_2 を用いた場合についても、支障なく生物固定できると考えられる（**図 5**）。

一方、TPBR への CO_2 通気流量と藻体濃度を基に計算した CO_2 固定効率は、最も細胞分裂が進行する対数増殖期においても約 18%と低く（**図 4C**）、先に述べた CO_2 吸収率との差は大きい。これらは、TPBR の設計仕様や供給 CO_2 濃度だけでなく、培養液に対する CO_2 の溶解方法にも依存するため [27]、最適な培養条件を今後見出す必要がある。

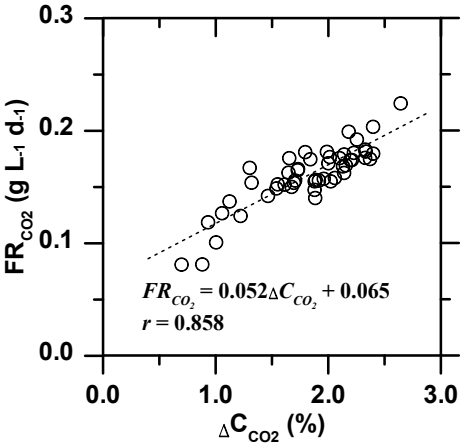


図 5 CO_2 固定速度と気相 CO_2 濃度差の関係

3.2 長期培養による生長への影響

微細藻類は、誘導期、対数増殖期および定常期と呼ばれる 3 つの成長段階を経て増殖するが [28]、濁度の増加に伴い光が TPBR のガラス管内部に届き難くなるため、定常期における細胞増殖は減速する。実際、濁度が 1800 程度に達した以降の生長は鈍化し、CO_2 固定速度や CO_2 固定効率は抑制された（**図 4B, 4C** および **4F**）。このため、TPBR から増殖した微細藻類の一定量を収穫し、培養初期の濁度となるようにフレッシュな培養液を加えることでバッチ試験を繰り返し行い、生長速度への影響を調査した。

バッチ試験の繰り返しによる藻体濃度の変化（増殖曲線）および比増殖速度と倍加時間の変化をそれぞれ**図 6A** および**図 6B** に示す。試験回数を重ねる毎に対数増殖期間は短くなり、試験終了時における藻体濃度は試験開始時のそれに比べ約 80%減少した。また、比増殖速度も低下するため、これを基に計算される倍加時間は約 1.7 倍まで増加したが、当初の目的としていた 3 ヶ月間の長期連続培養を達成することができた。

このような増殖曲線の変動は、微細藻類の壁面付着成長、低活性細胞や死細胞の沈着（バイオフィルム）、試験の不確実性などに起因する [29]。本システムは年間を通じての運用を想定しているが、培養の長期化は上記リスクを増大させることから、連続データの傾向を踏まえ、薬品による定期的な TPBR の殺菌あるいは培養液自体の総入れ替えが必要となる。

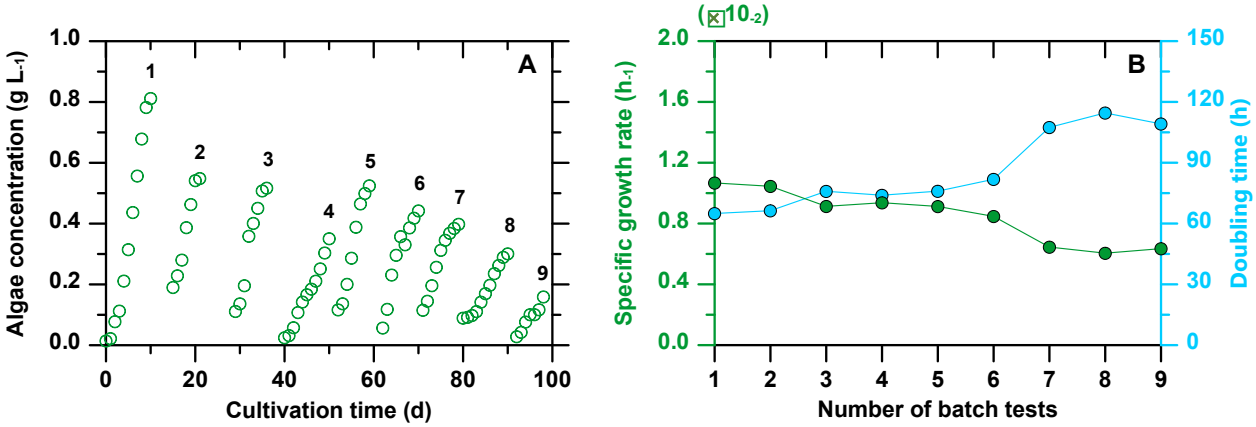


図 6 バッチ試験における藻体濃度(A)と比増殖速度および倍加時間(B)の変化
（図 6A 中の番号はバッチ試験回数を表す）

3.3 今後の課題

本研究では屋外培養実験の他に、ジャーファーメンターと LED 光源を使用したラボ実験により微細藻類の基本特性調査を行っている。ラボ実験でこれまでに観測された倍加時間は、屋外培養実験のそれに比べ約 1/10 と大幅に短く、この時間差は CO_2 固定量の増加を目指す上で大きな障害となる。これを解消すべく、これまでに得たデータを基に微細藻類の能力を最大限に引き出す TPBR の改良と培養条件についてコスト面も含めて検討を行う必要がある。また、出口戦略として、濁度上昇に伴って収穫により TPBR から排出される多量の微細藻類の活用候補先についても、調査を行う予定である。

4. おわりに

本稿では、オフィス労働者の生産性・ウェルネス向上及びカーボンネガティブ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、屋外における連続培養および CO_2 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 に供給された CO_2 は微細藻類の生長に使用されており、CO_2 吸収量と CO_2 固定速度との間には正の相関が認められることから、居室空気中から回収・濃縮した CO_2 についても効率よく生物固定できると考えられる。また、培養から収穫までのバッチ試験を繰り返し行ったところ、試験を重ねる毎に微細藻類の対数増殖期間は短くなり、藻体濃度の上限値も徐々に減少した。微細藻類の活性度が減少したことにより、倍加時間は初期状態に比べ 1.7 倍まで増加したが、CO_2 の生物固定は継続して行われ、当初目標としていた 3 ヶ月間にわたる長期連続培養を達成した。また、別途開発中の CO_2 吸脱着システムを組み合わせると、本システムは酸素リッチ／低 CO_2 濃度環境を必要とする建物、例えば教育機関やホテルなどへのニーズが期待できる。

以上より、微細藻類を用いた CO_2 固定化技術の確立の可能性が見出されたが、CO_2 固定量を増やす培養条件の探索や収穫した藻類の利用先調査など技術的な課題は多い。今後は、本システムの社会ニーズに沿った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) 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成果報告書参考資料 4(2016).
3) 気象庁 HP：https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
4) 高橋正好：二酸化炭素と人体，安全工学, 37(5), 352-357(1998).
5) 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).
6) 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).
7) 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_2 capture and new development trends. Energy Environ. Sci. 7(11), 3478–3518(2014).
8) Ooi Z.L., Tan P.Y., Tan L.S., Yeap S.P.: Amine-based solvent for CO_2 absorption and its impact on carbon steel corrosion: A perspective review. Chin. J. Chem. Eng. 28(5), 1357–1367(2020).
9) 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).
10) Alami A.H., Alasad S., Ali M., Alshamsi M.: Investigating algae for CO_2 capture and accumulation and simultaneous production of biomass for biodiesel production. Sci. Total Environ. 759, 143529(2021).

11) 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).
12) 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).
13) Mata T.M., Oliveira G.M., Monteiro H., Silva G.V., Caetano N.S., Martins A.A.: Indoor air quality improvement using nature-based solutions: Design proposals to greener cities. Int. J. Environ. Res. Public Health 18, 8472(2021).
14) 瀧本善之，村上仁一，山田文博：特開平 10-155478(1998).
15) Borowitzka M.A.: Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. J. Biotechnol. 70, 313-321(1999).
16) Richardson J.W., Johnson M.D., Outlaw J.L.: Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. Algal Res. 1, 93-100(2012).
17) Rebolloso Fuentes M.M., Garcia Sánchez J.L., Fernández Sevilla J.M., Acién 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).
18) 宮下英明，荒谷彰吾，井村綾子，沈元，石井健一郎，神川龍馬：次世代微細藻類バイオマス生産法とそれに適した微細藻類の収集・選抜，日本エネルギー学会機関紙えねるみくす, 96, 40-49(2017).
19) Thoré E.S.J., Schoeters F., Spit J., Van Miert S. Real-time monitoring of microalgal biomass in pilot-scale photobioreactors using Nephelometry. Processes 9, 1530(2021).
20) Binh T.N., Bruce E.R.: Low-cost optical sensor to automatically monitor and control biomass concentration in microalgal cultivation. Algal Res. 32, 101-106(2018).
21) 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).
22) 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).
23) 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).
24) Politaeva N.; Ilin I.; Velmozhina K.; Shinkevich P.: Carbon dioxide utilization using chlorella microalgae. Environments 10, 109(2023)
25) Fei T., Lin L., Li X., Yang J.-Y., Zhao J., Liu, L.: Modeling effect of bubbles on time-dependent radiation transfer of microalgae in a photobioreactor for carbon dioxide fixation. Photonics 9, 864(2022).
26) Chiu S.Y., Kao C.Y., Chen C.H., Kuan T.C., Ong S.C., Lin C.S.: Reduction of CO_2 by a high-density culture of *Chlorella sp*. in a semicontinuous photobioreactor. Bioresour. Technol. 99, 3389–3396(2008).
27) Cheng L., Zhang L., Chen H., Gao C.: Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor. Sep. Purif. Technol. 50, 324–329(2006).
28) Price K., Farag I.H.: Resources conservation in microalgae biodiesel production. Int. J. Eng. Tech. Res. 1(8), 49-56(2013).
29) Schoeters F., Spit J., Swinnen E., Cuyper A.D., Vleugels R., Noyens I., Miert S.V.: Pilot-scale cultivation of the red alga *Porphyridium purpureum* over a two-year period in a greenhouse. 35, 2095-2109(2023).

ABSTRACT

The concentration of CO_2 in building occupancies has been increasing owing to the recent rise in atmospheric CO_2 levels, in addition to the usual exhaled CO_2. If the concentration exceeds 1000 ppm, symptoms such as fatigue and drowsiness increase, which may significantly affect the decision-making and concentration abilities of the workers. Therefore, a prototype system for the biological fixation and reduction of CO_2 concentration in living spaces using microalgae with excellent photosynthetic ability and a tube-type photo-bioreactor was developed, and basic studies were conducted, particularly regarding cultivation. The results showed a positive correlation between the CO_2 fixation rate and the difference in gas-phase CO_2 concentration at the inlet and outlet of the reactor, indicating the amount of CO_2 fixed, as well as an increase in turbidity, confirming that the CO_2 was biologically fixed. Additionally, repeated batch tests from cultivation to harvest showed that the growth of microalgae slowed down and the doubling time increased with each successive test. Nevertheless, the initial goal of long-term continuous cultivation over three months was achieved.

【導入事例】

低温排熱を利用した吸着材蓄熱システムの導入事例※

大山孝政・谷野正幸・川上理亮
鎌田美志・中田拓司
福島史幸[*1]・千場悠之介[*1]

Introduction Example of Adsorption Thermal Storage System Using Low-temperature Exhaust Heat

Takamasa Oyama・Masayuki Tanino・Yoshiaki Kawakami
Haruyuki Kamata・Takuji Nakata
Fumiyuki Fukushima・Yuunosuke Senba

我々は低温排熱が利用できる吸着材蓄熱システムを開発してきた。このシステムでは吸着反応熱を利用するため、原理的に放熱ロスはなく、高密度な蓄熱が可能である。2014 年から実験的に吸着材蓄熱槽の蓄放熱特性を検討した。また、定置型蓄熱システムとオフライン熱輸送システムの実証試験を実施してきた。2023 年 12 月にはオフライン熱輸送システムを稼働中の工場に実導入した。本報では、吸着材蓄熱システムの概要、吸着材蓄熱システムの開発、及び導入事例について紹介する。

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラルに向けて、水素・電化に加えて、排熱利用が重要になってきている。しかしながら、我が国の既存の工場から放出されている 200℃未満の排熱は**図 1** の調査結果[1)]の通り、大部分が未利用のまま捨てられているのが現状である。高温排熱は発電・蒸気利用が推進されているが、200℃未満の排熱は発生場所における用途が限定されることから、使い道が限られてきた。そこで、当社は**図 2** に示す低温排熱を空間的に異なる利用先までトラック等で運搬するオフライン熱輸送システムに着目した。さらに、当社は、従来型のオフライン熱輸送システムの課題解決のため、産業技術総合研究所が 2008 年に開発した吸着材ハスクレイをベースに、2014 年から(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業において、100℃程度の低温排熱が利用可能な吸着材蓄熱システムの研究開発を共同実施してきた[2-7)]。本報では、吸着材蓄熱システムの概要、吸着材蓄熱システムの開発及び導入事例について紹介する。

※ 本論文は、文献 2)～7)を加筆修正したものである。
*1 エンジニアリング事業部　産業設備 1 部

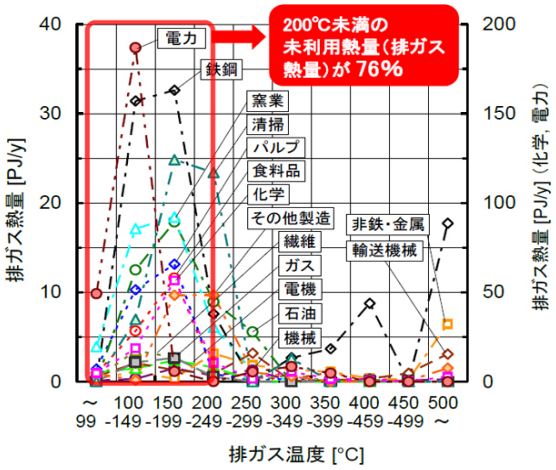


図 1　工場での廃熱量 [1)]

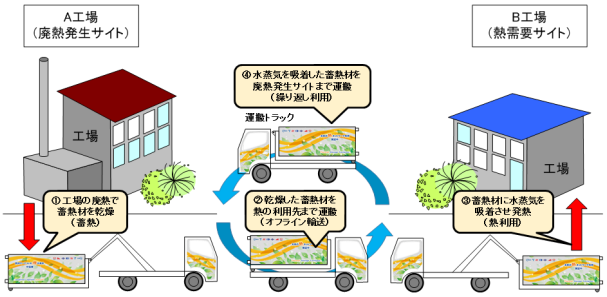


図 2　オフライン熱輸送システムのイメージ図

2. 吸着材蓄熱システムの概要

従来型のオフライン熱輸送システムでは、糖類等の融解熱を利用する固液相変化材（以下、PCM）を蓄熱材として用いているが、蓄熱密度が低いため重量や容積が大きくなること、PCM の固液相変化時の潜熱を利用するため蓄放熱温度が PCM の相変化温度（融点）に限定されること、輸送時には蓄熱槽からの放熱で PCM が一部相変化し潜熱ロスが発生すること等が課題となっていた。そこで、これらの課題を解決するため、我々は吸着材蓄熱システム(以下、当システム)の開発に取り組んできた。**図 3** に当システムの蓄放熱運転を模式的に示す。蓄熱時は熱（排熱）によって製造された高温空気を、粒状の吸着材が充填された蓄熱槽に供給し、吸着材を乾燥させる。放熱時は湿潤空気を蓄熱槽に供給し、吸着材に水分を吸着させて発熱させ、高温低湿空気を製造する。このように蓄熱時は水分脱着、放熱時は水分吸着で、蓄熱利用というよりは水分移動に伴う発熱である。よって、原理的に外気との温度差に係る熱ロスは発生しない。また、蓄熱槽内へ水分の流入がないように密閉できれば長期間の保存も可能である。相変化で蓄熱・放熱する方式ではないので、熱利用温度域が限定されないといった特長も有している。なお、放熱運転にて水分を吸着しきった吸着材は、再度蓄熱運転を行い乾燥させることで繰り返し利用が可能である。**図 4** に当システムで使用している吸着材の外観と使用温度帯を示す。当システムで使用している吸着材はハスクレイとゼオライトの 2 種類で、排熱の温度帯によって使い分けている。

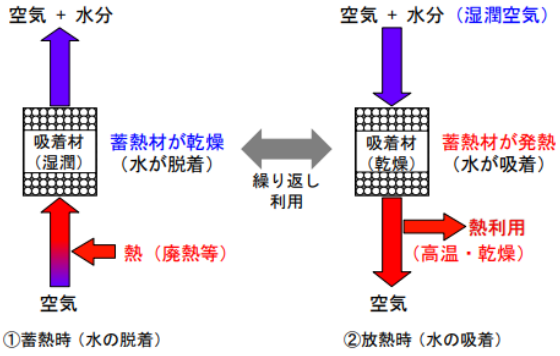


図 3　吸着材蓄熱システムの蓄放熱運転

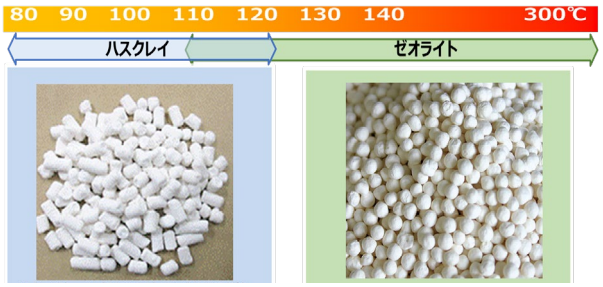


図 4　吸着材の種類と使用温度帯

3. 吸着材蓄熱システムの開発

3.1 小型装置を用いた基礎的な特性の確認

2014 年～2015 年の NEDO 助成事業(インキュベーション研究開発フェーズ)では、**図 5** に示す 10kg 級のハスクレイ造粒体での蓄熱材充填槽を用いて、水蒸気の吸脱着の基礎的な特性等を検討した。その結果から、従来型のオフライン熱輸送システムの 2 倍以上となる蓄熱密度 500 kJ/L 以上の実現性を確認した[2,3]。また、ここで取得したデータを基に、**図 6** に示す設計ツールを開発した。この設計ツールは、数値解析モデル[2]を表計算ソフトベースでツール化したものである。

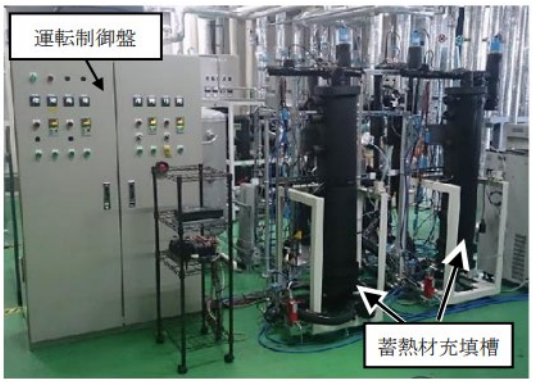


図 5 試験装置の外観

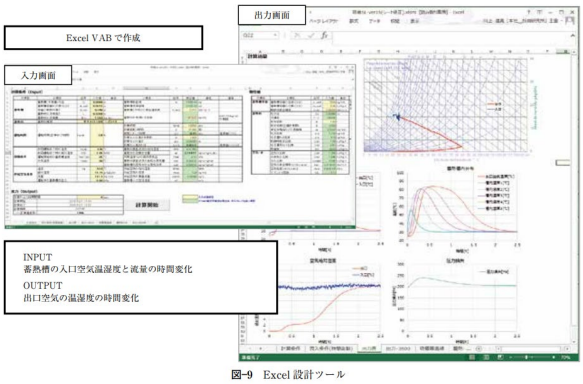


図-9 Excel 設計ツール

図 6 吸着材蓄熱システムの設計ツール

3.2 蓄熱槽の実際の工場での性能評価

2015 年～2017 年の NEDO 助成事業(実用化開発フェーズ)では、蓄熱槽内の風量分配、圧力損失 1kPa 以下と蓄熱密度 500 kJ/L 以上を同時に達成できる、2ton 級蓄熱槽(**図 7**)の内部構造等の仕様を確立した。また、**図 7** に示すトラックを用いて、日野自動車羽村工場(東京都羽村市)内にある塗装工程での排気脱臭装置からの排熱を蓄熱した後、日野自動車新田工場(群馬県太田市)の生産プロセスで放熱する実証試験を実施した[4]。この実証試験から、蓄熱槽およびシステムの蓄放熱特性を評価し、実際の工場における動力設備の削減効果を確認した。

図 7 トラック搭載時の 2ton 級蓄熱槽の外観

3.3 定置型及びオフライン熱輸送型の実証試験

2018 年～2020 年の NEDO 助成事業(実証開発フェーズ)では、石原産業四日市工場(以下、四日市工場)において定置型蓄熱槽での産業プロセスに対する実証試験と、日野自動車羽村工場(以下、羽村工場)周辺においてオフライン熱輸送型での実証試験を行った[5-7]。各実証サイトに構築した設備の設計には、前述の設計

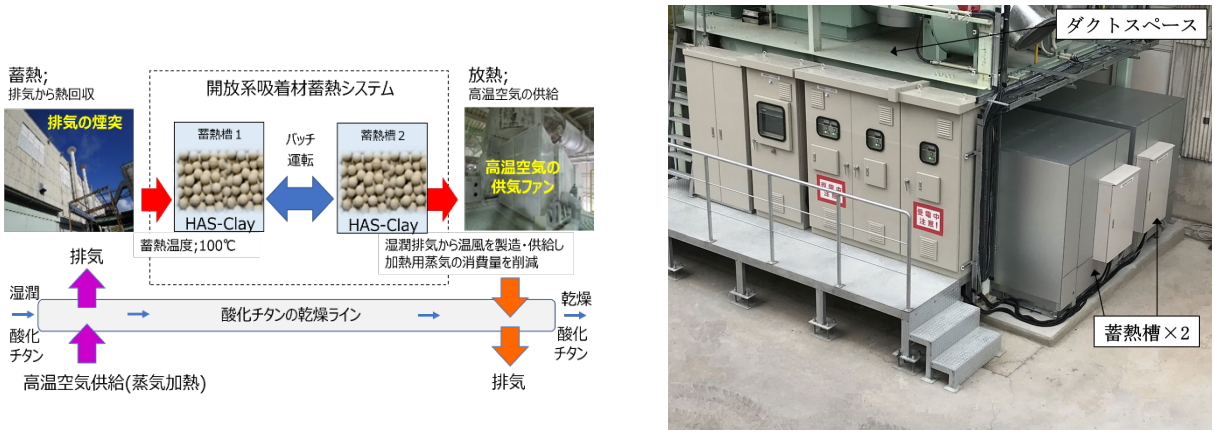
ツールを使用した。各実証サイトのスケールイメージとして、蓄熱槽に充填し使用された蓄熱材量を**表 1** に示す。

表 1 各実証サイトでの蓄熱槽への蓄熱材量

種類	蓄熱	放熱	蓄熱材量 ton	台数
定置型 蓄熱システム	石原産業四日市工場 産業プロセス		2.2	2
オフライン熱輸送 型蓄熱システム	日野自動車 羽村工場 CGS	羽村市 スイミングセンター	5.5	1
		日野自動車羽村 工場塗装工程	2.2	1

(1)定置型蓄熱システムの実証試験

図 8 (a)、(b) に、四日市工場における実証試験の概要を示す。酸化チタン製造工程における乾燥ラインで実証試験を行った。乾燥ラインからの 100℃以下の排気から排熱を回収・蓄熱し、乾燥ラインに必要な熱源負荷低減のために、ラインへの給気に蓄熱槽からの放熱空気を供給した。2 つの蓄熱槽を設置し、乾燥ラインの運転と排熱の放出状態に合わせて、それぞれ蓄熱／放熱を切り替えるバッチ式の運転を行った。その結果、ヒートポンプのような蓄熱温度以上に放熱温度を昇温する機能を付加できること、バッチ運転制御によって連続的・安定的な熱供給を確認した。



(a) 概要　　(b) 外観

図 8 定置型蓄熱システムの実証試験

(2)オフライン熱輸送型蓄熱システムの実証試験

図 9 に、羽村工場周辺における実証試験の概要を示す。羽村工場内のコージェネレーションシステム(CGS)の排熱を蓄熱し、羽村市スイミングセンターに高温低湿空気を供給して既設ボイラ燃料の消費量を削減した。また、羽村工場内の塗装工程の産業空調設備にも高温低湿空気を供給して空調機で使用する冷水と温水の消費量を削減した。

図 10 に蓄熱サイトの実証設備の系統図を示す。羽村工場の CGS の蓄熱設備では、100℃以上の排ガスと 88℃のジャケット温水から熱回収し、蓄熱材に蓄熱した。

図 11 (a)、(b) に羽村市スイミングセンターの実証設備の系統図と蓄熱槽と搬送用の大型トレーラーの外観をそれぞれ示す。この蓄熱槽を 20 フィート海上コンテナ用トレーラー台車に積載し、CGS 設備から約 2km 離れた羽村市スイミングセンターへ大型トレーラーにより輸送した。輸送後、蓄熱槽にプール室内の湿潤空気が供給され、蓄熱槽内での吸湿・発熱反応で昇温した空気は、間接熱交換器を介してボイラ循環水やボイラ給水を昇温した。その結果、既設ボイラ燃料の消費量が削減された。このように顕熱回収された空

気は常温低湿状態になったため、プール天井内の換気やプール室内の暖房のために利用された。とくに、プール室内とプール天井内では結露防止の効果が期待され、実際に結露が防止されたが、それを経済的に評価することは難しかった。

図 12 (a)、(b) に羽村工場内の塗装工程の産業空調設備における実証設備の系統図と蓄熱槽と搬送用の小型けん引車の外観をそれぞれ示す。 CGS 設備から数百 m 離れた塗装工程の空調設備までは、小型けん引車で運搬した。この小型けん引車は通常、場内で資材や完成部品の運搬用に使用されている。空調対象はフレッシュブースとリサイクルブースに分けられ、図では模式的に示している。外気を既設の外調機で温湿度を調節し、フレッシュブースに給気する。このフレッシュブースの排気は、塗装ミストなどを除去するためブース下部で散水され、相対湿度が 90%RH と高湿になっている。そのため、フレッシュブースの排気をリサイクル空調機で冷却除湿・加熱し、リサイクルブースに給気する。リサイクル空調機の内部には、各種フィルター、冷水コイル、温水コイルが設置されている。図のように今回設置した放熱設備では、高湿空気であるフレッシュブースの排気の一部を蓄熱槽に供給し、槽内で吸湿・発熱反応により昇温した高温低湿度の空気がリサイクル空調機に戻された。実証試験の結果、エネルギー費は導入前と比較して 57%のコストダウンとなることを確認した。本実証設備の構築費用に基づき算出した単純投資回収年数は、8 年以下になる見通しを得た。ただし、運用コストには輸送の人件費は含まれていない。

定置型蓄熱システムやオフライン熱輸送システムの実証試験では、夏季・中間期・冬季におけるの経済性評価のための運用データや省エネルギー効果量等のデータを蓄積した。また、設計ツールを用いて予測した蓄放熱特性と実測した蓄放熱特性を比較した結果、当数値解析モデルは設計ツールとして活用できると判断した。

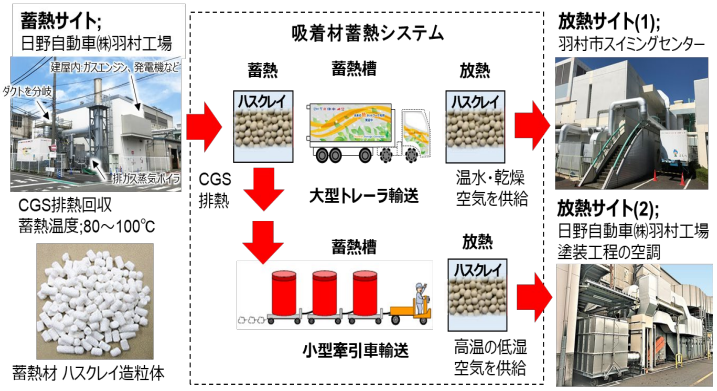


図 9 オフライン熱輸送型実証装置

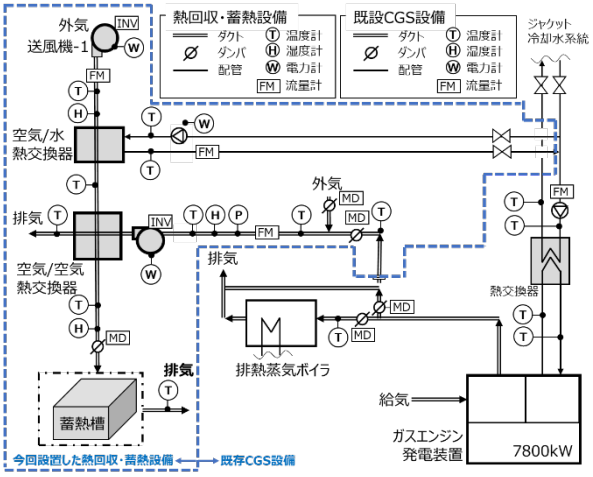
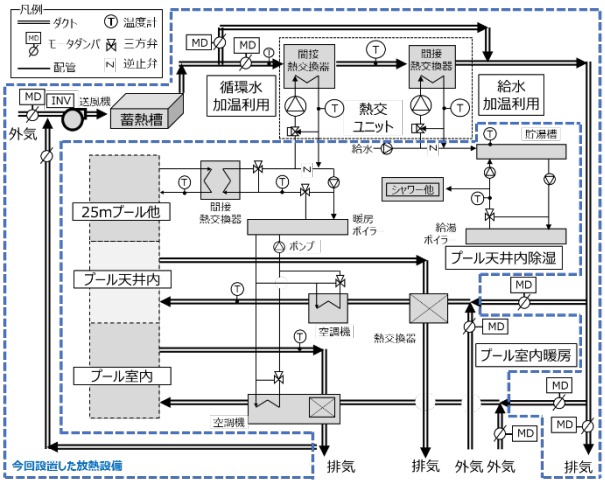


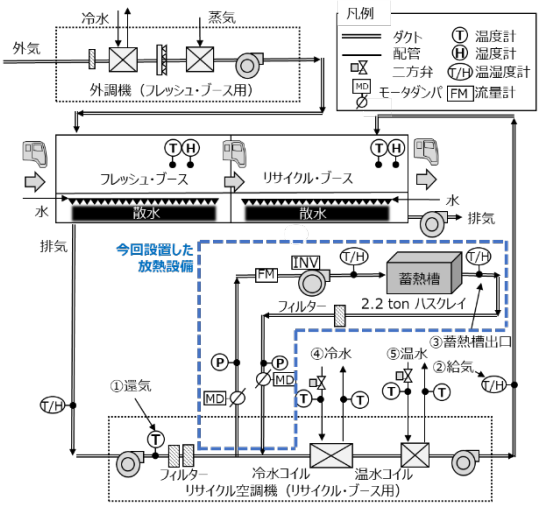
図 10 蓄熱サイトの実証設備の系統図



(a) 概要

(b) 蓄熱槽と搬送用大型トレーラー

図 11　羽村市スイミングセンターの実証設備



(a)系統図

(b) 蓄熱槽と搬送用小型けん引車

図 12　塗装工程の空調設備および実証設備

4. 吸着材蓄熱システムの導入事例

4.1 建物概要

図 13 に建物外観と建物概要を示す。TDK の創業者齋藤憲三氏の出身地である秋田地区は、世界 30 か国以上に事業を展開している TDK の中心となる製造拠点である。中でも、本荘工場西サイトは、身の回りのあらゆる電子機器で使用される積層セラミックチップコンデンサの主要製造拠点で、従業員約 2、000 名が在籍する国内最大規模の製造・開発拠点である。

導入場所	TDKエレクトロニクス ファクトリーズ株式会社 本荘工場西サイト
所在地	秋田県由利本荘市
竣工	2008年3月
敷地面積	184,637m²
延床面積	65,703m²

図 13 建物外観と建物概要

4.2 導入システムの概要

積層セラミックチップコンデンサは、誘電体(セラミックシート)と内部電極(金属ペースト)が 100～1000 槽積み重ねられており、この製造過程において、セラミックシートを乾燥させる工程がある。乾燥にはボイラで作った蒸気の熱で加温した空気を利用しており、乾燥後の排気は熱燃焼式排ガス処理装置にて燃焼処理し、大気に放出していた。この製造工程は 24 時間、年間 364 日稼働しており、蓄熱燃焼式排ガス処理装置からの排気(100℃程度)も 24 時間、年間 364 日、大気に放出していた。そこで、蓄熱燃焼式排ガス処理装置からの排気をセラミックシートの乾燥用供給空気の加温補助に有効活用して、蒸気使用量及び CO_2 排出量を削減することを目的として、今回新たに顕熱熱交換器を設置した。顕熱熱交換器を使用して蓄熱燃焼式排ガス処理装置の排気と外気を熱交換し、昇温した外気をセラミックシートの乾燥工程へ供給することで蒸気の使用量を削減する。さらに、それでも使い切れない排気は吸着材蓄熱システムを活用して、蓄熱槽に一旦熱を蓄熱して、工場内で近接するクリーンルームへトラックで熱輸送し、外調機の加温の補助に使って蒸気使用量及び、CO_2 排出量を抑制するシステムとした。**図 14 (a)** にシステムの概要、**(b)** に蓄熱サイトの外観、**(c)** に放熱サイトの外観、**(d)** に搬送トラックの外観をそれぞれ示す。蓄熱槽は底辺 2.7m×1.7m の矩形型で高さは 1.4m の直方体であり、その内部に蓄熱材ゼオライトが乾燥質量で 1.6ton 充填されている。車両は積載荷重 4ton の汎用的な車種で、車両のアームで蓄熱槽の積み下ろしが可能な脱着装置付きコンテナ車とした。この設備は 2023 年 12 月末日に竣工し、2024 年 2 月から運用を開始している。顕熱熱交換器による熱回収は、24 時間、年間 364 日、吸着材蓄熱システムによる熱回収は、1 日 2 回、中間期～冬期に運用している。本設備導入による CO_2 削減効果は、年間 249 ton-CO_2 と試算しており、本荘工場西サイト全体における CO_2 排出量の約 5%に相当する。

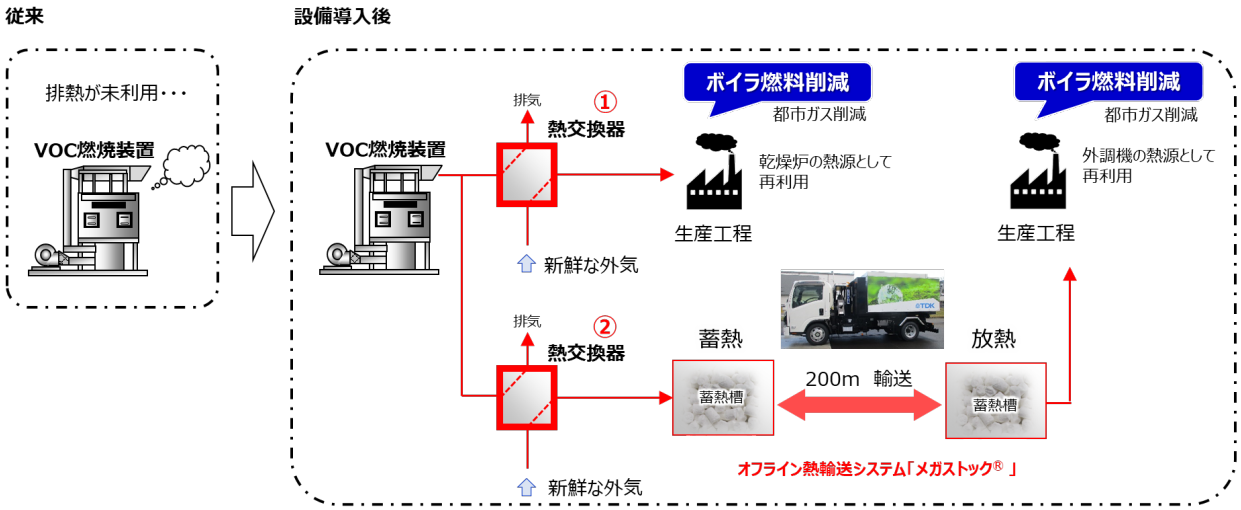
また、**図 15** に示すように、今後、TDK では、本荘工場西サイトで蓄熱した熱を、事業所内での利用だけでなく事業所外・地域へ供給する等、地域全体での熱利用を検討している。当システムは工場排熱などの広域熱利用システムとして活用が期待できることから、排熱の有効利用を検討する顧客へご紹介を続け、今後の排熱利用を広げることで脱炭素へ貢献していく予定である。

5. おわりに

以上のように、石原産業四日市工場や日野自動車羽村工場周辺での実証試験を行い、定置型蓄熱システムやオフライン熱輸送システムの蓄放熱特性を確認した。また、小型装置の実験データを基に作成した設計ツールが実際に活用できることを確認した。

2020 年に当システムを販売開始して以降、工場や自治体の担当者から多くの問い合わせを頂いており、排熱利用の機運の盛り上がりを実感している。当社は、これらの問い合わせに対し、上述した設計ツールを用いて、提案活動を行っており、その提案活動の中から TDK 本荘工場西サイトに実導入した。

今後は、当システムを活用した新たな取り組みも見据えつつ、継続して提案活動を行い、当システムの導入を通じて 2050 年のカーボンニュートラルに貢献していきたい。



(a) 系統図

(b) 蓄熱サイトの外観

(c) 放熱サイトの外観

(d) トラックの外観

図 14　TDK 本荘工場西サイト　導入システムの概要

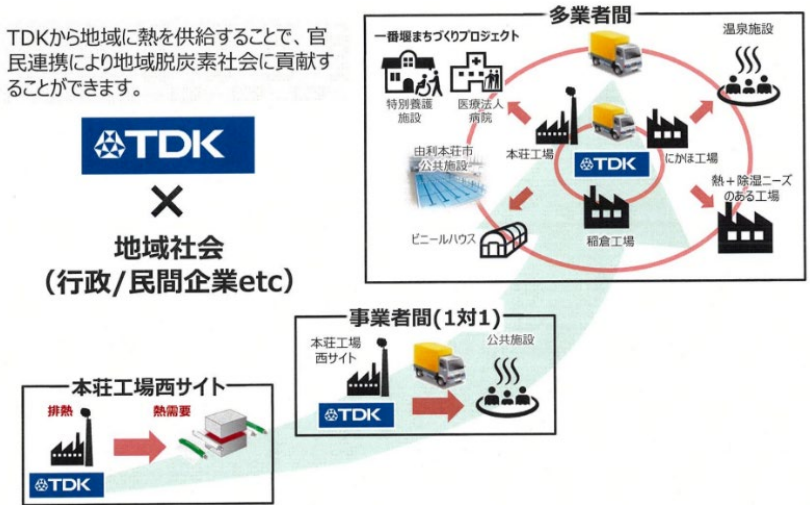


図 15　今後の展開イメージ

謝辞

NEDO 助成事業の成果は、（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構助成成事業「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」において、高砂熱学工業㈱、石原産業㈱、東京電力エナジーパートナー㈱、森松工業㈱、日野自動車㈱、(国研)産業技術総合研究所が共同実施した実証開発の結果、得られたものである。関係各位及び実証場所をご提供頂いた羽村市様に御礼申し上げます。

また、TDK 本荘工場西サイトの小野氏、高橋氏、榊原氏には、導入に際し適切なご助言を賜りました。御礼申し上げます。

文　献

1) 15 業種の工場設備の排熱実態調査報告書, NEDO,2019.3.4,https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101074.html
2) 鎌田ら：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(2020-8).
3) 宮原ら：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自の発熱量について－, 空気調和・衛生工学会論文集, 45-285(2020-12).
4) 川上ら：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(2021-5).
5) 川上ら：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 定置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(2021-12).
6) 鎌田ら：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 オフライン熱輸送システムの実証試験－, 空気調和･衛生工学会論文集, 47-301(2022-4).
7) 鎌田ら：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(2022-11).

ABSTRACT

We have developed the adsorption thermal storage system, that can utilize the low-temperature exhaust heat. Since 2014, experimentally, we have investigated the charging and discharging characteristics in the adsorption thermal storage tank. We also conducted demonstration tests of a stationary heat storage system and an off-line heat transport system. In December 2023, the off-line heat transport system was installed in a plant in operation. In this paper, the outline of adsorption thermal storage system, the development of adsorption thermal storage system and case study were described.

高砂熱学イノベーションセンター報　No. 38　2024

発行日　2025年5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ィング)	☎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