

No. **36**

2022

■ **高砂熱学** ■

■ **イノベーションセンター報** ■

高砂熱学イノベーションセンター報

No. 36 2022

目 次

【巻頭言】

カーボンニュートラルに向けて熱の脱炭素化、徹底した省エネと水素国際サプライチェーンの実現を急げ！！

(東京工業大学 柏木孝夫) 1

【イノベーションセンター特集】

エネルギー自立型サステナブル研究施設

1. 竣工2年後の ZEB 達成状況の評価と対策

(清水昭浩・平原美博・相澤直樹・羽鳥大輔・武藤友香・田辺新一) 3

2. 地下水熱利用システムとバイオマス CHP 排熱の運用実績

(大迫孝輔・相澤直樹・青山剛士・清水昭浩・羽鳥大輔・武藤友香) 10

3. 外調機の除湿性能評価

(柴田克彦・平原美博・清水昭浩・羽鳥大輔・武藤友香・田辺新一) 15

4. 執務エリアへの置換空調導入検証と暖房対策

(木村健太郎・相澤直樹・平原美博・羽鳥大輔・武藤友香・田辺新一) 23

5. 天井放射パネルの個別制御による省エネルギー性と快適性

(鈴木美穂・相澤直樹・柴田克彦・清水昭浩・武藤友香・竹原大暉) 32

6. DEVELOPMENT OF A GRID INDEPENDENT ENERGY SYSTEM USING ENERGY SUPPLY AND DEMAND PREDICTION (Part 3) Designing Model Predictive Control by Energy Simulation

(Yuki MATSUNAMI, Yuan GAO, Shohei MIYATA, Yasunori AKASHI,
Katsuhiko SHIBATA, Yoshiaki KAWAKAMI) 38

【技術論文】

1. FEASIBILITY STUDY ON COMFORTABLE SPACE ENVIRONMENT UNDER LOW GRAVITY

(Katsuhiko SHIBATA, Tai NAKAMURA) 46

2. リキッドデシカントユニットにおける加湿性能の基本特性の把握

(澁澤朱音・馬場大輔・川上理亮・谷野正幸・三宅友香・原田政利) 56

3. バイオマスボイラによる低コスト汚泥減量化技術実証研究

(鎌田美志・川上健志) 64

4. 廃プラスチックエネルギーの高度有効利用

(中田拓司・谷野正幸・成瀬一郎・堀田幹則・長沼宏・幡野博之・野田英彦・小山寿恵・稲田孝明) 69

【レビュー】

CO₂ 回収・利用技術とカーボンプライシングの動向

(増田正夫・宮下真一・太田宗吾) 84

【技術紹介】

グリーン水素活用の防災機能を有するマイクログリッド

(石塚朋弘・加藤敦史・貝塚朋二) 94

カーボンニュートラルに向けて熱の脱炭素化、 徹底した省エネと水素国際サプライチェーン の実現を急げ！！

当社顧問
東京工業大学 科学技術創成研究院
特命教授・名誉教授
工学博士 柏木 孝夫

Tokyo Institute of Technology
Takao Kashiwagi



パリ協定の発効を機に世界の先進国では、「2050年カーボンニュートラル」への潮流が具現化しだした。それを受け我が国は、2030年を見据えた「第6次エネルギー基本計画」を2011年に策定した。総発電量に占める原子力の割合を20～22%で維持する一方、再生可能エネルギーの比率は2018年時点の計画の22～24%から36～38%に高める目標を掲げた。この実現は容易でないことは周知である。世界の先進国やEUのような地域圏では、一次エネルギーの選択肢を維持しながら、国益をかけた基本戦略となるエネルギーミックスを提示しつつある。通常、カーボンニュートラルの実現には、まず省エネ、電化、水素化にあるといわれている。

我が国は、30年時点で温室効果ガスの削減割合を13年比46%としたが、さまざまな足かせの中、再エネ比率を大幅に上げざるを得なかった。しかし、カーボンニュートラルに向け、再エネ比率を上げさえすれば良いというものではない。昨今、政府が対策に躍起になっている一つに電力需要のピーク時に供給が不足するという問題もある。再エネ電源の増加と電力市場の自由化に伴い石炭火力や旧型火力発電所が廃止され、必要な時に天候に左右される再エネが十分な稼働をしない場合、ネットワークの需給バランスが崩れ大規模停電を引き起こす可能性がある。その変動する調整をLNG（液化天然ガス）発電に期待をかけていたが、ロシアによるウクライナ侵攻に端を発する市場の混乱・資源高が直撃した。加えてサハリンからのLNG問題もロシアの思惑一つで予測できない危うさとなっている。

日本のカーボンニュートラルは、このような複雑な事情をしっかりと捉えて、トランジション（移行期）戦略を丁寧に進めていく必要があると考える。2021年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画には、水素やアンモニアが加えられ、選択肢が増加したことは特筆に値する。

さて、まずやるべきことは、省エネであり、空調エンジニアリングが牽引すべき最も重要な課題である。それがリアリティかつ即効性のある脱炭素化への打ち手である。特に、日本の最終消費エネルギーの4分の3を占める熱分野での省エネは大きな効果をもたらす。再エネ電源へのシフトもちろん必要だが、前述したように特に自然変動性再エネの利用には、変動する発電量への対応の課題がある。工業国家の日本では、安定したエネルギー供給は必須であるので、足元では省エネに加え、それらの調整電源ともなり得るコージェネレーションシステムなどの低炭素型エネルギー高度利用システムの導入が最も現実的な解の一つと言える。メーカー各社は、既存の技術にさらに磨きをかけていることも事実だ。

同時に燃料そのものを脱炭素化していく必要がある。水素や合成燃料の社会実装・普及拡大に取り組みなければならない。2021年カーボンニュートラル社会の実現に向けて社会実装を見据えた民間研究開発を支援する2兆円の「グリーンイノベーション基金」が公的資金で設けられ、水素や合成燃料関連等に1兆円弱が分配された。さらに20兆円の政府主導のGX基金も用意されている。

水素は、その由来に色を付けて分類している。再エネ電力で水電解するような水素は、グリーン水素で、化石燃料を蒸気メタン改質や熱分解によって製造された水素は、グレー水素と呼ばれている。グレー水素の製造過程から排出されるCO₂を回収・固定化すれば、ブルー水素となる。目安としては、1kgの水素製造に対して、排出するCO₂の量を2～3kg以下に抑えることが条件となりそうだ。グリーン水素が最もクリーンな水素であるが、コストを考えるとまずはブルー水素の社会実装から目指すべきだ。エネルギー需給構造の転換には、長い時間と膨大なコストに加え、

S+3E*のバランスを保ちながら進めるという極めて困難な課題と丁寧に向き合わなければならない。すでにオーストラリアの褐炭から、水素を製造し、CO₂は地中へ固定し、日本へ水素を運搬する実証プロジェクトが始まっている。今後、水素を受け入れる港湾地域では、水素ネットワークによる新たなエネルギー供給システムが構築されると考えられる。また、水素のメリットの一つは、CO₂と合成させれば、都市ガスの原料であるメタンになるということである。つまり、既存の都市ガスのパイプラインを活用して、水素由来の「e-methane（メタネーション）」を供給する事で、余分なコストを掛けずに、カーボンニュートラル化していく事ができる。また、同様に水素から航空機や車両の合成燃料「e-fuel」も製造可能で、「e-fuel」の開発は日本の成長戦略の柱になり、将来的には、合成燃料輸出国になる可能性もある。

日本の既存技術やインフラを活用できる水素社会の実現を世界に先駆けて目指すことが、日本の急務であり、国には、水素サプライチェーン構築へ向け、例えば環太平洋諸国を取り込んだサプライチェーン実現等の様々な国際的施策展開を求めたい。

ユーザーは、引き続き徹底した省エネの推進を実行しつつ、CO₂の絶対量削減を目指し、同時に、メーカーやエネルギー事業者は、水素の利活用に向けた技術開発やDR、VPPを視野に入れた新しいイノベーションを駆使したビジネスモデルの多様化を進めていけば、その先に、明るい日本の未来があると確信している。

本年、御社が創業100周年を迎えられることに敬意を表しつつ、次の100年に向かって益々のご発展を大いに期待しています。

* S+3E：安全性（Safety）＋安定供給（Energy security）・経済性（Economic efficiency）・環境（Environment）

エネルギー自立型サステイナブル研究施設

—竣工2年後のZEB達成状況の評価と対策—※

清水昭浩・平原美博・相澤直樹
羽鳥大輔*¹・武藤友香*¹・田辺新一*²

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center

- Evaluation of ZEB Achievement Status and Countermeasures Two Years after Completion -

Akihiro Shimizu・Yoshihiro Hirahara・Naoki Aizawa
Daisuke Hatori*¹・Yuka Mutoh*¹・Shin-ichi Tanabe*²

高砂熱学イノベーションセンターは、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、2022年度で3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、再生可能エネルギーや蓄電池の運転状況を含めた竣工後2年間の建物の供給/消費エネルギーの運用状況の推移を評価した。これらの運用実績値より、敷地全体では Nearly ZEB、オフィス棟では『ZEB』を達成、CO₂排出量に関してはカーボンニュートラルを実現していることを確認した。

1. はじめに

本施設は、既報²⁾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、再生可能エネルギーを有効に活用するために、竣工1年後に大容量蓄電池の増設（写真1参照）を行い、2021年4月より運用を行っている。表1に本施設の再生可能エネルギー及び蓄電池の仕様を示す。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、蓄電池の増設前後での建物の年間供給/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ガス化発電（以下、バイオマス発電）や太陽光発電の運転状況、更にはZEBの達成状況やCO₂排出量の評価を行ったので報告する。



写真1 蓄電池設置状況

表1 再生可能エネルギー及び蓄電池の仕様

	種類	能力
再生可能エネルギー		
新設	太陽光発電	発電量 約200kW
	バイオマス ガス化発電	発電量 40kW/台 × 2台 排熱量 200kW/台
蓄電池		
新設	リチウムイオン 電池	入出力 216kW 蓄電容量 430kWh
	リチウムイオン 電池	入出力 429kW 蓄電容量 2,964.8kWh
増設	NAS電池	入出力 200kW 蓄電容量 1,200kWh

※本論文は、2022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, Mitsubishi Jisho Design Inc.、*2 早稲田大学, Waseda University

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に竣工後2年間の受電電力量及び供給電力の推移を示す。竣工後1年目の2020年度に比べて2年目の2021年度は実験装置の稼働が増えたこともあり、全電力量は639.4MWhから798.2MWhと25%増加しているが、受電電力量は245.8MWhから162.2MWhと約2/3まで減少しており、大容量蓄電池の増設効果が表れている。図2に示すように電力構成比率も受電電力の比率が38%から20%まで減少し、その分バイオマス発電の比率が上昇している。竣工直後は蓄電池が小容量であったため、蓄電池が満蓄となった場合は太陽光の出力抑制制御が働くとともに、バイオマス発電も負荷の少ない休日は停止していたが、蓄電池増設後はこれらの出力抑制を削減でき、再生可能エネルギーをより有効に使えるようになった。

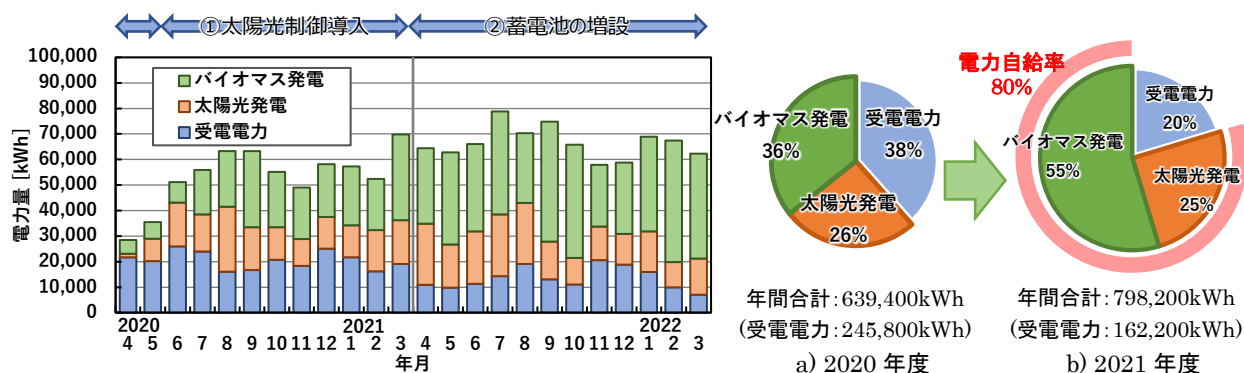


図1 年間の受電電力量及び供給電力の年度比較

図2 電力構成比率の年度比較

2.2 バイオマス発電の運転状況

図3にバイオマス発電の発電量の推移を示す。年間の発電量は、目標値560,000kWh(80kW×7,000h相当、目標値の設定に関しては文献3)参照)に対して2020年度は41%、2021年度は78%の出力であった。2021年度で目標値に対して開きが大きい8月、12月は長期休暇期間中、11月はトラブル発生により約半月間バイオマス発電機を停止したためである。発電機の年間稼働時間を上げるためには、特にトラブルによる停止時間の削減が大きな課題であり、現在トラブル要因解析による再発防止策の実施、特に木質チップの含水率管理の徹底を行っているところである。

表2にバイオマス発電機のエネルギー効率のメーカー値と、代表日(2021年4月15日)の運用データから求めた2台の発電機の実績値を示す。実績値の算出では燃料の木質チップの有効熱量は18.7MJ/kg(メーカーカタログ値)を用いた。メーカー値の発電効率22%、熱利用を含めた総合効率78%に対して、実績値では2台平均で発電効率22.5%、排熱利用率54.0%、総合効率76.4%であり、概ねメーカー仕様値と同等の性能であることを確認した。

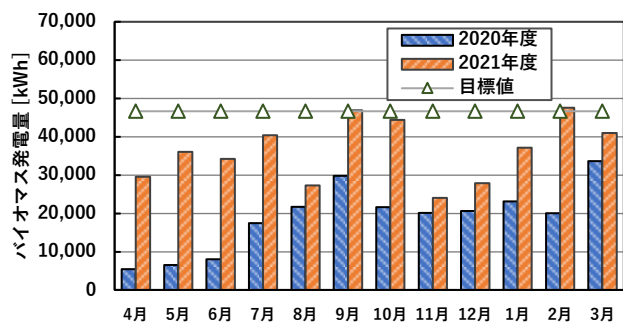


図3 バイオマス発電量の推移

表2 バイオマス発電機のエネルギー効率

バイオマスCHP	メーカー仕様値	実績値(2021年代表日)		
		CHP No.1	CHP No.2	平均
電気エネルギー [%]	22	21.9	22.9	22.5
熱エネルギー [%]	56	55.0	52.9	54.0
総合効率 [%]	78	76.9	75.8	76.4
熱/電気比率	2.5	2.51	2.31	2.4

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。年間の発電量は、目標値の222,000kWh（全負荷相当時間で約1,100h）に対して2020年度は74%、2021年度は90%であった。2021年度5、10、2、3月で太陽光発電量が目標値を下回っているのは、この期間、バイオマス発電主体の運転を続けたため蓄電池が満蓄電となり、太陽光発電の出力抑制制御が働いたためである。出力抑制を考慮に入れると2021年度はほぼ想定した通りの運転結果と言える。

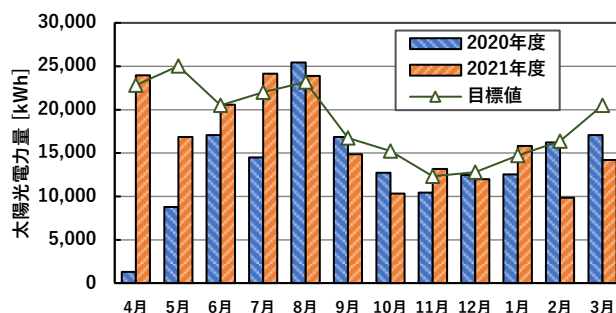


図4 太陽光発電量の推移

2.4 年間消費電力量

図5に負荷単位の電力量より算出したオフィス棟及びラボ棟（設備展示棟等を含む）の消費電力量の推移を示す。2021年度は執務室や来客対応の施設であるオフィス棟の消費電力量は、2020年度に比べて約21%減少しているが、実験を行うラボ棟では実験装置の実装、稼働開始に伴い消費電力量が43%増加となり、敷地全体では10%の増加となった。また、2021年度は蓄電池を増設したため、充放電に伴う蓄電ロスや蓄電池の補機に係る電力が、全体の消費電力量の約14%を占める結果となった。なお、図中の折れ線の供給電力と積上棒グラフで約5%の差が見られるのは、トランスや送電での損失や計測誤差によるものとする。

図6にオフィス棟の系統別の年間電力消費量の2020年度と2021年度の比較を示す。系統の分類は、文献4)のBESTプログラムの計算結果に倣う。2020年度は後掲の図10に示すように設計試算値と実績値の差が、空調熱源、水搬送、空気搬送の項目で大きかったため、2021年度は外気導入量や外調機の運転時間の見直し、地下水の汲上ポンプの運転方法の見直しを行った。その結果、空調熱源、空調空気搬送の動力が約30%、汲上ポンプを含む空調水搬送の動力が47%削減できた。また、照明についても2020年10月に行った照明出力の調整により、2021年度は電力消費量を12%削減することができた。

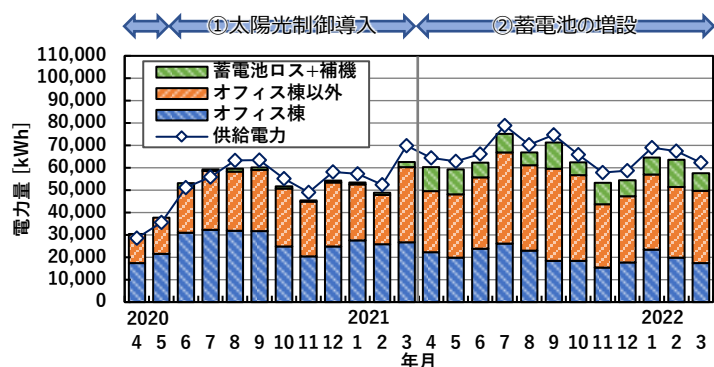


図5 年間の消費電力量の年度比較

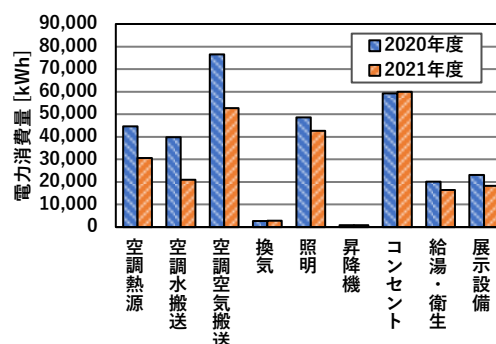


図6 オフィス棟の系統別
年間電力消費量の比較

3. 蓄電池増設の効果の評価

3.1 蓄電池の運転状況

本施設では冒頭で述べたように 2021 年 4 月より増設した蓄電池の運用を開始している。その効果については前章でも既に述べたが、ここでは蓄電池本体の評価を行う。

図 7 にリチウムイオン電池の充放電量の推移を示す。放電量を充電量で除した充放電効率で評価すると、メーカーの公称の充放電効率 90% を下回る結果となっているが、これはメーカーの公称値が周囲温度 25°C で 1 日 1 サイクルする時の値であるのに対して、本施設の運用では周囲温度や充放電のサイクルの長さ（当施設では基本 1 週間で充放電を行う）が異なるためと考えられ、今後詳細検討を加えることにより、実績値より得られる充放電効率の妥当性の確認を行っていく。

一方、NAS 電池に関して詳細は割愛するが、本体の充放電効率とともに、蓄電池のセルを 300°C 以上に保つために必要な補機電力も無視できないためそれらを含めて最適な運転方法を今後検討していく。

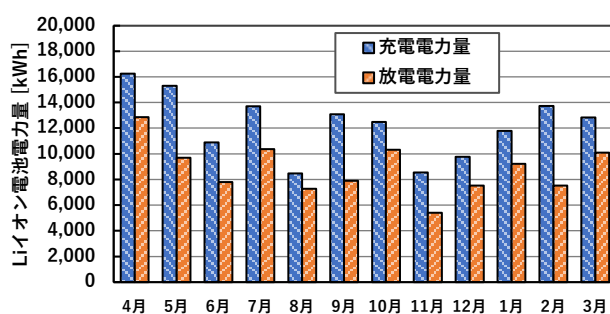


図 7 リチウムイオン電池の充放電量

3.2 蓄電池の運転方法の改善事例

図 8 に蓄電池の運転方法の改善事例を示す。「a) 従来の運転方法の課題」は、2021 年 12 月初旬から中旬にかけての受電量及び発電量の推移を示す。当時は逆潮防止のために常時受電電力 10 kW 一定（制御上の安全性を考慮した最低値）になるようにリチウムイオン電池で充放電制御を行っていた（図中①）。通常の運転であれば、土日の休日に余剰電力を蓄電し蓄電池を満蓄電状態にする予定であったが、日曜日の 12 月 12 日早朝にバイオマス発電機が停止した結果（②）、12 月 13 日午後以降、蓄電池の残蓄電量がほぼゼロとなり発電だけでは電力負荷を賄えなくなったため、受電電力が消費電力に追従して増加（③）し、最終的には受電量が最大 163 kW となった。

このような受電電力のピークを抑制するために、「b) 改善事例」では 2 月 1 日の時点で予め蓄電量がゼロに近づくことが予測されたため、2 月 2 日から 3 日にかけての夜間に受電電力量を 40 kW に増加（図中④）させる運転を行った結果、2 月 3 日以降は受電電力量をほぼ 10 kW に維持（⑤）できた。

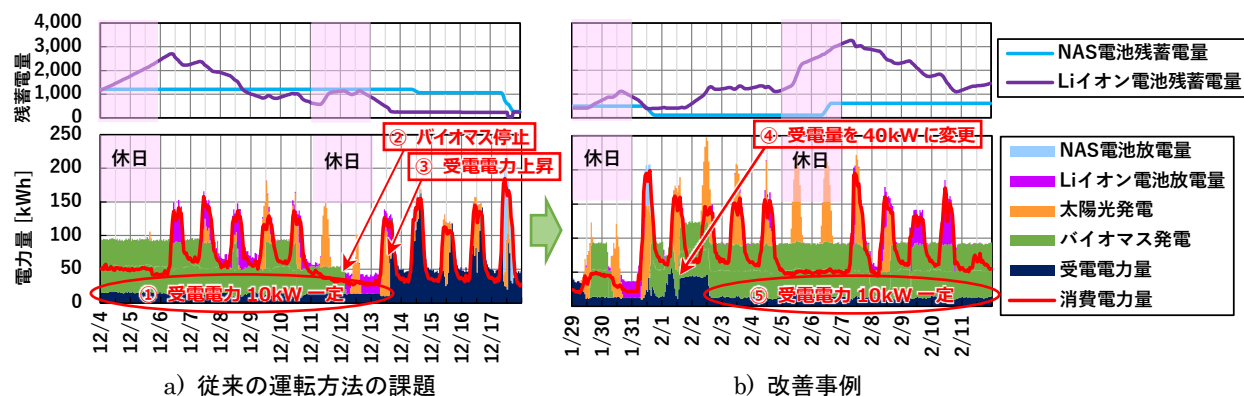


図 8 蓄電池の運転方法の改善事例

今回の受電電力量の設定値変更は手動で行ったが、現在はエネルギーマネジメントシステム（EMS）により自動設定している。今後は、施設の消費電力量や太陽光の発電量の予測精度を上げることによりシステムの信頼性の更なる向上につなげていく。

4. ZEB の達成状況及び CO₂ 排出量での評価

4.1 ZEB の達成状況の評価

表 3 に年間の一次エネルギー消費量の目標値と運用開始後 2 年間の実績値の比較を、図 9 に ZEB チャートでの達成状況の評価を示す。図 9 は文献 5) の ZEB の評価方法に基づき、エネルギー消費量と供給量を基準値（移設前の技術研究所（以下、旧研究所）の過去 4 年間の実績値の平均値）で指数化し表したものである。

一次エネルギー消費量原単位で見ると敷地全体では、目標を大きくクリアし当初の ZEB Ready の目標に対して 1 ランク上の Nearly ZEB を達成している。一方、オフィス棟は目標通り『ZEB』を達成できているが、エネルギー消費量原単位は 2021 年度で 489 MJ/m²・年（2020 年度は 629 MJ/m²・年）であり、目標値に対しては 17% 増となった。引き続き 2022 年度も、バイオマス発電の排熱の冬期暖房用への更なる利用や外気導入量の細かな調整等、目標値を目指して継続的な運用改善を行っている。

表 3 年間一次エネルギー消費量の目標値と実績値の比較

		エネルギー消費量 [MJ/年]	延床面積 [m ²]	エネルギー消費量原単位 [MJ/(m ² ・年)]
敷地全体	旧研究所	16,340,000	5,187	3,150 (100%)
	目標値(設計段階)		11,610	1,407 (44.7%)
	実績値(2020年度)*	5,899,556	11,764	501 (15.9%)
	実績値(2021年度)*	7,328,509	11,764	623 (19.8%)
オフィス棟	旧研究所	2,451,000	1,764	1,389 (100%)
	目標値(設計段階)	1,979,974	4,750	417 (30.0%)
	実績値(2020年度)	3,078,273	4,897	629 (45.2%)
	実績値(2021年度)	2,394,225	4,897	489 (35.2%)

※：蓄電池ロス及び補機動力を含む

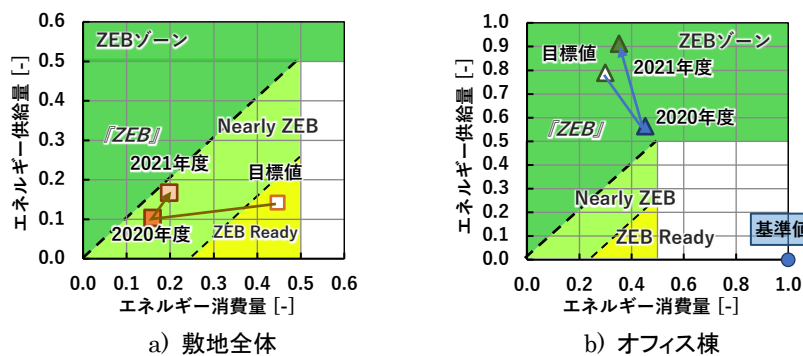


図 9 ZEB チャートでの達成状況の評価

オフィス棟のエネルギー消費量をより詳細に分析するために、建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST を用いて計算した試算値と実績値を、エネルギー消費量原単位で比較した結果を図 10 に示す。試算値のうち、設計試算値は、設計時に想定した内部負荷等をもとに試算した結果（詳細は文献 6）参照）、運用段階試算値は、運用段階で得られた内部負荷や運転条件等をもとに試算した結果（詳細は文献 4）参照）である。2021 年度実績値でみると、BEST プログラムで計算対象外とした給湯・衛生と展示設備の項目を除くと 420 MJ/m²・年となり、運用段階試算値 405 MJ/m²・年に近い数値で、項目ごとの内訳についても空調水搬送と空調熱源以外はほぼ同等の数値となっている。空調熱源については前述したバイオマス発電の排熱の更なる利用等により今後削減が可能と考える。

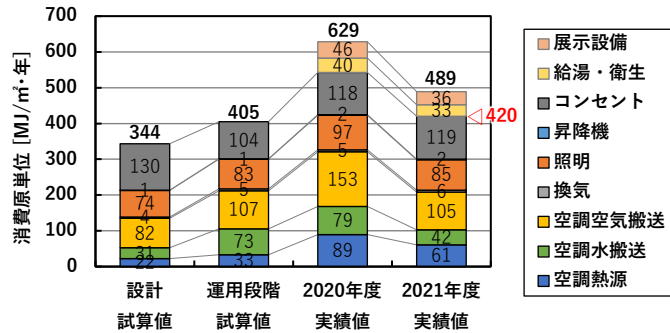


図 10 オフィス棟のエネルギー消費原単位の内訳

4.2 BEI での評価

図 11 に BELS 認証での計算値、旧研究所及び運用段階での実績値について比較したものを示す。BELS 認証での基準値に対して再エネを含む BELS での計算値は BEI=0.09 である。一方、実績値に関して BELS の計算と同様に、その他を含む消費量原単位から発電量を引いた数値（図 11 中の「消費(NET)」）を求めると、旧研究所の実績値に対して 2021 年度の実績値は 97%減となった。なお、図中の「消費（その他）」には、コンセントやラボ棟の実験装置での電力消費量を含む。

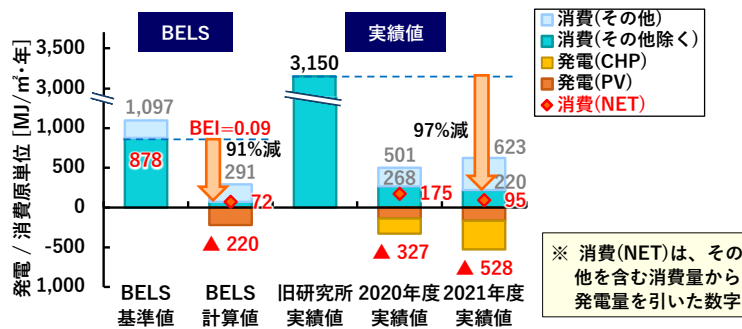


図 11 BELS の計算結果と実績値の比較

4.3 CO₂ 排出量での評価

図 12 に CO₂ 排出量の基準値（旧研究所の実績値）と当施設の実績値の比較を示す。バイオマス発電、太陽光発電の再生可能エネルギーの活用に加え、水力発電由来のグリーン電力（東京電力、アクアプレミアム）を 2020 年 7 月から購入開始したことにより、2020 年度は基準値に対しては 97%削減、2021 年度は 100%削減となり化石燃料を一切使用しないカーボンニュートラルを達成した。

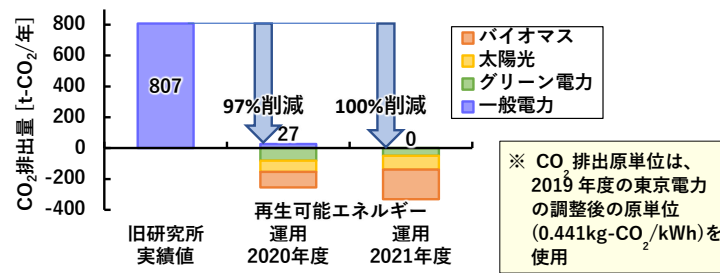


図 12 CO₂ 排出量の削減状況の比較

5. おわりに

本報では、BEMS データを活用して蓄電池の増設前後での建物の年間供給／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発電や太陽光発電の運転状況、蓄電池の運用状況の評価及び運用改善事例について報告した。更に ZEB の達成状況や CO₂ 排出量の評価を行った結果についても報告した。脱炭素社会の構築が喫緊の社会課題として重要視される中、本報が ZEB の今後の普及促進の参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 清水ほか：エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証評価（第 18 報），竣工後 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).
- 2) 清水ほか：エネルギー自立型サステイナブル研究施設 —ZEB 達成状況の評価と対策—，2021 年度イノベーションセンター報，(2022.3).
- 3) 相澤ほか：エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証評価（第 15 報），再生可能エネルギーの活用状況および運転実績，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.217-220 (2021.9).
- 4) 武藤ほか：エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証評価（第 19 報），エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.189-192 (2022.9).
- 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」，p5 (2015).
- 6) 武藤ほか：エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証評価（第 1 報），全体計画及びコンセプト，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.185-188 (2019.9).

ABSTRACT

The Takasago Thermal Engineering Innovation Center will start operation in March 2020 and will be in its third year in 2022, with the aim of becoming an energy-sufficient research facility that reduces environmental impact and improves intellectual productivity. During this time, under the constraint that reverse power flow into the grid was not possible, in April 2021, we added a large-capacity storage battery and started operation in order to effectively utilize renewable energy. In this report, we evaluated the operation status of the building's supply/consumption of energy, including the operating status of renewable energy and storage batteries, for two years after completion. Based on these operational results, we have confirmed that the entire site has achieved Nearly ZEB, the office building has achieved "ZEB", and CO₂ emissions have been carbon neutral.

エネルギー自立型サステイナブル研究施設

—地下水熱利用システムとバイオマス CHP 排熱の運用実績—※

大迫孝輔・相澤直樹・青山剛士
清水昭浩・羽鳥大輔^{*1}・武藤友香^{*1}

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center Operational Results in the Use of Groundwater and Waste Heat

Kosuke Osako・Naoki Aizawa・Takeshi Aoyama
Akihiro Shimizu・Daisuke Hatori^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}

100%再生可能エネルギーによるエネルギー自立型施設を目指した高砂熱学イノベーションセンター（以降、本建物）の2021年度における地下水熱利用システムならびにバイオマスガス化熱電併給システム（以降、バイオマス CHP）排熱の運用状況を調査した。その結果、汲み上げ条件の変更により、汲み上げ地下水量は2020年度に比べ39%減少した。地下水熱を有効利用し、年間の冷水熱量に占める地下水熱の割合は63%であった。バイオマス CHPの運転時間は約5,800時間/年で目標の約8割であった。バイオマス CHPの排熱は2020年度と同様に空調とチップ乾燥で主に使用し、効率的に活用できていることを確認した。

1. はじめに

本建物¹⁾は、100%再生可能エネルギーによるエネルギー自立型施設を目指し、木質チップを燃料としたバイオマス CHP、太陽光発電システム、蓄電システム、地下水熱利用システムを採用している^{2),3)}。既報⁴⁾では、施設の立ち上がり時期にあたる2020年度の上記システムの運用実績および抽出した課題について報告した。本報では、再生可能エネルギーの活用状況と運用実績として、地下水熱利用システムならびにバイオマス CHP 排熱の利用状況について、2021年度の運用実績を中心に報告する。

2. 上下水利用

本建物は、既存研究所よりも延べ床面積が約2倍であり、在籍人数は既存研究所での30人から100人へ増員する計画であったが、上水及び下水の各年間使用量の目標値は既存研究所の実績値と同じ2,860 m³とした。表1に上下水の年間使用量、図1に水の使用用途と2021年度における水使用量の実績を示す。

表1 上下水の年間使用量

年間使用量[m ³ /年]	上水	下水
目標値 (既存研究所の実績値)	2,860	2,860
実績値(2020年度)	650	9,160
実績値(2021年度)	1,300	7,600

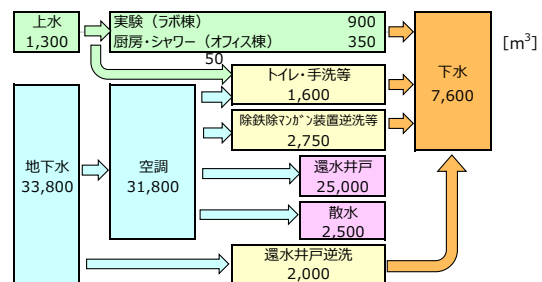


図1 水の使用用途と2021年度実績

※本論文は、空気調和・衛生工学会大会講演論文,pp.193~196(2022)を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計

表1に示すように上水使用量は、2020年度、2021年度ともに目標値を達成した。2020年度は、新型コロナウイルス感染症拡大防止に向けたリモートワークの推進により在室人数が少なく、厨房利用がないことなどもあり使用量が650 m³と少なかった。2021年度は通常の業務活動に近づきつつある中、上水を必要とする実験の実施等も増えたため上水使用量は、1,300 m³に増加したが、地下水を空調利用した後に井水として雑用水利用することで目標値以下となった。

表1に示すように下水量は、目標値以上の水量となっている。地下水熱利用システムを安定稼働させるために、汲み上げ水の除鉄除マンガン装置の逆流洗浄と、還水井戸の閉塞抑制のための還水井戸の逆流洗浄を行っており、下水量が多くなったと考えられた。

図1に示すように、本建物では空調で熱利用した地下水をトイレ・手洗い、逆洗、散水などの井水として雑用水利用している。2021年度の上水と地下水の合計使用量は、約35,100 m³であり、内訳は上水が約1,300 m³、地下水が約33,800 m³で、本建物で使用した水の96%が地下水であった。トイレや手洗いで使用した水1,600 m³のうち約3%にあたる50 m³が上水、残り97%が地下水であった。

本建物では、地下水利用が上水使用量の削減に寄与している。下水に関しては、熱利用も加味して総合的な評価を継続する予定である。

3. 地下水利用

3.1 地下水使用量

(1)地下水の汲み上げ条件の変更

図2に地下水熱利用システムの系統図を示す。貯水槽と還水槽の水温は熱利用や熱ロスによって上昇することを前提に、2020年度は、貯水槽と還水槽内の水を空調稼働開始前にすべて入れ替えていた。2020年度の運用実績から全量を入れ替えない運用方法を検討し、2021年度は、地下水汲み上げ量の削減を目的に、汲み上げ水量を負荷に応じて変動させ、必要な量を汲み上げ、排水する設定に変更した。加えて、夜間に貯水槽の水を循環させて吸着式冷凍機で冷却することにより空調稼働開始前に水温が高くなることを防いだ。吸着式冷凍機の冷却水には還水槽の水、再生用にはバイオマス CHP の排温水を用いている。

(2)汲み上げた地下水量および雑用水利用

図3に、汲み上げた地下水量と雑用水利用量を示す。冷房要求のある4月～10月にかけては、汲み上げた地下水量が2,500 m³/月～6,000 m³/月であった。一方、冷房要求のない11月～3月にかけては、雑用水の利用に応じて地下水の汲み上げが行われており、1,000 m³/月未満となった。

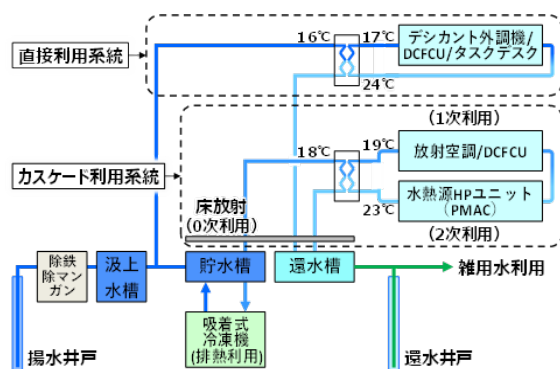


図2 地下水熱利用システム系統図

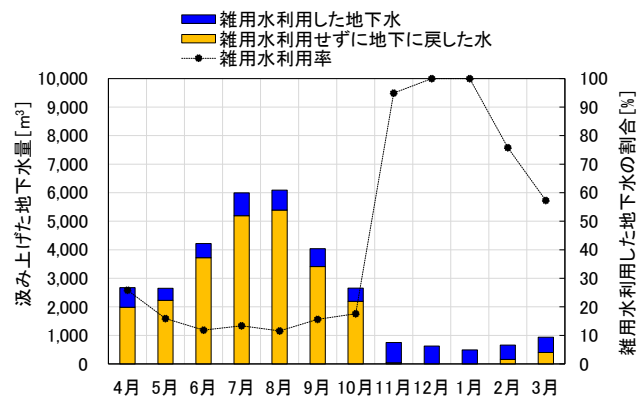


図3 汲み上げた地下水量と雑用水利用量

図3中の雑用水利用率は、汲み上げた地下水量に対する雑用水量の割合である。4月～10月は雑用水利用率が低く、11月～1月は高い結果だった。なお、1月に比べて2月と3月で雑用水利用率が低下したのは、井戸の調査ならびに検証を行ったためである。

本建物では、汲み上げた地下水量は、2020年度の52,000 m³に対して2021年度は31,800 m³で約39%減少した。これは、(1)で前述の汲み上げ条件の変更によるものである。雑用水利用率は、汲み上げた地下水量が減少したが雑用水の利用量も減少したため、2020年度の年間平均が24%であったのに対して2021年度は22%となり、2020年度と大きな違いはなかった。

3.2 地下水熱利用

(1)地下水熱の利用状況

図4に、2021年度の地下水温度の各月の平均値、冷水熱量のトレンドを示す。地下水温度は、外気温度による影響は小さく、年間を通じた変動は3℃程度であり、地下水温度の年間平均は16.6℃であった。2020年度は16.5℃であった。

図4の地下水熱は、地下水と熱交換した冷熱で、図2の直接利用系統とカスケード利用系統の2系統で使われた冷熱量である。地下水熱利用の内訳は、デシカント外調機、放射空調、パーソナル空調、水熱源の個別空調である。ヒートポンプは、ヒートポンプチラーで製造した熱量を示す。冷房要求のある4月～10月は11月～3月に比べて冷水熱量が多く、地下水熱がヒートポンプより多かった。年間での地下水熱の割合は、冷水熱量全体の63%を占めた。

(2)地下水熱利用の効果

建物の消費電力量が多かった2021年7月21日の冷房のための地下水系統とヒートポンプの消費電力量を図5に示す。夜間に地下水系統で電力を消費しているのは、地下水汲み上げの規制がある本地域において、夜間に貯水槽に水をため昼間の冷房要求に対応できる地下水量を確保するためである。地下水熱をヒートポンプに置き替えた場合と仮定すると、ヒートポンプの電力量は図5の赤破線のようになり、日中の電力量が増加する。地下水熱利用の効果としては、建物全体の日積算電力量に対して約9%、建物全体のピーク電力に対して約13%の削減と算出された。

年間の実測値に基づいて算出した地下水熱利用のシステムCOPは、最も効率が高い夏期（7月～9月）で平均7.8、年間平均では6.5であった。一方、ヒートポンプチラーの年間平均のシステムCOPは4.1と試算され、地下水熱利用システムの方がシステムCOPは高い結果となり、その有効性が示唆された。

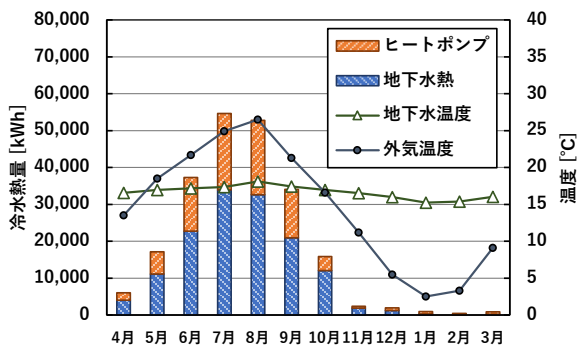


図4 冷水熱量

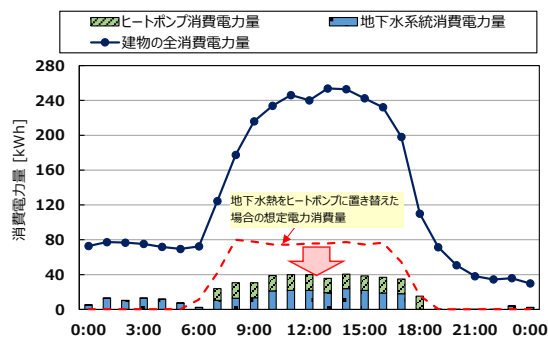


図5 地下水系統とヒートポンプの消費電力量

3.3 地下水利用の課題と今後の取り組み予定

第2章で記述したとおり、本建物では地下水を安定利用するために除鉄除マンガン装置を使用している。この装置の日常維持管理として、平日の稼働前にスケジュールで逆流洗浄を行っている。地下水汲み上げ水量が少ない冬季は過剰に逆流洗浄を行っていると考えられるため、今後は地下水汲み上げ水量に応じて逆流洗浄条件を変更するなどの対策に取り組む予定である。また、オープンループ方式で開放型の地下水熱利用システムの課題として還水井戸の閉塞があり⁵⁾⁶⁾、同システムを採用している本建物においても、同様の閉塞課題が生じた。2021年度から現在まで原因と対策方法の検証を行い、今後は抽出した対策方法で運用する予定である。

4. バイオマス CHP の排熱利用

(1) バイオマス CHP の運転時間

図 6 に 2021 年度のバイオマス CHP の運転時間を示す。8 月や 12 月は盆や正月の長期休暇、11 月は装置トラブルによる停止があったため、運転時間が短くなった。本建物に設置している 2 台のバイオマス CHP の運転時間の実績は、年間の保守時間を除いた運転可能な時間として 1 台あたり 7,800 時間/年に対し、2021 年度は長期休暇なども勘案して 7,000 時間/年を目標⁴⁾としたが、実績は約 5,800 時間/年で目標の 83%であった。2020 年度の実績約 3,000 時間/年と比較するとバイオマス CHP のメンテナンスなど運用方法の熟練から稼働は安定してきている。

(2) バイオマス CHP 排熱の運用実績

バイオマス CHP の排熱は、既報^{3),4)}で述べたように平日の日中は空調に利用し、空調の熱需要が低い夜間や休日は燃料チップの乾燥や貯湯槽の加温に利用している。

図 7 に、2021 年度のバイオマス CHP の補機類および空調の排熱利用熱量の月変動を示す。空調については、年間を通して 20%~50%の排熱を利用していた。11 月以降はメンテナンスにより一次乾燥機の利用熱量が増え、プレ乾燥機と二次乾燥機の利用が減った。5 月~10 月は吸着式冷凍機でも排熱を利用している。4 月~10 月の空調の内訳として外調機のデシカントロータの再生で最も多く利用されており、11 月~3 月は外調機による暖房や床暖房で多く利用されていた。

図 8 に、バイオマス CHP の排熱利用について、2021 年度の年間積算値の割合を示す。排熱のうち約 43%を空調、約 54%を木質チップの乾燥工程で使用されており、2020 年度と同傾向であった。その他、吸着式冷凍機で 1.7%、給湯用の加温で 1.6%が使用された。2021 年度の運転実績から、バイオマス CHP の空調での排熱利用量は 1,607 GJ/年、排温水の搬送動力は 46 GJ/年であり、効率的に運用ができていると考える。

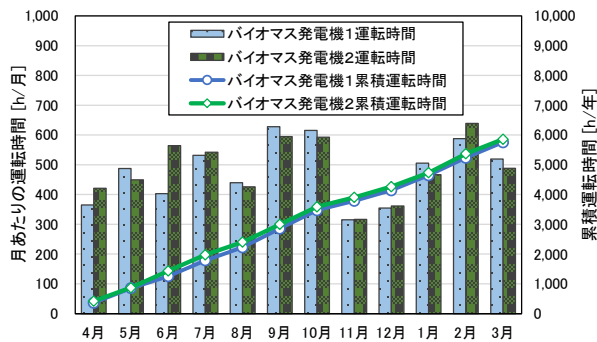


図 6 バイオマス CHP の運転時間(2021 年度)

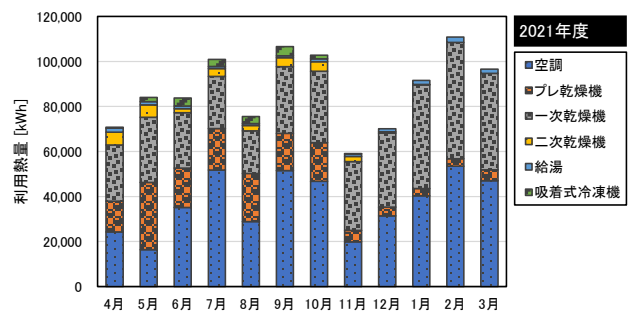


図 7 バイオマス CHP 排熱利用熱量の月変動(2021 年度)

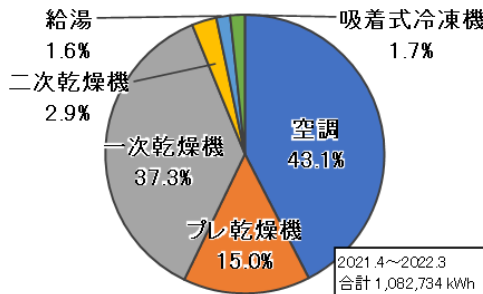


図 8 バイオマス CHP 排熱の利用先

5. おわりに

再生可能エネルギーによるエネルギー自立を目指す本建物での、2021年度の地下水熱利用システムならびにバイオマス CHP 排熱の運転実績から、以下の知見を得た。

- 1) 上水使用量は 1,300 m³ で目標値より少なかったが、下水使用量は 7,600 m³ で目標値より多く、今後逆流洗浄方法の改善に取り組む予定である。
- 2) 地下水汲み上げ条件を変更したことにより、2021年度の汲み上げ地下水量は 33,800 m³ となり、2020年度より 39%削減できた。
- 3) 年間の冷水熱量に占める地下水熱の割合は 63%であった。
- 4) バイオマス CHP の運転時間は、約 5,800 時間/年で目標の約 8 割であった。更なる向上を目指して対策に取り組む予定である。排熱は 2020 年度と同様に空調とチップ乾燥で主に使用していることを確認した。

文 献

- 1) 武藤友香, 羽鳥大輔, 高西茂彰, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 牧野内絵里, 粕谷文: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証 (第 1 報) 全体計画及びコンセプト, ” 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (札幌) ” , 185-188(2019).
- 2) 羽鳥大輔, 武藤友香, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 滝澤知史: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証 (第 2 報) ZEB に向けた建築・設備計画, ” 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (オンライン) ” , 149-152(2020).
- 3) 元田治, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 羽鳥大輔, 武藤友香: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証 (第 3 報) 木質バイオマスガス化 CHP を利用したエネルギー自立型自家消費システム, ” 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (オンライン) ” , 153-156(2020).
- 4) 相澤直樹, 平原美博, 清水昭浩, 大迫孝輔, 羽鳥大輔, 武藤友香: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証 (第 15 報) 再生可能エネルギー の活用状況および 運用実績, ” 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (オンライン) ” , 217-220(2021).
- 5) 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会, 一般社団法人全国さく井協会: 地中熱ヒートポンプシステムオープンループ導入ガイドライン 第 1 版, 14-17(2017).
- 6) NPO 法人地下水・地下熱資源強化活用研究会編 藤縄克之 監修: 「地中熱利用技術ハンドブック 地下の未利用再生可能エネルギー活用技術全集」, 121-127, NPO 法人地下水・地下熱資源強化活用研究会, (2020).

ABSTRACT

This building was built with the aim of becoming an energy-independent facility with 100% renewable energy. It uses a compact woody biomass gasification Combined Heat & Power, solar power generation, and a cascade heat utilization system for groundwater. The operation of the facility started in March 2020, and each energy system started operation. We are continuously attempting to the operational status, identify issues, and verify countermeasures. In this study, we report the results on the operation of groundwater heat utilization system and the utilization of waste heat produced during biomass gasification Combined Heat & Power in FY2021.

エネルギー自立型サステナブル研究施設

—外調機の除湿性能評価—※

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

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

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

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

1. はじめに

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

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

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

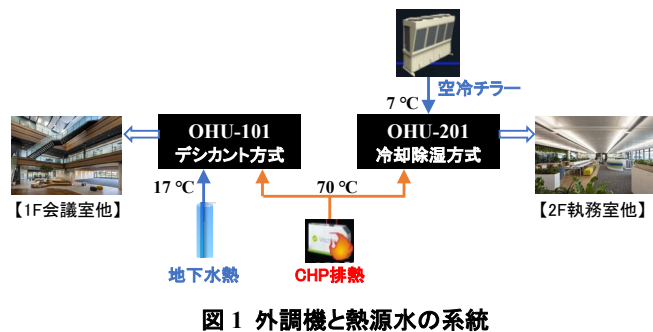
*1 株式会社三菱地所設計 *2 早稲田大学

2. 外調機の仕様

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

表1 外調機の仕様

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



3. 外調機の除湿制御性

3.1 運転状況

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

3.2 除湿の制御性

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

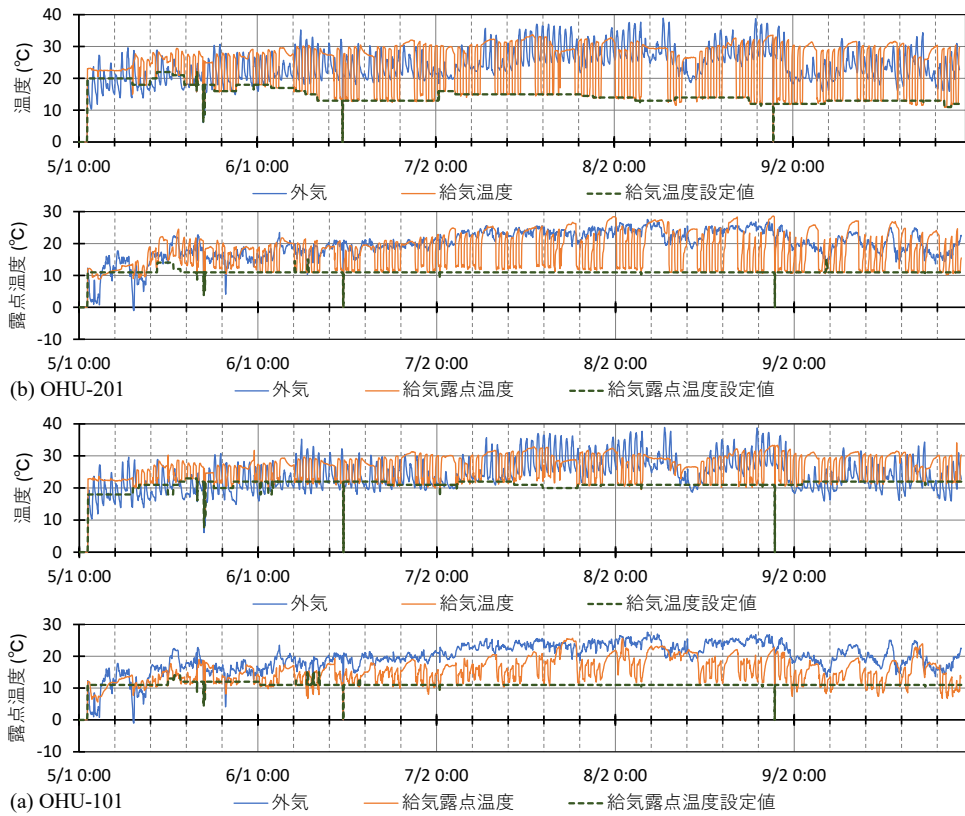


図2 外調機の除湿時運転状況(2021/5/1~9/30)

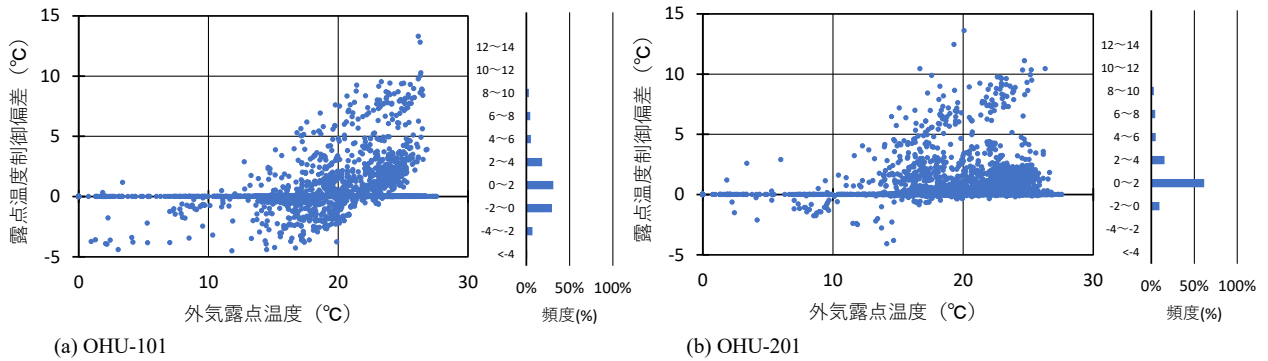


図3 外調機の除湿制御性

4. 外調機のエネルギー効率

4.1 消費熱量の比較

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

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

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

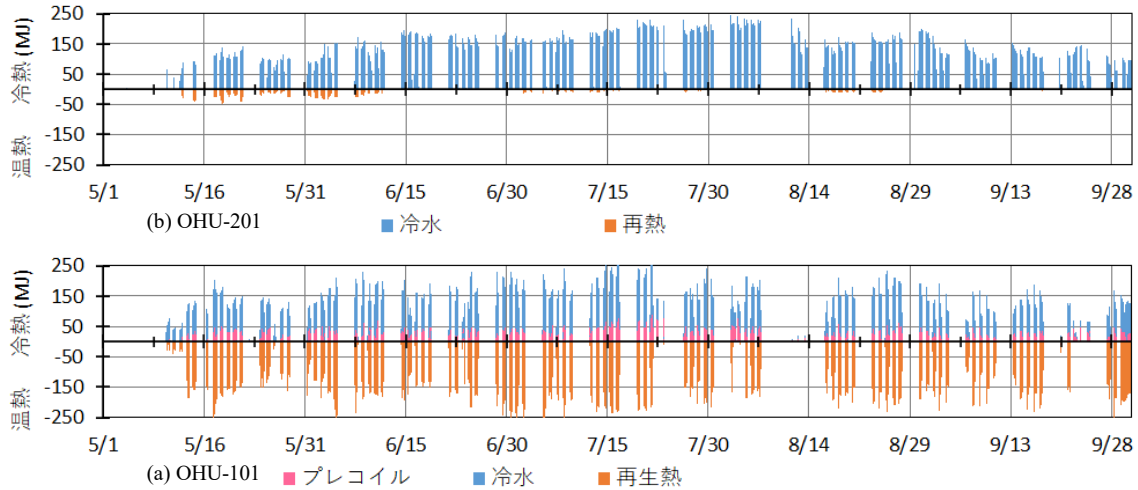


図 4 外調機の処理熱量

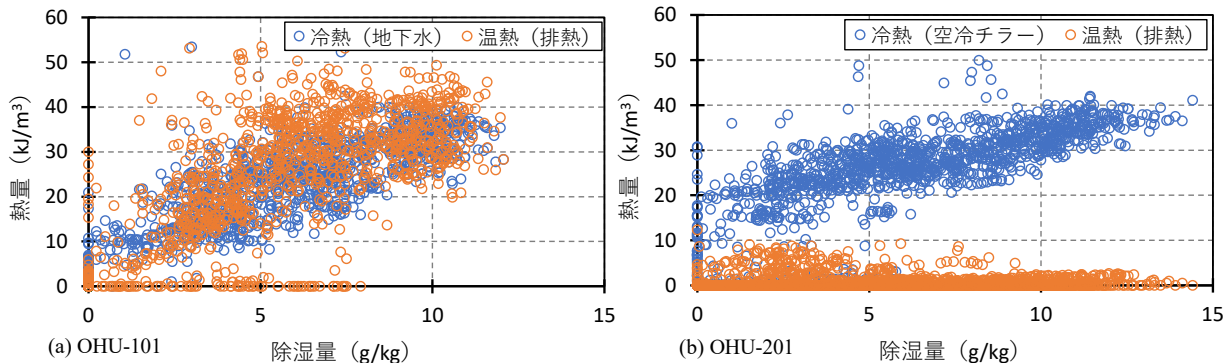


図 5 外調機の除湿量と処理熱量

4.2 電力消費量の比較

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

・OHU-101 の熱源電力消費量

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

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

・OHU-201 の熱源電力消費量

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

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

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

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

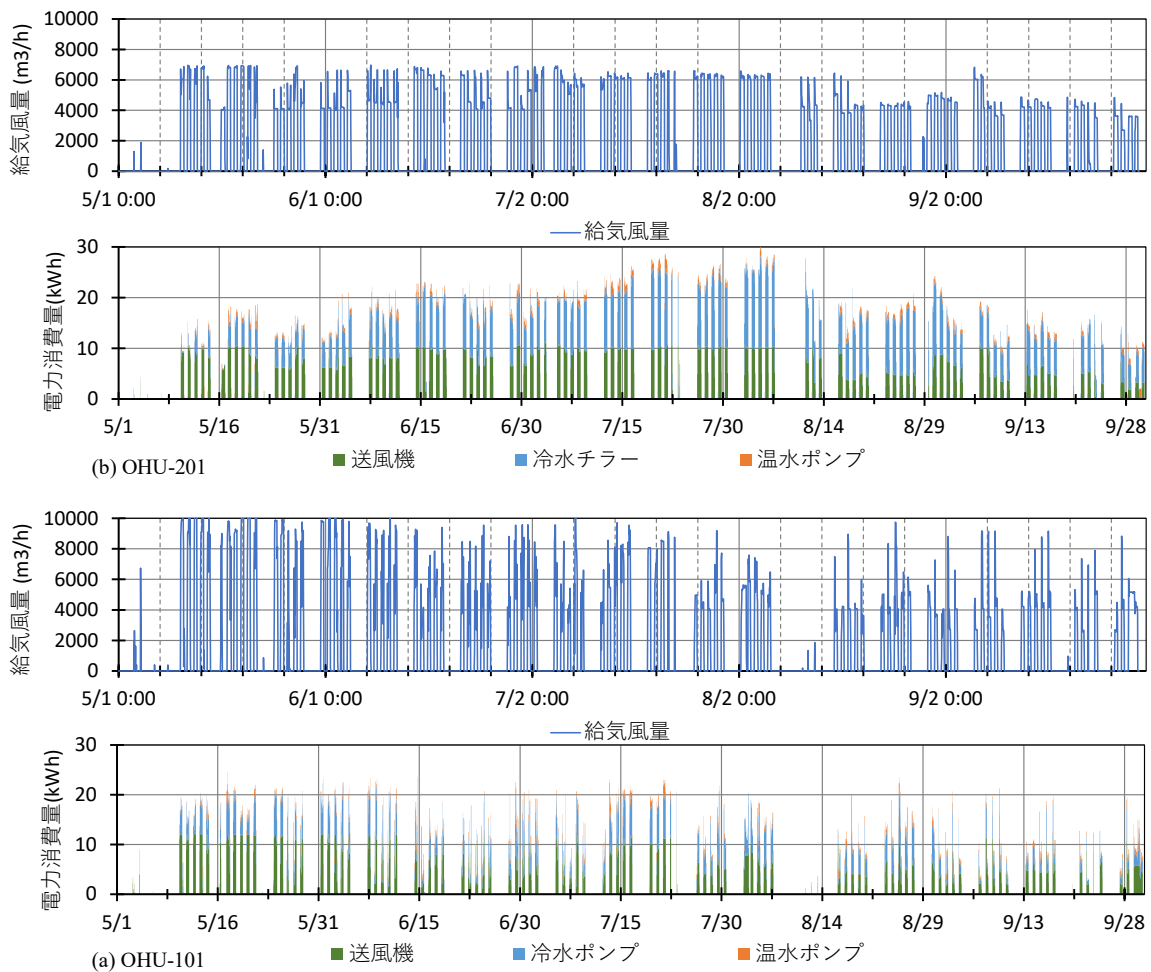


図6 外調機の給気風量と電力消費量

4.3 除湿量に対する電力消費量の比較

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

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

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

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

4.4 LCEM による冷熱源電力消費量の推定

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

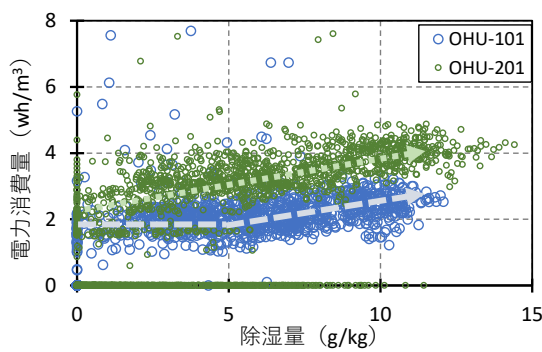


図 7 外調機の除湿量と電力消費量

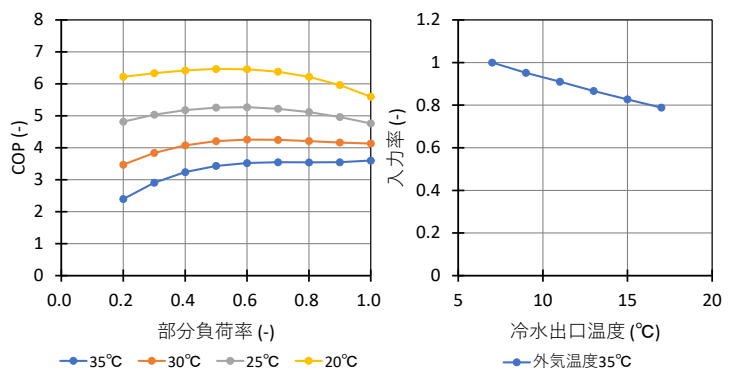


図 8 LCEM モデルでの部分負荷特性

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

図 9 LCEM の解析モデル

4.5 除湿のエネルギー効率

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

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

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

5. おわりに

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

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

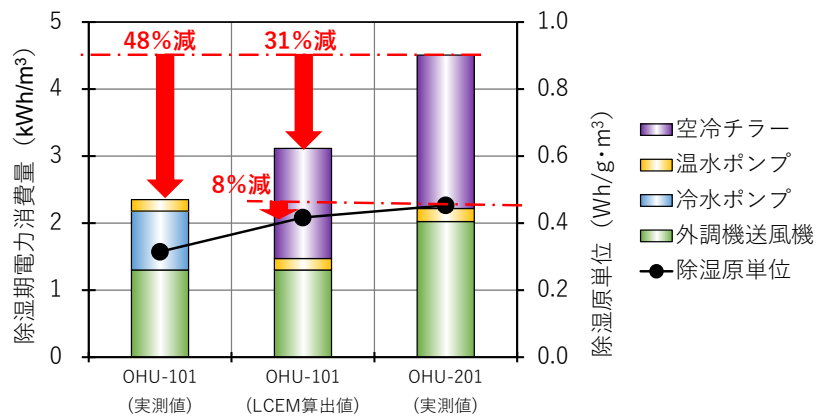


図 10 除湿方式、熱源方式と電力消費量

文 献

- 1) 武藤ほか、エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第 1 報)全体計画及びコンセプト、空衛学会講演、B-14、pp.185-188(2019.9).

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

ABSTRACT

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

エネルギー自立型サステナブル研究施設

ー 執務エリアへの置換空調導入検証と暖房対策 ー※

木村健太郎・相澤直樹・平原美博
羽鳥大輔^{*1}・武藤友香^{*1}・田辺新一^{*2}

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center

Performance Evaluation and Heating Measures for Displacement Ventilation Systems for Office Use

Kentaro Kimura・Naoki Aizawa・Yoshihiro Hirahara
Daisuke Hatori^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}・Shin-ichi Tanabe^{*2}

執務エリアの空調方式には、アネモやノズルなど空気攪拌により室温の均一化を図る混合空調が一般的である。本施設のオフィス棟¹⁾は、自然採光取入れのため室中央部に吹抜けを有しながら自然換気を積極的に利用するために間仕切りが少ない構造となっており、大空間に適した消費エネルギーの少ない空調方式の採用が求められた。既報²⁾ではCFD解析を実施し、天井の高い大空間でも居住域だけを効率良く冷房でき、高温給気や大温度差給気により熱源動力や搬送動力の低減が可能な置換空調を導入した。置換空調は、発熱体の熱上昇流を乱さないように室下部から低速で給気し、室上部から排気することで室内に温度成層が形成され、居住域を適温かつ清浄な環境に保つことができるシステムである。冷房負荷の大きい大空間の工場や倉庫などと親和性が高く、空気の密度差により給気が搬送されるため、混合空調のように室内にダクトを張り巡らすことは不要となり、吹抜けのある大空間には適した空調方式である。一方、置換空調用吹出し口を用いて温風を供給する場合、浮力により給気が上昇するため効率的な暖房を行う事が課題となっており、執務室エリアへの採用実績が少ない理由の一つとなっている。本報では、運用2年目に入った本施設において、感染症拡大防止対策として建築物衛生法に基づく必要換気量を確保しながらも、省エネルギー運転に配慮した置換空調エリアの冷暖実測結果を示す。また、暖房時に露見した空調立ち上がり時間の長さや足元の温度低下による快適性低下に対し、環境改善や排温水の有効利用を目的とした対策を実施しその効果を示す。

1. 設備概要と測定概要

1.1 オフィス棟1階設備概要

写真1に各室使用状況と置換空調用吹出し口を示す。オフィス棟1階は、エントランスホール、カフェ、会議室等、外来者が利用可能な空間となっており、地下水とバイオマスCHPの排温水を熱源とするデシカント外調機で調湿された外気は、旋回流誘引型の壁吹出し口や床吹出し口、エントランスホールの階段側面に設けた吹出し口の計3種類の置換空調用吹出し口から給気を行い、吹抜け上部の2階天井(1FL+8m)より還気することで置換空調を行っている。

※本論文は、2021年度空気調和・衛生工学会大会講演論文³⁾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

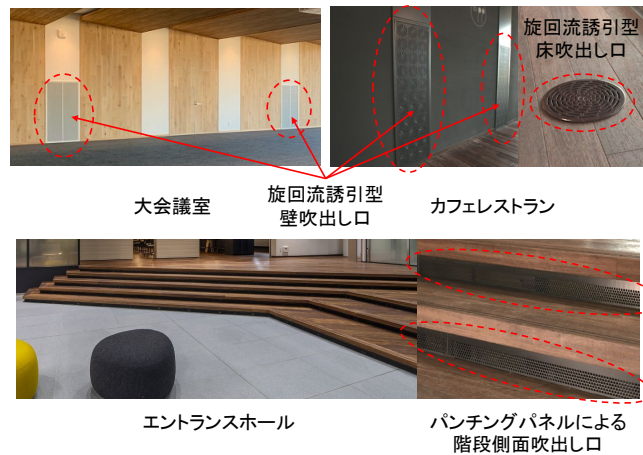


写真 1 各室使用状況と置換空調用吹出し口

1.2 実測概要

図 1 に器具配置と実測概要を示す。垂直温度測定は、吹抜け中央部に熱電対を高さ 1m ピッチで設置し 1 分間隔でデータロガーに保存した。平面温度測定は、赤外線による表面温度とセンサ周囲温度を測定するサーモパイル（視野角 22 度）を採用し、天井面に 1.8m ピッチで設置し 1 分間隔でサーバに保存した。

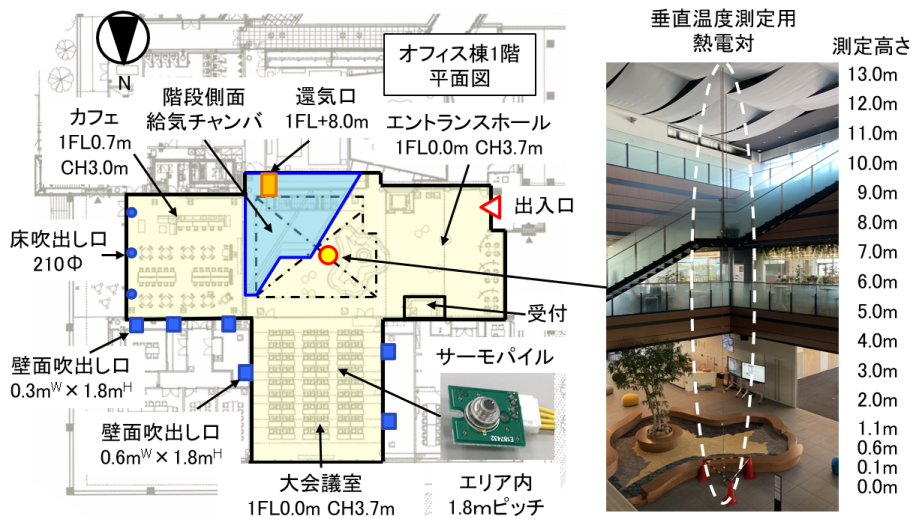


図 1 器具配置と実測概要

1. 実測結果

2.1 夏期冷房運転

図 2 に夏期代表日（2021 年 8 月 4 日(木)）のオフィス棟吹抜け部の垂直温度分布を時刻ごとに比較して示す。外気温度は、本施設最寄りの気象庁観測データ（つくば市館野）を示す。放射の影響で床表面は居住域より 1°C 程度高く、室上部ほど高温となる置換空調特有の温度勾配を形成している。また外調機の起動と地下水を通水開始した 7 時より室内温度が徐々に低下し、就業開始の 9 時以降は居住域を含めた時刻変動が少なく、快適な居住環境が維持できている。

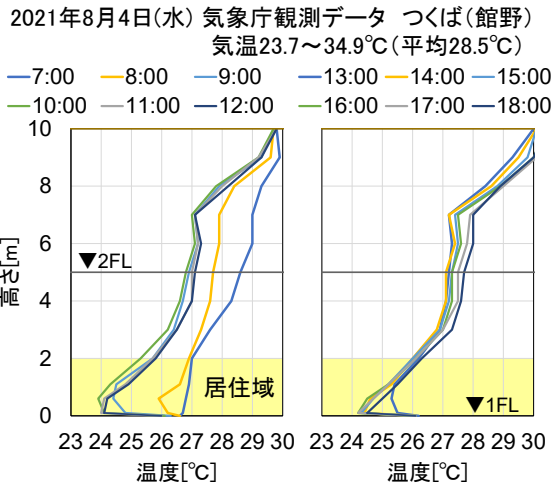


図2 夏期代表日(8/4)時刻別垂直温度分布

図3に同日12時のオフィス棟1階床表面と天井高さの平面温度分布を比較して示す。当日は最高気温が34.9℃と猛暑日並みであり、各室の給気風量はともに定格風量(カフェ 2,900 m³/h、エントランスホール 3,000 m³/h、大会議室 5,000 m³/h)の半分以下、給気温度は設計値の19℃より高い21.4℃の条件下ではあったが、居住域温度は天井付近温度より1~2℃低く、概ね設計室温の26℃以下となった。カフェの外壁近傍や給茶機等の機器周囲に温度上昇は見られるが、テーブルやパーテーションなど什器が密に配置されていてもインテリア部では給気が密度差により部屋の隅々まで行き届き、いずれの室でも温度ばらつきは4℃以下と少ない結果が得られた。

エントランスの床下ピットは地下水の貯留槽となっており、貯水槽エリアと還水槽エリアの床表面温度と各槽内温度には相関が見られ、ともに室内の冷却に寄与していることを確認した。

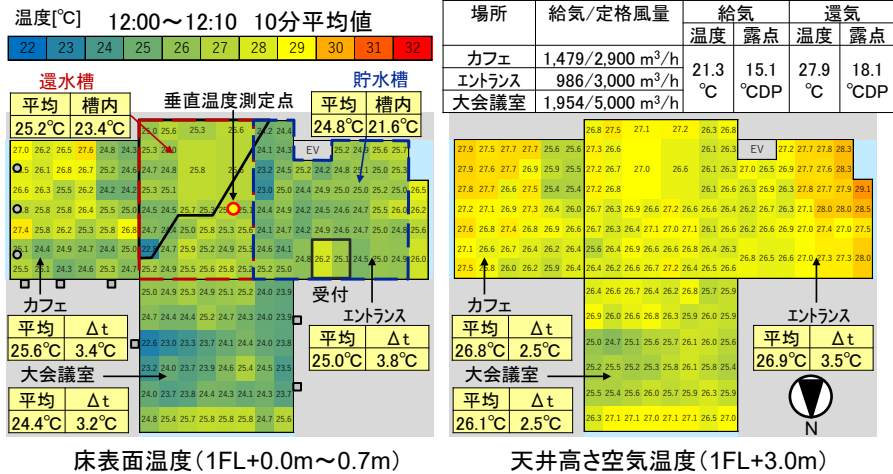


図3 夏期代表日(8/4 12:00)平面温度分布

2.2 冬期暖房運転

図4に冬期代表日(2022年2月14日(月))のオフィス棟吹抜け部の垂直温度分布を時刻ごとに比較して示す。休日明けの居住域温度は、外調機の起動と排温水を通水開始した7時より徐々に上昇して13時頃に定常状態に至る。地下水貯留槽は貯水槽と還水槽いずれも19℃程度で推移しており、室内の極端な底冷えを軽減させている。居住域の下部は18℃程度に留まり、室上部より2~3℃低い温度で推移した。

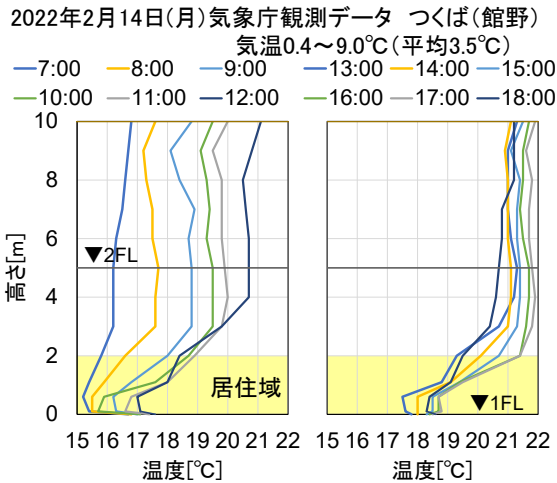


図4 冬期代表日(2/14)時刻別垂直温度分布

図5に同日9時のオフィス棟1階床表面と天井高さの平面温度分布を比較して示す。床吹出し口のあるカフェを除き、外壁ガラス近傍から室中央付近にかけて床表面温度の低下が見られる。これは、外壁に近いほど低温となっている平面温度分布から外気の影響でガラスやサッシ温度が低下し、室内へ冷気が流入するコールドドラフトの影響と想定された。

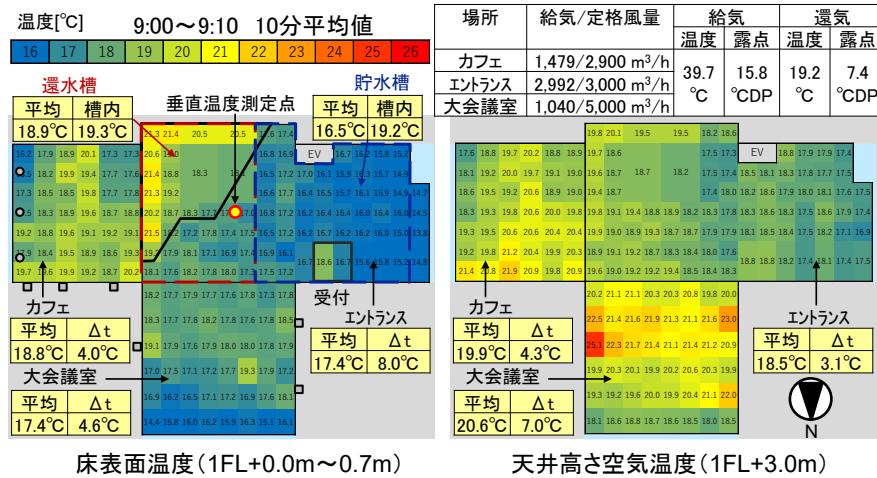


図5 冬期代表日(2/14 9:00)平面温度分布

以上より、本施設はZEBを達成するために高い外皮性能を有し、カフェに設置した床吹出し口により一定の冷氣遮蔽効果は見られたが、インテリアゾーンに設置した置換空調の単独システムだけでは、給気条件を高く設定してもペリメータを含む室全域を快適温度に維持することは困難と想定された。特に厳寒期の休日明けは、空調の立ち上がり時間の長さや足元の温度低下による不快感の課題が顕在化し、置換空調による暖房時の改善が求められた。

2. 階段側面給気チャンバによる床暖房

3.1 対策概要

本建物は、常時200kWほどのバイオマスCHPからの排温水(60~80°C、110L/min程度)があり、冬期の日中は暖房や給湯、夜間はバイオマスCHPの燃料となる木質チップの乾燥に利用している⁴⁾。空調停止

となる休日には排温水の余剰分を木質チップのプレ乾燥に利用しているが、過乾燥によるチップ劣化をさせないためにも、排温水の有効利用が求められていた。そこで、2章で露見した休日明けの立ち上がり時間の短縮と排温水の有効活用を目指し、休日に排温水の一部をオフィス棟へ供給する対策を行った。図6に排温水の供給先としたエントランスホール内の階段側面給気チャンバを示す。排温水で温められた空気は、階段側面の吹出し口から給気することで約70m³の給気チャンバ内に約40℃の暖気が満たされ、床板が温められることで床暖房効果が得られることを狙った。

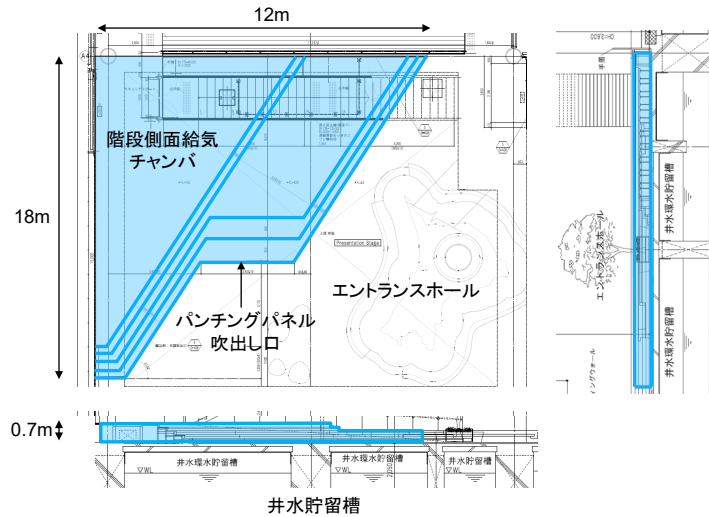


図6 オフィス棟1階階段側面給気チャンバ

3.2 実測結果

図7に休日より階段側面からの暖房給気を行った2022年2月21日(月)のオフィス棟吹抜け部の垂直温度分布、図8に同日9時のオフィス棟1階床表面と天井高さの平面温度分布を比較して示す。階段側面給気を行わなかった前週月曜日と比較し、外気温度が低く、給気風量も少ない条件下であったが、追加のエネルギーを消費することなく朝方の底冷えを改善できている。また、日中の居住域の温度上昇幅は少なく、空調立ち上がり時間の削減に寄与することを確認した。上記対策に伴うエネルギー消費は、木質チップのプレ乾燥に用いる動力と同程度(1.7kW)であり、暖房立ち上がり時間の短縮や電力デマンドを抑える効果が期待できるため、排温水のある場合には有効な方法と考えられる。

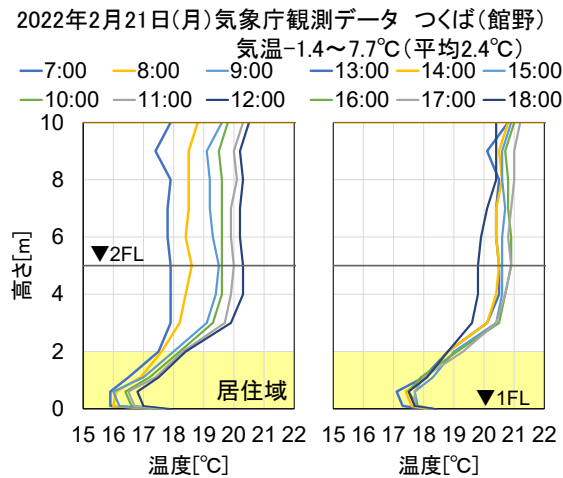


図7 階段暖房時(2/21)時刻別垂直温度分布

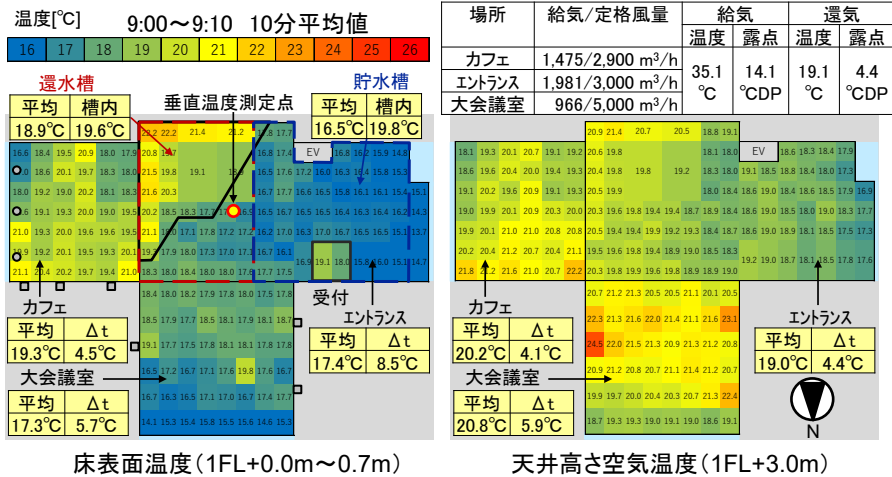


図8 階段暖房時 (2/21 9:00) 平面温度分布

3. ペリメータ部床暖房パネル

4.1 対策概要

足元のドラフト不快感の改善には外壁からの冷気防止が必要となる。そこで、本施設のオフィス棟 2 階執務室へ導入し、既報⁵⁾で暖房効果を確認した OA フロア用床暖房パネルを利用者の滞在時間の長い大会議室のペリメータ部へ導入した。

4.2 CFD 検証

図9に大会議室を解析領域とした CFD 解析モデルを示す。窓面は 10°C 固定、その他壁面は断熱条件とし、40°C に固定した床暖房パネルの有無を定常解析で比較した。図10に暖房稼働有無、及び床暖房パネル稼働有無による床上 0.1 m 平面温度の解析結果を比較して示す。床暖房により窓面からの冷気入が抑えられ、夜間を想定した非空調時に室温が約 1.5°C 上昇する結果となった。

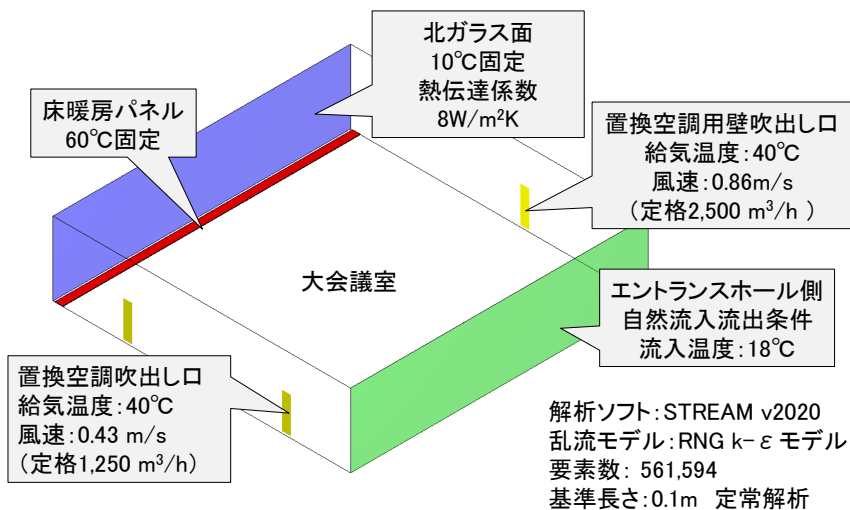


図9 CFD 解析モデル

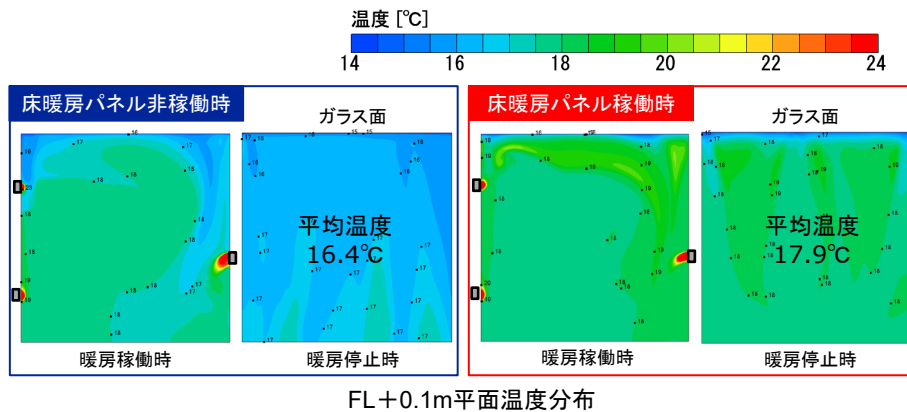


図 10 CFD 結果 (FL+0.1m 平面温度分布)

4.3 実測結果

大会議室の床暖房に加え、エントランス内受付の快適性を向上させるため、当施設の空調配管に採用したアルミ三層管を受付デスク下部に敷設し、排温水を通水することで放射による局所暖房を目指した。(写真 2)



写真 2 大会議室の床暖房パネル設置状況と受付局所暖房

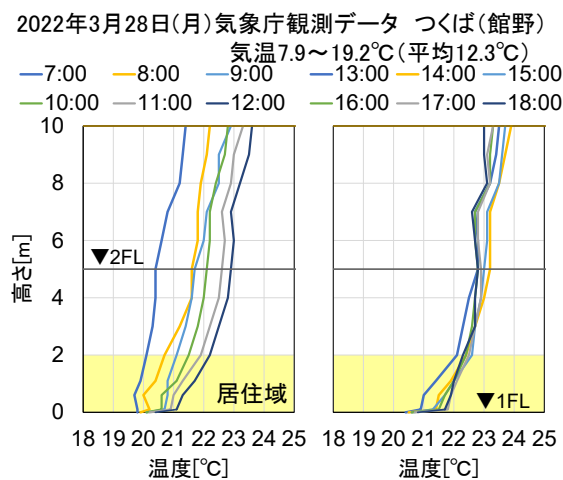


図 11 大会議室床暖房時 (3/28) 時刻別垂直温度分布

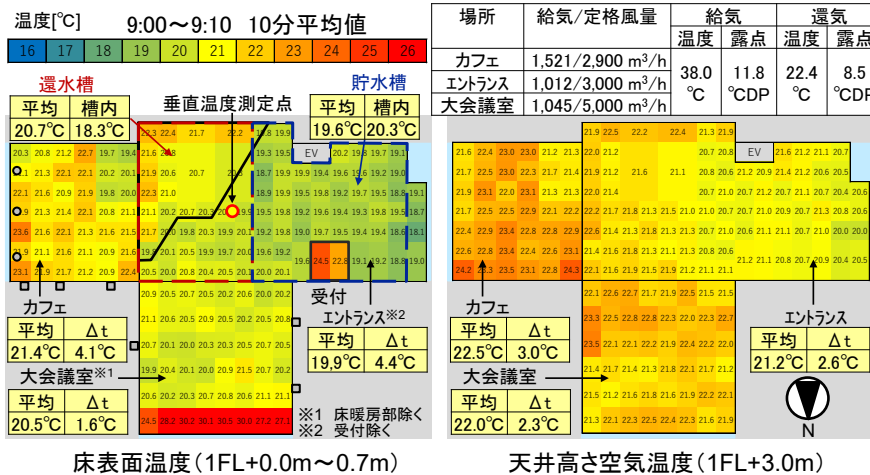


図 12 大会議室床暖房時 (3/28 9:00) 平面温度分布

大会議室のペリメータ床暖房を稼働した 2022 年 3 月 28 日(月)のオフィス棟吹抜け部の垂直温度分布を 図 11 に、同日 9 時のオフィス棟 1 階床表面と天井高さの平面温度分布を図 12 に示す。なお、休日の階段側面給気は停止している。気温の高い条件下ではあるが、排温水の通水量は室全体で 3.3 L/min と少量ながら、大会議室側壁面からの冷気流入が抑えられていることを確認した。また、受付内は約 24°C となり、局所暖房による快適性向上と同時に、電気ヒータによる補助暖房利用も抑制することができ、消費エネルギーの削減にも貢献した。

4. おわりに

本報では、吹抜けのある執務エリアへ置換空調を導入し、必要換気量を確保しながらも省エネルギー運転を行った時の温熱環境、並びに暖房時に露見した課題と対策を実行し、その改善効果を示した。昨今、室内負荷が減少する傾向の中、オフィスでは暖房の重要性が高まっており、今回実施した対策や改善効果を元に、冷気流入しているエントランス壁面への床暖房設置や冷暖でそれぞれ有効な吹出し方法に変えるなど、更なる環境改善に取り組んでいきたい。

文 献

- 1) 武藤友香, 羽鳥大輔, 高西茂彰, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 牧野内絵里, 粕谷文, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第 1 報)全体計画及びコンセプト, 2019 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(札幌), B-24, pp.185~188, (2019).
- 2) 清水昭浩, 平原美博, 木村健太郎, 柴田克彦, 羽鳥大輔, 武藤友香, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第 4 報)二次側空調システム及びセンシングシステムの概要, 2020 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(オンライン), J-33, pp.157~160, (2020).
- 3) 木村健太郎, 平原美博, 相澤直樹, 羽鳥大輔, 武藤友香, 田辺新一, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第 22 報)執務エリアへの置換空調導入検証と暖房対策, 2022 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(神戸), C-50, pp.201~204, (2022).
- 4) 元田治, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 羽鳥大輔, 武藤友香, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第 3 報)木質バイオマスガス化 CHP を利用したエネルギー自立型自家消費システム, 2020 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(オンライン), J-32, pp.153~156, (2020).
- 5) 木村健太郎, 平原美博, 相澤直樹, 羽鳥大輔, 武藤友香, 渡邊円, エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実

証評価(第11報)置換空調とパーソナル空調機の性能評価, 2021年度空調和・衛生工学会大会学術講演論文集(福島), J-50, pp.201~204, (2021).

ABSTRACT

This report shows the indoor thermal environment during cooling and heating by displacement ventilation systems that are operated with energy saving while ensuring the required ventilation volume as a measure to prevent the spread of infectious diseases in the office area with a stairwell. In addition, because the comfort of heating by displacement ventilation systems decreased owing to the cold draft, we will introduce measures to effectively use waste heat.

エネルギー自立型サステナブル研究施設

—天井放射パネルの個別制御による省エネルギー性と快適性—※

鈴木美穂・相澤直樹・柴田克彦
清水昭浩・武藤友香 *1・竹原大暉 *2

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center - Energy saving and comfort by individual control of ceiling radiation panel -

Miho Suzuki・Naoki Aizawa・Katsuhiko Shibata
Akihiro Shimizu・Yuka Mutoh・Daiki Takehara

本施設内の主執務室では、外気負荷および外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機と放射空調で処理し、個人の行動や好みで随時負荷が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・アンビエント空調システムを採用している²⁾³⁾。本報では、ABWを採用している当オフィスにおいて2021年度の夏期における運用結果から個別制御方式の放射空調による省エネルギー性と快適性への影響について考察したので報告する。

1. 放射空調のシステム概要

今回検証対象としたメインオフィスの執務室2-1では図1に示すように放射パネルとDCFCUが同系統となっており、その下流に水熱源ヒートポンプ(PMAC)が連なり地下水のカスケード利用を行っている。放射パネルは図2に示すように南北両端に定流量パネルが、内部の東西に渡り個別制御可能な変流量パネルが配置されている。変流量パネルは20列あり、各列3グループのパネルで構成されている。600×600mmの単体パネル6枚のセットが2セットずつで1グループとし、グループ毎に設けた二方弁で個別にON/OFF制御を行っている。二方弁のON/OFFにはパネル表面温度を用い、予め設定した上下限值により弁を開閉する。設置面積としては執務室天井面の約半分を占めており、負荷の偏在に対応可能である。また、個別に制御することで水搬送動力の削減効果も期待できる。

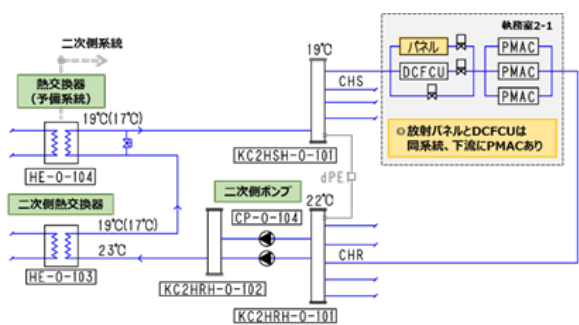


図1 執務室内設備を含む配管系統図

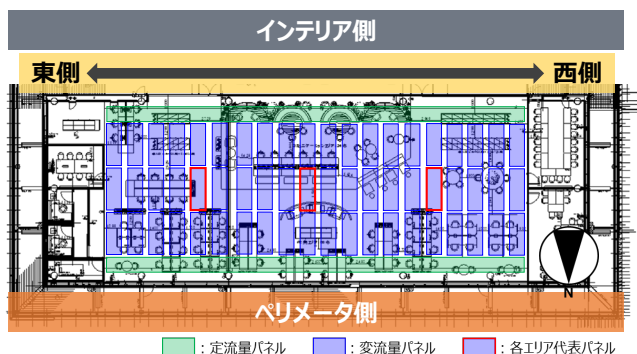


図2 執務室内の放射パネル配置

※本論文は、空気調和・衛生工学会大会講演論文,pp.205~208(2022)を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計 *2 早稲田大学

2. 放射パネルの個別制御における運転実績と省エネ性

2.1 放射パネルの能力評価

放射パネルの能力評価をするために、放射パネル廻りの計測データを用いて解析を行った。図3は、放射パネル廻りの熱量のデュレーションカーブで、放射パネル熱量を大きいものから並べた上、下流に接続する水熱源ヒートポンプユニット(PMAC)の処理熱量も合わせて表記している。データとしては冷房期間(2021年4月～11月)の就業時間に相当する9時から17時までの中央監視の記録データ積算値の時間差分を用い、その数値を横軸にとっている。放射パネルの処理熱量は熱交換器からの送水温度と放射パネルからの還り温度の温度差および送水流量より算出した。放射パネルの処理熱量の最大値は22.9 kWで設計仕様の21.7 kWとほぼ同等であり、放射パネルの面積当りに換算すると73 W/m²であった。この数値は放射パネルの居室側と天井裏への放熱量の合算(その比率については文献⁴⁾参照)であり、居室側への放熱量は同比率を用いると床面積当りで24.6 W/m²となる(室内負荷の詳細は続報⁵⁾参照)。なお、図2に示したように放射パネルと並列に執務室2-1用DCFCUも設置されているが、DCFCUは期間中の稼働がごく少数であったため今回は算出した熱量の全量を放射パネルの処理熱量として扱った。

図4に、図3の条件での冷水温度の出入口温度差を示す。放射パネルの出入口温度差は平均で1.9℃差、PMACを含めると平均で3.0℃差となっており、設計時の想定値とほぼ同等で熱のカスケード利用の効果が表れている。

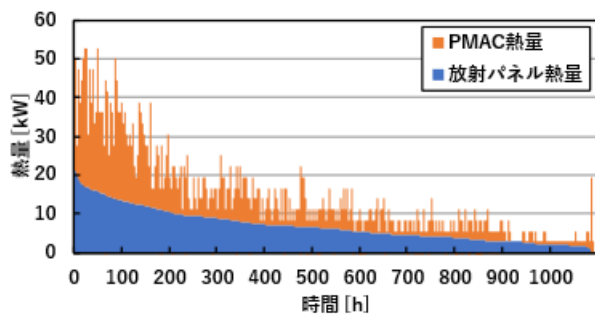


図3 放射パネル廻りの熱量のデュレーションカーブ

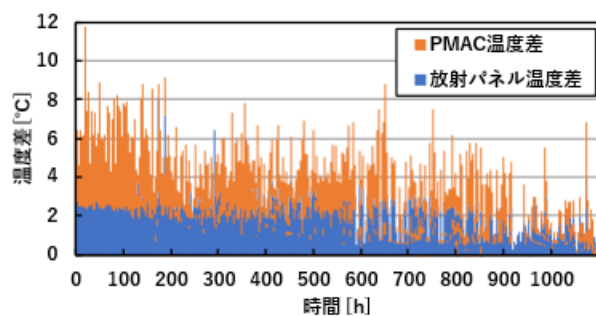


図4 放射パネル廻りの温度差

2.2 放射パネルの個別制御の省エネ性の評価

本システムにおいて放射パネルを個別制御するための二方弁は合計で60個設けられている。個別制御による省エネ性を評価するため、図5に二方弁が開の状態の個数と放射パネルに係るポンプ動力の関係を示す。放射パネルに係るポンプ動力は、2台の冷水二次ポンプCP-O-104で計量された電力を各系統の流量、熱量で按分した数値である。冷水二次ポンプ自体は定格7.5 kW×2台のインバータ制御であるが、放射パネルに係る動力としては約0.1 kWと非常に小さな値であるとともに、二方弁開の個数増加に伴って動力も増加しており、設計時に想定した放射パネルの個別制御の省エネ性を確認できた。

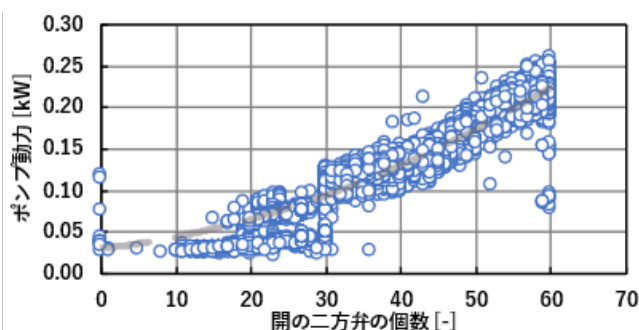


図5 稼働パネル数とポンプ動力の関係

表1 比較条件一覧

各設定項目		条件1	条件2
執務環境条件		均一空間	平面温度分布付与
実測代表日		8月3日	8月20日
アンケート対象期間		8月2日～8月3日	8月19日～8月20日
外調機	吹出エリア	全面	西側のみ
	給気温度	14℃	14℃
	風量	2,500CMH	625CMH
放射パネル	パネル表面温度SP	25℃	30℃
	二方弁	制御許可	制御許可
	パネル出口温度SP	25℃	-
共通	二方弁	制御許可	強制開
共通	送水温度	19℃	19℃

2.3 運転条件による省エネ性の評価

図6に、夏期運転時における執務室系統の処理熱量と消費電力トレンドの抜粋を示す。各代表日は表1に示す比較条件である。

処理熱量に関しては外調機と放射パネル、その合計を表している。条件1では外調機が定格運転、放射パネルが全面稼働の表面温度25℃設定にて制御しており、時間経過と共に負荷が減り処理熱量の減少が確認できる。処理熱量としては外調機と放射パネルではほぼ同等であった。一方、条件2では条件1と比較して外調機の吹出風量が1/4に減らしておりその処理熱量も3割程度に減っている。放射パネルの稼働量は、条件1の6割程度であり処理熱量としては7割程度に減少していた。

図6の消費電力に関しては、外調機系統に空冷ヒートポンプチラーが含まれ、冷水2次側ポンプが放射パネル系統の電力となっている。外調機系統の消費電力の割合が大きかったため、条件2においては執務室全体で条件1の1/3程度の電力に抑えることができており、放射パネル主体での空調とすることで省エネ性が大きく向上することが確認できた。

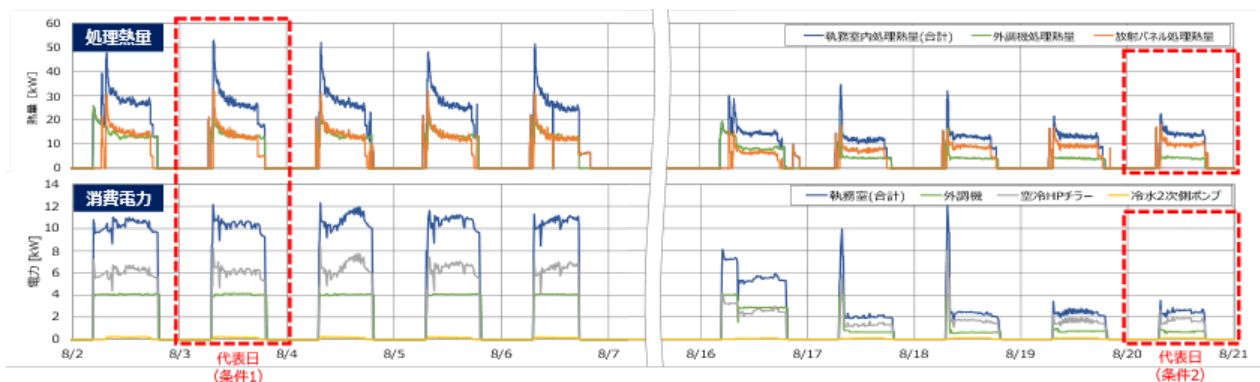


図6 夏期運転時における執務室系統の処理熱量と消費電力量

3. 個別制御による執務空間の制御と快適性

3.1 実測条件と計測概要

放射パネルの個別制御による付加価値の一つとして、同一の執務空間内で温度帯の異なるエリアを形成できる点について、複数の実測条件と執務者アンケートの比較により快適性向上の可能性について検討した。今回の検証では表1の代表日を対象とした。条件1は外調機による吹出エリアが均一で放射パネルの設定温度が全面25℃となっており、基本的な運用条件と言える。条件2は執務室全体の西側半分のみ空調を行うことにより、執務室内の東西でアンビエント域の温度帯を変えることを目的とした。外調機の吹出風量が条件1の1/4程度で吹出し、放射パネルも外調機吹出エリアに合わせて西側半分を開状態での運転とした。

計測点としては図7の各ポイントにおいて、空気温度(H=1,100 mm)およびグローブ温度(H=600 mm)を計測している。執務者アンケートについては、各実測日において図8に示すエリア毎に滞在した執務者の温熱環境満足度の回答結果に基づき考察を行った。

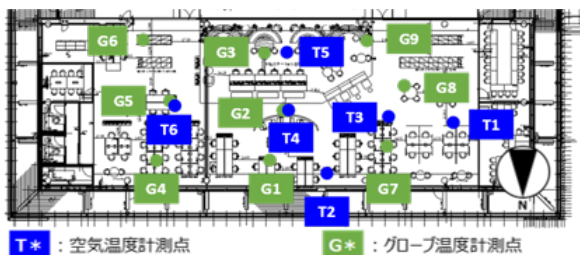
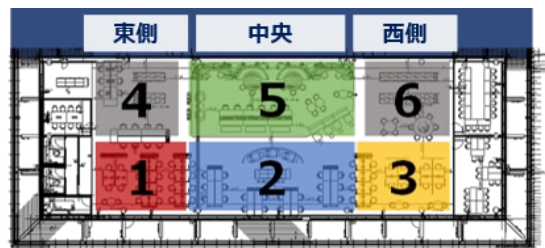


図7 執務室内の計測点一覧



※4・6は中央監視設備、ロッカー配置

図8 執務室内エリア区分

3.2 均一条件での運転による執務空間と快適性

条件1による運転を行った場合、対象の執務室においては負荷分布を除外すれば温度の均一な空間が形成される。執務室の負荷分布については人員負荷を除いた場合、中央監視設備のある東側（図8の1・4エリア）の負荷が中央監視設備のある東側（図8の1・4エリア）が高く、ロッカーの設置で座席数の少ない西側（図8の3・6エリア）の負荷が低い傾向にある。

図9に、放射パネル廻りの運転トレンドおよび空気温度と作用温度の変化を示す。図内の二方弁開閉については、図2で示した各エリアの代表パネルの状態を表している。図9より条件1における実測では中央エリアの放射パネルが温度制御によりON/OFF動作をしており、他のエリアと比較して負荷が少なかったと想定される。

一方で空気温度では東側から西側に向かって温度が低くなっている。作用温度では高負荷側の東側のみ高い傾向にあり、中央・西側は低めとなった。中央の温度分布のみ、空気温度に比べ作用温度が0.5℃程度低くなっている。他のエリアに比べ放射空調による効果がみられた結果、放射パネルも温度設定値によって制御動作をしていたものと思われる。

図10に、条件1のアンケート対象期間における執務者分布とエリア毎の満足度を示す。実測期間における執務者分布は東側14%、中央54%、西側32%となり、執務室中央エリアに多い傾向となった。またエリア毎の温熱環境満足度は「どちらでもない」を満足側に捉えると西側ほど満足度が高い結果となり、作用温度の分布に伴った結果となった。この時、執務室全体での満足度は76%となり、温冷感の申告は暑い側・涼しい側共にどのエリアにおいても見られた。

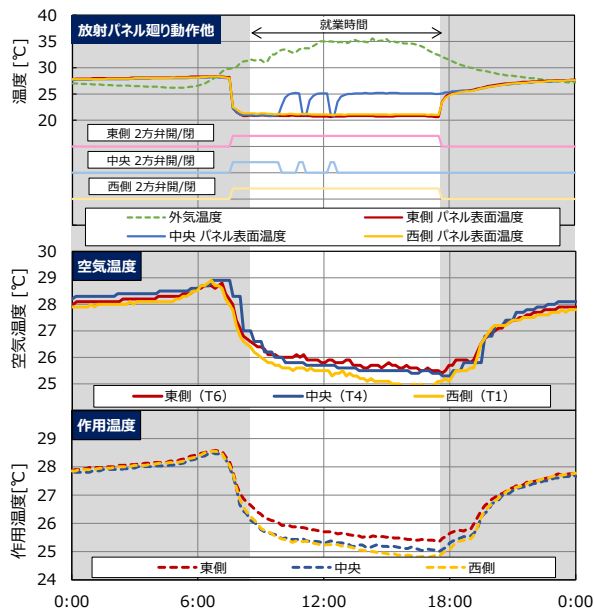


図9 条件1における各種トレンド(8月3日)

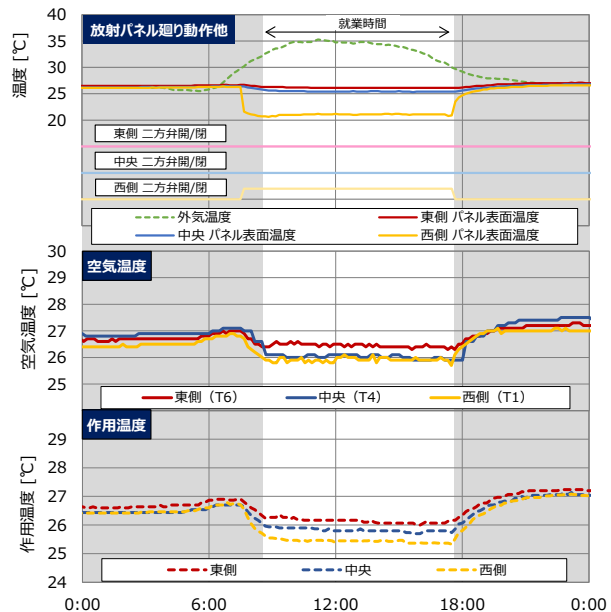


図11 条件2における各種トレンド(8月20日)

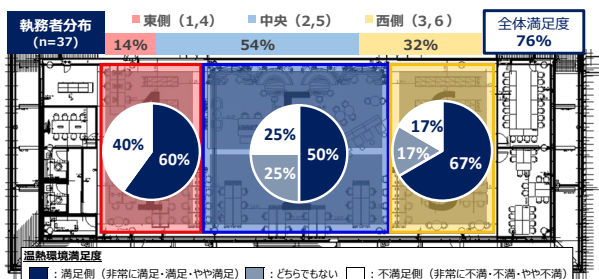


図10 執務者分布と満足度(8月3日)

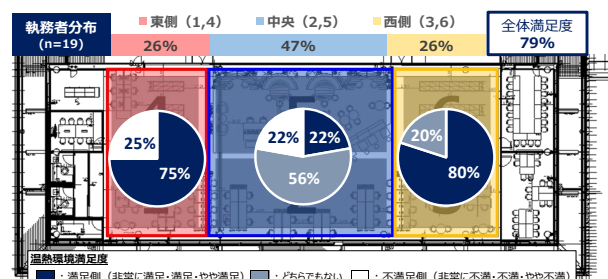


図12 執務室者分布と満足度(8月20日)

3.3 不均一条件での運転による執務空間と快適性

条件2では執務室全体の西側半分のみ空調を行っている。条件1と比較して外調機の吹出し風量が1/4程度でパネル運転枚数も半数近く減るため、執務空間のアンビエント環境はやや高い温度帯となる。

条件1と同様に図11にパネル廻りのトレンドおよび空気温度・作用温度の変化を示す。空調を行っている西側において空気温度よりも作用温度が低くなっており、放射空調による効果と思われる。作用温度は条件1と比較して全体的に0.5℃程度高い結果であった。この実測において、執務室の東西で空気温度・作用温度共にパネルの設定値に応じて0.5℃程度の温度差がつき、放射パネルの個別制御により同一空間内で温度帯の異なるエリアを形成できることが確認できた。

また、図12に条件2の実測期間における執務者分布と温熱環境満足度を示す。執務者分布は条件1の時と同様に中央エリアが最も多い結果であった。温熱環境満足度としては執務者の多い中央エリアにおける満足側の申告者が大幅に減ったものの不満足側には至らず、執務室全体での満足度は79%となり、条件1よりやや向上していた。ABWの採用により執務者が自由に環境を選べる点と、執務室内にタスク空調としてパーソナル空調機が設置されていることにより、不満要素の解消につながった可能性が考えられる。アンケート結果からも執務者の行動としてパーソナル空調機を使用した回答があり、エリアよりも個人に偏る傾向が見られたため、今後執務環境の条件と合わせより詳細な確認が必要である。

4. おわりに

今回の夏期検証から、放射パネルの個別制御により同一執務空間内で温度帯の異なるエリアを形成可能なことが確認できた。また、放射パネル主体の空調とすることで省エネ性を大きく向上させることが可能である。その場合、条件によってはアンビエント域の室温がやや上昇するが、タスク空調の使用や座席移動により執務環境における温熱環境満足度を大きく損なわずに運用ができると考えられる。

以上より、個別制御方式の放射パネルはABWやタスク空調と組合せることで省エネを図りながら快適性の高い執務環境を再現できる可能性を確認した。

文 献

- 1) 武藤友香, 羽鳥大輔, 高西茂彰, 平原美博, 清水昭浩, 木村健太郎, 牧野内絵里, 粕谷文: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証(第1報) 全体計画及びコンセプト, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(札幌)”, 185-188(2019).
- 2) 清水昭浩, 平原美博, 木村健太郎, 柴田克彦, 羽鳥大輔, 武藤友香: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証評価(第4報) 二次側空調システム及びセンシングシステムの概要, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(オンライン)”, 157-160(2020).
- 3) 柴田克彦, 平原美博, 清水昭浩, 羽鳥大輔, 武藤友香, 田辺新一: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証評価(第10報) 潜顕分離空調の夏期性能評価とシステム最適化, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(福島)”, 197-200(2021).
- 4) 武藤友香, 羽鳥大輔, 高椋敦士, 木村健太郎, 清水昭浩, 田辺新一: エネルギー自立型サステイナブル研究施設の計画と実証評価(第19報) 実内部負荷調査に基づくシミュレーションによる運用評価, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(神戸)”, 189-192(2022).

ABSTRACT

In this innovation center with a task-ambient air-conditioning system, the outside-air conditioner, the radiant air conditioning treats with the building skin load and lighting load, and the personal air-conditioner mainly treats with the human related load which varies dependent upon an individual behavior and preference.

In this report, we report about the effects of individual control type radiant air conditioning system on energy saving and comfort from actual summer data in offices that use ABW.

DEVELOPMENT OF A GRID INDEPENDENT ENERGY SYSTEM USING ENERGY SUPPLY AND DEMAND PREDICTION (Part 3) Designing Model Predictive Control by Energy Simulation

Yuki MATSUNAMI ¹, Yuan GAO ², Shohei MIYATA ², Yasunori AKASHI ²
Katsuhiko SHIBATA ¹, Yoshiaki KAWAKAMI ¹

ABSTRACT

In this research, we aim to develop an energy self-sufficient building by applying model predictive control (MPC). In this paper, the details of the objective functions (OF) for the MPC, at the Takasago Innovation Centre are explained. One OF aims to prevent reverse power flow, and the other aims to minimize the peak of received power, during the predicted period. Then, the validity and effect of the MPC is shown through energy simulations. As a result, both OFs worked as planned, and the annual peak of received power was reduced 55.3% , compared to the case of conventional sequence control.

1. INTRODUCTION

This study aims to build an energy management system (EMS) which can achieve an energy self-sufficient building by renewable energy. In this context, model predictive control (MPC) is employed to optimally control the system against various objective functions (OFs) and constraints, based on the predicted results of energy demand and power generation. Therefore, the objective of this study is to propose a design method of prediction models, as well as OFs and constraints of the MPC, through verification on an actual building (TIC: Takasago Thermal Engineering Innovation Center).

In the first report^[1], system overview of TIC (Fig. 1), and the fact that reverse power flow is restricted was introduced, as well as operational issues. It was stated that given the energy balance of TIC, stored electricity will reach maximum, and excessed energy will lose its way and reverse power flow will occur in some periods. It was also stated that charged energy of the battery (SOE: State of Energy [kWh]) will run out on some periods, resulting in the excessing of received power over the target value of 10kW. In the second report^[2], methodology and case study results of the solar radiation prediction, which is required for the hourly PV output prediction were presented.

In this report, two MPCs were formulated as measures to address the operational issues presented in the first report^[1], and the results of the verification of the MPCs through energy simulation are described. The first MPC aims to control the maximum SOE of the battery energy storage system (BESS) and prevent reverse power flow. The second MPC aims to reduce the peak of received power, based on the assumption that the basic electricity bill is determined according to the maximum received power in the previous 12 months^[3]. In the next report^[4] (Part 4), the improved methodology and case study results in predicting solar radiation are described.

This article is an update of a technical paper, submitted to the 2022 annual meeting of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE), September 15-17

¹ Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

² The University of Tokyo

2. BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS)

2.1 Model overview and calculation formula

As shown in Fig. 1, the three components of the BESS are: (1) storage battery, (2) PCS (Power Conditioning Subsystem), (3) auxiliary equipment (temperature control function, power supply for controls, etc.).

In addition, the following assumptions were made.

- 1) Energy losses of BESS occur only at the PCS and the proportion of power going in and out (η_{PCS} : PCS coefficient) of PCS is constant.
- 2) Power consumption of auxiliaries (P_{AUX}) is constant.
- 3) Power going in and out of the storage battery is equal to the change in SOE (State of energy).

Equations based on these conditions are shown in Eq (1) ~ (3).

$$P_{Battery} \geq 0 \text{ (Discharge)}$$

$$P_{System} = \eta_{PCS} P_{Battery} - P_{AUX} \quad \dots (1)$$

$$P_{Battery} < 0 \text{ (Charge)}$$

$$P_{System} = \frac{1}{\eta_{PCS}} P_{Battery} - P_{AUX} \quad \dots (2)$$

$$E_{Battery,t+1} = E_{Battery,t} - \int_t^{t+1} P_{Battery} dt \quad \dots (3)$$

(P_{System} : System output [kW], $P_{Battery}$: Battery output [kW], P_{AUX} : Auxiliary Power [kW], $E_{Battery,t}$: SOE at step(t) [kWh] and η_{PCS} : PCS coefficient [-])

As the only measured data of TICs BESS are the system output and SOE, auxiliary power and PCS coefficient were estimated from these measured values. Specifically, auxiliary power and PCS coefficient that minimize the residual difference between the measured difference of SOE between each time step, and the estimated difference of each time step from Eq. (1) ~ (3), were calculated. Summary of used data and estimated values are shown in Table 1.

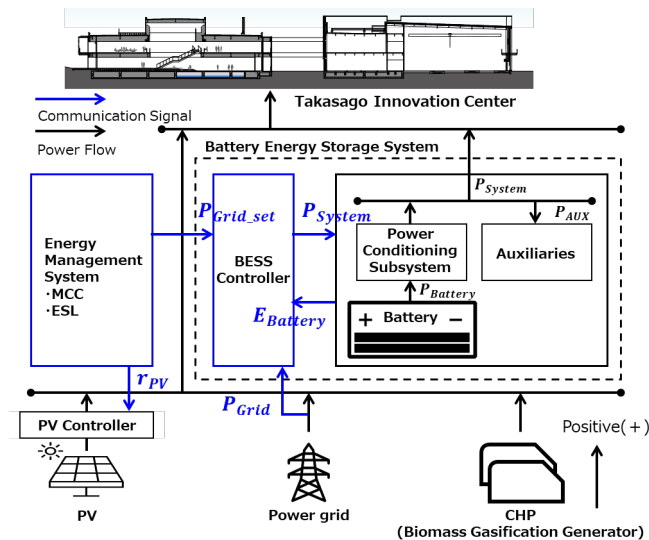


Fig. 1 TIC System Overview

Table 1 Data and Results of Parameter Estimation

Used Data	Time Step	1 hour
	Period	May 2021~December 2021
Estimated Values	P_{AUX}	3.49 kWh
	η_{PCS}	0.95

2.2 Time series SOE estimation

Transition of SOE over a one-week period was calculated from Eq. (1) ~ (3), which were compared with measured values. Initial value of SOE was set to the measured value at 2022/1/12/00:00, from which the transition of SOE was calculated by iterating the calculation of Fig. (3). The storage battery output ($P_{Battery}$) at each time step was calculated from Eq (1) and (2), as well as the measured system outputs (P_{System}). The results showed that mean absolute percentage error was 2.99%, and that the calculation model described above is sufficient for predicting the transition of SOE.

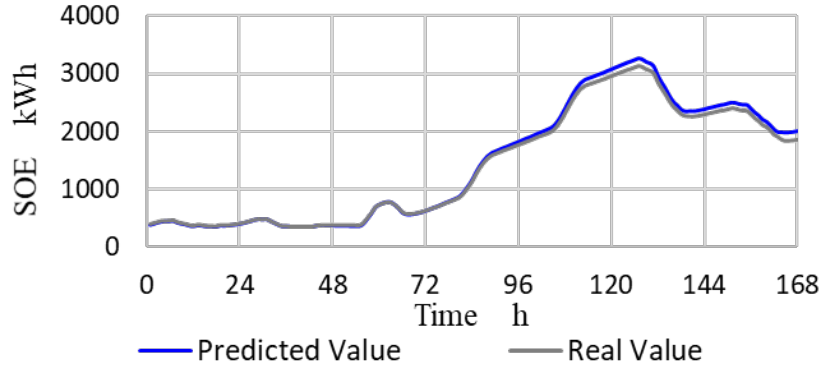


Fig. 2 SOE Prediction Result

2.3 Constant Power Receiving Control (CPC)

The existing BESS controller determines the system output value which brings the received power closest to a specific value (RPV: Receiving Power Value), within the boundaries of the system output determined by the current SOE and rated value. On the other hand, as a safety measure against control errors due to CPC response delays etc., RPV is basically set to 10 kW (RPT: Receiving Power Target)^[1].

3. FORMULATION OF MPC

MPC requires the formulation of an OF within a given prediction period, as well as optimizing the problem at each time step, with the control inputs as variables^[2]. This chapter describes the formulation of the following optimization problem: maximum energy capacity control (MCC) which aims to prevent reverse power flow, energy supply levelling control (ESL) which aims to cut the peak of received power.

3.1 Maximum Energy Capacity Control (MCC)

Control overview is shown in Fig. 3, and the OF and constraints are shown in Eq. (4). The OF is defined as the residual square between the predicted maximum SOE, and the predetermined maximum SOE threshold (MST) within the prediction period. Therefore, the PV output rate at each time step that minimizes the OF is the output of MCC.

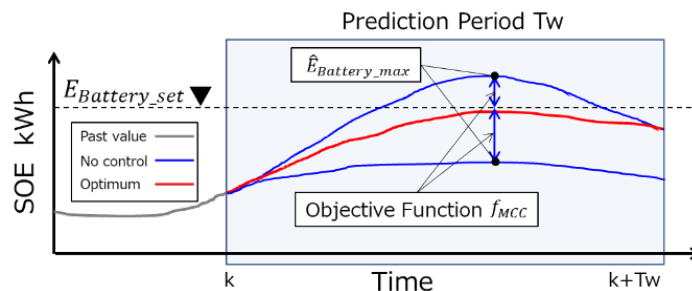


Fig. 3 Maximum Capacity Control (MCC)

$$\begin{aligned} \min. f_{MCC} &= (\hat{E}_{Battery_max} - E_{Battery_Set})^2 \quad \dots (4) \\ s. t. \hat{P}_{Load} &= \hat{r}_{PV} \hat{P}_{PV_MAX} + \hat{P}_{CHP} + \hat{P}_{System} + \hat{P}_{Grid} \\ \hat{P}_{Battery}, \hat{P}_{Grid} &= f_{CPC}(P_{Grid_Target}) \\ 0 &\leq \hat{r}_{PV} \leq 1 \end{aligned}$$

($\hat{E}_{Battery_max}$: Predicted maximum SOE, $E_{Battery_set}$: MST, \hat{P}_{Load} : Predicted load, \hat{r}_{PV} : PV output rate, \hat{P}_{PV_MAX} : Predicted maximum PV output, \hat{P}_{CHP} : Predicted CHP output, \hat{P}_{System} : Predicted BESS output, \hat{P}_{Grid} : Predicted received power and f_{CPC} : Function of CPC)

If the maximum SOE in the prediction period is to exceed the MST, PV output it is suppressed by multiplying the PV output rate, which is considered to avoid full charge and can prevent reverse power flow.

3.2 Energy Supply Leveling Control (ESL)

Control overview is shown in Fig. 4, and the OF and constraints are shown in Eq. (5). The objective of ESL is to find the PRV (which is the control set value of CPC) that will result to the lowest peak of received power during the prediction period. Thus, the residual square between the RPT and the peak of received power is defined as the OF.

$$\begin{aligned} \min f_{ESL} &= (\hat{P}_{Grid_max} - P_{Grid_target})^2 \quad \dots (5) \\ s. t. \hat{P}_{Load,t} &= \hat{r}_{PV,t} \hat{P}_{PV_MAX,t} + \hat{P}_{CHP,t} + \hat{P}_{Battery,t} + \hat{P}_{Grid,t} \\ \hat{P}_{Battery}, \hat{P}_{Grid} &= f_{CPC}(P_{Grid_set}) \end{aligned}$$

(\hat{P}_{Grid_max} : Predicted maximum received power, P_{Grid_Target} : RPT)

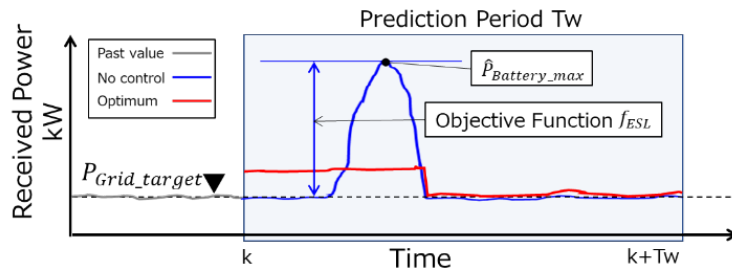


Fig. 4 Energy Supply Leveling (ESL)

3.3 MPC Flow

The Flow of MPC is shown in Fig. 5. First, the PV output rate during the prediction period is calculated by MCC, based on the given prediction results as well as the current SOE. Next, the PRV is calculated by ESL based on the given PV output rate. Finally, the control values (PV output rate, RPV) are input to each controller respectively.

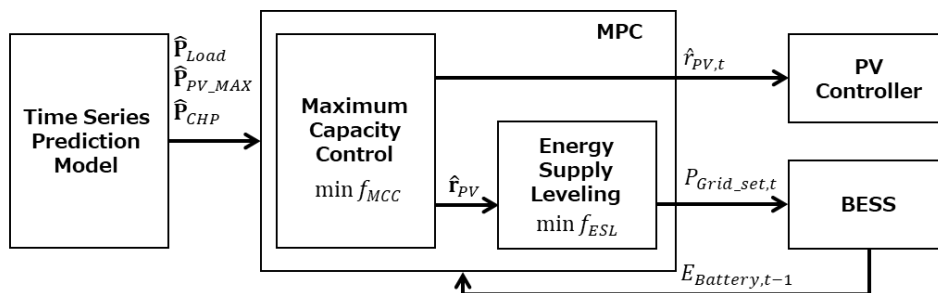


Fig. 5 Flow diagram of MPC

3. MPC Verification

This chapter presents verification results under hypothetical conditions for the two MPCs presented in Eq. (4) and (5). It is assumed that both power consumption and generation can be predicted with 100% accuracy. The effectiveness and validity of the MPCs are demonstrated through simulations. Also, the assumed prediction period is changed and the effects on the occurrence of reverse power flow and the peak of received power are shown. The Powell method from the Python library SciPy^[5] was used to solve the MPCs.

3.1 Operation check

For each MPC, simulations were carried out with hypothetical values for the following time series of each hour: power consumption, maximum PV output, CHP output.

(1) MCC

The preconditions are shown in Table 2, and PV output and SOE are shown in Fig. 6 and 7. Hypothetical conditions were set up where surplus power was continuously generated and the SOE exceeded the MST when no controls were applied. It was set so that surplus power continues to be generated even when the PV is shut down, due to the base operation of CHP which is a feature of TIC. The results showed that MCC was able to keep the SOE below the MST regardless of the prediction period. But when the prediction period was 80h, the exceedance was predicted earlier, resulting in an earlier start of PV suppression.

(2) ESL

The preconditions are shown in Table 3, and the SOE and received power are shown in Fig. 8 and 9. Hypothetical conditions were set up where SOE would go down to 0%, and the received power increases from the target value of 10 kW to 120 kW. The simulation results showed that the ESL was able to calculate the optimum RPV regardless of the prediction period. When the prediction period was 80h, the peak of received power was lower because ESL responded earlier.

Table 2 Preconditions for RPP test

Time Step	1 h
Period	60 h
Max. Charged Energy Set Value	2,500 kWh
Initial Charged Energy	0 kWh
Prediction Period	20 h, 80h

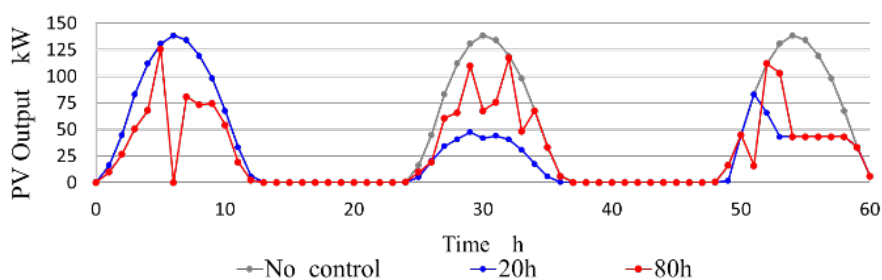


Fig.6 Results of PV Output

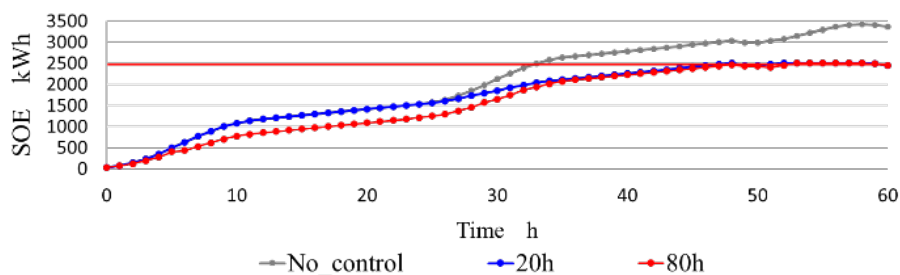


Fig.7 Results of SOE

Table 3 Preconditions for PCC test

Time Step	1 h
Period	60 h
Target of Power from Grid	10 kW
Initial Charged Energy	2,500 kWh
Prediction Period	20 h, 80h

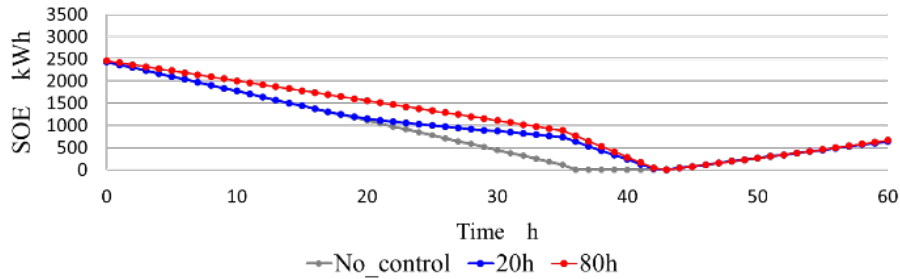


Fig.8 Results of SOE

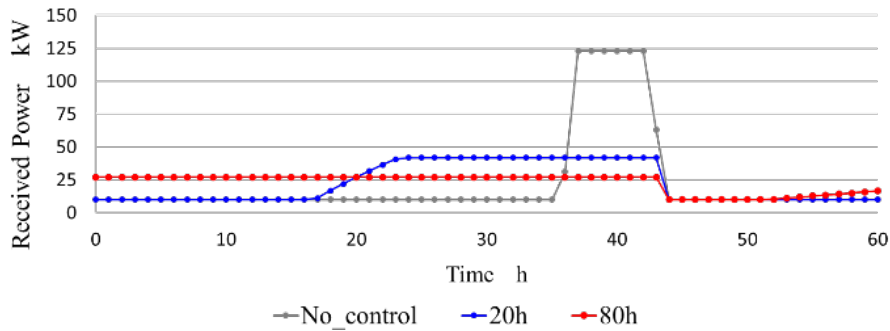


Fig.9 Results of Power from Grid

3.2 Annual Simulation

(1) Operation plan of CHPs

As described in the first report ^[1], if the CHPs annual operation is not set so that the balance between power consumption and generation is matched, surplus power will be constantly generated and SOE will reach maximum, leading to excessive PV suppression. Therefore, the CHP operation pattern was determined according to the following conditions.

- 1) Annual total of CHP generation, PV generation and received power (10 kW) equals the total of power consumption.
- 2) CHPs operate in base operation, simultaneously.
- 3) CHPs are shutdown on holidays longer than three days
- 4) CHPs are shut down on weekends once every 600 hours (maintenance cycle recommended by the manufacturer)

(2) Other Preconditions

Other preconditions are shown in Table 4.

(3) Simulation Results

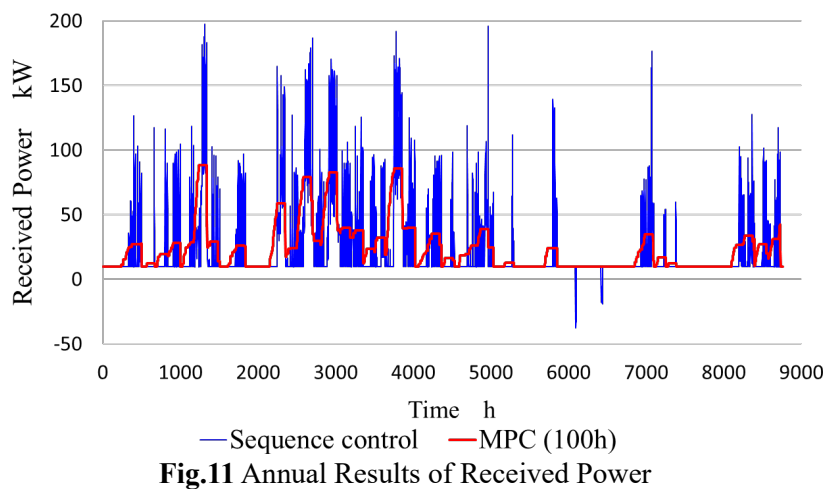
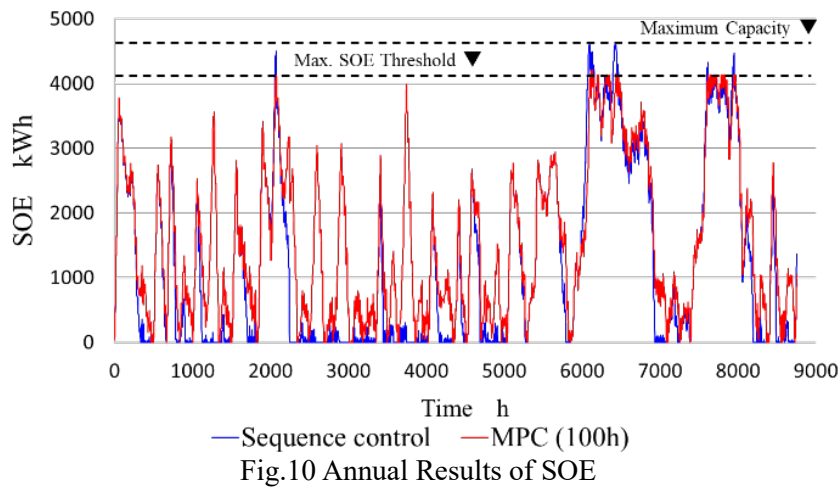
The results of annual SOE and received power are shown in Fig.10 and 11. The results from the conventional sequence control ^[1] are plotted together for comparison. For example, in the case of sequence control, SOE reached maximum just after 6,000h resulting in reverse power flow, whereas MCC kept SOE below the threshold value and prevented it. On the other hand, ESL reduced the peak of received power of approximately 109 kWh (55.3%), compared to sequence control.

Table 4 Preconditions for Annual Simulation

Time Step		1 h
Period		August 2020 ~ July 2021 (8760h)
Input Data (N=8760)	Load	Measured Data [kW]
	Max. PV Output	Estimated from Measured Insolation [kW]
	CHP	Calculated from Operation Plan [kW]
	PV	200 kW (Max.)
Equipment Specifics	CHPs	Rated Output: 75 kW
		Power of Auxiliaries: 20kW
	Battery	SOE Capacity: 4,590 kWh
		Output Range: ±625 kW
Target of Power from Grid		10 kW
MPC	Max. SOE Threshold	4,131 kWh (90% of Max. Capacity)
	Initial SOE	0 kWh
	Prediction Period	100 h

(4) Effects of Prediction Period

Finally, effects on the annual occurrence of reverse power flow, as well as the peak of received power was verified when the prediction period was changed. The results showed a gradual decrease in the peak of received power as the prediction period increased (Fig. 12). This can be considered that the longer the prediction period, the earlier the received power could be increased, and so that the annual peak could be further decreased. As for reverse power flow, it was found that the annual occurrence could be prevented if the prediction period was longer than 50h (Fig. 13). This is considered that at least 50h is required to respond to the sudden increase in SOE, immediately after 6,000h. and start suppressing the PV output.



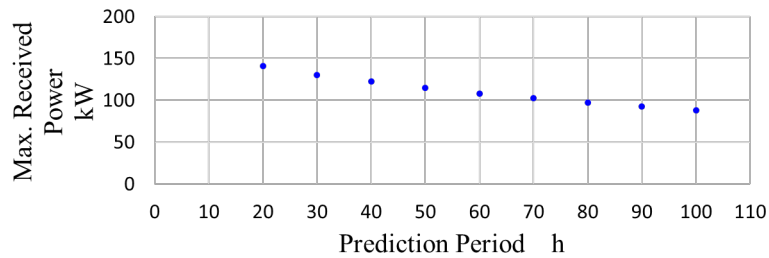


Fig.12 Maximum Received Power

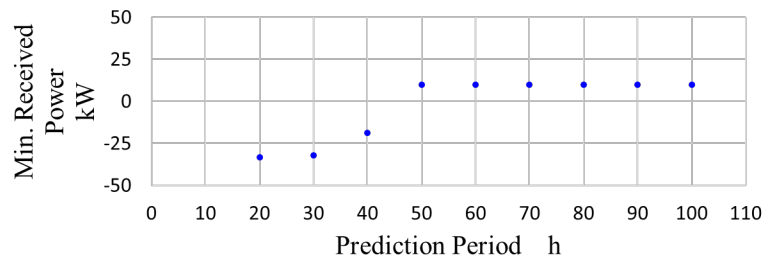


Fig.13 Minimum Received Power (-:Reverse Power Flow)

CONCLUSION

The BESS calculation model and two MPCs were formulated, and the results of their operation test and effectiveness were presented. The results showed that for the given preconditions, there exists an aptitude value length of prediction, in which reverse power flow can be prevented (approximately 40~50 h). Results also showed that MPC is effective in reducing the peak of received power by 55.3% when the prediction period is 100 h, compared to the conventional control method.

In this report, conflict of the 2 OFs from MCC and ESL where not considered. But when prediction period becomes longer, conflict is expected when MCC intends to reduce SOE as it reaches near maximum, but on the other hand, ESL intends to increase SOE and lower the future peak of received power. Furthermore, it was assumed that a 100% accurate prediction was obtained. Henceforth, study on conflicts between OFs (Requiring a multi-objective optimization) as well as effects of prediction error is necessary.

REFERENCES

- [1] Y Matsunami, et al., Vol.9, pp.1-4, Technical papers of annual meeting, The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 2021
- [2] Y. Gao, et al., Vol.9, pp.5-8, Technical papers of annual meeting, The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 2021
- [3] TEPCO, Commercial power , Available online: https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan_h/plan06.html (accessed 30 April 2022)
- [4] Y. Gao, et al., Vol.9, pp.5-8, Technical papers of annual meeting, The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 2022
- [5] SciPY, API Reference, Available online: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/optimize.minimize-powell.html> (accessed 30 April 2022)

要 約

本研究ではモデル予測制御 (MPC) を適用することにより、建物内の自家発電で得た再生可能エネルギーで自給自足することを目指した「エネルギー自立型システム」の開発を目的としている。

本報では、高砂イノベーションセンターにおける MPC の目的関数について述べる。片方の目的関数は予測期間中の逆潮流の防止を目的とし、もう片方は同期間中の受電電力ピークを最小に抑えることを目的としている。またエネルギーシミュレーションにより MPC の有効性と効果を示した。その結果、どちらの目的関数も計画通りに動作し、従来のシーケンス制御の場合と比較して、年間受電電力のピークを 55.3% 低減できる効果が示された。

FEASIBILITY STUDY ON COMFORTABLE SPACE ENVIRONMENT UNDER LOW GRAVITY

Katsuhiko SHIBATA¹, Tai NAKAMURA²

ABSTRACT

Today when even ordinary people could visit the International Space Station (ISS) as travellers, a new question is raised whether the current cabin environment of ISS set for professional astronauts such as temperature, humidity, air quality, and noise levels are really good for everyone. Above all, for the Asian people, whose habitus are different from Westerners, the comfortable environment and the air conditioning system that creates it must be different. In particular, when we travel to deep space or the lunar surface, the duration of stay extends no less than a few weeks. Consequently, the Crew Quarter (CQ), the relaxing and sleeping place, requires individually customized air-conditioning and noise suppression. Therefore, in this research, we investigated the desirable environmental conditions based on ASHRAE, ISO, and the standards of comfort in Japan by comparing and evaluating the ISS standards with them. In this paper, we propose an air conditioning method that realizes customization in temperature, humidity, and airflow in the CQ with low noise and proper diffusion of carbon dioxide from exhaled breath, using computational fluid dynamics (CFD) analysis.

1. INTRODUCTION

In Japan, JAXA holds a central role in implementing space development programs, and from the beginning of Japan's human space program, most of them were conducted in collaboration with NASA. In 2018, NASA issued a roadmap for Mars exploration in the 2030s as the new human space program after ISS (the International Space Station) [1]. Then, in 2019 Artemis program [2] was announced by NASA, which will begin with constructing a gateway in near lunar orbit in the 2020s to carry out lunar exploration based on the gateway. A Japanese private entity "ispace, Inc." [3] participates in the Artemis program providing a lunar explorer "HAKUTO-R" and Takasago Thermal Engineering Co., Ltd. has invested in this program taking on the challenge to electrolyze water on the lunar surface. On the other hand, the space travel business by private companies has become a reality and has already conducted several space flights. Through these activities, we recognized there are potential demands for ECLSS (Environment Control / Life Support System) in manned space missions to enable long travel in terms of the period and the distance and to embark the untrained tourists. Under such circumstances, the improvement of the environment quality of the cabin space from "endurance" to "comfort" by utilizing ECLSS functions. In particular, improving the CQ (Crew Quarter) environment in conformity with the request of the individual passenger is considerably important for long travel. In this research, we surveyed the literature on the environment quality standards of CQ, and investigated and examined a range of comfortable temperatures and humidity as well as the way to realize it.

This article is update of "73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2021."

¹ R&D center, TTE Co., Ltd.

² External Expert, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

2. STANDARDS OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

An environment standard with the requirements for the development was specified when JEM (the Japanese Experiment Module) of ISS (the International Space Station) was developed [4]. Since Japan has few experiences in human space programs, it followed NASA's environment standards almost as it is. Table 1 shows typical items related to air qualities extracted from the environment standards. This table listed the environment quality standards of JEM and NASA and the Japanese environment quality standards for building hygiene management on the ground as a reference. The validity of these criteria was verified based on literature such as NASA-STD-3000 [5] and related materials.

Table 1 Environment standards of relating to Air qualities.

Parameter	JEM Japanese Experiment Module	U.S ECLS	Building in Japan
Total pres. (kPa)	97.9~102.7	97.9~102.7	—
O ₂ pres. (kPa)	19.51~23.1	19.51~23.1	—
CO ₂ pres. (kPa)	Daily ave. 0.707, peak 1.01	Daily ave. 0.705, peak 1.01	1,000 ppm
Atmospheric temp. (°C)	18.3~26.7	17.8~26.7	17~28
Dewpoint (°C)	4.4~15.6	4.4~15.6	—
Relative humi. (%)	25~70	25~70	40~70
Particulate concentration	Daily ave. 3,530,000 part/m ³ peak 70,600,000 part/m ³	Daily ave. 0.05mg/m ³ (100,000 part/ft ³) peak 1.0mg/m ³ (2,000,000 part/ft ³)	0.15 mg/m ³
Intramodule circulation (m/s)	Daily ave. 0.067~0.203 min. 0.035, max. 1.02	Daily ave. 0.051~0.2 min. 0.036, max. 1.02	<0.5 m/s
Noise	<NC-50	—	—

2.1 CO₂ concentration standard

Dilution and removal of air contamination are a priority in non-ventilated spaces. In particular, as the amount of CO₂ produced by human exhaled breath is uncontrollable, appropriate control of CO₂ concentration is required. Since JEM's CO₂ concentration standard is based on a partial pressure marking, the concentration conversion at a total pressure of 1 atm is approximately 7,000 ppm. This is a considerably higher concentration than the hygiene control value on the ground. However, although CO₂ concentration is used as a substitute index for ventilation volume on earth, there is a difference in that JEM sets a standard value from the health hazard of single component gas. In the previous literature [6], [7], there is a description that the minimum concentration that affects health is 7,000 ppm, which is consistent with JEM's environment standards. Table 2 shows the permissible CO₂ concentrations on the ground of several countries [8]. In some cases, the upper limit is 5,000 ppm in the labour environment, but in the deskwork environment it is approximately 1,000 ppm, and as an index of CO₂ alone, it is 3,500 ppm.

In addition, Japanese ventilation standards set the required ventilation volume per person to 30 m³/h. This requirement can reduce the CO₂ concentration in the habitable room to 1,000 ppm or less by dilution, but ventilation is not possible on the ISS. In addition, due to insufficient ECLSS performance, the current environment standard is 7,000 ppm, but further improvement is desirable in the future.

Fig. 1 shows the relationship between the CO₂ concentration and the dissatisfied rate [8]. The experiment in the figure is consistent with the increase in the concentration in CQ because it is the dissatisfied rate when the CO₂ concentration increases due to the bio-emissive substance. According to the results of Japanese experiments [9], a CO₂ concentration of about 1,000 ppm results in a 20 % dissatisfied rate. This experiment is the case when the CO₂ concentration of the outside air is 370 ppm, and the concentration difference compared to the outside air is more significant than the absolute value. At the current standard of 7,000 ppm, the dissatisfied rate exceeds 70 %. Moreover, although there are some differences in sensation between Japanese and Westerners [10], [11], it seems that 3,000 to 3,500 ppm, which at least 50% of people do not feel uncomfortable, is appropriate.

Table 2 Permissible CO₂ concentrations of several country.

Country (Year)	Permissible CO ₂ concentration	Target
Norway Ministry of Health and Welfare (1999)	Max 1,000 ppm * Indicator of indoor air pollution	Habitable room
Canada Ministry of Health (1995)	1,000 ppm * Indicator of ventilation	Office
Canada Ministry of Health (1987)	≦ 3,500 ppm * Acceptable long-term exposure range	Habitable room
Singapore Ministry of the Environment (1996)	1,000 ppm (8 hr average) * Indicator of ventilation	Office with air conditioning
China Hong Kong Special Administrative Region (2003)	Best quality : 800 ppm (8hr average) Good quality : 1,000 ppm (8hr average)	Building, enclosed space with ventilation and/or air conditioning
China General Administration of Environmental Protection (2002)	1,000 ppm (24hr average)	Residence and office
South Korea Environment Department (2003)	1,000 ppm	Large-scale store, hospital building etc.
Taiwan Environmental Protection Agency (2012)	1,000 ppm (8 hr average)	—

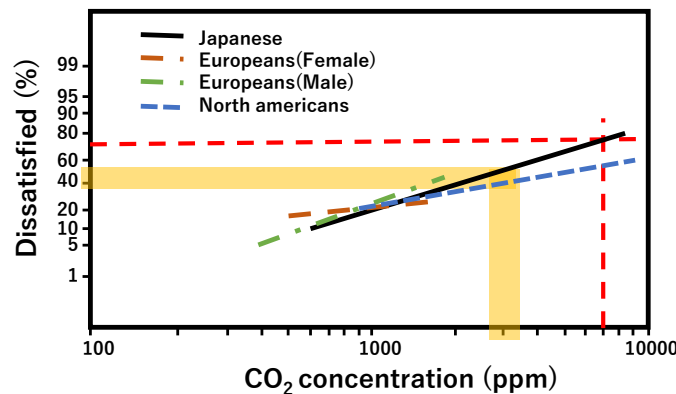


Fig. 1 CO₂ concentration and the dissatisfied rate.

2.2 Temperature and humidity standards

The heat sensation is a necessary item when a person judges comfortability. Temperature, humidity, airflow, and radiation are environment factors of human heat sensation. In addition, the human body elements such as the amount of clothes and the metabolic rate are also important factors. Hence, it can be determined by these factors in combination with the exposure time. Judging from the way of CQ utilization, the amount of clothes is presumed to be about 0.5 clo [Note 1], which is the same amount of summer clothing on earth, and the metabolic rate is about 1.0 met [Note 2], which is almost same level as a quiet state of the body. Assuming that the time of stay in CQ is about 8 hours including the sleep the lowest permissible temperature is 18 °C, and the comfort zone is around 25 °C from the previous study shown in Fig. 2 [5]. This fact indicates that the current JEM temperature standard is set slightly lower.

For reference, Fig. 3 shows ASHARE Standard 55, which is well known as the thermal comfort range on the ground [12]. ASHRAE divides the temperature and humidity range into summer and winter based on the difference in the amount of clothes. In addition, the operative temperature, which is the average value of the air temperature, and the radiation temperature, are used as the temperature here. On the other hand, natural convection does not exist in the weightless space, but heat transfer by radiation still occurs. Therefore, it is considered more appropriate to use the operative temperature in the same way as on the ground to evaluate the heat sensation in CQ where the amount of clothes is half-sleeved and the metabolic rate is small.

Next, we consider the humidity standard. As for the heat sensation, the low humidity alleviates the heat even at a high air temperature. Fig. 4 shows the transition of ASHRAE's comfort zone [12]. With every standard revision, the relationship between temperature and humidity for comfort has become more detailed. Furthermore, in recent years, with the spread of PET bottled beverages, restrictions on the low humidity side have tended to be relaxed. As a result, if the temperature range is 23 °C to 26 °C and the humidity range is non-condensation, it is appropriate to consider it no problem.

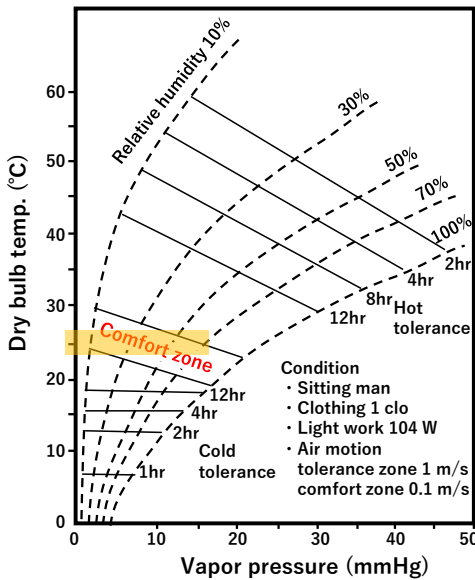


Fig. 2 Environmental requirements.

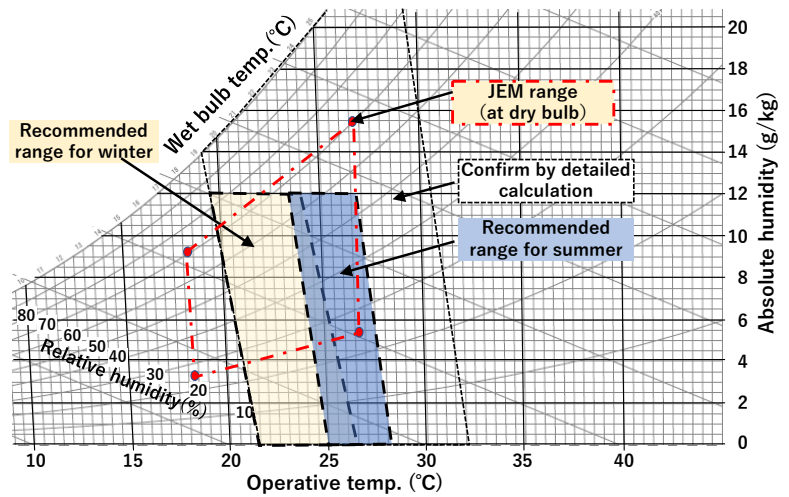


Fig. 3 ASHRAE standard 55.

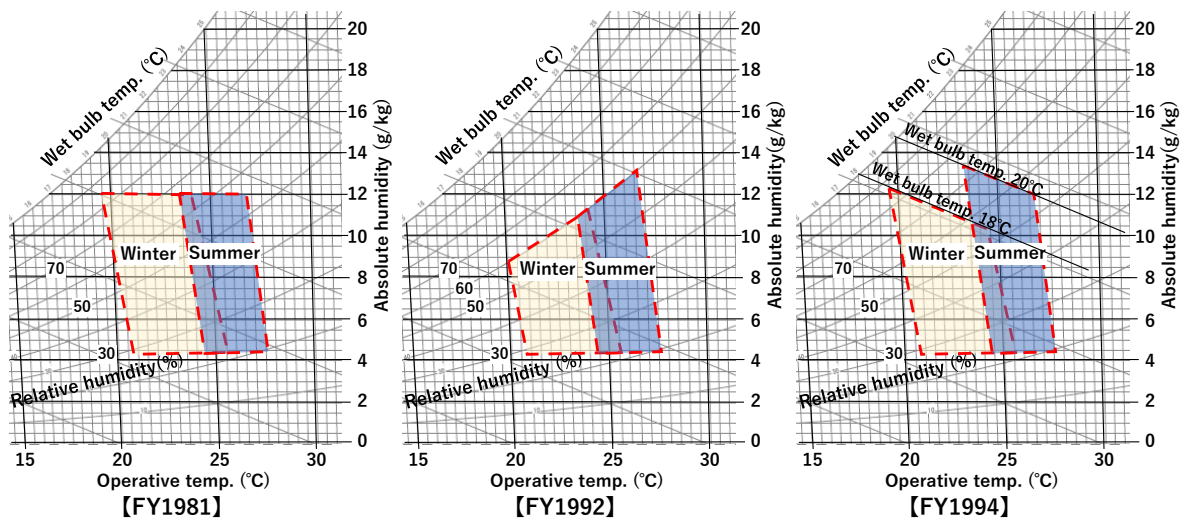


Fig. 4 Transition of ASHRAE's comfort zone.

2.3 Criteria for circulation air volume

For processing the internal heat load in ISS, we cannot count on radiational cooling because the inside walls of the experiment modules and common areas are equipped with various devices. Therefore, the heat load from human bodies and the lighting equipment is processed by the convective heat transfer with circulating air. On the other hand, since the CQ targeted here does not have a device on the wall that impedes heat transfer, we can also count on radiational cooling from the wall surface for heat load

processing. It means the diffusion of CO₂ in the exhaled air rather than the heat load processing governs the amount of air supplied to the CQ. One of the previous research on CQ users [13] has examined the expiratory advection range from the analysis of the expiratory jet flow and CO₂ concentration. However, in this research, not only temperature distribution, the CO₂ concentration of exhaled air, and the subjects but the noise from the air supply and exhaust ports are equally concerned. And as far as we know, there is no such case as these factors have been comprehensively evaluated. Since CO₂ has a slower diffusion rate than air, it should be enough to exhaust the equal air to the breathing volume out of the zone between each breath to exhaust CO₂ from the respiratory zone. Generally, a human breathes 500 ml ($\approx 8\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$) of air 12 to 20 times per minute. Based on this, if the airflow speed moves 8cm in 3 seconds, that is, if there is an airflow of 0.03 m/s or more one can breathe fresh air provided that the frequency of breaths is 20 times per minute, which is the worst case. Fig.5 shows the concept of the minimum air velocity. Also, regarding the upper limit of the airflow speed, we think 0.5 m/s or less is appropriate, which does not cause discomfort.

2.4 Noise standards

A quiet environment is necessary when resting or sleeping. The environment standards for noise based on the Environmental Basic Law of Japan are 50 dB or less at night in areas used for commercial and industrial purposes, and 45 dB or less at night in areas used for residential purposes. Therefore, NC-50, the requirement of JEM, seems acceptable. In the meantime, the noise data of the CQ during low airflow operation measured with the microphone installed at the head position at the pre-launch inspection of the CQ in Fig. 6 shows a higher noise level of 58 dB at 250 Hz. An environment in which such low-frequency noise is constantly generated interferes with a good night's sleep.

The noise source of the CQ is the air supply fan into the CQ. The drastic countermeasure is to make the air supply fan quieter, but there are other ways to do this by using the sound absorption effect of the CQ interior, such as sound absorption in the duct and the air outlet away from the head. In any case, noise reduction is closely related to the air conditioning system.

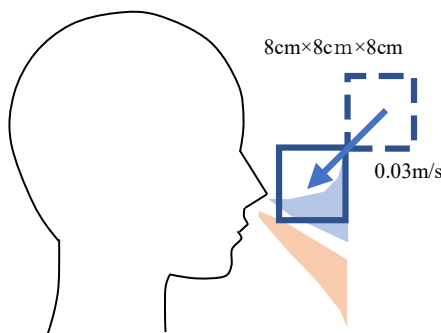


Fig. 5 Concept of the minimum air velocity.

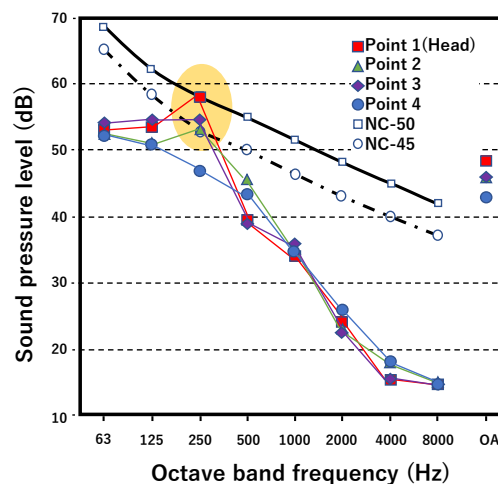


Fig. 6 CQ interior sound level measurements at low fan speed.

3. PROPOSAL OF COMFORTABLE ENVIRONMENT STANDARDS CONSIDERING UNSKILLED PASSENGERS

In this section we will review the environment standards of JEM again, which already have been shown as appropriate, assuming that unskilled people will advance into space hereafter, and then propose the comfortable environment standards as follows. Table 3 shows the current JEM standards and our new environmental standards that lay stress on comfort. As for the concept of the new standards, since the

operating costs in space are significantly different from those on the ground, we prioritize comfort for the items that do not require significant improvements from the current ECLSS. At the same time, we tried to comply with the current standards considering the feasibility for the items such as processing devices that require increment of size and equipment that needs further replenishment. Moreover, as a new trial, here we focused on the sensation of the Japanese representing Asian people.

3.1 Standards for CO₂ concentration, temperature, and humidity

Regarding the CO₂ concentration, the lower concentration is desirable to improve intellectual productivity [14] needless to say to prevent health damage by it. On the other hand, since CO₂ removal requires consumables such as adsorbents, it is not realistic to require too less concentration. Then, according to a policy we set in this study, the discomfort shall be less than 50%, and the CO₂ concentration in the inhalation zone of respiratory air shall be at 3,000 ppm as the upper limit.

As for temperature, since the amount of clothes is different, the working temperature, which is the average of the radiation temperature and the air temperature, was used as the standard. And we set the average temperature inside CQ at around 25 °C, which is the comfortable range in summer on the ground. In addition, the vertical temperature distribution near the person is kept within 3 °C [15] to reduce the discomfort caused by the temperature change. No lower limit is set for the humidity, which tends to be relaxed on the ground.

3.2 Criteria for circulation air volume and noise

As for the airflow speed that affects the circulation of air volume, the faster the velocity, the more discomfort we feel regardless of exposure time. Therefore, the airflow speed is better to set to the low range as much as possible. Then, the lowest limit of the velocity is determined by that the breathing air is replaced between each breath, and the upper limit is set at 0.5 m/s based on the air environment standard [16] for air conditioners in Japan.

For the sound environment, we recommend NC-45, which is equivalent to the level at night-time in residential areas in Japan, considering a good night's sleep.

Table 3 Environment standards of current and new.

Parameter	Current JEM value	New CQ comfort value
CO ₂ pres. (kPa)	Daily ave. 0.707(→7,000 ppm) peak 1.01	Breathing air peak 0.308 (→3,000 ppm)
Atmospheric temp. (°C)	18.3~26.7	Around 25 Vertical distribution <3°C
Relative humi. (%)	25~70	~70
Intramodule circulation (m/s)	Daily ave. 0.067~0.203 min. 0.035, max. 1.02	Around body Daily ave. 0.07~0.203 min. 0.03, max. 0.5
Noise	<NC-50	<NC-45

4. ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF CQ

Since the air sucked from the cabin space is supplied into the CQ, it is difficult to control its temperature, humidity, and CO₂ concentration suitable for each CQ. Therefore, the location of the air supply/exhaust port, the shape of the air outlet, and the outlet velocity are the parameters for creating the environment inside the CQ. According to the open information, photos, papers, etc. [17], [18] about the ISS interior, the air outlet inside the CQ is at the top, and the jet flow is blown from the rectangular grill toward the head. Though the suction port is at the bottom, it is a unidirectional airflow system in which the blown jet flow reaches the suction port after stirring inside the CQ. One disadvantage of this method is that the noise reduction by distance is not feasible because the outlet is near the ears. In addition, since the blowing jet flow directly hits the human body, it is likely to cause discomfort due to exposure to the airflow and the

difference in the upper and lower temperature distributions. Furthermore, there is a risk of creating a dead space where the blown jet flow cannot reach and becomes stagnant. To verify these concerns, we have performed the environmental analysis inside the CQ using computational fluid dynamics (CFD). The modelling and results of this analysis are specified below.

4.1 Analysis model

Fig.7 shows the analysis model of CQ. For the shape and dimensions of the analysis area, we referred to the previously published materials. Then we adopted the human body model standing at the center of CQ while resting and operating the PC and staying in a sleeping bag on the wall with only the head exposed during sleep. Table 4 shows the calculation conditions. In this table, we used the same turbulence model, radiational convergence calculation, convective heat transfer coefficient, and material and gas physical properties as on the ground. The only difference from the ground model is the gravitational acceleration in the x, y, and z directions, which is set to 0.0.

4.2 Analysis case

For the analysis case, we used the same unidirectional flow method of top blow-bottom intake following the current shape. To reduce the noise generation, we tested the following conditions: two cases for circulating air, such as the usual amount and a half amount, and two cases for processing the heat load in the break time and the sleep. Table 5 shows analysis cases.

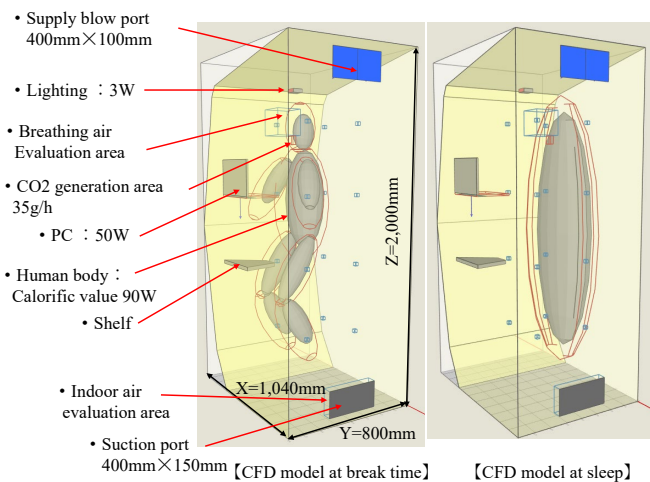


Fig. 7 Analysis model of CFD.

Table 4 Calculation condition.

Software	Flow Designer (Advanced Knowledge Laboratory Inc.)
Calculation method	Unsteady/steady
Turbulent model	High reynoise type κ - ϵ
Gravity setting	X, Y, X=0
Initial temp.	23 °C
Initial CO ₂ coe.	2,000 ppm
Supply air	Temp. 23°C CO ₂ coe. 2,000 ppm
CO ₂ generation	35 g/h
Mesh	Rectangular mesh X, Y, Z=100×43×200

Table 5 Analysis cases.

Case	1-1	1-2	2-1	2-2
Human status	Break time		Sleep	
Heat load (W)	145		75	
Supply ari Flow speed (m/s)	0.5	0.25	0.5	0.25
Flow temp. (°C)	23			
CO ₂ generation (kg/h)	35			

4.3 Analysis results

As an example of the analysis, temperature contours, CO₂ concentration contours, and ventilation efficiency SVE3 [Note 3] are superimposed on the airflow vectors of outlet velocity 0.5 m/s during rest in case 1-1 and outlet velocity 0.5 m/s during sleep in case 2-1. Fig.8 shows the results.

In case 1-1, although CO₂ in exhaled breath is blown away and the concentration is low, it is observed from this figure that the blown jet flow hits the human body directly, and the upper body is super-cooled. In addition, since the blown jet flow reaches the suction port from the bottom after it flows around the human body, local heating at the PC, and the increase of storage temperature and ventilation efficiency SVE3 are observed because the air in CQ is not well-stirred. Since this phenomenon is also observed in areas of CQ where the face is likely to come close, there is a danger of inhaling stale air.

And in cases 2-1, exhaled CO₂ is blown away and the concentration is low. Since the PC does not generate heat during sleep, heat spots do not occur. By staying in a sleeping bag, the respiratory zone and the environment around the human body are controlled and perceived to be comfortable. However, the distance of the head from the air outlet is less than 1 m, and the noise from the air outlet is heard directly without reduction.

Table 6 shows the maximum, average, and minimum values of CO₂ concentration, temperature, operative temperature, and wind speed at evaluation points around the respiratory zone and the human body in each analysis case. In breathing air zone, the comfort environment standards are mostly satisfied except for the sleeping state. In the environment around the human body, even in Cases 1-2 and 2-2 with the half volume of air supply, the CO₂ concentration almost satisfies the comfortable environment standard. However, the temperature is high except for Case2-1. Furthermore, the vertical temperature distribution obtained from the difference between the maximum and the minimum temperature widely exceeds 3 °C, and the heat sensation seems to be uncomfortable. Stirring the air in the CQ may be insufficient because the amount of CO₂ emissions from exhaled breath and the heat load are handled well by the difference in CO₂ concentration and temperature between the outlet and the inlet.

From the above results, we think it is necessary to improve the air conditioning system to improve stirring in the room while reducing noise during sleep by making the air volume changeable for both periods of rest and sleep.

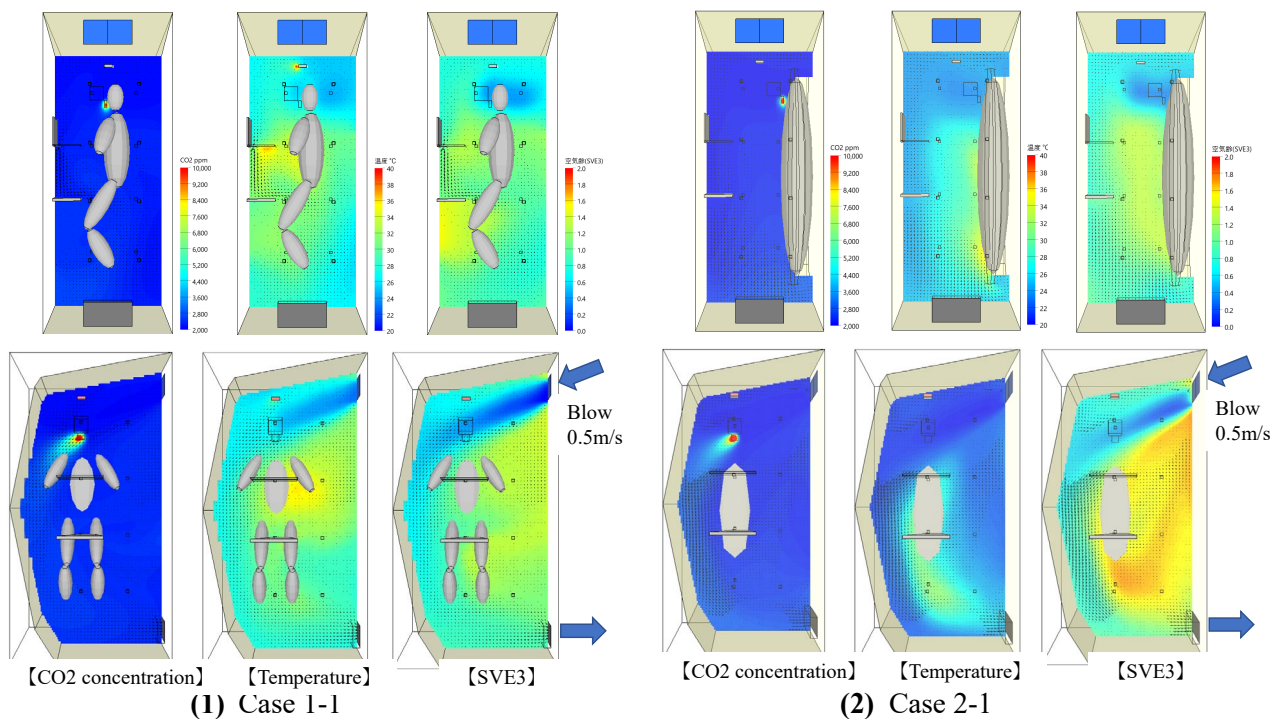


Fig. 8 Example of analysis results.

Table 6 Analysis results of evaluation points.

		CASE	1-1	1-2	2-1	2-2
Breathing air zoon	CO2 (ppm)	Max	2,748	3,342	2,179	2,358
		Ave.	2,154	2,367	2,041	2,076
Around human body	CO2 (ppm)	Max	2,505	3,027	2,459	2,983
		Ave.	2,337	2,778	2,207	2,409
	Temp. (°C)	Max	33.9	40.4	32.5	42.9
		Ave.	29.7	35.0	26.5	30.3
		Min.	24.7	28.6	23.4	23.8
		$\Delta T(\text{Max-Min})$	9.2	11.8	9.1	19.1
	Operative temp. (°C)	Max	31.8	38.9	30.0	40.1
		Ave.	28.5	34.5	25.5	29.2
		Min.	24.5	30.2	22.4	24.5
	Intermodule circulation (m/s) (Upper half of CQ)	Max	0.22	0.13	0.22	0.11
		Ave.	0.11	0.07	0.09	0.05
		Min.	0.02	0.03	0.02	0.01
	Air age(SVE3) (Upper half of CQ)	Max	1.38	0.95	1.24	1.25
		Ave.	0.96	0.79	0.94	0.93
Suction air	CO2 (ppm)	Ave.	2,418	2,864	2,429	2,861
	Temp. (°C)	Ave.	28.1	33.5	26.4	30.1
	Intermodule circulation (m/s)	Ave.	0.33	0.17	0.35	0.17

5. CONCLUSION

Regarding the CQ environmental standards, we focused on CO₂ concentration, temperature and humidity, air velocity, and noise, which are closely related to air conditioning. After verifying the validity of conventional environmental standards aimed at sustaining life, we proposed comfortable environmental standards assuming unskilled people will advance to space. Furthermore, the environment in the current air conditioning system was examined by analysis using CFD. As a result, we confirmed that the CO₂ concentration could be controlled within the range of the comfortable environment standard during sleep when the heat load was low even if the air circulation was half volume. In the future, we plan to improve the air-conditioning system and study to lower the blower noise to satisfy the comfortable environment standards including the heat sensation.

Note 1: The unit of metabolic rate “met” is the metabolic rate of 58.2 W/m² in the state of resting in a chair.

Note 2: The unit of clothing volume “clo” indicates the thermal insulation of clothing, and refers to the state of resting in a chair at a temperature of 21.2 °C, relative humidity of 50 %, and airflow of 0.1 m/s.

Note 3: Ventilation efficiency “SVE3” is the time it takes for the blowing air to reach.

REFERENCES

- [1] Sogo Nakanoya, Naoki Sato: Study status of lunar orbit gateway, the Space Sciences and Technology Conference, No.62, OS05-3, 2018.10.
- [2] <https://www.cnn.co.jp/fringe/35136898.html> (2022.8).
- [3] https://www.tte.net.com/topics/2020/pdf/20200820_1.pdf (2022.8).-
- [4] JAXA JEM Development Project Team: Japanese Experiment Module "Kibo" Comprehensive Report - Main Volume (Volume 1), p.232, 2010.3.
- [5] NASA-STD-3000, NATIONAL AERONAUTICS and SPACE ADMINISTRATION.
- [6] Air Conditioning and Sanitary Engineers Society Standard, SHASE-S102-2011 Ventilation Standard and Commentary.
- [7] Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health; Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality, p.8, 1989.

- [8] SHASE, Concept of Indoor Carbon Dioxide Design Standard Concentration for Calculating Required Ventilation Volume, 2021.5.
- [9] Tsuyoshi Iwashita et al.: Fundamental study on evaluation of indoor air quality based on human sense of smell, Proceedings of Architectural Institute of Japan, No.410, 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] Bjarne W. Olsen: ASHRAE' s History With Thermal Comfort, ASHRAE Journal pp.32~39, 2020.11.
- [13] Matei R Georgescu: Accumulation and spatial distribution of CO2 in the astronaut's crew quarters on the International Space Station.
- [14] Ministry of Health, Labor and Welfare in JAPAN: Act on Maintenance of Sanitation in Buildings.
- [15] ISO7730: Moderate thermal environments, Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, ISO, 2005
- [16] Sue Fairburn:'Sleeping With the Stars' – The Design of a Personal Crew Quarter for the International Space Station, Kwantlen Polytechnic University, 2001.
- [17] Susan M. Fairburn: Retrofitting the International Space Station, 2009.
- [18] James L. Broyan , et.al.: International Space Station Crew Quarters Ventilation and Acoustic Design Implementation.

要 約

民間人による宇宙ステーション(ISS)での滞在が実現した現在、船内の温湿度や空気質、騒音などの環境に対して、従来の職業宇宙飛行士を対象とした基準で良いのか疑問である。また、欧米人に比べ体格が異なるアジア系人種にとって、好みの環境とそれを作り出す空調方式は異なるものである。特に、深宇宙や月面までを考えると滞在時間が週単位に及ぶことから、リラックスかつ就寝の場となる CQ (Crew Quarter) には、空調の個別性かつ静音な環境が求められる。そこで、ASHRAE、ISO、日本などで評価される快適性の基準を調査し、従来の環境基準と比較評価することで、推奨の環境条件を検討した。さらに、それらの条件を満足し、かつ静音な環境を提供し得る空調方式について例示し、数値流体力学(CFD)解析による CQ 内の温湿度、気流、呼気からの二酸化炭素の分布などについて検証した。

リキッドデシカントユニットにおける加湿性能の 基本特性の把握

澁澤朱音・馬場大輔・川上理亮
谷野正幸・三宅友香・原田政利^{*1}

Verification of Humidification Performance on Liquid Desiccant Unit without Heat Exchanger

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

本報では、省エネおよび室内環境向上を達成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器部のみを抽出したリキッドデシカントユニットの定常・非定常状態の加湿性能試験を行った。定常状態の種々の給気条件において、乾球温度の標準偏差は0.1°C以内、相対湿度は0.09%RH以内であり、高い温湿度制御性を確認した。また非定常状態においても、乾球温度の標準偏差は0.22°C以内、相対湿度は0.22%RH以内であり、高い温湿度制御性を確認した。

1. はじめに

従来、蒸気加湿は高い加湿量と加湿効率を有している点から、外気の加湿処理等に用いられている。しかしながら、他の加湿方式と比較して、蒸気生成における消費エネルギーが大きいため、CO₂排出量も多くなる¹⁾。地球温暖化防止の観点から、省エネかつ脱炭素化を目指した加湿システムの開発が望まれる。近年は、脱炭素を目指した加湿技術として、比例制御を用いた気化式加湿器²⁾や二流体加湿³⁾の開発が行われているが、設備運用者または生産技術者が望む蒸気式加湿と同程度の加湿性能までは至っていない。また、近年の新型コロナウイルスの感染対策として、室内空気の湿度の維持⁴⁾と換気量の増加⁵⁾が挙げられるが、それらに伴い、空調機器の消費エネルギーが増加するという課題が顕在化してきている。

我々は、45~60°C程度の低温排熱を利用し除湿・加湿が可能なリキッドデシカント空調システムに着目した^{6,7)}。その空調システムの基本原理は、液体調湿剤と空気を接触させることで、液体調湿剤の温度と濃度により供給空気の温湿度を制御するものである。また、液体調湿剤である塩化リチウム水溶液は除菌作用を有しており、空気と接触させることによる空気清浄効果が期待できる^{8,9)}。**図1**に一般的なりキッドデシカント空調システムの概略図と今回の検証範囲を示す。このシステムは除湿および加湿を行う処理部と、除湿時に希釈された塩化リチウム水溶液を濃縮する再生部から構成されている¹⁰⁾。液体調湿剤として使用する塩化リチウム水溶液は、高い金属腐食性を有するため¹¹⁾、熱交換器と配管は耐腐食性とする必要がある。そのため、従来のリキッドデシカント空調システムは、機器サイズおよび機器コストが大きという課題がある。そこで我々は、それらの課題を解決するべく、**図1**の赤枠内の処理部における加湿機能のみ

^{*1}ダイナエアー株式会社 製品開発部門

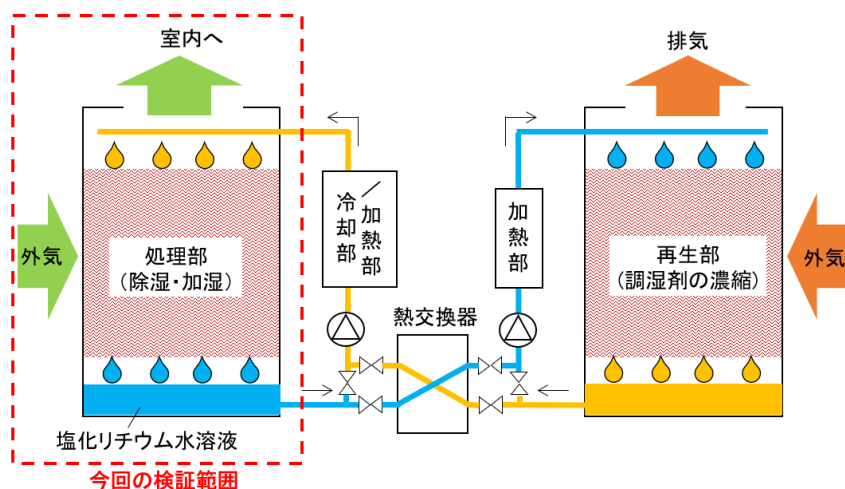


図1 一般的なリキッドデシカント空調システム概略図と今回の開発範囲

の活用可能性を検討すべく、気液接触器部のみ（リキッドデシカントユニット：LDU）の加湿性能を実験的に検証した。なお、本検証はリキッドデシカント空調機メーカーであるダイナエア株式会社と共同で行った。

2. 検証試験の概要

2.1 LDU の原理

写真1に検証用 LDU の外観、図2に概略図を示す。検証用 LDU は、気液接触部、塩化リチウム水溶液、循環ポンプ、給水配管から構成されている。加湿時には、循環ポンプにより塩化リチウム水溶液が上部から散布され、気液接触部を液膜状に流下する。気液接触部は吸水性に優れたセルロース系の材料から成っており、塩化リチウム水溶液と空気が十分に接触するように形状が設計されている¹²⁾。そして、導入空気と塩化リチウム水溶液が接触することで、両者の水蒸気圧の大小関係により空気が除湿されるか加湿されるかが決定する。すなわち、空気の水蒸気圧が塩化リチウム水溶液の水蒸気圧よりも高い場合、空気は除湿され（空気中の水蒸気が塩化リチウム水溶液に吸収される）、反対に低い場合には空気は加湿される（塩化リチウム水溶液中の水が空気中に水蒸気として放出される）。塩化リチウム水溶液の気液平衡水蒸気圧は濃度

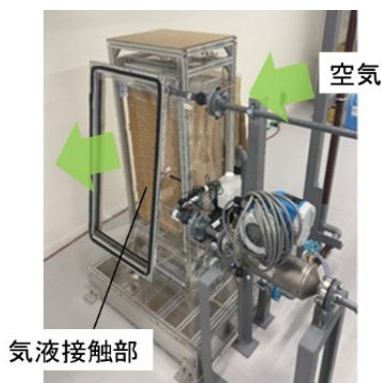


写真1 LDU 外観

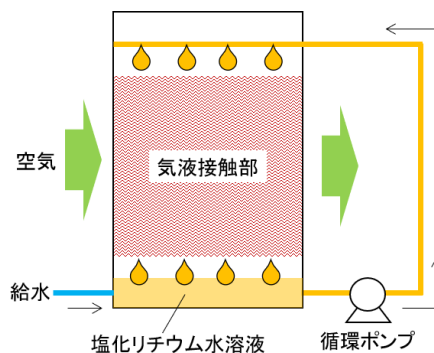


図2 LDU 概略図

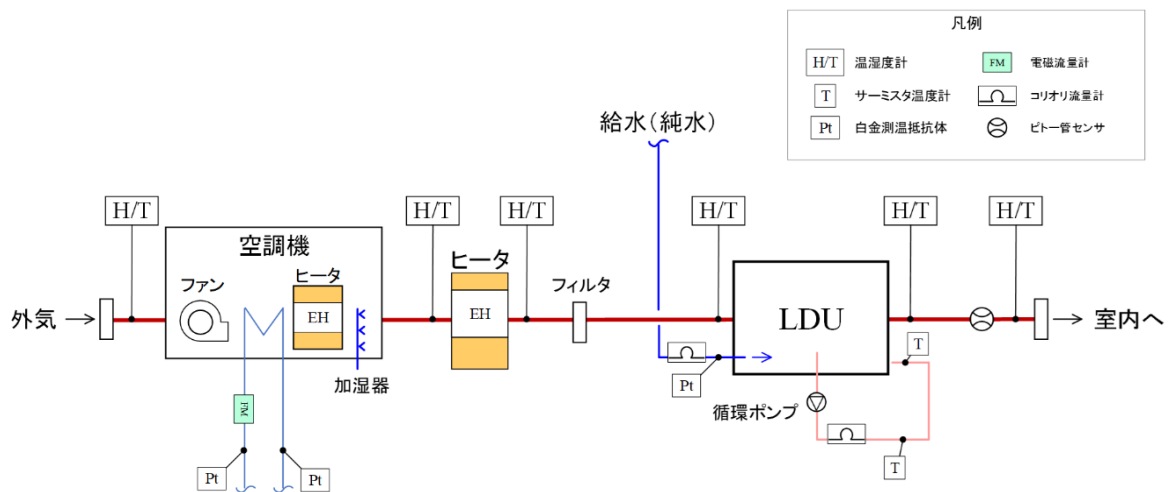


図3 加湿性能検証試験装置の系統図

が高いほど、そして温度が低いほど低下して空気中の水分を吸収しやすくなるという性質を持つ。リキッドデシカント空調システムはこの原理を利用することで供給空気の調湿を行っている¹³⁾。図1のような、一般的なリキッドデシカント空調システムでは、再生器により水溶液を濃縮し、給水により水溶液を希釈することで濃度の調節を行っている。気液接触部において水溶液中の水分は空気側へ移動するため、濃縮する方向に進んでいく。そのため、供給空気の相対湿度を制御ターゲットとし給水量を調節することで水溶液濃度を一定に保ち、加湿量を制御する。また、供給空気の温度は、水溶液を加熱しつつ加湿を行うことから、運転濃度に対応した気液平衡線に沿って移動する。一方、本気液接触部のみのLDUの場合、加湿時に溶液の加熱を行わないため気化冷却により加湿が行われ、空気線図上の動きは等エンタルピー変化となる。

2.2 試験装置

本報では、LDUからの供給空気を種々の条件で設定し、各条件における供給空気の乾球温度および相対湿度を測定することで加湿性能を検証した。LDUのサイズおよび塩化リチウム水溶液の流量は、物質伝達率、圧力損失、塩化リチウム水溶液の循環流量を事前に確認し、決定した。図3に試験装置の系統図を示す。本試験装置は、加湿装置内蔵の空調機、ヒーター、LDU、切替ダンパ、それらを接続するダクトから構成されている。LDUに供給される空気の乾球温度と相対湿度の調整は、ヒーターと空調機内のブラインが流れる熱交換器によりなされ、風量の調節は、空調機内のファンの回転数制御より行われる。LDUの出口相対湿度は、LDU下流側に設置した相対湿度計の値をもとに給水量を決定することで、塩化リチウム水溶液の濃度調整を行い、設定の相対湿度に調整する。試験装置に用いたセンサの精度は、温湿度センサ 測定精度 $\pm 0.8\%RH$ 、 $\pm 0.1^{\circ}C$ 、定置式複合ピトー管センサ 測定精度 $\pm 2\%RD$ となっている。

2.3 試験条件・手順

表1に試験条件を示す。LDUからの各出口空気温度・湿度条件は、条件1は一般的な夏季の室内空気、条件2は夏季において空調を省エネ設定とした場合の室内空気、条件3は一般的な冬季の室内空気の温湿度条件を想定している。なお、LDUへの導入空気(入口空気)の乾球温度は $35^{\circ}C$ とし、相対湿度は入口空気と出口空気の比エンタルピーが等しくなる値に調整した。

試験手順は、初めにLDUを起動して相対湿度の目標値を入力することで、制御ターゲットの設定を行う。

表 1 加湿性能試験の条件

	出口空気 目標値			入口空気	
	乾球温度[°C]	相対湿度 %RH	比エンタルピー [kJ/kg']	乾球温度 [°C]	相対湿度 %RH
条件 1	25	50	50.3	35	16.9
条件 2	27	60	61.4	35	29.1
条件 3	22	50	43.1	35	8.9

次に空調機ファンの周波数を調節し風量を調整した。そして、ヒーターの出力、ブライン温度、ブライン流量を調節することで表 1 の入口空気を再現した。検証試験は、各装置の出力が安定し、入口空気の乾球温度および相対湿度が定常状態に達したことを確認した後にデータを取得した。

2.4 計算方法

乾球温度および相対湿度の測定データから測定時間 0 ~ 60 min の時間平均 \bar{x} と標準偏差 S を算出した。標準偏差 S は式(1)から求めた。 n はデータ総数、 x_i は 1 秒ごとの測定データである。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

風量は以下の式(2)により算出した。 Q は風量[m³/h]、 P_v は差圧[Pa]である。定数 A, α, ρ はそれぞれ断面積[m²]、センサー係数、空気密度[kg/m³]である。

$$Q = 3600 \times A \times \alpha \times \sqrt{\frac{2}{\rho} \times P_v} \quad (2)$$

また、下記の手順により乾球温度 T_d °C および相対湿度 %RH から空気の比エンタルピーを算出した。

① Wexler-Hyland の式¹⁴⁾より T_d から飽和水蒸気圧 P_s [Pa] を算出する。

② 式(3)に P_s と空気の全圧 P_t [Pa] を代入し、絶対湿度 X [kg/kg'] を算出する。

$$X = 0.622 \times \frac{P_s}{P_t - P_s} \quad (3)$$

③ 式(4)に X と T_d を代入し、比エンタルピー h [kJ/kg'] を算出する。

$$h = 1.006T_d + (1.86T_d + 2501)X \quad (4)$$

3. 検証試験結果

3.1 空気線図上の挙動

図 4 に各条件の入口空気と出口空気をプロットした空気線図を示す。図より、いずれの条件においても入口比エンタルピー h_{in} と出口比エンタルピー h_{out} はほぼ同じ値であり、同一エンタルピーのライン上を移動していることがわかる。また、比エンタルピーの変化率を式(5)により算出すると、すべての条件で変化率は 4% 以内であった。このことから、塩化リチウム水溶液と空気接触による加湿過程は、等エンタルピー的に変化することがわかった。

$$\text{変化率\%} = \frac{h_{out} - h_{in}}{h_{in}} \times 100 \quad (5)$$

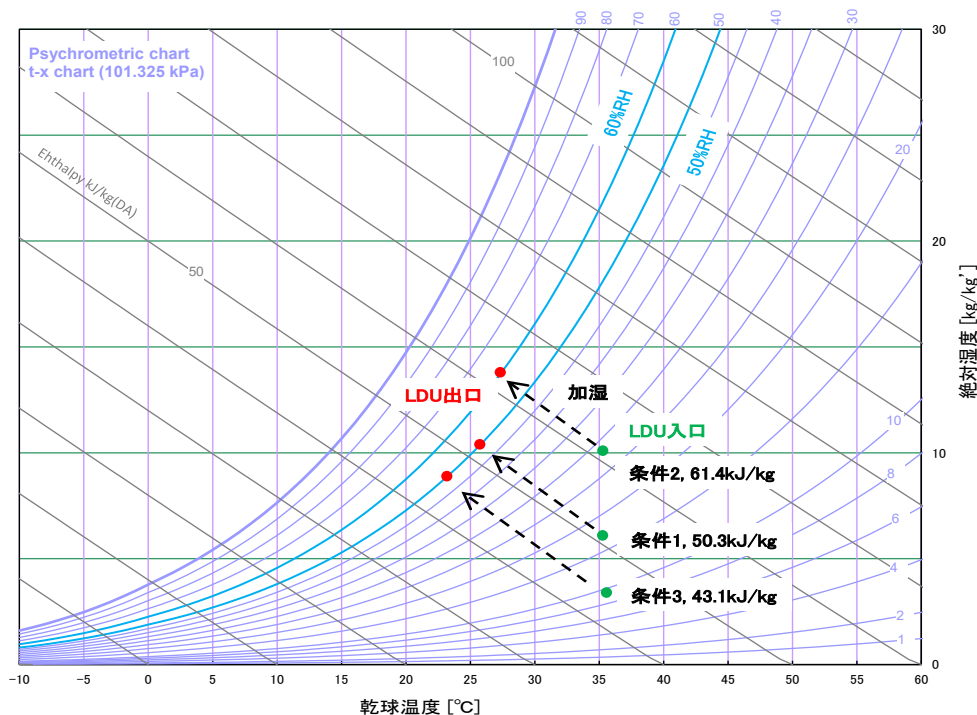


図4 各条件における空気線図上の挙動

表2 条件1におけるLDU出口空気の乾球温度および相対湿度

		試験結果
乾球温度 [°C]	時間平均	25.7
	標準偏差	0.10
相対湿度 [%RH]	時間平均	50.6
	標準偏差	0.07

3.2 LDUの加湿制御性の検証

LDUの性能検証のため、定常状態の各条件における出口空気の時間変化を測定した。表2に条件1における出口空気の乾球温度および相対湿度の測定結果を、図5にその条件下での時間変化を示す。

表2より、LDU出口空気の相対湿度の標準偏差は0.07%RHと非常に小さく、図5においても乾球温度と相対湿度はほぼ変動することなく一定の値で安定する結果となった。条件2,3においても同様の結果が得られた。また、本試験にて、単純に液体調湿剤の濃度を調整することで出口条件に制御することを確認した。したがって、任意の飽和効率で制御が可能であることが検証された。

今回、LDUの乾球温度は目標値より0.7°C高い値で安定したが、この理由としてはLDU入口空気の比エンタルピーをターゲットとした温度制御を行ったことが挙げられる。比エンタルピーは乾球温度と相対湿度から算出されるため、相対湿度・温度プローブの測定精度(±0.8%RH, ±0.1°C)により比エンタルピーは±1.0 kJ/kg'の誤差を取る。今回の試験では、入口空気の比エンタルピーの時間平均は51.3 kJ/kg'であり目標値より+1.0 kJ/kg'高い値であったため、出口空気の乾球温度は目標値よりやや高い値となったと考えられる。これについては、LDU出口空気の乾球温度をターゲットとした温度制御を行うことで、目標値と非常に近い値(時間平均25.1°C)で安定することが確認できている。以上の結果から、LDUは安定した乾球温度および相対湿度の給気が可能であることが検証された。

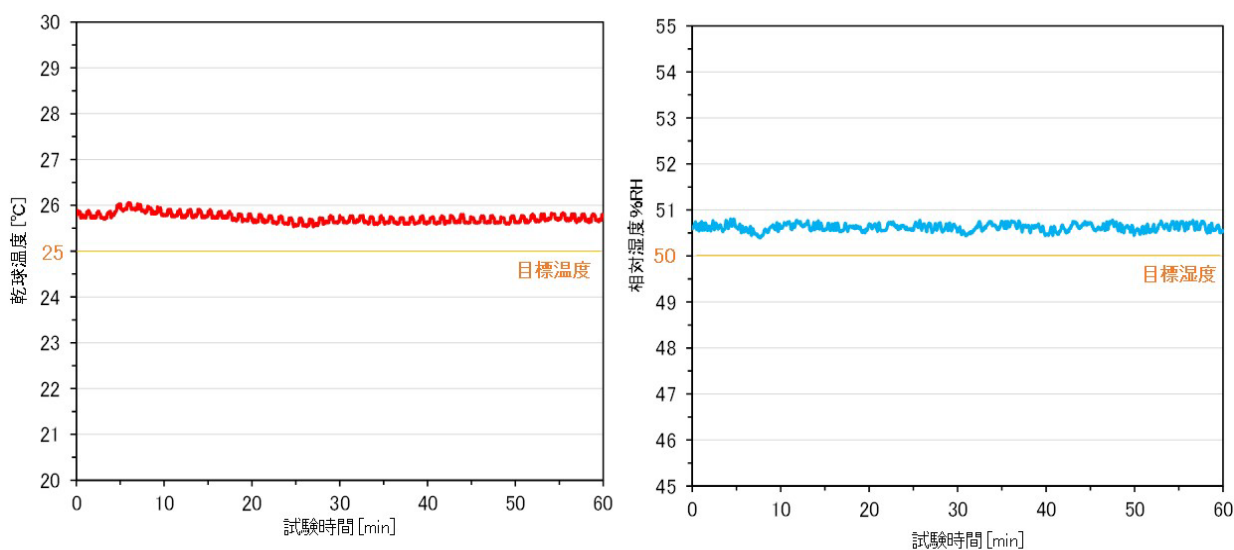


図 5 LDU 出口空気の乾球温度・相対湿度の時間変化

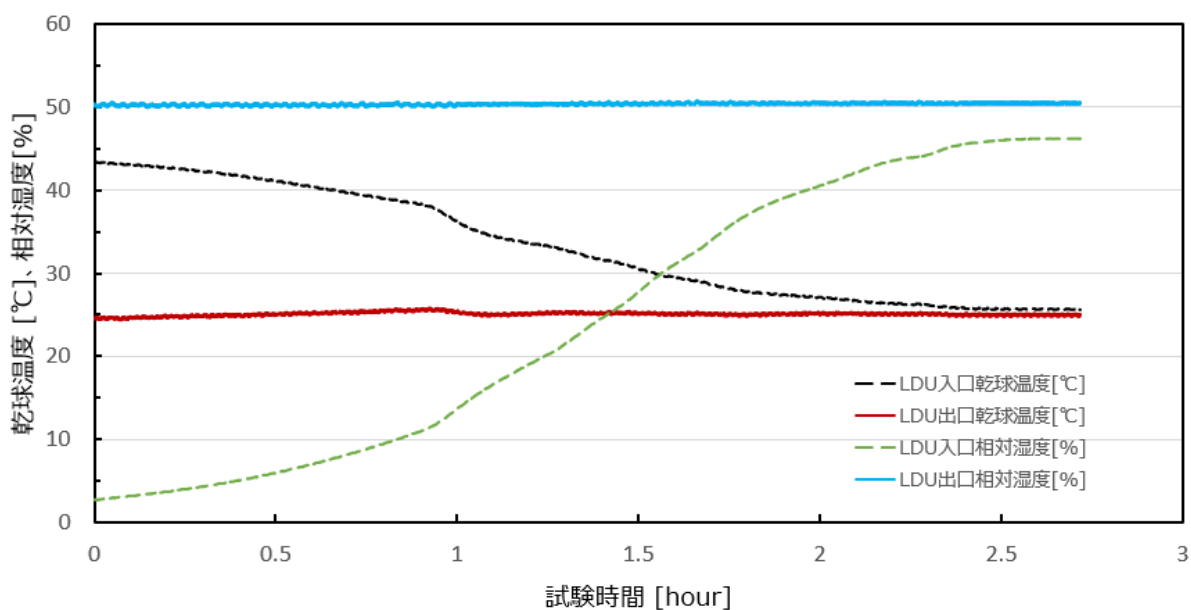


図 6 LDU 入口空気と出口空気の相対湿度，乾球温度の時間変化

3.3 非定常状態における加湿制御性の検証

入口空気を非定常状態とした場合の LDU の加湿制御性を調べるために、LDU 入口空気の乾球温度と相対湿度を時間的に変化させた。図 6 に LDU 入口空気の乾球温度，相対湿度の時間変化および出口空気における相対湿度の時間変化を示す。出口空気の相対湿度の時間平均は 50.4%RH、標準偏差は 0.11 であり、LDU は入口空気の温度および湿度変化に関わらず相対湿度を安定に制御することが確認できた。したがって、相対湿度は LDU により制御し、乾球温度はヒーターにより制御することで、湿度と温度を独立させた制御ができることがわかった。これにより、入口空気の負荷変動に対して安定した温湿度制御が可能となることを確認した。なお、出口空気の乾球湿度の時間平均は 25.1°C、標準偏差は 0.22 であった。

4. おわりに

本報ではリキッドデシカントユニット (LDU) の加湿性能の基本特性把握のため、種々の給気条件における加湿性能の検証を行った。その結果、以下の結論を得た。

・ LDU の空気線図上の動作を確認するため、LDU 入口空気と出口空気の比エンタルピーを比較したところ、いずれの条件においても変化率は 4.0%以内であった。このことから、LDU は等エンタルピー変化により加湿が行われることを確認した。

・ LDU の制御性の検証のため、種々の条件における出口空気の乾球温度および相対湿度の時間変化を測定した。いずれの条件においても乾球温度と相対湿度の標準偏差の値は 0.1 以下であり、時間変化のグラフにおいても一定の値で安定していた。また、単純に液体調湿剤の濃度を調整することで出口条件に制御できることを確認し、任意の飽和効率で制御が可能であることを検証した。

・ 非定常状態における加湿制御性を検証するために、LDU 入口空気の乾球温度を変化させ、出口空気の相対湿度変化を確認した。その結果、入口空気の負荷変動に依らず相対湿度が安定して給気されることを確認し、その試験条件の相対湿度の時間平均は 50.4%RH、標準偏差 0.22 であった。

以上の結果から、本検証で使用した LDU は高い加湿制御性を有することを確認した。引き続き、蒸気加湿に代わる省エネかつ精密空調を実現できる加湿空調システムの開発を進めていきたいと考える。

文 献

- 1) 武田尚吾, 古賀修, 熊田瑤子, 丹波英治, 高橋直樹, 進藤宏之: 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性能評価, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”, 345-348(2014).
- 2) ウェットマスター株式会社 HP: <https://www.wetmaster.co.jp/product/vapor/vhr/>.
- 3) 東芝三菱電機産業システム株式会社 HP: <https://www.tmeic.co.jp/product/innovation/tmfog/>.
- 4) A. Ahlawat, A. Wiedensohler, S. K. Mishra: An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments, *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 1856-1861(2020).
- 5) J. Biryukov, J. A. Boydston, R. A. Dunning, J. J. Yeager, S. Wood, A. L. Reese, A. Ferris, D. Miller, W. weaver, N. E. Zeitouni, A. Phillips, D. Freeburger, I. Hooper, S. R. Shumate, J. Yolitz, M. Krause, G. Williams, D. G. Dawson, A. Herzog, P. Dabisch, V. Wahl, M. C. Hevey, L. A. Altamura: Increasing Temperature and Relative Humidity Accelerates Inactivation of SARS-CoV-2 on Surfaces, *Applied and Environmental Science*, 5(4), 1-9(2020).
- 6) 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).
- 7) A. Giampieri, Z. Ma, A. Smallbone, A. P. Roskilly: Thermodynamics and economics of liquid desiccants for heating, ventilation and air-conditioning – An overview, *Applied Energy*, 220, 455-476(2018).
- 8) 柚本玲, 田中辰明: リキッド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”, 78-79(2006).
- 9) H. X. Fu, X. H. Liu: Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality, *Building and Environment*, 116, 158-172(2017).
- 10) 小西雄大, 外山裕貴, 山口誠一: リキッドデシカント空調システムの除湿区間における性能評価, “2021 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集”, 1-5(2021).
- 11) 山田治夫: 液体調湿剤による除湿について, *化学工学*, 22(8), 513-519(1958).
- 12) 渡辺拓也, 山口誠一, 齋藤潔, 宮内彦夫, 原田政利: リキッドデシカント用除湿メディアにおける熱・物質移動特性, “第 44 回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集”, 95-98(2010).
- 13) 七尾龍一, 原田政利, 丹波英治, 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”, 193-196(2020).

14) R. W. Hyland, A. Wexler: Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K, ASHRAE Trans, 89(2A), 500-519(1983).

15) 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器に関する研究 (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”, 161-164(2020).

ABSTRACT

In this paper, we report on the development of a new humidification system that saves energy and improves the indoor environment. We tested the steady-state and non-steady-state humidification performance of a liquid desiccant unit, in which only the gas-liquid contactor part was extracted from a conventional liquid desiccant air-conditioning system. Under various steady-state air supply conditions, the standard deviation of the dry bulb temperature was within 0.1°C and the relative humidity was within 0.09%RH, confirming the high controllability of temperature and humidity. Under non-steady-state conditions, the standard deviation of dry bulb temperature and relative humidity were within 0.22°C and 0.22%RH, respectively, confirming high temperature and humidity controllability and stability.

バイオマスボイラによる低コスト汚泥減量化技術実証研究※

鎌田美志・川上健志 *1

Demonstration Study of Low-cost Sludge Reduction Technology Utilizing a Biomass Boiler

Haruyuki Kamata・Takeshi Kawakami

我々は乾燥された下水汚泥を燃料としたバイオマスボイラを開発し、中小規模の処理場から排出される汚泥を集約して低コストで処理することで、広域化の促進に資するエネルギー化システムを考案した。その実証設備を室蘭市に所在する蘭東下水処理場に建設し、実証研究を実施した。この実証設備では、消化汚泥を脱水し、円環式気流乾燥機により乾燥された燃料化汚泥をバイオマスボイラで燃焼させることで、汚泥の排出量が大幅に減少するとともにエネルギー回収も可能となった。その結果、安定的な操業が可能であり、汚泥処分費の低減効果によりライフサイクルコストを26%低減できることがわかった。

1. はじめに

国家的な施策として、下水汚泥のバイオマス資源としての利活用が推進されている。既に平成28年度に採択された下水道革新的技術実証事業（B-DASH：Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project）で実施された脱水乾燥システム¹⁾等の技術により、低コストで汚泥を乾燥することで処分費の低減は図れるが、地域によっては有効利用先の確保が困難なケースも多い。一方、地方自治体は、管理体制（人）、施設管理（モノ）、経営管理（カネ）における課題を抱え、従来の下水道事業の持続が困難な状況にある。中小規模処理場の上記課題に対して、スケールメリットを生かせる広域化は有効な手段といえるが、従来の焼却炉では集約の拠点施設のコスト面の負担が過大となり、普及展開が難しい。以上より、低コストで汚泥を減量化し、エネルギー化を図る有効利用技術の確立が急務といえる。こうした背景から、月島機械株式会社・日鉄セメント株式会社・高砂熱学工業株式会社・室蘭工業大学・室蘭市水道部共同研究体は、先述した脱水乾燥システムとバイオマスボイラを組み合わせ、低コストかつ多様なバイオマス利用を可能としたエネルギー化技術を開発した。また、本技術は汚泥やバイオマスを燃焼し場内でエネルギー利用を図ることから、有効利用先の確保の問題を解決し、汚泥集約の拠点施設において化石燃料依存からの脱却を図り、広域化の促進に資することができる。

本実証研究は令和2年度にB-DASHに採択され、実規模レベルの実証設備を設計・建設し、2021年9月から設備の性能評価等の実証研究を行っている。図1に、実証技術の概要と実証範囲を示す。本稿では、本技術の処理データや導入効果について報告する。

※2022年度下水道研究発表会講演論文²⁾を加筆修正したものである。

*1 月島機械株式会社

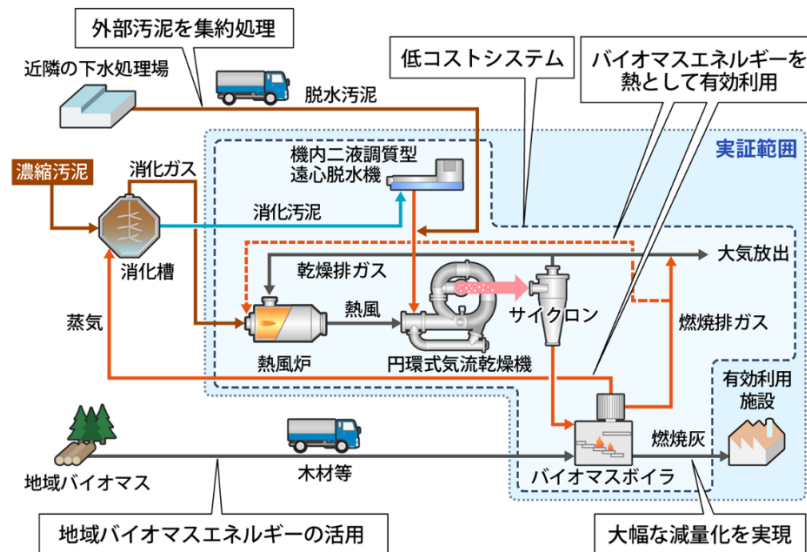


図1 実証技術概要

2. 実証研究方法

2.1 実証フィード

実証設備が設置されている北海道室蘭市蘭東処理場では、下水を標準活性汚泥法で処理しており、現有処理能力は最大 48,000 m³/日である。汚泥処理は、分離濃縮→消化→遠心脱水→外部委託処分(主としてセメント原料として有効利用)となっている。今回の実証研究では、消化槽から引き抜いた消化汚泥を対象とした。また、外部バイオマスの受入れ試験として、近隣の北海道伊達市伊達終末処理場で採取した脱水汚泥と伊達市で間伐材を原料に生産されている木質ペレットを試験に用いた。

2.2 実証設備概要

図2に実証設備フローを示す。処理対象となる消化汚泥は脱水機にて含水率78~79%に脱水され、乾燥機において約400℃の熱風で含水率10~15%程度まで乾燥される。乾燥汚泥は、バイオマスボイラで燃焼され蒸気として熱回収される。蒸気は、消化槽の加温や冬期の館内暖房として利用される。実証設備では、消化ガスを燃料に熱風炉により乾燥に必要な熱を供給するが、消化ガスを利用できない処理場ではバイオマスボイラで発生する熱を乾燥に利用することを想定している。

2.3 研究内容

(1) 運転の安定性の検証

バイオマスボイラの最適運転状態に関する調査として、空気比、給気バランス、滞留時間、排ガス循環量の影響調査を行い、四季を通じた代表条件での運転性能の把握を行うとともに、ボイラ内部状況の確認を定期的に行い、処理の安定性を評価した。

(2) ライフサイクルコスト (LCC: Life Cycle Cost) の評価

本実証技術は中小規模下水処理場での汚泥の集約処理への導入を目指しており、基幹処理場に本実証技術を導入し、2箇所の被集約対象処理場から脱水汚泥で集約処理した場合のLCCの評価を行った。評価対象としては、それぞれの処理場で従来の脱水処理し脱水汚泥で処理委託する場合(以降、従来脱水)、および基幹処理場で従来の焼却設備で集約処理した場合(以降、従来脱水+焼却)とした。なお、従来技術の建設費、維持管理費についてはバイオソリッド利活用基本計画策定マニュアル³⁾の費用関数により試算し、本実証技術については今回の実証で得られた結果をもとに、建設費、維持管理費(修繕、燃料、電気、凝集

剤、人件費)を試算して評価した。

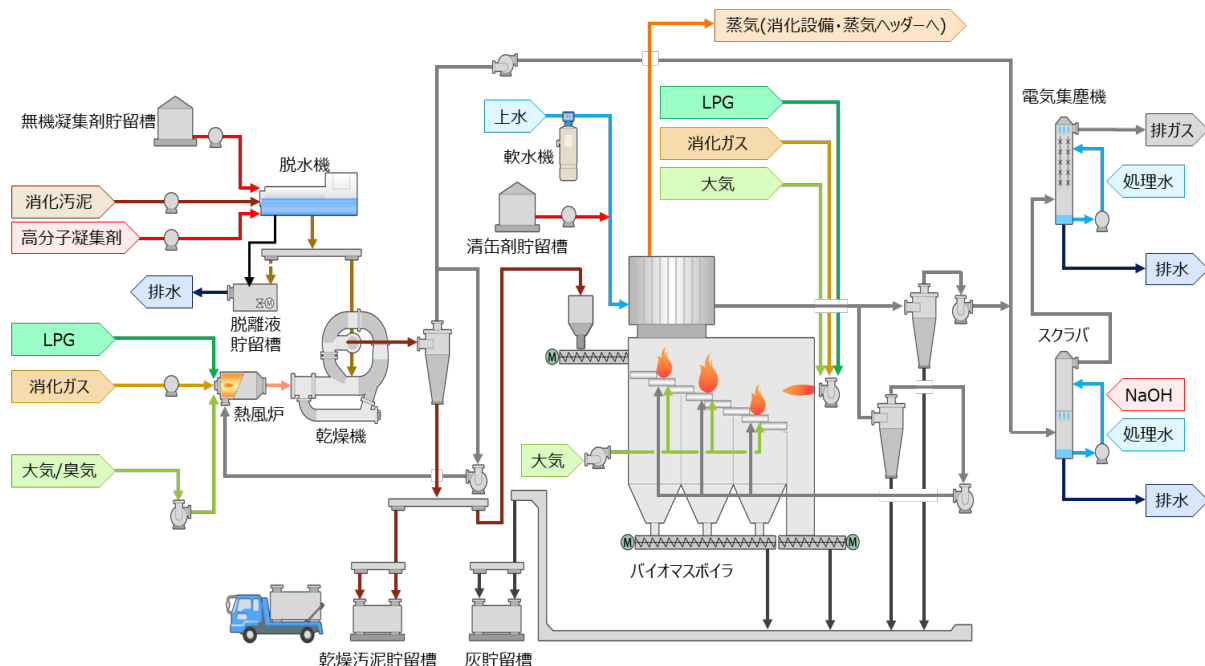


図2 実証設備フロー

3. 結果

(1) 運転の安定性の検証

表1に運転条件と結果を、図3に供給乾燥汚泥量とボイラ効率の関係を、図4に供給乾燥汚泥量と灰の未燃分割合の関係を示す。定格95 kg/hrに対して70~95 kg/hrの負荷調整が可能であり、ボイラ効率としては60~70%程度であった。脱水性状などの条件にもよるが、汚泥を乾燥するのに必要な熱量よりも多くの熱量を回収可能であることがわかった。スクラバ出口でのばいじん濃度は0.3 g/Nm³未満であり、本設備は大気汚染防止法の適用外ではあるが本法での規制基準を満たしている。排ガス中のN₂O測定値を投入脱水汚泥1 tあたりに換算したN₂O排出原単位を表2に示す。本設備による排出原単位は、最新の焼却炉のガイドライン数値と同程度であった。

表1 運転条件および結果

項目	単位	21/9 秋季	21/11 秋季	22/2 冬季	
汚泥処理量	m ³ /h	5.5	5.0	6.0	
汚泥濃度	%	1.6	1.58	1.5	
高分子凝集剤注入率	%	1.8	2.2	2.7	
無機凝集剤注入率	%	12	20.3	20.5	
消化ガス使用量(重油換算)	L/t-ds	279	273	271	
電力使用量	脱水乾燥	kw/t-ds	635	635	635
	ボイラ	kw/t-ds	126	126	126
ボイラ熱効率	%	77.3	73.3	77.2	
ばいじん濃度	g/Nm ³	0.26	0.24	0.27	
灰未燃分率	%	1.7	1.9	1.2	
脱水汚泥含水率	%	78	78.1	79.0	
乾燥汚泥含水率	%	8~14	18.6	14.9	
N ₂ O濃度	ppm	—	27	30	

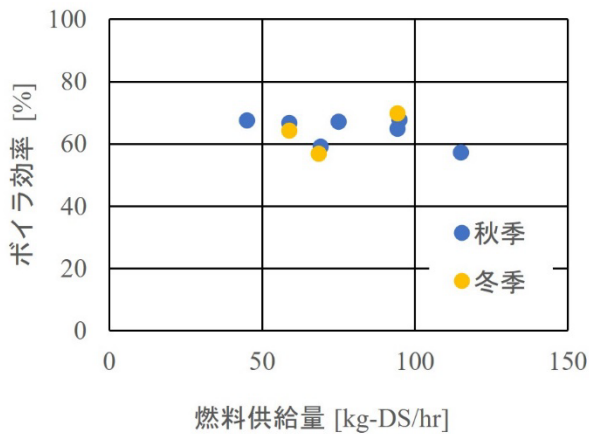


図3 燃料供給量とボイラ効率

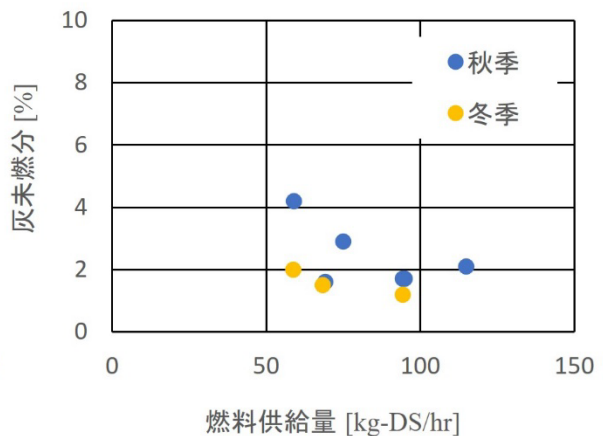


図4 燃料供給量と灰未燃分

表2 N₂O 排出量原単位の比較

機種	原単位(kg-N ₂ O/t-wet)
高分子・流動炉(通常)	1.51 ⁴⁾
高分子・流動炉(高温)	0.645 ⁴⁾
高分子・多段炉	0.882 ⁴⁾
多段吹込燃焼式流動炉(高温) 二段燃焼式循環流動炉(高温) ストーカー式	0.263 ⁴⁾
過給式流動炉	0.214 ⁴⁾
バイオマスボイラ(今回)	0.228

(2)LCC 評価

表3に導入の検討条件、図5にLCC評価結果を示す。脱水汚泥量が合計15.5t/日(含水率78%)程度発生する中小規模処理場の集約処理で導入を想定した。従来脱水と比較した場合、建設費および維持管理費は上昇するが汚泥処分費の低減効果によりLCCで26%の削減効果が確認された。

表3 導入検討条件

項目		内容
条件	脱水汚泥発生量	合計最大19t/日(平均15.5t-ds/日)
	水処理	標準活性汚泥
	汚泥処理	分離機械濃縮(消化無)
単価	汚泥処理	脱水汚泥 15,000 円/t
		焼却灰 18,000 円/t
	薬品	高分子 790 円/kg、無機 37 円/kg
	電力	17 円/kWh
A 重油		80 円/L

※単価は国交省調査による全国平均値

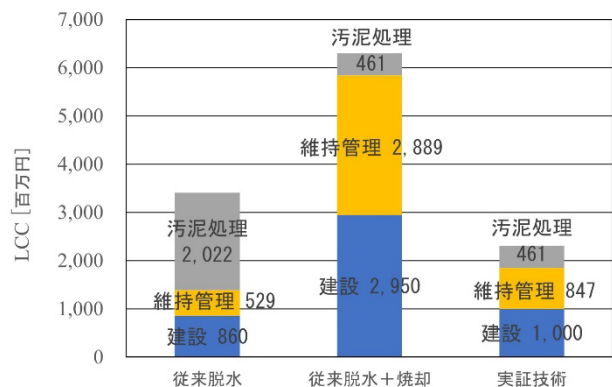


図5 LCC 評価結果

5. おわりに

以上のように、バイオマスボイラを用いることで汚泥の乾燥に必要な熱量相当の蒸気を回収でき、中小規模処理場へ集約処理する想定での導入検討では、従来技術に対して LCC の低減効果が得られ、十分な導入効果があることがわかった。今後は、春季と夏季の調査を行い、四季データを揃えて年間を通じた運転の安定性の評価をする予定である。

文 献

- 1) 国土技術政策総合研究所, 脱水乾燥システムによる下水汚泥の肥料化, 燃料化技術導入ガイドライン, (2019).
- 2) 横幕宏幸, 高尾大, 梅染俊行, 川上健志, 鎌田美志, 斉藤耕司, 河合秀樹, 末尾正, 岩淵光生: バイオマスボイラによる低コスト汚泥減量化技術実証研究, 第 59 回下水道研究発表会, (2022. 8. 4).
- 3) 公益社団法人日本下水道協会, バイオソリッド利活用基本計画策定マニュアル.
- 4) 国土交通省, 下水汚泥エネルギー化技術 ガイドライン (平成 29 年度版).

ABSTRACT

We developed a biomass boiler using dried sewage sludge as fuel. We devised an energy conversion system that promotes regional expansion by concentrating sludge discharged from small- and medium-sized treatment plants with low-cost treatment. A demonstration facility was constructed at the Ranto Sewage Treatment Plant, Muroran City, for this study. At this demonstration facility, digested sludge was dewatered and dried using a flash dryer. Sludge burned in a biomass boiler significantly reduces sludge emissions and enables energy recovery. The demonstration concluded that stable operation is possible. The life cycle cost can be reduced by 26% by reducing the sludge disposal cost.

廃プラスチックエネルギーの高度有効利用※

中田拓司・谷野正幸・成瀬一郎 *1
堀田幹則 *2・長沼宏 *3・幡野博之 *4
野田英彦 *5・小山寿恵 *6・稲田孝明 *6

Advanced Effective Utilization of Waste Plastic Energy

Takuji Nakata・Masayuki Tanino・Ichiro Naruse*1
Mikinori Hotta*2・Hiroshi Naganuma*3・Hiroyuki Hatano*4
Hidehiko Noda*5・Toshie Koyama*6・Takaaki Inada*6

我々は2020年度から、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」において、エネルギーリカバリー（ER）チームに参画してきた。廃プラスチック焼却施設での高効率な熱回収のため、高耐久性・難灰付着性を有する金属系とセラミック系の伝熱材料と、伝熱管の表面改質に関する基盤研究を行っている。また、回収した熱を付加価値の高い冷熱として利用するため、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の評価技術を開発し、様々な地域での事例を検討していく予定である。本報では、本研究開発の背景とERチームでの技術開発の概要を紹介する。

1. はじめに

近年の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強化などにより、これまで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。また、「プラスチック資源循環戦略」（2019年5月31日策定）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ている。図1に日本における廃プラスチックの処理処分量と有効利用率の推移を示す。廃プラスチックの処理処分量は減少傾向に、その有効利用率は増加傾向にあり、総排出量規制とリサイクル促進の効果が表れていることがわかる。しかし、未利用量は依然として多く、そのうち約70万トン/年は単純焼却処理となっている。そのため、マテリアルリサイクル（MR: Material Recycle）、ケミカルリサイクル（CR: Chemical Recycle）、エネルギーリカバリー（ER: Energy Recovery）および分離・選別（SR: Sorting for Recycling）の各プロセスの技術革新が必要である。さらにはライフサイクルアセスメントにより、リサイクルシステム全体の最適化と高度化が求められている。我々は2020年度から、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」²⁾において、ERチームに参画してきた。

※本論文は化学装置2021年1月号掲載の「廃棄プラスチックスエネルギーの高度有効利用ⅠⅡ」^{3,4)}を基に作成したものである。

*1 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 中央大学、

*5 八戸工業大学、*6 東京電機大学

本 NEDO プロジェクトの全体では図 2 に示すとおり、複合センシング・AI 等を用いた廃プラスチック「①高度選別」技術、「②材料再生」プロセスの高度化技術、高い資源化率を実現する「③石油化学原料化」技術、および「④高効率エネルギー回収・利用」技術の開発を行い、プラスチック製品の資源効率性と廃プラスチックの資源価値を飛躍的に高めることを目的としている。プラスチック資源循環のためには図中の矢印のように、「①高度選別」の後、「②材料再生」として多くのプラスチックが再利用され、さらに「③石油化学原料化」されることが肝要である。また②にも③にも選別されないプラスチックが単純焼却や埋立されないよう、「④高効率エネルギー回収・利用」に係る技術開発が期待されている。

廃プラスチックに含まれるエネルギーを回収する ER 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、ER 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。また、低温排熱の有効利用を目的として、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。

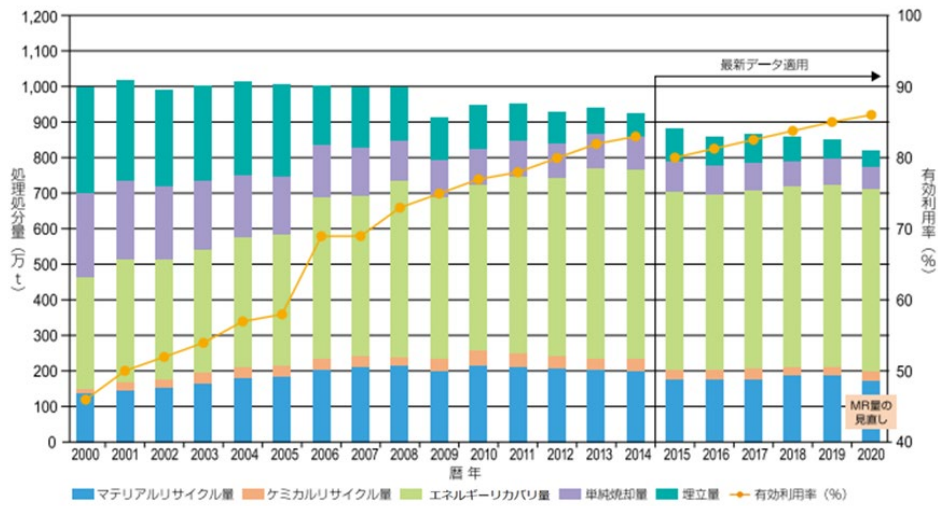


図 1 日本の廃プラスチックの処理処分量と有効利用率¹⁾

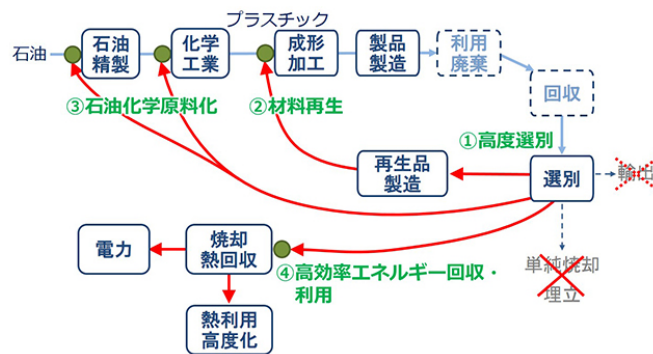


図 2 NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」の概要²⁾

以下では ER チームでの技術開発として、高効率な排熱回収のための伝熱管の表面改質技術、低温排熱の有効利用のための吸収冷凍機および氷スラリー製氷機の開発、総合熱利用システムの評価技術の概要を紹介する。

2. 高効率な排熱回収

ER としては焼却時に発生する熱を回収して発電や熱利用がなされており、小規模・分散型の電源としてそ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。例えば、一般廃棄物発電設備において発生する塩素は、家庭系ごみの場合、主に容器包装やラップなどのプラスチックごみに由来しており、全塩素の約 75%を占めている⁵⁾。ごみ中の塩素と実際に伝熱面上の付着層に含まれる塩素の含有率には明確な相関があるので⁶⁾、プラスチック混入はプラントの伝熱管の寿命や灰付着に直接影響することになる。

塩素を含む廃棄物燃焼 ER 施設における高温腐食に対し、経済産業省と NEDO により、高効率廃棄物発電システムに関する技術開発が精力的に実施された（平成 3 年度～平成 11 年度）⁷⁾。そのプロジェクトによって耐食性に優れた伝熱管や表面改質技術における材料開発が大きく進展した。また、同様の課題に対し、環境研究総合推進プロジェクトによって、溶射法などによる課題解決や灰付着・高温腐食機構解明が実施され、一定の成果がまとめられている^{8,9)}。しかし、同プロジェクトで整理されたとおり、ER 施設における灰付着・高温腐食機構は多種多様かつ複雑で、より一層の耐食性向上と灰付着低減は、依然として未解決の重要課題となっている。そのため、一般的な ER 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、発電効率も比較的強く抑えられている。

そこで本 NEDO プロジェクトでは、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 3 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¹⁰⁻¹⁹⁾。

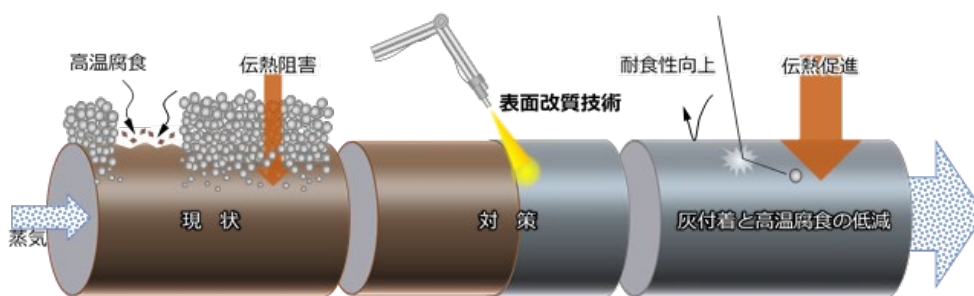


図 3 高効率排熱回収のための伝熱管表面改質技術の開発概要

2.1 高耐久性・難灰付着性を有する金属系・セラミック系の伝熱材料の開発

熱交換器内における伝熱管表面への燃焼灰の付着は、付着灰中に含まれる塩化物、アルカリ金属およびアルカリ土類金属化合物などの低融点化合物によって腐食を促進し、かつ伝熱阻害を引き起こす。よって、耐腐食性ととも難灰付着性の表面特性を有する伝熱管の開発が必要となる。これがかなえば、廃プラス

チック ER 施設において蒸気の高温化による発電効率の向上、さらには連続運転の長期化や伝熱阻害の解消による稼働率の向上が達成できる。

まず、材料開発にあたっては、伝熱管材料が熱伝導の高い金属であるため、このような金属材料と親和性が高い金属系の伝熱管材料の開発について説明する。

これまで、灰成分、雰囲気ガス組成および伝熱管材料組成のすべてを考慮して、熱力学平衡計算を実施し、生成する熔融塩成分の割合およびその生成温度を理論的に評価して候補材料を選定した。これらの評価結果を基に伝熱管サンプルを作製し、その材料と灰との付着性を評価している。また、熔融した灰成分と候補材料との親和性を、**図 4** の装置を用いて高温接触角測定により評価している。本装置は急速昇温特性に優れ、雰囲気ガス調整も可能な装置で、熔融塩が関与する灰付着力を構成する液架橋力について、実環境を模擬した条件下で評価することができる。本接触角測定試験では $\text{NaCl-KCl-Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ を等モル比で調合した粉体合成塩を板状に加工した各種金属試験片の上に積載して昇温し、一定プログラムで急速昇温後、所定の温度に保持して接触角を測定する。接触角が小さい（濡れ易い）金属試験片は合成塩との親和性が高く、その結果、灰付着力および腐食反応量が大きくなるものと考えられる。接触角測定結果の一例を **図 5** に示す。この図では 1150°C に保持後、各経過時間で計測した接触角で、本プロジェクトで開発した Ni 基合金 (Ni-2) と参照材 SUS310S におけるデータを掲載している。なお、SUS310S は ER 施設の過熱器管に使用されている材料である。図のように、開発材 Ni-2 の接触角は SUS310S に比べて大きく、熔融合成塩に対して濡れ難い効能が発揮されていることがわかる。時間の経過とともに両方の金属試験片における接触角が小さくなっていくが、Ni-2 が比較的濡れ難い傾向は同様に保持されている。このことから、Ni-2 については熔融塩を含む灰粒子が伝熱管に付着する際の液架橋力を SUS310S よりも低減でき、従来よりも灰付着量を抑制できる可能性がある。

さらに、接触角試験後の金属試験片表面における灰付着および腐食の状態を顕微鏡や元素分析で詳細に解析している。

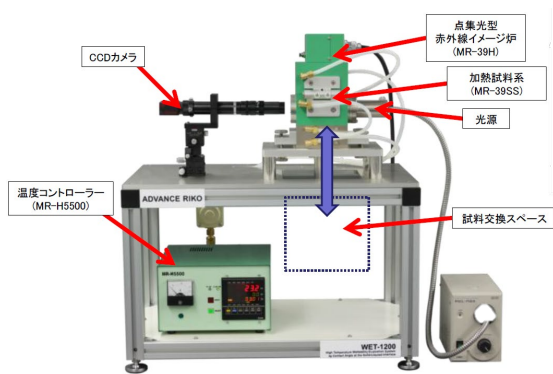


図 4 高温接触角測定試験装置

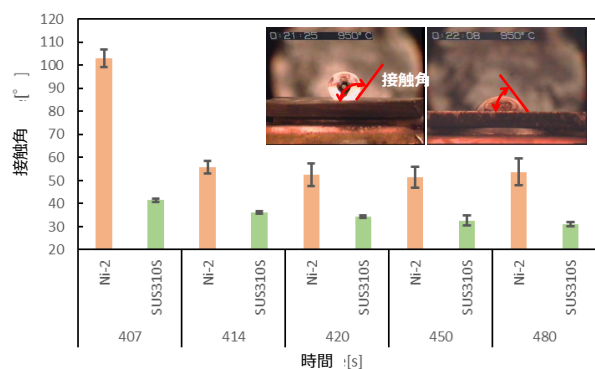


図 5 接触角測定結果(1150°C)

つぎに、廃プラスチックの焼却時には塩素や硫黄などを含む腐食性のガスや灰が発生することから、このような過酷な環境下でも安定かつ効率的に熱回収するために、セラミック材料が本来有する耐腐食性を保持しつつ、灰が付着し難いセラミック系の伝熱管材料の開発について説明する。

これまでに、廃プラスチック等を含む廃棄物の焼却時に際に発生する灰から生成する熔融塩成分の割合およびその生成開始温度を熱力学平衡計算により理論的に評価し、セラミック系の候補材料を選定した。ここで、熔融塩成分の生成割合が低いほど、または熔融塩成分の生成開始温度が高いほど、伝熱管材料としては有望な候補材料である。その結果、従来の SUS よりも熔融塩の生成割合が低く、その生成開始温度が高いセラミック系材料を見出した。さらに、これらセラミック系候補材料の焼結体を作製し、セラミック系焼結体における腐食性や灰付着性を評価した。灰付着性の評価については、まずセラミック系焼結体

と灰との初期付着性を $\text{NaCl-KCl-Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ からなる混合塩での高温接触角測定により評価した。ここで、焼結体と熔融塩との接触角が大きいほど、焼結体と熔融塩との親和性が低いこと、即ち、材料に対して灰が付着し難い材料であることを示している。その結果、セラミックの中でも接触角が大きいセラミック系材料を見出した。また、**図 6** の長期付着力測定試験装置を用いて、セラミック系焼結体と灰との長期付着性を評価した。現在、選定および評価した候補材料に対して、現場施工が可能な溶射法などの表面改質技術への適用性を検討している。

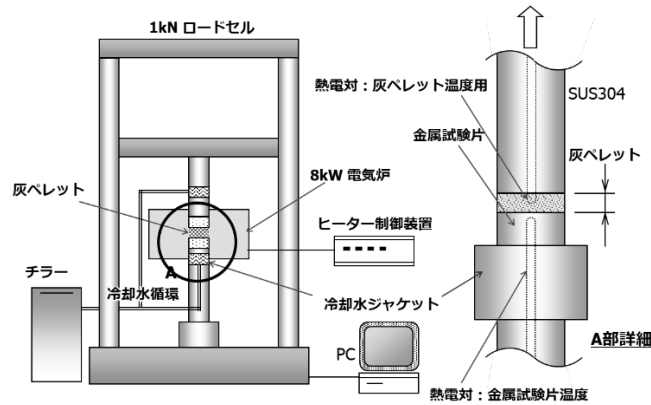


図 6 長期付着力測定試験装置

2.2 伝熱管の表面改質技術の開発

前項で候補となる材料、ならびにその他の表面改質技術・材料について、その灰付着低減効果と耐食性を評価し、全体の改質コーティングの構成とコーティング技術の構築を目指す。本プロジェクトの対象は前記のとおり塩素、硫黄、低融点灰などを含む過酷な環境であり、ER 施設やバイオマス利用設備の多様性をカバーするために、柔軟で現地適用性に優れた材料・技術が求められている。

付着性評価については、前述の**図 6** に示す付着力測定装置を用いて実機温度条件（炉内・伝熱管の温度）における灰試料ーコーティング試験材料間の付着力を直接測定、評価している。**図 7** に合金試験片（304 : SUS304、310S : SUS310S、PVD 304 : SUS304 を母材とした Al-Cr 系物理蒸着、Plating 304 : SUS304 を母材とした Cr 系メッキ処理）に対する付着力測定結果を示す。この結果は、ER 施設実機から採取した熔融飛灰（産業廃棄物）を調合・圧縮成型した灰ペレットを試料としたものである。図のように、灰試料ー合金間の付着界面温度（横軸）に対し材料によって付着力成長傾向が異なることがわかる。この傾向は合金側の Ni や Cr の含有率と相関することがわかっており、これらの知見をコーティングの組成設計に反映させている。通常、付着界面温度（伝熱管表面温度であり蒸気温度から数十℃高い値）は発電効率に直接影響することから、高い界面温度においても低い付着力となる材料が求められる。現在、廃棄物処理プラントのボイラ過熱器管で使用されている SUS310S よりも低い付着力となる表面改質材料・技術の開発を目指しており、前記した Ni 基合金 (Ni-2) やセラミック材料で SUS310S よりも付着力を低減できる材料を見出している。

耐食性評価については、JIS 評価法である埋没法や塗布法に準拠して実施している。前記の開発材 Ni-2 の耐食性評価結果を**図 8** に示す。本試験では、前項の高温濡れ性試験と同様の合成塩 ($\text{NaCl-KCl-Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ 等モル比) を用いており、 $650^\circ\text{C} \times 20 \text{ h}$ (大気雰囲気) 合金試験片板を合成塩に浸漬させた時の試験前後の重量減量を測定した (JIS Z 2290 金属材料の高温腐食試験方法通則に準拠)。図より、オーステナイト系ステンレス材料では腐食反応による大きな減量が計測されており、一方、Ni-2 では減量は小さく、安定な Ni 塩化物生成により増量となっていることがわかる。Ni-2 において腐食反応が比較的進んでいないことは断面の観察・分析からも裏付けられており、開発した材料が高い耐食性であることが示された。以上のように、灰付着低減効果と耐食性を評価し、再度前記した材料設計へ反映させることで、より優れた材料開発へつなげている。

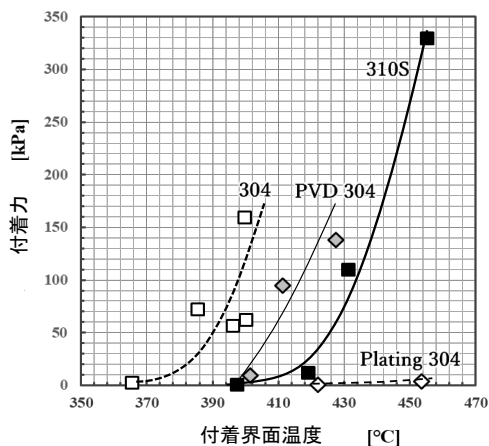


図7 各金属試験片の付着界面温度に対する付着力変化

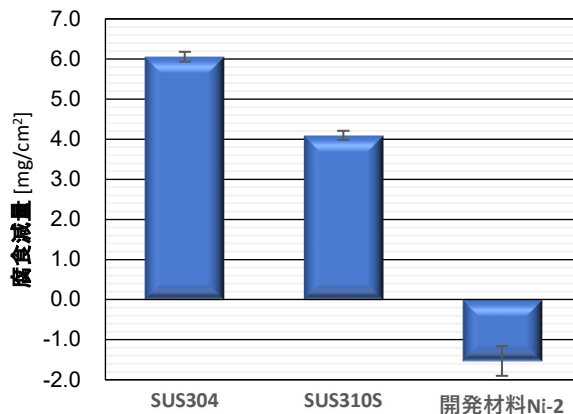


図8 耐食性評価結果例(650°C-20h, 大気)

3. 低温排熱の有効利用

廃プラスチックは一般廃棄物処理施設や産業廃棄物処理施設で処理されているが、小規模な施設も多いことから熱回収の無い単純焼却による処理や埋立などが多い。これらを高度熱利用するためには、エネルギー単価が高くなる熱利用が必要である。様々な温度帯の中で 0°C以下の冷熱は空調や冷蔵などに利用でき、付加価値が高い(氷の価値: 約 30 円/MJ)。さらに、0°C以下の冷熱発生量に見合う冷熱需要量を有する需要家が必要である。その一例として物流業界は年間を通じて冷蔵輸送が必要で地域毎に拠点を備えていることから有力な候補と考えられ、物流業界を想定した冷熱ネットワークの構築に必要な技術開発を行っている。

図9のように物流業界を想定した冷熱ネットワークには、未利用排熱から 0°C以下の冷熱を発生する吸収式冷凍機や、この冷熱を冷蔵車で使うために流動性の高い 0°C以下の氷スラリーを製造することが必要となる。これは、固体の水では冷蔵車への冷熱供給が難しいが、氷スラリーであれば配管を通して冷熱供給が可能になるためである。

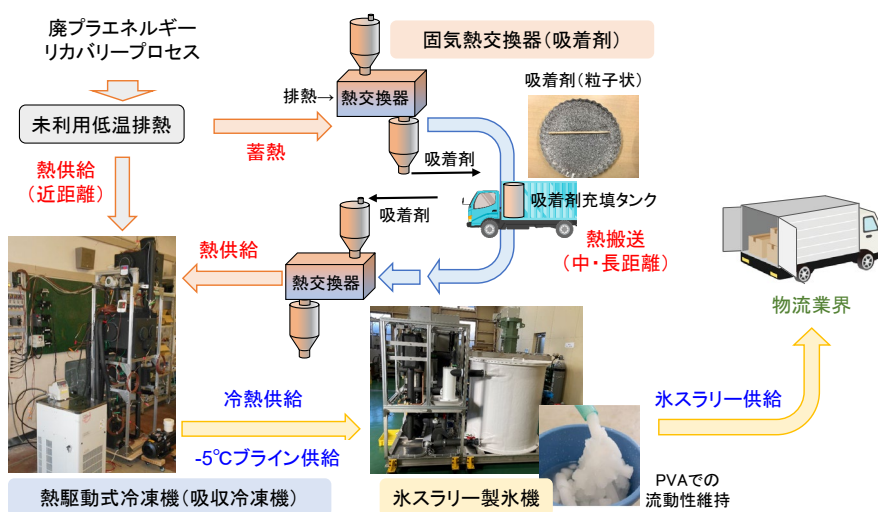


図9 排熱の冷熱利用の開発概要

また、本ネットワークでは、熱発生施設と熱需要施設と間の熱輸送も重要になってくる。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。しかし、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、潜熱蓄熱や吸着剤蓄熱での蓄熱剤を専用コンテナでトラック輸送するオフライン熱輸送システムが提案されている。蓄熱方法には潜熱蓄熱、吸着剤蓄熱²⁰⁻²⁶、化学蓄熱²⁷があり、蓄熱量はそれぞれ 265~340 kJ/kg、1 GJ/kg、2 GJ/kg となる。本開発では吸着剤蓄熱を選択し、**図 9** に示す様に廃棄物処理施設と冷熱需要地に専用の連続乾燥装置、熱発生装置と貯槽を備えるシステムを考えている。両施設間は専用コンテナを使って大量に吸着剤を輸送し、密閉性の高い貯槽で長期間の蓄熱を可能とする。蓄熱工程では、吸湿した吸着剤の連続乾燥させるために必要な大量の熱風を削減するために、小さな粒子径の吸着剤を選び、それらを内部に伝熱管を設置した流動層での伝導加熱併用乾燥を行うことで熱風量を削減することにした。今後、乾燥容量 3 kW クラスの吸着剤連続乾燥機を製作し、熱風による熱供給と伝導加熱量の最適な割合を明らかにし、装置構造を決定していく。

ここでの技術開発目標は熱発生運転時に発生する熱であるが、同時に大量の低露点温度の乾燥空気が併産できる。これは一般空調の潜熱除去に利用可能²⁸だけでなく、リチウムイオン電池製造や半導体製造などで必要な超低露点空気も供給できる^{29,30}。また、我が国の産業界から大量に排出される低温排熱^{31,32}を有効利用できれば燃料消費を 40%程度削減でき、昨今のカーボンニュートラルに向けた大幅な省エネルギー技術としての応用も可能と考えている³³⁻³⁵。

3.1 低温排熱で 0°C 以下の冷熱を発生する吸収冷凍機の開発

吸収冷凍機は、熱を加えて冷凍・空調用の冷熱を製造する冷凍機である。冷房負荷変動にも COP が変化しないため省エネルギーであり、大規模ビル空調用冷凍機として多数導入されている。従来型の吸収冷凍機の作動液は LiBr-H₂O を用いており、作動液を加熱して得られる冷媒は水である。吸収冷凍機が製造可能なブラインの最低温度は冷媒の凝固点によって決められるが、水が冷媒である場合、その凝固点は 0°C のため、0°C 以下の冷熱は製造できない。そこで、本研究では凝固点が十分に低い冷媒となる作動液の組成や物性を解明し、低温排熱を利用して 0°C 以下の冷熱を製造できる吸収冷凍サイクルを開発することを目標としている。さらに、3~4 kW の冷熱製造のプロトタイプ試験機を製作し、0°C 以下の冷熱が連続的に製造可能であることを実証する。

図 10 に開発中の 2 段式吸収冷凍機の模式図を示す。1 段目は従来の LiBr-H₂O を作動液体とした装置であり、2 段目の吸収器冷却水を製造する。2 段目は LiBr-H₂O/1-プロパノールを作動液とし、氷点下冷熱を製造する。吸収冷凍機は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。この圧力は作動液の濃度と温度で決まる。冷媒を吸収（凝縮）した作動液は温度が上昇するため冷却水が必要であり、1 段目では冷却塔からの冷却水で冷却する。2 段目では 0.5 kPa を維持するために、1 段目に製造した 7°C 程度のブラインで冷却する。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、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、蒸発器に流入しサイクルを形成する。

冷凍機の性能は動作係数 COP（製造した冷熱/入力した熱や動力）で表される。本冷凍機では排熱から Q_{11} 、 Q_{12} の熱入力があり、 Q_{32} の冷熱出力を製造する。したがって、補機動力を w と置くと COP は次式で与えられる。

$$COP = Q_{32} / (Q_{11} + Q_{12} + w) \quad (1)$$

Q_{11} 、 Q_{12} は吸収器から還流する希薄作動液を沸騰させて濃縮する。したがって、ほとんどの熱が冷媒蒸発に利用される。 Q_{21} 、 Q_{22} は冷媒蒸気を凝縮させる凝縮熱であるため

$$Q_{11} = Q_{21} \quad (2)$$

$$Q_{12} = Q_{22} \quad (3)$$

凝縮した冷媒は蒸発器で蒸発し、吸収器で凝縮するので、

$$Q_{31} = Q_{21} = Q_{41} = Q_{11} \quad (4)$$

$$Q_{32}=Q_{22}=Q_{42}=Q_{12} \quad (5)$$

1 段目に製造した冷熱 Q_{31} は 2 段目吸収器の冷却と凝縮器冷却に使われるので、

$$Q_{31}=Q_{22}+Q_{42}=2 \times Q_{32}=2 \times Q_{12} \quad (6)$$

したがって、補機動力を無視すると次式となる。

$$\text{COP}=Q_{12}/(2 \times Q_{12}+Q_{12})=0.33 \quad (7)$$

実機では入力を作動液の顕熱に使ったり、蒸発器の冷媒が液のまま一部吸収器に流れたり、断熱不全などで熱ロスが発生する。また、補機動力も必要であり、従来の一重効用冷凍機の COP は 0.7 程度である。したがって、本機の COP は 0.23 程度と推定している。

目標の -5°C 氷点下冷熱を製造するためには、2 段目冷媒 $\text{H}_2\text{O}/1$ -プロパノールの凝固点が -10°C 以下である必要が有る。そこで、 $\text{H}_2\text{O}/1$ -プロパノールの凝固点に及ぼす組成の影響を調査した。その結果、冷媒の H_2O モル分率が 0.9 以下であれば凝固点は -10°C 以下になることを解明した³⁶⁾。また、2 段目吸収器の冷却水には 1 段目で製造する 7°C 程度の冷却水を用いるため、作動液 $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}/1$ -プロパノールの結晶化温度に及ぼす濃度および水モル分率の影響を調査した。その結果、水モル分率が低下 (1-プロパノールが増加) すると、結晶化温度が低下すること、濃度 60%の結晶化温度は 15°C 程度、58%では 0°C 以下であることが判明し、2 段目に用いる作動液の最高濃度は 58%であることが判明した³⁷⁻³⁹⁾。

今後は、作動液から蒸発する冷媒の水モル分率を調査し、最適な作動液の選定方法を解明する。次に作動液や冷媒の温度と圧力の関係を解明し、氷点下冷熱を製造できる吸収冷凍サイクルを設計できるデュリング線図を作成する。さらに温度条件を考慮した作動液を選定して冷凍サイクルを検討し、製作中のプロトタイプ試験機で氷点下冷熱が製造可能であることを実証する予定である。

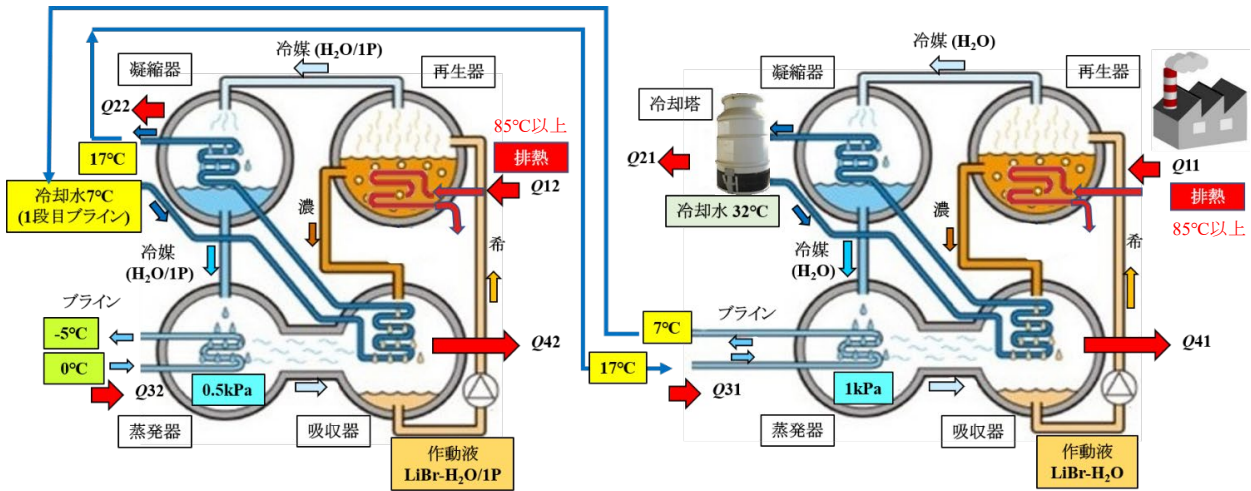


図 10 開発中の 2 段式の吸収冷凍機の模式図

3.2 製氷機の開発と氷スラリーの高度化

氷スラリーとは、スラリーアイス、フローアイス、アイススラリーなどとも言われるシャーベット状の氷のことをいう。氷スラリーは、氷粒子径が数百 μm 程度の微細な氷と水（または水溶液）の固液二相混合物であり、水と比較して蓄熱能力に優れ、氷と比較して高い流動性を有する。安価で安全性の高い氷スラリーは、 0°C 以下において潜熱を利用した高密度の蓄熱・熱輸送が可能のため、コールドチェーン向けの冷熱媒体として有望視されている。これまでに氷スラリーを用いたさまざまな氷蓄熱式空調システムが開発され、オフィスビルなどでの実用普及が進んできたが、今後は物流分野への氷スラリーの応用も期待されている⁴⁰⁾。

氷スラリーの製造方式には循環製氷方式、ダイレクト方式などあり、さらにハーベスト式、かき取り式

など様々な製造方法がある。これらの氷スラリーの製造方法の中で、過冷却水（0℃以下の水）からの氷スラリー製造は、エネルギー効率に優れた方法として知られている⁴¹⁻⁴⁶。原料である水溶液を熱交換器（過冷却器）にて過冷却状態にした後、超音波照射をトリガーとして過冷却を解除し、氷スラリーを製造する。過冷却水から氷スラリーを製造する際の課題は、過冷却器内部での凍結閉塞を防止しつつ、高効率かつ安定な熱交換を実現することである。また、前項の吸収冷凍機との組み合わせを考慮すると、温度が不安定な氷点下ブラインを用いた場合でも、安定的に運転可能な過冷却器が必要となる。

物流分野コールドチェーンへの冷熱供給を目的とする場合、氷スラリーに求められる特性としては、高蓄熱密度（すなわち高水分率）の条件でも十分な流動性を有している必要がある。しかし、氷分率の増大と流動性の維持は、一般にはトレードオフの関係にある。氷スラリーの流動性が悪くなる主な要因として、氷粒子の粗大化及び凝集が考えられる。そのため、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。図11に合成高分子の微量添加による氷粒子の粗大化抑制の効果を示す。ポリビニルアルコール（PVA）を0.1 mg/mL（約100 ppm）添加するだけで、氷粒子の粗大化を著しく抑制することが可能である。また、製氷液体として、塩水を使用すると凝固点降下により製氷温度は-3℃以下となるが、PVAを添加した水であれば凝固点降下が起きないため製氷温度が下がらないというメリットもある。

物流におけるコールドチェーンでは、広い温度範囲の冷熱が求められ、中でも0℃以下の冷熱需要は大きい。昨今では、冷熱源として氷スラリーの有用性が注目されている。今後は、氷スラリーの粗大化や凝集を抑制する技術を組み込んだ高効率氷スラリー製氷機の開発を行うことにより、物流におけるコールドチェーン向けの冷熱媒体への氷スラリーの適用を目指していく。

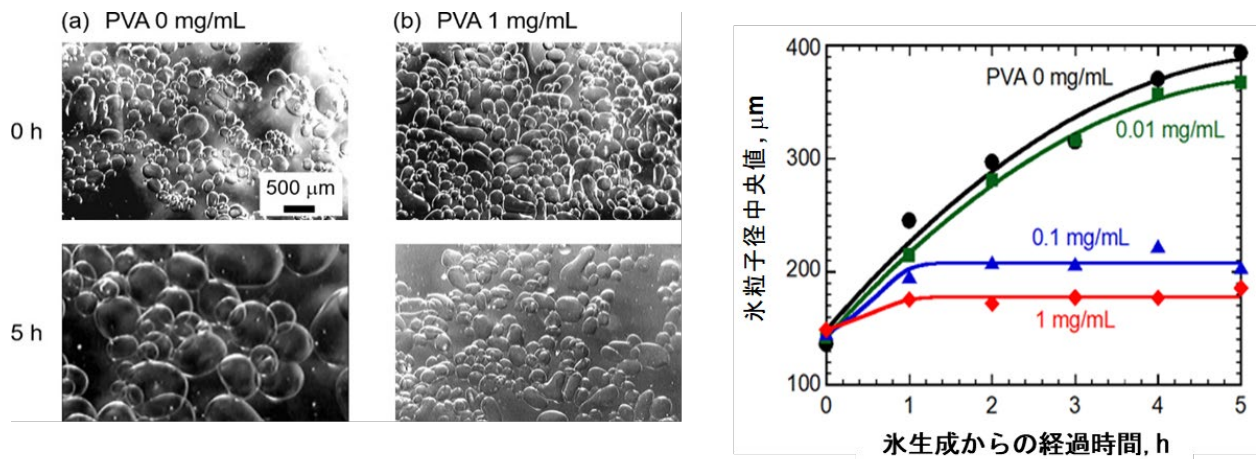


図11 ポリビニルアルコール(PVA)添加による氷粒子の粗大化抑制

4. 総合熱利用システムの評価技術

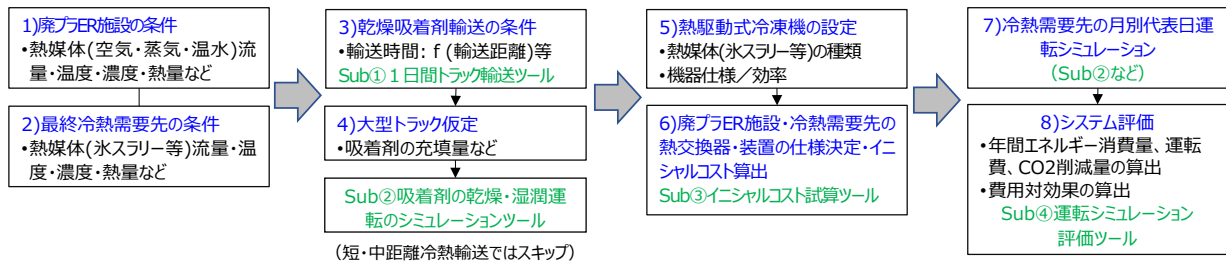
本研究では、熱発生側の熱条件（温度、熱量など）と熱需要側のそれとが合致しているか否かなどの熱マネジメントを行うために、冷熱利用システムの総合評価技術の開発を行っている。

図12に冷熱利用システムの評価モデルの概要を示す。図の(a)のフローのように評価モデルは1)～8)の項目と、サブ・ツール(Sub①～④)で構成されている。1) 廃プラER施設の条件と2) 最終冷熱需要先の条件が入力条件である。これらの条件は、各々施設の場合も複数施設の場合もあり得る。1)と2)の熱量の最小値が熱利用システムの容量になるが、2)の需要先の熱量で決定される場合が多い。

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み合わせ条件として、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、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熱媒体(氷スラリー等)の種類や機器仕様/効率などを定めて、6) 廃プラ ER 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イニシャルコストを算出する。

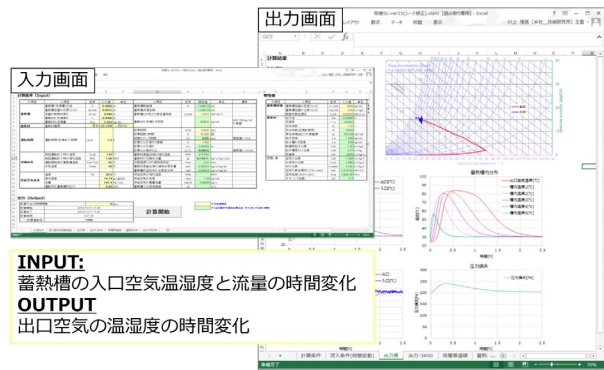
最後に、Sub②吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールを用いて、7) 冷熱需要先の月別代表日運転シミュレーションを行い、Sub④の運転シミュレーション評価ツールによって年間エネルギー消費量・運転費、CO₂削減量、費用対効果などを算出して 8) システム評価を行う。



(a) 評価モデルのフロー

焼却場		配送センター			
焼却場	種類	A	B	C	D
1	焼却場	1319	1927	2061	3424
2	焼却場	3905	4205	4911	1354
3	焼却場	2372	1167	1737	3562
4	焼却場	1787	1430	2170	3514
5	焼却場	1655	1428	2178	3488
6	焼却場	1501	1395	2135	3088
7	焼却場	2307	1233	1803	3497
8	焼却場	2493	838	1486	3325
9	焼却場	1911	841	1381	2743
10	焼却場	2529	959	1709	3323
11	焼却場	2088	1316	1886	3161
12	焼却場	2981	1107	1685	3161
13	焼却場	3098	3153	3779	1698

(b) Sub①一日間トラック輸送ツール



(c) Sub②吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールのシミュレーションツール

区分	品名	単位	数量	単価	金額	備注
水スラリー製氷機	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機
	製氷機	台	1	1,000,000	1,000,000	製氷機

(d) Sub③イニシャルコスト試算モデル

運転条件	蓄熱材容量	※※ ton/台		
	蓄熱材充填層サイズ	※※ m ³		
	蓄熱空気条件	※※ °C	※※ %RH	※※ g/kg
	放熱空気条件	※※ °C	※※ %RH	※※ g/kg
供給熱量	蓄熱材放熱	※※ m ³ /h		
	放熱熱量	※※ m ³ /h		
	設備稼働時間	※※ h/日	※※ 日/年	
投資回収効果	設備稼働時間	※※ h/回		
	運転回数	※※ 回/日		
供給熱量	供給熱量	※※ KJ/L	※※ m ³	※※ GJ/回
	(S1M結果より)		(蓄熱材容量)	※※ GJ/日
投資回収効果	供給熱量	※※ GJ/年	※※ %	※※ GJ/年
			(放熱口を除いた供給効率)	
投資回収効果	蒸気削減料金	※※ GJ/年	※※ 円/GJ	※※ 千円/年
	設備の運転電気料金	※※ MWh/年	※※ 円/kWh	※※ 千円/年
	メンテナンス費用			※※ 千円/年
	導入コスト			※※ 千円/年
	設備費			※※ 千円/年
投資回収効果	一般経費	※※ 千円/年	※※ %	※※ 千円/年
	イニシャルコスト			※※ 千円/年
投資回収効果	投資回収年数			※※ 年
	年間COP			※※

(e) Sub④運転シミュレーション評価モデル

図 12 冷熱利用システムの評価モデルの概要化

図 12 の (b)、(c)、(e)、(d) では、エクセルベースのサブ・ツールである Sub①、Sub②、Sub③、Sub④ を説明する。

Sub①の一日間トラック輸送ツールを図の (b) に示す。図のように複数の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。この移動時間の取得には Google Maps API とオープンソースの地理情報システム (Geographic Information System) ソフトである QGIS⁴⁷⁾ の利用を検討したが、この QGIS の特徴から、今後、多数の焼却場と多数の配送センターとの輸送計画を検討する場合には QGIS を活用することにし、現状は操作が簡便な Google Maps API を採用することにした。エクセル上において、Google Maps API 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を図の (c) に示す。蓄熱槽の形状やサイズを設定し、図のように蓄熱・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。現在は固定層を対象にしたシミュレーションモデルであるが、今後、研究の進捗により、流動層を対象としたモデルに拡張する予定である。

Sub③のイニシャルコスト試算ツールを図の (d) に示す。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。なお、あくまで概算費用であり、実導入時には現地に合わせ詳細検討が必要である。

Sub④の運転シミュレーション評価ツールを図の (e) に示す。図のように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 CO₂ 削減量を算出する。今後は、熱交換器伝熱管材料ならびに表面改質技術の成果による発電効率と稼働率の向上、冷熱需要の増加による熱回収率の向上といった要素を汲み合わせた総合エネルギー利用効率も評価する予定である。

以上の評価ツールの完成度を高めることを主目的に、具体的な二三の事例研究として、①中核都市、②地方都市 (離島)、③大都市 (首都圏ほか) を対象に、評価モデルを適用することを検討してきた。①中核都市モデルの 1 つには八戸市を選定して、現在、八戸湾岸エリアでの排熱発生の状況把握とデータ収集を行っている。今後は、①中核都市としては八戸市、②地方都市 (離島) としては大島、三宅島、八丈島、③大都市としては東京都、大阪、愛知、福岡を調査し、2 件以上の事例検討を行う予定である。なお、③大都市では、複数の一般廃棄物処理場と複数の物流倉庫を対象に、冷熱利用システム評価モデル (Sub①の一日間トラック輸送ツール) を適用し、トラック・トレーラの輸送時間に基づき、都心エリア全体でオフライン熱輸送が必要な場合と不要な場合をスクリーニングする。

5. おわりに

以上のように、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、伝熱管の表面改質に関する基盤研究、低温排熱の有効利用に関する研究開発、および総合熱利用システムの評価技術の研究開発について説明した。

各々の研究開発の概要と今後の予定は、以下のとおりである。

- ・ ER 施設の課題の一つは、廃プラスチック焼却の際の、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低減と耐食性向上であり、その解決は容易ではない。しかし、プラスチック資源循環プロセスの高度化には欠かすことのできない重要な課題であり、それが確立されれば、適用範囲は広くインパクトも大きい。本プロジェクトでは、灰付着低減効果および耐食性を有する表面改質材料・技術の開発を 2022 年度までに終了させる。その後、2023~2024 年度に実機における検証と評価を行い、2025 年度以降の社会実装を目指す予定である⁴⁸⁾。
- ・ 低温排熱の有効利用については、排熱発生施設の熱を直接冷熱に変換する技術開発、および熱発生施設

と熱需要施設との間の熱輸送に関わる技術開発を行っている。これらの技術が確立されれば、産業界全般に適用が可能でインパクトが大きい。本プロジェクトでは2020年度から開始された技術開発を2022年度までに完了させる。そして、2024年度には実証研究を終了し、それ以降の実用化を目指している⁴⁹⁾。

・熱マネジメントや未利用排熱の利用は、ユーザー一律速である。ユーザーの求める経済性や環境性を担保するために、冷熱利用システムの統合評価モデルを活用することで、本プロジェクトで開発する0°C以下の冷熱を発生する吸収冷凍機および氷スラリー製氷機で構成される排熱駆動型氷スラリー製氷機とともに、遠隔地への熱輸送技術の評価を行い、総合熱利用システムの実証研究と実用化を目指したい⁴⁹⁾。

本プロジェクトでの低温排熱の有効利用や製氷機と氷スラリーの高度化についての記載内容は、2022年6月に急逝された、稲田孝明先生が牽引されてきた成果である。我々は、稲田孝明先生の遺志を引き継ぎ、本プロジェクトでの開発技術の実用化と社会実装を目指す。

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。また、本プロジェクトの参画企業は、経済産業省が2050年カーボンニュートラルの実現に向けたイノベーションに挑戦する企業として、ゼロエミチャレンジ企業にリストアップされている⁵⁰⁾。

NEDOや経済産業省をはじめ、関係の皆様方に感謝を申し上げます。

文 献

- 1) プラスチックリサイクルの基礎知識 2021, 一般社団法人プラスチック循環利用協会 HP, <https://www.pwmi.or.jp/data.php?p=panf> (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 2) 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: 2023.01.29) .
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 松藤敏彦, 石井翔太, 廃棄物資源循環学会論文誌, 22, No.6, 382-395, 2011.
- 6) Capablo, J.; Jensen, P. A.; Pedersen, K. H.; Hjuler, K.; Nikolaisen, L.; Backman, R.; Frandsen, F. J., Energy & Fuels, 23, 3/4, 2009.
- 7) 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, <http://www.nedo.go.jp/content/100087257.pdf> (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 8) 環境省 HP, https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h26/pdf/3K123011.pdf. (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 9) 長沼 宏, 佐々木 頼明, 成瀬 一郎, 義家 亮, 植木 保昭, 二宮 善彦, CHEN Juan, 野口 学, 長 洋光, 廃棄物発電設備の灰付着と腐食に関する現状と課題, 日本エネルギー学会誌, 95 巻, 11 号, pp.1089-1104, 2016.
- 10) 佐伯達哉, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎, 産業廃棄物灰の熔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.
- 11) 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.
- 12) 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熔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.

- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIE, and Ichiro NARUSE, Ash deposition mechanisms in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, vol.9, No.4, 21-00435, 2022.
- 18) 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.
- 19) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 邊章, 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.
- 20) 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一, 高性能吸着材ハスクレイ[®]の開発, Synthesiology, 9 巻, 3 号, 154-164, 2016.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸, ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 4 報—一定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.
- 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 5 報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, 47 巻, 301 号, 9-16, 2022.
- 26) 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, 47 巻, 308 号, 11-18, 2022.
- 27) 劉醇一, 高密度化学蓄熱材の開発, 伝熱, 45 巻, 190 号, 21-26, 2006.
- 28) 幡野博之, 松田聡, 上之原康弘, 川口靖夫ほか, 低圧損化した移動層型デシカント空調の除湿特性, 粉体工学会誌, 50 巻, 3 号, 212-218, 2013.
- 29) 金偉力, 坂井麻美, 岡野浩志, ドライルーム用超低露点除湿機の省エネ性研究, 日本冷凍空調学会論文集, 29 巻, 1 号, 81-88, 2012.
- 30) 西村浩一, 岡村典明, 超低露点清浄空気発生装置の開発, 化学工学論文集, 26 巻, 3 号, 332-335, 2000.
- 31) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 2019 年 3 月, 産業分野の排熱実態調査, <http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf> (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 32) 三菱総合研究所 環境・エネルギー開発本部, 平成 29 年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査 (熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査), https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000018.pdf (最終アクセス日: 2023.01.29) .

- 33) 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・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021.
- 34) 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・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021.
- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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-H₂O-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.
- 38) 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, 2022.
- 39) 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-H₂O/1-Propanol の蒸発特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会, 岡山, 2022.
- 40) 射場本忠彦, 氷蓄熱空調システム概論, 日本冷凍協会誌, Vol.62, No.714, 1~11, 1987.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) 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.
- 44) 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.
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) QGIS (キュージーアイエス、旧称:Quantum GIS) : <https://ja.wikipedia.org/wiki/QGIS> (最終アクセス日: 2023.01.29).
- 48) 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.
- 49) 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.
- 50) 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-mission_challenge/index_zeroemi.html (最終アクセス日: 2023.01.29).

ABSTRACT

Since FY2020, we have been participating in the Energy Recovery (ER) team of the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) project "Development of Innovative Plastic Resource Recycling Process Technology". For highly efficient heat recovery in waste plastic incineration facilities, we are conducting basic research on metallic and ceramic heat transfer materials with high durability and difficult ash adhesion, and also, on surface modification of heat transfer tubes. In addition, to utilize the recovered heat as high-value-added cold heat, we are advancing technologies related to adsorbent heat storage, absorption chillers that generate cold heat below 0°C from low-temperature waste heat, and ice slurry utilization. Furthermore, we plan to develop evaluation technologies for integrated heat utilization systems covering heat recovery to ice slurry utilization, and to study case studies in various regions. This paper presents the background of this research and an overview of the technological development in the ER team.

CO₂回収・利用技術とカーボンプライシングの動向

増田正夫・宮下真一・太田宗吾

Trends in Carbon Dioxide Capture/Utilization Technology and Carbon Pricing

Masao Masuda・Shinichi Miyashita・Sougo Ohta

2020年10月に日本政府は2050年までにカーボンニュートラル実現を目指すことを宣言した。これを契機に、脱炭素に向けた活動が全ての業種・業界において重要な経営課題となってきた。また、経済産業省はCO₂を炭素資源と捉えて再利用するカーボンリサイクルというコンセプトを推進している。このような動きを受けて、本報では、CO₂回収・利用技術とカーボン・プライシングの動向について概説する。

1. はじめに

世界各国でカーボンニュートラルを目指す取り組みが加速する中、国内では、2020年10月に菅首相が所信表明演説で、2050年までにカーボンニュートラル実現を目指すことを宣言した¹⁾。2022年6月には、岸田首相が「新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画」のなかでGX（グリーントランスフォーメーション）を重点投資分野の一つに指定した²⁾。このような動きを受けて、脱炭素にむけた活動が全ての業種・業界において重要な経営課題となってきた。

カーボンニュートラルとは、温室効果ガスの排出量と森林などによる吸収量を均衡させることを意味する。温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという地球温暖化対策の一つとして取り組まれている。また、GXとは、クリーンエネルギーを主軸とする産業構造、社会システムへと変革を図る概念を意味する。

カーボンニュートラルを真に実現するためには、CO₂排出量を削減するだけでなく、CO₂を回収・貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）もしくは回収・利用（CCU：Carbon dioxide Capture and Utilization）する技術が不可欠とされている³⁾。

前者のCCSとは、人が化石燃料を燃焼する等の活動で排出されたCO₂もしくは大気中のCO₂を回収して、固定化・貯留するプロセスを言う。一般的には、発電所や化学工場などからのCO₂を回収して地中深くに貯留・圧入することを差す。2005年のグレンイーグルズ・サミットで注目され、2008年の洞爺湖サミットで国際的に支持された。これらを受けて、我が国では、2012年から北海道・苫小牧で大規模な実証実験が始められた。製油所から排出されるガスからCO₂だけを分離・回収し地中に貯留するもので、2016年から2019年の間に海底下の地中に累計30万トンのCO₂の貯留を実証できた⁴⁾。課題はCO₂回収コストであり、コスト削減のための研究開発が現在も継続されている。また、ブルーカーボン（海洋の沿岸生態系に隔離・貯留される炭素）やグリーンカーボン（植物や土壌など陸上の生態系に隔離・貯留される炭素）も有望なCCSとして注目されている。

一方、後者のCCUとは、人が化石燃料を燃焼する等の活動で排出されたCO₂もしくは大気中のCO₂を回収して、化学製品や燃料等に変換するプロセスを言う。これらの製品や燃料を利用する際にCO₂が大気に再放出されても、従来の化石燃料由来からの置き換えで低炭素化を図れたり、あるいは輸入に頼る化石燃料の代替品を国内で製造・調達できるようになるため、既にあるインフラやサプライチェーンをより低炭素

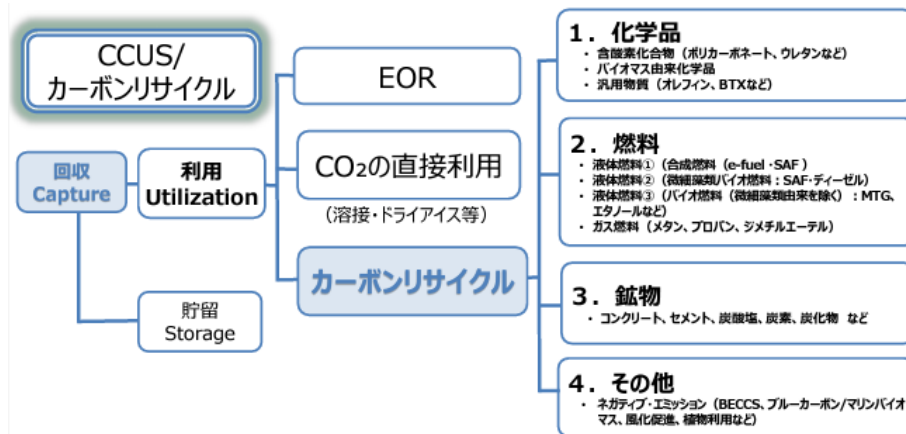


図1 有望なカーボンリサイクル技術⁹⁾

注) EOR: 原油増進回収法、BTX: 芳香族炭化水素のベンゼン/トルエン/キシレンの総称、e-fuel: 合成燃料、SAF: 持続可能な航空燃料、MTG: メタノールからのガソリン合成法、BECCS: バイオマス燃焼+CCS

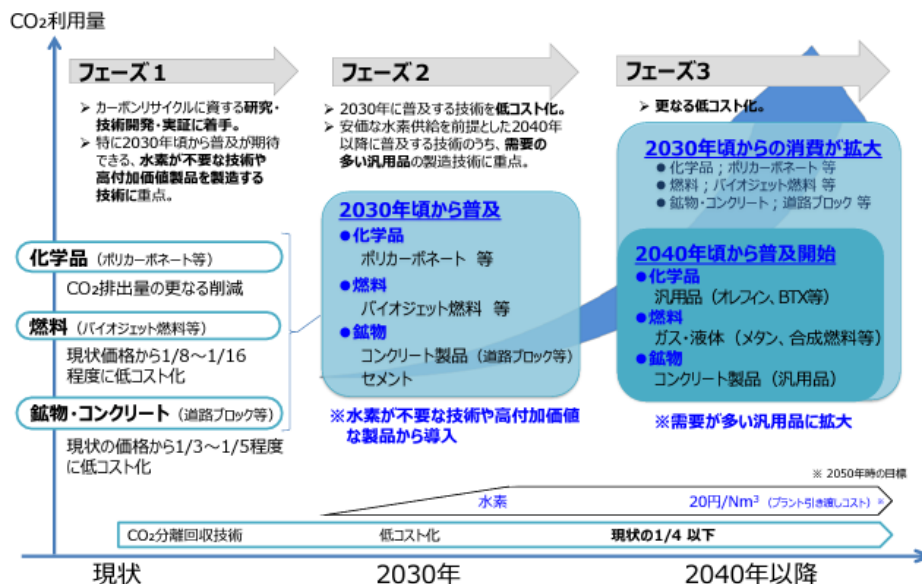


図2 カーボンリサイクル技術ロードマップ⁹⁾

な形で活用できたりする。既存のインフラ等を変更するのは容易ではないが、新たなビジネスを創出できる可能性を秘めている⁵⁾。

CCS と CCU の技術を併用して使用すること、もしくはそれらの総称を CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) と言う。CCU や CCUS という言葉は、学術論文では 2000 年代初期から見られるが、エネルギー分野で注目され始めたのは、2015 年末のパリ COP21 が一つの背景にあり、これ以降、国際的な会議の報告書で使われるようになった⁶⁾。

CCU は、特に欧州や米国で先進的に取り組まれている。欧州で 2018 年に提案された A Clean Planet for All⁷⁾において、2050 年までにカーボンニュートラル経済の実現を目指すことが明示され CCU を活用することが示された。また、米国では、気候変動対策よりもエネルギーセキュリティの観点から幅広い CCU が検討されている⁵⁾。

我が国では、2019 年 1 月に安倍首相がダボス会議で CCU への意欲を示してから⁸⁾、経済産業省が CO₂を炭素資源と捉えて再利用するカーボンリサイクルというコンセプトを推進し始めた。6 月には、各分野で研究開発が必要な技術課題を整理した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」⁹⁾が経済産業省から公表された。その後、米国等との国際的な連携が進展するなど、多岐に亘って大きな進展があったため、カーボンリサイクルの取り組みをさらに加速すべく、2021 年 7 月には改訂版が公表された。改訂版を図 1 と図 2 に示

表 1 CO₂回収技術の比較

手法	原理	起因力	長所	短所	
化学吸収法	化学反応	温度差	<ul style="list-style-type: none"> ・低分圧ガス向き ・炭化水素への親和力が低い ・高濃度CO₂が回収可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸収液が高価 ・腐食・浸食・泡立ちがある ・適用範囲が限定的（大容量向き） ・110～130℃の再生用熱源が必要 	
物理吸収法	物理吸収	分圧差(濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> ・高分圧ガス向き ・適用範囲が広い ・腐食・浸食・泡立ちが少ない ・再生熱源不要 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸収液が高価 ・重炭化水素との親和性が大 	
物理吸着法	PSA	物理吸着	分圧差(濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> ・高純度精製が可能 ・適用範囲が広い ・装置が比較的簡易 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸着材の費用が大 ・再生ガスが必要 ・水分との親和性が大 ・高圧対応のためTSAよりもイニシヤル・ランニングが大
	TSA	物理吸着	温度差	<ul style="list-style-type: none"> ・高純度精製が可能 ・適用範囲が広い 	<ul style="list-style-type: none"> ・吸着材の費用が大 ・再生用熱源が必要 ・水分との親和性が大
膜分離法	透過	分圧差(濃度差)	<ul style="list-style-type: none"> ・簡便 ・安価 	<ul style="list-style-type: none"> ・低純度 ・運転費が高い ・適用範囲が限定的（小容量向き） ・油脂分含有ガスに弱い 	
深冷分離法	液化・精留	相変化	<ul style="list-style-type: none"> ・高純度精製が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・装置が複雑 ・建設費が高価 ・運転費が高い ・適用範囲が限定的（大容量向き） 	
固体吸収法	化学反応 物理吸収	分圧差(濃度差) 温度差	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー消費、コスト面で吸収法よりも優位 	<ul style="list-style-type: none"> ・実用化開発段階 	

す。改訂版ロードマップでは、水素が不要な技術や高付加価値な製品については2030年頃からの普及を目指し、2040年以降に向けては、現在未確立の技術で、実現した場合のCO₂利用量が多いものの普及を目指すとしている。環境省も2018年より「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」を開始してCCU普及を目指す事業を進めている。

2. CO₂回収技術

CO₂回収技術には多くの方式があり、それらを比較したものを表1に示す。いずれの方式も長所と短所があり、どの技術を選択するかは、ケース・バイ・ケースで異なってくる。また、CO₂回収の対象は、CO₂濃度の高い排ガス（CO₂濃度7%～15%）とCO₂濃度の低い大気（約0.04%）に大きく分けられる。前者の方が効率良くCO₂を回収できるので、一般的には排ガスが対象とされるが、近年では、後者についてもDAC（Direct Air Capture）と呼んで、場所を問わずどこでも大気中のCO₂を回収できるので注目を浴びている。DACについては、第4章で詳細に説明する。

主なCO₂回収技術について、以下に概説する。

2.1 化学吸収法

化学吸収法は、化学反応を利用してCO₂を分離する方法である。吸収塔内でCO₂は40～50℃でアミン水溶液と反応してアミン炭酸塩を生成する。アミン炭酸塩を再生塔で110～130℃まで加熱すると、CO₂はアミン水溶液から気化するので高濃度CO₂を回収できる。大規模にCO₂を回収する用途に向いているため、世界中で研究開発や実証プロジェクトが実施されているが、課題はCO₂分離時の加熱における多大なエネルギー消費である。現在、エネルギー効率が高くCO₂吸収率の高いアミン水溶液の開発が進められている。

国内では世界に先駆けて 1980 年代始めから研究が行われている¹⁰⁾⁻¹²⁾。近年の事例としては、RITE（公益財団法人地球環境産業技術研究機構）と日本製鉄が、COURSE50（NEDO 委託事業）で開発した化学吸収液とそのプロセスがあり、化学吸収法による CO₂ 回収設備としては世界で初めての商用設備として 2014 年に日鉄エンジニアリングの室蘭製鉄所内に 1 号機が導入された（120 t-CO₂/day）。2018 年には、石炭火力発電所向けの CO₂ 回収設備として、新居浜西火力発電所で 2 号機が操業を開始した（143 t-CO₂/day）¹³⁾。回収された CO₂ は、主に食品産業や化学産業において直接利用されている。

2.2 物理吸収法

物理吸収法は、吸収塔で CO₂ を吸収するポリエチレングリコールやメタノールなどの吸収液に排ガスを通して、高圧・低温下で物理的に CO₂ を吸収する方法である。そして再生塔で減圧または加熱し、高濃度 CO₂ を回収する。高圧ガスを対象にする場合には本方式が有利になるが、低圧ガスでは化学吸収法の方が有利になる。

国内で実証プロジェクトが稼働しており、電源開発の若松研究所における EAGLE プロジェクト（2008～2014 年）や大崎クールジェンによるプロジェクト（2019 年～）等があり石炭ガス化複合発電（IGCC）や石炭ガス化燃料電池複合発電プラント（IGFC）との組み合わせによる有効性が実証されている¹⁴⁾⁻¹⁷⁾。

2.3 物理吸着法

物理吸着法は、圧力差や温度差を利用し、ゼオライトや活性炭などの固体の吸着材に排ガスを通して、CO₂ を他の気体と分離させる方法である。圧カスイング吸着法（PSA 法）と温度スイング吸着法（TSA 法）に加えて、両者を併用する PTSA 法がある。分離回収に要するエネルギーが比較的小さく、装置が比較的簡易になることもあって適用範囲が広い。しかし水等の他成分が容易に吸着するため、吸着の制御や劣化が課題になる¹⁸⁾。

2.4 膜分離法

膜分離法は、CO₂ をろ過して取り出す方法である。高圧力の排ガスからの CO₂ 分離においては、加減圧や加熱によるエネルギー消費がなく、最もエネルギー効率が高い。しかし、原理的に高濃度 CO₂ が得られないこと、大容量や低圧ガスには不向きであること等の短所がある¹⁹⁾。

2.5 深冷分離法

深冷分離法は、気体の沸点の違いを利用し、排ガスを圧縮および低温液化し、蒸留することで CO₂ を取り出す方法である。設備コストが高くなることや排ガスの圧縮エネルギーが大きくなることから、実用化には至っていない。

2.6 固体吸収法

固体吸収法では固体の CO₂ 吸収材を利用する。CO₂ を化学的に吸収するアミンを多孔質支持体に担持させたタイプなどがある。化学吸収法と同様の特性を示しながらも、固体であるが故に CO₂ 分離の際の顕熱や蒸発潜熱を削減できることから、化学吸収法に比べて必要なエネルギーを大幅に低減できる。

RITE を中心としたグループを中心に開発が行われており、特に排ガス向けの CO₂ 回収技術としては、化学吸収法の分離回収コストを現状の 4,000 円程度/t-CO₂ から 2,000 円台/t-CO₂ に、エネルギー消費量を現状の 2.5 GJ 程度/t-CO₂ から 1.5 GJ/t-CO₂ に低減できる可能性が示されている²⁰⁾。発電所等の大規模施設での CO₂ 回収方法の本命として期待されている。現状は実証段階にあり、2030 年頃の技術の確立を目指している。

3. CO₂ 利用技術

CO₂ 利用は、主に直接利用と間接利用とに分けられる。間接利用とは CO₂ を何らかの製品に変換させて利用することを言う。

3.1 直接利用

直接利用としては、溶接ガスなどの産業分野、炭酸水などの飲料・食品分野、並びに医療分野で利用したり、ドライアイスにして生鮮食品の冷温保管・輸送などで利用したりする。農家のハウス栽培で促進栽培に利用したり、枯渇油田に圧入して油田の残存原油を回収する EOR (Enhanced Oil Recovery) に利用したりする。いずれも既に市場が存在するが、現状においては、従来技術よりもコストやエネルギー消費の面で明らかに有利でなければ普及は難しい状況となっている。また、これらの市場は必ずしも大きくないため、将来的に大規模に回収された CO₂を全てこれらの市場で賄うのは難しいとされている。そのために間接利用の研究開発が盛んに行われている。

3.2 間接利用

間接利用としては、CO₂をメタンやメタノール、エタノール等に変換させて燃料や化学品として利用したり、CO₂を炭酸カルシウムに変換してセメントの原料にしたり、高強度コンクリートに利用したり、他にも用途は多岐にわたる。これら間接利用は、研究開発段階あるいは実証段階のものが多く、その多くは 2030 年頃からの普及が想定されている。

3.2.1 化学品への利用

CO₂から製造できる化学品としてはメタノールやエタノールがある。燃料としてそのまま利用することができ、エチレンやプロピレンさらには様々な化学品に合成して利用することもできる。

アイスランドの Carbon Recycling International 社は、レイキャビクにおいて CO₂からのメタノール生産プラントを 2012 年から商業稼働している。地熱発電の電力で水電解した水素と、地熱発電からの年間 5,500 トン CO₂を使って、年間 4,000 トンのメタノールを製造・販売している⁵⁾。

日本でも CO₂からメタノールを製造するプロジェクトが行われている。東芝は、太陽光発電で水電解から製造した水素と、火力発電所の排ガスからの CO₂により、メタノールを製造する人工光合成の実証事業を 2018 年より開始している²¹⁾。

3.2.2 燃料への利用

CO₂は、メタネーション技術によって水素と反応させてメタンに変換させたり、還元反応による合成ガス (CO と水素の混合ガス) を経て、軽油やアルコール、オレフィンといった製品に変換させたりできる。メタンはそのまま都市ガスとして、軽油はそのまま燃料として利用できるなど、既にあるインフラやサプライチェーンを有効活用できる面で大きなメリットがある。

海外でもメタネーションの技術開発が進んでいる。その代表例として Store & Go プロジェクトがある。ドイツの Falkenhagen、スイスの Solothurn、イタリア南部の Troia の 3 地点において、27 機関が 2016 年から Power-to-Gas (P2G) の実証を行っている²²⁾。P2G とは、再生可能エネルギーの余剰電力を、水素やメタンなどの気体燃料に変換して貯蔵・利用することを言う。

国内でもメタネーション実証事業が始まっている。INPEX 社は、自社のガス田からの CO₂からメタンを製造し、都市ガスとして再利用する事業を 2019 年より始めた²³⁾。日立造船は、2018~2022 年度の環境省の事業において、清掃工場の排ガスからの CO₂と再エネを利用した水電解によって作られる水素でメタンを製造する実証事業を行っており、メタネーション技術のモデル実証を小田原で行っている²⁴⁾。

3.2.3 コンクリートへの利用

CO₂をセメントの原料の石灰石の主成分である炭酸カルシウムに変換したり、コンクリート製造時に CO₂を吹き込むことで強度の高いコンクリートに仕上げたりして CO₂を利用できる。CO₂利用時に、水素や多量のエネルギーが不要であるため、他の利用先に比べて大きなメリットがあると言われている。

2007 年に創業したカナダの Carbon Cure Technologies 社は、ビル・ゲイツ氏ら富豪からの投資を元手に、セメント製造で炭酸カルシウムを焼成する際に大量に排出される CO₂をリサイクルしてコンクリートに注入する事業に取り組んでいる²⁵⁾。

国内では、鹿島建設、中国電力、デンカが共同開発したコンクリート CO₂-SUICOM により、大量の CO₂ をコンクリートに固定する技術を確立している²⁶⁾。

3.2.4 ポリマーへの利用

CO₂から生成されるポリマーは、使い捨て容器などの汎用プラスチックとして利用されるポリエチレンや、電気・電子部品や衣料用繊維などの工業用プラスチックとして利用されるポリカーボネートなど、身近にある様々な製品での利用が期待できる。

海外では、ドイツの化学メーカーCovestro AG が、CO₂とプロピレンオキシドを反応させてポリマーの原料を年間 5,000 トン生産している⁵⁾。

国内でも旭化成が CO₂を原料にポリマーを製造する実証事業を 2014 年度～2016 年度に行っていた。実証により、従来の製造プロセスに比べて省エネかつ CO₂排出量削減を実現できることが示されている²⁷⁾。

3.2.5 バイオマス由来製品への利用

CO₂を微細藻類などのバイオマスに吸収させ光合成を促進させることで増殖させ、それらを原料に燃料や化学品に変換させる技術も有望な CCU と位置付けられている。

欧州・米国においては、多くの企業や研究機関が早くからバイオマス関連の研究や商品開発を行っている。一方、国内の代表例としては、佐賀市において清掃工場の排ガスから CO₂を分離回収し、回収した CO₂を藻類培養事業とバジル栽培事業で利用している²⁸⁾。

4. DAC

DAC とは、大気中の CO₂を直接吸収することによって、大気中の CO₂を減少させる技術のことを言い、直接空気回収技術とも呼ばれている。DAC に相応しい CO₂回収方法としては、物理吸着法や化学吸収法、固体吸収法など、様々な手法が検討されている。

4.1 DAC の事例

国外では、カナダやスイス、米国などで DAC の実用化、商用化に向けた研究開発が進んでいる。カナダのカーボン・エンジニアリング社は、低コストで大気から CO₂を回収し、それらを水素と合成して液体燃料を製造することに成功した²⁹⁾。DAC 技術のリーディングカンパニーであるスイスのクライムワークス社は、2021 年 9 月から、アイスランドで世界最大の DAC プラントを稼働させている。このプラントは、年間 4,000 トンの CO₂を大気から回収しており、今後、2030 年までに年間 100 万トン以上の CO₂を回収することを目指している³⁰⁾。DAC プラントの写真を図 3 に示す。

国内では、九州大学カーボンニュートラル・エネルギー研究所は、福岡県のナノメンブレン社との共同



図 3 アイスランドにおけるクライムワークス社の DAC プラント³⁰⁾

研究により、分離膜を用いた CO₂回収技術を研究開発しており、多段の膜分離により空気中の CO₂を 40%以上まで濃縮できることを明らかにしている³¹⁾。川崎重工業は、環境省と連携して、固体吸収材を用いた DAC の小型化の実証事業を行っている。1 日 5 kg-CO₂を回収し、回収された CO₂も純度 95%で回収できることが確認された³²⁾。東京都立大学の山添らは、イソホロンジアミンが CO₂と反応して固体となって析出することを利用して、大気中の低濃度 CO₂を高速で吸収する技術を開発しており、将来の DAC 技術への適用が期待されている^{33),34)}。

4.2 DAC の課題

CO₂分離回収に伴うエネルギーコストが膨大であることが、現状の技術水準における最大の課題となっている。既に商用化されているスイスのクライムワークス社の設備でも、コストは 600 ドル/t-CO₂、エネルギーは 9.0 GJ/t-CO₂となっており³⁰⁾、一般的な普及に向けては、コストとエネルギーの大幅な低減が求められる。

5. カーボンプライシング

カーボンプライシング^{35),36)}とは、炭素排出に価格付けを行う仕組みのことを言う。脱炭素社会に向けた行動変容を促す目的で導入する手法の一つとされる。明示的カーボンプライシングと暗示的カーボンプライシングの 2 種類に大別される。前者は、排出される炭素に対して 1 トン当たりの価格付けがなされる。政府によって価格付けされる炭素税や国内排出量取引、民間企業が独自にプライシングするインターナル・カーボンプライシングや国内クレジット取引などがある。一方、後者は、エネルギー消費量に課税することで、間接的に温室効果ガス排出量の抑制を図るものである。代表的なものに、エネルギー課税、エネルギー消費量や機器などに関する規制・基準などがある。

5.1 海外の動向

カーボンプライシングは、海外で先行して取り組まれている。

フィンランドは 1990 年に世界で初めて炭素税を導入した国で、その税収は、所得税の減税や企業の社会保障費削減による税収減少の一部を補填するために使われている。炭素税という形でいち早くカーボンプライシングを取り入れた国であり、これまで CO₂排出量の削減と経済成長を両立させている。例えば、2014 年時点の CO₂排出量を 1990 年比で 16%削減しながらも GDP を 48%向上させている³⁷⁾。

EU では、2005 年に世界で最初となる EU-ETS (欧州連合域内排出量取引) が導入された。この制度は、対象企業に対して排出量の上限が割り当てられ、その過不足分を市場取引する仕組みである。対象業種は、発電、鉄鋼、窯業 (セメントやガラス製造業など)、パルプ・紙製造業で、2021 年の改正で、海運、道路輸送、建物 (化石燃料などの暖房を利用する住宅等) が加えられた。全体の排出量は当初より減少傾向にあるものの、多くの企業は排出量の削減が追いつかず排出枠の購入を余儀なくされており、そのコストを商品の価格に転嫁する動きも出てきており、グリーンインフレーション (緑のインフレ) が懸念されている。

中国はエネルギー起源 CO₂排出量が世界で最も多い国であり、世界の排出量の約 30%を占める。2020 年 9 月の国連総会で、中国は、2060 年までにカーボンニュートラルを達成するよう努力すると表明し、2021 年 7 月に排出量取引制度 (ETS) を開始した。現在の ETS の対象は、石炭および火力発電を行う発電事業者のみであるが、今後は対象事業の拡大が検討されている。

5.2 国内の動向

2012 年 12 月に「地球温暖化対策のための税 (温対税)」として国レベルで炭素税が導入され、すべての化石燃料に対し CO₂排出量に応じた税率が課された。しかしながら、CO₂排出量 1 トンあたり 289 円という税率は、諸外国と比べてかなり低い水準に留まっている。これに対して、スウェーデンでは 2021 年 4 月時点で CO₂排出量 1 トンあたり 137 ドル (日本円で約 1 万 5 千円) である。

自治体の動きとしては、東京都が 2010 年に大規模事業所に対して CO₂排出量の削減義務を課す「総量削減義務と排出量取引制度」を実施した。続いて、埼玉県でも 2011 年に大規模事業所向けに「地球温暖化対

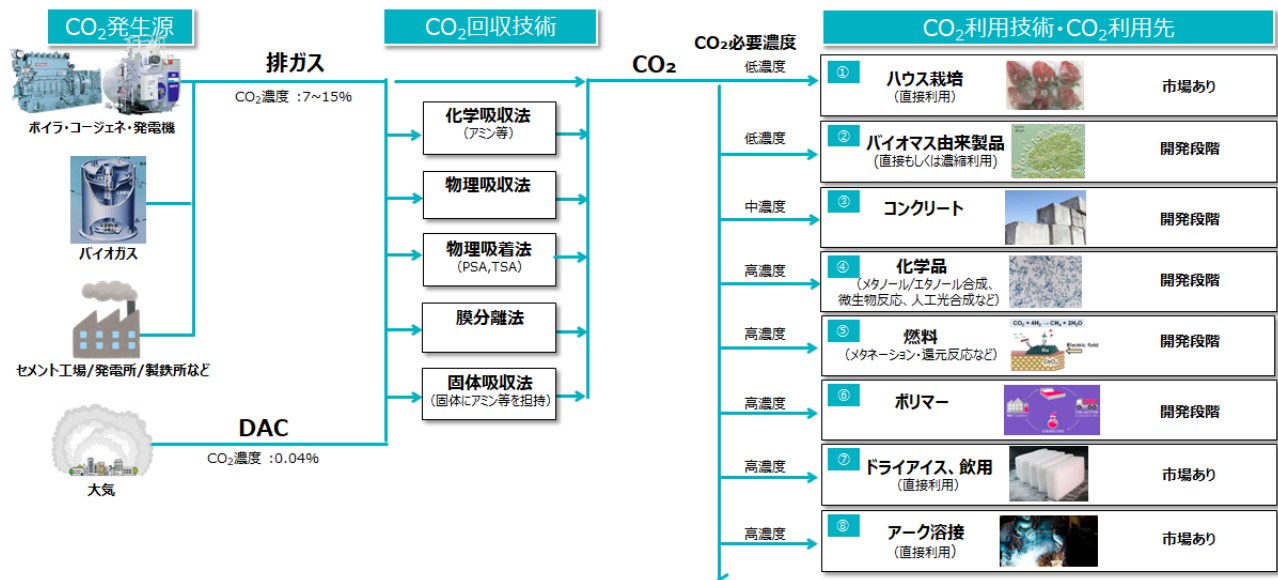


図4 CO₂発生源～CO₂回収技術～CO₂利用先

策計画制度」と「目標設定型排出量取引制度」を開始した。

東京証券取引所では、経済産業省からの委託事業として、試行取引を行うカーボン・クレジット市場の実証を2022年9月22日から2023年1月末までの予定で実施している。一方、民間セクターでは、企業が独自に排出量に価格をつけ、低炭素投資や対策推進の判断などに活用するインターナル・カーボンプライシングが進んでいる。2022年3月の環境省資料³⁸⁾によると、日本では約280の企業がインターナル・カーボンプライシングを導入または2年以内に導入予定となっている。

5.3 カーボンプライシングの課題

カーボンプライシングは、企業や社会に対して脱炭素化に向けた取り組みを強力に促すことができる。排出量が増えればコストが必要になる一方で、減らすことができれば新たな収益の機会となる。したがって、現在の排出量を削減するためのイノベーションに取り組むインセンティブが生まれる。

その反面、以下のことが懸念されている。一つは、民間企業への負担の増加である。これにより産業の国際競争力低下につながる可能性があり、導入の狙いの一つであるイノベーションを逆に阻害してしまうという意見もある。二つ目は、制度設計の難しさである。排出量取引で各企業・業種にCO₂排出量の上限を設ける場合、現在の排出量や脱炭素技術の発展状況などを踏まえた排出枠や負担金を設定する必要がある。しかし、公平で効果的な制度設計は容易ではない。

今後、国内で本格導入される見込みであるが、現在も産官学の多くの検討会で議論を重ねている。

6. おわりに

CO₂回収・利用技術の実用化には、CO₂の回収と利用に伴うコストと消費エネルギーの削減が喫緊の課題であり、その普及には、依然として時間を要すると思われる。

一方、地球環境問題に端を発するCCUを好機として、早期にビジネスに活かすためには、CO₂発生源、CO₂回収技術、並びにCO₂利用技術とCO₂利用先を図4のように俯瞰し、LCAを駆使して技術の組み合わせの最適解を導き出す必要があると考える。例えば、利用側で高濃度なCO₂が必要な場合には高純度CO₂回収技術が必要になるが、一方で、利用側が低濃度CO₂で十分な場合には、必ずしも高度な技術を採用する必要はない。CO₂発生源とCO₂利用先のマッチングを踏まえた技術開発でなければならない。

文 献

- 1) 資源エネルギー庁：令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）第1部 エネルギーをめぐる状況と主な対策 第2章 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と取組 第3節 2050年カーボンニュートラルに向けた我が国の課題と取組(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-3.html>), (2021.6).
- 2) 首相官邸：新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画 ～人・技術・スタートアップへの投資の実現～ (https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202205/31shihon.html), (2022.6).
- 3) 有野洋輔, 田村堅太郎：IEA（国際エネルギー機関）による2050年ネットゼロに向けたロードマップの解説(公益財団法人地球環境戦略研究機関ホームページ：<https://www.iges.or.jp/pub/iea-2050netzero/ja>), (2021.7).
- 4) 経済産業省, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 日本 CCS 調査株式会社：苫小牧におけるCCS大規模実証試験30万トン圧入時点報告書（「総括報告書」）, (2020.5).
- 5) 野原珠華：CO₂有効利用（CCU）の国内外の動向, みずほ情報総研レポート Vol.20 (2020).
- 6) 柴田善朗：CCU・カーボンリサイクルに必要な低炭素化以外の視点 -CCUS という分類学により生じる誤解-, (<https://eneken.ieej.or.jp/data/8821.pdf>), (2020.2).
- 7) 経済産業省：英国・EUにおけるカーボンニュートラルシナリオについて, (2020.11).
- 8) 首相官邸：世界経済フォーラム年次総会出席等 (https://www.kantei.go.jp/jp/98_abe/actions/201901/23wef.html),(2019.1).
- 9) 経済産業省：カーボンリサイクル技術ロードマップ,(2019.6公表, 2021.7改訂).
- 10) 三村知弘, 林幹洋, 萩生大介：CO₂化学吸収プロセスの開発～世界最高の低熱消費量への挑戦～, 新日鉄エンジニアリング技報 Vol.3 (2012).
- 11) 飯島正樹, 高品徹：エネルギー問題とCO₂排出抑制の展望, 三菱重工技報 Vol.41, No.4, (2004.7).
- 12) 飯嶋正樹, 遠藤崇彦, 島田大輔：地球温暖化対策技術としてのCO₂回収技術, 三菱重工技報 Vol.47 No.1(2010).
- 13) RITE 化学研究グループ：CO₂分離・回収技術の高度化・実用化への取り組み, RITE Today 2021, (2021.)
- 14) 山口健一：石炭ガス化プラントにおけるCO₂分離回収技術（物理吸収法）,平成25年度火力原子力発電大会論文集, (2014.4).
- 15) 坂本康一,品田治, 佐々木啓介, 流森文彦, 横濱克彦：IGCC 石炭ガス化複合発電プロジェクトの動向, 三菱重工技報 Vol.52, No.2 (2015).
- 16) 電源開発株式会社：石炭火力からのCO₂分離回収技術 ～究極の低炭素化技術、ただ更なる技術革新が必須～, 次世代火力発電協議会 第二回会合 資料 2-2 (https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/002_02_02.pdf), (2015.6).
- 17) 大崎クールジェン株式会社：大崎クールジェンプロジェクトの概要 (<https://www.osaki-coolgen.jp/project/overview.html>).
- 18) 鈴木正哉：二酸化炭素吸着性能が優れた向き多孔質材の開発 大気圧以上で二酸化炭素を効率的に回収, 産総研 Today(https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2008/pr20081204/pr20081204.html), (2009.4).
- 19) 神尾英治, 吉岡 朋久：日本における膜分離法によるCO₂分離回収技術, 膜 (MEMBRANE), 42 (1), 2-10 (2017).
- 20) 余語克典：二酸化炭素固体吸収材の研究開発動向と RITE の取り組み, 革新的 CO₂分離回収技術シンポジウム (2022.2).
- 21) 野々村洗：東芝がCO₂の資源化開発を加速、光合成を模した「緑の技術」, 日経 XTEC ニュース解説 (<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05470/>), (2021.4).
- 22) Store & Go ホームページ (<https://www.storeandgo.info/>) .
- 23) 株式会社 INPEX, 大阪ガス株式会社：世界最大級のメタネーションによるCO₂排出削減・有効利用実用化技術開発事業の開始について～都市ガスのカーボンニュートラル化を実現する技術の実用化へ～, プレスリリース (2021.10).
- 24) 日立造船株式会社：国内最大となるメタネーション設備の実証運転開始 ～清掃工場からの二酸化炭素を利用したメタネーションは世界初～, プレスリリース (2022.6).

- 25) 建設テック(CON-TECH)のホームページ：あのビル・ゲイツも投資！CO₂をリサイクルする Carbon Cure って？ (<https://contech.jp/carboncure/>), (2020.4).
- 26) 鹿島建設株式会社のホームページ:環境配慮型コンクリート「CO₂-SUICOM® (シーオーツースイコム)」 (https://www.kajima.co.jp/tech/c_eco/co2/index.html#!body_02)
- 27) 旭化成株式会社のホームページ：カーボンリサイクルを実現する旭化成のCO₂ケミストリーのご紹介, (2020.7).
- 28) ふるコネの記事：世界初！ 排ガスから二酸化炭素を取り出す脱炭素・資源循環による持続可能なまちづくり～佐賀県佐賀市～ (<https://furu-con.jp/articles/99>) , (2022.3).
- 29) 環境金融研究機構のホームページ記事：カナダの・カーボン・エンジニアリング社、大気中のCO₂からガソリンを開発、実用化へ道筋。夢の「炭素フリー」燃料、低価格化が見えてきた (<https://rief-jp.org/ct8/80317>) , (2018.6).
- 30) Audi Japan Press Center：アウディとクライムワークス社が大気中のCO₂を回収して地下に貯蔵 (<https://www.audi-press.jp/press-releases/2020/b7rqm000000wlb9.html>) , (2020.9).
- 31) 九州大学のプレスリリース：九州大学と双日、分離膜を用い、大気から二酸化炭素を直接回収する技術と その関連技術の社会実装に関する覚書を締結 (<https://i2cner.kyushu-u.ac.jp/ja/news/8029/>), (2022.2)
- 32) 環境金融研究機構のホームページ記事：川崎重工、大気中のCO₂を直接回収・貯留する「DAC」技術の実証化に取り組み。2025年には実用化を目指す。日本企業のDAC本格取り組みは初めて (<https://rief-jp.org/ct10/120567>) , (2021.12).
- 33) Soichi Kikkawa, Kazushi Amamoto, Yu Fujiki, Jun Hirayama, Gen Kato, Hiroki Miura, Tetsuya Shishido, and Seiji Yamazoe : Direct Air Capture of CO₂ Using a Liquid Amine–Solid Carbamic Acid Phase-Separation System Using Diamines Bearing an Aminocyclohexyl Group, ACSEnviron.Au2022,2,pp.354–362 (2022).
- 34) 日本経済新聞ホームページ：脱炭素へ注目高まる「CO₂直接回収」新材料で高効率に (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC203CM0Q2A520C2000000/>) , (2022.5).
- 35) 野村総合研究所：用語解説 カーボンプライシング(https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/1st/ka/carbon_pricing).
- 36) 佐藤みず紀：カーボンプライシングとは？ 海外と日本の動向、課題を解説, 朝日新聞デジタル, (<https://www.asahi.com/sdgs/article/14650075>), (2022.6).
- 37) 環境省：諸外国における炭素税等の導入状況 (https://www.env.go.jp/policy/tax/misc_jokyo/attach/intro_situation.pdf), (2017.7).
- 38) 環境省：インターナショナルカーボンプライシング活用ガイドライン ～企業の脱炭素・低炭素投資の推進に向けて～ (<https://www.env.go.jp/content/900440896.pdf>) , (2022.3).

ABSTRACT

In October 2020, the Japanese government declared that it aims to achieve carbon neutrality by 2050. With this as an opportunity, decarbonization activities have become an important management issue in all industries. On the other hand, the Ministry of Economy, Trade and Industry is promoting the concept of carbon recycling, which treats CO₂ as a carbon resource and reuses it. In response to these trends, this report outlines trends in CO₂ capture/utilization technology and carbon pricing.

グリーン水素活用の防災機能を有するマイクログリッド

石塚朋弘・加藤敦史・貝塚朋二^{*1}

Micro-Grid with a Function of Disaster Prevention by "Green Hydrogen"

Tomohiro Ishizuka・Atsushi kato・Tomoji Kaizuka^{*1}

高砂熱学工業株式会社は株式会社北弘電社と共同で、太陽光発電を電源とする「防災機能を有する持続可能な低炭素型マイクログリッド」を石狩市厚田地区に設置した。本マイクログリッドは、太陽光発電設備、受変電設備、蓄電池、および水素エネルギーシステム（水電解装置、燃料電池、水素タンク）で構成されている。エネルギーマネジメントシステムで制御される蓄電池と水素エネルギーシステムを組み合わせることで、太陽光発電電力の高効率な活用、および災害時にも最低限必要な電力供給が可能なシステムである。また本マイクログリッドの運営事業を、高砂熱学工業株式会社が100%出資した「石狩厚田グリーンエネルギー株式会社」が石狩市より受注し、今後10年間のマイクログリッドの運営を行っていく。

1. はじめに

東日本大震災や北海道胆振東部地震に伴うブラックアウトなどの自然災害への対策、また、脱炭素社会構築へ向けた再生可能エネルギー（以下、再エネ）の大量導入に伴う電源の分散化などの観点からマイクログリッドへの関心が高まっており、様々な取り組みがなされている。一方、再エネの主要電源である太陽光発電設備は、再エネ特措法により国内で最も普及をした再エネ設備であるが、買い取り単価の下落および系統制約の観点から現在ではその普及スピードが鈍化傾向にある。

この課題を解決する方策の一つとして、高砂熱学工業株式会社（以下、当社）は、石狩市厚田地区において、太陽光発電、蓄電池、水素システムを組み合わせ、これらを制御するエネルギーマネジメントシステム（以下、EMS）を組み込んだマイクログリッド（以下、本システム）を設置した。本報では、本システムの導入経緯、構成の詳細、および運用の方法と予測について説明する。

2. 本システム設置の経緯

石狩市は、北海道中央部日本海に面する南北70kmにわたる自治体であり、平成の大合併において石狩市、厚田村、および浜益村を統合して現在に至っている。厚田地区は石狩市の中央部に位置し、人口約2,000人の地域であり、人口減少が続くなか、地域産業や商店街等の活力低下や、交通・買い物などの日常生活における利便性低下などが課題となっている。また、厚田地区は災害に対するレジリエンス強化が必要な地域であり、停電等に対する住民の不安解消も重要である。石狩市は、低炭素対応、地域活性化、およびレジリエンス強化の観点から、厚田地区へのマイクログリッドの導入を計画し、当社が、2018年5月に北海道が公募した「エネルギー地産地消事業化モデル支援事業」へ応募し、採択された。

同市は、同支援事業内で実施した調査事業を経て、2020年6月にマイクログリッド設置に係る委託事業「石狩市エネルギー地産地消事業化モデル設備導入委託業務」の公募を開始し、当社は北海道で電気工事業を営む株式会社北弘電社と共同企業体を組成してこれに応募し優先交渉権を獲得した。本システムは、

^{*1} 札幌支店営業部 兼石狩厚田グリーンエネルギー株式会社

共同企業体による設備設置、および3カ月程度の試運転を経て、2022年3月末に石狩市への引き渡しを完了した。

3. マイクログリッドの概要

上記の委託事業への応募にあたっては、要求水準書に記載されていた下記の「基本的な考え方」に即したシステムの提案を行った。

- ・再エネ活用による低炭素な地域づくりの推進
- ・複数の設備を組合せた安定的な発電
- ・防災拠点の形成

写真1 にマイクログリッドを形成した地区の航空写真を示す。本マイクログリッドでは、**写真1** 中に記載する5カ所の公共施設に対して一括受電を形成したうえで電力を供給する。グリッドシステムを形成する主な機器の仕様を**表1** に示す。各装置規模は、過去1年間の1時間毎の各施設の電力需要を石狩市から入手し、最大需要が140-160kW程度であることを確認したうえで設定した。

4. システム構成の詳細

本システムは、「防災機能を有する持続可能な低炭素型マイクログリッド」であり、これを達成するために多くの工夫を組み込んでいる。**図1** に本システムの構成を示す。本システムは、太陽光発電設備、受変電設備、蓄電池、および水素システム（水電解装置、燃料電池、水素タンク）で構成されている。EMSで



写真1 マイクログリッドの全景

表1 グリッドシステムの主な機器仕様

設備	仕様
太陽光発電	163.4 kW (PCS 出力 165 kW)
水素システム	水電解装置：1 Nm ³ /h 燃料電池：2 kW 水素タンク：120 Nm ³ (貯蔵圧力 1 MPa 未満)
蓄電池	50 kW / 168 kWh
可搬式蓄電池	12 kW / 40kWh (実運用容量：28.8 kWh)
自営線	高圧・低圧 (自立用含む)、総延長：約 1,200m

制御される蓄電池と水素エネルギーシステムを組み合わせることで、太陽光発電電力の効率的な活用、および非常時の最低限必要な電力供給が可能なシステムとした。

4.1 太陽光発電設備

太陽光発電設備の外観を**写真 2**に示す。太陽光発電設備は、高緯度寒冷地で積雪があることも考慮し、下記のとおり設計した。

- ・ 太陽電池モジュールは単結晶 72 セル 430 W の単結晶高効率モジュールを採用
- ・ 冬期の積雪・風圧などを考慮した強度を有し、パネル下高さが 1,400 mm となる架台
- ・ 発電効率、積雪、コストを考慮し太陽電池モジュールの設置角度は 30°



写真 2 太陽光発電設備

4.2 蓄電池、水素システム

電力の供給は、**図 1**に示すように水素の製造と貯蔵、水素による発電を行う機器群から成る水素システムと蓄電池で構成され、太陽光発電と協調して EMS 等からの指令で機能する。

本システムの果たす役割は、通常時は「再エネ電力の供給による低炭素化への貢献」であり、自然災害等による系統停電時は「防災機能を有する自立電源」である。前者に対しては太陽光発電システム、後者に対しては、蓄電池と水素システムがその役割を担う。実運用時に際しては、昼間は太陽光発電を最大限活用し、余剰分は蓄電池に蓄電し夜間に利用する。蓄電池および水素システムは可能な限り電力および水素を貯蔵し、非常時にこれを活用して指定避難所である「厚田学園体育館」へ給電する。水素システムは定期的な短期運転以外は運転を行わず、水素システム構成機器の「運転時間に伴う性能低下」を低減し、現時点ではまだ高価な水素システム部品の交換頻度を下げ、運用後の費用圧縮に貢献する運用とした。水素システムには、**写真 3**に示す当社が製造・販売している水電解装置「Hydro Creator[®]」を採用している。

また、緊急指定避難場所である「あいろーど厚田」には可搬式蓄電池を設置し、停電時に約 6.5 kW の電力を 3 時間程度供給が可能なシステムとした。なお、可搬式蓄電池はイベント時等に屋外電源として使用することが可能である。

4.3 エネルギーマネジメント

本システムは、低炭素対応のために発電した太陽光発電電力を可能な限り使用することを前提としている。このため、過剰な設備を設置せずに電力不足分は系統から買電する。一方、余剰電力が発生した際は、系統上の制約から逆潮することができないため、システム側、需要側それぞれの発電量や負荷の計測

による電力貯蔵の最大化・最適化が重要となる。必要な計測項目を以下に示す。

「システム側」：①太陽光発電量、②蓄電池による太陽光発電電力平準化、③水素システムの運用

「需要側」：①各需要施設の負荷、②系統からの不足電力量

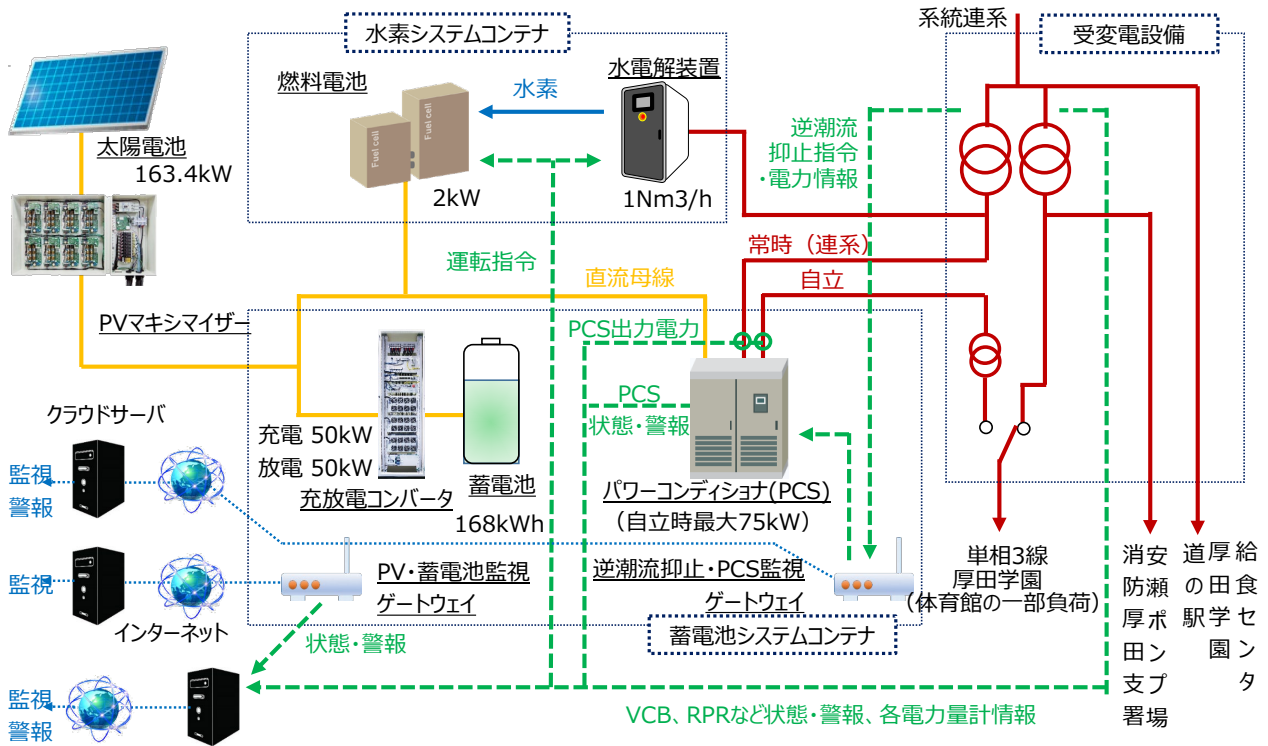


図1 マイクログリッドのシステムフロー



写真3 水電解装置「Hydro Creator®」

このニーズを含め、以下の点を重要ポイントとした EMS の設計を行った。

- ①発電量と需要を監視し蓄電池容量も鑑みて、可能な限り発電した電気を消費・貯蔵する。
- ②太陽光発電電力の効果的な調整、電力貯蔵、および災害発生時の電力供給確保のため、蓄電池容量は原則 50%以上を確保するように運用する。
- ③水素システムは非常時に問題なく稼働できるように月 1 回以上、自動で稼働する。
- ④災害などで停電を感知した際は、通常運転から自立運転へ移行する。
- ⑤日射がない等の太陽光発電電力が供給されない状況においても、自立運転時は 72 時間以上、最大で 3.7 kW の電力供給が可能なシステムとする。
- ⑥日射がない状況が続く蓄電池残量が枯渇した際は燃料電池のみから給電し、日射が回復した際は蓄電池へ充電することで、電力供給を確実に行うシステム制御とする。

4.4 自営線

グリッド内の自営線敷設において、観光客も訪れる地域であることから景観への配慮が課題となった。既設配電線に加え、新たに自営線専用配電柱を設置することは困難であり、地下埋設を検討したが費用的な面から実現性は低いことが分かった。このため、2021 年 4 月より変更になった共架に係る制度（自治体所有電線については既設配電柱への共架可能となった）を活用し、既設系統配電柱へ共架させることを検討した。北海道電力株式会社の協力を得て、グリッド用ケーブルを既設配電柱へ共架することができた。

4.5 サイネージ、監視画面

図 2 にサイネージの設置イメージを示す。本システムの運用状況は、2022 年度以降にシステムの運用を担う運用事業者がモニタリングし、不具合発生時等に迅速に対応できるように設計し、さらに太陽光発電量や CO₂削減量等をサイネージで閲覧できるように設計した。サイネージは「あいろーど厚田」の 2 階に設置し、地域イベントの紹介や、企業 PR 等を差し込むことが可能となるように設計した。

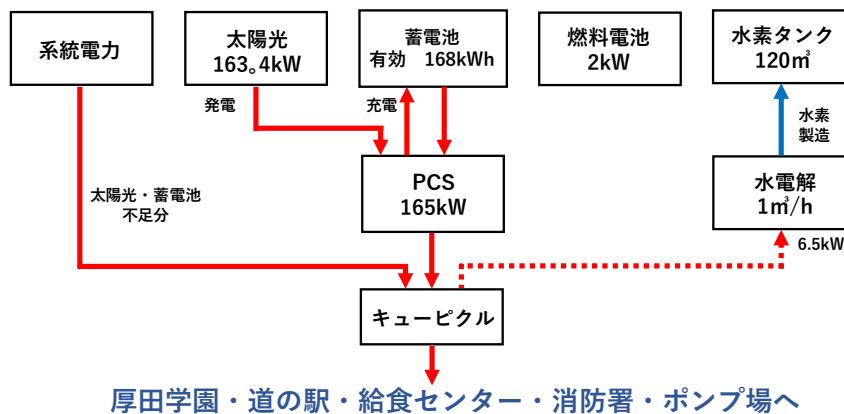


図 2 サイネージの設置イメージ

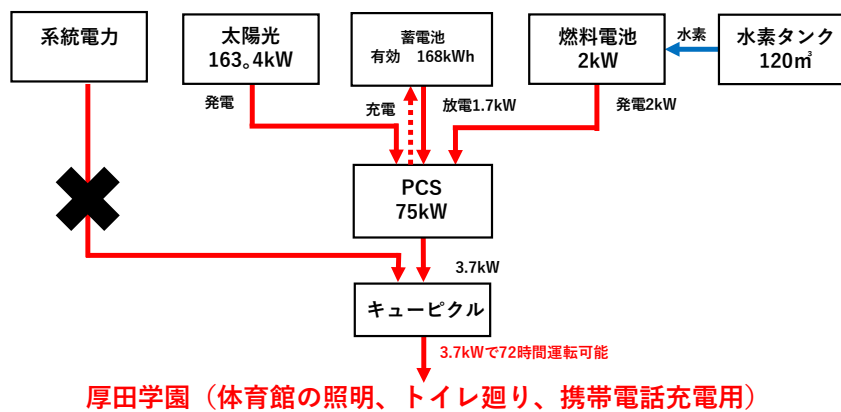
5. 本システムの運用方法

図3に本システムの(a)通常運転、および(b)災害時自立運転での運用イメージを示す。本システムは通常運転時および自立運転時(災害発生時)の運用を変更するシステムとしている。これは、通常運転時と自立運転時の制御を同じとした場合、通常運転の運用を基本とすると、自立運転時に送電する電力が非常に大きくなり数時間で蓄電池および水素が枯渇することになる。本システムでは、蓄電池に最大で168kWhの電力、水素タンクに約150kWh分の水素を貯蔵している。グリッド内の昼間の電力需要は100kW前後であるため、自立運転に移行した後に日射がない場合、数時間で電力供給ができなくなり、防災機能を発揮することができなくなる。一方、自立運転の運用を基本とすると、送電量は最大で3.7kWであるため、通常運転時に必要な電力を供給することができず、グリッドの必要性が発生しない。これを解決するため、本システムでは通常運転時、自立運転時に最適な運用が可能になるようにそれぞれの制御を別に設計することとした。

図3に示すように、通常時は5つの公共施設へ太陽光の電力を供給し、不足分は系統電力を利用する。一方、EMSが一定時間の系統からの停電を感知した際、通常運転から自立運転に移行する。その際、システム内の自家消費を可能な限り削減するために、最低限必要な補器以外への電力供給を遮断し、特定負荷のみに制限することとした。この制御により、自立運転に移行した際①可搬式蓄電池から指定緊急避難場所である「あいろど厚田」の特定負荷(トイレ回り)へ3時間の給電を実施、②蓄電池および燃料電池から指定避難所である「厚田学園体育館」の特定負荷(体育館照明、トイレ回りの照明、および携帯電話充電用コンセント)へ72時間以上の給電を行うことができる。



(a) 通常運転のイメージ図



(b) 災害時自立運転のイメージ図

図3 マイクログリッドの運用方法

6. 本システムの運用予測

本システムの導入にあたり、設置する太陽光パネルの仕様、角度、日射量などから発電量を予測した。表 2 および表 3 に、本システム導入による発電量と使用電力量の予測値と、年間 CO₂削減量の予測値をそれぞれ示す。試算した太陽光発電設備の年間発電量は、設備稼働率を 9.1%と推定し表 2 に示す通り 130,210 kWh/年となった。自家消費電力量および送電ロスなどが 47,790 kWh/年と想定されることから、太陽光発電から需要先へ供給できる電力量は 82,420 kWh/年と予測しており、この場合、CO₂削減量は表 3 に記載のとおり 53 ton/年 程度となる。また、グリッド内全体での使用電力量の 18.4%を太陽光発電から供給できると推定しており、発電した電力の利用率は、蓄電池および水素システムでの余剰電力の貯蔵、利用を行うことにより、90%以上になると試算している。

本システムは 2022 年度 4 月から運用されており、データを積み重ねていくことで、これらの予測値を検証していく。

表 2 発電量、使用電力量の予測

種別	内訳	数値 (kWh/年)
電力量予測 ^{※1}	太陽光発電量	130,210
	システム全体での損失	47,790
	各施設での利用可能電力量	82,420

※1 太陽発電利用率を 9.1 %/年とする

表 3 システム導入効果

	年間 CO ₂ 削減量
商用電力の購入削減による CO ₂ 排出削減効果	53.0 トン/年 ^{※2}
エネルギーの地産地消率	18.4 %

※2 商用電力の排出係数は 0.643 kgCO₂/kWh とする

7. おわりに

本システムの運営は、2022 年 4 月より 10 年間、当社の 100%出資会社である「石狩厚田グリーンエネルギー株式会社」が担っている。本システムを運用していく中で、グリッド運用データ、とくに水素システムの運用に関するデータ蓄積を進め、今後の事業展開に活用していく。再エネを電源とするグリッドシステムの普及を進め、脱炭素社会構築の一助としていきたい。

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering Co., Ltd. and Kitakodensha Co., Ltd. jointly installed a "Sustainable Low-carbon Microgrid with Disaster Prevention Functions" powered by solar power in the Atsuta district of Ishikari City. This microgrid consists of photovoltaic power generation equipment, a power receiving/transforming equipment, a battery and a hydrogen energy system (consisted of a water electrolisor, a fuel cell and hydrogen tanks). By combining a storage battery controlled by an energy management system and a hydrogen energy system, the system enables highly efficient use of solar power and the minimum necessary power supply even in the event of a disaster. In addition, Ishikari-Atsuta Green Energy Co., Ltd., wholly owned by Takasago Thermal Engineering Co., Ltd., has received an order for the operation of this microgrid, and will operate the microgrid for the next 10 years.

高砂熱学イノベーションセンター報 NO.36 2022

発行日 2023年3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

高砂熱学工業株式会社

高砂熱学イノベーションセンター	〒300-2417	茨城県つくばみらい市富士見ヶ丘2-19	☎0297(55)1337
本社	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8212
東京本店	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8221
横浜支店	〒220-8126	神奈川県横浜市西区みなとみらい2-2-1(横浜ランドマークタワー)	☎045(224)1570
関信越支店	〒330-0854	埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-10-16(シーノ大宮ノースウイング)	☎048(637)3500
東北支店	〒980-0811	宮城県仙台市青葉区一番町2-4-1(青葉通パークビルディング)	☎022(227)9552
札幌支店	〒060-0003	北海道札幌市中央区北3条西4-1-1(日本生命札幌ビル)	☎011(261)2531
大阪支店	〒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