

No. **37**

2023

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. 37 2023

目 次

【巻頭言】

2123 年へツナグ (代表取締役社長 小島和人) 1

【寄稿】

新百年後の日本 (早稲田大学教授 田辺新一) 3

「化学工学」は絶滅危惧分野でよいか？ イノベーションを実現するための人材育成に懸念
(東北大学教授 青木秀之) 4

情報・物質・熱・エネルギー・ひと・宇宙・・・高砂熱学次の100年に向けて
(宇宙航空研究開発機構(JAXA)名誉教授 稲谷芳文) 6

高砂熱学と共に創る”みらい都市” (つくばみらい市市長 小田川浩) 8

【創立 100 周年特集】

高砂熱学における技術開発の歩み (佐部利俊和・井上正憲・柴田克彦・谷野正幸) 10

【イノベーションセンター受賞記念特集】

1. 高砂熱学イノベーションセンター 受賞報告 -空気調和・衛生工学会賞技術賞、カーボンニュートラル大賞、ASHRAE Awards 等受賞-
(清水昭浩・相澤直樹・木村健太郎・柴田克彦・大迫孝輔・齋藤雅浩) 30

2. 高砂熱学イノベーションセンターにおける環境・設備計画と実施
(木村健太郎・平原美博・清水昭浩・柴田克彦・小林功・羽島大輔・武藤友香・高椋敦士・金子英宏・牧野内絵理・岡田怜・北澤結人・田辺新一・鶴飼真成・赤司泰義・宮田翔平) 35

【技術論文】

1. エネルギー自立型サステイナブル研究施設 ～竣工 3 年後の ZEB 達成状況の評価と対策～
(清水昭浩・相澤直樹・木村健太郎・羽島大輔・武藤友香・田辺新一) 44

2. 需給予測を用いたエネルギー自立型システムの構築 -長・短期記憶(LSTM)を用いた電力需要予測結果の評価およびケーススタディ-
(高橋利知・松浪佑宜・柴田克彦・川上理亮・高原・宮田翔平・赤司泰義) 52

3. ZERO WATER BUILDING EVALUATION AND CONSIDERATION AT TAKASAGO THERMAL ENGINEERING INNOVATION CENTER
(Kosuke Osako, Uwais Roslan, Katsuhiko Shibata, Naoki Aizawa, Masayuki Otsuka) 59

4. 体育館向け空調システムの開発と実証
(小山尚人・木村健太郎・平原美博) 67
5. 二酸化塩素ガスを用いた安全キャビネット除染方法の評価
(荒川宏樹・高橋秀人・朴民亀・岩堀伸哉・佐々木雄治) 75
6. 電池製造工程におけるロータ式 NMP 濃縮装置の低温再生化
(河岡将行・高橋秀人) 82
7. フィールド試験によるリキッドデシカントユニットの加湿性能の検証
(澁澤朱音・馬場大輔・川上理亮・谷野正幸・三宅友香・前田彩子・原田政利) 88
8. 廃プラスチックエネルギーの高度有効利用
(谷野正幸・増田正夫・鎌田美志・成瀬一郎・堀田幹則・長沼宏・野田英彦・折田久幸・幡野博之・村瀬和典
・小山寿恵・小林佳弘・熊野寛之・森本崇志) 98
9. サーマルマイニングによる月面水採取 (第二報)再凝縮・凝固を考慮した氷レゴリスの伝熱解析
(内田浩基・中田拓司・川上理亮・河南治) 115

【新技術・新商品紹介】

- 50kW 級の高効率マイクロコージェネレーションシステムの開発
(増田正夫・谷野正幸・岡村明彦・大井淳) 125

【開発ストーリー】

- ケミカルワッシャー[®]T-GET[®]シリーズの開発と改良
(岡村典明・井上正憲) 137

【地域貢献への取り組み】

- 高砂熱学イノベーションセンターの地域貢献活動について
(来田昌弘) 143

巻 頭 言

Preface

2123 年へツナグ

代表取締役社長

小島 和人



2023 年 11 月 16 日に当社は 100 周年を迎える事が出来ました。

先輩たちが創始した『空気調和』という事業を今日まで繋ぎ続けられたのは、『技術の高砂』として、事業を通じて社会奉仕を追及し続けてきたことに尽きます。

そして、2020 年に高砂熱学イノベーションセンターを開設して早くも 4 年が経過しました。この間、新型コロナウイルスの世界的な蔓延、ロシアによるウクライナ侵攻、これに端を発したエネルギー価格の高騰など、様々な問題が私たちに直面しました。このように予測が非常に困難な時代ではありますが、そういった時においても、高砂熱学の存在意義を失うことなく、未来永劫に亘って繋ぎ続けていくため、全社員と共に、高砂熱学グループのパーパスを策定しました。

『環境革新で、地球の未来をきりひらく。』

このパーパスのもと、高砂熱学イノベーションセンターでは、「建物の環境を創る」「地球の環境を守る」「新たな環境に挑む」の 3 つの柱で、日々技術開発・事業開発に取り組み、社会・環境への貢献を目指しています。また、立地するつくばみらい市を中心に、「地域社会に貢献する」目的で施設の提供や未来を担うこどもたちの夢を育むしごとをしています。

本報は 2023 年の 1 年間のイノベーションセンターの活動を皆様に詳しく知っていただくための報告集です。さらに今回は、これまで当社の研究開発・事業開発の 3 つの柱と地域貢献の活動で、長きにわたりご指導、ご支援を賜りました先生方に、高砂熱学の次の 100 年に向けたメッセージも頂戴しています。

当社は創立以来『技術の高砂』を標榜し、独自の技術を開発できたのは、「創造的性格」を時代のニーズにあわせて追及してきたからにほかなりません。では 100 年後はどんな技術を創造しているのでしょうか。

建物内にて温湿度だけでなく、CO2 や光、水分までをコントロールし、植物より出される信号とマッチングさせて、植物が欲しい時に効率的な栄養を与えるネットゼロに資するシステムを開発し、温暖化の解決だけでなく、この影響による生物存続の危機や食糧問題もクリアしている

高砂熱学イノベーションセンター報 No.37 2023.

かも知れません。一方で、現在は空調システムに不可欠でありつつも、オゾン層破壊などの影響を与えてきたフロンガスを全く使わない高効率の冷却・加熱技術が、エネルギー問題に貢献するとともに、人体を取り巻く環境の温湿度制御や、様々なモノづくりの場における環境構築の主流になっているでしょう。さらに、月や火星などの宇宙に目を向けると、その存在が有力視されている氷の層から、当社の得意とする熱・流体を活用したサーマルマイニングによって水を取り出し、太陽光発電により水を電気分解して作り出された水素と酸素を利用して、多くの人類が宇宙で快適に暮らしていることと思います。想像するだけでもワクワクしてきませんか。

このような未来は、『技術の高砂』といえども、決して当社グループだけでは創り得ません。目的と志を共有する、様々なパートナーの皆さまと共に進む『共創』でこそ、実現すると信じています。

終わりに、パーパスの実現のために、高砂熱学の原点である『人の和と創意で社会に貢献』を胸に、TakasagoWayの価値観を持って行動し、環境クリエイターとして邁進していくことを祈念して、締めくくりといたします。

【寄稿】

新百年後の日本

早稲田大学 創造理工学部建築学科
教授
工学博士 田辺 新一

Waseda University
Shin-ichi Tanabe



100年後を予測するのは極めて難しいことだ。今から約100年前の1920年（大正9年）に「百年後の日本」と題した特集が雑誌「日本及日本人」の春季増刊に掲載された。1979年に復刻版が出版されている。前路の展望を雪嶺が行っている。雪嶺とはこの雑誌の創刊者三宅雪嶺である。政府の専制主義と欧化主義に批判的立場を取った明治中期のナショナリズムの代表者である。読んでみると興味は尽きない。蒸気に代わる電気、水力、太陽の光熱、地中の熱、飛行機及び潜水艦など技術に関しては現在に通じる議論が行われている。世界における日本を意識した文章が多い。その後、言論人を含めて370名が100年後の日本を予想している。1918～1920年にスペイン風邪の大流行はあったがほとんど触れられていない。大正時代の雑誌であるので、まだ世相は明るく、未来も楽観的に予測している。未来を語るのが楽観的になるのか悲観的になるのかはその時の世の中の状況に大きく影響する。女性の進出を予測した知識人もいた。一方でこの雑誌でよく当たっているのではないかとされているのが、平均寿命の伸び、9割の洋服化、携帯電話やスマホの登場である。まあ、370名が勝手な予測をしているのだから、当たっていることもあるだろう。しかしながら、地球温暖化に関する記述はない。2050年にはネット・ゼロ（カーボンニュートラル）が実現していないと行けないことから考えるとこれから100年後には当たり前になっているはずである。

研究室では「バック・トゥ・ザ・フューチャー」という映画を見て感想を書くようにという課題を出している。1985年の米国のSF映画で、過去に戻るシーンが多いが、第2作で30年後の2015年にタイムトラベルするシーンがある。未来に関する予測について感想を書いて貰っている。映画撮影時の1980年代は日本企業が世界で活躍していたこともあり、日本人らしい上司がテレビ電話で指示を出すシーンがある。また、室温設定をHEMSのようなものを操作して行っている。映画という自由な条件でも30年後を予測するのは至難の業となる。一つ言えるのは、技術は変わっても住宅や建築でそこで行われているすむことや働くという行為は変わっていないことだ。

冷暖房空調の歴史を考えると暖房の歴史に比較して冷房・空調の歴史は浅い。人類が火を使って暖房をするようになったのはおおよそ100万年前といわれている。一方、近代空調の父はウィリス・キャリア（1876～1950年）である。発明年には諸説あるが1902年に露点温度制御が行える空調システムを開発したとされている。キャリア社の創設は1914年で順調な滑り出しであったが、大恐慌、第2次世界大戦で米国での冷房空調普及は遅くなる。高砂熱学工業株式会社初代社長の柳町政之助氏は、日本の空気調和の父であるが、1923年にキャリアによる技術記事を読んで、事務所建物のための冷凍機は遠心式と直感し、国産ターボ冷凍機の開発に着手したとのことだ。また、1934年に我が国ではじめて「空気調和」の用語を使用した。直訳すると空気調整としても良さそうだが調和と訳したところが素晴らしい。室内の居住者の姿が想像でき、100年後も使われているだろう。私の学生時代の空気調和設備の講義は井上宇市先生が担当されていたが、柳町政之助氏のパイオニア精神はよくされていた。

現在は一人の発見や発明が大きく取り上げられる時代は過ぎて複数の分野による社会課題を解決する研究が求められるといわれる。しかしながら、これでは未来は進展しないだろう。日本の苦しい状態は分かるがその対策を教育研究のせいにするのはおかしい。学者が商人風になったりすることを雪嶺は痛烈に批判していた。1920年の「百年後の日本」発刊後、1923年に関東大震災があり、1929年に世界恐慌が訪れ国際紛争に突入していく。地球温暖化、安全保障など悲観的な予測が多いが、未来について百様の意見を忌憚なく語って、パイオニアを出現させよう。

【寄稿】

「化学工学」は絶滅危惧分野でよいか？ イノベーションを実現するための人材育成に懸念

東北大学 大学院工学研究科
教授
工学博士 青木 秀之

Tohoku University
Hideyuki Aoki



2011年、東日本大震災と同年に、関西経済連合会から絶滅危惧分野の一つとして化学工学の名が挙げられました。化学工学分野は19世紀の米国における自動車産業と石油化学工業の発展を契機にMITに講座が設置され、「単位操作」を基盤としてもものづくりを支える学問として発展してきました。2015年、化学工学会では、会員数の減少に危機感を抱き、会誌で「我が国の化学工学教育の今と未来—化学工学の発展を願って—」と題する特集号を組んでいます。中身を要約すれば、『1960年代からの我が国における産業の発展とともに化学技術者の需要が高まり、その人材作成を担うべく、多くの大学に「化学工学科」が設置されました。現在は名称が変更され、「化学システム工学科」と称する大学もありますが、教育の内容が変化しております』とあります。記事から9年が経とうとしておりますが、化学工学教育の環境はますます悪化しているといわざるを得ません。この背景には様々な要因が考えられますが、国からの運営資金の減少による教員確保の難しさが大きな要因の一つと考えられます。教員数の減少は理学部と工学部の融合による理工学科への改組、工学部化学科の「応用化学化」(カリキュラムの上で応用化学が中心となり、化学工学カリキュラムであった「単位操作」を十分に教育せず、概論科目を用意することで内容を圧縮)が考えられます。筆者の属する学科では10科目20単位体制で化学工学に関する講義を2~3年生の段階で受講できるように用意され、学生実験や演習についても質や量を維持して来ましたが、教員数が減少すれば、この体制は維持できなくなることになるでしょう。科目が概論化されれば、範囲を維持したまま掘り下げが不足することになります。工業社会からは、製造業の会社にとって化学工学技術者が必要不可欠であり、プラントの運転・維持・管理や新規プラントの設計を行う上で、欠かせない人材となっています。多くのリクルーターの方々から、化学工学をきちんと学んだ学生を獲得したいとの要望をいただきますが、人材獲得の最前線におられる方々のご意見ですので、上述の通り、化学工学教育の質・量の低下により、素養をもった人材数の減少が進行しているとともに人材育成の重要性がわかります。また、2022年にはセミナー開催・書籍出版会社が、化学工学入門のセミナーの開催を計画するなかで、化学プラント等の「スケールアップ」の概念を、たった1日で理解してもらった講義を依頼されました。この背景には、化学工学人材の不足が工業社会で進行していることを示していると思います。一方で、AIの発展とともにその導入が人材不足を解決できるとして、数年前から工学部・電気情報工学科の倍率が高まる現象が起きました。最近はずしずつ落ち着いてきておりますが、情報系の人気は電気情報工学科の教育カリキュラムの改悪につながらなければよいと考えています。AIを工学分野で活用するためには、まず、AIの展開先で必要となる工学の知識を身に付けていなければなりません。その上でAIを活用することで効率化を図ることができる部分を絞り込み、設計や解析の時間短縮や高精度化を目指すこととなります。最近のAI人気の落ち着きは、このような性質が次第に理解されてきたためと考えられます。大学においては、AI分野に興味のある学生を対象に、専門知識に加えてAIの素養もあわせて修得できる体制の整備が必要となります。さらに、このような社会の変革に対応し、教育・研究を行うことのできる教員が求められます。そのためには、大学が魅力ある職場であることをアピールすることも必要です。

随想のように書き連ねましたが、イノベーションの実現のためには、類い希なるアイデアを創出し、それを実現するリーダーシップと実行力が必要です。さらに随所で先輩や先人たちの知識や知恵が必要でしょう。この知恵や知

識の伝承が、団塊の世代の定年時の問題として取り上げられたことがありましたが、イノベーションは若い世代の、過去に縛られない自由奔放で奇抜なアイデアがあり、それを汲み取って具体化する人材が相まって実現すると考えます。そのときには化学工学エンジニアをぜひチームに入れていただきたいと思います。

高砂熱学工業(株)とのおつきあいは、筆者が大谷茂盛研究室 4 年研究室配属時(1986 年)から始まりました。当時、総合研究所仙台研究室が青葉山の東北大学工学部キャンパス内にあり、研究員の方々が常駐し、電力負荷平準化を目指した氷蓄熱の過冷却解除現象の解明に取り組んでおりました。その後、半導体工場用空気清浄装置内のガス吸収特性の定量化や建築設備用の統合型水素利用システムの開発研究について共同研究を実施して参りました。種々の研究に取り組むことができたことも人材の育成につながりました。また、本学工学研究科・工学部教育院が実施しているトップリーダー特別講義では、2017 年、大内厚会長兼社長（当時）にご講義を賜ったこともございます。浅からぬご縁に感謝申し上げます。

「空気調和」が人を対象としたビルや施設から産業分野に展開する中で、カーボンニュートラルを実現することが求められています。技術の革新は待ったなしではありますが、イノベーションセンターにおける自由奔放で奇抜なアイデアの創出、そして研究開発の発展に期待いたします。

【寄稿】

情報・物質・熱・エネルギー・ひと・宇宙・・・

高砂熱学次の100年に向けて

宇宙航空研究開発機構（JAXA）
名誉教授
工学博士 稲谷 芳文

Japan Aerospace Exploration Agency
Yoshifumi Inatani



高砂熱学創立 100 周年おめでとうございます。次の 100 年を考えるにあたって、新たな環境である「宇宙」の今後を考える視点からみなさまへの期待を申し上げます。

人類の宇宙活動は、第二次大戦後の米ソ冷戦から始まり、相手方に核ミサイルを打ち込む技術から出発して、有人ロケットの技術に進化した。この宇宙競争は 1969 年アポロ計画による人類の月着陸で決着をみて、その後は経済性を目指した 1980 年代のスペースシャトルから、国際共同で行う宇宙ステーションへと発展し、地球周回軌道での持続的な有人活動までに至った。

この間、米露中と日本を含む西側の主要国において、国が宇宙開発を独占して行う状況が続いたが、宇宙を利用した通信や放送などの分野で 1980 年代から民間事業の対象として成長を始めた。現在では宇宙空間を使った高度な情報伝達や、多様な観測技術によって地球や宇宙の情報利用ビジネスへと発展してきた。米国ではスペースシャトルの退役を機に、2010 年代から地球周回軌道への輸送は民間の事業に委ねる政策へと転換した。この結果現在では、多くの輸送ベンチャーが現れ、スペース X に代表される民間ロケットが打ち上げ市場を席卷し、有人輸送も担う状態に至っている。

宇宙の探査や情報を電波や光に乗せて伝える分野では、技術進化の結果、サイエンスの世界で、ビッグバンからの宇宙の進化や、銀河や太陽系の成り立ちなど、人類の知識は飛躍的に拡大した。また宇宙を使った情報通信や測位などの分野では、軍用としてスタートしたインターネットや GPS が民生利用の世界で、我々の生活を一変させた。これらのイノベーションは「情報」すなわちビットという、極めて小さいエネルギーで演算処理や情報伝達するための、半導体や通信やソフトウェアの技術が、1.5 年で 2 倍（ムーアの法則）すなわち 10 年で二桁という進化を 40 年にわたって遂げてきた結果の応用としてもたらされたのである。

これに対して、人間が宇宙空間で生きるための技術や、宇宙に出かけるための輸送の分野では、物質や熱やエネルギーそのものを扱う技術が不可欠である。例えば宇宙用ロケット推進における現実的な性能向上策は、液体水素を燃料とすることで、それ自身は既に実用化されているが、エンジン自身の性能は、宇宙開発の初期の時代から 1-2 割程度向上したに過ぎない。むしろロケットの次の進化の方向性は、輸送コストを桁違いに下げること、使い捨て型から航空機のような高頻度往還運航型への転換と、燃料としての水素の低コスト化が、その鍵であるとされ、地上の水素エネルギー社会の構築における水素利用の一般大衆化との連携が求められている。

また構造材料の分野では、鉄やアルミ合金などの金属材料から、複合材やセラミクスなどの軽量かつ高温に耐える新材料へと進化した。ここでも数倍という程度の進化で、材料の革命という意味では、超伝導材料や桁違いの比強度や熱伝導性を発揮するカーボンナノチューブなどの新材料が期待されるが、まだ実用には遠い。3D プリンタなど製

造技術の進化による、最適設計や低コスト化が期待されるが、これ自身で桁違いの性能には至らない。

すなわち、情報技術の世界とは異なり、物質やエネルギーそのものを扱う分野においては、桁違いの世界を作ることは容易ではない。それゆえにさまざまな工夫やアイデアによって、材料技術や製造技術の進化、および地上の他の分野の活動との連携とともに、高度な熱交換や相変化や化学反応や、電磁力や核エネルギーも含めたエネルギー変換技術やそれらの社会実装などのエンジニアリングの洗練が求められるのである。また、光合成や植物生産や微生物の役割など生物の効果も含め、宇宙で人間の生活空間を創るための、多くの研究開発の余地がある。この辺りにこそ 100 年後の高砂熱学の活躍の場があるだろうというのが以下の議論である。

宇宙ステーションの次のステップは、月や火星への人類の進出と持続的活動であり、その動きは始まっている。そこでは、実体としての人間が、呼吸をし、食物を摂取し、排泄し、居住環境を維持する、というリアルワールドの技術が、まさに死活的に重要となる。また、必要な物資を地球から運ぶのではなく、現地での資源の調達 (in-situ resource utilization) が必須の要件となってくる。人間の生活に必要な酸素、水素、炭素などの月火星現地での調達である。月の極域に存在するとされる水を利用して、その分解により月での物質とエネルギーの閉鎖循環系を作り、人類が持続的に滞在し活動するための空間を創造することや、月以遠や地球との輸送のための燃料供給などという、利用のための基盤を作ることが期待されるのである。

その際、極めて限られた宇宙飛行士や何 10 億円というお金を払うことのできる特別な人たちではなく、一般の人が普通に旅行したり滞在したりするような世界を、何百人とか何万人などという、より大きな規模で経済的に成り立つ事業の形で、巨大なマーケット創出を考えるべきだろう。現状からの発展として、地上における水素エネルギー利用の一般化や、高度で快適な空間創造との相乗効果で、このような自在な宇宙活動の基盤形成を大きな事業規模で考えることは、次の 100 年のよい目標設定となるだろう。

ここで視点を変えて、100 年よりさらに先の未来の出来事を考えてみる。例えば 1 万年とか 100 万年あるいはもっと長い時間のうちには、地球の上ではいろいろなことが起きるだろう。恐竜を絶滅させたとされる小惑星の衝突や太陽活動の変動による氷河期などの変化、あるいは人間の存在の故に引き起こされる温暖化や気候変動など、大規模な異変が起きることは明らかである。その際には、人類のサバイバルという視点で、地球の上で生きながらえることが困難な事態が必ず起きるだろう。何億年以上という時間では、地球はおろか太陽系に人類が現在の状態のままでは存在できないことは、恒星の進化の物理の教えるところによって、必定である。

人類はそこまで生きながらえる前に、別の理由で滅んでしまうだろうし、銀河系を見渡してもそのような文明が存在している証拠もない、との論も一方ではある。仮に人類がさまざまな困難を乗り越えて、その文明を継続させるとすれば、いずれは地球や太陽系を離れて宇宙空間に持続的な人類社会を創るしか方法はない。その第一歩として、地球からもっとも近い月面上に、誰でも簡単に往復することができ、持続的滞在から社会を作るくらいにすることは自在にできるほどの技術力を身につけて、その先で起きる困難な状況に対応できるようにしておくべきではないか、との論もまた成り立つ。どちらの立場に立つか、次の百年でどこまでやるべきか、は自明ではないが、ポジティブなビジョンを持って先んじて行うことに価値がある、と考えるのが前向きだろう。

さて、現在の宇宙活動の延長上で獲得すべき技術と、未来に起きるであろう人類のサバイバルの視点から遡って求められること、の両者の 100 年後の「交差点」で、何をすべきか考えるのがよいだろう。これまでに蓄積された技術を基盤に、月面における水電解実験を手始めとして、「高砂熱学」の環境技術や、脱炭素の文脈で行われる物質とエネルギーの熱交換に関わる技術との親和性は極めて高い。ここで述べた多様な議論の切り口から、桁違いに発達する情報技術を駆使しつつ、地球の上、月面上さらには宇宙空間での人類の持続的活動に向けて、「空間創造」を標榜する「高砂熱学」に相応しい研究テーマや実証課題を抽出できるだろう。

人類の住環境の洗練のための技術の高度化、地球の上での脱炭素から出発して、宇宙でのヒトと物質と熱とエネルギーをマネージする技術と持続的有人活動、自在な移動と輸送、大きなスケールの宇宙の利用、究極には人類のサバイバル・・・の流れの中で、高砂熱学のビジョンを発信し、守備範囲を広げていく 100 年として、発展されることを期待します。

【寄稿】

高砂熱学と共に創る”みらい都市”

つくばみらい市
市長 小田川 浩

Tsukubamirai City
Hiroshi Odagawa



高砂熱学工業株式会社様が創立 100 周年の記念すべき節目を迎えられましたことを、心よりお祝い申し上げます。

高砂熱学工業様とつくばみらい市のあゆみが始まったのは、2020 年 8 月 5 日のことでした。この日、「「みらい都市」の実現に向けた包括連携協定」を締結し、「教育」「防災」「コミュニティ」「エネルギー」の4つの分野において連携し、脱炭素社会の実現や、社会課題の解決に向けてともに取り組みを進めていくこととなりました。

いきさつを振り返ると、高砂熱学工業イノベーションセンターがまだ構想段階であったところに、ご担当者の方から「地域貢献に携わりたい」とのお話を頂戴したことが協定締結のきっかけであったと記憶しております。

つくばみらい市には「つくばエクスプレス」の「みらい平駅」が立地し、高砂熱学イノベーションセンターが立地する「みらい平地区」では人口増加が進み、子育て世代を中心とした新たな賑わいが創出されているほか、工業団地やスマートインターチェンジの整備など、新しいまちづくりを進めています。

一方でそれに比例する形で、地域課題の複雑さは増していると感じています。加えて、地球温暖化に伴う気候変動により災害が激甚化していることから、市民の安全・安心な生活を今後も守り続けていくためにはどうすべきか、そして、脱炭素に向けた取り組みをどの様に推進していくのかなど、幅広いテーマにおいて課題が山積していると日々痛感しています。

これらの課題解決には、行政が主体となり取り組むことは当然ですが、専門的な知見と高度な技術を持つ企業の皆様と連携することで早期の課題解決に繋がり、さらに付加価値が加わると考えています。その中で、空調による環境革新に取り組む高砂熱学工業様と連携を図れることは、当市にとって大きな幸運でした。協定式当日、高砂熱学工業様と歩む未来への期待感に胸を膨らませたことを、昨日のこの様に覚えております。

協定項目が4つの分野に跨ることは先に触れましたが、ここで各分野の取り組みについて簡単に紹介します。

まず教育分野では、子どもたちの環境問題や持続可能なまちづくりへの意識醸成に取り組むべく、小中学生の夏休み自由研究に、新たに「高砂熱学環境クリエイター賞」を設けて頂いたほか、SDGs に関する出張授業などを企画して頂いているところです。

防災分野では、災害発生時の市民の安全な暮らしの維持を目的とした取り組みを行っており、災害時避難所用空調ブースを寄贈して頂いたほか、富士見ヶ丘小学校を実証実験の場として、体育館空調システムの開発を行ってまいりました。

コミュニティの分野では、地域コミュニティの形成を目的として、2021 年から高砂熱学イノベーションセンターを会場に「たかさごマルシェ」を定期的で開催し、地域交流の活性化に取り組んでいます。

エネルギーの分野では、脱炭素社会の実現に向け、専門的な知見を持つ高砂熱学工業様から市が取り組むべき施策への助言や、当市環境保全審議会への委員参加、市内公共施設への太陽光設備導入のポテンシャル調査などを行って頂いているところです。

とはいえ、全てが順風満帆に進んだ訳ではありません。各分野において様々な魅力的なアイデアが出され構想は

進んでいくものの、新型コロナウイルス感染症拡大により様々な社会活動が制限されるといった苦しい状況もありました。そのような状況下でも、取組を1つずつ実現させていくことができたのは、高砂熱学工業様がこれまでの100年間で培ったパイオニア精神の賜物であったと強く感じており、その気概を肌に触れて学べたことも、この連携の成果であったと断言できます。

そして、いずれの分野の取組も、高砂熱学工業様の高度な知見と、イノベーションセンターが持つ機能を最大限発揮するもので、まさにこの連携でしか成し得ない内容です。また、これらの取組が評価され、総務省主催の「令和4年度ふるさとづくり大賞」において「地方自治体表彰（総務大臣表彰）」の受賞に到りました。

世界情勢が混迷を極め、地球温暖化による気候変動、そしてそれが引き起こす災害の激甚化など、次の100年はこれまで以上に困難な100年であろうことかと思えます。この様な中で、「環境クリエイター」というヴィジョンを掲げる高砂熱学工業様の役割には、日本のみならず世界中が注目しているところです。その役割において、高砂熱学工業様とつくばみらい市との連携の内容が、何か世界のために役立てて頂けるようなことがあれば、市としてこの上ない喜びであります。

高砂熱学工業様が世界の期待に応えながら、次の100年で更なる飛躍を遂げられることを祈念し、お祝いの言葉といたします。

高砂熱学における技術開発の歩み

佐部利俊和・井上正憲

柴田克彦・谷野正幸

Progress of Technology Development at Takasago Thermal Engineering since Establishment 1923

Toshikazu Saburi・Masanori Inoue
Katsuhiko Shibata・Masayuki Tanino

高砂熱学工業は 2023 年に創立 100 周年を迎えた企業である。1923 年の創立以来、当社は多くの施設の空調設備の設計・施工を行ってきた。これまで、顧客や社会のニーズに対応するために、技術開発を継続し、新しい商品と顧客価値を提供してきた。本報では、当社における技術開発体制の変遷、および主な技術分野における技術開発の歩みについて紹介するとともに、未来に向けた技術開発について提言を行う。

1. 技術開発体制の変遷

当社は 1923 年（大正 12 年）の創立以来、空気調和設備のパイオニアを自負し、自らの設計・施工の経験をもと「空気調和技術」の確立・発展に寄与してきた。さらには、時代と共に変化する顧客や社会のニーズをタイムリーに捉えた技術開発を行い、事業を展開してきた。ここでは、これまでの 100 年の歴史における技術開発体制や施設整備の主な変遷について紹介する。

1923 年に、前身の高砂工業の煖房工事部の在籍人員がそのまま移籍し、高砂煖房工事株式会社として創立した。社員 23 名のうち技術系 14 名の体制で、それぞれが開発・設計・施工の全ての業務を担当していたと思われる。当時は、米国や欧州から輸入した機器類が多く、国産化が待ち望まれていた。このような背景のもと、当社は国内メーカーとも連携しながら、高砂荏原式ターボ冷凍機をはじめとする様々な機器やシステムの開発・設計・製造に関わってきた。創立以来「技術の高砂」を標榜し、「ないものは、自分たちで創る」という当社の企業風土は、この頃から育まれてきたものと思われる。

1962 年（昭和 37 年）には、初めて本社組織に研究開発を専門的に担当する技術企画部を設置した。当部は各店と協力して、これまで個人や各支店に蓄積されてきた固有技術を全社的に統一・標準化し、**図 1** の様な「施工規格」「設計基準」として各店へ配布した。併せて、米国や欧州の先進技術や新商品の調査研究も精力的に行っていた。

1968 年（昭和 43 年）には、仙台技術研究所（後の仙台分室）を設置し、隣接する東北大学と連携して技術開発を行ってきた。ここでは、伝熱に関する基礎的な実験研究、海苔や牧草の乾燥装置の開発、松茸の人工栽培の研究など、様々な研究や技術開発にチャレンジしていた。**図 2** に当時の仙台技術研究所での実験風景を示す。



図1 施工規格・設計基準¹⁾



図2 仙台技術研究所の実験風景¹⁾

続いて1971年（昭和46年）には、厚木技術センター（後の厚木実験所）を設置し、海水冷却塔の性能試験、噴霧乾燥装置の試験、高炉送風除湿装置の研究など、産業用機器の技術開発に取り組んだ。

1984年（昭和59年）には、同業他社に先駆けて厚木実験所の跡地に、本格的な研究開発施設となる総合研究所（後の技術研究所）を建設した。併せて、技術開発体制の整備も行うことで、幅広い分野の技術開発に取り組み、空調業界の先駆けとなる様な新商品・新技術を創出してきた。

そして、2020年に創立100周年記念事業として、茨城県つくばみらい市に共創による新事業の創出を目指した高砂熱学イノベーションセンターを建設し、技術開発体制の更なる強化を図った。本施設では、従来からの技術開発分野に加え、カーボンニュートラルに寄与する技術開発や、カーボンニュートラル事業の展開体制の強化を図った。図3～4に総合研究所、高砂熱学イノベーションセンターの全景を示す。

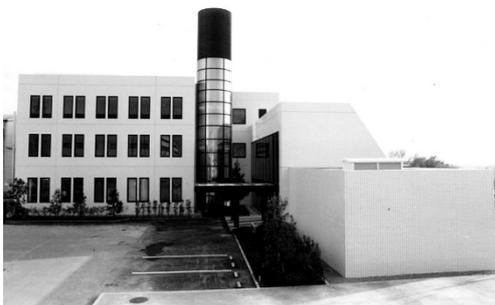


図3 総合研究所(厚木市)¹⁾



図4 高砂熱学イノベーションセンター(つくばみらい市)²⁾

2. 主な技術分野における技術開発

ここでは、当社の主要な技術分野における技術開発について紹介する。具体的には、クリーン化技術、温湿度調整技術、水処理技術、気流制御技術、設備の運用・制御の最適化技術、熱源関連技術、およびエネルギー貯蔵技術に関する開発の歩みである。

2.1 クリーン化技術

本項では、電子デバイス製造用クリーンルームに関するクリーン化技術の歩みを中心に紹介する。

1960年代は国内におけるクリーンルーム黎明期であり、当社もいち早く米国の先進技術やノウハウなどを学びながらクリーンルームの設計・施工技術を獲得していった。1963年（昭和38年）には、クリーンルームの清浄度規格として米国連邦規格（FED-STD-209）が制定された。そして1968年（昭和43年）、当社として初めてクリーンルームの設計・施工（日本電装株式会社、現株式会社デンソー）を行った。本施設はIC回路の研究用施設で、クラス100を含む4室を設計・施工した。当時は半導体の製造工程の知識も乏し

く、顧客とのコミュニケーションを重ねながら苦勞して設計図を完成させた。以降、精密機械・電子部品製造、製薬、病院などの施設でクリーンルームの建設が増加していった。図 5 には高砂層流クリーンルームの内部を示す。さらに 1975 年（昭和 50 年）には、本社別館 1 階（旧御茶ノ水本社）に図 6 に示す様な常設のショールームを開設し、クリーンルーム機器やプレハブ型クリーンルームを展示し、積極的に顧客開拓を行った。

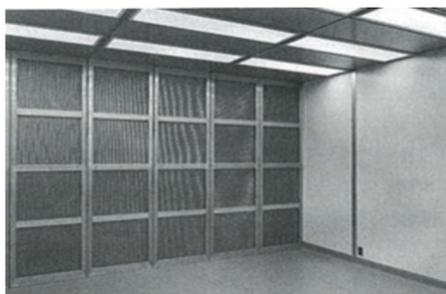


図 5 高砂層流式クリーンルーム¹⁾



図 6 本社別館の CR ショールーム¹⁾

1980 年代に入ると、クリーンルームの建設が相次ぎ、その規模も大型化していった。当社は図 7～8 に示す様な、自社開発のファンフィルターユニット (TFFU[®]) やタカサゴ多目的クリーンルーム (TCR Super MP[®]) といったクリーンルーム商品を開発し市場投入した。同時に半導体製造などの歩留まり向上を目的とした粒子汚染制御が要求されていたため、気流制御技術の蓄積や静電気対策用のイオナイザー (IRISYS[®]シリーズ) の商品開発も並行して行った。

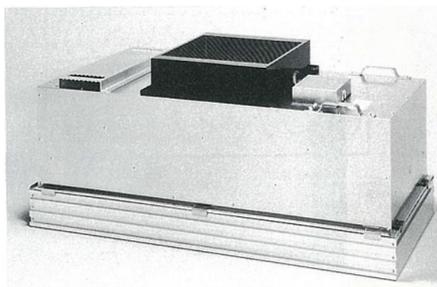


図 7 ファンフィルターユニット(TFFU[®])¹⁾



図 8 高砂多目的クリーンルーム(TCR Super MP[®])¹⁾

1990 年代に入ると、クリーンルームでの要求が粒子汚染制御に加え、ガス状物質などによる分子汚染制御へと変わってきた。この様な背景より、当社においても開発テーマの見直しを行い、クリーンルームの空気循環系ではケミカルフィルタ (TIOS[®]シリーズ)³⁾、外気導入系では図 9 に示すケミカルワッシャー[®] (T-GET[®]シリーズ)^{4,5)}の開発・市場投入を行い、顧客ニーズに応じてきた。併せて、クリーンルーム構成材からの脱ガス放出に関する評価⁶⁾を行い、データベース化することで脱ガスに配慮したクリーンルーム設計を支援した。

2000 年代以降は、製造環境の局所化 (ミニエンバイロメント) が進み、生産装置内部でのクリーン化が行われるようになってきた。そのため、クリーンルームへの清浄度要求は大きく緩和された。この様なニーズの変化に対応するため、当社は生産装置向けのクリーンドライエア供給装置 (CDASS[®]シリーズ) の開発を行い商品化した。また、クリーンルームシステムとしては、生産装置の周囲空間 (設置高さ程度まで) のみをクリーン化することができ、極めて省エネルギー性能が高い TCR-SWIT[®]を商品化して展開を進めてい

るところである。図 10 に TCR-SWIT[®]の導入事例⁷⁾を示す。

これまで紹介した様に、当社におけるクリーン化技術は、顧客ニーズの変化にタイムリーに対応した商品を開発し、改良を継続することで、市場での競争力を維持してきている。



図 9 ケミカルワッシャー[®] T-GET[®]



図 10 TCR-SWIT[®]の導入事例⁷⁾

2.2 温湿度調整技術

温湿度調整は空調において基本となる技術であり、特に除湿環境や恒温環境は産業分野での特殊な製造環境として要求される場合が多い。ここでは、電池産業向けのドライルーム[®]用除湿機および IC 製造用露光装置向けの恒温チャンバーの開発の歩みについて紹介する。

1923 年の創立時より、繊維工業に代表される工場空間の温湿度調整には、専らエアワッシャーやエロフインヒータが用いられていた。1960 年代に入ると当社は新規分野として産業用除湿機に注目し、1970 年（昭和 45 年）には除湿装置メーカーの東亜工業株式会社から湿式除湿装置の製造販売に関する営業譲渡を受ける契約を締結する。さらに、1972 年（昭和 47 年）には除湿分野の補強を図るために、乾式除湿機（吸着ローターを内蔵）の技術を持つ株式会社バーナー・インターナショナルと販売契約を結び、除湿機技術の蓄積とシステム開発を行い、着々と実績をあげていった。

そして 1982 年（昭和 57 年）には、電池材料製造のためのドライルーム[®]を初めて納入した。要求される室内露点温度が -30°C であったため、2 段式乾式除湿機を用いて対応した。実績の増加とともにドライルーム[®]用の除湿機技術が社内に蓄積され、1997 年（平成 9 年）には図 11 に示す様な当社独自の省エネ型除湿機 WINDS[®]の開発に結び付き、以降 WINDS[®]シリーズとして商品のラインナップを増やし、ドライルーム[®]の受注に貢献してきた。

2021 年には、これまで除湿機開発で培った吸着ローターのハンドリング技術を活用し、図 12 に示す様な有機溶剤回収用のクローズド VOC 回収装置の開発を完了し、商品展開を行っている。本装置は吸着した有機溶剤を回収し、精製後に再利用することが出来るため、資源循環が可能な環境性の高い装置として評価⁸⁾されている。



図 11 省エネ型除湿機 WINDS[®]



図 12 クローズド VOC 回収装置⁸⁾

一方、IC 製造における高集積化が進むにつれ、特に露光プロセスでは清浄度の高い環境に加えて、温度変化の無い恒温環境が求められるようになった。当社は、1975 年（昭和 50 年）に、**図 13** に示す様なクラス 100、温度変動 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内を保証する恒温クリーンルームを「サーマルチャンバ[®]」と称して開発し、翌 1976 年（昭和 51 年）に 1 号機を日立製作所武蔵工場へ納入した。以降 1980 年（昭和 55 年）までに 100 台を超える販売を行った。1985 年（昭和 60 年）には商品事業部が新設され、「サーマルチャンバ[®]」や前年に開発したタカサゴ多目的クリーンルーム「TCR Super MP[®]」などの販売を行った。当事業部は独立組織として、当社で開発した機器の営業からアフターサービスまでを担当していた。

さらに 1990 年（平成 2 年）には、**図 14** に示す様な対象空間における温度変動 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 以内、温度分布 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 以内に制御することを可能とした「スーパーサーマルチャンバ[®]」を開発し、販売を開始した。当時、超 LSI の製造工程（露光工程）では、ステッパー（縮小投影露光装置）が大きな役割を果たしていたが、このステッパーが行う位置合わせの精度は、周囲の温度変動や温度分布による空気密度のゆらぎに左右されると言われていた。この開発では、独自開発の熱交換量調整装置や空気混合攪拌装置、送風機モータの冷却など、総合的な対策により従来機に比べて大幅に温度制御性能を高めることを実現した。

しかし、1992 年（平成 4 年）には競合他社の参入などで、ビジネスとしての旨味が減ってきたこともあり、サーマルチャンバ[®]の製造販売を中止することになった。以降、開発を通じて培った恒温技術は類似物件などで活用されている。



図 13 サーマルチャンバ[®]の調整風景¹⁾

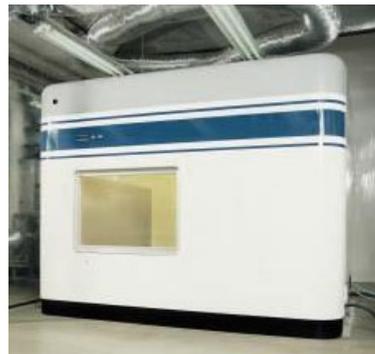


図 14 スーパーサーマルチャンバ[®]外観⁹⁾

2.3 水処理技術

当社の水処理関連技術の開発は、1970 年代の噴霧乾燥技術を用いた汚泥乾燥装置の開発、1987 年（昭和 62 年）の磁気ディスクや VTR 用磁気ヘッドなどの切削水用の磁気濾過装置「MAGCATCHER」の開発、1997 年（平成 9 年）のグリーストラップ「バイオマックス」の共同開発など、散発的に行われていた。

2000 年頃から水の循環利用技術の構築を最終目標として、本格的かつ組織的に取り組みを開始した。ここでの技術開発は、物理的処理技術と生物処理技術を中心に行われた。2010 年（平成 22 年）には、海外の水資源が不足している地域での水の再利用を目的とした電気透析水処理技術を開発した。翌 2011 年（平成 23 年）には、活性汚泥処理においてバルキング障害防止・処理水量の増加・汚泥の減容化を狙ったオゾン利用排水処理システムを開発した（**図 15** は開発時の実験風景）。2013 年（平成 25 年）には、配管施工後に行う管内洗浄時の洗浄水を浄化することで、排水自体を無くすことができる「排水レスフラッシング[®]工法」を開発した。**図 16** に同工法で用いるフラッシング水の浄化装置を示す。さらに 2014 年（平成 26 年）には、使用済み RO 膜を再利用することを目的とした RO 膜洗浄リサイクルサービスを開発した。当社での水処理に関する開発技術の中には、コスト優位性や市場性の面で上市に至らなかった技術も幾つかあるが、当社における水処理技術の蓄積は着実に進んできている。そして、一部の商品やサービスはグループ会社などを通じて現在も顧客への提供を続けている。



図 15 オゾン利用排水処理システムの実験風景



図 16 排水レスフラッシング®工法で用いる水浄化装置¹⁰⁾

2.4 気流制御技術

ここでは、当社が携わった気流制御技術の変遷を主に一般空調の事例で記す。図 17 は、震災後三越本店の修築に際して建設された 1927 年（昭和 2 年）竣工国内初の温湿度調整装置を施した収容人数約 650 名の劇場である¹¹⁾。空調の吹出口を図 18 に示す。左右壁面の上部に設けられた吹出口は、内装に善美を尽くし壮麗目を醒ましめると当時表現された意匠に引けを取らない美しさである。以降、今日に至るまで気流制御は居住空間の上部から吹き降ろす混合かく拌方式が主流となっている。ちなみに、観客席の上部に吹出口があるもののダクトと吹出口の風速を極端に遅くすることで、特別の消音を行わなくとも差し支えなかったようである。

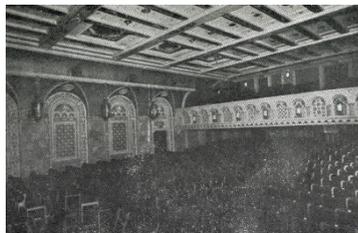


図 17 三越呉服店演芸場¹¹⁾

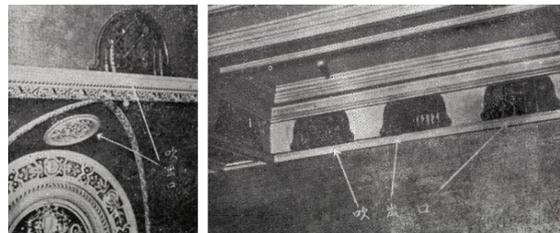


図 18 壁面上部の吹出し口¹¹⁾

ところで、冷房においては自然対流により熱プルームが発生することから、居住空間の下部から冷気を供給する方式が利にかなっている。特に、事務所ビルの 10 倍以上の顕熱負荷が発生する電算機室では、逸早く床吹き出し方式が採用された。図 19 に電算機室用空調気流方式の分類を示すとおり、床吹きの有無で大別される¹²⁾。この文献は、ASHRAE ガイドライン¹³⁾にも引用されていることから、分類の原型と思われる。以降、現在に至るまで電算機室の空気気流方式は、床下プレナムチャンバーから居室に吹出す床吹き出し方式が主流である。なお、ラック列が整然としホットアイルが区画されているデータセンターでは、後述の壁吹き方式が導入され始めている。図 20 に電算機室用空調の代表例を示す¹⁾。ここでは、床吹き出し方式と天井吹き出し方式を併用し、信頼性の面で設備機器、配管とも 2 ウェイバックアップシステムを採用、また当社開発の設備診断システム（後述の SIGMAT[®]シリーズ）を導入した。

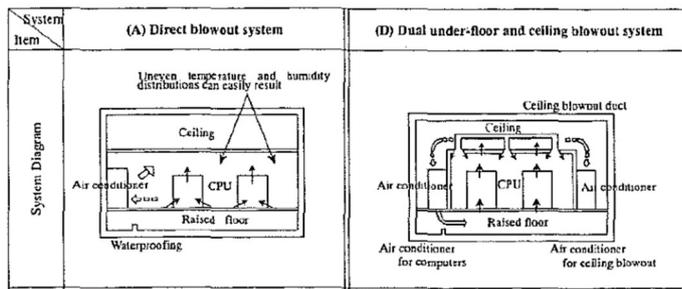


図 19 電算機用空調方式の例(1967 年)¹²⁾

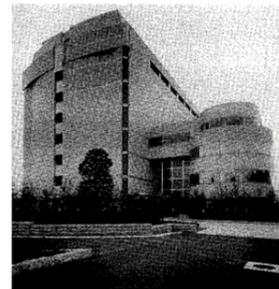


図 20 全信連厚木システム開発センター¹⁾
(現 信金中央金庫システム開発センター)

大型電算センターの開設は、オフィスの IT 化を推進した。この時ブームとなったのが 1983 年（昭和 58 年）アメリカ・コネチカット州ハートフォードに建てられたシティプレイスを始めとするスマートビル、日本ではシェアテック社が唱えたインテリジェントビルである。当社では、1984 年（昭和 59 年）東京六本木の日本アイ・ビー・エム本社 6 階のモデルフロア工事ほか、数々の施工を展開した¹⁾。インテリジェントビルの出現は、空調方式を進化させたエポックといえる。特に、①空調ゾーンのモジュール化とそれに伴う個別分散化、②OA 機器による局所的発熱と空間を共にするペリメータの環境向上、③フリーアクセスフロアの導入、は執務室に水配管を持ち込まないオールエアー方式の導入を促進させた。

オフィスビルへの床吹き出し方式の導入は、1986 年（昭和 61 年）竣工の香港上海銀行を皮切りに 1989 年（平成元年）竣工のイトーキのショールーム、1990 年代に入ると熱効率の良さから大江戸博物館や六本木ヒルズなど天井高の高い空間に導入されてきた。当社も床下有効高さ 100mm の低床対応という特徴ある床吹き出し空調システム LUFT[®]を開発した^{14),15)}。図 21 に LUFT[®]採用案件で実施した性能検証の様子を示す¹⁶⁾。奥行き長い変形のプレナムチャンバーにて冷気が端部まで到達し、均一に給気できることを確認している。また、床上 250、750、1250mm の位置に模擬発熱負荷の提灯を取り付け、熱プルームを再現させている事も記しておきたい。その後、個別空調対応として吹き出し口に可変風量機構を設けた LUFT[®]-VAV へと進化させている¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。

当社技術を実在物件に導入する際には、試運転段階および運用段階での検証が欠かせない。図 22 に示す事例は、3 方の壁面に配置したパンチングパネルから緩やかに空調空気を供給する大型精密機械組み立て工場での検証の様子である。模擬負荷には、養生シートで大型精密機械を模倣し、内部に石油ストーブを設置した²⁰⁾。

本節の最後に壁吹き出し方式の事例を紹介する。床吹き出し口の開発で獲得した旋回ベーン技術の壁面に応用し、従来の置換空調用吹き出し口に比べ表面積を 1/3 に小型化した旋回流誘引型成層空調システム SWIT[®]を開発した¹⁵⁾。図 23 に床上 7.5m までの空間を恒温、低気流速を実現した事例を示す²¹⁾。SWIT[®]は換気効率の良さを活かして、清浄度レベルの比較的緩やかなクリーンルームへと展開している²²⁾。また、壁吹き出し方式は先述の電算センターにも応用し、図 24 に示す送風動力を従来の 1/3 に低減できる IDC-SFLOW[®]を開発導入した^{15),23)-26)}。

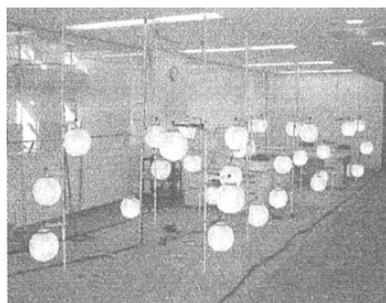


図 21 床吹き出し空調システムでの検証事例¹⁶⁾

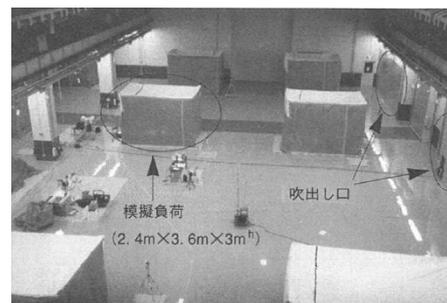


図 22 壁吹き出し空調システムでの検証事例²⁰⁾



図 23 旋回流誘引型壁吹出方式²¹⁾



図 24 データセンターの壁吹出方式²⁶⁾

2.5 運用・制御の最適化技術

1983年（昭和58年）経営計画「新事業・新技術の基本的方向について」では、熱工学および流体力学に理論的根拠を置く「熱と物質の移動」の基軸技術に加え、新しい電子工学に裏付けされたインテリジェント・コントロール・システム技術を第二の基軸技術とし、開発に注力してきた¹⁾。

当時の開発を牽引した基盤技術と言え、8ビットマイコンとトランジスタ・インバータである。図25にザイログ社の8ビットマイクロプロセッサ Z80 を搭載した制御ボード²⁷⁾を示す。このボードは、PLC(Programable Logic Controller)が無い時代に、狙いの動作で自動制御を行うため設計から試作まで当社独自で開発したものである。また参考として図26にトランジスタ・インバータ使用したインバータ装置を示す。これらの基盤技術は、制御機器メーカーがまだ取り組んでいなかった「回転数制御」を用いた省エネ運転システムの開発につながった。さらに、急速に普及が進んでいた PC に当社独自のソフトウェアを組込み、システム化技術として TIS 商品を開発した。図27に TIS 商品のシリーズを示す^{1),27)}。

- ① SECTA[®]シリーズは、省エネ運転と省力化のための自動制御システムである。制御基盤と AI/AO、DI/DO ボードを筐体に組込んだ通称「青箱」と、インバータ装置、通信ユニットで構成されている。
- ② DELTA シリーズは、微小変量を意味するデルタからネーミングされた。1980年代パイオセーフティ設備への高まる要望に応えるため、室圧の高精度制御を逸早く開発している。このラインナップには、給気風量と排気風量のバランスから隣接する室間差圧を一定に保つ微小差圧制御、気密仕様の耐圧チャンバー内の圧力を一定に保つ絶対気圧制御がある。
- ③ SIGMAT[®]シリーズは、総和、集積を意味するシグマからネーミングされた。

この時期、設備規模の拡大と機能の高度化、システムの複雑化が進展し、設備管理は従前の技の練達では対応し切れなくなっていた。当社では、計測とシミュレーション技術、人工知能技術を駆使して設備のエネルギー管理、機器の異常検知、保全管理などのシステム商品をラインナップした。



図 25 マイクロプロセッサ搭載の制御基盤²⁷⁾

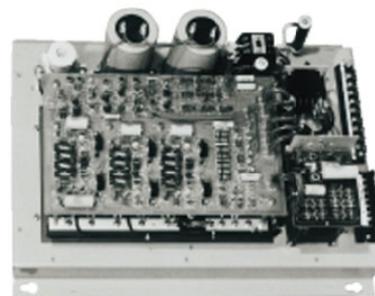


図 26 トランジスタ・インバータ搭載の電源基盤の例²⁸⁾



図 27 TIS(Takasago Intelligent System)シリーズ^{27),29)}

次に、通信ネットワーク関連の技術開発を紹介する。2000年代になると、プラント設備で導入されていたオープンネットワークが業務用設備にも導入され始めた。先駆けとなる後楽森ビルで LonWorks の特質を経験した当社は、国内最大規模のオープン型ビルオートメーションシステムをシステムインテグレータとして纏めた。図 28 に六本木ヒルズ森タワーの空調中央監視システムを示す。各ネットワーク階層でオープン化技術を採用している。当時は汎用のゲートウェイが無かったため、機器メーカーと開発し導入してきた^{15),30)}。

最後に、TIS 商品の開発を第 1 ステージとすると、後継機開発の第 2 ステージ、近年の第 3 ステージについて紹介する。

第 2 ステージでは、データ収集・分析技術として 2005 年（平成 17 年）にデータ収集分析ツール GODA^{®15)}、計測+解析+評価のトータルシステム MAT[®]を開発した³¹⁾。統合制御技術として 1997 年（平成 9 年）インバーターボ冷凍機の利用を始まりとして熱源の最高効率を目指した高砂型統合熱源システム³²⁾、2006 年（平成 18 年）搬送動力の省エネを目指した分散ポンプ式空調用水循環システム GLIP^{®33)}、2008 年（平成 20 年）設備全体最適化を目指した最適運転制御システム E-CONtrol³⁴⁾を開発した。また、高精度制御技術として 2008 年（平成 20 年）微差圧制御システム LO-VST^{®35)}を開発し、バイオ・製薬関連施設に納入した。近年の第 3 ステージでは、ハードに付随するソフトの開発に取り組み 2015 年（平成 27 年）VAV 高速給排気管理システム i-Fume^{®36)}、およびソフトを汎用のパッケージ化した i-Fume^{® mini}³⁷⁾を開発した。現在では、AI を活用した GDoc[®]シリーズ³⁸⁾や EMS³⁹⁾の開発に取り組んでいる。

本節のまとめとして、運用・制御の最適化技術で開発してきたシステムの系譜を図 29 に示す⁴⁰⁾。

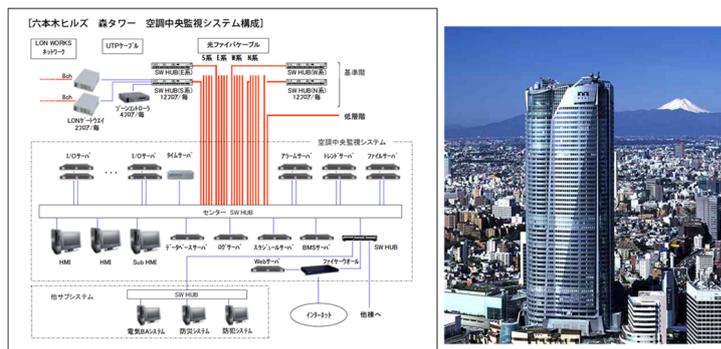


図 28 オープン化ネットワークへの取組³⁰⁾

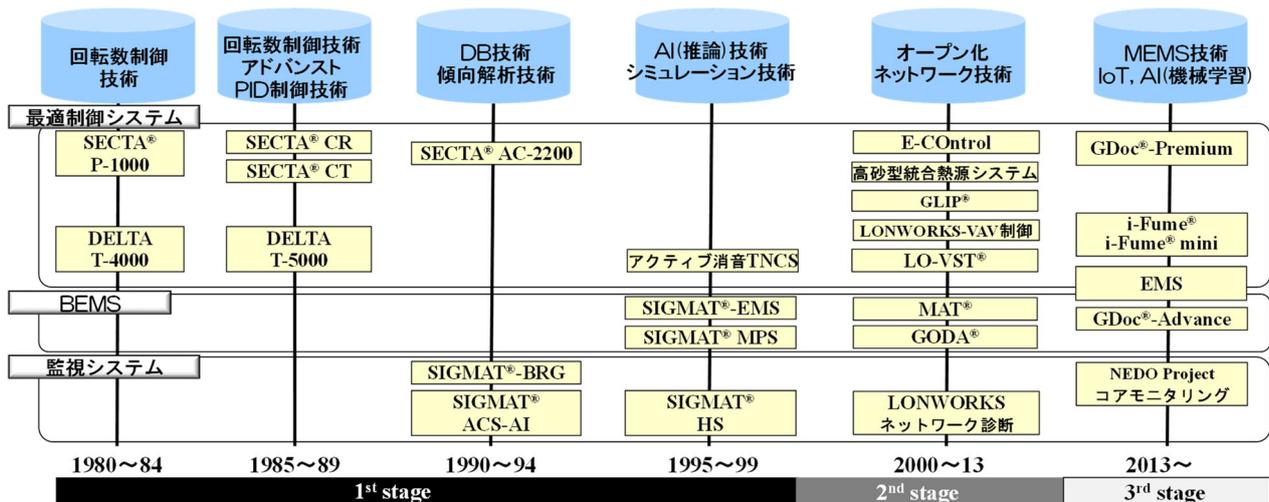


図 29 運用・制御の最適化技術⁴⁰⁾

2.6 熱源技術

1930年（昭和5年）、高砂熱学工業と荏原製作所の協働によって、我が国で最初のターボ冷凍機（遠心式冷凍機）の試作機が完成した。この国産第一号のターボ冷凍機は、**図 30**のように高砂荏原式ターボ冷凍機⁴¹⁻⁴³⁾と命名され、百貨店、劇場、紡績工業などの多くの空気調和設備として導入された^{1,11,41-46)}。1931年（昭和6年）から1941年（昭和16年）までの納入実績は104台、計18,500冷凍トンに及んだ⁴¹⁻⁴³⁾。

柳町政之助氏は、当時の冷凍機のほとんどがアンモニア冷媒で、その悪臭や危険性・大きさや重量から、ビルの冷房用には不相当と感じていた。そこで、以前より注目していた、アメリカのキャリア博士の考案のCentrifugal Refrigerating Machineを輸入することを考えたが、非常に高価であったため、国産化を決意した。1929年（昭和4年）、ターボ・コンプレッサの開発を目的にアメリカの技術を見聞すべく渡米し、帰国後、荏原製作所と**図 31**に示すような75冷凍トンの試作機を製作した。こうして国産初のターボ冷凍機は、1931年（昭和6年）、大阪の中之島の朝日ビルに180冷凍トン×2台が導入され、全館冷房、温度湿度制御、遠隔制御の空調システムが採用された⁴⁵⁾。この朝日ビルは屋上にスケートリンクを設置するなど、当時の空調の最新技術を結集した画期的な施設であった⁴⁴⁾。



図 30 日本機械学会機械遺産第 42 号
「高砂荏原式ターボ冷凍機」⁴¹⁻⁴³⁾

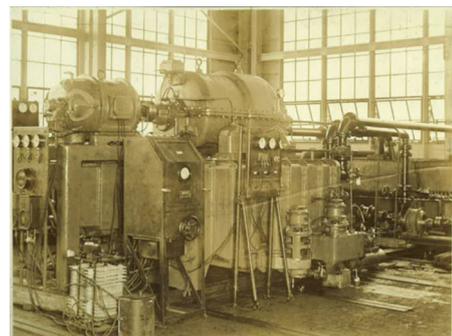


図 31 高砂荏原式ターボ冷凍機の
75 冷凍トンの試作機⁴³⁾

図 32に、高砂荏原式ターボ冷凍機の開発試験機の概略構造を示す。図のように、蒸発器、圧縮機、凝縮器の三主要部分から構成され、圧縮機はターボ・コンプレッサであった。液管には膨張弁はなく、フロート式トラップによって自動的に円滑に液を蒸発器に戻すようになっていた。**図 33**には、ここでの使用冷媒で

あるダイクロロエチレン $C_2H_2CL_2$ の当時の線図として、温度-エントロピー線図 ($T-S$ 線図) を示す⁴⁴⁾。冷凍サイクルを説明する上で当時は、圧力-エンタルピー線図 ($P-h$ 線図) でなく、 $T-S$ 線図で説明されていたことが興味深い。

この後の1937年(昭和12年)には、京都電燈(株)本社(後に関西電力(株)京都支店、地下1階/地上8階、延床面積10,619 m^2)に、高砂荏原式ターボ冷凍機130馬力(夏季100冷凍トン・冬季80冷凍トン)×2台による、ヒートポンプ式冷暖房システムが設置された^{42,43)}。

以上のような開発の経緯や技術内容のほか、特許係争の中での「鬼検事といわれる琵琶田検事の取り調べ」など、多くの臨場感に溢れる記事もあるので、それらの詳細は参考文献⁴⁵⁾を参照されたい。

なお、現存する最古の高砂荏原式ターボ冷凍機は、高砂熱学イノベーションセンターに展示・保管されている²⁾。

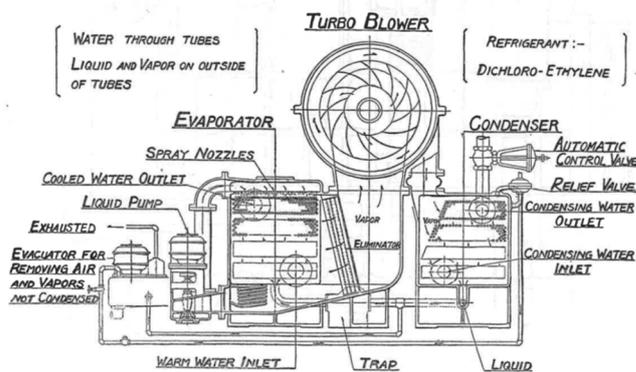


図32 高砂荏原式ターボ冷凍機の開発試験機の概略構造⁴⁴⁾

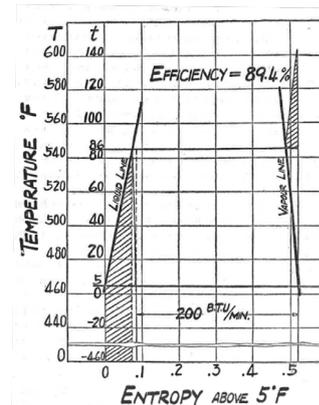


図33 冷媒ダイクロロエチレン $C_2H_2CL_2$ の温度-エントロピー線図($T-S$ 線図)⁴⁴⁾

冷却塔は工業用水の再利用などを目的として、1907年(明治40年)に、室蘭の輪西製鉄所で大気式冷却塔が輸入・設置された⁴³⁾。現在のような強制通風式冷却塔については1938年(昭和13年)、高砂熱学工業によって図34のように日本水素工業(株)小名浜工場にて、わが国最初の向流型工業用冷却塔が設計・施工された。それ以降、図35のような製鉄所や石油精製所に、多くの工業用大型冷却塔が導入された。その当時は空調用の冷凍機の冷却水のために、冷却塔を採用した事例はなかった^{1,11,43)}。

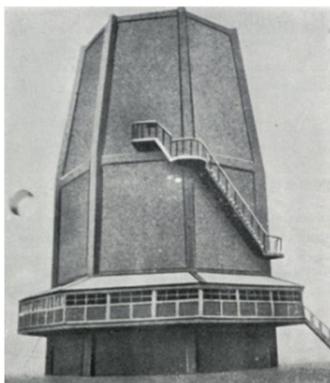


図34 日本水素工業(株)小名浜工場でのわが国最初の向流型工業用冷却塔^{1,11)}

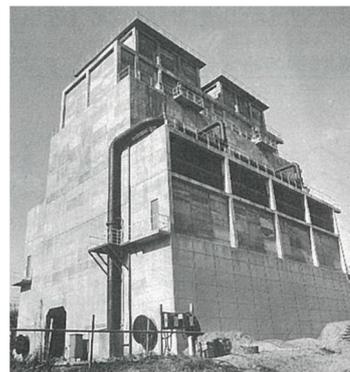


図35 新日鉄大分での工業用冷却塔^{1,11)}

第二次大戦終結後、次第に強制通風式冷却塔は空調用にも採用され、冷却塔市場には多くのメーカーが参入した。さらに1960年代に入って空調の普及とともに、井水の汲み上げ量が増加して地盤沈下の問題が発生し、図36のような汎用冷却塔⁴⁷⁾の需要が大幅に増えることになった⁴³⁾。

その後、1970年代には次項で説明する地域冷暖房施設などにおいて、1基が3000冷凍トンという大容量冷凍機に対応するよう、**図37**のように空調用冷却塔では、大型化の開発がなされることになった⁴³⁾。



図36 汎用小型冷却塔⁴⁷⁾

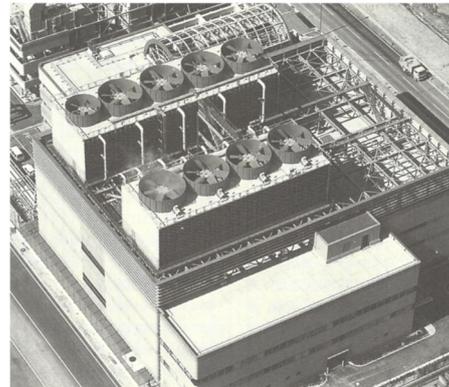


図37 空調用の大容量冷却塔⁴³⁾

東京大学や東北大学などでの集中暖房の時代を経て、1970年（昭和45年）には、**図38**のような新宿新都心地区と大阪の千里中央地区において、わが国初の本格的な地域冷暖房設備が導入された^{1,42,43)}。その後、札幌市都心地区、幕張ハイテク・ビジネス地区、東京臨海副都心地区、光が丘地区、箱崎地区、後楽一丁目地区、丸の内一丁目地区、銀座5・6丁目地区、JR東海名古屋駅周辺地区、中之島2・3丁目地区、シーサンドもち地区など、多くの地域に地域冷暖房設備が導入され、国交省資料によると50地区の地域熱供給の事例リストが挙げられている⁴⁸⁾。

1972年（昭和47年）に熱供給事業法が公布・施行されて以来、公害防止、都市防災、省エネルギー、CO₂削減、都市美観の向上などの様々なメリットのために、**図39**のように多くの熱源技術の開発と実証がなされてきた⁴⁹⁾。その詳細は、関連学協会のサイトを参照されたい^{50,51)}。



図38 地域冷暖房施設が施工されている
1970年当時の新宿新都心エリア¹⁾

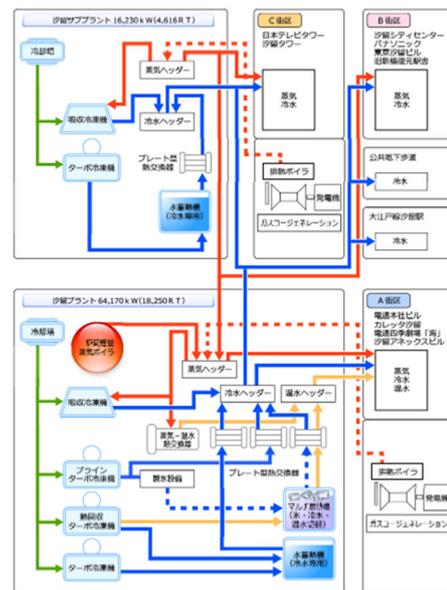


図39 汐留北地区での地域冷暖房設備の概要⁴⁹⁾

ここではボイラや吸収冷凍機など、空調用の熱源技術として記載しなければならない機器開発の紹介ができていない。そこで、空調の技術開発における歴史の全体像を見るためには、関連学会の書籍^{42,43)}を参照されたい。

2.7 エネルギー貯蔵技術

1952年（昭和27年）、日活多摩川撮影所（現、調布撮影所）に日本で初めて、柳町政之助氏の設計・施工による水蓄熱槽を活用した空調設備が導入された^{42,43,52}。当時の導入目的は、スタジオ照明の有無による冷房負荷の大きな変動を蓄熱槽の採用によって吸収し、その結果、高価な冷凍機の容量を低減して空調設備費のコストの軽減を図ることであった。この建物の延べ床面積は6170 m²、冷凍機容量は60 冷凍トン、蓄熱水量は200 m³であった⁴³。蓄熱設備が記録されたビデオは、**図 40**の高砂熱学イノベーションセンターのシアタールームで視聴できる²⁾。

柳町政之助氏は戦前から、太陽熱の暖房・給湯への利用のための蓄熱槽を研究していた⁴³。そこで、ボイラや冷凍機の蓄熱運転に気づき、その実現のため、太陽熱の温水蓄熱でなく、冷凍機と冷水蓄熱槽の構成で実導入されたことは興味深い。

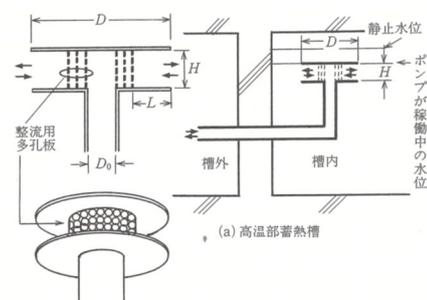
また、このような平面型の蓄熱槽は、外国には例がなく、とくにピット間の基礎梁の開孔に制限されて水流にむらができ、蓄熱効率が低下する。この流れの研究に関しては多くの優れた成果があり、1970年（昭和45年）頃には、**図 41**のように開孔前面に梁を設け、成層流れにする考案もなされ、水蓄熱槽の性能は大幅に向上した^{42,52}。中原信生先生らは、蓄熱槽の設計と運転制御の実際面から蓄熱式空調システムの運転効率向上の方策を追求した⁵²。

とくに我が国では、耐震のための建物の二重床を活用し、防食技術の石灰石含侵法¹⁾も開発され、水蓄熱槽は多くの建物で採用された。また、**図 42**のような蓄熱槽効率に優れた、温度成層型水蓄熱槽の研究開発もなされ、多くの空調設備に導入された。この温度成層型水蓄熱槽に関しては、宮武修先生らによって、実験結果の詳細な解析と経験式の総括的な研究が行われた⁵²。

柳町政之助氏は、このような水蓄熱や前述の高砂珪原式ターボ冷凍機だけでなく、躯体蓄熱システムや個別分散空調機など、先駆的な空調設備を開発してきた。限られた紙面では、これらを全て紹介することは困難であった。そこで、柳町政之助氏の技術開発の全体像を見るためには、是非、関連学会の書籍^{42,43}を参照されたい。



図 40 高砂熱学イノベーションセンターのシアタールーム²⁾



(a) 高温部蓄熱槽

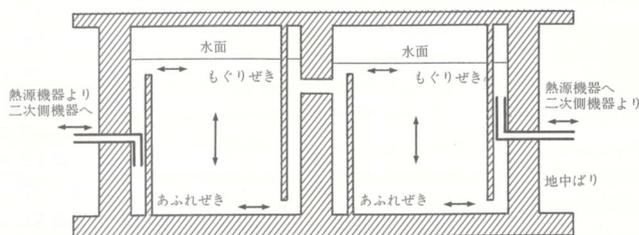
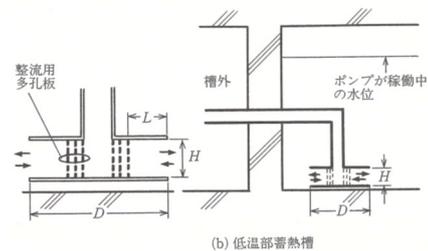


図 41 もぐりぜき型蓄熱槽の概念図⁵²⁾



(b) 低温部蓄熱槽

図 42 温度成層型水蓄熱槽の整流用多孔板の設計⁵²⁾

前述のような水蓄熱による蓄熱式空調の導入の中で、1980年（昭和55年）頃から、氷蓄熱システムが登場した。東京電力では容積縮小による蓄熱式空調システムの普及促進のために、1981年（昭和56年）に高密度蓄熱研究会を社内に設置し、射場本忠彦先生らによって氷蓄熱システムの研究開発が盛んに行われた⁵²。電力負荷平準化のため、電力会社の主導の下、**図 43**のような (a) スタティック型や (b) ダイナミック

ク型など、多種多様な氷蓄熱システムが開発された⁵³⁾。

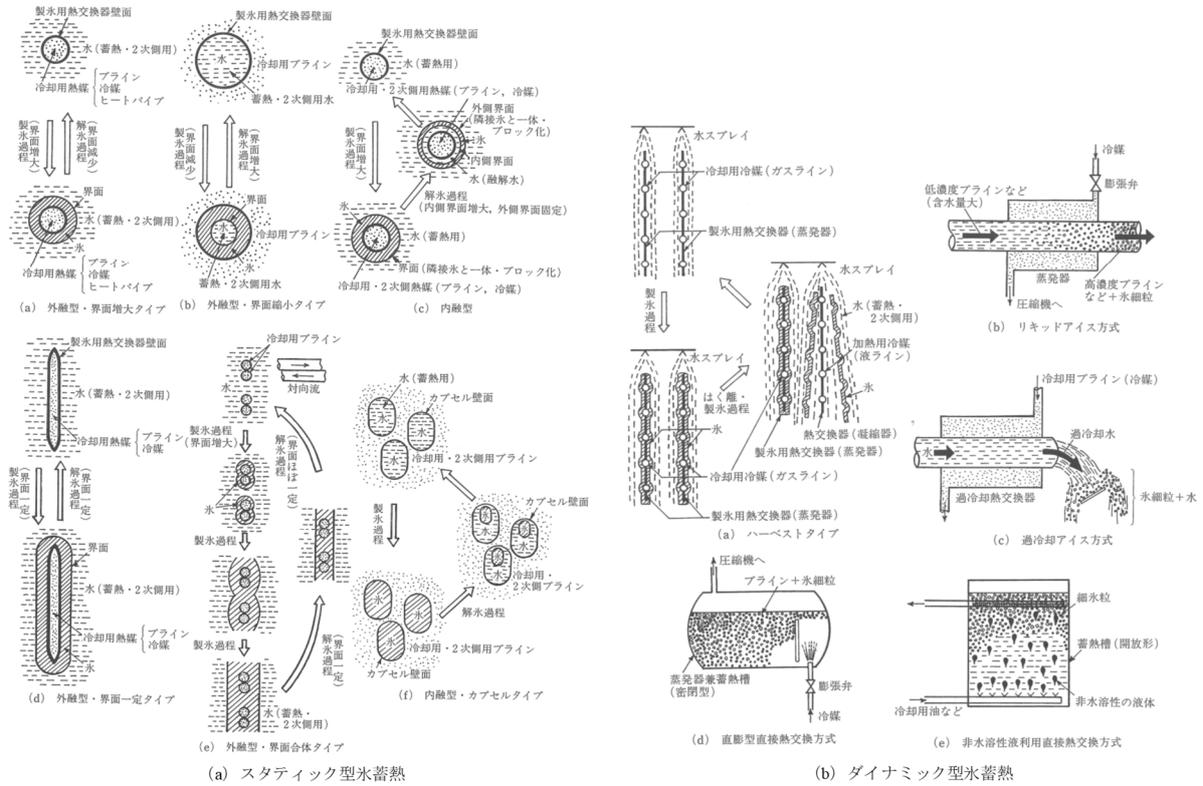


図 43 多種多様な氷蓄熱システム⁵³⁾

高砂熱学工業では 1986 年（昭和 61 年）以降、水の過冷却現象を利用したダイナミック型氷蓄熱システムである、スーパーアイスシステム (SIS[®]) が開発され、川崎の某工場に 1 号機が導入された。引き続き、大容量スーパーアイスシステム（大容量 SIS[®]）として、図 44 の幕張地域冷暖房施設での実証試験⁵⁴⁾を経て、図 45 の京都駅ビル⁵⁵⁾ や汐留北地区での地域冷暖房設備⁴⁹⁾などに導入された。また、スーパーアイスシステム MII (SIS[®] MII) として、某乳業会社のチルド水供給設備^{56,57)} や某大学の集中熱源などに導入された。導入実績としては 1998 年～2009 年（平成 10 年～平成 21 年）で、納入件数 33 件・総冷凍能力 12,000 USRt・総蓄熱槽容積 9000 m³ に昇った。その後、スーパーアイスシステム HF⁵⁸⁾ (SIS-HF[®]) として、蓄冷熱利用でなく、図 46 のように魚などの鮮度維持のための氷スラリーが利用されるようになった。



図 44 幕張地域冷暖房施設での実証試験設備⁵⁴⁾



図 45 建設当時の京都駅ビルの外観⁵⁵⁾

蓄熱技術は、水蓄熱などの顕熱蓄熱、氷蓄熱などの潜熱蓄熱、水素吸蔵合金や吸着材も含めた広義の化学蓄熱に大別される^{52,53)}。顕熱蓄熱においては熱容量（比熱×比重）が大きく、また、潜熱蓄熱においては潜

熱量が大きく、かつ安価であり安全であることが蓄熱媒体には求められる。そこで、現在まで冷凍空調分野で上市されてきた多くの蓄熱システムでは、氷蓄熱を含めて蓄熱媒体には水が採用されてきた。

更なる蓄熱密度の向上とともに、吸着式ヒートポンプ、ケミカルヒートポンプ、およびデシカント除湿・空調システムなどの熱駆動サイクルのシステムのため、化学蓄熱剤などの研究開発がなされている。図 47 のように、各種のエネルギー材料について、エネルギー貯蔵密度と作動温度の関係が整理された。図には化学蓄熱、潜熱蓄熱、熔融塩系潜熱蓄熱、吸着式、水素吸蔵合金系（金属水素化物系）、燃焼、蓄電池系の材料が比較されている。従来型の顕熱蓄熱や潜熱蓄熱は、100℃（373.15 K）以下の温度域に分布し、化学蓄熱は 100℃（373.15 K）以上の温度域で高い蓄熱密度を有することが示されている⁵⁹⁾。



図 46 平戸漁港での水スラリー利用⁵⁸⁾

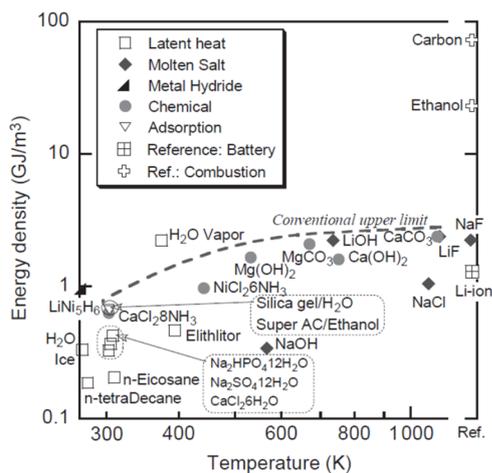


図 47 エネルギー材料の作動温度とエネルギー貯蔵密度の関係⁵⁹⁾

高砂熱学工業では 1996 年（平成 8 年）、水電解・燃料電池一体型セルと水素吸蔵合金から構成される水素利用システムを提案した。当時、安価な時間帯の系統電力や再生可能エネルギー由来の余剰電力で水素を製造し、それを水素吸蔵合金の充填タンクに貯蔵しておき、電力需要や熱需要があるときに貯蔵しておいた水素で発電して電力需要や熱需要を賄う、電力貯蔵・コージェネレーションシステムであった。図 48 に水素吸蔵合金タンクの試験装置を示す⁶⁰⁻⁶²⁾。2つの合金タンクを用いて、水素吸蔵合金ヒートポンプの実験も実施した。

また、吸着材蓄熱システムの実証開発についても、2014 年度（平成 26 年度）からの NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の事業として、図 49 のようなオフライン熱輸送システム（日野自動車）と定置型システム（石原産業）を実証した⁶³⁻⁶⁸⁾。ここでは、酢酸ナトリウムやエリスリトールの従来の潜熱蓄熱に比べて、蓄熱密度が高く、熱ロスの無い蓄熱システムの開発が目的であった。



図 48 水素吸蔵合金タンク⁶⁰⁻⁶²⁾



(a) オフライン熱輸送実証システム(日野自動車)



(b) 定置型実証システム(石原産業)

図 49 吸着材蓄熱システムの実証開発⁶³⁻⁶⁸⁾

3. 未来に向けた技術開発

高砂熱学は、1923年に高砂煖房工事株式会社としてスタートし、技術資料がまだない時期に自らの設計・施工経験より導き出した技術を纏め、「空気調和技術」を確立してきた。100年の歴史のなかで培ってきた『時代の要請や社会変化に応じて変革しつづける力』を強みと認識し、産業や社会の基盤を支える存在として『空気調和設備』を中心に技術開発に取り組み、事業を展開してきた。

今般、当社を取り巻く事業環境は劇的に変化している。足許では、世界情勢をうけての資機材不足、為替影響や人手不足による建築工程の遅延、労務費高騰などが懸念されている。地球温暖化は歯止めがかからない状態で地球沸騰化とまで言われはじめている。日本政府が発表した「2050年カーボンニュートラル宣言」によって、より一層脱炭素社会の実現に向けて各企業が、カーボンニュートラルやESGへの取り組みを加速させており、長期的な視点では、“2040年”が人口問題や気候変動問題による社会構造の大きな転換点であると予測している。図50に示すように、高砂熱学グループは未来に向けた取り組むべき社会課題として「建物環境のカーボントランジション」と「地球環境のカーボンニュートラル」を掲げている。

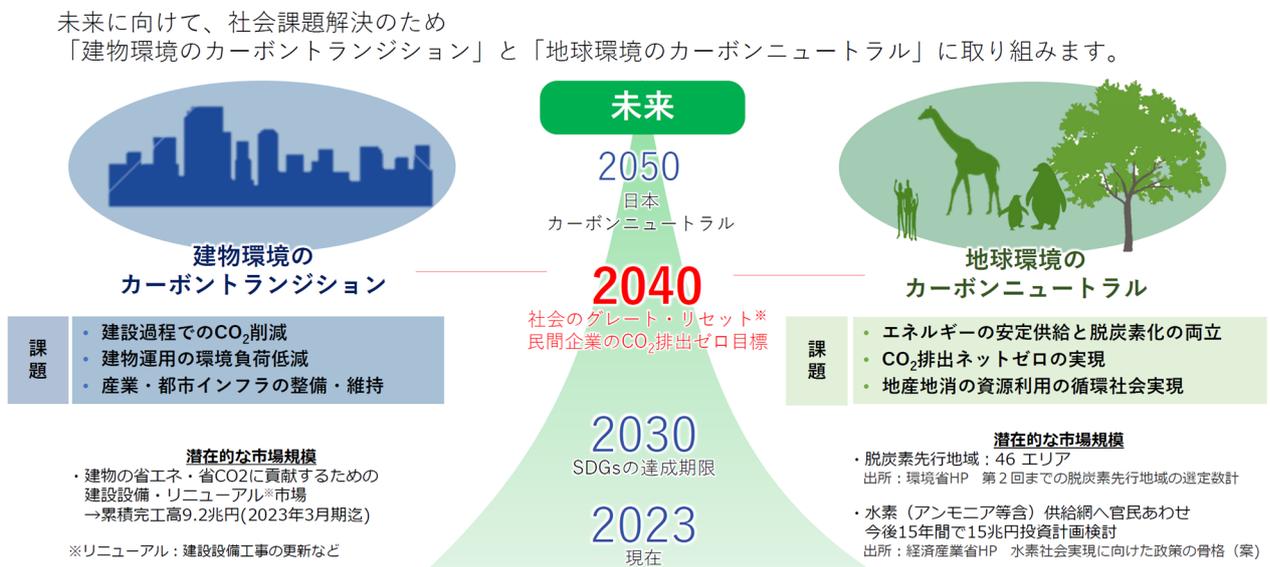


図50 高砂熱学グループが貢献する未来社会課題⁶⁹⁾

これらの課題解決に向けて当社研究開発本部は、これまで培ってきた温湿度調整技術、気流制御技術、クリーン化技術、水処理技術、熱源技術、エネルギー貯蔵技術、運用制御最適化技術を駆使して、技術開発を進めている。具体的な開発テーマをここに記すことは控えさせていただくが、「1. 建物の環境を創る」「2. 地球環境を守る」「3. 新たな環境に挑む」を三本の柱として、「地域社会に貢献する」も意識しながら研究開発を担っている。

「1. 建物の環境を創る」においては、業務用や産業用をはじめとするあらゆる建物の省エネと創エネを実現する建築設備、健康と安全を創る環境、知的生産性や製造生産性を向上させる環境を提供する技術の開発がその対象である。半導体製造用のクリーンルームや二次電池製造用ドライルームに関わるシステム、オンサイトで再生可能エネルギー利用技術、パーソナル空調の展開が挙げられる。これらは比較的短期での開発を目指している。

「2. 地球の環境を守る」においては、水素関連技術、CO₂回収・利用・固定技術、資源循環利用技術、熱・エネルギー制御技術、脱地球温暖化ガス利用冷却加熱技術などに関わる技術開発を対象としている。建物やある程度の規模のエリアで使われる熱・エネルギーや資源をカーボンニュートラルにする技術、エ

エネルギーを有効に使いこなすための蓄エネルギー技術、さらにはエネルギーを使うと蓄えると創るをスマートに“ツナグ”システムも開発対象となる。これらは一部を除き、比較的中長期の開発を想定している。

「3. 新たな環境に挑む」とは、月面、宇宙空間などでの居住環境、エネルギー供給施設への挑戦、得られた知見や手法の地上技術へのフィードバック（デュアル開発とも呼ばれる）を狙っているものである。宇宙については全くの新参ではあったが、保有する水電解技術をベースとして既に開発実証に着手しており、有力な宇宙関連パートナーの協力も得ながら宇宙品質を習得中である。宇宙空間において人が生存していくためには、その居住システムは完全閉鎖系でなければならない。エネルギーを自ら確保し、資源を循環させ、極限の効率で、系外に依存することなく、システムを維持する必要がある。いわゆる ZEB（ネットゼロエネルギービル）コンセプトである。その他にも今求められる技術に繋がる要素が、宇宙開発には大変多いことに気付かされている。振り返れば、その時代にまだ存在しないが求められる技術の開発に先輩達は挑戦してきたわけであり、そのフロンティアが宇宙となって今我々にも近づいてきたとも言えるであろう。

「地域社会に貢献する」については、当高砂熱学イノベーションセンターも 2024 年 4 月で 5 年目を迎え、開設当初よりの地域の方々との交流を通じて、空調や環境に関する技術への理解を深めていただくことに、微力ながら貢献できていると感じている。特に未来を担う小中学生、高校生の皆さんが我々の取組に共感してくれることは、我々にとっても何よりの励みになっている。引き続き地域のみならず多くの方々との交流を通じて、開発のニーズや方向性を正しく把握したり、開発へのやりがいを感じたりすることで開発の効率向上につなげていきたい。

未来に向けた技術開発においては、カーボンニュートラルが外せないキーワードであることに言を俟たない。ただし、カーボンニュートラルが目的なのではなく、安心安全で快適な環境、ものづくりに最適な環境やユーティリティについて、その品質を低下させることなくカーボンニュートラルを成立させながら提供することが我々の目指す価値である。高砂熱学イノベーションセンターは、環境革新で地球の未来をきりひらく「環境クリエイター®」への進化の先導役となるべく、これらの価値提供を実現する技術開発に取り組んで参ります。

【執筆担当者】

第 1 章 技術開発体制の変遷	井上 正憲
第 2 章 主な技術分野における技術開発	
2-1. クリーン化技術	井上 正憲
2-2. 温湿度調整技術	井上 正憲
2-3. 水処理技術	井上 正憲
2-4. 気流制御技術	柴田 克彦
2-5. 運用・制御の最適化技術	柴田 克彦
2-6. 熱源技術	谷野 正幸
2-7. エネルギー貯蔵技術	谷野 正幸
第 3 章 未来に向けた技術開発	佐部利 俊和

文 献

- 1) 高砂熱学工業 70 年の歩み (社史), 高砂熱学工業 (株) 編, (1996).
- 2) 高砂熱学工業 HP 高砂熱学イノベーションセンター: <https://www.tte-net.com/lab/introduction/index.html>
- 3) 阪田総一郎, 高橋英人, 佐藤克己: 空気中の化学汚染の低減対策, 高砂熱学工業総合研究所報, 13, 85-93(1999).
- 4) 稲葉仁, 岡村典明, 高橋惇: エアワッシャーにおける親水性エリミネータの有効性, 空気清浄, 37(4), 39-45(1999).
- 5) 井上正憲, 五味弘, 青木秀之, 三浦隆利: 清浄水を用いた気液接触ガス吸収装置の特性解析, 空気調和・衛生工学会論文集, 75, 81-88(1999).
- 6) 五味弘, 三澤雄一: クリーンルーム構成材から発生する有機化合物の評価, 高砂熱学工業総合研究所報, 12, 93-100(1998).
- 7) 高砂熱学工業 HP 技術パンフレット(グリーン・エアテック): <https://www.tte-net.com/solution/pdf/gat.pdf>
- 8) 高砂熱学工業 HP プレスリリース: https://www.tte-net.com/article_source/data/news/files/20210604_1.pdf
- 9) 井上正憲, 池鯉鮒悟, 五味弘: 超精密温度制御技術, 高砂熱学工業総合研究所報, 13, 17-19(1999).
- 10) TMES 株式会社 HP ソリューション: <https://www.tm-es.co.jp/solutions/solution/>
- 11) 高砂熱学 50 年の歩み (社史), 高砂熱学工業 (株) 編, (1973).
- 12) Briken, M.N.: Cooling Computers, Heating, Piping & Air Conditioning, 39(6), 125-128(1967).
- 13) ASHRAE Committee formed to Establish Thermal Guidelines for Datacom Facilities, (2005).
- 14) 高橋惇, 孔鉄男, 中谷博, 大和瀬靖司: 加圧方式の床吹出し空調システムに関する研究, 高砂熱学工業総合研究所報, No.11, 45-52(1997)
- 15) 高砂熱学工業 90 年史稿 (社史), 高砂熱学工業 (株) 編, (2016).
- 16) 三橋太, 高橋惇, 高橋亘, 阿部哲也, 清水保夫: 低床加圧式床吹出し空調システムの性能実測, 高砂熱学工業総合研究所報, No.14, 89-96(2000)
- 17) 守屋寛之, 三橋太: 各部屋個別に温度制御可能な低床床吹出し空調システム(LUFT[®]VAV)の開発, 高砂熱学工業総合研究所報, No.20, 5-9(2006)
- 18) 守屋寛之, 鹿子島修: VAV 機能付き低床型床吹出し空調システム(LUFT[®]VAV)の性能検証, 高砂熱学工業総合研究所報, No.23, 26-32(2009)
- 19) 守屋寛之, 水出喜太郎, 鹿子島修: 環境調和型図書館の熱環境性能評価に関する研究, 高砂熱学工業総合研究所報, No.24, 31-40(2010)
- 20) 三橋太, 石塚圭一, 高橋惇, 孔鉄男, 清水昭浩, 河岡眞之, 大和瀬靖司: 温度成層型空調システムに関する研究開発, 高砂熱学工業総合研究所報, No.15, 63-72(2001)
- 21) 木村健太郎, 早川和男, 鈴木利幸, 守屋寛之, 柴田克彦: SWIT[®]の大空間恒温室への適用, 高砂熱学工業総合研究所報, No.23, 19-25(2009)
- 22) 守屋寛之, 木村健太郎, 柴田克彦: SWIT[®]を用いたクリーンルーム空調システム, 高砂熱学工業総合研究所報, No.25, 7-10(2011)
- 23) 相澤直樹, 高西浩, 木村健太郎, 柴田克彦, 矢部克明: IDC サーバー室向け側壁給気型空調システムの開発, 高砂熱学工業総合研究所報, No.25, 37-44(2011)
- 24) 相澤直樹, 柴田克彦, 木村健太郎, 池田昌弘: DC 向け壁吹出し方式空調システム「IDC-SFLOW[™]」, 高砂熱学工業総合研究所報, No.26, 13-18(2012)
- 25) 相澤直樹, 渡辺慶一, 原豊, 高西浩: 郊外型のデータセンターにおける壁吹出し方式空調システムの試運転時の温熱環境検証, 高砂熱学工業総合研究所報, No.26, 27-32(2012)
- 26) 相澤直樹, 柴田克彦, 原豊, 高西浩, 三好隆, 広田博美, 内山隆康: グリーン IDC への壁吹出し方式空調システムの適用 試運転時の模擬負荷による温熱環境検証, 高砂熱学工業技術研究所報, No.28, 75-80(2014)
- 27) 高橋惇: 設備のインテリジェント化システムに関する研究開発, 高砂熱学工業総合研究所報, No.14, 3-20(2000)
- 28) <https://www.yaskawa.co.jp/product/inverter/history>, (2024/1 参照)

- 29) 伊藤雄偉, 川崎健二, 石塚圭一, 高橋惇: 環境制御に関する技術開発, 高砂熱学工業総合研究所報, No.14, 28-54(2000)
- 30) 世界最大規模のオープン型ビルオートメーションシステムを構築, 高砂熱学工業プレスリリース(2003.4.22)
- 31) 柴田克彦, 石塚圭一, 友田衛, 相澤直樹, 米沢仁: 計測+解析+評価の統合化技術の開発, 高砂熱学工業総合研究所報, No.18, 13-26(2004)
- 32) 永岡真紀, 杉山浩美: 統合型熱源システムの開発, 高砂熱学工業総合研究所報, No.20, 33-38(2006)
- 33) 増田正夫, 林利雄: 分散ポンプ式空調用水循環システム(GLIP[®]), 高砂熱学工業総合研究所報, No.22, 47-52(2008)
- 34) 柴田克彦, 米澤仁, 津田譲二, 茂森昭博, 今野一富: 設備全体の最適化制御システム「E-CONTROL」, 高砂熱学工業総合研究所報, No.22, 7-12(2008)
- 35) 柴田克彦, 米澤仁, 大神龍幾: 高安定性微差圧制御システム(LO-VST), 高砂熱学工業総合研究所報, No.21, 7-12(2007)
- 36) 青山剛士, 湯浅憲, 仲村慎一, 柴田克彦, 山口淳志, 入部真武: ヒュームフード向け高速給排気統合管理システム『i-Fume[™](アイ・ヒューム)』, 高砂熱学工業技術研究所報, No.29, 5-16(2015)
- 37) 青山剛士, 本井杏奈, 柴田克彦: パッケージ型ヒュームフード向け給排気管理システム『i-Fume mini』の高速 VAV マルチベンダ化, 高砂熱学工業技術研究所報, No.33, 3-8(2019)
- 38) 岡本英之, 池田俊明, 片山健一郎, 米澤仁, 柴田克彦: GDoc による熱源システムの運用最適化技術の開発, 高砂熱学工業技術研究所報, No.31, 55-62(2017)
- 39) Yuki Matsunami, Yuan Gao, Shohei Miyata, Yasunori Akashi, Katsuhiko Shibata, Kenichiro Katayama, Yoshihiro Hirahara: DEVELOPMENT OF A GRID INDEPENDENT ENERGY SYSTEM USING ENERGY SUPPLY AND DEMAND PREDICTION (Part 1) Concept and problem identification from operational data, 高砂熱学イノベーションセンター報, No.35(2021)
- 40) 柴田克彦, 岡本英之, 米澤仁, 高橋惇: 空調設備の運用・制御技術の開発, 高砂熱学工業技術研究所報, No.30, 65-80(2016)
- 41) 日本機械学会機械遺産: <https://www.jsme.or.jp/kikaiisan/#section1>.
- 42) 空気調和・衛生設備技術史: 空気調和・衛生工学会編, 丸善, 167, 292, 366(1991).
- 43) 日本冷凍史: 日本冷凍空調学会編, 日本冷凍空調学会, 98-99, 395(1998).
- 44) 山岸靖一, 大岩順二: ターボ冷凍機に就て一昭和6年3月20日講演会に於て講演一, 衛生工業協會誌(現, 空気調和衛生工学会誌), 5(6), 397-430(1931).
- 45) 柳町政之助: 我が国に於けるターボ冷凍機の誕生を懐古して, 冷凍誌「ターボ冷凍機特集号」, 30(332), 218-222(1955).
- 46) 大岩順二: ターボ冷凍機始期の思出, 冷凍誌「ターボ冷凍機特集号」, 30(332), 223-224(1955).
- 47) 荏原冷熱システム丸小型冷却塔: <https://www.ers.ebara.com/product/maru/>.
- 48) 国交省/地域熱供給50地区の事例リスト: <https://www.mlit.go.jp/common/001113135.pdf>.
- 49) 汐留アーバンエネルギー: http://www.shiodome-ue.co.jp/heat_source_equipment.html.
- 50) 日本熱供給事業協会: <https://www.jdhc.or.jp/category/area/>
- 51) 都市環境エネルギー協会: <https://www.dhcjp.or.jp/about/>.
- 52) 蓄熱式空調システム 基礎と応用: 空気調和・衛生工学会, 丸善, 平成7年10月20日.
- 53) 関信弘: 蓄熱工学1基礎編, 2応用編, 1995年12月25日.
- 54) 第35回空気調和・衛生工学会賞「技術賞」審査資料, 過冷却水を用いた大規模氷蓄熱システムの開発: 空気調和衛生工学会, 平成8年10月30日.
- 55) Technical Tour of ICE STORAGE SYSTEM IN KYOTO STATION BUILDING, The 4th Workshop on Ice Slurries of IIF/IIR, 12-13 Nov., 2001.
- 56) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 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, 日本冷凍空調学会論文集, 30(3), 319(2013).
- 57) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二: 乳製品加工工場における氷スラリーによるチルド水供給設備, 日本冷凍空調学会論文集, 30(3), 331(2013).

- 58) 過冷却完全解除型 シャーベットアイス製氷機 SIS-HF®, 高砂熱学工業 HP, <https://www.tte-net.com/solution/sis-hf.html>.
- 59) 潜熱蓄熱・化学蓄熱・潜熱輸送の最前線：鈴木洋, シーエムシー出版, 2016年11月18日.
- 60) 川上理亮, 増田正夫, 前田哲彦, 丹下学, 中納暁洋, 高橋惇, 庄子正和, 青木秀之, 三浦隆利: 建築設備用の統合型水素利用システムの開発 第1報-水素吸蔵合金タンクの最適設計, 空気調和・衛生工学会論文集, 165, 19-27(2010).
- 61) 川上理亮, 増田正夫, 前田哲彦, 丹下学, 中納暁洋, 高橋惇, 庄子正和, 青木秀之, 三浦隆利: 建築設備用の統合型水素利用システムの開発 第2報-水素吸蔵合金タンク群の運転制御法, 空気調和・衛生工学会論文集, 166, 27-34(2011).
- 62) 川上理亮, 増田正夫, 前田哲彦, 丹下学, 中納暁洋, 高橋惇, 庄子正和, 青木秀之, 三浦隆利: 建築設備用の統合型水素利用システムの開発 第3報-水素吸蔵合金タンク群の水素放出反応熱の有効利用, 空気調和・衛生工学会論文集, 168, 1-9(2011).
- 63) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 鈴木正哉, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第1報—小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, 45(281), 9-17(2020).
- 64) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第2報—低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着時の発熱量について, 空気調和・衛生工学会論文集, 45(285), 1-8(2020).
- 65) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第3報—吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 46(290), 39-46(2021).
- 66) 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(297), 31-38(2021).
- 67) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第5報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47(301), 9-16(2022).
- 68) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第6報—塗装工程での除湿利用の実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47(308), 11-18(2022). 高砂熱学工業 70年の歩み(社史), 高砂熱学工業(株)編, (1996).
- 69) 高砂熱学工業 HP 高砂熱学グループ長期ビジョン: https://www.tte-net.com/ir/plan/pdf/long_term_plan_2023.pdf

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering is a company that celebrated its 100th anniversary in 2023. Since our founding in 1923, we have designed and constructed air conditioning equipment and system for many facilities. To meet the needs of customers and society, we have continued to develop technology and provide new products and customer value. This report introduces the transition in our development system and the progress of development in the main technology fields, as well as makes recommendations regarding the direction and outlook of technology development for the future.

高砂熱学イノベーションセンター 受賞報告

— 空気調和・衛生工学会賞技術賞、カーボンニュートラル大賞、 ASHRAE Awards 等受賞 —

清水昭浩・相澤直樹・木村健太郎
柴田克彦・大迫孝輔・齋藤雅浩

Takasago Thermal Engineering Innovation Center Award Report

- SHASE Award for Distinguished Technologies, Carbon Neutral Award, ASHRAE Technology Awards, etc. -

Akihiro Shimizu・Naoki Aizawa・Kentaro Kimura
Katsuhiko Shibata・Kosuke Osako・Masahiro Saito

高砂熱学イノベーションセンターでの設計・施工・運用における取り組みが評価され、2023年度、空気調和・衛生工学会賞技術賞建築設備部門を始め、カーボンニュートラル大賞、ASHRAE Technology Award 等の賞を受賞した。各賞への応募内容や評価点等についてまとめて記載する。

1. はじめに

高砂熱学イノベーションセンターは、2017年8月から設計、施工期間を経て2020年3月より運用を開始し、それ以降継続的な検証を行ってきた。これまでの取り組みが評価され、2022年度、空気調和・衛生工学会賞（技術賞 建築設備部門）を始めとして、以下の賞を受賞した。本報では、この内、(1)の空気調和・衛生工学会賞技術賞、(3)のカーボンニュートラル大賞、(4)～(6)の American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers（以下、ASHRAE）Technology Awards 関連について、次章以降で紹介する。

- (1) 空気調和・衛生工学会 第61回空気調和・衛生工学会賞, 技術賞 建築設備部門（表彰：2023年5月）
業績名：高砂熱学イノベーションセンターにおける環境・設備計画と実施
受賞者：高砂熱学工業(株)、(株)三菱地所設計、(株)竹中工務店、(株)関電工、(株)ヤマト、
高砂熱学工業(株)関信越支店、田辺 新一（早稲田大学）、赤司 泰義（東京大学）、
鶴飼 真成（早稲田大学）、宮田 翔平（東京大学）
- (2) 建築設備総合協会 第21回環境・設備デザイン賞 第II部門: 建築・設備統合デザイン部門, 優秀賞（表彰：2023年5月）
業績名：高砂熱学イノベーションセンター
代表受賞者：高砂熱学工業(株) 木村 健太郎
共同受賞者：高砂熱学工業(株) 清水 昭浩、(株)三菱地所設計 阿折 忠受・羽鳥 大輔・武藤 友香、
(株)竹中工務店 金子 英宏・牧野内 絵理

- (3) 建築設備技術者協会 第11回カーボンニュートラル大賞（表彰：2023年6月）
業績名：高砂熱学イノベーションセンター 環境負荷低減と知的生産性向上を両立した研究施設
受賞者：高砂熱学工業(株)、(株)三菱地所設計、(株)竹中工務店、(株)関電工、(株)ヤマト
- (4) ASHRAE Japan Chapter Technology Award 2023 (Commercial Building, New), First Place（表彰：2023年7月）
業績名：Takasago Thermal Engineering Innovation Center
代表受賞者：武藤 友香（三菱地所設計(株)）
共同受賞者：木村 健太郎（高砂熱学工業(株)）、赤司泰義（東京大学）、田辺 新一（早稲田大学）
- (5) ASHRAE Region XIII Technology Award 2023-2024 (Commercial Building, New), First Place（表彰：2023年8月）
業績名、代表受賞者、共同受賞者は、(4)に同じ。
- (6) ASHRAE Technology Award 2024 (Commercial Building, New), Second Place（表彰：2024年1月）
業績名、代表受賞者、共同受賞者は、(4)に同じ。
- (7) 省エネルギーセンター 2023年度省エネ大賞 省エネ事例部門 経済産業大臣賞(業務分野)（表彰：2024年1月）
業績名：ZEBとウェルネスを両立したサステナブル研究施設
受賞者：高砂熱学工業(株)、(株)三菱地所設計、(株)竹中工務店、(株)関電工、(株)ヤマト、早稲田大学、東京大学

2. 空気調和・衛生工学会賞技術賞受賞^{1),2)}

空気調和・衛生工学会技術賞の表彰式の様子を写真1に示す。受賞内容の詳細については、文献3)を参照のこと。

当受賞に当たっては、「空調設備を軸とする設備施工会社の研究施設に相応しく、多くの自社開発技術や、新たな挑戦が盛り込まれており、個々の検証や改善に留まらず、全体最適を目指した継続的なモニタリングやチューニングがなされ、その成果を広く公開している点は、今後の発展や波及効果、実用的価値の観点からも高く評価でき、また、長く地域に根差し、空調技術の伝承と多くのイノベーション創出を両立するとの強い威信も感じられる」と評価された。

本業績の主たる評価点は以下の通りである。

- (1) 方位毎に熱環境・光環境・視線遮断・眺望に配慮したコンピューテーショナルデザインを行い、室用途・外観を考慮したファサード計画を実施するとともに、シミュレーションや実測を駆使し、本建物における最適な自然換気の利用法を確立している。また、無線通信により室内温度分布をリアルタイムで確認し、施設管理・施設利用・研究に役立てるなど、カーボンニュートラル時代を先導する研究施設として計画・運用されている。
- (2) 地下水熱とバイオマス CHP（コージェネレーション）排熱を利用した省エネ熱源システムおよび蓄電池設備の導入により、熱源のシステム COP 向上と電力自給率の増大を実現している。これにより、今後の再生可能エネルギー大量導入を見据えた計画や運用に関わるノウハウを蓄積するとともに当学会学術講演会などにおける公開に努めている。
- (3) ヒューマンセントリックな空調を目指し、汎用デスクに後付け可能なパーソナル空調機（前面吹出型、



写真1 空気調和衛生工学会賞表彰式
(東京都港区明治記念館にて)

腹部吹出型)を開発するとともに、快適な冷暖房を実現する吹出方法・温度調節機能を検証し、執務者の快適性向上にも寄与している。また、2種類の外調機(デシカント外調機/冷却除湿外調機)の性能比較により、その特徴を分析・把握している。

3. カーボンニュートラル大賞受賞^{4),5)}

カーボンニュートラル大賞の表彰式の様子を**写真2**に示す。受賞内容の詳細については、文献6)を参照のこと。

カーボンニュートラル賞は、一般社団法人建築設備技術者協会によって2012年度に制度を創設されたもので、建物のCO₂排出量をできるだけゼロに近づける「カーボンニュートラル化」に資する建築設備を表彰するものである。賞の選考は二段階あり、まず応募業績の所在地に関わる当協会支部ごとのカーボンニュートラル賞選考委員会で「カーボンニュートラル賞」を選考された後、その中から大賞選考委員会により

「カーボンニュートラル大賞」などが選考され表彰される。本業績も当協会の関東支部でカーボンニュートラル賞を受賞した後、カーボンニュートラル大賞を受賞した。

本賞の受賞において評価された点は以下の通りである。

- ・潜熱分離空調等の先進的な設備導入、地下水熱とバイオマス CHP (コージェネレーション) 排熱を利用した省エネ熱源システムなどの省エネ・再エネとともに、電力オフグリッドを目指した電源システムとその最適制御など高度な技術を導入し、先進性・独創性のある取り組みにチャレンジしている点。
- ・継続的な環境性能検証に取り組み、運用実績では施設全体で「Nearly ZEB」、オフィス棟で「ZEB」を達成している点。
- ・太陽光発電、バイオマス発電の再エネで約8割を賄い、グリーン電力の購入と合わせ、カーボンニュートラルに挑戦する意欲的な物件である点。

4. ASHRAE Technology Awards 関連⁷⁾

ASHRAE Technology Awards (1999年～、毎年開催)は、省エネ・快適性やユーザの健康などを兼ね備えた、革新的な環境建築に対する世界最大規模の技術賞である。審査には、設計時の性能だけでなく、実運用データによる裏付けが求められるため、建築・設備関係者からも高い信頼を集めている。今回の受賞は、まず日本のJapan ChapterでFirst Placeを受賞した後、世界を15地域に分け、各地域の最優秀賞を選ぶ、シンガポール、韓国、台湾などを含むRegion XIII (アジア地域)におけるFirst Place (最優秀賞)の評価を得た。これにより全世界最優秀選考の地域代表に選出され、ASHRAE Technology Awardでは、Category Commercial Building (New) (商業施設新築部門)でSecond Placeを受賞した。

ASHRAE Technology Awards 2024の選考プロセスを図1にASHRAE Region XIIIの受賞式の様子を**写真3**に示す。

ASHRAE Technology Awardsでの評価のポイントを以下に示す。



写真2 カーボンニュートラル大賞表彰式
(東京都港区建築会館にて)



写真3 ASHRAE Region XIII表彰式
(台湾台中市にて、写真中央は、ASHRAE会長のGinger Scoggins氏)



図 1 ASHRAE Technology Awards 2024 の選考プロセス

(1) 【新開発技術】大容量蓄電池用エネルギーマネジメントシステム

本施設では、大容量蓄電池を最適制御する新たなエネルギーマネジメントシステム（EMS）を開発・導入、本 EMS では、敷地内電力負荷及び日射量を数日先まで予測し、太陽光発電およびバイオマス CHP の予測発電量を基に蓄電池の蓄電/放電の最適制御を行うことで、オフィス棟の電力オフグリッド化を実現、外部電力網に頼らない施設運用が可能である。

(2) 【新開発技術】冷暖房の省エネ化に有効な地下水熱を直接利用した2つの空調システム

地下水熱を用いた空調の実現に向け2つの技術を開発し、執務スペースに導入した。

① システム天井対応放射パネル

従来、天井放射パネルは室内で画一的に制御されることが一般的であったが、ここでは負荷分布に応じて細かく制御するシステムを開発し、冷温水の搬送動力の削減を図った。600mm 角パネル 12 枚を 1 ユニットとし、パネル表面の温度に応じて送水を制御している。

② 3種のパーソナル空調機

個人の温冷感覚に合わせて冷暖房が可能なパーソナル空調機を開発している。執務スペースでパーソナル空調機を利用するワーカーを対象とした温熱環境の満足度調査からは、高い評価が確認できた。

(3) 再生可能エネルギーを利用した熱源の高効率な運用で、環境負荷を最小化

本施設では、中央監視システムをクラウド化することで、専門の設備管理者が常駐せずとも全ての機器を統合的に管理するとともに、下記システムの効率的な運用・迅速な改善に寄与している。

① 地下水熱の利用

年間を通じた地下水熱の水温モニタリングから安定した平均温度（16.6℃）であることを把握、この利用により、夏季のエネルギー消費効率（COP）は平均 7.8 と、空冷 HP チラーの場合（4.1）に対して非常に高効率な運用を実現した。この地下水熱は、本施設の冷熱需要の 63%を賄っている。

② バイオマス CHP（CHP：Combined Heat and Power、熱電併給）

高効率運用（総合効率 77%）により、施設全体の空調の温熱需要のほとんど（91%）をバイオマス CHP の熱で賄うことに成功。バイオマス CHP は2機を設置し交互に定期メンテナンスを可能とし、安定運用に寄与している。

5. おわりに

本報では、高砂熱学イノベーションセンターでの業績が評価され 2023 年度に受賞した空気調和・衛生工学会賞技術賞、建築設備技術者協会カーボンニュートラル大賞、ASHRAE Technology Awards を中心として各賞への応募内容や評価点などについて説明した。

今回の受賞に当たっては、三菱地所設計、竹中工務店、関電工、ヤマトの各社、早稲田大学田辺先生及び田辺研究室、東京大学赤司先生及び赤司研究室の皆様にご指導、ご協力頂きました。関係者の方々には誌面を借りてお礼申し上げます。

文 献

- 1) 空気調和・衛生工学会：第 61 回空気調和・衛生工学会賞審査報告，空気調和・衛生工学，Vol.97,No.7，p.10-11 (2023.7)
- 2) 高砂熱学工業(株)，プレスリリース：https://www.tte-net.com/article_source/data/news/files/20230515_1.pdf，(2023.5)
- 3) 木村健太郎ほか：高砂イノベーションセンターにおける環境・設備計画と実施，空気調和・衛生工学，Vol.97,No.7，p.37-42 (2023.7)
- 4) 建築設備技術者協会：第 11 回カーボンニュートラル賞選考結果報告，建築設備士，2023 年 7 月号，p.37-46 (2023.7)
- 5) 高砂熱学工業(株)，プレスリリース：https://www.tte-net.com/article_source/data/news/files/20230614_1.pdf，(2023.6)
- 6) 清水昭浩：第 11 回カーボンニュートラル賞事例発表「高砂熱学イノベーションセンター 環境負荷低減と知的生産性向上を両立した研究施設」，建築設備技術者協会 2023 年度「建築設備士の日」記念事業，(2023.11)
- 7) 高砂熱学工業(株)，プレスリリース：https://www.tte-net.com/article_source/data/news/detail/2023/496.html，(2023.9)

ABSTRACT

Our initiatives in design, construction, and operation at the Takasago Thermal Engineering Innovation Center were recognized. In 2023, we received the Award for Distinguished Technologies Category in the Building Mechanical Service System Category from SHASE (the Society of Heating Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan). In addition, we received the Carbon Neutral Award Grand Prize from JABMEE (Japanese Association of Building Mechanical and Electrical Engineers) and the ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Technology Awards in the Commercial Buildings Category (New), and more. A summary of application details and evaluation points for each award will be provided.

高砂熱学イノベーションセンターにおける 環境・設備計画と実施

木村健太郎・平原美博・清水昭浩・柴田克彦
小林功・羽鳥大輔^{*1}・武藤友香^{*1}・高椋敦士^{*1}
金子英宏^{*2}・牧野内絵理^{*2}・岡田怜^{*3}・北澤結人^{*4}
田辺新一^{*5}・鶴飼真成^{*5}・赤司泰義^{*6}・宮田翔平^{*6}

Environmental Facility Planning and Execution at the Takasago Thermal Innovation Center

Kentaro Kimura・Yoshihiro Hirahara・Akihiro Shimizu・Katsuhiko Shibata
Isao Kobayashi・Daisuke Hatori^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}・Atsushi Takamuku^{*1}
Hidehiro Kaneko^{*2}・Eri Makinouchi^{*2}・Satoshi Okada^{*3}・Yuto Kitazawa^{*4}
Shin-ichi Tanabe^{*5}・Masanari Ukai^{*5}・Yasunori Akashi^{*6}・Shohei Miyata^{*6}

高砂熱学イノベーションセンターは、2023年に当社が創立100周年を迎えることを記念し2020年1月に竣工した。「地球環境負荷低減と知的生産性向上を両立するサステナブル建築」を設計コンセプトとし、建築的には日射遮蔽と高断熱を図りつつ、自然換気や自然採光を積極的に取り入れた。設備的には快適性を考慮した省エネルギーへの取り組みに加え、バイオマスCHPや太陽光発電、地下水熱利用といった再生可能エネルギーの活用と蓄電池の組み合わせにより、カーボンニュートラルを実現した。また環境技術への興味の誘発と伝承を行っていく地域貢献の役割も担っている。



写真1 高砂熱学イノベーションセンター

1.はじめに

高砂熱学イノベーションセンター(写真1、図1)は、2023年に創立100周年を迎える当社が、既存の技術研究所と本社機能の開発部門の一部を集約した新たな研究開発拠点として計画した施設である。「地球環境負荷低減と

※本論文は、空気調和・衛生工学第97巻第7号を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計 *2 株式会社竹中工務店 *3 株式会社関電工 *4 株式会社ヤマト *5 早稲田大学 *6 東京大学

高砂熱学イノベーションセンター報 No.37 2023.

知的生産性向上を両立した「サステナブル建築」を設計コンセプトとして 2020 年 1 月に竣工、同 3 月に運用開始した。空調を軸に持続可能な社会の実現を目指す当社は、本施設を脱炭素社会に導く先駆的建物とすべく、ZEB 実現のために徹底した省エネルギー化技術と既成概念の枠にとらわれない創エネルギー技術を採用した(図2)。また、室内環境では知的生産性向上を促すヒューマンセントリックな技術とシステムを積極的に採用し、従業員が実際に日常的な運用・改善を行い、迅速に研究開発にフィードバックできる環境を構築することで、将来の社会還元を目標としている。加えて、当社初代社長である柳町政之助から始まる空調技術の伝承を目的とした展示施設を併設することで、隣接する小学校児童を含む多くの方々に空調を広く知って頂くと共に、空調技術の歴史や仕組みを伝承する施設を目指した。さらに、平常時からエネルギーを自立して運用することにより、非常時でも地域に安心を提供し、地域共生しながら成長する助け合いの場となることを目指している。

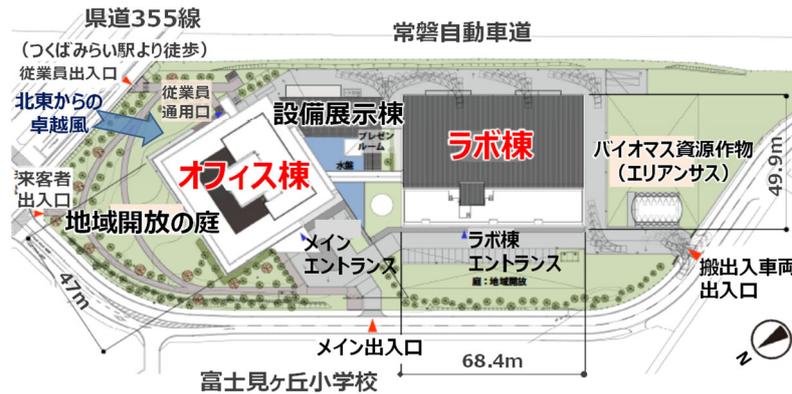


図 1 施設配置図

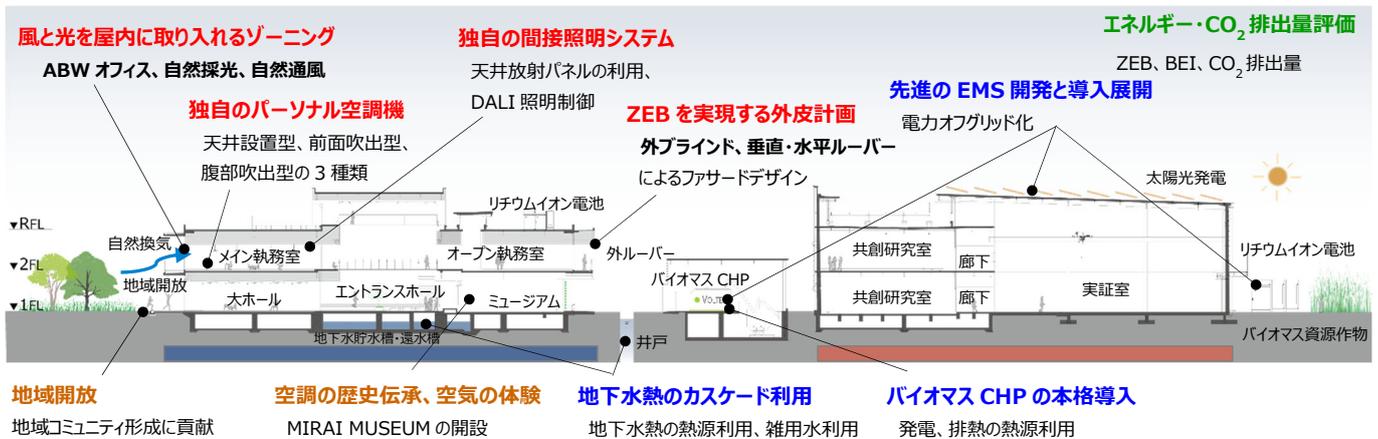


図 2 環境への取り組み概念図

2. ZEB を実現した建物計画と性能検証

次世代の新たな技術創出に向け、豊かな敷地を活かして低層のラボ棟とオフィス棟を連絡通路で結ぶ構成とし、風・光・緑・水などを建物内部に積極的に取り入れることで、「イノベーションを誘発する空間」への変革を目指した。

2.1 風と光を屋内に取り入れるゾーニング

オフィス棟は、中間期の自然換気を効率的に行うために、北東の卓越風を積極的に取り込み東西方向に間仕切りのない一体空間としセミオープンなエリアとした。上部開口を設けた中央の吹抜けからは各所に自然光が差し込み、照度や明るさ感を得られる計画とした。ラボ棟との結節点となる南西側には展示やワ

イガヤスペースを、眺望の良い北側には主執務室を配置した。中間期に自然換気の有無によるエネルギー消費量を比較検討したところ、自然換気（日中平均 5.7 回/h 相当）することにより空調の一日の消費電力が 33.4%削減となり、自然換気による省エネ効果を確認できた。

2.2 環境スクリーンとしての外皮計画

南面のバルコニーには、雲量解析と太陽位置によりスラット角度を自動制御する外ブラインドを設置した（写真 2）。自然換気のため開口を大きく設けた東西面は、外壁をセットバックさせバルコニーの奥行きを深くとり、緩衝領域を設けることにより室内外の一体利用を可能とした。東西面バルコニーの外ルーバーは、コンピューショナルデザインにより、日射取得熱量、室内光環境などを目的関数としてルーバーの形状と角度の最適化を行っている。



写真 2 各方位のファサード

2.3 新規開発した間接照明システム

主執務室には、新規開発した天井放射空調パネルと組み合わせた間接照明システムを導入し、机上面アンビエント照度を 300 lx とし不足分をタスクライトで補うタスク・アンビエント照明方式とした。間接照明はアンビエント照度で机上面 300 lx となるように 65%光を上限として運用しており、65%調光時の消費電力は約 4.2 W/m²である。従来の机上面 700 lx の照明の消費電力を 7 W/m²と想定すると、ベースの消費電力は約 40%の省エネとなった。さらに、照明制御を活用し、晴天日(2021年3月18日)では従来照明と比較して約 64%の省エネ（消費電力：約 2.5 W/m²）を実現した。

2.4 パーソナル空調機の開発と導入

本オフィスでは、執務者個人の代謝量や温熱嗜好に応じて温熱環境を自由に選択可能とするために、ABW(Activity Based Working)を導入しているが、その選択幅に更なる多様性を持たせるために、個人の端末で操作する 3 種類のパーソナル空調機を開発し、導入した（図 3、写真 3）。パーソナル空調機は、夏季には地下水を冷熱源とし、冬季にはバイオマス CHP の排熱を温熱源としている。また、外気投入量をベースにミニマム設計した外調機は、人位置検知による外気量制御を行い、確実な換気と省エネを両立した。

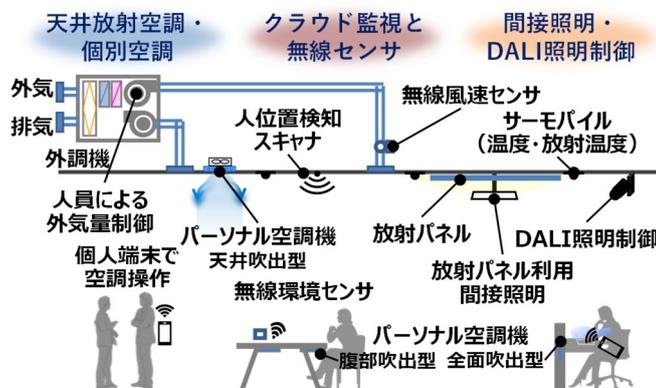


図 3 オフィス棟執務室の空調設備



写真3 パーソナル空調機

2.5 環境認証制度における評価

執務エリアでは、各シーズンでアンケート調査と詳細室内計測を行い、快適性の面においても運用改善を行った。アンケート結果からは、「非常に満足」～「どちらでもない」の回答が、夏季は75%、冬季は80%を占め、高い満足度が得られた。また、各種評価制度の認証も取得した。BELS認証では、標準入力法(WEBプログラム)での計算で BEI=0.09 となり、BELS 評価★5 つの Nearly ZEB を獲得した(創エネを除くと BEI=0.33)。CASBEE-WO の評価では、総合評価 86.6 点の S ランク認証を取得した。特に知的生産性の評価は全て 4.0 以上のスコアと高かった。建物の総合環境性能評価として、LEED®v4 では、72 点の Gold 認証を取得した。

3.カーボンニュートラルを見据えた省エネ・創エネ・蓄エネシステム

電力系統へ逆潮不可という制約のなか、地下水から冷熱と井水、木質チップから電力と温熱、太陽エネルギーから電力を取得し、さらに敷地内に大容量蓄電池を設置することでオフグリッドでも建物が自立するエネルギー計画とした(図4)。

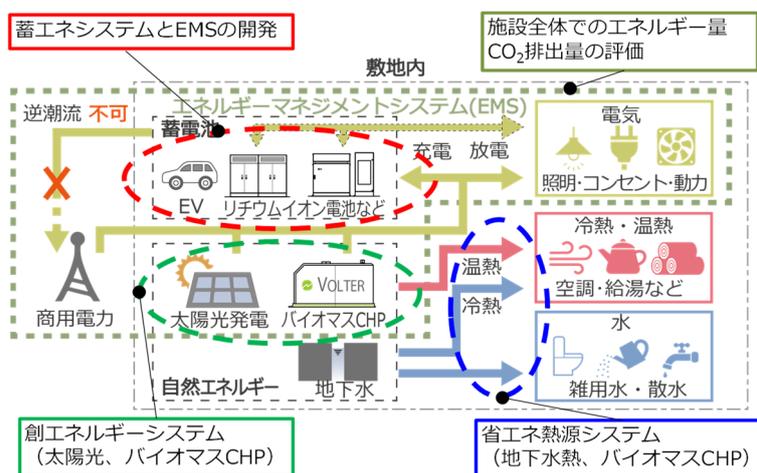


図4 省エネ・創エネ・蓄エネシステム概要図

3.1 地下水熱とバイオマス CHP 排熱を利用した省エネ熱源システム

汲み上げた地下水をエントランスの床放射、日中の外調機や放射空調などへ利用した後、さらに水熱源ヒートポンプユニットの熱源水とする三段階の熱のカスケード利用を行い搬送動力の削減や熱源機の高効率化を図った(図5)。2021年度の地下水熱利用の運転実績を図6に示す。地下水の汲上温度は、年間を通じて16°C前後で安定して供給されていた。地下水熱利用による冷水熱量とヒートポンプチラーで供給され

る。冷水熱量を比較したところ、施設全体の冷水熱量のうち、63%を地下水熱で処理しており、安定した冷熱源であることを確認した。一次ポンプを含む冷水システム COP は、地下水熱が 6.5 に対してヒートポンプは 4.1 となり地下水熱利用の省エネ性を確認できた。また、給排水衛生用途で使用した水のうち、約 80% は地下水だったことから、上水使用量削減の面からも CO2 排出量削減に寄与していることを確認した。

図 7 に 2021 年度のバイオマス CHP の排熱利用熱量の推移を示す。年間の積算値で見ると、バイオマス CHP の排熱のうち約 43% を空調、約 54% を木質チップの乾燥工程で使用されていた。木質チップの含水率管理に自身の排熱を使用し、省エネと安定稼働を実現した。その他、吸着式冷凍機で 1.7%、給湯で 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/年に対して、排温水の搬送動力は 46 GJ/年であり、少ない投入エネルギーで空調できていることを確認できた。また、施設全体の温水熱量のうち、93 % をバイオマス CHP の排熱で処理しており、安定した温熱源であることを確認した。

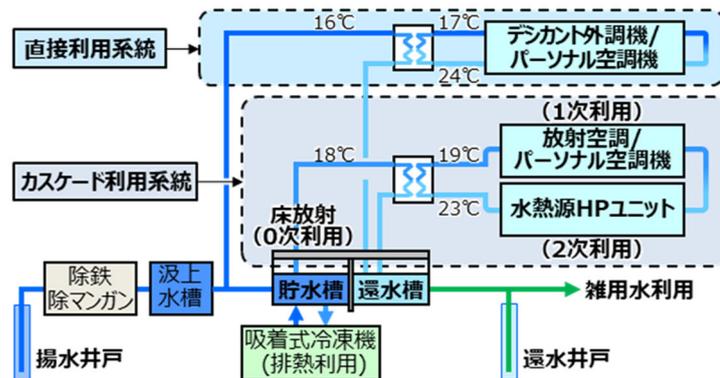


図 5 地下水熱利用の概要図

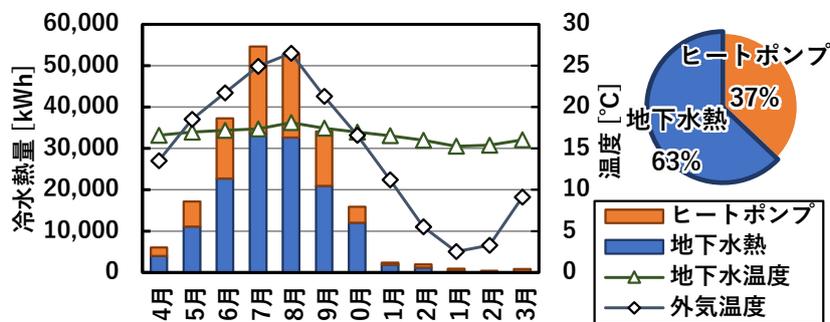


図 6 地下水熱利用の運用実績（2021年度）

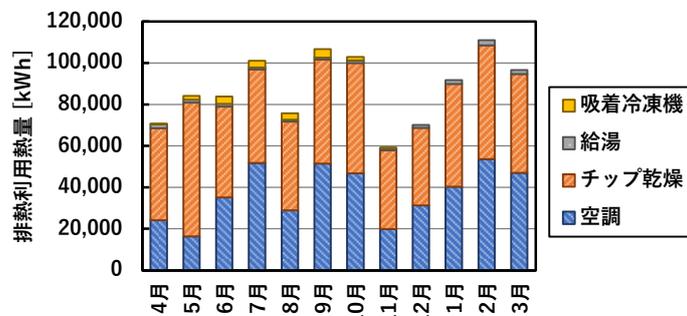


図 7 バイオマス CHP の排熱利用熱量の実績（2021年度）

3.2 太陽光とバイオマス CHP を組合せた創エネルギーシステム

創エネルギー設備として、太陽光発電 200 kW に加えて、ラボ棟の実験装置の 24 時間稼働を想定し電力の安定供給可能なバイオマス CHP を 2 台導入し、バイオマスエネルギーをベース電源とした。運用段階においては、課題の把握と運用改善を繰り返すことで、バイオマス CHP の安定稼働と排熱の有効利用を実現した。

3.3 電力オフグリッドを目指した蓄電池の増設と EMS の開発

立地の逆潮流（売電）不可という制約の中、大容量蓄電池（リチウムイオン電池 2,965 kWh+NAS 電池 1,200 kWh、オフィス棟の電力消費量の約 5 日分に相当）を増設して電力オフグリッド化を目指した。また、エネルギーマネジメントシステム（EMS、図 8）を開発し、AI を用いて天気予報などから太陽光発電量を予測し、建物消費電力量予測と合わせて蓄電池や発電機の最適制御を行った。これらの取り組みにより、電力自給率が 80%（バイオマス発電比率：55%）と高い水準を実現し、BCP の観点からも非常に優れたシステムであることを示した（図 9）。

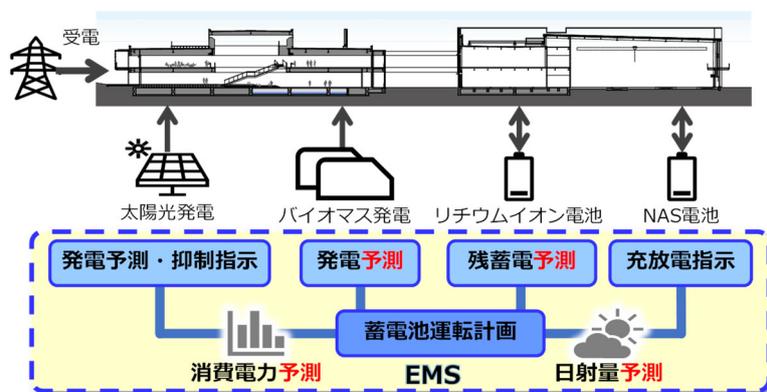


図 8 EMS の概要

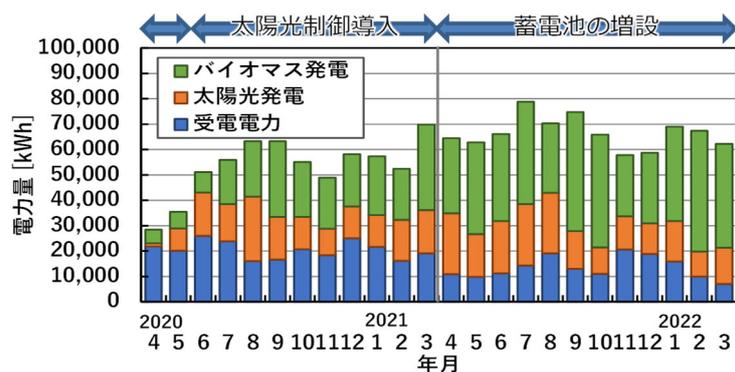


図 9 受電電力量及び再生可能エネルギー電力量の推移

4. 施設全体でのエネルギー量・CO2 排出量の評価

4.1 棟別エネルギー消費量の推移

図 10 に負荷単位の電力量より算出したオフィス棟とそれ以外（ラボ棟、設備展示棟等を含む）の電力消費量の推移を示す。2021 年度の年積算値は、執務や来客対応のオフィス棟では、初年度の 2020 年度に比べて 21 %減少したのに対し、実験を行うラボ棟では実験装置等の稼働増加により 43%の増加となり、敷地

全体では10%の増加となった。



図 10 棟別消費電力量の推移

4.2 ZEB 達成状況の評価

竣工後2年間継続的に運用改善を行った結果、敷地全体では Nearly ZEB、オフィス棟で『ZEB』を達成した(図 11)。基準値は、旧技術研究所における4年間の実績値平均(敷地全体 3,150 MJ/(m²・年)、オフィス棟 1,389 MJ/(m²・年))を使用した。エネルギー消費量原単位では、2021年度に施設全体で 1,397 MJ/(m²・年)、オフィス棟で 489 MJ/(m²・年)となった。

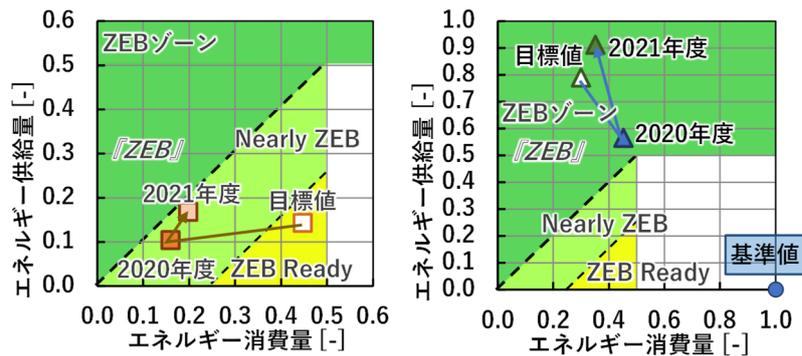


図 11 ZEB チャート達成状況(左:敷地全体、右:オフィス棟)

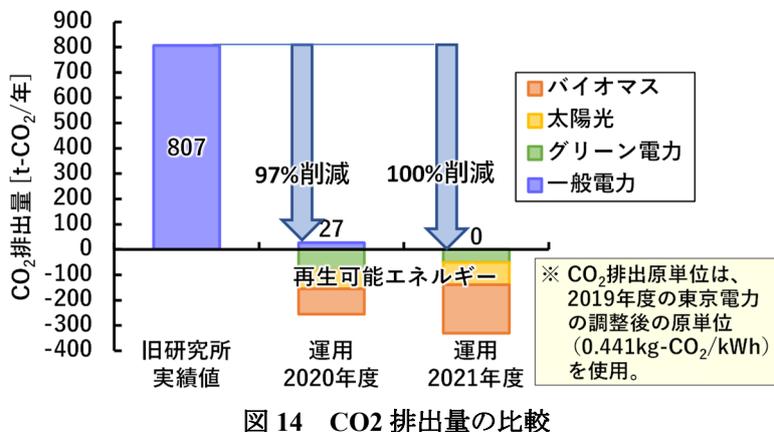
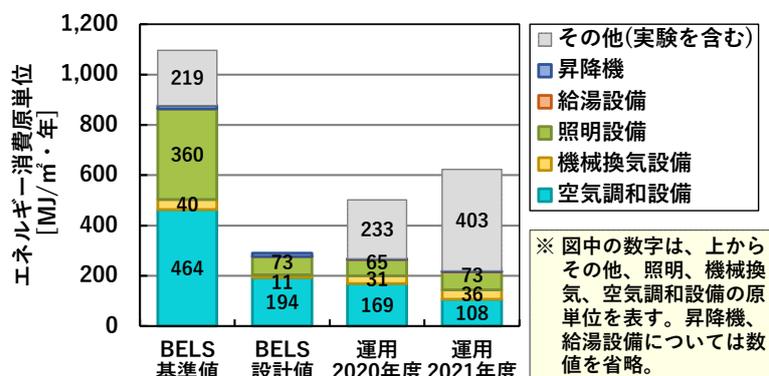
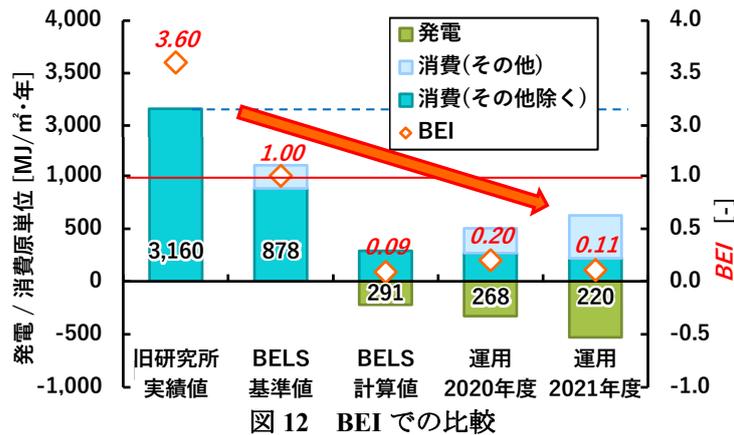
4.3 施設全体 BEI の評価

図 12 に BEI 及び発電/消費原単位の比較を示す。BELS の基準値に対する再エネを含む計算値は 0.09 であるのに対し、2021 年度の運用実績値では 0.11 となった。その他に相当するコンセントや実験装置等を除く原単位で見ると、BELS を上回る結果となった。

図 13 にエネルギー原単位の内訳を示す。その他を除く消費エネルギー原単位で比率の大きい空調和設備では運用実績値が BELS の設計値を下回り省エネ運用となっており、照明設備は BELS の計算値とほぼ同程度であることが確認できた。

4.4 CO2 排出量での評価

図 14 に CO2 排出量の基準値と本施設の実績値を比較した。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 100%カーボンニュートラルを達成している。これは、バイオマス CHP、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ためである。



5. 空調技術の伝承と地域に貢献する拠点づくり

5.1 空調技術の伝承の場

本施設は当社が担ってきた空調技術を足掛かりとして環境創造を情報発信する場でもある。当社の初代社長である柳町政之助のアンドロイドが環境や空調技術を紹介するプレゼンルームに加え、地域の子供たちが“空気”について体験し学べるミュージアム空間を設置した。

5.2 地域貢献への取り組み

地域貢献として施設廻りのオープンスペースを利用して「たかさごマルシェ」（野菜直売、施設内見学）などの開催により地域交流の場の提供を行っている。また、当社で開発した災害時避難所用空調ブースや

体育館向け空調システムを市内の小学校に提供するなど、地元つくばみらい市と安全や教育などの面で連携を進めている。

6. おわりに

本施設では、潜熱分離と個別空調を組合せた空調システムやエネルギー自立型施設の EMS など先進性の高い技術を導入するとともに、通常は建築設備として採用されることの少ないバイオマス CHP や大容量蓄電池を組合せ、逆潮流不可という制約の中、オフグリッドを見据えた独創性の高いエネルギー需給システムを構築した。

今回本施設に導入した設備システムは、実際に運用を行いながら改良・改善を図った上で、世の中に展開し社会実装を目指していく。また、本施設の空調設備や再生可能エネルギー設備を学びの場として積極的に地域に公開し、情報発信を継続していくことで、地域の発展にとどまらずカーボンニュートラルの実現に向けて社会貢献していきたい。

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering Innovation Center was completed in January 2020 to commemorate the 100th anniversary of our founding in 2023. The design concept of this building is "sustainable architecture that achieves both reduction of global environmental load and improvement of intellectual productivity".

We have adopted an architectural design that allows natural ventilation and natural lighting while aiming for solar shading and high heat insulation. In terms of equipment, we have introduced energy-saving systems such as desiccant outdoor, radiant, and individual air conditioning. In addition to solar power generation, we have introduced biomass gasification power generation and large-scale storage batteries as renewable energy. Furthermore, we pump up groundwater and actively use it for air conditioning.

エネルギー自立型サステナブル研究施設 —竣工 3 年後の ZEB 達成状況の評価と対策—*

清水昭浩・相澤直樹・木村健太郎
羽鳥大輔*¹・武藤友香*¹・田辺新一*²

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center

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

Akihiro Shimizu・Naoki Aizawa・Kentarō Kimura
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、2023年度で4年目となる。この間、系統に逆潮流できないという制約のもと、再生可能エネルギーを有効に活用するため、2021年4月に大容量蓄電池を増設して運用を開始した。本報では、竣工後3年間の建物の供給／消費エネルギーの運用状況、ZEBの達成状況、CO₂排出量の評価結果について報告する。合わせて、再生可能エネルギーの活用状況についてバイオマスガス化発電、太陽光発電、蓄電池の稼働状況についても報告する。

1. はじめに

本研究では、地球環境負荷低減と知的生産性向上の両立を目指して設立したエネルギー自立型のサステナブル研究施設に関して竣工後も継続的にシステム実証に取り組んでいる。

本施設は、既報^{2,3)}で報告したように発電機での余剰電力が逆潮流不可という制約の中、再生可能エネルギーを有効に活用するために、竣工1年後に蓄電池の増設を行い運用している。本報では、BEMSに蓄積された運用データを活用することにより、3年間の建物の年間エネルギー需給の推移、ZEBの達成状況、CO₂排出量の評価について報告する。併せて、再生可能エネルギーであるバイオマスガス化発電（以下、バイオマス CHP）、太陽光発電、蓄電池の稼働状況についても報告する。

2. 年間供給／消費エネルギーの年間実績

2.1 年間受電電力及び供給電力量

図1に2022年度の消費電力量の推移を、図2に受電電力量及び供給電力量の推移を示す。2022年度は、12月頃から大型実験装置が稼働を始めたため消費側、供給側共に大幅に電力量が増加している。

図3に過去3年間の年間電力量の推移を示す。2022年度は前年度に比べて、実験装置のあるラボ棟他の消費電力量が343 MWh、86%増加し、それに伴い受電電力量も大幅に増加している。その結果、電力自給率は2021年度の80%から2022年度は58%まで低下した。

※本論文は、2023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

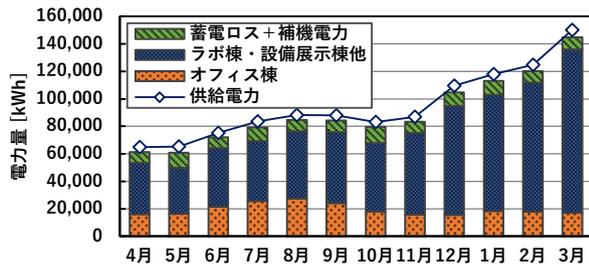


図1 消費電力量の推移(2022年度)

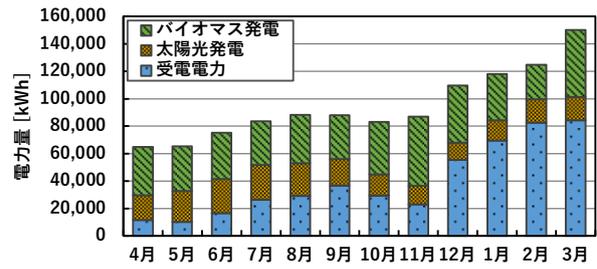
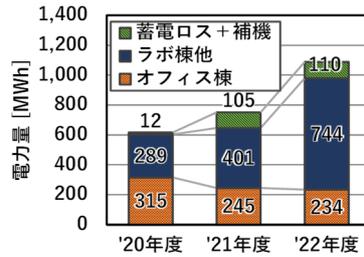
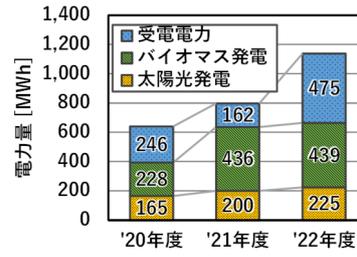


図2 受電電力量及び供給電力量の推移(2022年度)



a) 消費電力量



b) 供給電力量

図3 過去3年間の年間電力量の推移

2.2 バイオマス CHP の運転状況

図4にバイオマス CHP の発電量の推移を示す。2022年度の年間発電量は439 MWhで、前年度に対しては0.5%の漸増で、目標値560MWh(80kW×7,000h)に対しては78%の出力であった。目標値に対して開き大きい主な要因は、4~6月は電力需要が少なかったため電力出力を70%の絞り運転としたこと、8月は長期休暇期間の停止、2月はトラブル発生による停止である。トラブルによる停止時間は前年度より減少しているが、今後更なるトラブル要因解析と再発防止策の実施により運転時間を増やしていく。

2.3 太陽光発電の運転状況

図5に太陽光発電の発電量の推移を示す。2022年度の年間発電量は225 MWhで、前年度に対して13%増で、目標値の年間222 MWhに対しては101%となり目標を達成した。2021年度までであった蓄電池満蓄電時の太陽光発電の出力抑制はほとんど発生していない。月ごとの発電量を2021年度と2022年度で比較すると、4月が前年度より大きく減少している。当施設に程近い茨城県つくば(館野)の気象庁の気象データ⁴⁾で比較すると、平均全天日射量が2021年4月の19.5 MJ/m²に対して2022年4月は16.3 MJ/m²と約16%減少しており、これが発電量の減少した大きな理由と考えられる。一方、目標値を上回った6、7、9月は平均全天日射量が過去10年間の平均値と比較して4~8%増加しており、太陽光発電量はその年の日射量に大きく左右されることが分かる。

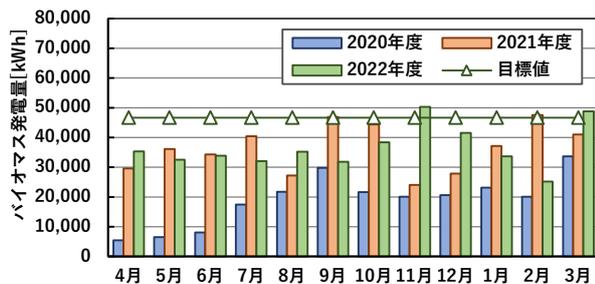


図4 バイオマス CHP の発電量の推移

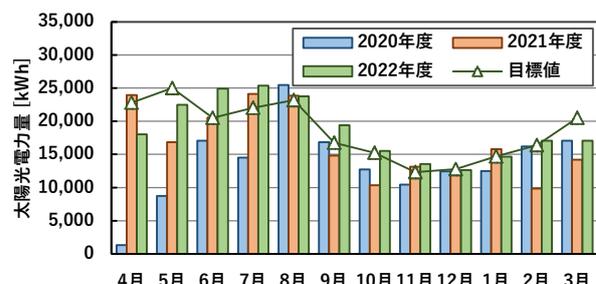


図5 太陽光発電量の推移

3. ZEB の達成状況及び CO₂ 排出量の評価

3.1 ZEB の達成状況の評価

図 6 に ZEB チャート⁹⁾での達成状況の評価を示す。基準値は旧技術研究所の過去の実績値としている。敷地全体 (図 6 a)) では、エネルギー消費量は増加しているが目標を下回り Nearly ZEB を達成している。オフィス棟 (図 6 b)) についても前年に引き続き『ZEB』を達成している。

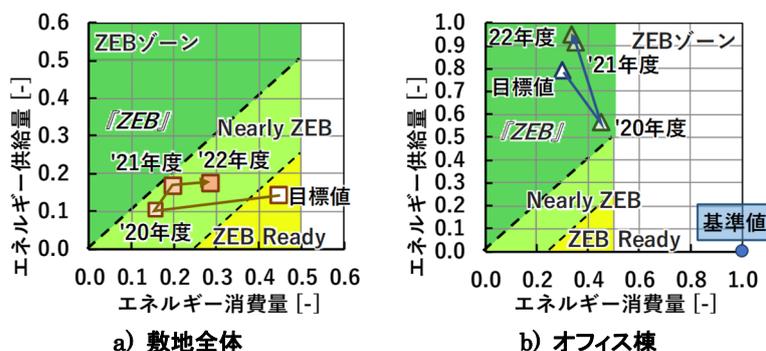


図 6 ZEB の達成状況

3.2 CO₂ 排出量の評価

図 7 に CO₂ 排出量の基準値 (旧技術研究所の実績値) と当施設の実績値の比較を示す。2020 年度は基準値に対しては 97%削減であったが、2021 年度以降は 100%削減となり、化石燃料を一切使用しない 100%カーボンフリーを達成している。図中のグリーン電力は東京電力より購入している水力発電由来の受電電力である。

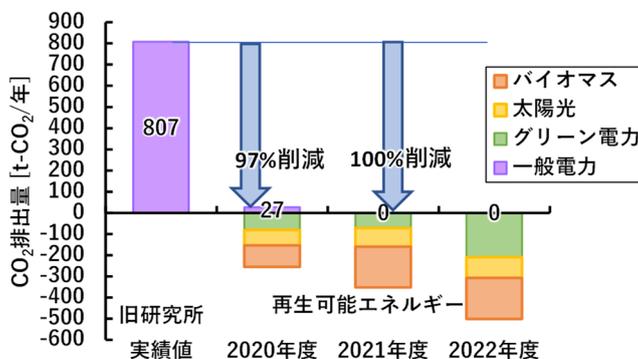


図 7 CO₂ 排出量の削減状況の比較

4. オフィス棟のエネルギー消費量の評価

4.1 エネルギー消費原単位の推移

図 8 にオフィス棟の一次エネルギー消費量原単位の過去 3 年間の実績値と運用段階試算値 (以降、試算値)、設計段階目標値 (以下、目標値) の比較を示す。試算値は、運用段階での空調運転時間等の運用実績をもとに BEST プログラムで試算した結果⁹⁾である。実績値は運用開始後年々減少しており、2022 年度実績値では 466 MJ/m²・年となった。試算値では計算対象外とした給湯・衛生と展示設備を除くと、385 MJ/m²・年となり試算値を下回る結果となった。一方、設計段階目標値 417 MJ/m²・年に対しては、2022 年度実績値でも 12%超過しており、更なる省エネルギーの推進が望まれる。

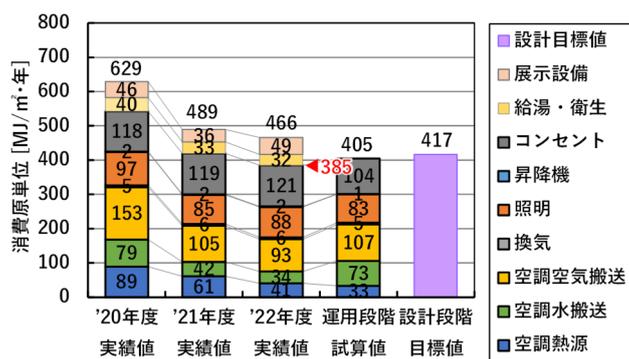


図8 オフィス棟のエネルギー消費原単位の比較

4.2 系統別エネルギー消費原単位の推移

図9にオフィス棟の3年間の用途別エネルギー消費原単位の推移を示す。空調熱源・空調水搬送・空調空気搬送の項目については運用改善の効果もあり年々減少しているが、照明・コンセントはほぼ変化がなくなっている。今後更に省エネルギーを進めていくために、代表週を選定し、設備の運転状況や消費電力量の評価を行った。

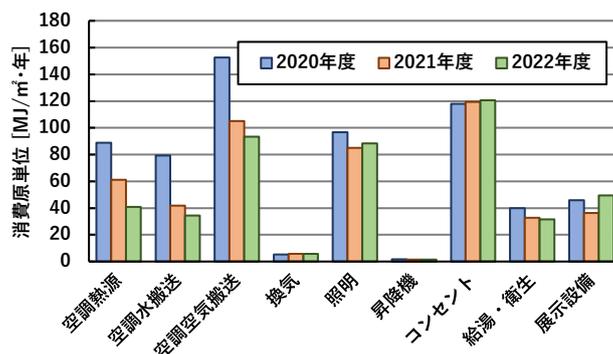


図9 オフィス棟の用途別エネルギー消費原単位の推移

4.3 代表週での用途別運転状況の評価

4.3.1 代表週の外気条件と消費電力量

オフィス棟での消費電力量が年間で最大となった2022年8月1日を含む1週間を代表週として選定した。

図10に代表週の外気条件と消費電力量の推移を示す。外気条件で見ると週の前半の8/1~8/3は晴天の日が続き最高気温は8/3で36.6℃となっている。一方、週の後半は曇天が続き最高気温も30℃以下となっている。消費電力量は、平日の8/1~8/5の6時から18時頃まで空調設備の運転及び実験装置の稼働に伴い増加し、最大は8/1の午後に敷地全体で258kWh、オフィス棟で110kWhとなっている。8/6、8/7は土日であるが、8/6の午前中オフィス棟で空調が運転され負荷が発生している。

4.3.2 代表週でのオフィス棟2階の系統別消費電力量

図11に執務室のあるオフィス棟2階(床面積:約2,280m²、会議室・更衣室・トイレを含む)の用途別消費電力量の推移を示す。

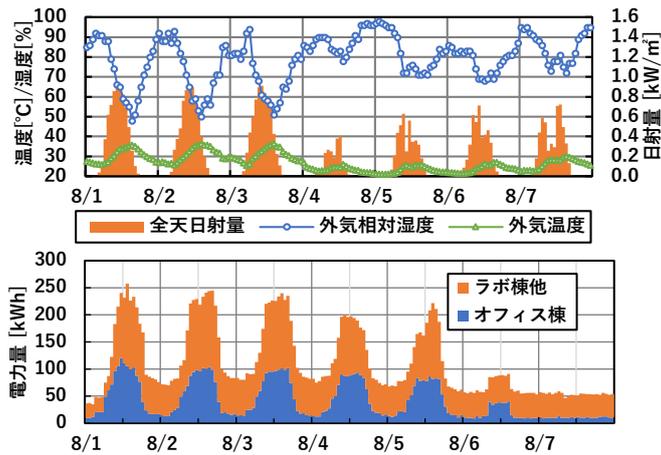


図 10 2022 年度夏季代表週の外気条件(上)と消費電力量

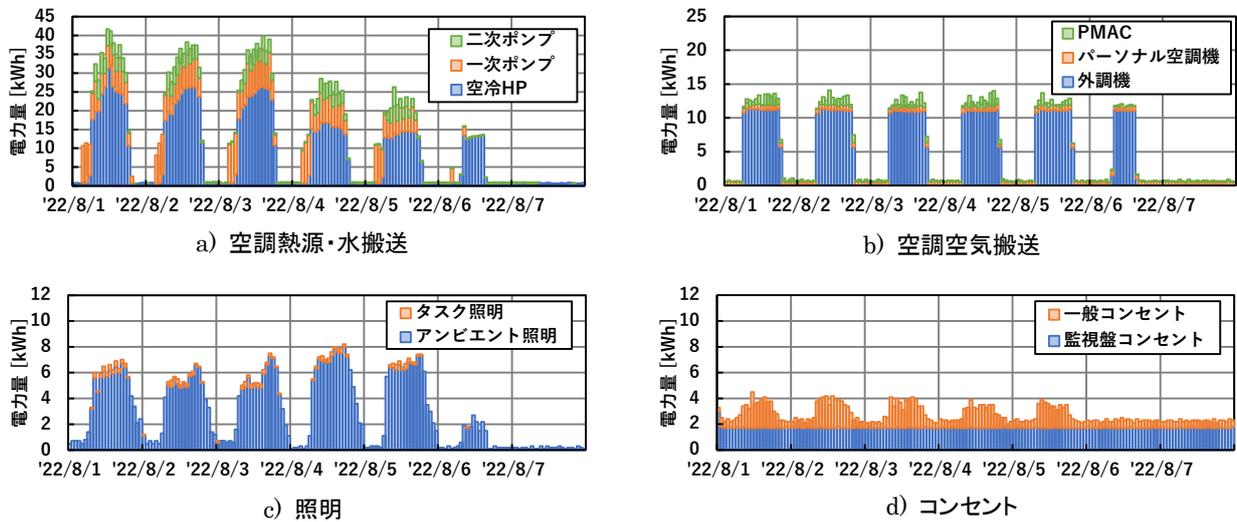


図 11 2022 年度夏季代表週の用途別消費電力量(オフィス棟執務室系統)

(1) 空調熱源・水搬送

オフィス棟 2 階の主熱源は空冷ヒートポンプチラー（ポンプ内蔵型）で、平日は 6:00～18:30 のスケジュールで運転していた。空冷ヒートポンプは、執務系統の外調機のみ冷水を供給しており、外気の変化に合わせて消費電力量が変動している。一次ポンプ、二次ポンプは、地下水熱利用系統のポンプと温水ポンプで、2 階だけでなく 1 階の外調機系統へも冷水・温水を供給している。

(2) 空調空気搬送

空調空気搬送の 8 割以上が外調機の消費電力で、この期間は夏季の性能検証で、外調機を最大風量運転としていたため、平日日中は常時約 11 kW の消費電力量となっている。室内 CO₂ 濃度や会議室の使用状況に沿った変風量運転を行うことにより更なる電力量削減の余地がある。

パーソナル空調機（デスク空調機・DCFCU）での消費電力量は、空気搬送の約 1 割で非常に小さな値となっている。会議室に設置された水熱源ヒートポンプ（PMAC）の消費電力量（コンプレッサ消費電力量も含む）も 1 割以下で、室の使用に合わせて運転されている。

(3) 照明

照明の消費電力の大半はアンビエント照明で、晴天の週前半の日中は 5～7 kW、単位面積当りの平均で 2.4 W/m²、曇天の週後半の日中で 6～8 kW、平均 3 W/m²と非常に小さくなっている。この結果は 2021 年 3

月の実測結果⁷⁾ともほぼ同等で、昼光利用と机上面照度 300lx の運用の効果が表れている。一方、タスク照明での消費電力は照明全体に占める割合は 3%程度と非常に小さい。

(4) コンセント

コンセントは、監視盤での消費電力量が 63%を占め、平日・休日に関わらず約 1.7kW ほぼ一定で推移している。一般コンセントの使用先は、パソコン、モニタ等であるが、日中では 2 kW 前後で推移しており、単位面積当りでは約 1 W/m²であった。

以上の結果より、照明・コンセントでの更なる省エネルギーは難しく、今後は空調熱源及び水・空気搬送を中心とした省エネルギーが重要であると評価した。

5. 蓄電池の運転状況の評価

5.1 蓄電池の充放電量の推移

図 12 にリチウムイオン電池の充放電量の推移を示す。年間の放電量を充電量で除した充放電効率で評価すると 75%となり、メーカーの公称の充放電効率を下回ってはいるが、前年度と比較すると性能劣化は見られない。

一方、NAS 電池は本体の充放電効率では 76%であるが、蓄電池のセルを 300℃以上に保つために必要な補機電力を含めると 33%という結果であった。

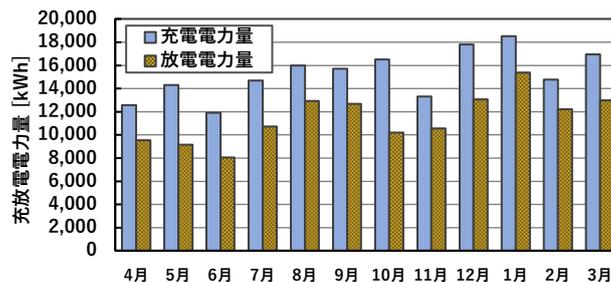


図 12 リチウムイオン電池の充放電量の推移

5.2 蓄電池の代表日での運転状況

図 13 に 4.3 で選定した夏季代表週での蓄電池及び発電機等の運転状況を示す。蓄電池の運転は基本的には週始めに満充電にして平日に放電し休日に充電を行う計画としているが、この週は 8 月 1 日の夜から 8 月 3 日の朝にかけて受電電力を 50 kW に上げたため、週末のリチウムイオン電池の残蓄電量は 1,250 kWh 程度となった。結果的には受電電力としてはほぼ 10 kW 受電で賄える状況であった。

図 14 に大型実験装置が稼働した後の代表的な一週間（2023 年 3 月 13 日～19 日）の運転状況を示す。消費電力量が最大で 400 kWh 近くまで増加したため、受電電力量も大幅に増加し、平日は最大で 200 kWh、休日で 100 kWh の受電を行っている。リチウムイオン電池及び NAS 電池に関しては、平日に放電してほぼ蓄電量を使い切るとともに、週末に充電することで翌週の受電電力の平準化に備えることができた。逆潮流が不可という制約の中、年間の受電電力量及びピーク電力の最小化を目指して、これらの結果を含めて現在エネルギー管理システムの改良に取り組んでいる。

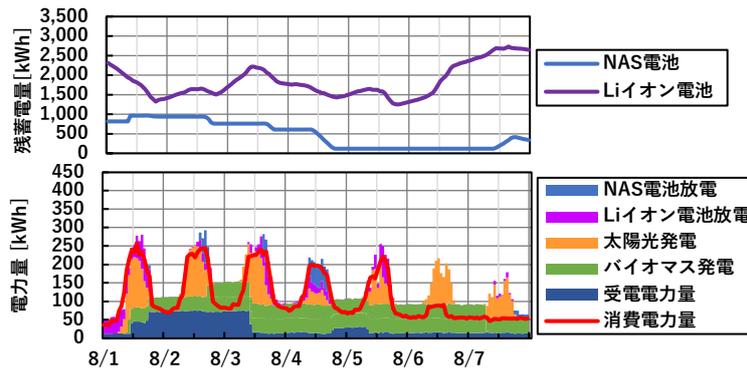


図 13 夏季代表週の蓄電池の運転状況

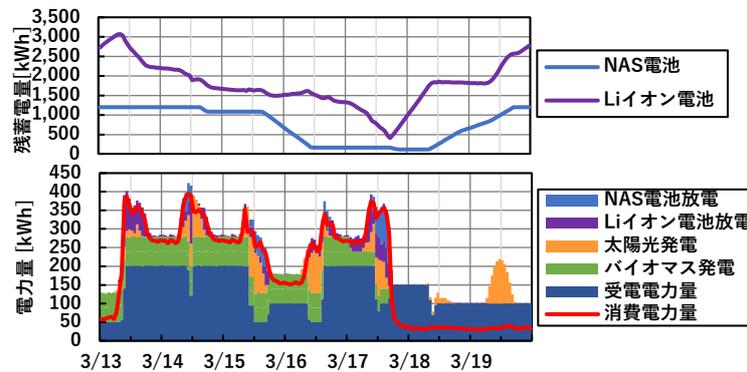


図 14 大型実験装置稼働後の代表週の蓄電池の運転状況

6. おわりに

本報では、BEMS データを活用して竣工後 3 年間の年間供給／消費エネルギーや再生可能エネルギーとして導入したバイオマス CHP や太陽光発電の運転状況、ZEB の達成状況や CO₂ 排出量の評価を行った。さらに、用途別消費電力量や蓄電池の運用状況の評価結果について報告した。今後も BEMS データを活用し運用段階での改善を行い、更なる省エネルギーを図っていく予定である。

文 献

- 1) 清水昭浩ほか：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価（第 28 報）竣工後 3 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.169-172 (2023.9).
- 2) 清水昭浩ほか：同上（第 16 報）ZEB 達成状況の評価と対策，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，p.221-224(2021.9)
- 3) 清水昭浩ほか：同上（第 18 報）竣工後 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)
- 4) 国土交通省気象庁：過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>
- 5) 空気調和・衛生工学会：「ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の定義と評価方法」，p5(2015)
- 6) 武藤友香ほか：エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証（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，p.189-192(2022.9)
- 7) 高正明ほか：エネルギー自立型サステナブル研究施設の電気設備の運用解析，電気設備学会全国大会，p.213-216(2021)

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.

需給予測を用いたエネルギー自立型システムの構築 長・短期記憶(LSTM)を用いた電力需要予測結果の 評価およびケーススタディ[※]

高橋利知・松浪佑宜

柴田克彦・川上理亮

高原^{*1}・宮田翔平^{*2}・赤司泰義^{*2}

Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction
Evaluation of power demand prediction results and case studies applying Long Short-Term Memory (LSTM)

Masanori Takahashi・Yuki Matsunami
Katsuhiko Shibata・Yoshiaki Kawakami
Yuan Gao^{*1}・Shohei Miyata^{*2}・Yasunori Akashi^{*2}

建物を送配電網からの電力に依存せずに運用するためのシステム構築を目指す本研究において、建物の電力需要を予測する手法を確立することが課題の一つである。本報では、予測モデルに長・短期記憶(LSTM, Long Short-Term Memory)を用い、電力需要を予測するケーススタディを通して精度等の評価を実施した。その結果、説明変数として日時、外気温度、施設の稼働日といった比較的少ない情報でも電力需要が予測可能であることが示された。また、施設運用の変化を反映する説明変数として外調機の運用パラメータを用いることで、予測精度が向上することが示された。

1. はじめに

本研究では、送配電網からの電力に依存せず、再生可能エネルギーで自給自足できるエネルギーマネジメントシステム(EMS)の構築を目指している。その中で、建物内のエネルギー需要及び発電量の予測結果に基づき、様々な目的関数や制約条件に対し最適にシステムを制御する手段として、モデル予測制御(MPC)を採用した¹⁾。高砂イノベーションセンター報 No.36【イノベーションセンター特集】第6報²⁾では、研究対象とする高砂熱学イノベーションセンター(TIC)の熱源・空調システムの運用課題に対する対策として2つのMPCを定式化し、エネルギーシミュレーションにより検証した結果について述べた。

本報では、比較的少ないパラメータで1週間先までの建物内のエネルギー需要を予測する深層学習モデルを構築し、予測結果の評価および予測精度の向上に向けたケーススタディを実施した。

※本論文は、2023年度空気調和・衛生工学会大会講演論文を加筆修正したものである。

^{*1}九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 エネルギーシステムデザイン研究センター

^{*2}東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻

2. 評価対象建物

前述したとおり、本研究では TIC（2020 年 1 月竣工）を対象建物とした³⁾。TIC はオフィス棟・ラボ棟・設備展示棟から構成されている。TIC の配棟図を図 1 に示す。本報告では、オフィス棟のみを対象に電力需要予測を実施した。学習には 2020 年 8 月～2021 年 12 月の計測値を用いた。TIC では計測値を 1 分毎で集計しているが、本研究で開発中のエネルギーマネジメントシステムの時間粒度に合わせて、消費電力の 10 分あたりの平均値を学習対象として使用した。

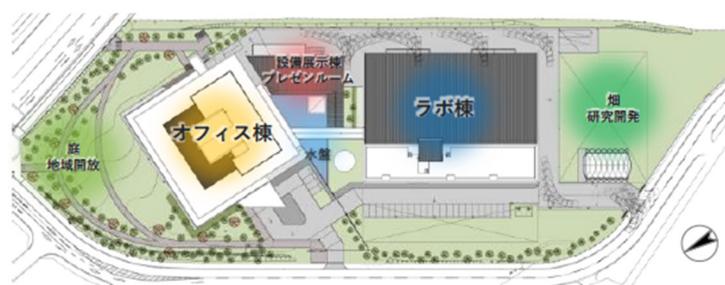


図 1 TIC の配棟図

3. 深層学習モデルの概要・評価方法

3.1 モデル概要

本研究で構築したモデルの概念図を図 2 に示す。一般的なニューラルネットワークと同様に、入力層・中間層・出力層から構成されており、予測したい期間の日時・外気条件・建物の運用条件などを入力層に与えることでその期間の消費電力の時系列予測が出力されるモデルを構築した。モデルにはリカレントニューラルネットワーク (RNN) の一種で長期間の時系列予測が可能な LSTM を採用した。RNN は直前の出力値を次ステップの入力値の一部とする再帰構造を持つことで時系列データの学習・予測が可能なニューラルネットワークで、時系列データの予測に広く用いられている。学習時には、入力データと消費電力がセットのデータを学習用と評価用でそれぞれ用意し、評価用の入力データを用いて予測した結果と実測値の誤差の総和が最小となるように学習させた。

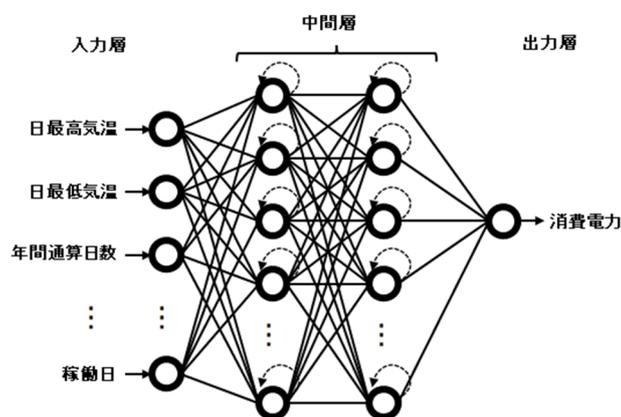


図 2 構築したモデルの概念図

3.2 学習および評価方法

学習用、評価用、予測用のデータにはそれぞれ、2020年8月～2021年7月、2021年12月1日～7日の1週間、2021年12月10日～30日の3週間のデータを用いた。予測用データの期間（以下、予測期間）における消費電力の平均値は23.1 kW、最大値は106.2 kWであった。実運用では気象予報等の誤差を含むデータを入力データとすることが想定されるが、本報告では、モデルの評価および予測の際の入力データに実測値を用いた。また、各ケーススタディにおいて、予測期間の予測結果について誤差評価を行った。評価指標には、平均絶対誤差 MAE (Mean Absolute Error) および平均絶対パーセント誤差 MAPE (Mean Absolute Percent Error) を用いた。それぞれの導出式を式(1), (2)に示す。MAPE は絶対誤差を実測値で除しているため、実測値に対して過大な予測をすると数値が大きくなる評価指標である。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_t - \hat{y}_t| \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{y_t} \times 100 \quad (2)$$

(\hat{y}_t : 時刻 t の電力需要の予測値、 y_t : 時刻 t の電力需要の実測値、 n : 予測期間のデータ数)

4. 評価結果とケーススタディ

4.1 入力データが外気条件と建物の運用条件のみの場合

学習および予測の際に入力層に与えた8個の入力データを表1に示す。年間通算日数は、1月1日を1として起算した整数値である。曜日は月曜日を0とする0～6の整数値とした。外気条件に関するデータには、TICの屋上で測定された外気温度データ（測定精度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ）から算出した一日の最低気温および最高気温を選択した。これらは、気象予報として最長1週間先まで取得可能な数値であり、実運用において最長1週間の予測をすることを考慮して採用した。稼働日は、非稼働日の定義を土日・祝日・長期休暇の取得推奨日とし、稼働日を1、非稼働日を0として与えた。

表1 入力データ

日時	年間通算日数
	月 曜日 (0-6) 時間 [hour] 分 [min]
外気条件	日最低気温 [$^\circ\text{C}$] 日最高気温 [$^\circ\text{C}$]
	稼働日 (0 or 1)

予測期間のうち、2021年12月10日～16日の予測結果を図3に示す。また、予測期間の誤差評価を表2に示す。予測結果の概形からは、日中の電力需要を過大に予測しているが、電力需要の変動傾向をおおむね予測できている様子がみられた。入力データが外気条件および建物の運用条件のみでも、電力需要の傾向を予測可能であることが示唆された。一方で、予測誤差はMAEが7.78 kWと、予測期間の平均値23.1 kWに対して33.7%となっており、MAPEも50.3%と誤差が大きい結果となった。稼働日（2021年12月10日, 13日-16日）の実測値と予測値を比較すると、早朝に山なりの電力需要を予測している。また、電力需要の立ち上がりや立ち下がりのタイミングが実測値とずれている様子が散見された。これらが、誤差評価値が大きく算出された原因と考える。

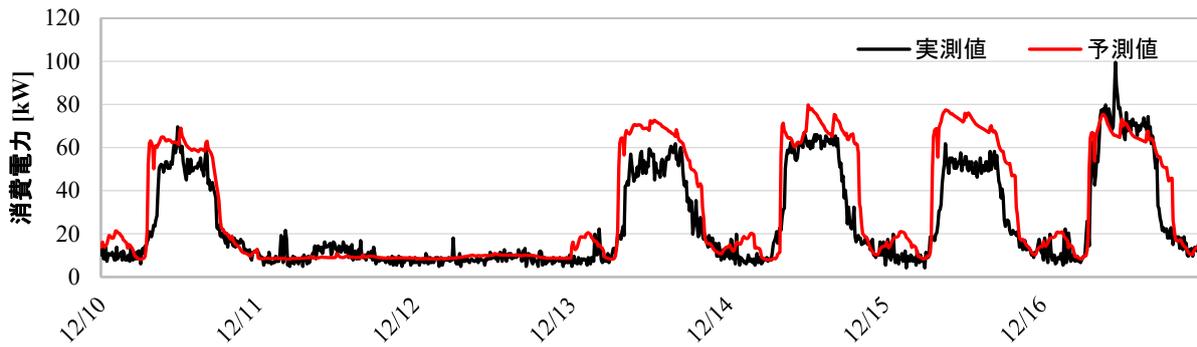


図3 2021年12月10日～16日の電力需要の予測結果

表2 予測結果の誤差評価

		予測誤差
MAE	[kW]	7.78
MAPE	[%]	50.3

学習期間と予測期間の特徴の違いを分析するために、2020年と2021年の12月における稼働日の電力需要の時刻別平均値を図4に示す。予測期間における稼働日の電力需要についても同様に図4に示した。学習用データに用いた2020年では、予測結果で見られたような早朝の山なりの電力需要があったことがわかる。また、2021年と比べて日中の電力需要が約10～20kWほど高く、電力需要の立ち上がり時刻が早く、立ち下がり時刻が遅い様子がみられた。したがって、学習用データに用いた2020年12月の電力需要の変動が予測結果に大きく影響し、予測誤差の原因となったと考えられる。また、図中の2020年の消費電力と予測値の傾向が酷似していることから学習用データの影響が大きいことがわかる。学習用データの期間に依存しない予測をするためには、学習用データ期間と予測期間での施設運用の変化を反映でき、電力需要の変動に連動するような入力データの追加が必要と考える。

次に、2021年12月27日～29日の予測結果を図5に示す。これらの日は予測の際に非稼働日と指定したが、稼働日の日中と同程度の電力需要を予測した。これは、学習用データで非稼働日と定義した日の中に稼働日と同程度の電力需要が生じた日が存在したためであり、実際の電力需要に合わせて稼働日と修正することで解消されることがわかっている（図5中の青線）。土日・祝日に勤務者がいたことや長期休暇の取得推奨日と勤務者の休暇取得日にズレがあったことが原因と考えられる。学習用データ中の稼働日を定義する方法や、実運用において予測期間の稼働日を取得する方法に検討が必要と考える。

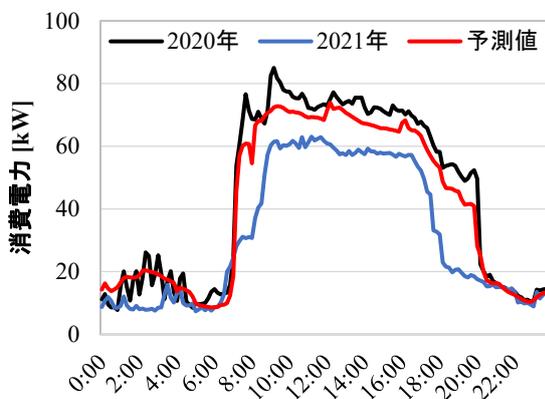


図4 電力需要の変動の比較

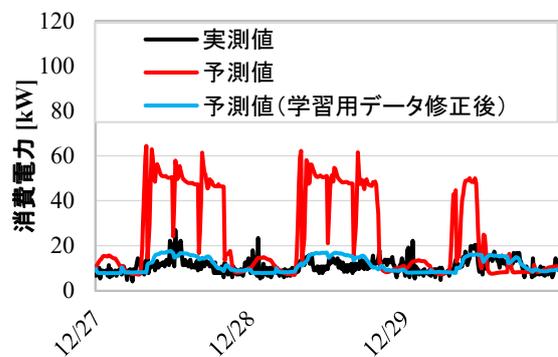


図5 非稼働日の予測結果

4.2 入力データに外調機の給気風量を追加した場合

4.1 の検討で、2021 年よりも 2020 年の電力需要が大きかったことがわかった。その原因として、2020 年に新型コロナウイルスの感染対策による換気回数の増加で熱需要や電力需要が大きかったことや、運用開始から 2 年目の 2021 年で施設運用の省エネ対策が進んだことが考えられる。学習期間と予測期間の電力需要の違いを比較するために、2020 年と 2021 年における 12 月の消費電力量の内訳を図 6 に示す。明らかに 2020 年の電力需要が大きく、外調機・熱源において顕著に差が表れている。したがって、外調機または熱源設備の運転パラメータを入力データとすることで施設運用の変化を考慮できると考えられる。一方で、TIC では空冷チラーのほかに地下水熱や木質バイオマスガス化発電機（ラボ棟に設置）の排熱を組み合わせ利用している。そのため、熱源設備のパラメータをオフィス棟の入力データとして利用するのは困難と考え、外調機の運転パラメータを入力データとして検討した。2020 年と 2021 年の 12 月の稼働日における外調機の給気風量の時刻別平均値を図 7 に示す。2021 年 12 月と比べて日中の給気風量が約 1,000 m³/h ほど大きく、給気風量の変化から外調機の起動時刻が早く、停止時刻が遅い様子がみられた。これらは、図 3 に示した電力需要の比較の傾向と類似していることから、学習用データ期間と予測期間での施設運用の変化を反映できる入力データとして期待できる。以上から、4.1 で示した 8 個のデータに外調機の給気風量の実測値を追加した 9 個の入力データとして再学習させた。

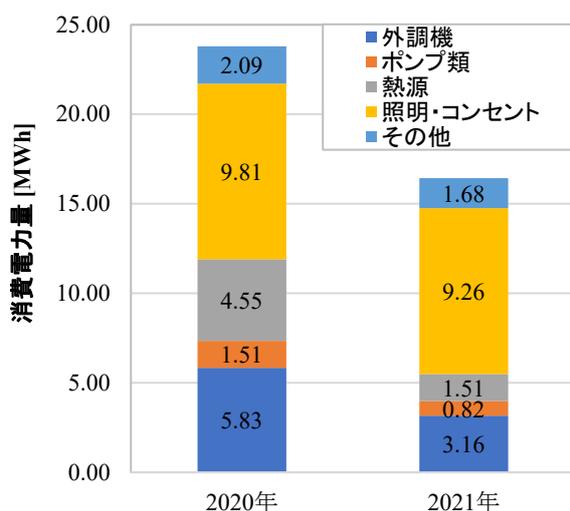


図 6 12 月の消費電力量の内訳

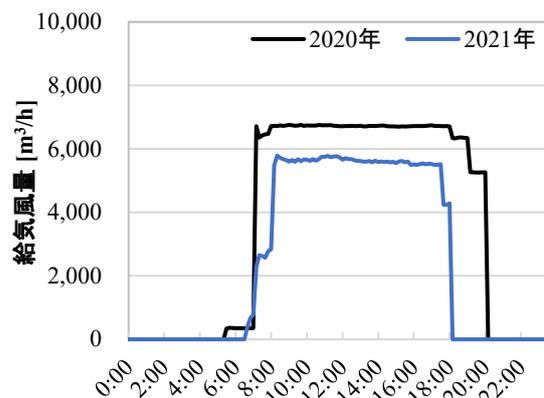


図 7 給気風量の変動の比較

再学習後の 2021 年 12 月 10 日～16 日の予測結果を図 8 に示す。予測の際には、入力データに外調機の給気風量の実測値を与えた場合（実測風量）と、実運用を想定して給気風量の設定値を与えた場合（設定風量）の 2 通りを実施した。また、予測期間の誤差評価を表 3 に示す。いずれの結果においても、入力データを追加する前と比較して電力需要の立ち上がりや立ち下りのタイミングのずれが小さくなり、それに伴って MAE および MAPE も小さくなった。したがって、TIC における運用の変化を反映する入力データとして、外調機の給気風量が有効であることが示された。また、実測風量と設定風量の場合で予測結果および誤差評価値にほとんど差がないことから、実運用においても外調機の給気風量の設定値から予測が可能であることが示された。

表 3 入力データを追加後の予測結果の誤差評価

		実測風量の場合	設定風量の場合
MAE	[kW]	5.03	5.04
MAPE	[%]	27.7	27.8

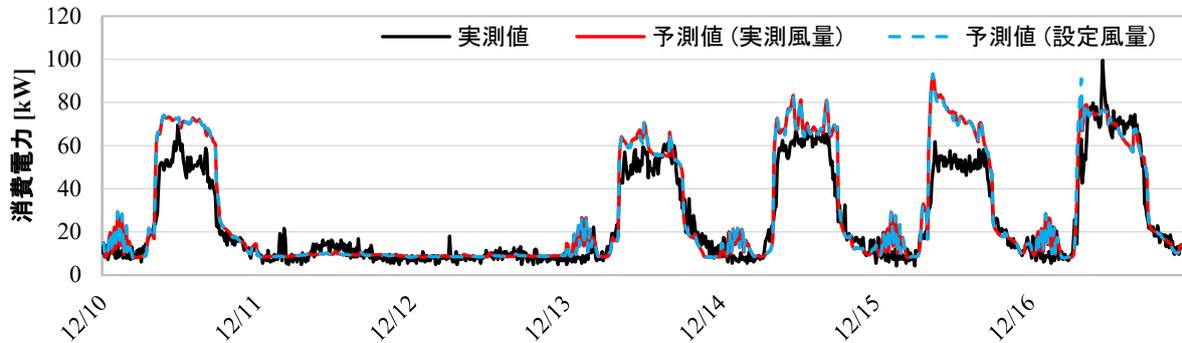


図 8 入力データを追加後の 2021 年 12 月 10 日～16 日の電力需要の予測結果

一方で、稼働日の早朝に見られた山なりの電力需要の予測や日中の電力需要の過大な予測については、入力データの追加による改善が見られなかった。これは、上述の電力需要の変動に対する外調機の寄与が小さいまたは寄与していないためであると考えられる。さらなる精度向上を目指すためには、これらの電力需要の変動に大きく寄与する機器等の運転パラメータを入力データとして追加する必要があると考える。

5. まとめ

本報告では、構築した深層学習モデルを用いて電力需要予測結果の評価およびケーススタディを行った。

1) 外気条件および建物の運用条件のみを特徴量とした場合でも、電力需要の傾向を予測可能であることが示唆された。一方で、学習用データに用いた電力需要の特徴が予測結果に大きく影響し、予測誤差の原因となった。

2) 空調機器の運転パラメータとして外調機の給気風量を入力データに追加することで、電力需要の立ち上がりや立ち下がりタイミングのずれが小さくなり、予測精度が向上したことを示した。一方で、外調機の給気風量だけでは運用の変化を完全に反映できなかつたため、さらなる調査が必要と考える。

文 献

- 1) MATSUNAMI Yuki, GAO Yuan, MIYATA Shohei, AKASHI Yasunori, SHIBATA Katsuhiko, KATAYAMA Kenichiro, HIRAHARA Yoshihiro: Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 1) Concept and problem identification from operational data, “空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(福島)”, IS-8(2021)
- 2) MATSUNAMI Yuki, GAO Yuan, MIYATA Shohei, AKASHI Yasunori, SHIBATA Katsuhiko, KAWAKAMI Yoshiaki: Development of a grid independent energy system using energy supply and demand prediction (Part 3) Designing Model Predictive Control by Energy Simulation, “高砂イノベーションセンター報”, No.36, p38-45(2022)
- 3) 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, 牧野内絵理, 粕谷文: エネルギー自立型サス

ティナブル研究施設の計画と実証評価（第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）”，B-24(2019)

ABSTRACT

The establishment of energy demand prediction methods, is one of the issues in our research in which we aim to develop an energy self-sufficient system for buildings. In this paper, we applied long-short-term memory (LSTM) to power demand forecasting and evaluated results by conducting case studies. The results showed that it is possible to predict power demand using features of date, outside temperature and building operation. In addition, it was shown that the prediction accuracy would improve by adding the Roof top unit operation as a feature.

ZERO WATER BUILDING EVALUATION AND CONSIDERATION AT TAKASAGO THERMAL ENGINEERING INNOVATION CENTER

Kosuke Osako¹, Uwais Roslan¹, Katsuhiko Shibata¹, Naoki Aizawa¹, Masayuki Otsuka²

ABSTRACT

To achieve carbon neutrality by 2050, Japan's Basic Energy Plan positions renewable energy sources, such as solar power, woody biomass, and geothermal energy, as important domestic energy sources. Although energy and resource self-sufficiency has been touted as part of this transition, concrete examples are lacking. The Takasago Thermal Engineering Innovation Center, which was completed in January 2020, has achieved an energy-self-sufficient system by combining renewable energy sources such as woody biomass gasification power generation, solar power generation, and geothermal water utilization with storage batteries. This report presents an overview of the equipment, water use, electricity, and thermal energy performances of the facility throughout the year. In addition, owing to the increasing interest in water resource conservation and reuse, this report proposes evaluation methods for zero-water building (ZWB) in relation to geothermal water and water utilization.

1. INTRODUCTION

The importance of building facilities to achieve carbon neutrality by 2050 is increasing, as buildings must be environmentally friendly with a focus on energy conservation and use of renewable energy while maintaining a comfortable environment inside the building. In the areas of water supply, drainage, and sanitary facilities, zero-water buildings (ZWBs) are attracting attention as buildings that not only save water and recycle water, but also recycle water resources to reduce the burden on the water supply and sewerage infrastructure. Under these circumstances, the Takasago Thermal Engineering Innovation Center (Fig. 1) was constructed in conjunction with the relocation of the former Technical Research Institute, based on the design concept of "a sustainable building that both reduces global environmental impact and improves intellectual productivity," and was completed in January 2020. This report provides an overview of the facilities and achievements of the groundwater heat utilization systems. The ZWB of the facility was estimated based on the definition provided by the U.S. Department of Energy. In addition, interpretations of the use of groundwater heat are discussed.



Location	Tsukubamirai City, Ibaraki Prefecture, Japan
Site area	Research Facilities
Building area	22,746.18m ²
Extended bed area	7,129.74 m ²
Total floor area	11,763.97 m ²
Number of stairs	2 above ground, 1 in tower
Building Height	15.455 m
Structure	steel construction, RC construction in part
Construction period	February 2019 - January 2020

Fig.1 Takasago Thermal Engineering Innovation Center

This article is update of “The 48th International Symposium on Water Supply and Drainage for Buildings (CIB W062), August 29-31, 2023, Leuven, Belgium.”

1 Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

2 Kanto Gakuin University

2. BUILDING OVERVIEW

2.1 Building and Facilities Overview

The facility consists of two main buildings: an office building (area of approximately 4,750 m²) with an exhibition area, café/restaurant, office space, and a laboratory building (area of approximately 6,050 m²) for experiments and analysis. The office building was arranged around a four-axis layout, and the façade was designed to match the heat and light environment in each direction to effectively take in the prevailing wind from the northeast and create a façade that is in line with the environment. Changing rooms, toilets, conference rooms, etc., which do not require natural ventilation or views, are located in corner areas, and high windows are used to reduce the solar load to the maximum extent possible. The interior and exterior surfaces of the roof slab were insulated to reduce the heat load. Fig. 2 presents an overview of the facilities installed to achieve ZEB. The building has achieved a significant reduction in energy consumption through the use of natural energy to reduce the air-conditioning load in the building plan and the introduction of advanced facilities, such as latent-sensible air conditioning. Photovoltaic power generation, combined biomass heat and power generation, and storage batteries have been introduced as renewable energy sources, while groundwater heat and water have been effectively used to reduce CO₂ emissions.

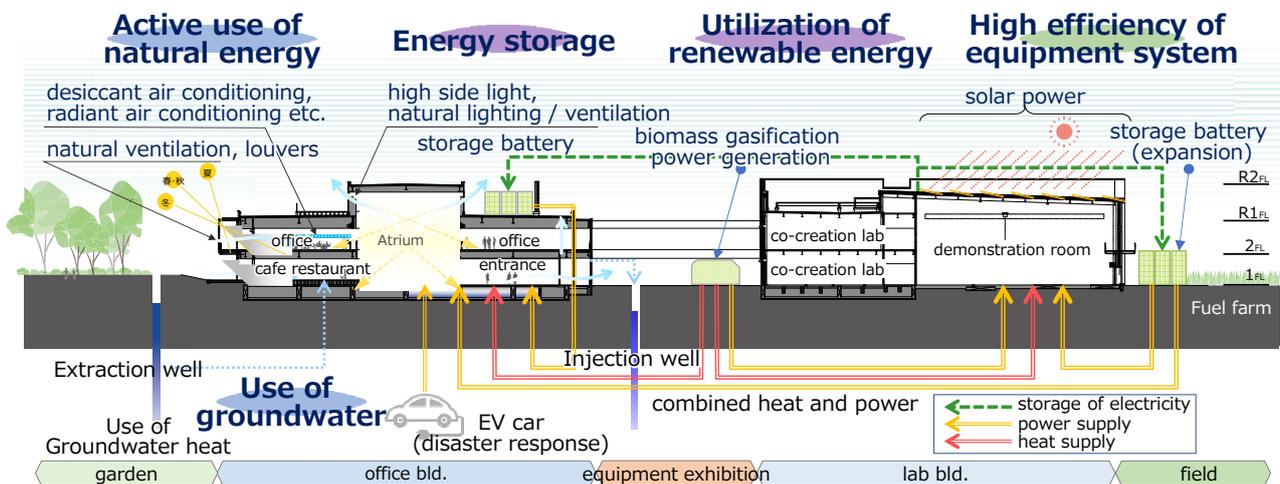


Fig. 2 Overview of equipment installed for ZEB

2.2 Certification

In acquiring certification under various evaluation systems, the company achieved a BEI of 0.09 and a BELS rating of *5 Nearly-ZEB (BEI = 0.33 if energy creation is excluded). In the CASBEE-Wellness Office (WO) evaluation, the building received an S-rank certification with an overall rating of 86.6 points, and in LEED v4, the building's comprehensive environmental performance evaluation received a gold certification of 72 points.

2.3 Evaluation of Energy and CO₂ Emissions

Simulations of the office building based on ASHRAE90.1_2010 for the former R&D center yielded a design value of -130 MJ/sqm/year compared to the baseline value of 421 MJ/sqm/year, with 131 % energy savings. The actual 2021 records show a further 14.3 % reduction in the proposed value through continuous operational improvements. Furthermore, the power generated by the PV panels and biomass CHP units would reduce the primary energy consumption to -263 MJ/sqm/year, or 162 % savings compared to the baseline, achieving the status of net ZEB (Fig. 3).

An aggressive use of renewable energy sources and a highly efficient system set-up and operation yielded an operational carbon emission of -159 t - CO₂/year (-33.4 kg - CO₂/sqm/year), conferring the status of “Zero Emission” to this building (Fig. 4). (The CO₂ emission baseline unit is 0.457 kg - CO₂/kWh according to the Tokyo Electric Power Co.).

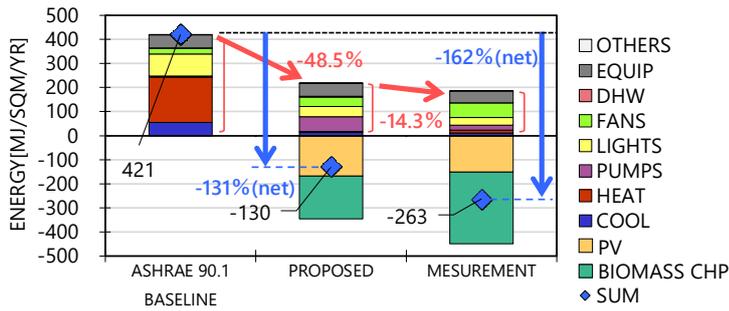


Fig. 3 Primary energy consumption

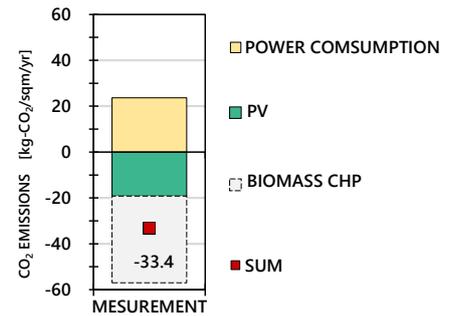


Fig. 4 Operational CO₂ emissions.

As a result of the above operational achievements, the center has been recognized as the leading facility for a carbon-neutral society in Japan and has received the Academic Award from the Society of Heating, Air-Conditioning, and Sanitary Engineers of Japan (SHASE) and the Carbon Neutrality Award from the Japanese Association of Building Mechanical and Electrical Engineers (JABMEE).

3. GROUNDWATER HEAT UTILIZATION SYSTEM

This section discusses the groundwater heat utilization system of the installed facilities. This system effectively utilizes groundwater heat and water, which contributes to energy and water conservation and carbon neutrality.

3.1 Overview of the groundwater heat utilization system

This facility uses groundwater heat and water effectively. Fig. 5 shows a schematic of the groundwater utilization. The system has two wells—a pumping well and a return well—both of which are approximately 150 m deep. The pumping and return wells are almost identical; however, the return well has a backwash pump to prevent blockage. Fig. 6 shows a schematic of the water-return process. Groundwater pumped from the pumping well is used for floor radiation at the entrance, daytime outdoor air conditioning, radiant air conditioning, etc., and is subsequently used as the heat source water for the water-source heat pump unit in a three-stage heat cascade. A portion of the heat-utilized groundwater is used for miscellaneous purposes, and the remainder is returned to the ground through a water return well.

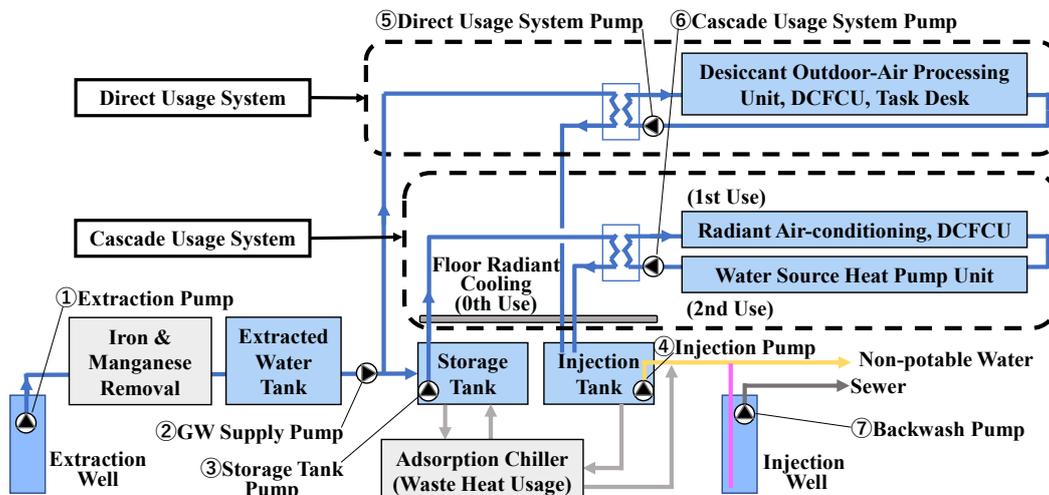


Fig. 5 Overview of the groundwater heat utilization system

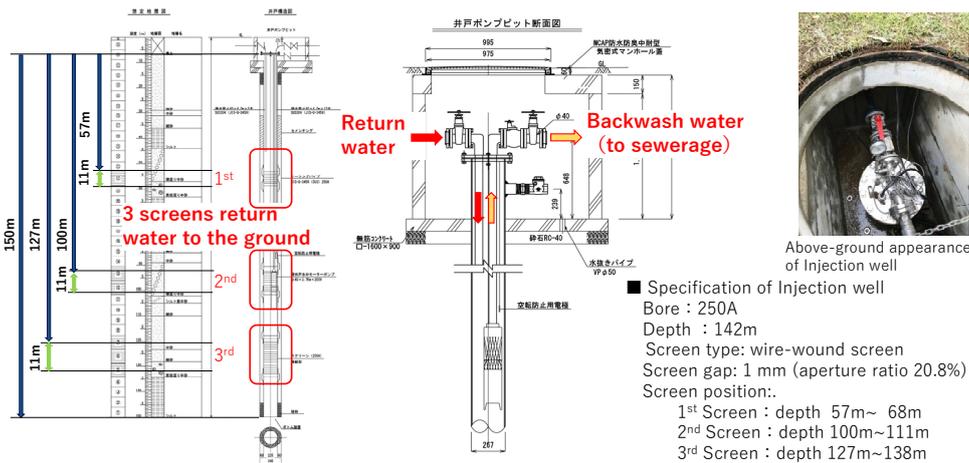


Fig. 6 Overview of injection well

Fig. 7 shows the actual groundwater heat use in FY2022. The amount of cold heat is the sum of cold heat from the direct groundwater heat utilization system, cascade utilization system, and cold heat from heat pumps. “Groundwater Heat” in Fig. 7 is the amount of cold heat used by exterior air conditioners, radiant panels, personal air conditioners, and individual air conditioners with water heat sources. “Heat pump” is the amount of cold heat produced by air-source heat pumps. Groundwater heat accounts for approximately 65 % of the total annual cold heat. Groundwater heat was used for cooling from April to October, and the system COP during this period was 7.5 for the groundwater heat and 3.9 for the heat pump, confirming the energy efficiency of the groundwater heat use (Fig. 8).

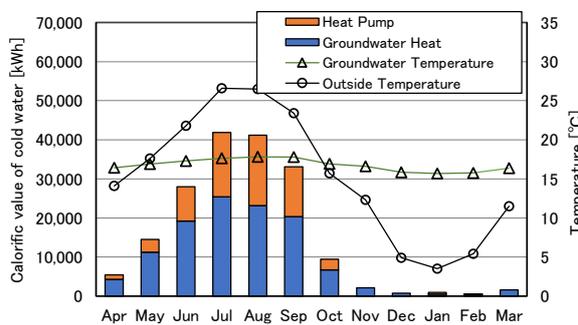


Fig. 7 Quantity of cold heat

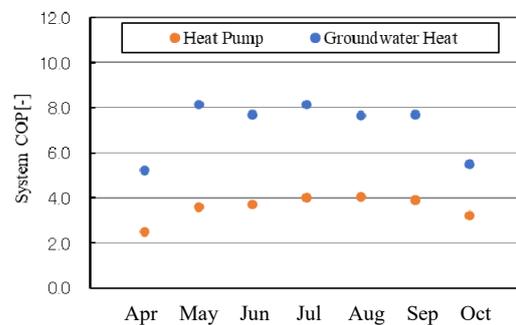


Fig. 8 SCOP value

3.2 Groundwater Use and Water Balance

In this building, tap water is stored in a receiving tank and supplied to the building; groundwater is pumped and used as heat for air conditioning; and a portion of the groundwater is used for miscellaneous purposes, such as toilet flushing water. As shown in Fig. 9, the volume of drinking water was 600 m³/year. The percentage of essential drinking and kitchen water was 53 % (320/600), and the remainder could be reclaimed from groundwater. The well backup contained 20 m³/year of tap water. The groundwater used for air conditioning was reused along with water for the experiments, hand washing and flushing of toilets, backwashing of iron and manganese removal equipment, and irrigation, among other uses. The well water used for the experiments, hand washing, toilet flushing, etc. amounts to 1,490 m³/year, which implies an increase over the previous year. This was because of the increase in the number of experiments conducted in the laboratory building. The volumes of tap water, groundwater, and sewage were approximately 600 m³/year, 25,430 m³/year, and 7,240 m³/year, respectively, making the discharge rate to sewerage to approximately 28 %, with the remainder 72 % recycled. The amount of water used for backwashing the iron and manganese

removal equipment accounted for approximately 60 % of the total sewage volume, which could be reduced by changing the backwashing conditions.

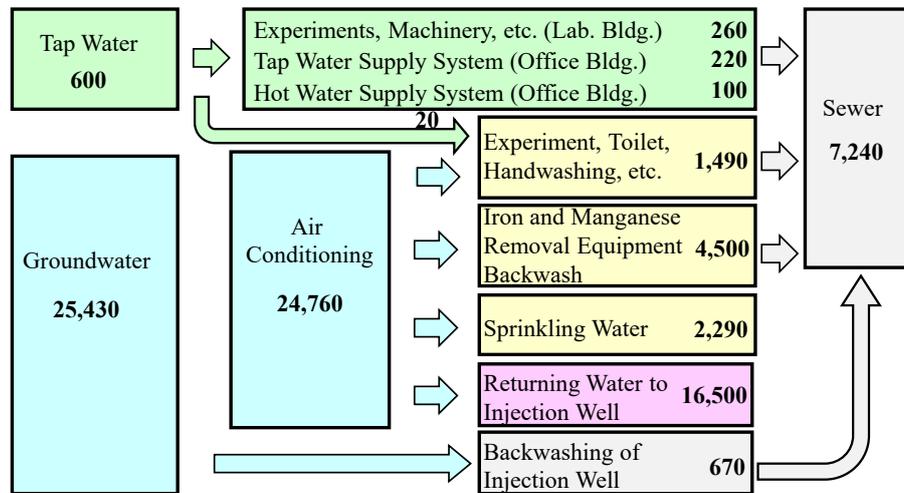


Fig. 9 Diagram of the Flow of Water Usage in the Facility [m³/year]

3.3 Relationship between Groundwater Pumping and Water Use

Fig. 10 shows the amount of tap water and groundwater used each month. From April to October, when the cooling demand is high, the amount of pumped groundwater ranges from approximately 1,200 m³/month to 4,600 m³/month (an average of approximately 3,100 m³/month). However, from November to March, when the cooling demand is low, groundwater is pumped for miscellaneous water usage, averaging approximately 640 m³/month.

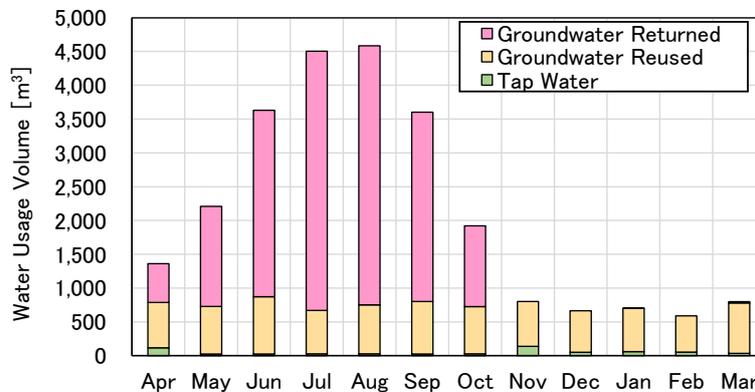


Fig. 10 Monthly quantity of tap water and groundwater

From the above, the groundwater heat utilization system at this facility was shown to not only utilize groundwater heat, which is renewable, but also to effectively use groundwater by reusing part of it after heat utilization for miscellaneous water usage.

4. ZWB EVALUATION

While various ZWB evaluation formulas have been reported, this study focuses on analyzing and discussing them in accordance with the ZEB evaluation method proposed by the U.S. Department of Energy (DOE).

4.1 Method for Evaluating ZWB

The definition of ZWB as stated on the U.S. Department of Energy's website is shown in Table 1. ZWB is defined as a building where the sum of the alternative water use (AW) and return to groundwater (WR) equals the total water use (WU). The ZWB attainment percentage calculation is simple: WU is divided by the sum of AW and WR. The ZWB attainment rate is calculated by dividing WU by the sum of AW and WR. If the ZWB formula in Table 1 yields a value greater than 100 %, then ZWB is achieved. In this study, underground stormwater infiltration was not considered given that no facilities contributing to stormwater infiltration were installed. In addition, some water uses could not be clearly sorted based on the ZWB definition. Some interpretations of the various uses of groundwater are difficult and should be examined in the future.

Table 1 Definition of ZWB by the U.S. Department of Energy

TERM	DEFINITION
AW	Alternative water use
	<ul style="list-style-type: none"> • Harvested rainwater, stormwater, sump-pump (foundation) water • Graywater • Air-cooling condensate • Rejected water from water purification systems • Reclaimed wastewater • Water derived from other water reuse strategies.
A net zero water building (or campus) uses alternative water sources to offset the use of freshwater.	
WR	Water returned
WU	Total water use
ZWB	Zero Water Building

※ : Freshwater is water sourced from surface or groundwater such as lakes and rivers.

4.2 Results and Discussion of ZWB Evaluation

Each water volume in Fig. 9 is shown in Fig. 11, and Table 2 lists the calculated results of the ZWB evaluation (Case-1).

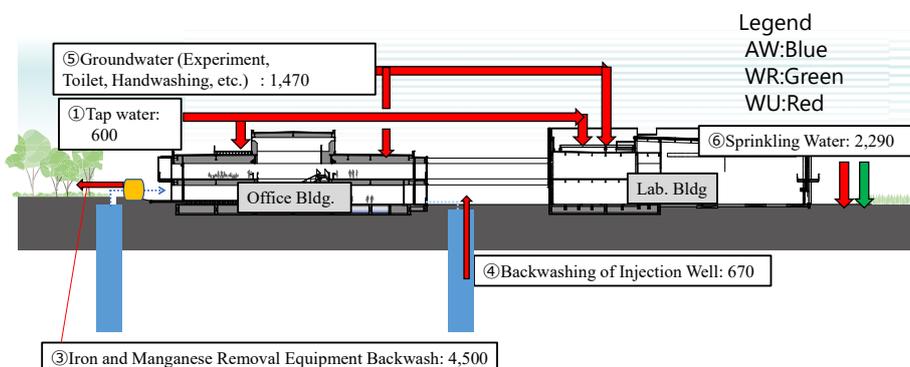


Fig. 11 Water and Groundwater Consumption in FY2022 (Case-1)

Table 2 Calculated results of ZWB based on DOE (Case-1)

Term	Unit	Value	Remarks
AW	m ³ /year	0	
WR	m ³ /year	2,290	⑥
WU	m ³ /year	9,530	①+③+④+⑤+⑥
ZWB	%	24	

None of the alternative waters defined in Table 1 are applicable for water use at the facility. Groundwater plant irrigation and stormwater groundwater infiltration were considered applicable to the amount of water returned. Total water use was the sum of the groundwater used for miscellaneous purposes, including drinking water, backwash water from the iron and manganese removal equipment and injection wells, and sprinkling water. This resulted in a ZWB rating of 24 %. Given that no examples of ZWB evaluations for facilities that use groundwater for heat and water, such as the facility considered in this study, have been reported, and the definitions in Table 1 are not applicable, groundwater heat use was not included in water consumption in this ZWB evaluation estimation. However, it is incongruous that groundwater pumped up from underground and returned to the ground after heat use is not included in water usage. It is expected that an increasing number of facilities, such as the aforementioned facility, will have diverse water use methods, such as heat use of water. Therefore, it is necessary to discuss how to define ZWB for diverse water use methods as soon as possible.

Consider the case in which groundwater used as heat in this facility is included in the calculation of water consumption (Case-2). Fig. 12 shows the respective water volumes. Under the present conditions, the groundwater used for backwashing of the iron and manganese removal equipment, and the groundwater used for miscellaneous purposes were considered as alternative water volume, given that the water after air conditioning used as groundwater heat is considered to be reused water. In addition, the amount of groundwater returned to the ground through the injection wells after heat utilization is added to the amount of water to be returned to the ground. The total water consumption is defined as the sum of drinking water, groundwater used for heat utilization, and groundwater used for miscellaneous purposes, including sprinkling water after heat utilization. As a result, the ZWB evaluation value was 72 %, as shown in Table 3.

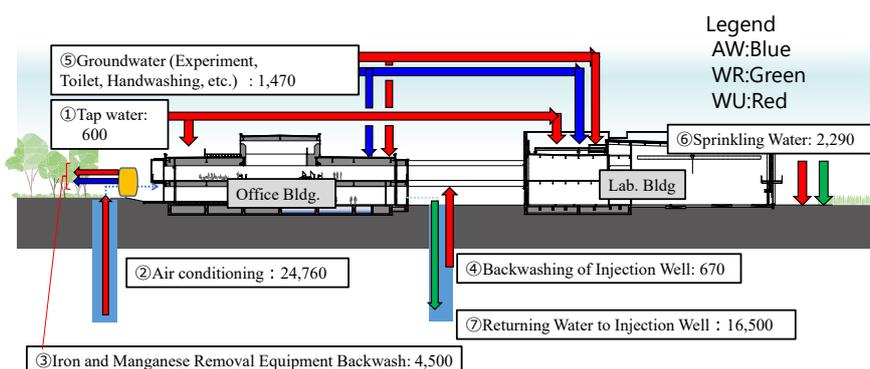


Fig. 12 Water and Groundwater Consumption in FY2022 (Case-2)

Table 3 Calculated results of ZWB based on DOE (Case-2)

Term	Unit	Value	Remarks
AW	m ³ /year	5,970	③+⑤
WR	m ³ /year	18,790	⑥+⑦
WU	m ³ /year	34,290	①+②+③+④+⑤+⑥
ZWB [※]	%	72	

※: ZWB approaches 100 % if underground infiltration water from rainfall on the site is included in the WR.

In Case-2, both groundwater pumping and return water are taken into account, resulting in a 48 % improvement in the ZWB value compared to Case-1. This is considered to be a calculation in line with actual water use. With the increasing focus on efficient water resource utilization in the pursuit of carbon neutrality, there is a growing consensus that evaluations should encompass not only water usage but also heat usage, and should be more accurate for diverse water resources. In addition, because this facility does not currently have rainwater infiltration facilities, this study estimates the rainwater infiltration water as WR as zero. However, we believe that incorporating the underground infiltration of rainwater and rainwater utilization will bring us closer to achieving a ZWB. By including the underground infiltration water of rainfall at the site as WR, it is estimated that it will approach ZWB. As a specific improvement proposal for ZWB, we are considering the utilization of rainwater storage tanks and the reuse of groundwater used for water usage.

5. CONCLUSIONS

This study introduces a research facility in Japan constructed as a sustainable building considering the global environment. We propose a new ZWB that can be applied to various systems, including factors such as water heat utilization, rather than simply evaluating the ZWB from the viewpoint of water consumption alone. We propose a new ZWB that can be applied to various systems.

REFERENCES

- [1] Kosuke Osako, Naoki Aizawa, Takeshi Aoyama, Akihiro Shimizu, Daisuke Hatori, and Yuka Mutoh, Planning and Evaluation of the Energy Self-Sufficient Innovation Center (Part 20) Operational Results in the Use of Groundwater and Waste Heat, pp193–196, 2022.
- [2] U.S. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Federal Energy Management Program “Net-zero Water Building Strategies”,
URL: <https://www.energy.gov/femp/net-zero-water-building-strategies>, (accessed June 23, 2023)

要 約

2020年1月に竣工した高砂熱学イノベーションセンターは、主力電源として採用した木質バイオマスガス化発電と太陽光発電、及び地下水熱利用からなる再生可能エネルギーの活用と蓄電池を組み合わせることで、自立運転が可能なエネルギーシステムを実現した。本施設は、我が国のカーボンニュートラル社会を先導する施設として、SHASEの学会賞、JABMEEのカーボンニュートラル大賞などのアワードを受賞した。本報では、本センターの設備概要と年間を通しての水利用、電力、熱エネルギー実績を報告する。さらに、水資源の保全や水の再利用への関心の高まりから近年注目されているZero Water Building(ZWB)について、地下水熱・水利用における評価および考察した。ZWBに向けた具体的な改善案として、雨水貯留槽の活用や水使用した地下水の再利用などを考えている。今後は、単に水使用量だけの観点からZWBを評価するのではなく、水の熱利用なども含めた様々なシステムに適用可能な新たなZWBを考えていきたい。

体育館向け空調システムの開発と実証

小山尚人・木村健太郎・平原美博*¹

Development and demonstration of air conditioning system for gymnasiums

Koyama Naoto・Kentaro Kimura・Yoshihiro Hirahara

近年の地球温暖化による熱中症対策や、災害避難所利用時の感染対策をカバーした体育館向け空調換気システムが重要になっている。そこで今回、冷暖房を備えた空調換気システムをつくばみらい市富士見ヶ丘小学校体育館に導入し実証試験を実施した。全外気運転方式の室外機一体型空冷ヒートポンプ外調機とビニール風船型吹出し口とで構成された本システムによって、競技への影響を及ぼさずに効率よく冷暖房と除湿・換気を行うことができたので報告する。

1. はじめに

体育館の使用用途は、授業や季節イベント、地域住民のスポーツ練習場所、そして災害時の避難所などが挙げられる。近年、地球温暖化により夏の暑さや冬の寒さは年々厳しさを増しており、特に夏の猛暑での体育館内の環境は、競技やイベントを行っている競技者はもとより見学者においても熱中症のリスクを伴う。また、体育館を避難所として利用する際は、暑さ寒さに加え、換気やプライバシー確保等の課題がある。避難する年齢層は乳幼児から高齢層まで幅広いことから、新型コロナウイルスへの感染対策として体育館全体をカバーする換気システムが非常に重要であり、密集した空間でも安全に過ごせる仕組み作りが求められている。

一方で、全国約3万校の公立小中学校のうち、体育館には15%程度（2022年9月現在）しか空調導入が進んでいないこともあり、学校運営だけでなく災害避難所の両面で安全快適に過ごせる環境が求められている。

当社と茨城県つくばみらい市は、2020年に締結した包括連携協定における防災分野での協力を元に、体育館向け空調換気システムの開発を進め、2022年8月に富士見ヶ丘小学校への工事が完了し、実証試験を開始した。

本報では、体育館施設における課題改善を図るためにゼロベースから開発した本システムの概要、ならびに夏期と冬期の実証結果を紹介する。

2. 体育館施設における課題

体育館施設における課題は多岐にわたる。表 1 に体育館施設における課題を体育館使用時と避難所利用時に分けて示す。体育館利用時は、夏の熱中症対策や冬の底冷え対策に加え、競技に影響を及ぼさない気流などが望まれる。また、災害時に避難所として利用される体育館では、大人数が一時的に閉鎖空間で収容されることになり、換気は重要課題となっている。また、パーティションやテントなどでプライバシー確保を行う行政は増えているものの、部屋の隅々まで冷気が行き届かないことが課題となっている。

表 1 体育館施設における課題

体育館としての課題	災害時避難所としての課題
夏の熱中症、冬の底冷え対策	避難所としての感染、換気対策
冷暖房効率の改善	テント敷設時の冷暖房
競技に影響を及ぼさない気流	高温多湿の熱中症対策
衝突安全対策	プライバシーの確保

3. システム概要

3.1 高効率な冷暖房方式

体育館施設の課題を一つずつ解決するため、熱中症対策には除湿した冷却空気を供給し、寒さ対策には床面への暖気供給、供給空気は全て新鮮外気により行い同量を排気し熱回収することにより、通常時だけでなく避難所利用時にも対応できる熱中症・防寒・感染対策を兼ね備えた空調システムの開発を目指した。

図 1 に本システムの冷房時と暖房時の温度イメージを示す。本システムは、主にビニール風船型吹出口と室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機で構成され、夏期は室下部から低速給気し室上部から排気することで置換空調を構築し、熱や汚れた空気を室上部へ搬送し居住域だけを効率よく冷却除湿する。冬期は、床面に沿って水平に高速給気し床面のコアングダ効果により中心部まで暖気を到達させることで室下部にたまりやすい冷気を除去した暖房を行う。

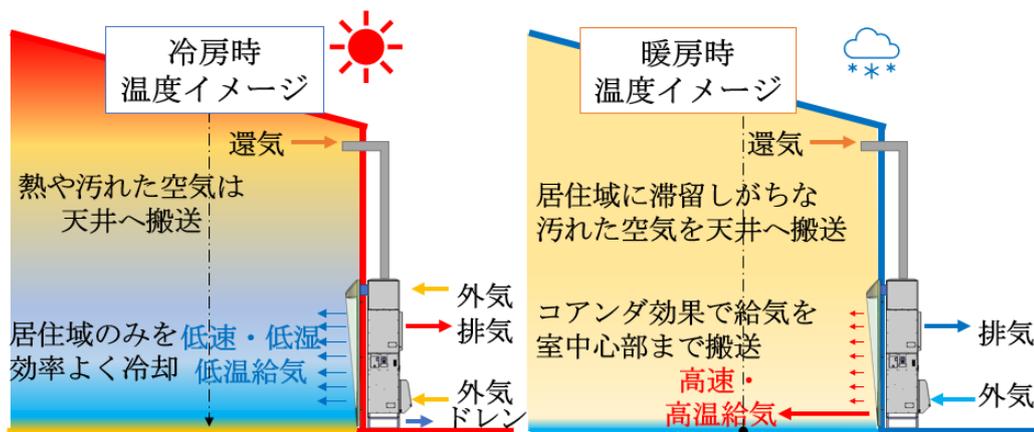


図 1 冷房時と暖房時の温度イメージ

3.2 ビニール風船型吹出し口

アリーナに設置する吹出し口は、安全性に配慮した形状と衝撃吸収構造とし、競技時の安全を確保した。図2にビニール風船型吹出し口の設置状況を示す。ビニールへ給気して膨らませることで、無数のパンチング開口(細孔3mmφ、開口約5%)から低速で吹出す。奥行きは給気チャンバの上部200mmから吹出し底部50mmにかけて断面積を減少させることで均一な吹出しを実現した。冷房と暖房の切り替えは、スイッチ操作に加え、吹出し口下部のファスナー開閉とした。冷房時はファスナーを閉鎖することで低速給気となり、暖房時はファスナーを開放することで高速給気を実現する。ビニールはJIS A6519(体育館用剛製床下地構成材)の繰り返し衝撃試験を行って耐久性を確認し、破損した場合は取り換えが容易な仕様となっている。

3.3 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機

表2、及び図3に室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の仕様と内部構造を示す。^[注1]外調機は、常に新鮮な外気を直接冷却・加熱し給気する機構となっており、窓開け換気を行いながら冷暖房を行う方式とは異なり、冷暖房した空気を室外へ漏気せず空調できる。また、還気は熱回収してから排気するため、エネルギーの無駄を低減できる。また、機器設置後に吹出し口と換気ダクトを接続し、電源を投入するのみでシステムを完成させることができるため、室外機設置や冷媒工事が不要なことから導入コストを低く抑え、設置工事期間を短縮できる。

表2 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の仕様

冷房能力/暖房能力	14.3kW/15.0kW
消費電力	冷房時 5.2kW COP2.75
	暖房時 4.9kW COP3.06
電源	3相 200V
送風量	冷房時 1,000m ³ /h
	暖房時 1,500m ³ /h
機外静圧	50Pa



図2 ビニール風船型吹出し口の設置状況

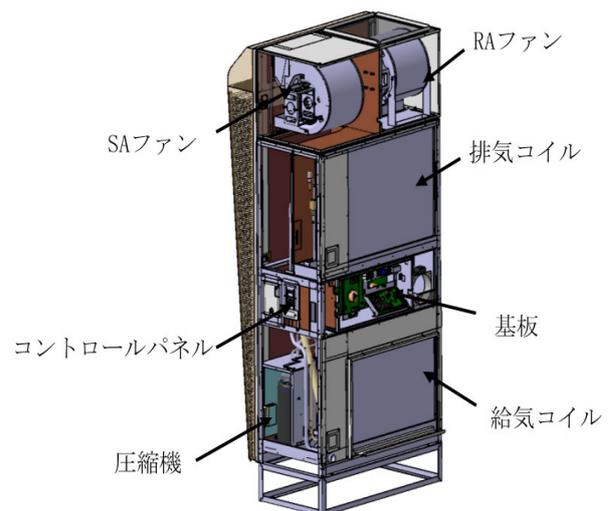


図3 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の内部構造

4. フィールド検証・建物概要

4.1 建物概要

表 3 につくばみらい市立富士見ヶ丘小学校体育館の建物概要を示す。建物はアリーナと地域交流室で構成される複合型施設となっており、アトリウム長手方向の外壁はガラス窓とそれを保護する格子窓のダブルスキン構造となっている。

4.2 設備概要

表 4 に本システムの設備概要を示す。給気が効率よくアリーナ全域へ行き渡るように、空調機は両側の壁にそれぞれ 4 台ずつ設置した。また、置換空調では空調機毎で個別制御した場合に発生しやすい混合損失を防止するため、8 台の全空調機は同じ給気温度で制御する運用とした。

表 3 建物概要(空調設置前)

所在地	茨城県つくばみらい市
延床面積	792m ² (33m×24m)
天井高さ	11~13m(片流れ屋根)
換気方式	有圧換気扇 12,000m ³ /h
壁	ダブルスキン
構造	S 造鉄骨ブレース構造

表 4 設備概要

外調機	8 台
給気風量	冷房時 8,000m ³ /h
	暖房時 12,000m ³ /h
吸込み高さ	5.0m
制御	給気温度制御

4.3 測定概要

図 4 に体育館内測定点を示す。2 人用の避難所テント (2 m×2 m) は、実際の避難所利用時を想定した 49 張を 1 m 間隔で敷設した。平面測定には、アリーナの隅々まで空調されていることを確認するため、高さ 1m の自立センサを 12 か所設置した。垂直温度及び垂直湿度測定では、5m 高さを 1m ピッチで 2 か所設置し、5 分間隔の瞬時値を記録した。また、微風速計 (TESTO 製、熱式プローブ) を用いて、測定点 (床上 0.1m・0.6m・1.1m) の移動測定 (10 秒平均値) を行なった。

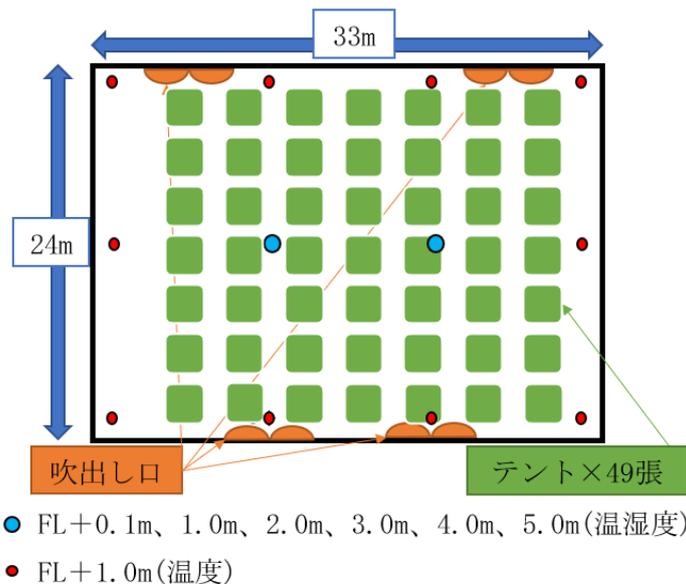


図 4 体育館内測定点

5. 夏期検証結果

5.1 温度及び湿度分布

実測は、2022年8月25、26日に行った。図5に冷房時のテント設置状況と熱画像を示す。混合空調では気流障害となるテントが密に配置されているにもかかわらず、テント間に離隔があれば冷気は密度差によって隔々まで行き渡り、アリーナ中央付近まで冷却できている。

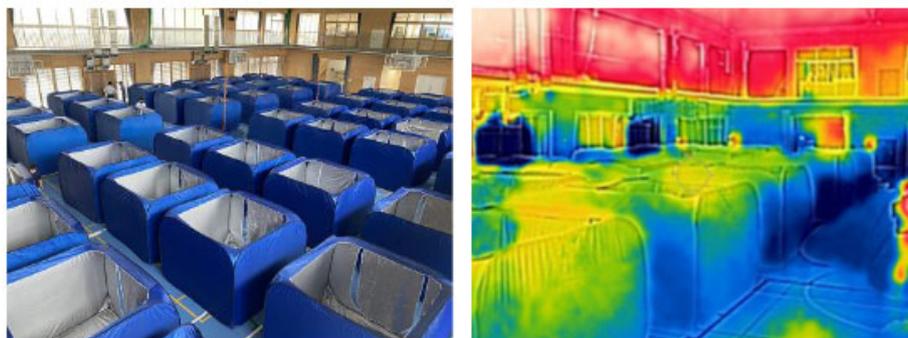


図5 冷房時のテント設置状況と熱画像

図6に冷房時の床上1.0mの平面温度分布を示す。外気が30.2℃において、室内平均温度は24.8℃となった。室中央2か所の平均値となる相対湿度では、外気の69%と比較し49%まで低下した。本システムでは、冷却だけでなく除湿による効果もあり不快指数が大幅に低下し、より快適な環境を作り出すことができる。

図7に冷房時の温度及び湿度経時変化を高さ別に示す。室下部ほど低温低湿な環境となり、空調起動から約30分で安定し空調の立ち上がり時間が早いことを確認した。

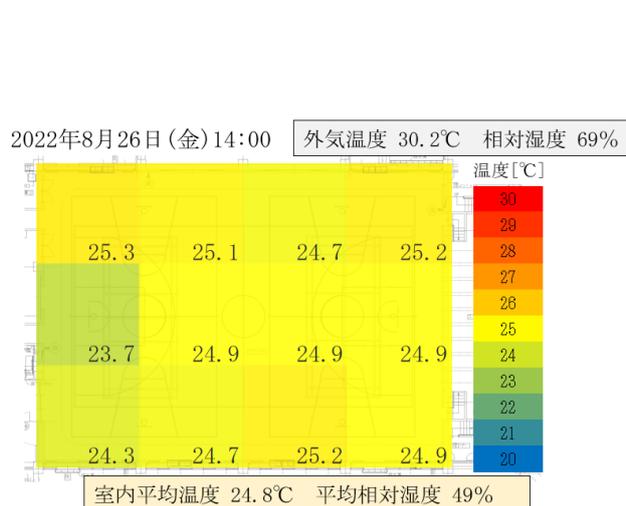


図6 冷房時の平面温度分布

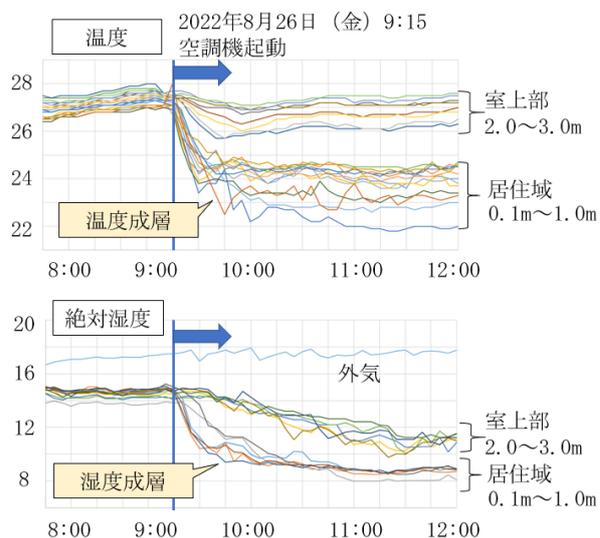


図7 冷房時の温度及び湿度経時変化

図8に室中央部の垂直温度及び垂直湿度分布を示す。絶対湿度分布では、床に近い居住域ほど低湿度となった。温度分布では室上部の28℃に対し居住域温度は25℃と3℃程度低い値となり、居住域を効率よく冷却できている。置換空調では、吸込み高さ温度が混合空調時の室内温度と近くなることから、28℃の冷房能力で25℃の居住域環境を構築していることになり、混合空調と比較し2割ほどの省エネ効果があることを示唆できた。

5.2 風速分布

図9に冷房時の平面風速分布を示す。室内の平均風速は0.14 m/sとなった。室内競技は風速の上限値を求められていることが多く、競技に影響を及ぼさない室内気流（冷房時の室内平均風速0.15 m/s以下）を実現した。

5.3 利用者アンケート

本体育館は、平日は17～21時、休日は終日市民開放されており、本システムの冷房効果についてアンケート調査を実施した。2022年9月9～14日の5日間、各クラブのコーチや保護者を対象にアンケートを実施した結果、「熱中症の危険が下がり、保護者として安心できた」「発汗が抑えられ運動に集中できた」と好評な結果が得られた。また、「窓開けが不要なため、虫が入ってこなくなった」、「汗の落滴がなくなり、スリップによる怪我のリスクが減った」等、開発時には想定していなかった知見も得られた。

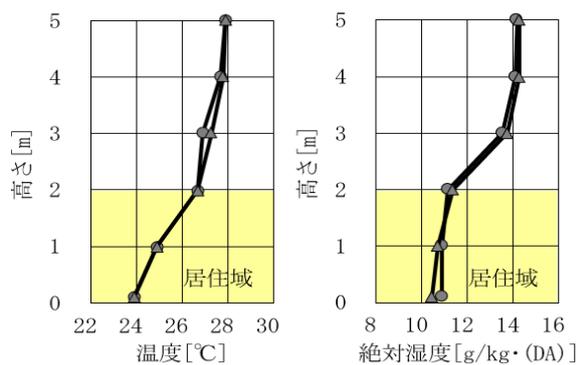


図8 冷房時の垂直温湿度分布

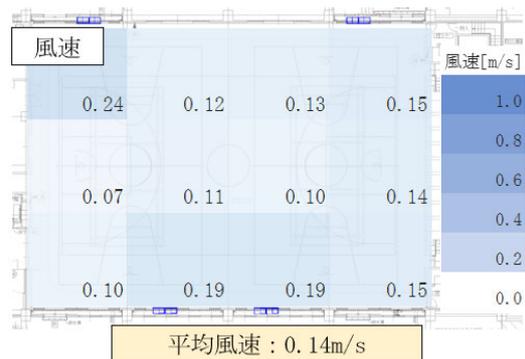


図9 冷房時の平面風速分布

6. 冬期検証結果

6.1 温度及び湿度分布

実測は、2022年12月26、27日に行った。図10に暖房時の平面温度分布を示す。外気が6.9℃において、室内平均温度が13.5℃となった吹出し前方に隙間なくテントを設置したケースにおいて気流障害となり室中央付近が低温となったが、離隔距離が1mほどとれていれば、暖気が室中央部まで到達することを確認した。

図11に暖房時の温度及び湿度経時変化を示す。空調起動から徐々に昇温し、60分ほどで室全体の温度が安定する結果となった。

6.2 風速分布

図12に暖房時の平面風速分布を示す。暖房時は床面を高速給気する方式ながら、床上1.0mの平均風速は0.20 m/sとなり、競技への影響は低いことが確認できた。

6.3 利用者アンケート

2022年2月13～17日の5日間、利用者アンケートを実施した。夏期と同様に、「高速給気でも新体操のリボンには影響しなかった」「選手が動きやすい環境になった」と好評な結果が得られた。

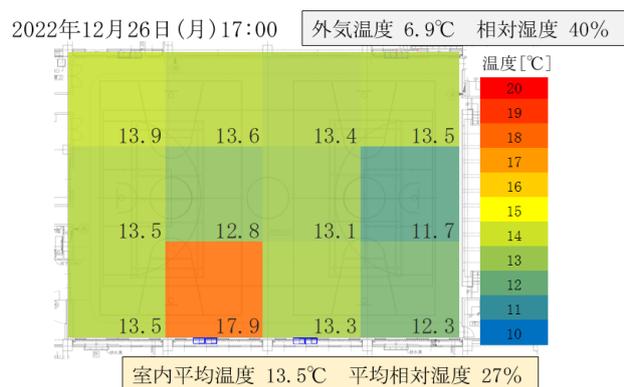


図10 暖房時の平面温度分布

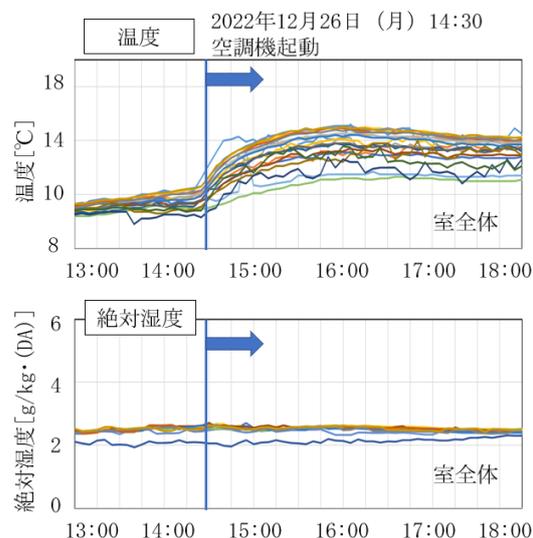


図11 暖房時の温度及び湿度経時変化

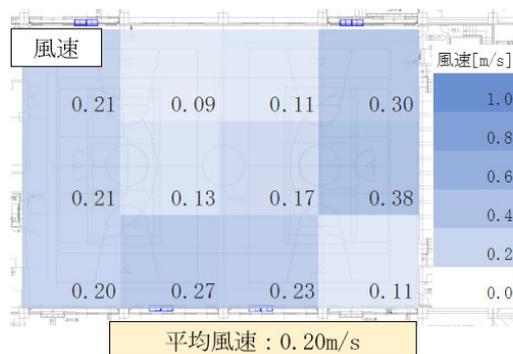


図12 暖房時の平面風速分布

7. まとめ

体育館環境に合わせて作り上げた空調システムの実フィールド結果では、体育館施設における課題解決に大きく貢献できることを示した。置換空調は、外気冷房期間も長くなるため、混合空調と比較して年間のエネルギーの大幅な削減が可能であると考えられ、今後も運用面も含めて検証を継続する予定である。通常利用時と避難所利用時と両方の利用者にとって安全快適な室内環境を作り、今後も社会に貢献していきたい。

[注1] 室外機一体型空気熱源ヒートポンプ外調機の仕様と内部構造について

本報の実証を行った時点での試験機の仕様と内部構造であり、製品版と異なる部分がある。

ABSTRACT

In recent years, an air conditioning and ventilation system for gymnasiums that covers heat stroke prevention due to global warming and infection prevention when used as a disaster shelter has become important. Therefore, in this study, a heating and cooling air conditioning and ventilation system has developed and demonstrated at the Fujimigaoka Elementary School gymnasium in Tsukubamirai City. The system consists of an all-outdoor air operation type air-cooled heat pump outdoor unit and a vinyl balloon-type diffuser, which efficiently provides heating, cooling, dehumidification, and ventilation without affecting athletic performance. This report describes the results of the demonstration in FY2022.

二酸化塩素ガスを用いた安全キャビネット除染方法の評価※

荒川宏樹・高橋秀人・朴民亀^{*1}・岩堀伸哉^{*1}・佐々木雄治^{*2}

Evaluation of Microbial Decontamination Method for Biosafety Cabinet Using Chlorine Dioxide Gas

Hiroki Arakawa・Hideto Takahashi・Mingoo Park^{*1}・Shinya Iwahori^{*1}・Yuji Sasaki^{*2}

バイオハザード対策用クラスⅡキャビネット(以下、BSC)に関するJIS規格(JIS K 3800) 附属書B「除染方法の評価」では、2021年の改正の際、除染剤として二酸化塩素ガス(以下、CDガス)が追加された。このJIS規格において、除染を行う際には排気HEPAフィルタ下流部から作業台部への循環回路の設置が必須条件になっている。しかし、CDガスの物性は拡散性が高いため、循環回路が無くても除染効果を満足できる可能性が考えられる。本報では、CDガス除染方法に対する循環回路の効果を確認するため、循環回路の有無で除染効果を評価した。その結果、循環回路を設置しない場合はCDガスの短時間除染のメリットが相殺されることが分かった。また、BSCに対して腐食リスクが高まるなどの悪影響を及ぼす可能性があることが示唆された。したがって、CDガス除染時に循環回路を設置してBSC内のガス分布を均一にすることは、短時間で確実な除染効果の成功とBSCの保全にとって重要である。

1. はじめに

バイオハザード対策用クラスⅡキャビネット(いわゆる安全キャビネット。以下、BSC: Biosafety Cabinet)は、病原性のある微生物や遺伝子組み換え生物を取扱う際に、作業者や周囲の環境を保護する重要な装置である。そのため、BSCは定期的に作業エリア内の清浄度や作業台開口部への流入風速などの封じ込め性能を評価することが求められており、その作業前にはBSC内の微生物除染(以下、除染)が必要となる。従来のBSC用除染剤は、ホルムアルデヒドガスだけが信頼できるとされてきた。その理由はホルムアルデヒドガスが、拡散性が高い、除染効果が高い、一方で腐食性が低い、安価など他に類を見ない利点があったためと考えられる。しかし、ホルムアルデヒドは、シックハウス症候群や発がん性など人体に対して障害を与え、またパラホルムアルデヒドが除染後の表面に残存して完全に除去できない問題があることから、新しい除染方法が検討されてきた。2021年に改正されたバイオハザード対策用クラスⅡキャビネット JIS K 3800: 2021¹⁾の附属書B「除染及び除染方法の評価」(以下、本JIS)では、密閉キャビネットの隅々へのガス拡散性の高さおよび除染効果の標準的指示方法である枯草菌芽胞の生存率を 10^{-6} 未満に減少できる除染効果の高さがホルムアルデヒドと同様である点から、二酸化塩素ガス(以下、CDガス: Chlorine Dioxide Gas)を用いた除染方法が追加された。本JISのCDガスとホルムアルデヒドガスのガス総量一定方法を表1、除染時の概略図を図1に示す。除染方法を比較すると、ホルムアルデヒドガスの場合、排気HEPA下流部から作業台部への循環回路の有るか無しかは選択できる。一方、CDガスは、循環回路有りが必要条件になっている。しかし、CDガスの物性は拡散性が高いため、循環回路無しでも除染効果を満足できる可能性が考えられる。

本稿ではCDガス除染効果に対する循環回路の効果を確認するため、循環回路の有無で除染効果を評価した結果を報告する。

※本論文は、令和5年度空気調和・衛生工学会大会論文²⁾を加筆修正したものである。

*1 株式会社イカリストリファーム *2 イカリ消毒株式会社

表 1 本 JIS のガス総量一定方法

除染剤	ホルムアルデヒドガス	CDガス
温湿度	21°C以上、60%～85%	15°C以上、60%～85%
循環回路	有り or 無し	有り
除染条件	パラホルムアルデヒド量 11g/m ³ CT値 ^{※1} 7,200 ppm・h以上 (6時間～12時間以上)	CDガス量 4.7g/m ³ (処理時間85分以上)
中和・除去・排気	炭酸水素アンモニウムを加熱・待機後に排気	除去・排気設備を運転
効果判定	枯草菌芽胞を生残率10 ⁻⁶ 未満となる "BI" または "CT値"による判定	

※CT 値:ガス濃度と暴露時間の積

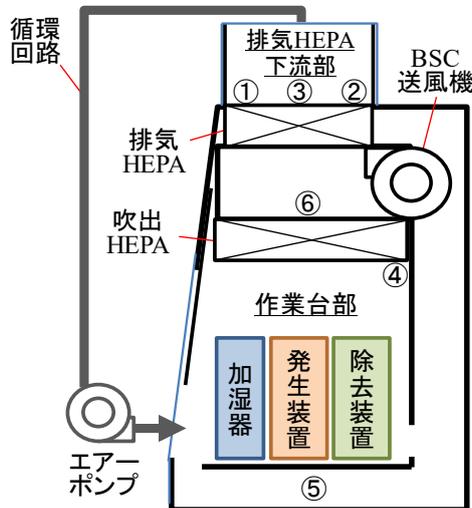


図 1 除染の概略図の一例

※①～⑥は表 3 のバイオリジカルインジケータ位置番号

2. CD ガス除染の概要

2.1 物理的性質

二酸化塩素の主な物性と許容濃度を表 2 に示す。二酸化塩素は沸点が 11°C であり常温ではガス状態として存在する。また、米国の労働安全衛生局による許容曝露濃度 (PEL) は 0.1 ppm である。0.1 ppm の CD ガスは、人の嗅覚で感知できるため、万が一除染中に僅かなガス漏洩が発生したとしても、検知器など特別な分析機器を用いることなく臭気で危険を察知することが可能であり、実用に適している。

2.2 CD ガス発生方法

CD ガス発生装置の概略図を図 2 に示す。この発生装置は、本 JIS の CD ガス総量一定方法を想定した構成となっており、従来のホルムアルデヒドガス発生法と同様に、ヒータに薬剤 (固体の亜塩素酸ナトリウムとリンゴ酸溶液) を投入した反応容器を設置して加熱することで、単純かつ簡単に CD ガスが発生できる。また、装置構造が単純なため、故障等のトラブルが発生し難く安価であるため、仮にトラブルが発生しても予備を準備しておくことで容易かつ迅速に対応できる。

表 2 二酸化塩素の主な物性と許容濃度

分子式	ClO ₂	
沸点	11 °C	
相対蒸気密度 (空気=1)	2.3	
規制値	PEL (permissible exposure limit)	0.1 ppm
	STEL (Short Term Exposure Limit)	0.3 ppm
安全性	色	除染濃度の数百ppmの時、目視確認可能(赤～黄色)
	臭い	安全濃度0.1 ppm(PEL)でも人の嗅覚で感知可能
除染効果	酸化作用	

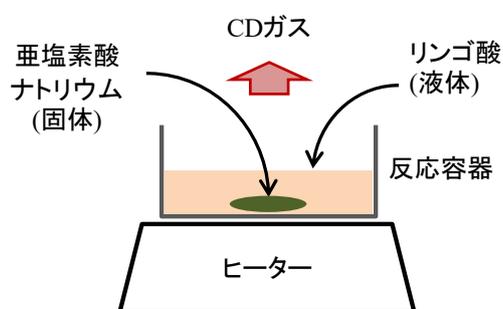


図 2 CD ガス発生装置の概要

3. CD ガス除染効果に対する循環回路の効果の確認

CD ガス除染効果に対する循環回路の効果を確認するため、CD ガス総量一定方法を基に、試験④：循環回路有り（本 JIS）と試験⑤：循環回路無しを比較評価した。

3.1 方法

試験④循環回路有りの処理工程の様子を写真 1 に示す。BSC（日本エアーテック社、BHC-1308 II A2）内の本 JIS 所定 6 箇所各 1 対のバイオロジカルインジケータ（以下 BI：枯草菌芽胞 10⁶ CFU）を設置後（写真 2）、作業上部と排気 HEPA 下流部に CD ガス濃度センサー（ATI 社、00-1359）と温湿度計（T&D 社、RTR-53A）を設置した。また、CD ガス総量一定方法で規定の CD ガス量 4.7 g/m³ を満足する薬剤量を投入した CD ガス発生装置、CD ガス除去装置と加湿器を作業台に設置後、開口部の養生を行い、試験④循環回路有りの場合は排気 HEPA 下流部から作業上部に向けて循環ホースとエアープンプを接続した。送風状態について、試験④循環回路有りは常にエアープンプによる送風運転、試験⑤循環回路無しは BSC 送風機も含めて常に送風停止とした。除染工程は、所定の温湿度でガス処理を 90 分間行う処理工程と、それに引き続いてガスを除去する除去工程からなる。BSC 内を室内空調で約 23°C、加湿器で約 65%RH に調整後、CD ガス発生装置のヒータを起動加熱して処理開始とし、その 90 分後に除去装置を起動した。また、試験⑤循環回路無しの排気 HEPA 下流部の滞留ガスは、除去開始 90 分後（処理開始 180 分後）に直近実験排気ダクトから排出した。各試験 3 回実施し、試験後に回収した BI を所定時間培養して陰性/陽性判定により除染の成功/不成功を評価した。処理条件を以下に示す。

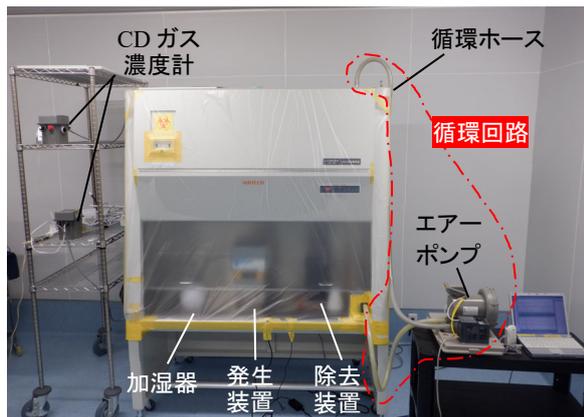


写真1 試験①循環回路有り処理中の様子

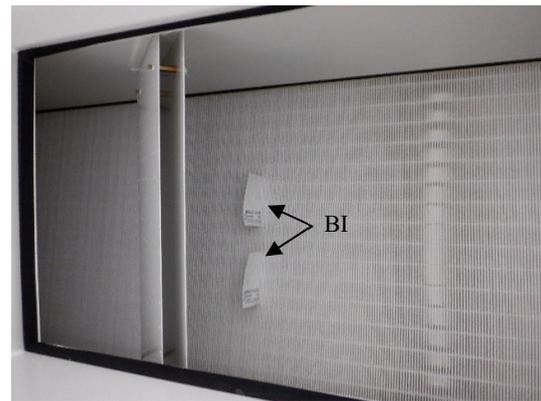


写真2 BI設置の様子(吹出しHEPAフィルタ上流部)

- ・ 処理工程の温湿度：約 23°C、60%RH～85%RH
- ・ BI
 - ： Noxilizer、BI-S-N/100-001
 - 指標菌： *Geobacillus Stearothermophilus*
 - 芽胞菌数： 10⁶ CFU
 - 培養条件： 55°C～60°C×7 日間

3.2 結果と考察

各試験の温湿度、CDガス濃度の経時変化の一例を図3、図4に、BIによる除染効果判定結果と各試験時の排気 HEPA 下流部の CT 値を表3に示す。

3.2.1 温湿度

全ての試験で処理工程の温湿度条件を満足した。なお、処理工程条件ではないが、除去工程の湿度について、作業台部(図3、図4の実線)と試験①循環回路有りの排気 HEPA 下流部(図3の破線)で60%RH未滿に低下した。これは除去装置に使用した活性炭フィルタに水分も吸着したためと考えられる。試験②循環回路無しの排気 HEPA 下流部(図4の破線)は、除去工程も60%RH以上であった。これは湿分が無風状態の HEPA フィルタを通過できないためと考えられる。

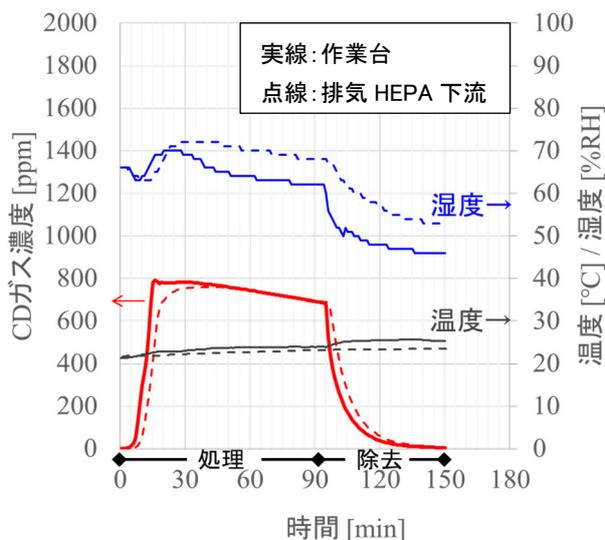


図3 試験①の CD ガス, 温湿度の経時変化の一例

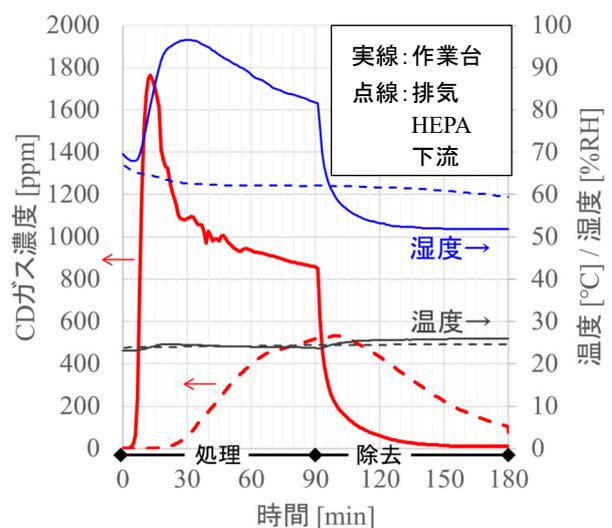


図4 試験②の CD ガス, 温湿度の経時変化の一例

表 3 BI による除染効果判定の結果と各試験時 CT 値

本JIS所定 BI設置位置		試験①:循環有り			試験②:循環無し		
		1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
排気 HEPA 下流	①外壁-1	○	○	○	×	○	○
	②外壁-2	○	○	○	×	×	○
	③中央	○	○	○	×	×	×
④汚染正圧域		○	○	○	○	○	○
⑤作業台トレー下		○	○	○	○	○	○
⑥吹出しHEPA上流中央		○	○	○	○	○	×
陽性対照(未処理)		×	×	×	×	×	×
除染判定		成功	成功	成功	不成功	不成功	不成功
CT値* ($\geq 60\%RH$) [ppm·h]	排気HEPA 下流部	994	1,091	996	616	849	724

* : 試験①は 90 分間、試験②は 180 分間の CT 値

○ : 除染有効=1 対の BI 両方が培養陰性または片方だけ培養陽性

×

成功 : 陽性対照以外で×印 1 個以下

不成功 : 陽性対照以外で×印 2 個以上

3.2.2 CD ガス濃度

作業台部の CD ガス濃度は、全ての試験で試験開始 5 分以内にガス濃度が上昇し、10~15 分後にピークを迎え、その後は減少傾向を示した。除去開始後は速やかに濃度減少して 60 分以内に許容暴露濃度の 0.1ppm となった。一方、排気 HEPA 下流部の CD ガス濃度は、試験①循環回路有りの場合、5 分程度の時間遅れはあったが概ね作業台部と同様に推移し、除去開始後は速やかに濃度減少して 60 分以内に許容暴露濃度の 0.1ppm となった。試験②循環回路無しの場合、処理開始 15 分後から濃度上昇を開始し、60 分後に 400ppm 到達、その後は濃度上昇が少し緩やかになった。除去開始 15 分後まで濃度上昇が続き、その後は緩やかな濃度減少に転じるが、除去開始 90 分後（処理開始 180 分後）でも約 100 ppm の高濃度が残留した。実際のオペレーションでは安全確保のため、残留濃度が許容レベル以下に低下するまで除去時間を延長する必要が生じる。ホルムアルデヒドガスに比べて CD ガスは短時間で除染できる方法であるが、上記のような除去時間の延長は CD ガスの時短メリットに対し相殺側に働く。

3.2.3 除染効果

試験①循環回路有りは全ての BI 設置位置で除染有効（○印）であり除染判定は成功、試験②循環回路無しは排気 HEPA 下流で除染無効（×印）であり除染判定は不成功であった。一般に、除染効果はガス濃度と暴露時間の積である CT 値で評価される。試験①循環回路有りと試験②循環回路無しの排気 HEPA 下流部の CT 値の比較から、除染有効に必要な CT 値は 994 ppm・h 以上であることが分かった。試験②循環回路無しは処理時間を低濃度側の排気 HEPA 下流部で CT 値 994 ppm・h 以上に到達するまで延長すれば、処理工程内に除染判定成功になる可能性がある。しかし、排気 HEPA 下流部の除染効果に合わせて処理時間を設定すると、高濃度側の作業台部は過剰な CT 値となる。さらに、除去工程の際、排気 HEPA 下流部は湿度と CD ガス濃度が高い状態で維持されるため、過剰な CT 値となる。CD ガスの除染効果は酸化作用（表 2）によるものであり、過剰な CT 値は BSC の腐食・劣化を招く恐れがあるため、適正な BSC 運用管理にとって処理時間延長の対応は許容できない。

3.2.4 その他:BSC への影響

本 JIS の方法（試験①循環回路有り）の条件で、CD ガス除染による BSC への影響について確認した。本

表 4 キャビネット観察結果

項目	結果
作業台パネル	変化なし
吸込みスリット_手前	変化なし
吸込みスリット_奥	変化なし
作業台内コンセント	変化なし
ガスコック	変化なし
バーナー	変化なし
紫外線ランプ・ソケット	変化なし
吹出し風速センサー	性能に問題なし
吹出しHEPAフィルタ固定具	変化なし
作業台トレイ下部	変化なし
BSC内ガス配管	変化なし
BSC送風機	変化なし
内装パネル_汚染正圧域	変化なし
排気HEPAフィルタ固定具	一部で腐食あり 固定ボルト、ナット、ワッシャ
内装パネル_排気HEPA下流部	変化なし
HEPAフィルタ	性能に問題なし (樹脂コーキング部が変色)



写真 3 排気 HEPA フィルタ固定ナット腐食の様子
(上段:処理前、下段:10回処理後)

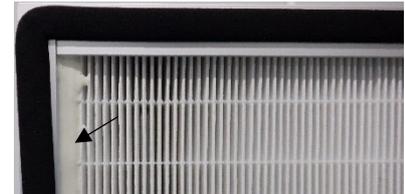


写真 4 HEPA フィルタコーキング変色の様子
(上段:処理前、下段:10回処理後)

JIS には少なくとも 10 回処理時にキャビネットに影響がないこと、または影響する可能性がある場合は提案書などに記載することとされている。前述の処理後、追加処理を 4 回行い合計 10 回処理後のキャビネット内の腐食状況を 20 カ所で確認した結果を表 4、写真 3、写真 4 に示す。BSC の封じ込め性能には影響は無いが、HEPA フィルタのコーキングの色変化および排気 HEPA 下流側にあるフィルタ固定具のボルト、ナット、ワッシャーで腐食が認められた。HEPA フィルタコーキング色変化は捕集性能上問題が無かった。フィルタ固定具は、除染処理毎に目視点検を行い、腐食変化があれば交換することで運用上問題ないと考えられる。

4. まとめ

BSC 内の除染処理は、定期的な封じ込め性能検査前、HEPA フィルタ交換前、内部の大量微生物汚染時、使用目的の変更前、BSC の移送前や廃棄前に実施する非常に重要な作業であり、作業員への感染を防止するために確実に除染効果を成功させる必要がある。

本稿では CD ガス除染効果に対する循環回路の効果について、循環回路の有無の条件で比較評価した。循環回路が有る場合、除染判定は成功であり、除染効果にとって重要なパラメータである安全キャビネット内部の温湿度と CD ガス濃度は概ね均一で適正な状態であった。CD ガス除染時間は 2.5 時間程度（処理工程 1.5 時間＋除去工程 1 時間）と短く、ホルムアルデヒドガスの 7 時間以上（処理工程 6～12 時間＋除去工程 1 時間以上）と比べて 1/3 程度に短縮できるメリットがある。一方、循環回路が無い場合、排気 HEPA 下流部は除染できず、除染判定は不成功であった。排気 HEPA 下流部は CD ガスの迅速な供給や速な除去が難しい状態であった。排気 HEPA 下流部が除染有効となるまで処理時間を延長すれば、除染判定が成功する可能性はあるが、処理時間延長は先に述べた除去時間の延長と同様に CD ガスの短時間除染のメリットを相殺することになる。さらに、作業台部は過剰な CT 値によって BSC に悪影響を及ぼす可能性がある。

したがって、CD ガス除染時に循環回路を設置して BSC 内のガス分布を均一にすることは、短時間で確実な除染効果の成功と BSC の保全にとって重要である。

文 献

- 1) バイオハザード対策用クラスⅡキャビネット，JIS K3800：2021 付属書 B
- 2) 荒川宏樹，朴 民亀，岩堀伸哉，佐々木雄治：二酸化塩素ガスを利用した安全キャビネット除染方法の評価，“令和 5 年度空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集” E-25，pp.101-104，(2023)
- 3) 坂井利夫，渡邊 真，杉浦彰彦：二酸化塩素ガスによる安全キャビネットの除染についての検討，第 20 回日本バイオセーフティ学会総会学術集会，(2021)

ABSTRACT

Chlorine dioxide (CD) gas has been added to the decontamination agents list in the 2021 revision of appendix B of the JIS K 3800 Class II biosafety cabinet (BSC). According to the described JIS standard, it is essential to install a recirculation loop from downstream of the HEPA filter exhaust to the cabinet work area for CD gas decontamination. However, because CD gas is highly diffusible, satisfactory decontamination may be achievable without a recirculation loop. In this report, decontamination efficacy with and without a recirculation loop is evaluated to confirm the efficacies of both CD gas decontamination methods. The results confirmed that the absence of a recirculation loop offsets the benefits of short-term decontamination with CD gas. Additionally, they suggest the possibility of negative effects, such as increased biosafety cabinet corrosion risk. For rapid successful decontamination and maintenance of the BSC, it is important to ensure uniform gas distribution by installing a recirculation loop for CD gas decontamination.

電池製造工程における ロータ式 NMP 濃縮装置の低温再生化

河岡将行・高橋秀人

Low-Temperature Regeneration System of the Rotary NMP Concentrator

Masayuki Kawaoka・Hideto Takahashi

リチウムイオン二次電池製造工場で使用される NMP (N-メチル-2-ピロリドン) 回収システムの省エネルギー化を目的として、濃縮ロータの低温再生化を検討した。試験装置で 80℃、70℃でロータ再生を行った場合、濃縮装置の除去効率は 95%以上で、従来の 130℃再生と同等の性能があることを確認した。また、同等の除去性能が出る条件で、70℃再生時と 80℃再生時のエネルギー使用量を比較すると、80℃再生時の方が省エネルギーであることを確認した。低温再生の熱源に、排熱を利用することにより、従来の回収システムと比較して年間 CO₂ 排出量を 19%、約 260 ton 削減できることを示した。

1. はじめに

近年、カーボンニュートラルが世界的な潮流となっており、モビリティの EV (Electric Vehicle) 化や再生可能エネルギーの蓄電設備の導入が急速に進んでいる。蓄電池として最有力のリチウムイオン二次電池 (LIB) は、今後急激に需要が高まることが予想され、現在主流の液系のものに加え全固体 LIB への期待も高まっている。

LIB の製造工程は、図 1 に示すように、超低湿度環境のドライルームや塗布乾燥機、排気処理設備など、エネルギー使用量が多い設備が多数ある。また、今後の普及に期待が高まっている全固体 LIB では、液系よりもさらに低湿度環境が求められる場合もあり、エネルギー使用量の増加も普及展開の課題となっている。そのため、電池製造コストの低減ならびに環境負荷低減のために、製造工程での省エネルギー化、資源の再利用が強く求められている。

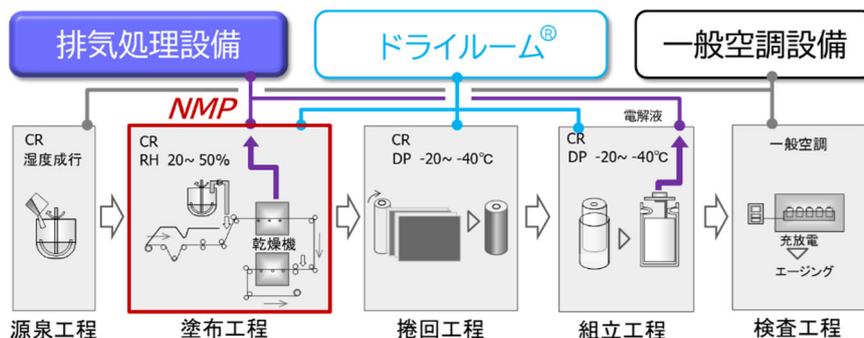


図1 LIB 製造工程

当社はこれまで、電池製造工程の省エネルギーツールとして、低温再生型の除湿機を製造販売してきた。さらなる省エネルギー、資源循環の要望に応えるべく、電極製造工程で使用される高価な有機溶剤のNMP（N-メチル-2-ピロリドン）の回収システムの省エネルギー化について検討した。

2. 電池工場におけるNMP回収システム

LIBの電極製造ラインでは、高価な有機溶剤であるNMP（N-メチル-2-ピロリドン）が電極に塗布する活物質とバインダーの混合物の溶媒として大量に使用されている。電極に塗布されたNMPは乾燥炉で蒸発し、高濃度のNMP蒸気を含む高温（100℃）空気が乾燥炉から排出される。環境負荷低減と経済性の観点から、排気中のNMPを積極的に回収し製造工程で再利用されている。

NMP回収システム（図2）は、大きく4つの機器群〔(I)乾燥炉、(II)排熱回収コイルユニット、(III)冷却回収ユニット、(IV)濃縮装置〕から構成されており、乾燥炉の給排気は循環再利用している。NMPの沸点は202℃と高く、冷却によって容易に凝縮するため、(I)乾燥炉からの排気を(III)冷却回収ユニットに通してNMPを冷却凝縮させて液化回収している。冷却によって200ppm程度まで下がった空気からさらにNMPを回収するために、(IV)ロータ式濃縮装置にて吸着処理し、再生ヒータで加熱した空気を用いて濃縮ロータに吸着したNMPを脱着させ、高濃度のNMP蒸気（1,400～2,000ppm）を含む再生排気を再度(III)冷却回収ユニットへと導いて冷却凝縮させている。

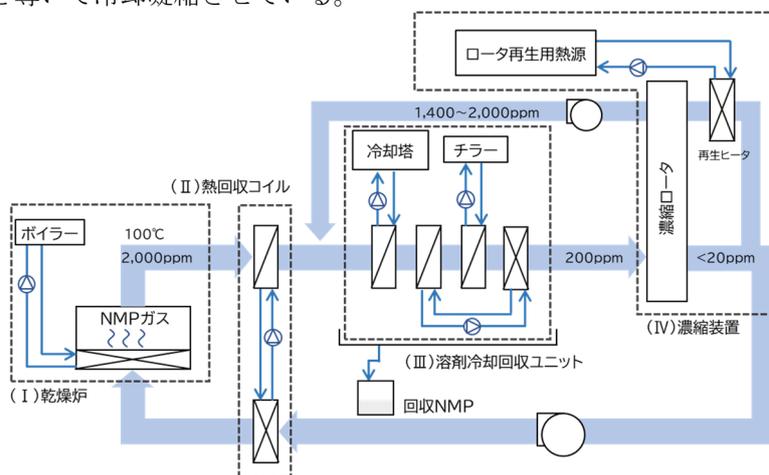


図2 NMP回収システム

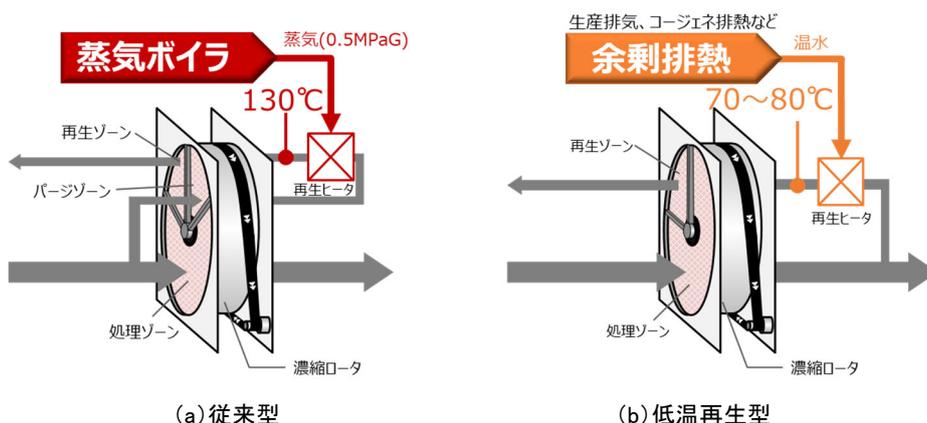


図3 ロータ式濃縮装置

NMP回収システムでは、空気の加熱・冷却に大量のエネルギーを必要とするため、大規模な電池工場では、NMP回収システムの省エネルギーが課題である。

図3(a)に示す従来の濃縮装置では、濃縮ロータの再生に130℃程度の高温空気が必要であったが、図

3(b) に示すように、80℃程度の低温でロータが再生できれば、生産設備やコージェネレーション設備等から排出される 100℃以下の排熱をロータの再生に利用できるため、濃縮装置での蒸気使用量削減による大きな省エネルギー効果が期待できる。そこで本研究では、溶剤濃縮ロータの再生温度を従来の 130℃から 80℃および 70℃に低温化した時の濃縮装置の除去性能を実験により検証するとともに、NMP 回収システムのエネルギー使用量を試算し、低温再生化と排熱利用による省エネルギー効果について報告する。

3. 低温再生時の除去性能の検証実験

再生温度 T_R が 80℃および 70℃での濃縮装置の除去性能を確認するために、図 4 に示す試験機を製作した。試験機は、処理ゾーンと再生ゾーンで構成されている。ロータの処理入口空気の NMP 濃度は、液体の NMP を流した気化メディアに空気を通気させて調整した。処理入口と処理出口の NMP 濃度は、GC-FID (GC4000SF, GL サイエンス社製) で測定した。

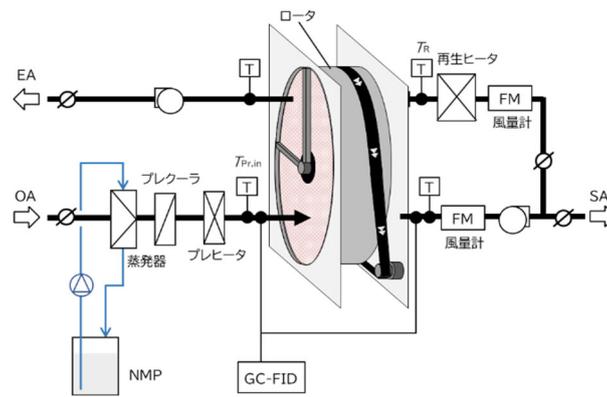


図4 NMP 濃縮試験機

実験条件は、処理入口 NMP 濃度 200 ppm、ロータ回転数 2r/h、濃縮倍率 (=処理風量/再生風量) は 7 倍とした。処理入口温度 ($T_{Pr,in}$) と除去率の関係を図 5 に示す。一般に NMP 濃縮装置に求められる除去率は 90~95%程度である。再生温度 80℃、70℃のいずれの条件においても除去率 95%以上での運転が可能であることを確認した。また、再生温度 80℃と 70℃で同じ除去率を達成するには、再生温度 70℃では 80℃の場合よりも処理入口温度を下げる必要があることが分かった。

濃縮装置の再生出口空気は、冷却回収ユニットに戻るため、再生出口温度が高いと冷却回収ユニットの負荷になる。NMP 回収システム全体の負荷を試算するうえで、再生出口温度は重要な因子となるため、図 6 に再生温度ごとの処理入口温度と再生出口温度の実験結果を示した。

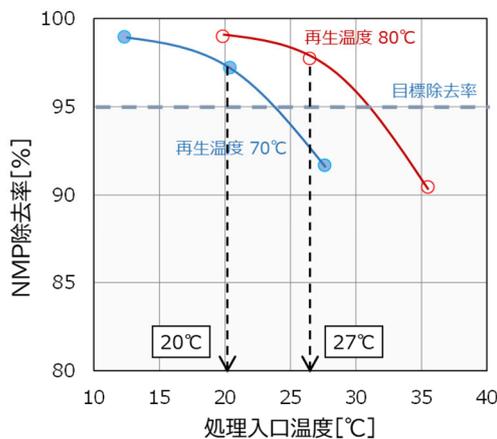


図5 処理入口温度と除去率の関係

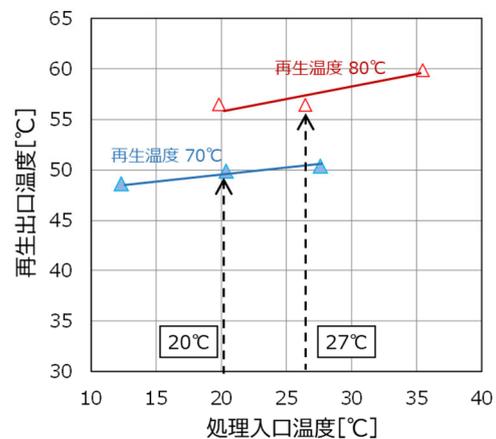


図6 処理入口温度と再生出口温度の関係

4. 低温再生による省エネルギー効果の確認

4.1 再生温度による比較

再生温度 80℃と 70℃で同等の除去率の場合、どちらの方がよりエネルギー使用量が少ないのかを確認するため、NMP 回収システムのエネルギー使用量を試算した。なお、本試算では送風動力、ポンプ動力については考慮していない。

試算には、図 5 に示した実験データのうち、ほぼ同等の除去率が得られた再生温度 $T_R=80^\circ\text{C}$ 、処理入口温度 $T_{Pr,in}=27^\circ\text{C}$ のデータと、再生温度 $T_R=70^\circ\text{C}$ 、処理入口温度 $T_{Pr,in}=20^\circ\text{C}$ のデータを使用した。濃縮倍率は 7 倍、ロータ再生出口温度は図 6 に示した実験値を使用した。

図 7 に、試算対象としたシステムの構成と各部位における風量・温度条件を示す。図中の Q1~Q6 は熱の移動を、M1、M2 は NMP の物質移動を示している。また、各コイルの熱負荷を図 8 に示す。加熱負荷をプラス、冷却負荷をマイナスで表示した。

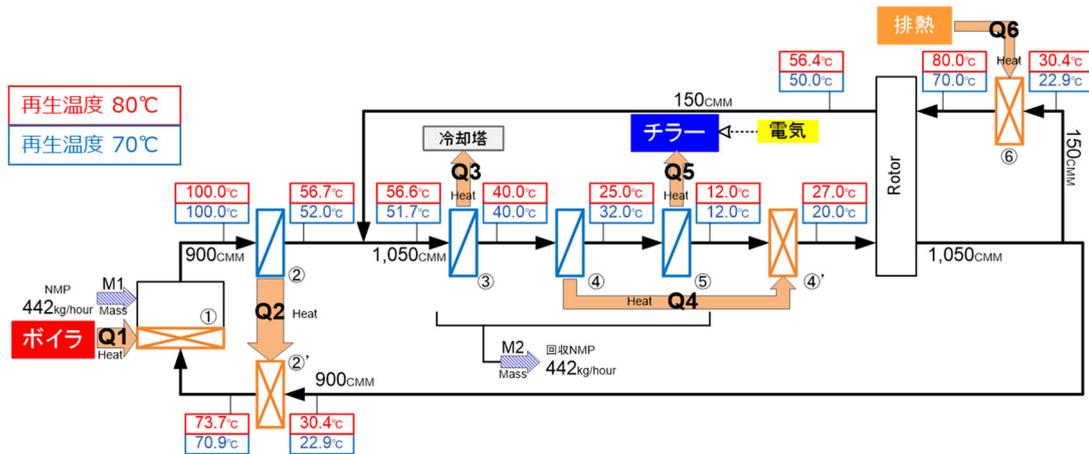


図7 各所の風量と温度 (80℃再生と70℃再生の比較)

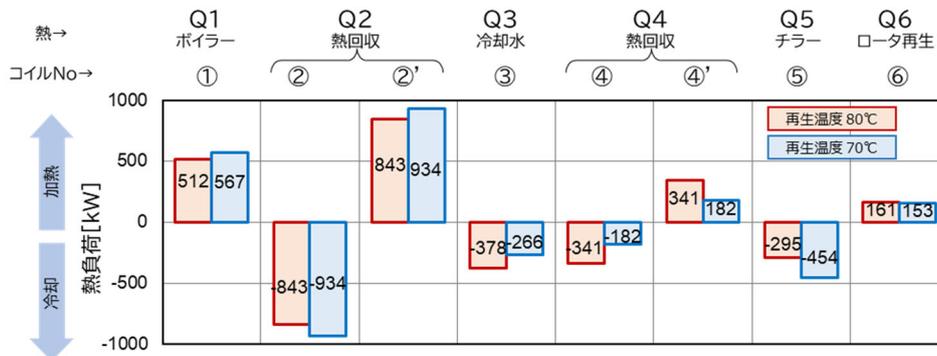


図8 コイルの熱負荷 (80℃再生と70℃再生の比較)

全コイル負荷のうち、熱源エネルギー使用に関わるのは乾燥炉加熱量 (ボイラー) Q1 とチラーの冷却熱量 Q5 およびロータ再生加熱量 Q6 である。試算結果から、再生温度 70℃と 80℃で比較すると、70℃に低温化することにより、ロータ再生加熱量 Q6 が下がるものの、乾燥炉加熱量 Q1 とチラーの冷却熱量 Q5 は 70℃再生の方が増加することがわかった。

これは再生温度 70℃の時は、処理入口温度を 20℃にすることによって、コイル④→④' の冷熱回収量が低下しチラーの冷却負荷 Q5 が増加 (80℃再生時: 295kW、70℃再生時: 454kW) することに加えて、さらに②' 乾燥炉給気加熱コイルの出口温度が低下 (80℃再生時: 73.3℃、70℃再生時: 70.9℃) して乾燥炉加熱負荷 Q1 が増加 (80℃再生時: 512kW、70℃再生時: 567kW) するためである。

4.2 従来(130°C再生)システムとの比較

低温再生化により排熱を利用した場合（再生温度 80°C）のエネルギー使用量と、従来の NMP 回収システム（再生温度 130°C）と比較した。図 9 に各部位における風量・温度条件を、図 10 に各コイルの熱負荷を示す。80°C再生と同等の除去性能で比較するため、130°C再生時は、濃縮倍率を 10 倍（再生風量 100 CMM）とした。

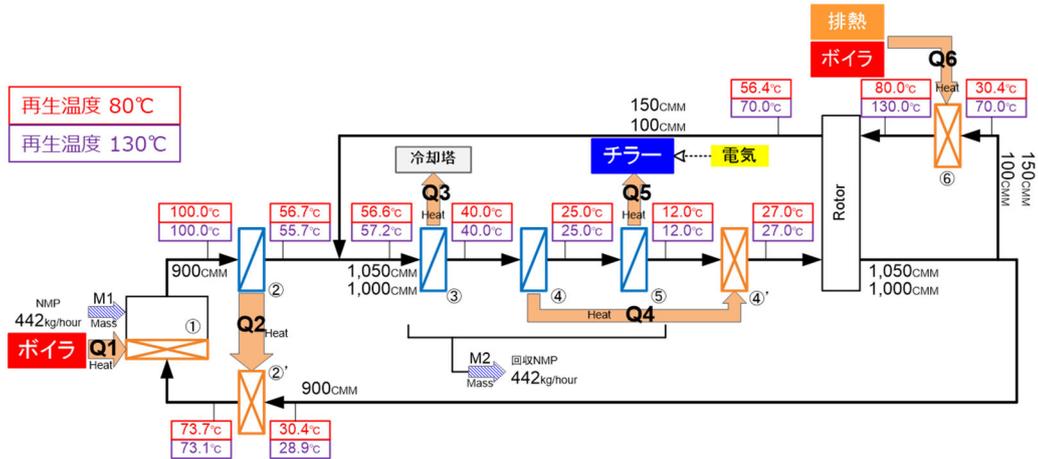


図9 各所の風量と温度(80°C再生と130°C再生の比較)

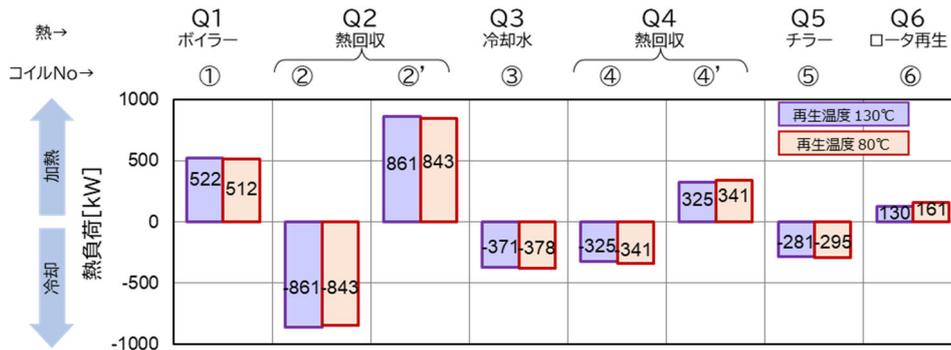


図10 コイルの熱負荷(80°C再生と130°C再生の比較)

再生温度 130°Cと 80°Cで比較すると、80°Cに低温化することより、乾燥炉加熱量 Q1 が下がるものの、チラーの冷却熱量 Q5 とロータ再生加熱量 Q6 は 80°C再生の方が増加することがわかった。

これは、130°C再生から温度を下げたことにより、同等の除去性能を維持するには再生風量を増加させる必要があるため、必要熱量が増えたと考えられる。また、図 10 のロータの再生加熱量 Q6 を見ると、80°Cの低温で再生したことによって加熱量が減っているわけではないことが分かる。したがって、低温再生化によって省エネルギーになるのは、外部の排熱が利用できる場合のみであり、ロータの再生用加熱源として蒸気ボイラを用いるケースで単純にロータの再生温度を下げて、ほとんど省エネルギーにはならないと言える。

一方、排熱を利用した 80°C低温再生と従来の蒸気を利用した 130°C再生の場合について、表 1 の計算条件で算出した年間の CO₂ 排出量を図 11 に示す^{注1)}。ロータの再生に排熱を利用することによって、システム全体として CO₂ 排出量が 19%、約 260 ton 減少することが分かる。したがって、100°C程度の温水等の排熱が利用できる場合は、このように低温再生システムでは従来よりも蒸気使用量が削減でき、CO₂ 排出量の削減、脱炭素化が図れる。

表1 CO₂排出量試算条件

年間稼働時間	8,760hours
CO ₂ 排出係数	
電気	0.376kg-CO ₂ /kWh
蒸気	0.06ton-CO ₂ /GJ

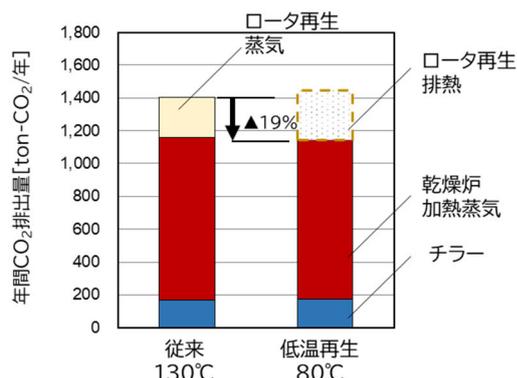


図 11 年間 CO₂ 排出量

5. おわりに

NMP 回収システムのエネルギー削減を目的として、ロータ式 NMP 濃縮装置の低温再生化を図った。その除去性能と省エネルギー性能を評価し、以下の結果を得た。

- ・実験により、再生温度 80℃および 70℃の条件で、除去率 95%以上を達成できることを確認した。
- ・試算により、ロータの再生温度 80℃と 70℃では、再生温度 70℃のときの方が NMP 回収システム全体のエネルギー使用量が多いことを確認した。
- ・試算により、濃縮ロータの再生に未利用排熱を利用した NMP 回収システムでは、従来の 130℃再生回収システムに比べて CO₂ 排出量を 19%、約 260 ton/年削減できることを確認した。

すでに上市している低温で再生可能なドライルーム用除湿機 (WINDS-III) とあわせて、今回の低温再生型 NMP 濃縮装置の開発により、リチウムイオン二次電池製造工場の蒸気使用量を大幅に削減することが可能になる。今後さらに需要が高まる全固体電池製造においては、リチウムイオン二次電池以上の低湿度化、脱炭素化が求められることが予想されるため、乾燥炉排熱やコージェネ排熱などの未利用熱を最大限に活用した、省エネルギーな電池製造環境を今後も提供していく所存である。

注 1) 排熱の CO₂ 排出量はゼロとみなした。

文 献

- 1) 新永秀臣：リチウムイオン二次電池製造工程排気からの NMP 回収装置，冷凍，87 (1012)，36-42 (2012)

ABSTRACT

In order to reduce the energy of NMP (N-methyl-2-pyrrolidone) recovery systems, which are used in lithium-ion battery manufacturing plants, we studied the performance of a rotary concentrator that works with regenerating adsorbent rotor at lower temperature than those currently in use. When the rotor is regenerated at 80 °C and 70 °C, the concentrator has a removal efficiency of >95%, which is the same performance as at 130 °C. Comparing the energy consumption during regeneration at 70 °C and regeneration at 80 °C under conditions that yield the same removal performance, it was confirmed that regeneration at 80 °C saves more energy. According to our trial calculation for a model NMP recovery system, utilization of outside waste heat for regeneration will reduce annual CO₂ emission by 19% in comparison with conventional recovery system.

フィールド試験におけるリキッドデシカントユニットの 加湿性能の検証

澁澤朱音・馬場大輔・川上理亮・谷野正幸

三宅友香・前田彩子・原田政利*¹

Verification of Humidification Performance on Liquid Desiccant Unit in the Field Test

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

脱炭素に資する新たな加湿システムの開発を目的とし、従来のリキッドデシカント空調システムから気液接触部のみを抽出し、小型で構造を簡素化したリキッドデシカントユニットを開発した。本報では、一般空調並びに産業空調を念頭に定格風量 10,000 m³/hr のフィールド試験機を当社イノベーションセンターの外調機系統に設置して、加湿性能の検証と液体調湿剤である塩化リチウム水溶液の飛散検証を行った。入口空気の温湿度条件が変動する場合でも出口空気の乾球温度 [°CDB]と相対湿度 [%RH]の標準偏差 3σ はそれぞれ 0.5°CDB 以下、0.5%RH 以下であり、高い温湿度制御性を示した。また、当該ユニットからの塩化リチウム水溶液の飛散試験では、設計面風速より速い 3.0 m/s においても腐食リスクとなる飛散は見られなかった。

1. はじめに

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、一般空調および産業空調の更なる消費エネルギーの削減および脱炭素化が求められている。特に一般空調において、新型コロナウイルスやインフルエンザウイルス等の感染予防策である室内湿度の維持^{1,2)}と換気量の増加³⁾により、空調機器の消費エネルギーが増加する課題が顕在化してきている。これらの課題を解決するために、省エネと室内環境の維持を両立する加湿システムの開発が望まれる。産業空調において、外気の加湿処理等に用いられる蒸気加湿器は高い加湿能力と加湿効率を有していることで多く採用されているが、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⁴⁾。そこで、省エネ性と加湿制御性を達成する加湿方式としてヒートポンプ加熱と気化式加湿器を用いた加湿システムが開発されている^{5,6)}。しかしながら、水加湿の共通課題として、微生物に起因する空気質の汚染やスライムの発生がある。定期的な清掃の実施、抗菌効果のある薬剤添加や素材の適用などの対策が行われているが、そのリスクがゼロとなる根本的な解決まで至っていない⁷⁾。

そこで我々は、液体調湿剤による高精度な除湿および加湿制御が可能なりキッドデシカント空調システムに着目した^{8,9)}。基本原理としては、液体調湿剤と空気を接触させることで液体調湿剤濃度により供給空気の相対湿度を制御するものである^{10,11)}。蒸気生成が不要であり、なおかつ使用する冷温水の温度帯もヒ

*¹ ダイナエアー株式会社 製品開発部門

ートポンプで対応可能な範囲であるため、蒸気加湿よりも消費エネルギーが抑えられる¹²⁾。一般的なリキッドデシカント空調システムは**図1**のように除湿および加湿を行う処理部と除湿時に希釈された液体調湿剤を濃縮する再生部から構成されている。液体調湿剤である塩化リチウム水溶液（LiCl aq.）は除菌作用を有しているため、エレメントでの微生物や菌等の繁殖を抑えられ、細菌などの空気汚染物質の除去が期待できる^{13,14)}。しかしながら、LiCl aq.は高い金属腐食性を有するため¹⁵⁾、熱交換器と配管には耐腐食性の材料を用いる必要がある。そのため、機器コストが高いという課題があった。また、供給空気の乾球温度は空気とLiCl aq.が接触する過程で制御される。したがって、気液接触部を流れるLiCl aq.は、空気を加熱または冷却するための熱量を十分に供給できる循環流量とする必要がある。LiCl aq.の循環流量が多いほど飛散しやすくなるため、従来のリキッドデシカント空調機的设计面風速は1.5 m/s程度が限界であり、機器サイズが大きいという課題もあった。

前報ではそれらを解決するため、**図1**赤枠内の加湿機能部である気液接触器部のみ（リキッドデシカントユニット：LDU）を抽出することで乾球温度の制御はLDU外で行うシステムを構築し、加湿性能の基礎特性を報告した^{16,17)}。本報ではLDUの実建物への導入に向けてフィールド試験機による加湿性能の検証、および飛散試験の結果について報告する。なお、本検証はリキッドデシカント空調メーカーであるダイナエア株式会社と共同で行った。

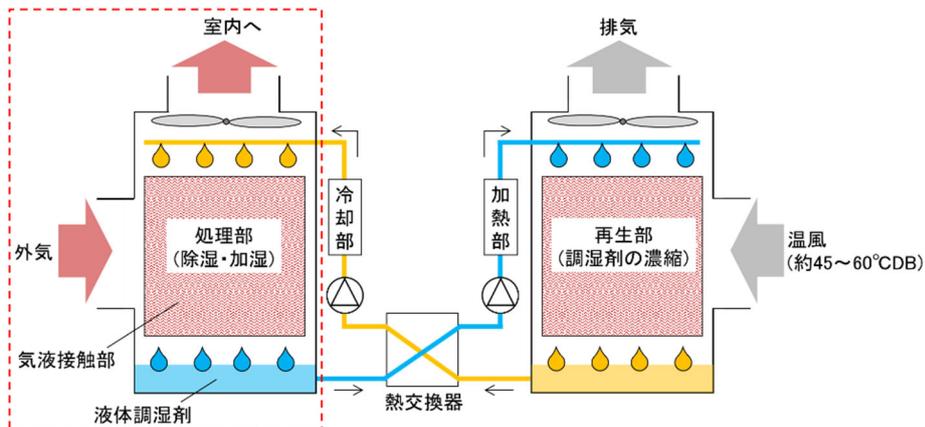


図1 一般的なリキッドデシカント空調システムの概略図

2. 検証試験の概要

2.1 LDU 調湿原理

LDUの概略図を**図2**に、気液接触部の外観を**写真1**に示す。LDUは気液接触部、循環ポンプ、給水配管、LiCl aq.から構成されている。加湿時には循環ポンプによりLiCl aq.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でできており、LiCl aq.と導入空気が十分に接触するような形状に設計されている¹⁸⁾。そして、導入空気とLiCl aq.が接触する際、両者に含まれる水分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まる。LiCl aq.濃度と相対湿度の平衡関係を**図3**に示す。**図3**より、溶液の濃度が高いほど、空気の相対湿度が低くなることがわかる。これはLiCl aq.の気液平衡水蒸気圧は濃度が高いほど低くなり、空気中の水分を吸収しやすくなるという性質を持つためである。加湿時は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、水溶液は濃縮する方向に進んでいく。そのため、LDUの出口空気の相対湿度を制御ターゲットとし、給水量の調節によりLiCl aq.濃度を変化させることで加湿量を制御する。

また各LiCl aq.濃度におけるLiCl aq.の温度と相対湿度の平衡関係を**図4**に示す。**図4**より、各濃度において相対湿度はLiCl aq.の温度変化に対してほぼ一定であることがわかる。そのため、本システムでは出口空気の乾球温度と相対湿度を個別に制御することが可能である。すなわち、LiCl aq.の濃度（給水量）を調

節することで出口空気の相対湿度を制御し、入口空気の乾球温度を調節することで出口空気の乾球温度を制御することができる。なお、LDUでは溶液の加熱・冷却は直接行わないことから空気線図上の動きは等エンタルピー変化となる。

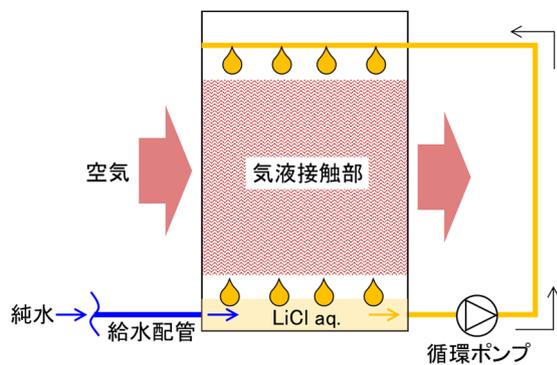


図2 LDU 概略図



写真1 LDU 気液接触部の外観

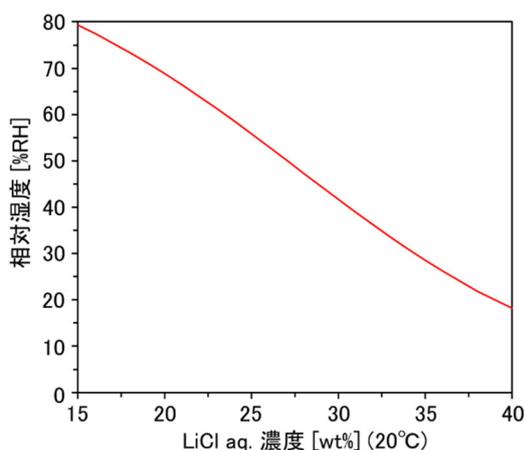


図3 LiCl aq.濃度と相対湿度の平衡関係

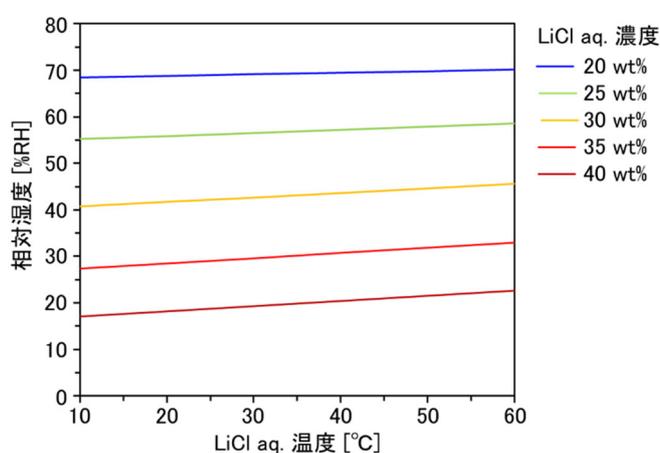


図4 各 LiCl aq.濃度における LiCl aq.温度と相対湿度の平衡関係

2.2 試験装置および内容

2.2.1 フィールド試験機による加湿性能試験

実建物規模を想定した風量 (10,000 m³/hr) における加湿性能の検証のため、フィールド試験機 (機器サイズ: 1,300^W × 1,800^D × 1,600^Hmm) を 2023 年 6 月に当社イノベーションセンターの外調機系統に設置した。試験期間は 2023 年 6 月から 11 月までとした。写真 2 にフィールド試験機の外観、図 5 に系統図を示す。本試験装置は外調機と LDU で構成されており、LDU 通過後の空気は当該施設のラボ棟各部屋に供給される。LiCl aq. の循環流量は物質伝達率等を事前に確認することで決定し、従来のリキッドデシカント空調機の 1/10 以下とした。本検証では、フィールド試験機の加湿制御性および追従性の確認のため、LDU の入口空気を種々の条件に設定し、LDU の出口空気における温湿度の時間変化を測定した。出口空気の相対湿度は、LDU 下流側に設置した温湿度センサの値をもとに給水比例弁により給水量を調整し、LiCl aq. 濃度を制御することで設定値に調整される。各センサは、温湿度センサの測定精度 ±0.1°CDB、±0.8%RH、風速センサの指示精度 ±2.5%F.S. (25 °C)、差圧計の測定精度 ±1.0%F.S.、コリオリ流量計の直線性は 0~25%F.S. 時に ±1.0%F.S.、25~100%F.S. 時に ±4.0%R.D. である。なお、風速センサは角ダクト (600 × 550) の長辺と短辺に 3 個ずつ取り付け、6 箇所平均風速 [m/s] とダクトの断面積 [m²] から風量 [m³/hr] を算出した。

まず、入口空気を定常状態として、各加湿負荷における加湿制御性を確認した。表 1 に入口空気条件を示

す。入口空気の乾球温度は一定として相対湿度を変化させることで、各加湿負荷を再現した。試験手順は、初めに LDU に出口相対湿度の設定値 (50%RH) を入力し、制御ターゲットの設定を行った。次にファンの回転数により風量を調節した。そして、入口空気の乾球温度と相対湿度を、外調機の冷温水コイルおよびデシカントローターにより調節した。本検証では、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 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{CDB}$ 、 $\pm 2.0\%\text{RH}$ で定常状態となったことを確認した後、60 min 間のデータ取りを行った。なお、装置規模による加湿性能の比較として後述する小型試験機においても同様の試験を行った。

次に、入口空気を外気成り行き非定常状態として、LDU の追従性を確認した。このとき、出口空気の乾球温度は、LDU 下流側の露点/乾球温度センサの値を基に外調機の冷温水流量によって $25\text{ }^{\circ}\text{CDB}$ になるように制御した。

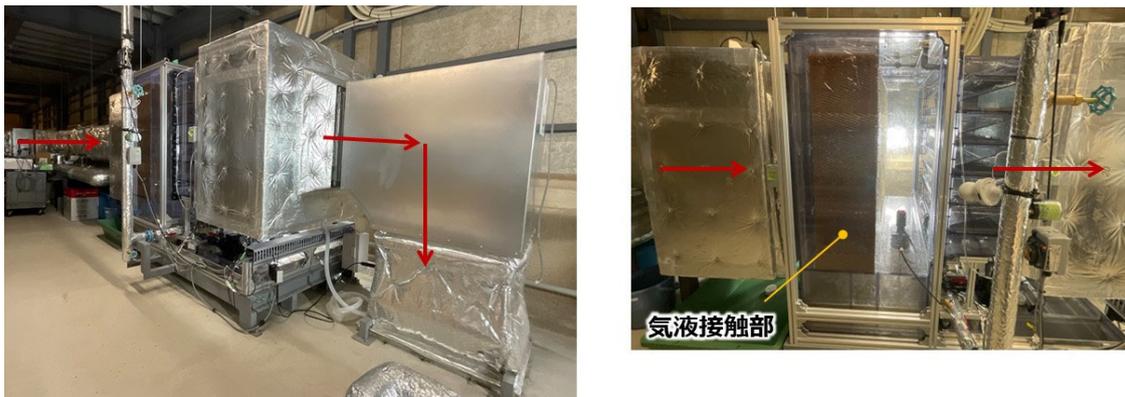


写真 2 フィールド試験機の外観 (左)全体、(右)正面

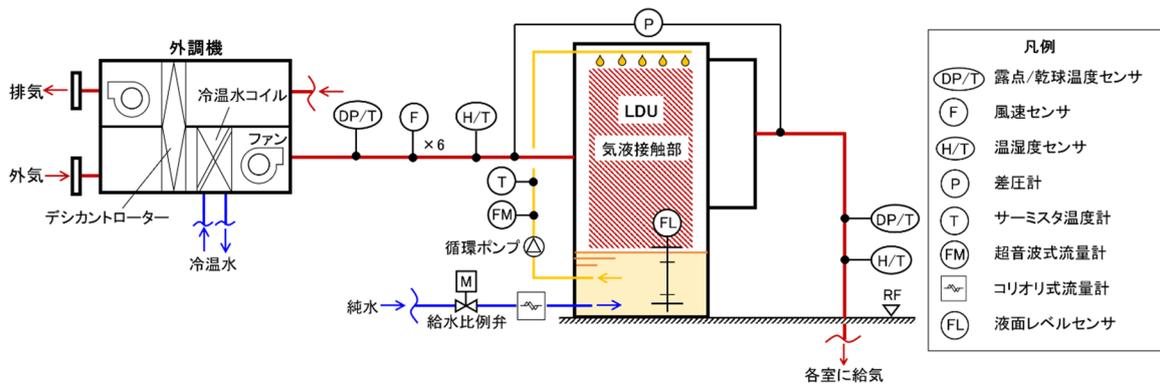


図 5 フィールド試験機の系統図

2.2.2 小型試験機による微粒子の飛散試験

LDU から微粒子状で飛散する LiCl aq. の量を調べるために、定格風量 $1500\text{ m}^3/\text{hr}$ の小型試験機 (機器サイズ: $920^{\text{W}} \times 850^{\text{D}} \times 1,250^{\text{H}}\text{mm}$) にて飛散物のサンプリングと定量分析を行った。図 6 に小型試験機の系統図とサンプリング箇所を示す。小型試験機は、空調機、ヒーター、HEPA フィルター、LDU、活性炭フィルター、それらを接続するダクトから構成されている。LDU 入口相対湿度の調節は、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により行った。LDU の出口相対湿度はフィールド試験機と同様に LDU 下流側に設置した温湿度センサの値をもとに給水量により制御した。出口乾球温度は同様の温湿度センサをもとにヒーター出力により制御した。各センサの測定精度は、温湿度センサ $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{CDB}$ 、 $\pm 0.8\%\text{RH}$ 、差圧計 $\pm 1.0\%\text{F.S.}$ 、定置式複合ピトー管センサ $\pm 2\%\text{R.D.}$ であり、パーティクルカウンターの測定粒径区分は $0.3/0.5/1.0/3.0/5.0\text{ }\mu\text{m}$ 以上である。

試験手順としては、初めに LDU の出口相対湿度と乾球温度の設定値を入力した。次にファンの回転数により LDU にて面風速が 3.0 m/s (風量 2,500 m³/hr) になるよう調節した。そして入口空気の相対湿度はブラインの温度および流量により調節した。以上の操作により、入口空気は 32°CDB、19%RH、出口空気は 25°CDB、50%RH とし、出口空気が定常状態に達した後、微粒子のサンプリングを行った。まずサンプリング箇所①において、パーティクルカウンターとダクトをチューブで接続し測定を行い、次にサンプリング箇所③、最後に②の順に各箇所の粒子数を測定した。いずれの箇所も測定条件は 1 min×5 回として、5 回の平均値を測定結果とした。

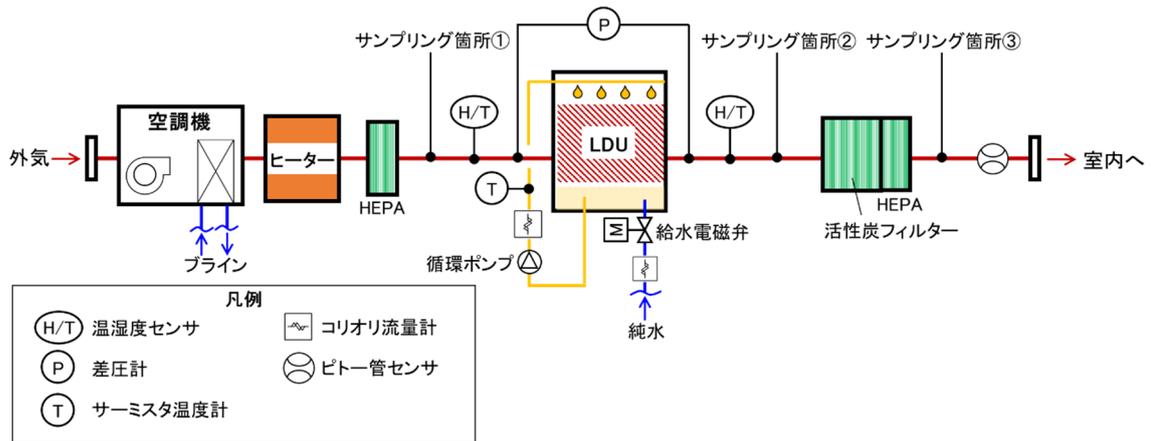


図 6 小型試験機の系統図

2.3 計算方法

乾球温度 [°CDB]および相対湿度 [%RH]においては試験時間における時間平均 \bar{x} と標準偏差 σ を算出した。標準偏差 σ は式(1)により算出した。

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

n はデータ総数 [個]、 x_i は測定間隔ごとの乾球温度または相対湿度である。フィールド試験機の測定間隔は 5 s、小型試験機は 1 s である。

小型試験機の風量 Q [m³/h]は式(2)により算出した。

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

P_v は動圧 [Pa]、定数 A, α, ρ はそれぞれ管路の断面積 [m²]、センサ係数 [-]、空気密度 [kg/m³]である。微粒子の飛散試験において、粒子数から質量濃度への換算は以下の計算方法によって行った。なお、飛散した微粒子の形状は球形、計測されたものは全て LiCl aq.と仮定した。初めに、式(3)により計測粒径区分ごとの粒子質量濃度 C'_m [g/m³]を算出する。

$$C'_m = C_p \times M_p \quad (3)$$

C_p は粒子の個数濃度 [個/m³]、 M_p は粒子の単位質量 [g/個]であり、それぞれ式(4)および(5)により求める。

$$C_p = \frac{\bar{n}}{Q_p \times t} \quad (4)$$

$$M_p = V_p \times \rho_p \times 10^3 \quad (5)$$

\bar{n} は測定した粒子数の平均値 [個]、 Q_p はパーティクルカウンターの空気吸引量 [m³/min]、 t は試験時間 [min]である。本検証では $Q_p = 0.00283$ m³/min、 $t = 1$ min である。また、 V_p は粒子の単位体積 [m³/個]であり粒子径から算出した。 ρ_p は LiCl aq.の密度 [kg/m³]であり、本検証ではサンプリング中にコリオリ流量計に

で測定した値の平均値 (1130 kg/m³) を用いた。そして、各計測粒径区分の粒子質量濃度 C'_m を合計して求めた総粒子質量濃度 C_m を式(6)に代入し、空気中に含まれる塩素の気相濃度 $C_{m,cl}$ [g/m³] を算出した。

$$C_{m,cl} = C_m \times \frac{MW_{cl}}{MW_{LiCl}} \times \frac{C_s}{100} \quad (6)$$

MW_{LiCl} は LiCl の分子量 (42.39 g/mol)、 MW_{Cl} は Cl の原子量 (35.50 g/mol) である。 C_s は LiCl aq. の溶液濃度 [wt%] であり、本検証ではサンプリング中の溶液密度から算出した値 (22.1 wt%) を用いた^{19,20)}。

3. 検証試験結果

3.1 フィールド試験機の加湿性能の検証

実建物規模を想定した風量における LDU の加湿性能を検証するため、最大風量が約 11,000 m³/hr のフィールド試験機を用いて、入口空気を定常状態とした場合の出口空気の時間変化を測定した。各試験条件における、小型試験機およびフィールド試験機の風量、出口空気の乾球温度と相対湿度、LDU への給水量の測定結果を表 1 に示す。また、表 1 の No. 3 における出口空気の乾球温度と相対湿度の時間変化のグラフを図 7 に示す。表 1 より、いずれの条件においてもフィールド試験機の標準偏差 3σ は小型試験機と同様に 0.5 以下であった。そして、加湿負荷が大きい条件ほど給水量が増加していることから、LDU は給水量による濃度調整によって加湿制御が行われることを検証できた。加えて図 7 より、入口および出口空気の絶対湿度差が 0.3 g/kg³ であり加湿負荷が特に小さい No.3 においても、乾球温度および相対湿度は設定値で安定する結果が得られた。これらの結果から、LDU は装置規模によらず液体調湿剤の濃度調整による安定した相対湿度制御が達成できることを確認した。

表 1 小型試験機、フィールド試験機における入口空気条件および出口空気の測定結果

No.	試験対象	入口空気条件		風量 [m ³ /hr]	出口空気 測定結果				給水量 [L/hr]
		乾球温度 [°CDB]	相対湿度 [%RH]		乾球温度 [°CDB]		相対湿度 [%RH]		
					平均値	標準偏差 (3σ)	平均値	標準偏差 (3σ)	
1	小型試験機	25	34	1,494	21.8	0.2	50.1	0.1	2.1
	フィールド試験機			10,593	21.5	0.4	49.9	0.2	
2	小型試験機	25	39	1,494	23.1	0.2	50.2	0.1	1.8
	フィールド試験機			9,923	22.6	0.2	49.9	0.2	
3	小型試験機	25	45	1,507	24.0	0.2	50.3	0.1	1.3
	フィールド試験機			11,235	24.1	0.2	50.0	0.2	

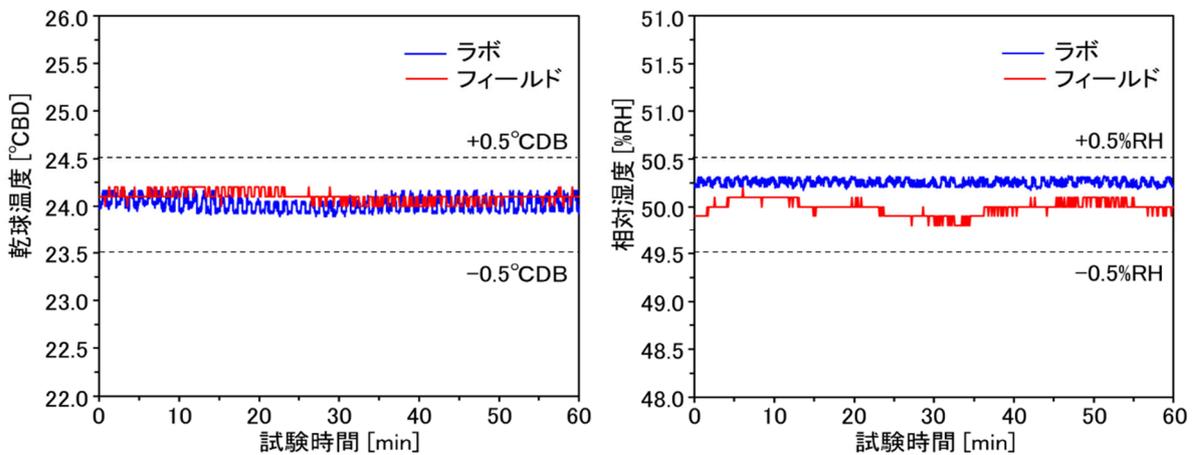


図 7 LDU の出口乾球温度(左)および相対湿度(右) 時間変化

次に追従性を検証するため入口空気を外気成り行ききの非定常状態として、出口空気の時間変化を測定した。入口および出口空気の乾球温度、相対湿度の時間変化を図8に示す。試験時間全体の出口乾球温度の平均値と標準偏差 3σ は $24.8 \pm 0.1^\circ\text{CDB}$ 、相対湿度は $50.0 \pm 0.4\%RH$ という結果が得られた。そして図8より、入口空気の変動によらず乾球温度と相対湿度がともに設定値で安定していることを確認した。これらの結果から LDU は高い追従性を有し、本システムでは乾球温度と相対湿度を個別に制御することで安定した温湿度が得られることを検証できた。

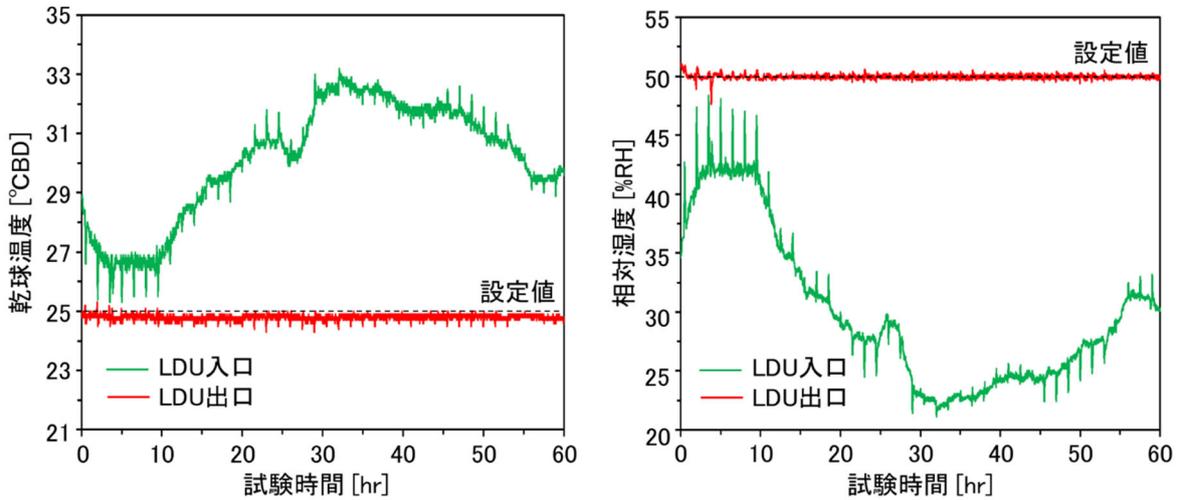


図8 フィールド試験機 入口および出口空気の乾球温度(左)、相対湿度(右)の時間変化

この時の入口および出口空気の絶対湿度の時間変化、絶対湿度差と給水量の相関関係を図9に示す。そして、加湿負荷が小さい時間帯である3 hr から5 hr 間における入口出口の絶対湿度差および給水量と、加湿負荷が大きい時間帯である30 hr から35 hr 間におけるそれらを表2に示す。図9および表2より、定常試験と同様に加湿負荷が大きいほど給水量が多くなるのがわかる。これは、入口空気の水蒸気圧が低い場合、LiCl aq. から空気側に移動する水分量が増加するためである。加えて、図9(b)より、絶対湿度差に対して給水量は比例関係にあることがわかった。以上の結果から、LDU では給水量の比例制御による相対湿度の調整が可能であることを確認した。

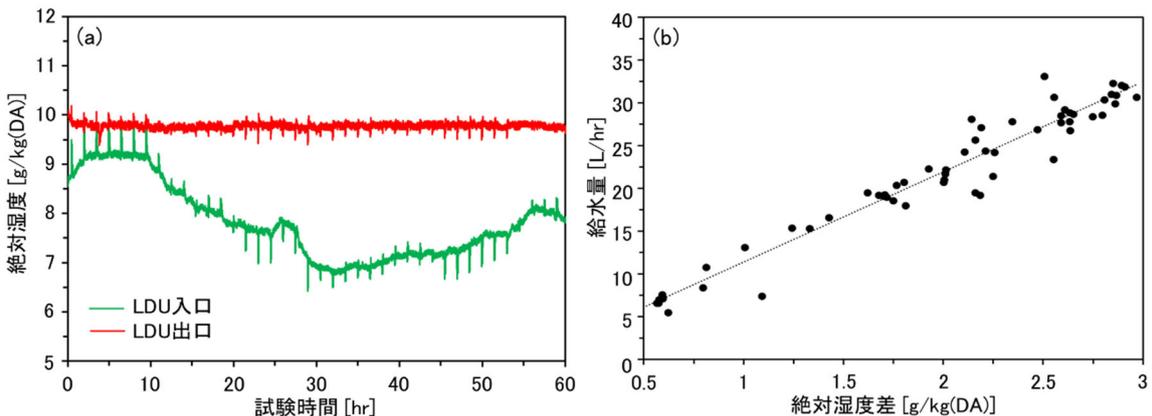


図9 フィールド試験機 (a) 入口および出口空気の絶対湿度の時間変化 (b) 絶対湿度差と給水量の相関関係

表2 フィールド試験機 入口および出口空気の絶対湿度と給水量

試験時間 [hr]	絶対湿度 [g/kg(DA)]		給水量 [L/min]	
	入口(平均値)	出口(平均値)	差	平均値
5~10	9.21	9.79	0.58	7.1
30~35	6.87	9.76	2.89	31.6

なお、風量 10,000 m³/hr におけるフィールド試験機の圧力損失は 171 Pa であり、同規模のデシカントローター（風量 10,000 m³/hr、191 Pa）と同程度であった。以上の結果から、LDU は実建物規模の風量にも適用でき、なおかつ高精度な加湿制御が可能であることがわかった。

3.2 微粒子の飛散試験

LDU から飛散する微粒子数を調べるため、小型試験機において面風速を設計値よりも速い 3.0 m/s まで上げて、各サンプリング箇所の微粒子数をパーティクルカウンターで測定した。その結果を表 3 に示す。表 3 より、LDU 出口直後となるサンプリング箇所②において 5.0 μm 以上の粒子の飛散は見られないことがわかった。また、サンプリング箇所②で検出された微粒子数を質量濃度に換算したところ、0.0029 μg/m³であった。これは東京ドームの体積（124 万 m³）に対して 0.0036 g の微粒子が存在する換算となり、非常に低い値である。加えて、試験後に LDU 下流側のダクトを観察したところ腐食は見られなかったことから、LiCl aq. 微粒子の飛散によるダクトの腐食リスクはほぼないと言える。以上の結果から、LDU では乾球温度の制御を加湿ユニット外で行うことで LiCl aq. の循環流量が抑えられ、面風速 3.0 m/s まで使用可能であることを検証した。従来のリキッドデシカント空調機の設計面風速は 1.5 m/s 程であるため、LDU では大幅に小型化が可能であることを確認した。

表 3 各サンプリング箇所の微粒子数

粒径[μm]	粒子数(平均値)[個]		
	①	②	③
0.3	1	17	0
0.5	0	6	0
1.0	0	2	0
3.0	0	1	0
5.0	0	0	0

※①～③は図 6 中のサンプル箇所を示す

4. おわりに

本報では、一般空調および産業空調を念頭に定格風量 10,000 m³/hr のフィールド試験機を当社イノベーションセンターの外調機系統に設置して、リキッドデシカントユニットの加湿性能および LiCl aq. の飛散量の検証を行った。その結果、得られた結論を下記に示し、今後の展望について言及する。

- ・実建物における LDU の加湿制御性の検証のため、入口空気を定常状態として、種々の条件における出口空気の乾球温度と相対湿度を測定した。いずれの条件において乾球温度および相対湿度の標準偏差 3σ は 0.5°CDB 以下、0.5%RH 以下であり、加湿負荷が低い条件においても高い加湿制御を示した。また、加湿負荷に応じて給水量が変化することを確認した。
- ・追従性の検証のため、入口空気を外気成り行きの変常状態とし、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。出口乾球温度の平均値と標準偏差 3σ は 24.8±0.1°CDB、相対湿度は 50.0±0.4%RH となり、設定値で安定した温湿度が給気された。このことから、LDU は外気の負荷変動に対し、高い追従性を示すことを確認した。また、加湿負荷に対して給水量がほぼ比例関係にあったことから、LDU では給水量の比例制御による安定した加湿制御が可能であることがわかった。
- ・LDU の圧力損失は風量 10,000 m³/hr で 171 Pa であり、同規模のデシカントローター（風量 10,000 m³/hr、191 Pa）と同程度であった。以上の結果から LDU は実建物規模の風量にも適用可能であり、高精度な加湿制御性と追従性を有することを確認した。

・LDU由来の微粒子数を調べるため、飛散試験を行った。面風速 3.0 m/s まで風速を上げた際に LDU 下流に飛散した微粒子濃度は 0.0029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であることから、LiCl aq.によるダクトの腐食リスクは低いと判断できる。したがって、LDUはLiCl aq.の循環流量を抑えることで面風速 3.0 m/s まで使用可能であり、従来のリキッドデシカント空調機から大幅に小型化が可能であることを確認した。

以上の結果から、LDUは蒸気レスによる省エネと高い加湿制御性を必要とする産業空調、例えば塗装工場などにニーズがあると考えられる。また、LiCl aq.自体の殺菌作用を合わせると、LDUは高い加湿制御性と衛生的な環境を必要とする建物、例えば病院、医薬品工場、ホテルなどへの適用が期待できる。今後は、LDUの市場化に向けた開発と展開を進めていきたいと考えている。

文 献

- 1) 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).
- 2) L. Duo, Z. Yang, L. Zhang, S. Wang, T. Bai, Y. Xiang, E. Long: Systematic review of the effects of environmental factors on virus inactivation: implications for coronavirus disease 2019, *International Journal of Environmental Science and Technology*, **18**, 2865-2878(2021).
- 3) 山中俊夫：自然換気と感染リスク評価，“空気調和・衛生工学”，**95**(8), 11-17(2021).
- 4) 武田尚吾, 古賀修, 熊田瑤子, 丹羽英治, 高橋直樹, 進藤宏行：次世代都市型病院の室内環境・エネルギー性能の検証・評価研究（第4報）加湿方式によるエネルギー評価性能，“空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”，**8**, 345-348(2014).
- 5) ウェットマスター株式会社 HP：<https://www.wetmaster.co.jp/product/vapor/vhr/>.
- 6) 間宮啓介, 田中英, 有村哲郎：制御性の高い滴下浸透気化式加湿方式に関する研究（第2報）二段加湿時の制御性の検証，“空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”，**7**, 161-164(2020).
- 7) 田村一, 安井文男：気化式加湿方式を用いた空調機における微生物汚染の調査結果, *空気清浄*, **50**(5), 11-17(2013).
- 8) S. Yamaguchi, J. Jeong, K. Saito, H. Miyauchi, M. Harada: Hybrid liquid desiccant air-conditioning system; Experiments and simulations, *Applied Thermal Engineering*, **31**, 3741-3747(2011).
- 9) A. Giampieri, Z. Ma, A. Smallbone, A. P. Roskilly: Thermodynamics and economics of liquid desiccants heating, ventilation and air-conditioning – An overview, *Applied Energy*, **220**, 455-479(2018).
- 10) 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).
- 11) 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期間における性能評価，“日本冷凍空調学会年次大会講演論文集”，(2021).
- 12) 七尾龍一, 原田政利, 丹羽英治, 河野匡志：液式デシカント空調システムの高度化と適用性向上に向けた研究 液式デシカント空調機の概要と加湿時のエネルギー性能評価，“空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”，**3**, 193-196(2020).
- 13) H. Fu, X. Liu: Review of the impact of liquid desiccant dehumidification on indoor air quality, *Building and Environment*, **116**, 158-172(2017).
- 14) 柚本玲, 田中辰明：デシカント空調機による浮遊真菌除去効果，“第24回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会”，78-19(2006).
- 15) 山田治夫：液体吸収剤による除湿について, *化学工学*, **22**(8), 38-45(1958).
- 16) 澁澤朱音, 馬場大輔, 川上理亮, 谷野正幸, 三宅友香, 原田政利：リキッドデシカントユニットにおける加湿性能の基礎特性の把握, *高砂熱学イノベーションセンター報*, **36**(2022).
- 17) 澁澤朱音, 馬場大輔, 川上理亮, 谷野正幸, 三宅友香, 原田政利：リキッドデシカントユニットにおける加湿性能の検証，“空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集”，301-304(2023).

- 18) 安田直史, 山口誠一, 齋藤潔, 宮内彦夫, 原田政利: リキッドデシカントの除加湿メディアにおける熱物質移動特性に関する研究, “日本冷凍空調学会年次大会講演論文集”, 331-334(2011).
- 19) M. R. Conde: Aqueous solutions of lithium and calcium chlorides – Property formulations for use in air conditioning equipment design, *Int. J. Thermal Sciences*, **43**(367), (2004).
- 20) 山口誠一, 齋藤潔, 宮内彦夫, 原田政利: リキッドデシカント空調システム用除湿器の熱・物質移動特性の究明—第1報: 実験による検討—, “日本冷凍空調学会論文集”, **29**(1), 229-236(2012).

ABSTRACT

To develop a new humidification system that contributes to decarbonization, we have developed a liquid desiccant unit with a compact and simplified structure by extracting only the gas-liquid contact part from a conventional liquid desiccant air conditioning system. A field test machine with a rated airflow rate of 10,000 m³/hr was installed in the outdoor air handling system of our Innovation Center to verify humidification performance for use in general or industrial air conditioning system. The standard deviation 3σ of the dry bulb temperature and relative humidity of the supply air was less than 0.5°CBD and 0.5%RH respectively, regardless of the steady/unsteady state of the introduced air, indicating high controllability of temperature and humidity. In the scattering test of lithium chloride solution, no amount of scattering was found to pose a corrosion risk under a surface wind speed 3.0 m/s, which is faster than the design value.

廃プラスチックエネルギーの高度有効利用

谷野正幸・増田正夫・鎌田美志
成瀬一郎^{*1}・堀田幹則^{*2}・長沼宏^{*3}
野田英彦^{*4}・折田久幸^{*4}・幡野博之^{*5}
村瀬和典^{*5}・小山寿恵^{*6}・小林佳弘^{*6}
熊野寛之^{*7}・森本崇志^{*7}

Advanced Effective Utilization of Waste Plastic Energy

Masayuki Tanino・Masao Masuda・Haruyuki Kamata
Ichiro Naruse^{*1}・Mikinori Hotta^{*2}・Hiroshi Naganuma^{*3}
Hidehiko Noda^{*4}・Hisayuki Orita^{*4}・Hiroyuki Hatano^{*5}
Kazuo Murase^{*5}・Toshie Koyama^{*6}・Yoshihiro Kobayashi^{*6}
Hiroyuki Kumano^{*7}・Takashi Morimoto^{*7}

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。現在までで、高効率な排熱回収のための伝熱管表面改質技術と低温排熱の有効活用のための冷熱利用技術の基盤技術を開発してきた。また、熱回収から氷スラリー利用先までの総合熱利用システムの評価技術を開発し、評価技術の検証とともに、基盤技術の実用化と社会実装のために、様々な地域での事例検討してきた。本報では、低温排熱の冷熱利用を中心にして、ERチームでの技術開発の概要を紹介する。

1. はじめに

近年、陸域から流出した廃プラスチックが原因となる海洋プラスチックごみが、大きな社会問題となっている。また、中国の廃プラスチック輸入規制に端を発したアジア諸国の廃プラスチック輸入規制強化により、国内での廃プラスチックの滞留が起り、日本から輸出していた廃プラスチックを含むプラスチック資源について、リサイクルなどの適正な処理が急務となっている。これらを受けて、2019年5月31日にはプラスチック資源循環戦略が策定され、革新的リサイクル技術の開発が我が国の重点戦略の一つとして掲げられている。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」¹⁾において、社会で大量に発生している廃プラスチックに対して、高度選別技術や新しい材料再生技術などを用いることにより、環境負荷を抑制しつつ、高効率なプラスチック資源循環システムを実現するための基盤技術を開発している。図1のように廃プラスチックの資源価値を飛躍的に高めるため、①複合センシング・AI等を用いた廃プラスチック高度選別技術（SR: Sorting for Recycling）、②材料再生プロセスの高度化技術（マテリアルリサイクル MR: Material Recycle）、③高い資源化率を実現する石油化学原料化技術（ケミカルリサイクル CR: Chemical Recycle）、④高効率エネルギー回

*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 八戸工業大学、*5 中央大学、*6 東京電機大学、*7 青山学院大学

収・利用技術（エネルギーリカバリーER: Energy Recovery）の開発を連携させて行い、廃プラスチックの品質に応じた最適な処理システムを構築することによる高度資源循環と環境負荷低減との両立を目指している。その結果、図のように廃プラスチックの輸出と単純焼却・埋め立ては行わない。

我々は、エネルギーリカバリーの開発チームに参画している。図中の各種リサイクルの後に、最終的に廃棄・焼却される廃プラスチックに含まれるエネルギーを回収するエネルギーリカバリープロセスにおいて、高効率な排熱回収のために、伝熱管の表面改質技術を開発している。廃プラスチックの焼却処理時の塩素、硫黄や低融点灰を含む厳しい環境・条件下での伝熱管への灰付着量と耐食性向上を図り、エネルギーリカバリー施設の蒸気温度の高温化、発電効率の向上、および稼働率向上につなげる。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。

本報では低温排熱の冷熱利用に関する技術を中心にして、現在、NEDO プロジェクトとして取り組んでいるエネルギーリカバリー技術の概要を紹介する。

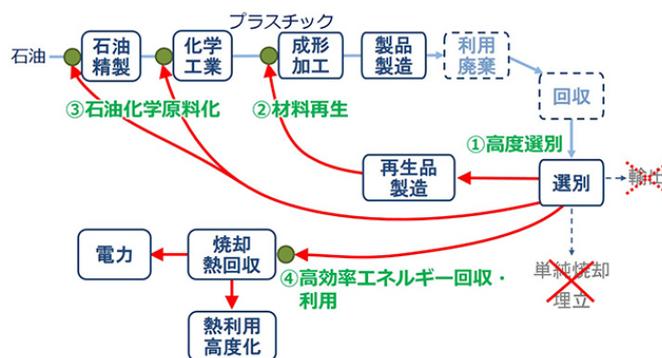


図1 NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」の概要¹⁾

2. 高効率な排熱回収のための伝熱管表面改質技術

マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルの開発を進める一方で、高い汚染度など、再生処理が困難な廃プラスチックに対しては、前述の図1のように、エネルギー回収による手法が有効である。そこで、焼却時に発生する熱を回収して発電や熱利用するような、小規模・分散型の電源としての重要性が見直されている。しかし、廃プラスチックの焼却時には塩素や硫黄を含むガスや低融点の灰が発生することがあり、ボイラなどの伝熱管表面に灰が付着して、伝熱管の高温腐食が問題になることが多い。とくに、他の再資源化技術の普及に伴い、エネルギー回収に投入される廃プラスチックの集合体は他のプロセスで忌避物質とされる物質が濃縮していることが想定できる。このような灰付着・高温腐食機構は多種多様かつ複雑であり、一般的な産業廃棄物処理施設や一般廃棄物処理施設では、安定かつ効率的な運転を維持するために一定期間プラントを運転した後、プラントを停止させて清掃作業を行っており、比較的低い稼働率となっているのが現状である。また、灰付着や高温腐食を抑制するために蒸気温度を低くせざるを得ない状況で、発電効率も比較的強く抑えられている。ここでは、その課題解決を念頭におきつつ、エネルギー効率向上に対して高温の排熱を回収し有効利用するための技術開発に取り組んでいる。

廃プラスチックに含まれる忌避物質等が濃縮した状態での燃焼を想定すると、焼却炉内での熱交換器の腐食と灰付着の対処等の耐久性の向上が重要となる。そこで、本開発では伝熱管表面に新規材料を用いて

改質する技術開発に取り組んでおり、高濃度な HCl、SO₂ を含む高温ガスによる化学腐食と焼却灰付着を抑制可能な耐久性のある材料開発を実施している。図 2 に示すように、溶射などのコーティング技術を用いて伝熱管表面に金属やセラミックなどの薄膜を形成して表面の改質を図り、プラント運転中の灰付着と腐食の進行を抑制することでプラントの運転期間を延伸化して、稼働率向上につなげることを目標としている。これまで金属系とセラミック系の候補材料に対し、熔融灰との濡れ性もしくは腐食減量測定をラボスケールで評価するとともに熱力学平衡論を用いた理論解析を行うことで、実験と理論の両面から材料選定を進めており、表面改質技術の開発とともに模擬ガスを用いた適用可能性の検証を進めている²⁻¹⁶⁾。

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

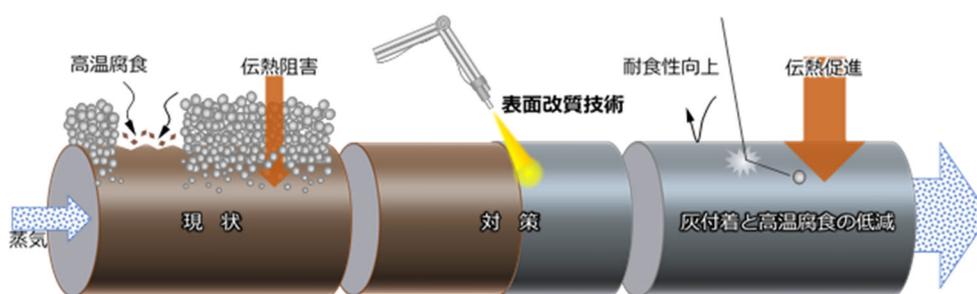


図 2 高効率排熱回収のための伝熱管表面改質技術の開発概要

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

本研究での灰試料は、化学腐食試験のための標準試料である標準混合塩や、産業廃棄物と一般廃棄物燃焼灰である標準試料灰（産廃）と標準試料灰（一廃）である。伝熱管表面への溶射材料は、Ni-2 というニッケルクロム系合金に微量の添加剤を添加した開発材料と、SUS310S という参照材料の 2 種類である。

付着した灰分がどのような相を呈するかを理論的に考察するため、熱力学平衡計算を実施した。そのツールとしては FactSage (ver.7.3) を用いている。図 3 に標準試料灰（産廃）の条件における、Ni-2 および SUS310S に関する熔融塩生成割合の温度変化について、得られた計算結果を示す。熔融塩生成割合は SUS310S に対して Ni-2 の方が低くなっており、Ni-2 の場合、液相生成物である熔融塩の生成割合が少ないことから、灰付着もしじ難い環境になるものと考えられる。

図 4 に Ni-2 および SUS310S 基板上における標準試料灰（産廃）の熔融挙動を示す。熔融挙動を Ni-2 と SUS310S で比較すると、SUS310S の方が明らかに熔融して扁平な形状になっている。その接触角の測定結果からは、Ni-2 の接触角は時間が経過しても約 80° と高い接触角を維持していることがわかる。すなわち、開発材料である Ni-2 は、接触角の結果においても SUS310S より優れた結果を示しており、高い難灰付着性が期待できる溶射材料であることがわかる。なお、このような傾向は、標準混合塩および標準試料灰（一廃）でも認められており、Ni-2 という金属材料の汎用性の広さも確認できた。

これらの結果を受けて、さらに電気加熱式ドロップチューブ炉による高温場での灰付着試験を実施した。

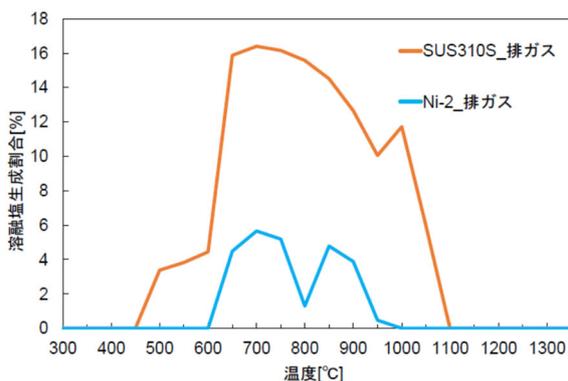


図3 溶融塩生成割合の温度変化(標準資料灰(産廃)の場合)

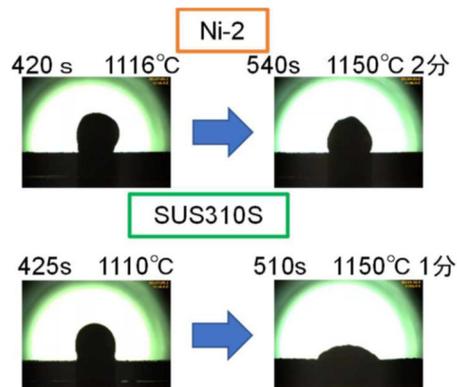


図4 標準試料灰(産廃)の溶融挙動

以上のような研究結果を受けて、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。そこで、低コストおよび耐久性を確保しながら灰付着を低減させるために、伝熱管の表面のみを改質して灰付着量を制御できる技術開発を行った。改質層は二層で構成されており、メインコーティングは耐食性と灰付着低減効果を有する数 $100\mu\text{m}$ 厚さの層である。成膜法は既設プラントでの現地施工で採用されている図5に示す溶射法を採用し、粉体形状の開発品を伝熱管表面にコーティングする。新設プラントにおける工場施工には溶射法以外の成膜法を採用し、先述した方法と同様、粉体形状の開発品をコーティングする。また、アディショナルコーティングは灰付着低減効果を有する数 $10\mu\text{m}$ 厚さのセラミック混合の耐熱塗料で、一定の耐久性を有している。このアディショナルコーティングは定期的な補修を行うことを想定しており、実機での塗装作業に適した塗料開発を進めている。



図5 開発材料の溶射施工状況

なお、伝熱管表面改質技術における材料開発・評価等の研究内容の詳細については、参考文献²⁻¹⁶⁾を参照されたい。

3. 低温排熱の有効活用のための冷熱利用技術

廃プラスチックエネルギーの有効利用には、前述の図1のように、まずは発電して電力利用するとともに、熱利用を高度化して、排熱需要を拡大することが重要である。そこで温熱需要に加えて、図6のように物流業界などの冷熱需要の拡大のため、 200°C 以下の未利用低温排熱から氷スラリーを製造して供給することを想定した。図のように 0°C 以下の冷熱を発生する吸収冷凍機を開発し、熱供給によって -5°C のブラインを製造し、製氷機にて 0°C 以下の流動性の高い氷スラリーを製造し、冷蔵車や冷蔵庫に氷スラリーを供給する。熱発生施設と熱需要施設が近距離にある場合は、直接、氷スラリーを供給するネットワークを容易に構築できるが、廃棄物処理施設を熱発生施設と想定した場合は両者が離れていることが多く、吸着剤蓄熱などのオフライン熱輸送システム¹⁷⁻²²⁾が必要になる。この吸着剤蓄熱システムを高効率化するために、吸着剤の流動層乾燥の研究を行っている²³⁻³²⁾。最新の研究内容の詳細については、参考文献²⁸⁻³²⁾を参照されたい。

3.1 氷点下冷熱の吸収冷凍機の開発

氷点下冷熱製造の低温排熱駆動式冷凍機は、図7に示すように、2元吸収冷凍サイクルの構成で開発する

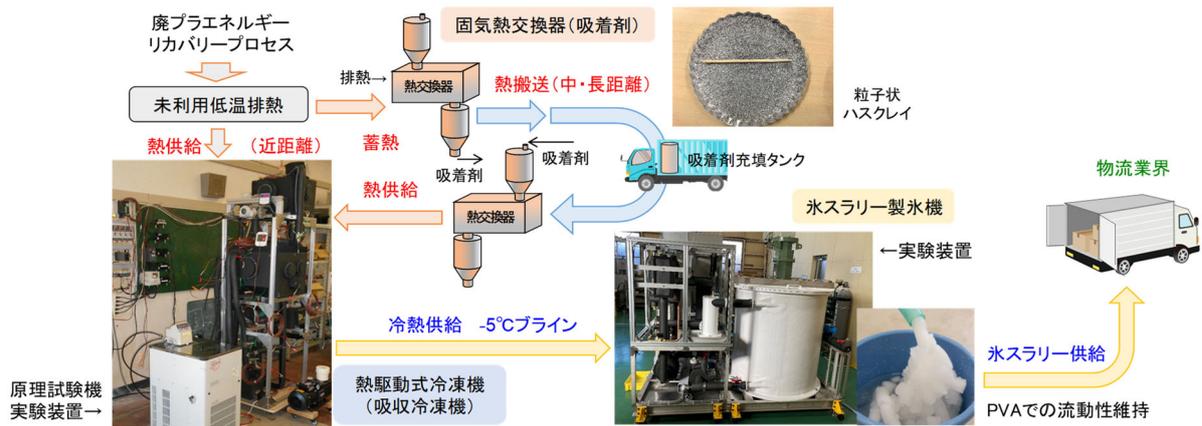


図 6 排熱の冷熱利用のための技術開発の概要図

ことにした。表 1 のように 1 元目の高温側冷凍機は従来型の吸収冷凍機であり、LiBr-H₂O を作動液体とし、低温側冷凍機の吸収器の冷却水を製造する。2 元目の低温側冷凍機は LiBr-H₂O/1-Propanol を作動液とし、氷点下冷熱を製造する。

開発対象の低温側吸収冷凍機は、図 7 のように低圧に保たれた蒸発器でブラインが流れる管上に冷媒を流して蒸発させ、蒸発潜熱でブラインを冷却する。蒸発した冷媒は吸収器の作動液に吸収され圧力を保つ。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に冷却が必要であり、1 元目の高温側冷凍機では冷却塔からの冷却水で冷却するが、この 2 元目の低温側では 0.5 kPa を維持するために、1 段目の高温側冷凍機が製造した 7℃程度の冷水や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、排熱源からの熱で濃縮されて再び吸収器に戻る。再生器で蒸発した冷媒は凝縮器で凝縮し、蒸発器に流入して「蒸発、吸収・再生、凝縮」の冷凍サイクルを形成する。

これまでに作動液や冷媒の種々の物性値を解明して、本吸収冷凍サイクルを設計・検討を行ってきた³³⁻³⁶⁾。図 8 の冷媒の凝固点を示すように、冷媒である H₂O/1-Propanol の H₂O モル分率を 0.9 以下にすることで、-10℃以下の蒸発温度での設計ができる。また、作動液の結晶化温度により、吸収器の最低温度を決めることができる。

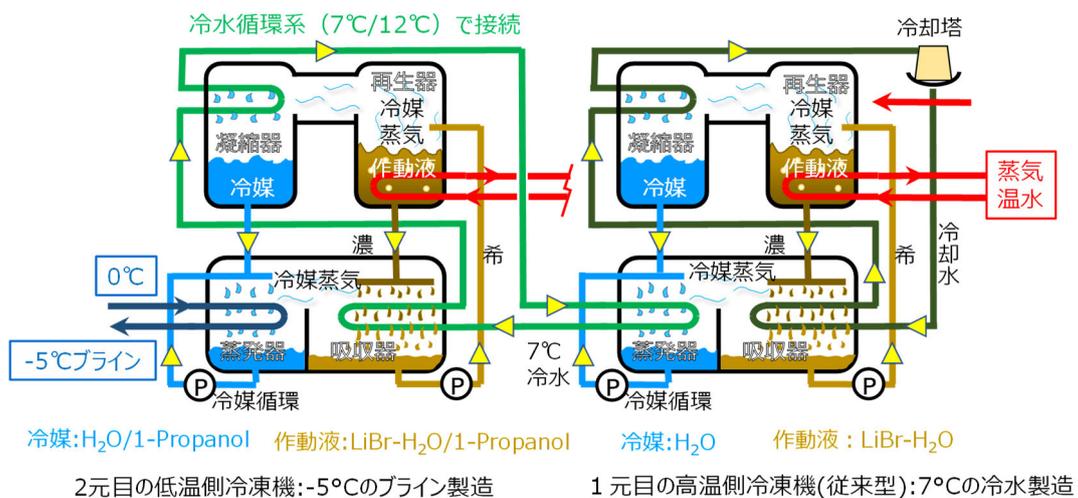


図 7 開発中の氷点下冷熱を発生する 2 元吸収冷凍機の模式図

表 1 低温排熱駆動式の2元吸収冷凍機の構成

項目	1元目の 高温側吸収冷凍機	2元目の 低温側吸収冷凍機
作動液	LiBr-H ₂ O	LiBr-H ₂ O/1-Propanol
冷媒	H ₂ O	H ₂ O/1-Propanol
熱源水温度 (排熱利用)	85℃/75℃	85℃/75℃
冷却水温度	32℃/42℃	7℃/17℃
冷水・ブライン温度	7℃/17℃	-5℃/0℃
蒸発器・吸収器圧力	1 kPa	0.5 kPa
凝縮器・再生器圧力	20 kPa	5 kPa

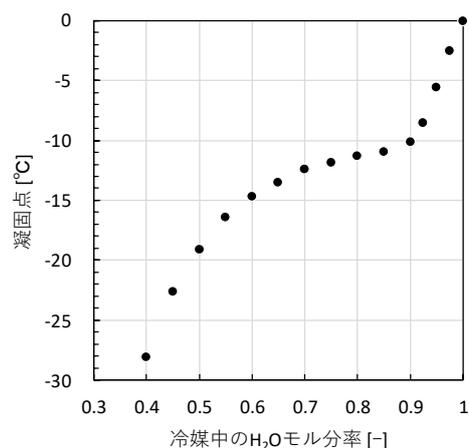


図 8 冷媒の水モル濃度と凝固点の関係

冷凍能力 1 kW 級の低温側吸収冷凍機の原理試験機を製作し、氷点下冷熱の製造を実験的に確認した。なお、この原理試験機の再生器の熱源には電気ヒータを用いた。実験装置の概観は、前述の図 6 中の左側の写真を参照されたい。

実験結果の 1 例を図 9 に示す。図のように実験開始 60 分後から冷却水入口温度を電動チラーで低下させ、150 分後に 7℃にすることで、ブライン出口温度は-4℃まで低温化した。ブライン入口温度は低温恒温槽と投げ込みクーラーで冷却し、0℃一定で推移した。この間、吸収器圧力、再生器圧力、再生器温度は一定で推移し、安定した氷点下冷熱の製造を確認した。これらの 1 kW 級の原理試験機での成果を受けて、図 10 のような 3~4 kW 級の吸収冷凍機を試作し、現在は、試験運転中である。

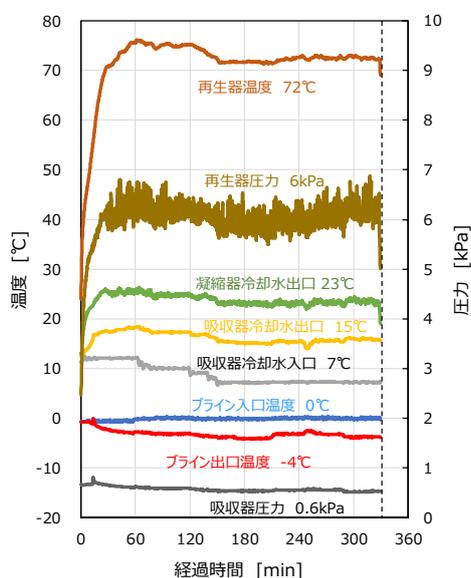


図 9 原理試験機での試験結果

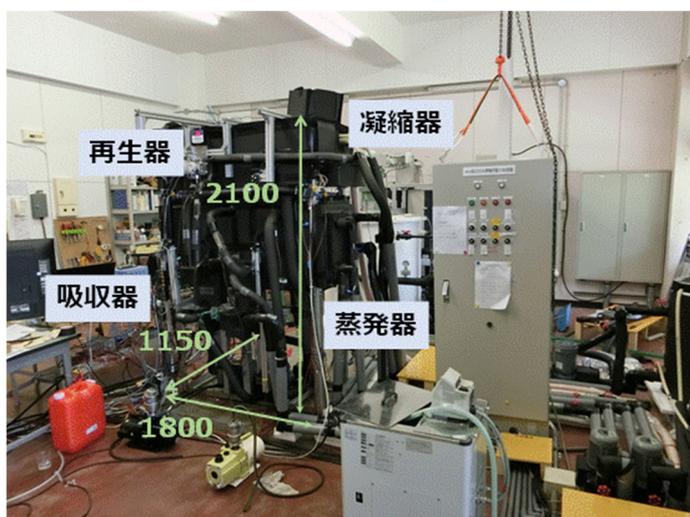


図 10 氷点下冷熱を発生する 3~4 kW 吸収冷凍機の試験機

3.2 製氷機の開発と氷スラリーの高度化

物流分野のコールドチェーンへの冷熱供給を想定した場合、氷スラリーには高蓄熱密度（高水分率）の条件でも十分な流動性を有していることが求められる。一方、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℃以下となり、冷凍機の COP は低下する。

氷スラリーの流動性が悪くなる主な要因として、氷粒子の粗大化と凝集が考えられる。本研究では不凍たんぱく質の水の凍結抑制効果の研究結果³⁷⁾に基づき、ポリビニルアルコール (PVA) によって、氷粒子の粗大化や凝集を抑制する技術の開発に取り組んでいる。PVA を添加した水であれば凝固点降下が起こらないため、製氷温度が低温化しない。図 11 と図 12 に PVA の微量添加による氷粒子の粗大化抑制の効果を示す。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^{38,39)}。

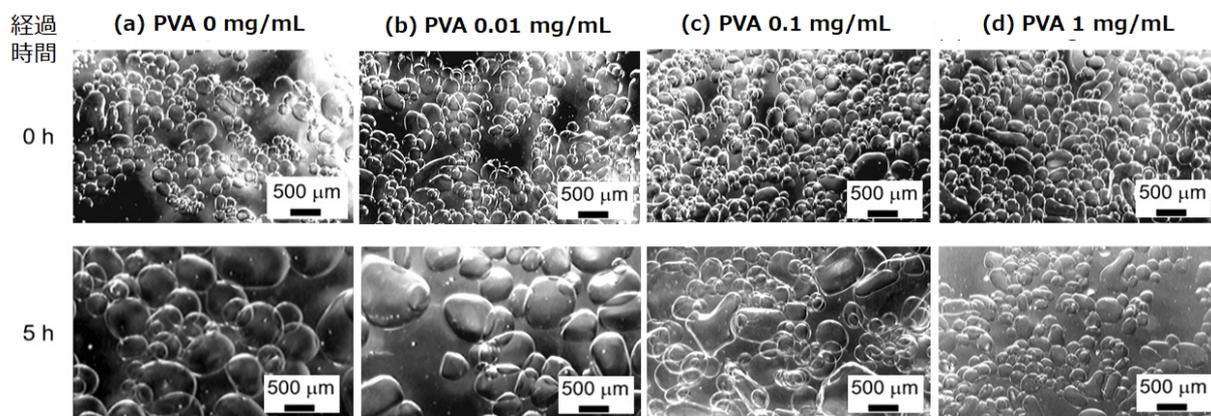


図 11 ポリビニルアルコール(PVA)添加による氷粒子の粗大化抑制

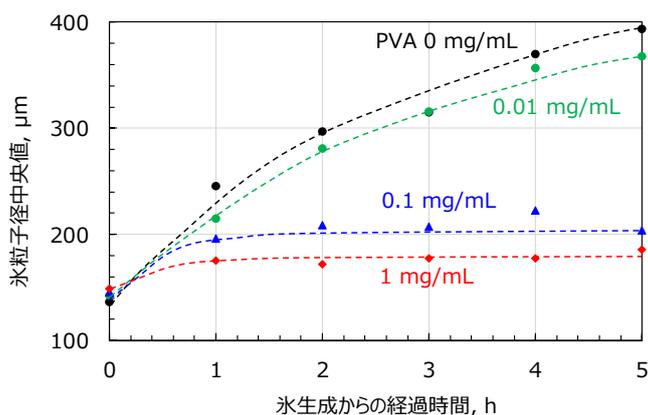


図 12 ポリビニルアルコール(PVA)添加による氷粒子径の時間変化

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°C 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⁴⁰⁻⁴⁵⁾。そこで、ここでの氷スラリー製氷機には、図 13 のような過冷却方式を採用した。水および水溶液を熱交換器 (過冷却器) にて過冷却状態にした後に、超音波照射をトリガーとして過冷却状態を解除して氷スラリーを製造する。過冷却器と過冷却解除器において、過冷却状態の生成と解除がなされる水溶液の循環運転が継続することで、タンク内の氷分率は増加する。本研究では、氷粒子の粗大化抑制効果が確認された PVA を用いて、氷スラリー中での氷粒凝集状態を評価して⁴⁶⁾、タンク内の氷スラリーの流動性³⁸⁾とタンクから取り出した氷スラリーの流動性を調べている。実験装置の概観は、前述の図 6 中の写真を参照されたい。

なお、図 13 のブライン冷凍機には現在、蒸気圧縮式冷凍機 (電動式冷凍機) を用いているが、2023 年度中には前述した氷点下吸収冷凍機を用いて製氷運転試験を実施する予定である⁴⁷⁾。この試験結果については、別途の機会に報告したい。

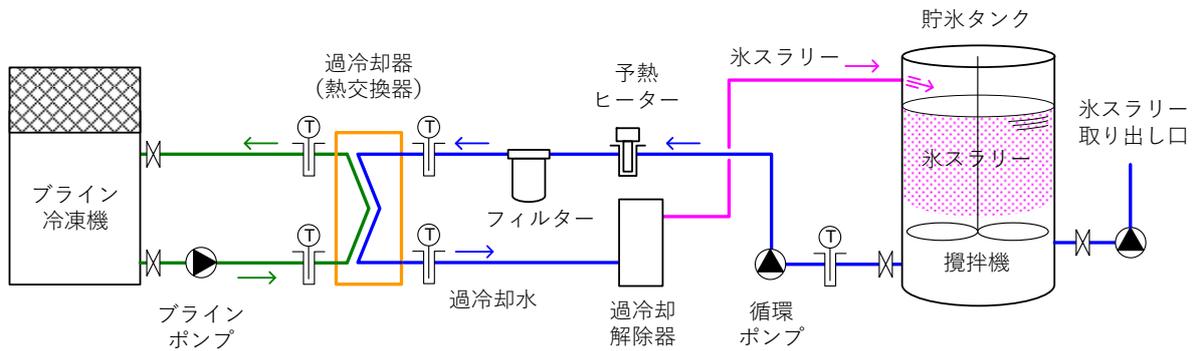


図 13 過冷却方式の製氷機の構成

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）と熱需要側の熱条件とが合致しているか否かなどの、熱マネジメントを行うために、冷熱利用システムの総合評価技術の開発を行っている⁴⁸⁻⁵²⁾。

4.1 冷熱利用システムの評価モデルの概要

図 14 に冷熱利用システムの評価モデルの概要を示す。図のように、評価モデルは 1)～8)の検討項目と Sub ①～⑤のサブツールで構成されている。1) 廃プラ ER 施設と 2) 最終冷熱需要先の条件が入力条件であり、各々の熱量の最小値が熱利用システムの容量になる。つぎに、3) 乾燥吸着剤輸送の条件を想定し、Sub①の一日間トラック輸送モデルによって輸送時間を計算する。4) 大型トラックの仮定を組合せ条件として、Sub②の吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールによる計算を行う。これらの繰返し計算によって、吸着剤の充填量などの蓄熱槽の仕様が決まる。5) 熱駆動式冷凍機の設定として、Sub⑤の熱駆動式冷凍機を含め、氷スラリーなどの熱媒体の種類や機器仕様・効率などを定めて、6) 廃プラ ER 施設・冷熱需要

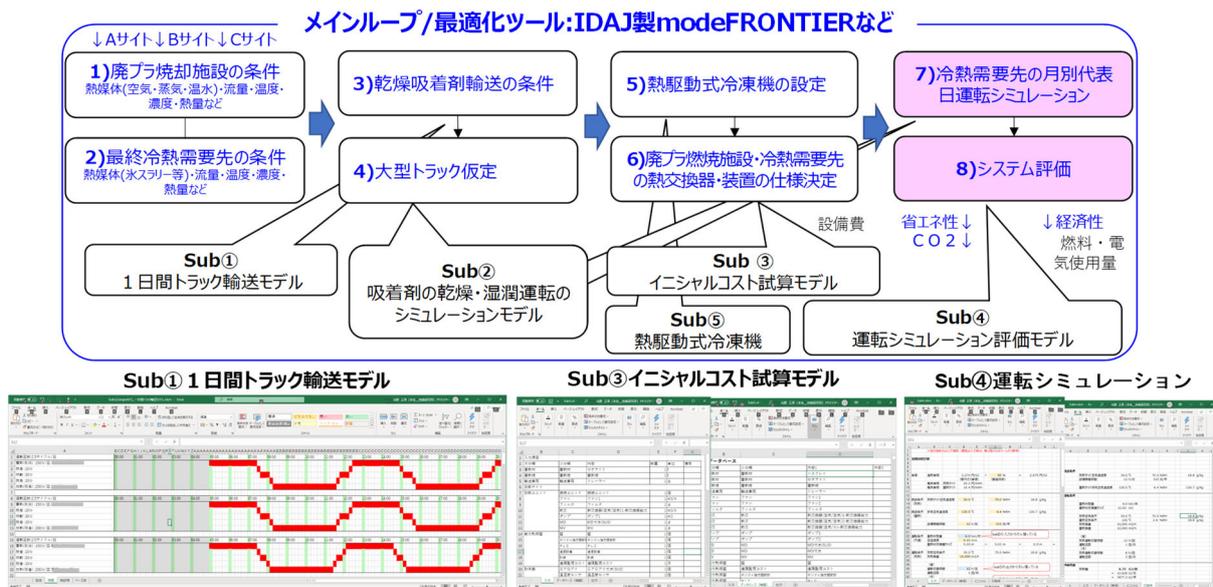


図 14 冷熱利用システムの評価モデルの概要化

先の熱交換器・装置の仕様を決定し、Sub③のイニシャルコスト試算ツールを用いてコスト算出する。最後に、Sub②吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールを用いて、7) 冷熱需要先の月別代表日運転シミュレーションを行い、Sub④の運転シミュレーション評価ツールによって年間エネルギー消費量・運転費、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。

図 14 中の下部は、エクセルベースのサブツールである。Sub①の一日間トラック輸送ツールでは、焼却場と配送センターの住所を入力して、それぞれの間の移動時間を Google Maps API より取得する。エクセル上において、Google Maps API 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では、蓄熱槽の形状やサイズを設定し、蓄熱・放熱運転における蓄熱槽の入口空気温湿度と流量の時間変化を入力して、出口空気の温湿度の時間変化を計算する。現在は固定層を対象にしたシミュレーションモデル¹⁷⁻²²⁾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では、重量、風量、面積、排熱量、冷熱量あたりのモジュール値の単価より各々のコストを算出し、図中に示す表のように積算してイニシャルコストの概算値を算出する。このモジュール値自体が重量、風量、面積、熱量の関数であり、イニシャルコストのスケール効果が加味されている。

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

以上のような評価ツールの完成度を高めることを主目的に、首都圏ほかの大都市エリア、八戸湾岸などの中核都市エリア、地方エリア（離島エリア）を対象に、評価モデルを適用し検討してきた。以下では、具体的な評価事例として、大都市エリアと離島エリアの評価事例を紹介する^{50,51)}。

4.2 大都市エリアでの評価事例⁵⁰⁾

ここでは、Sub①の一日間トラック輸送ツールを検証することを目的にして大都市エリアを対象に、オフライン熱輸送システムが必要な場合と不要な場合をスクリーニングすることを試みた。図 15 のように、(1) のオフライン熱輸送システムを必要とする場合と比較して、(2) のオフライン熱輸送システムが不要な場合では、輸送トラックが配送センターに戻る前に処理施設に設置された氷スラリー製氷機に立ち寄って、輸送トラックの冷蔵庫に氷スラリーを供給することが可能になると考えた。

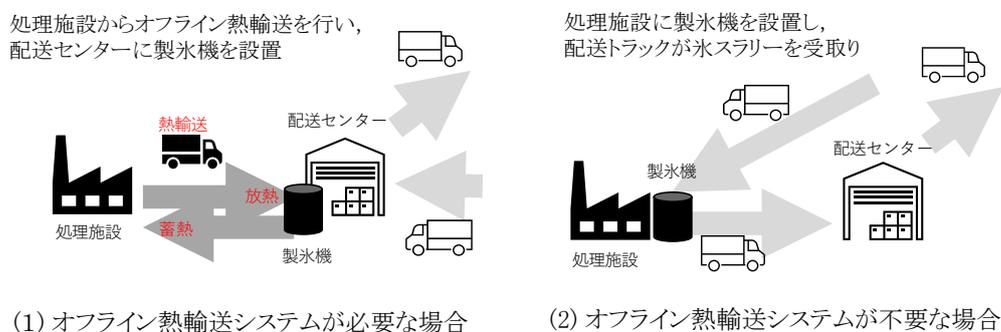


図 15 オフライン熱輸送システムのスクリーニング

4.2.1 評価対象

ここでは廃プラスチックの焼却設備としては産業廃棄物処理施設と一般廃棄物処理施設の2種類について、(1) 東京都、(2) 大阪府、(3) 愛知県、(4) 福岡県、および(5) 北海道の5地域において、複数の配送センターとの間の移動時間をSub①を用いて取得した。表2には産業廃棄物処理施設、一般廃棄物処理施設、および配送センターの件数を、(1) 東京都、(2) 大阪府、(3) 愛知県、(4) 福岡県、および(5) 北海道の地域について纏めて示す。処理施設と配送センターの数の積が評価計算数(N)である。

表2 計算条件と結果

	産業廃棄物 処理施設数	配送センター	計算数 N	移動時間(min)		
				最小値	最大値	平均
東京都	222	71	15,762	0.03	88.3	40.3
大阪府	229	72	16,488	1.17	83.8	32.7
愛知県	473	52	24,596	0.83	132.6	46.6
福岡県	425	41	17,425	0.47	160.0	56.6
北海道	621	59	36,639	0.07	695.2	183.9
	合計		110,910			

	一般廃棄物 処理施設数	配送センター	計算数 N	移動時間(min)		
				最小値	最大値	平均
東京都	41	71	2,911	0.73	86.2	43.2
大阪府	43	72	3,096	0.42	99.0	35.9
愛知県	43	52	2,236	2.43	133.9	52.0
福岡県	23	41	943	2.15	143.9	60.2
北海道	64	59	3,776	0.12	690.7	214.4
	合計		12,962			

4.2.2 計算結果と考察

Sub①を用いて計算・取得した移動時間の結果の概要として、前述の表2には(1) 東京都、(2) 大阪府、(3) 愛知県、(4) 福岡県、および(5) 北海道の地域について、移動時間の最小値・最大値・平均値を示す。この最小値より、産業廃棄物処理施設と一般廃棄物処理施設とも、また何れの地域でも、概ね1~2分以内の移動時間に配送センターがあることがわかる。各々の地域において近年、郊外の自動車道のインターチェンジの近くに建設されてきた配送センターが、元々、郊外に設置されてきた廃棄物処理・焼却設備に隣接しているものと考えられる。

図16には東京都の産業廃棄物処理施設と場合について、配送センターへの移動時間の結果を詳細に示す。図の棒グラフは0~5 min、5~10 min、10~15 minと5 min刻みの移動時間帯における産業廃棄物処理と配送センターの組合せ施設数であり、折れ線グラフは移動時間帯における累積施設数の全施設数(N=15762)に対する割合である。図のように、0~5 minの移動時間帯において71件であり、25~30 minの移動時間帯には1993件の最大件数であった。また、前述の表2での最大値と平均値により、概ね、東京都・大阪府・愛知県、福岡県、北海道の順で移動時間の時間が長くなり、オフライン熱輸送が必要になるが、北海道では地域自体が広域であることを考慮したい。

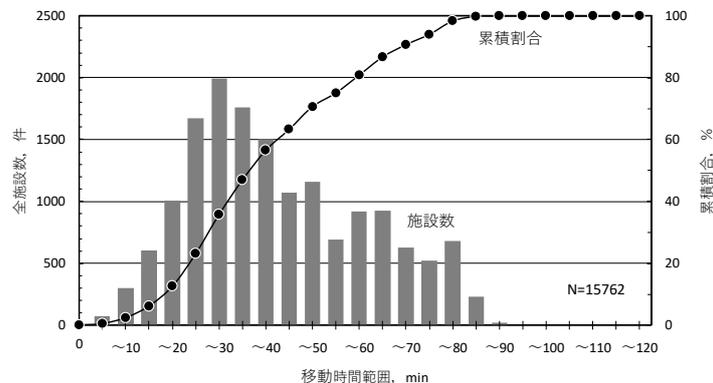


図16 東京都の産業廃棄物処理施設と配送センターの移動時間の分布

そこで、産業廃棄物処理施設毎の、最短の配送センターまでの移動時間によって評価することにした。その結果を前述の図16と同様に、棒グラフと折れ線グラフで図17に示す。図のように例えば、10 min まで

での移動時間の累積割合は、東京都では 54%、北海道では 34%であった。これら以外の地域での 10 min までの移動時間の累積割合については、大阪では 70%、愛知では 47%、福岡では 33%であった。このように、大阪府・東京都・愛知県、北海道・福岡県の順で累積割合が少なくなり、よりオフライン熱輸送が必要になる産業廃棄物処理施設が多くなることがわかった。

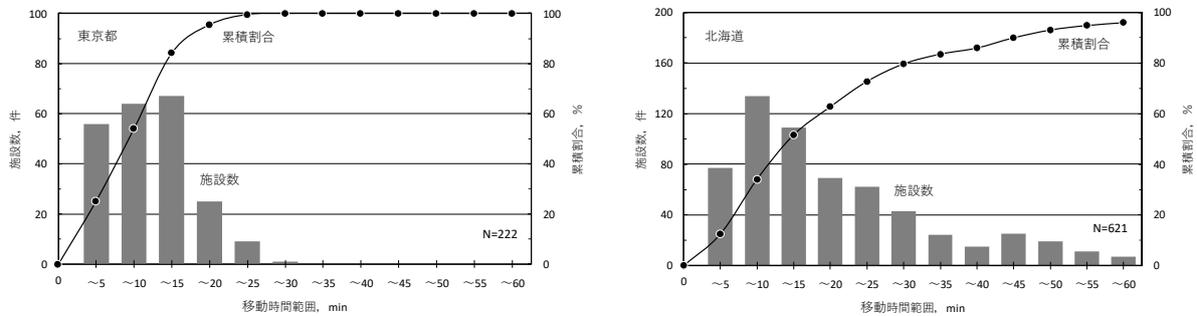


図 17 東京と北海道における、産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

4.2.3 オフライン熱輸送システムの検証結果

オフライン熱輸送システムが不要な場合の閾値を、例えば 5min、10min、15min とした場合、それらの時間以内の移動時間の産業廃棄物処理施設の割合を 図 18 に示す。図のように、福岡県と北海道に比べて、東京都、大阪府、愛知県ではオフライン熱輸送システムが不要な産業廃棄物処理施設の割合が多いことが読み取れる。また、一般廃棄物処理施設についても同様に、北海道、福岡県、愛知県、東京都、大阪府の順でオフライン熱輸送システムが不要な割合が多くなった。そこで、本提案の冷熱利用システムの導入初期段階においては、福岡県と北海道に比べて、東京都、大阪府、愛知県の方が社会実装し易いエリアと考える。

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

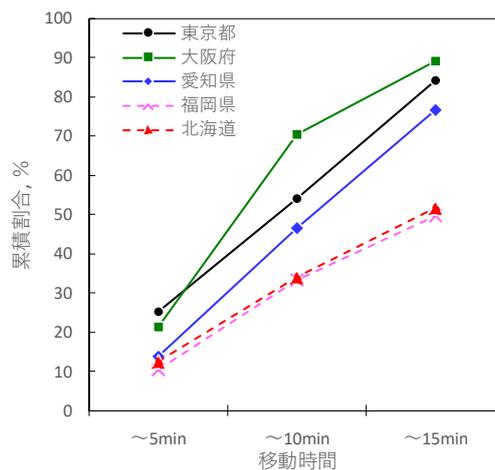


図 18 産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

4.3 離島エリアでの評価事例⁵¹⁾

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

今回、評価対象としたのは、伊豆諸島にある伊豆大島（東京都大島町）、三宅島（東京都三宅村）、八丈島（東京都八丈町）の3島である。表3に各島の基本情報を示す。図19には、各島における排熱発生場所である廃棄物処理場、並びに、主な冷熱需要である漁港の位置関係を示す。

表3 伊豆大島, 三宅島, 八丈島の基本情報

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

注：2023年10月1日における人口

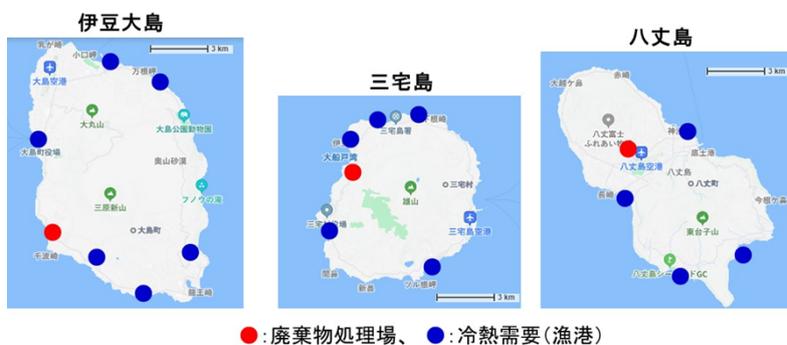


図19 3島における廃棄物処理場と冷熱需要(漁港)の位置

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

4.3.1 評価条件と方法

システム適合性を評価するに当たり、今回は一般的な廃棄物処理場を対象としたので、廃棄物処理量当たりの推定排熱量は一般的な値である8.8MJ/kgとした。本NEDO事業で開発中の低温排熱対応型の吸収式冷凍機のCOP（排熱量当たりの発生冷熱の割合）は暫定的に0.3として、比較対象となる従来方式の製氷用冷凍機のCOP（消費電力量当たりの発生冷熱の割合）は3.0とした。氷の販売価格を氷1トン当たり

0.5万円、電気料金を25円/kWhとした。吸着剤やシャーベット氷を輸送するトラックの燃費は、搭載重量毎に小型（3トン未満）を11km/L、中型（3トン以上、6.5トン未満）を7km/L、大型（6.5トン以上）を4km/Lに設定した。電力や軽油の原単位（一次エネルギー消費量原単位やCO₂排出量原単位）は、離島独自の値を採用した^{51,53)}。

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

4.3.2 評価結果と考察

以上の調査結果や評価条件をもとに、Sub①～Sub④によりシステム適合性の評価を行った。評価結果の一覧を表4に示す。いずれの島でも、排熱発生側と冷熱需要側の距離は近く、トラック輸送時間は島内平均で7～10分であった。そこで、廃棄物処理場の直近に吸収式冷凍機を設置して、そこで製氷を行って各漁港までシャーベット氷をトラックで輸送するケースを評価の基本とした。これを「熱輸送なし」と表記した。一方、吸着剤によるオフライン熱輸送システムを導入したケースは「熱輸送あり」として評価した。

表4 評価結果の一覧

	伊豆大島 (熱輸送なし)	三宅島 (熱輸送なし)	八丈島 (熱輸送なし)	八丈島 (熱輸送あり)	
1. 焼却ゴミからの排熱量と製氷可能量					
焼却ゴミ処理量	t/年	3,296	1,039	2,616	2,616
推定排熱量	GJ/年	29,005	9,143	23,021	23,021
排熱からの製氷可能量	t-ice/年	26,083	8,222	20,702	20,702
2. 漁港の冷熱需要					
漁獲量(島全体)	t/年	189	206	895	895
氷の需要	t-ice/年	277	55	2,360	2,360
3. 輸送距離 (ゴミ焼却場から漁港)					
片道輸送時間(平均)	分	13	13.5	18	18
片道距離(平均)	km	6.9	7.2	9.6	9.6
4. 氷の費用対効果					
イニシャルコスト回収年数	年	16	43	6.1	14
5. 消費エネルギーの比較					
一次エネルギー消費の比率(新方式/従来方式)		0.50	1.4	0.40	0.49
6. CO₂排出量の比較					
CO ₂ 排出量の比率(新方式/従来方式)		0.50	1.3	0.39	0.49

各漁港において従来方式の冷凍機で製氷する場合に比べて、総合熱利用システムを新設した場合の投資額に対するイニシャルコスト回収年数を試算した。その結果を図20に示す。「熱輸送なし」の八丈島では、回収年数が6.1年になり最も良好な評価結果が得られた。それ以外のケースでは全て10年以上になった。これは、八丈島が他の島と比べて冷熱需要が大きいためである。一方、図表には示していないが、伊豆大島や三宅島の「熱輸送あり」の評価では、回収年数が数十年と極端に大きくなった。これは、システム規模に対する冷熱需要量が小さいために、導入システムのイニシャルコストが相対的に割高になったからである。

一次エネルギー消費量の評価結果を、従来方式に対する新方式の比率として、図21の左側の青色の棒グラフで示す。「熱輸送なし」の伊豆大島と八丈島、並びに「熱輸送あり」の八丈島のケースでは、従来方式に比べて一次エネルギー消費量を半分程度かそれ以下まで低減できる。一方、三宅島では「熱輸送なし」であっても、従来方式よりも一次エネルギー消費量が大きくなる結果になった。これは、三宅島は他の島に比べて冷熱需要量が極端に小さいために、削減できる冷熱量よりも、導入システムの補機電力等のエネルギー消費量の方が大きくなったことによる。

CO₂排出量の評価結果を従来方式に対する新方式の比率として、図21の右側の赤色の棒グラフで示す。「熱輸送なし」の伊豆大島と八丈島、並びに「熱輸送あり」の八丈島のケースでは、従来方式に比べてCO₂

排出量を半分程度かそれ以下まで低減できた。一方、三宅島では「熱輸送なし」であっても、従来方式よりも CO₂ 排出量が大きくなる結果になった。これは、一次エネルギー消費量と同様の理由による。

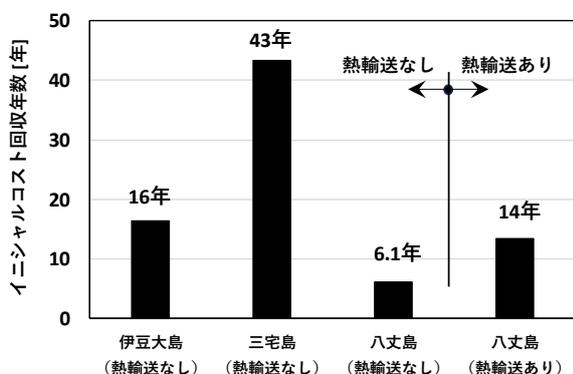


図 20 イニシャルコスト回収年数の評価結果

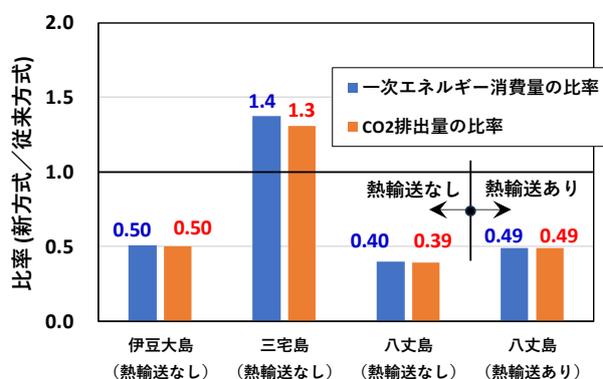


図 21 一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量の評価結果

4.3.3 総合熱利用システムへの適合性の考察

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

本報で評価を行った伊豆大島、三宅島、八丈島に関しては、イニシャルコスト回収年数、一次エネルギー消費量、並びに CO₂ 排出量という観点で、八丈島が最も適したエリアであるとの評価結果が得られた。これは、排熱発生側と冷熱需要側の距離が比較的近いという離島エリア独自の特性に加えて、八丈島が他の島よりも比較的冷熱需要が大きいという特性のためである。

したがって、八丈島のように熱融通エリアが比較的コンパクトで、かつ八丈島よりも冷熱需要の大きいエリアが他にあれば、システム適合性はさらに高くなる可能性がある。

5. 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、低温排熱の冷熱利用に関する基盤研究、および総合熱利用システムの評価技術の事例研究について説明した。2020 年度から開始された本 NEDO プロジェクトでは、来年度の 2024 年度に 5 年目の最終年度となるため、期初の研究目標の達成に向けて邁進する。併せて、研究開発成果の関連学協会での公表に努める。

2050 年のカーボンニュートラルに向けて、電化・水素化とともに省エネルギーが重要であり、排熱利用の拡大は CO₂ 排出量の削減に直接的に寄与できる。今後、廃プラスチックの焼却熱や各種の未利用熱や排熱が有効活用されるよう、本基盤技術の実証・実用化を進めたい。

なお、2023 年度中には氷点下吸収冷凍機と氷スラリー製氷機を連結させた、熱駆動式氷スラリー製氷機の製氷・蓄氷試験を実施するので、これらの試験結果については、別途の機会に報告する。

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、経済産業省のゼロエミチャレンジ企業にリストアップされている⁵⁴⁾。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) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）HP：
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100179.html（最終アクセス日：2023.12.27）。
- 2) 佐伯達哉, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎：産業廃棄物灰の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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 長沼宏：固体燃焼における灰付着と高温腐食, 第 58 回石炭科学会議, 2021.
- 7) 産業技術総合研究所, 名古屋大学, 東北発電工業：廃プラスチックからの高温熱回収に関する研究開発の紹介, 日本機械学会動力エネルギーシステム部門, ニュースレター, 2022/09.
- 8) 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.
- 9) 佐伯達哉, 義家亮, 植木保昭, 成瀬一郎：産業廃棄物処理炉内における灰付着制御, 第 31 回日本エネルギー学会大会, 2022.
- 10) 成瀬一郎：高効率排熱回収技術の開発～伝熱管表面改質・回収熱量増大・長寿命化～, NPO 法人循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 11) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition mechanisms in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, vol.9, No.4, 21-00435, 2022.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 渡邊章, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭：NaCl 存在下における高温加速酸化機構の速度論的解析, 第 60 回石炭科学会議発表論文集, 2-16, 2003.
- 15) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition and corrosion mechanisms of tubes in Waste-to-Energy plants, Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE-2022), 2023.
- 16) 森岳人, 長沼宏, 堀田幹則, 成瀬一郎：廃棄プラスチックエネルギーの高度有効利用 第 1 報:伝熱管の表面改質技術, 化学工学会第 89 年会, 2024 (予定).
- 17) 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.
- 18) 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.

- 19) 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.
- 20) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 4 報—一定型蓄熱システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 46 巻, 297 号, 31-38, 2021.
- 21) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 5 報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47 巻, 301 号, 9-16, 2022.
- 22) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 6 報—塗装工程での除湿利用の実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47 巻, 308 号, 11-18, 2022.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 幡野博之, 新井一馬, 及川慈英: 低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 53 回秋季大会, 2022, ST-29.
- 28) 大関泰知, 鈴木翔太, 王ジュエ, 及川慈英, 幡野博之, 村瀬和典: 低温排熱有効利用に向けた吸着剤蓄熱システムの研究- 吸着剤特性と蓄熱性能, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会 2023.
- 29) 王ジュエ, 及川慈英, 大関泰知, 鈴木翔太, 幡野博之, 村瀬和典: 蓄熱システムにおける吸着剤熱発生特性に関する研究, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会.
- 30) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之: 蓄熱システムの吸着剤連続乾燥特性, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会.
- 31) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之: 低温排熱有効利用のための蓄熱システム用吸着剤連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
- 32) 幡野博之, 王ジュエ, 及川慈英, 鈴木翔太, 村瀬和典: 吸着剤蓄熱システムの熱発生特性に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
- 33) 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.
- 34) 磯嶋将, 野田英彦, 正野孝幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用動作流体 LiBr- 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.
- 35) 正野孝幸, 野田英彦, 磯嶋将, 片山正敏, 折田久幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用新作動液の飽和特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会 (岡山), E321, 2022.
- 36) 磯嶋将, 野田英彦, 折田久幸, 片山正敏, 正野孝幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用動作流体 LiBr-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), E321, 2022.
- 37) 小山寿恵, 稲田孝明: III 型不凍タンパク質の低濃度水溶液中で成長する氷結晶ベーサル面上のピット形成過程の観察, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.33, No.3, 251-259, 2016.
- 38) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 谷野正幸, 折田久幸, 野田英彦, 幡野博之: 廃プラスチックエネルギーからの冷熱を用いる氷スラリー製造, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B232, 2023.
- 39) 請川颯一, 小山寿恵, 小林佳弘, 谷野正幸, 稲田孝明: 氷スラリー製氷機で製造した氷スラリーへの PVA 添加による氷粒子の成長抑制効果, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B233, 2023.

- 40) 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.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) 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.
- 44) 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.
- 45) 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.
- 46) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 熊野寛之, 森本崇志, 谷野正幸: 氷スラリー中での氷粒凝集状態の評価方法の提案, 第12回潜熱工学シンポジウム, G09, 2023.11.
- 47) 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機を用いた熱駆動型氷スラリー製氷機の研究開発, 日本冷凍空調学会誌4月号, 2024 (掲載予定).
- 48) 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.
- 49) 谷野正幸, 増田正夫, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 小林佳弘, 幡野博之, 村瀬和典: 廃プラスチックエネルギーの冷熱による高度有効利用, 空気調和・衛生工学会大会, (2023.9), I-45.
- 50) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志: 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発～第1報 オフライン熱輸送の大都市エリアでの評価事例～, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024.1), 18-3.
- 51) 増田正夫, 谷野正幸, 鎌田美志: 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発～第2報 離島エリアでの評価事例, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024.1), 18-4.
- 52) 鎌田美志, 増田正夫, 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 幡野博之, 熊野寛之: 廃プラスチックエネルギーの高度有効利用 第2報: 排熱の冷熱利用技術, 化学工学会第89年会, 2024 (予定).
- 53) 東京電力パワーグリッド株式会社; エネルギー状況報告書, 2022, <https://www.tepco.co.jp/pg/company/environment/warming/> (最終アクセス日: 2023.12.27).
- 54) 経済産業省ゼロエミチャレンジ企業リスト: https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/zero-emission_challenge/index_zeroemi.html (最終アクセス日: 2023.12.27).

ABSTRACT

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

サーマルマイニングによる月面水採取

(第二報) 再凝縮・凝固を考慮した氷レゴリスの伝熱解析

内田浩基・中田拓司・川上理亮・河南治*¹

Thermal Mining for Water on Lunar Regolith Part 2 - Thermal Analysis of Icy Regolith with calculation of Condensation and Solidification

Hiroki Uchida・Takuji Nakata・Yoshiaki Kawakami・Osamu Kawanami

月極域の永久影領域にある氷水を採取する新たな方法として、氷レゴリス層をヒータで直接加熱し、発生した水蒸気を採取する独自の方法を考案した。この方法は、月面の真空中で氷が昇華した際に水蒸気が拡散・消失しないようレゴリス内に氷壁に囲まれた閉塞空間を形成し、水蒸気を内部に貯留した後、月面上の凝縮器で吸い上げる方法である。重機を月面に持ち込む必要がないことから低コストに月の氷水を採取できると考えている。現在、この方法の実現可能性を様々な観点から検討中であり、その一つとして数値解析により氷レゴリス層に氷壁が形成される様子をシミュレートした。まずは OpenFOAM のソルバーをカスタマイズすることで、月の氷レゴリス内の伝熱解析を可能とした。更に、このソルバーを用いてヒータにより氷レゴリスを加熱したときの伝熱解析を行った。その結果、ヒータに近接する領域（3 mm 以内）のレゴリスにおいて、氷の昇華は短時間で完了し乾燥領域が出現した。この領域の水蒸気はヒータから離れる方向に流動し、ヒータから 10mm 前後の位置で再凝縮・凝固して氷リッチな領域（氷壁）を形成した。

1. 緒言

当社は 2024 年以降、世界で初めて月面に水電解装置を持ち込み、月面環境下において水素と酸素を生成する実証試験を行う予定である²⁾。月面における水電解は推薬生成プラント構想の後工程であり、この前段階として月面下の氷水の探査や採取、採取した氷水のプラントへの輸送、水の純水化处理などの工程が必要となる。更に水電解で生成した水素は月面での圧縮・液化や貯留が必要であり、今後各工程において確立すべき技術課題は多い。これらの工程の内、当社では月面水電解技術の開発に加えて、月面下に存在すると考えられている水資源の採取方法を検討している。月極地に存在する氷水の採取方法として、氷水を含有するレゴリス層を太陽光にて直接加熱し、水蒸気を回収する“サーマルマイニング法”が Sowers によって提案された³⁾。この方式は、月面に多くの重機を持ち込む機械採掘に比べて輸送コストや装置整備の面で有利である。一方、月面レゴリスの実効熱伝導率はソイル（乾燥した砂粒）が詰まった状態でも $0.007 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ と極端に熱を伝え難い⁴⁾。このため表層から 1~2 cm 以上深い位置の氷水を加熱しにくく、深さ方向に広範の氷水を採取できないといった問題がある³⁾。そこで我々は、月面のレゴリス層内に真空から隔てられ氷壁に囲まれた閉塞空間を形成し、内部に高温の乾燥気体を循環させレゴリスから昇華した水蒸気を吸い上げる新しいサーマルマイニング方式（高砂サーマルマイニングと呼ぶ）を考案した⁵⁾。

※本論文は、第 67 回宇宙科学技術連合講演会論文¹⁾を加筆修正したものである。

*1 兵庫県立大学 大学院 工学研究科

2. 高砂サーマルマイニングの概要

装置概要とイメージを図1に示す。月面では地下のレゴリス層内も真空と考えられるため、水採取のため何らかの方法で氷を加熱しても昇華した水蒸気は真空中に拡散し消失すると考えられる。そこで昇華した水蒸気を留め置くための"容器"として氷壁に囲まれた空間を地下のレゴリス層内に形成することを考えた。

月面レゴリス層内に氷壁を形成する具体的な方法としては、図2のように月面にある程度の深さの孔をドリルにより削孔し、電気ヒータを差し込んで深い位置の孔の側壁を加熱する。月極地の永久影 (PSR) は 110K 以下⁹⁾と極低温であり、地下のレゴリス層も同様に低温と考えられる。また層内の氷も真空中で昇華しない極低温であり、真空に近い非常に小さな水蒸気圧に保たれていると推測される。このようなレゴリス層深部の孔の側壁をヒータで加熱した場合、レゴリス中のソイルと氷は昇温し、氷が昇華/再凝縮することで、ヒータ近傍に氷壁 (氷リッチな層) が形成できると予想している。

氷壁形成後、図1の装置によりレゴリス層内の氷壁内に乾燥気体を送り込む注入ノズルと高温気体を還流させる抽出ノズルを差し込んで氷壁内の水蒸気を回収する。ソイル間の空隙はレゴリス層内の体積の半分以上を占め、気体はソイル間の空隙を流通すると予想している⁹⁾。レゴリス層内に低温真空から切り離された与圧空間を形成できれば、固体間熱伝導のみによらず気体を介した対流熱伝達による熱拡散が可能となり、より広範のレゴリス層を容易に加熱できると考えている。氷壁内を循環させる乾燥気体は、例えば N₂ や水電解で生成する O₂、H₂ などが利用できる。乾燥気体は図1中の気体加熱器で加熱し飽和水蒸気量を高めた後、注入ノズルを介してレゴリス層内の氷壁内部に送り込む。乾燥気体は氷壁内部を循環してレゴリス層を加熱するとともに水蒸気を吸湿し、この吸湿した高湿度の気体を抽出ノズルにより水分凝縮器に取り込む。水分凝縮器内の低温コンデンサにより気体中の水分が凝縮・凝固することで、レゴリス層内の氷水を装置内に取り込むことができると考えている。

3. 氷含有レゴリス内の氷壁形成メカニズム

図3に氷含有レゴリスをヒータで加熱した場合の氷壁形成のメカニズムを示す。図の左側からヒータなどで熱を入力した場合、ヒータに接触する左端近くのソイルは熱伝導により昇温する。昇温の範囲は氷水を含むレゴリスの熱伝導率に依存する。真空中の乾燥レゴリスの熱伝導率は非常に低いが、レゴリスが氷水を含むソイル間の空隙に氷が入り込んだ場合、熱伝導率は大きくなる可能性が考えられる⁴⁾。ソイル周囲の氷は、ソイルからの固体内熱伝導、および輻射により昇温する。氷の昇温により氷表面の水蒸気圧は上昇し、氷から水蒸気に昇華すると考えられる。氷表面から発生した水蒸気は真空よりも大きな水蒸気圧であるため、真空 (ここでは図右側) に向かって水蒸気が移動する。前述の通り、ソイル内を伝わる固体間の熱伝導は非常に小さく水蒸気の移動速度に比べて小さい⁵⁾。このため、水蒸気が移動したところのソイル表面は水蒸気温度に比べて低温であり飽和圧力を下回るため、水蒸気はソイル表面で再凝縮・凝固すると考えられる。このような現象は Sowers の氷含有模擬レゴリスを赤外線加熱した実験において

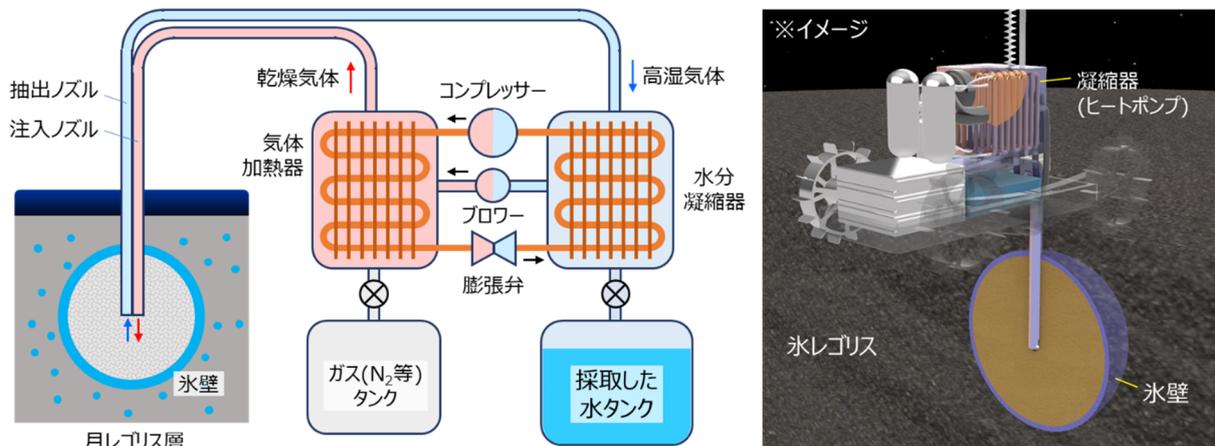


図1 高砂サーマルマイニング装置概要

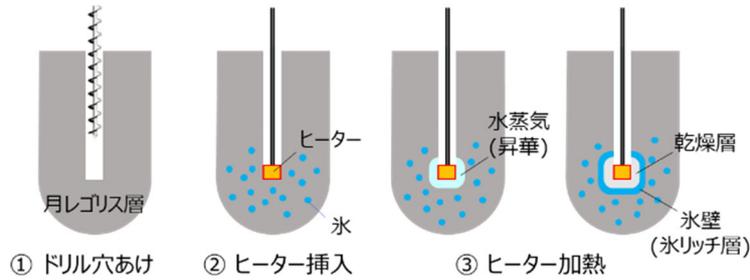


図2 レゴリス層内への氷壁形成方法

も観察されている³⁾。

本報では、上述の低温に保たれた氷水を含むレゴリスを加熱した場合の伝熱、および昇華と凝縮・凝固による氷壁形成の様子をシミュレーションにより再現した。また氷壁形成の数値シミュレーションの妥当性を検証する目的で氷結した真空下の模擬レゴリスを加熱する実験装置を構築したので報告する。

4. 解析方法

月極地のレゴリス内の伝熱は、極低温かつ真空下の氷から水蒸気の昇華と凝縮・凝固、物質移動を含む伝熱形態であり、地上で類似する現象は見当たらない。このため一般的な地上の伝熱を扱う既存の商用ソフトウェアを用いて解析することは難しい。そこでオープンソースソフトウェアである OpenFOAM の熱流体解析ソルバーをカスタマイズすることで氷水を含む月面レゴリス内の伝熱解析を試みた。カスタマイズしたソルバーの計算フローを図4に示す。

本解析では、計算領域全体において固体部分(ソイルと氷)の熱伝導解析とソイル間を流れる流体部分(水蒸気)の熱流動解析のそれぞれを行う連生解析⁷⁾を行った。計算要素の個体部分の温度 T_{solid} と流体温度 T_{fluid} 間で授受する熱量を計算した。ここで個体部分はソイルと氷、流体は水蒸気である(固体部分と流体部分を含む計算領域全体はレゴリスと表現する)。ソイル間を流れる水蒸気の流動解析においては、平均粒径 d_{soil} のソイル粒子が充填された多孔質体内流れと仮定し、流動抵抗を Ergun の式⁸⁾から計算した。水蒸気の熱物性値に関しては、理想気体と仮定し比熱、粘性、熱伝導率を OpenFOAM 内の既存の温度依存関数式から計算している。

固体部分の熱伝導解析においては、固体をソイルと氷からなる複合材と考え、それぞれの物性値を元に質量分率から計算した。真空中のソイル固体内の熱伝導率は、空隙部分を含む実効熱伝導率 k_{soil} として以下の式⁴⁾から求めた。

$$k_{soil} = 6.12 \times 10^{-3} (1 - \varepsilon)^2 \left(1 + 1.82\varepsilon \left(\frac{T_{solid}}{350} \right)^3 \right) \quad (1)$$

また氷の熱伝導率 k_{ice} は以下の温度依存式⁴⁾より計算した。

$$k_{ice} = 1.582 + 11.458 \times \exp\left(-\frac{T_{solid}}{95.271}\right) \quad (2)$$

氷の熱伝導率 k_{ice} とソイルの熱伝導率 k_{soil} から求まる固体部分の複合熱伝導率 k_{solid} は、氷がソイルを覆うように付着していると仮定して、以下の直列接続の複合熱伝導率を考えた。

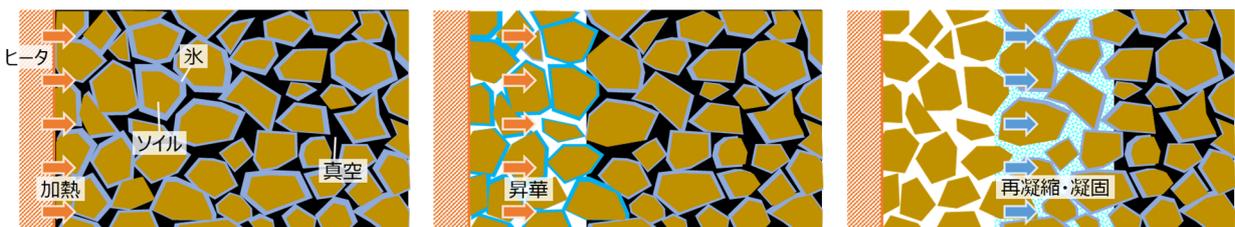


図3 レゴリス内の氷壁形成メカニズム

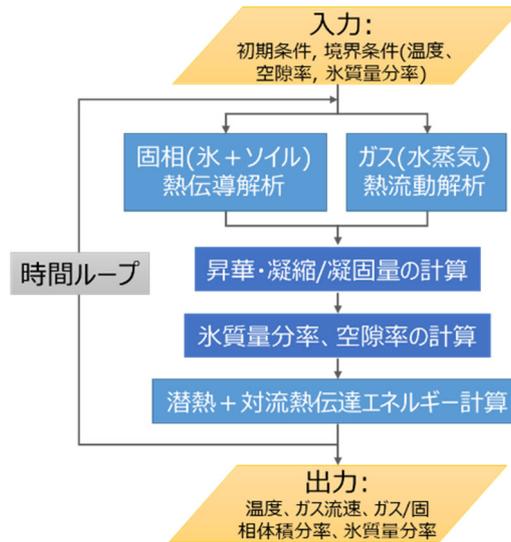


図4 レゴリス伝熱解析計算フロー

$$k_{\text{solid}} = \frac{k_{\text{soil}} \times k_{\text{ice}}}{\alpha_{\text{ice}} k_{\text{soil}} + \alpha_{\text{soil}} k_{\text{ice}}} \quad (3)$$

ここで α_{ice} は固体部分に占める氷の体積分率、 α_{soil} はソイルの体積分率であり、 $\alpha_{\text{ice}} + \alpha_{\text{soil}} = 1$ である。

以上の連生解析により求まる固体の温度場 T_{solid} と流体の圧力場 p から、各計算要素における固体部の氷から流体部の水蒸気に変化する相変化量（昇華量）と水蒸気から氷に変化する相変化量（凝縮量）を計算した。昇華、または凝縮による相変化量 S は以下の式から計算した⁹⁾。

$$S = (p_{\text{sat}} - p) \left(\frac{M_w}{2\pi R T_f} \right)^{1/2} \quad (4)$$

ここで M_w は水の分子量、 R は気体定数、 T_f は固/気相間の界面温度、 p_{sat} は T_f における飽和水蒸気圧、 p は流体の圧力である。飽和蒸気圧 p_{sat} は Murphy and Koop による予測式¹⁰⁾から計算した。式(5)から計算した T_f と p_{sat} の関係を図5に示す。

$$p_{\text{sat}} = \exp(9.550426 - 5723.265/T_f + 3.53068 \ln T_f - 0.00728332 T_f) \quad (5)$$

各計算要素における氷の昇華量、水蒸気の凝縮量 g から、次のタイムステップの氷の質量分率、空隙率を計算した。また氷の質量分率や空隙率の変化に応じて、次のタイムステップにおける各熱物性値（熱伝導率、比熱、密度）を再計算した。

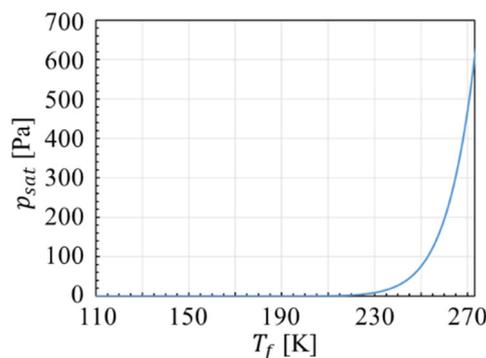


図5 低温域の飽和水蒸気圧曲線¹⁰⁾

次式で計算される各計算要素の気体/固体間の熱移動量 Q は、次のタイムステップの連生解析においてエネルギー保存式の生成項として加味した。

$$Q = Q_{subl} + Q_{conv} \quad (6)$$

ここで Q_{subl} は昇華、または凝縮・凝固による気体/固体間の潜熱移動量であり、凝縮/凝固熱と式(4)から求まる相変化量 S の積である。 Q_{conv} は気体/固体間の対流熱伝達による移動熱量である。

以上の非定常計算を OpenFOAM の時間ループ（圧縮性流体 PIMPLE）により行った。

5. 解析モデル

解析モデルは後述する実験装置と同様に中央に加熱ヒータがあり、2次元的に放射状に熱が広がるモデルを考えた（図6）。解析領域は、計算時間短縮のため周方向の対称性から角度 3° のケーキカット形状とし、半径方向に 50 等分の計算要素に分割した 1 次元伝熱モデルとした。解析領域内は氷含有レゴリスであり、ソイルまたは周りに氷が付着したソイルの粒が詰まった粒状多孔質体と仮定した。ソイルの平均粒径は $90 \mu\text{m}$ 一定と仮定し、氷の昇華や凝縮・凝固により粒内の氷とソイルの体積割合、及び粒子間の空隙率が変化するものとした。解析領域の氷含有レゴリスの初期条件は、空隙率 0.54、氷含有率 5~15 wt%、温度 110 K とし、レゴリス内の空隙は真空（0 Pa）と仮定した。外周の境界条件は真空であり、モデル中心に設置したヒータから $1.1 \sim 3.2 \text{ kW/m}^2$ の熱流 q を印可したときの水蒸気の昇華と凝縮・凝固を考慮した伝熱シミュレーションを行った。加熱時間 t は 0~6 h（21,600 s）間とし、この間の非定常解析を実施した。

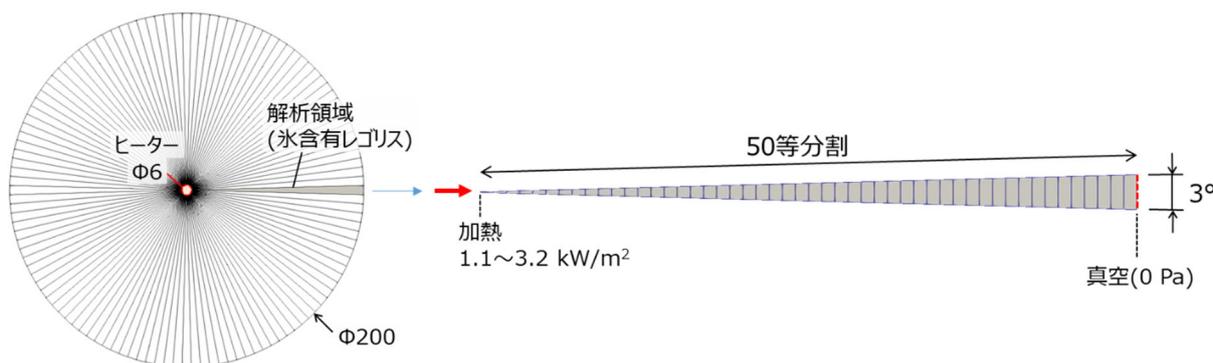


図6 解析モデル

6. 解析結果と考察

10 wt%氷含有レゴリスを $q=3.2 \text{ kW/m}^2$ で加熱した場合の 6 h 後のヒータ周辺のソイル温度、水蒸気圧力、氷質量分率の各コンター図を図7に、ヒータ中心からの距離 $x=0.003 \sim 0.06 \text{ m}$ の範囲における各時間のソイル温度分布、水蒸気圧力分布、氷質量分率の分布を図8に示す。ソイル温度はヒータ直近($x=0.003 \text{ m}$)から $x=0.06 \text{ m}$ 以上の広い範囲で時間と共に昇温した。一方、水蒸気の圧力や氷質量分率については、 $x=0.017 \text{ m}$ 以内の狭い範囲の変化に留まった。水蒸気圧力が大きく変化する位置において、氷質量分率も大きく変化的ことから、氷質量分率は水蒸気圧力の影響が支配的と考えられる。圧力や氷質量が顕著に変化する範囲は、ソイル温度が 230 K 以上の範囲であり、図5の飽和水蒸気圧 p_{sat} が急激に立ち上がる温度と一致する。

図9に 10 wt%の氷含有レゴリスを $q=1.1 \sim 3.2 \text{ kW/m}^2$ で加熱した場合の $x=0.003 \sim 0.013 \text{ m}$ の各位置における氷質量分率の時間変化を示す。 $q=1.1 \text{ kW/m}^2$ の場合、いずれの位置においても昇温が十分でないため、氷は昇華せず氷質量分率は変化しない。 $q=2.2 \text{ kW/m}^2$ の場合、1.5 h 以降で氷質量分率に変化が見られ、ヒータ直近の $x=0.003 \text{ m}$ の位置では氷が昇華して 2 h 以降で乾燥する(氷質量分率が 0)。 $x=0.005 \text{ m}$ の位置では 2 h までに氷質量分率が 8 wt%程度まで低下、 $x=0.007 \text{ m}$ の位置では、逆に 13 wt%程度まで上昇するが、

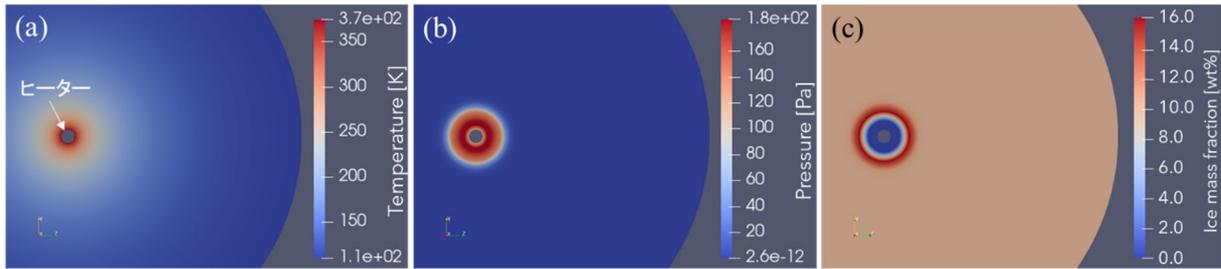


図7 (a)ソイル温度、(b)水蒸気圧力、(c)氷質量分率 ($q=3.2 \text{ kW/m}^2$, $t=6 \text{ h}$)

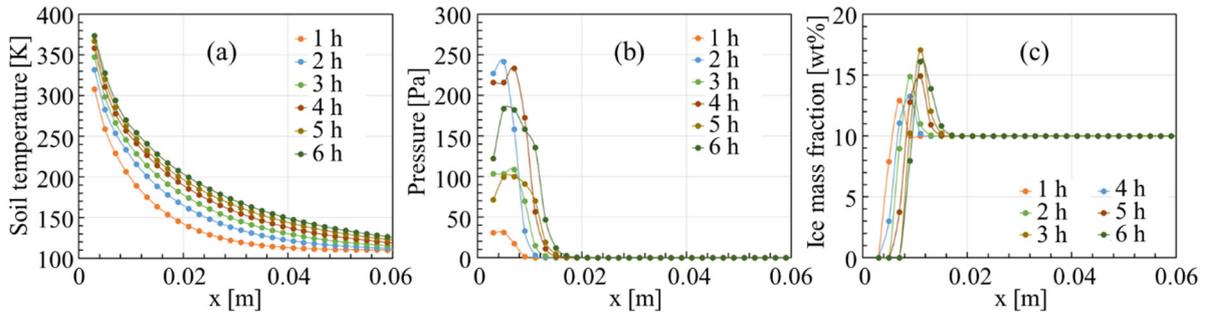


図8 (a)ソイル温度分布、(b)水蒸気圧力分布、(c)氷質量分率の分布 ($q=3.2 \text{ kW/m}^2$)

以降の時間は一定となった。 $q=3.2 \text{ kW/m}^2$ まで加熱量を増加した場合、位置によって昇華により氷質量分率が減少するタイミングと凝縮・凝固により増加するタイミングが異なる。ヒータ近傍 $x=0.003\sim 0.005 \text{ m}$ の位置においては、昇華により時間と共に氷質量分率は減少する。 $x=0.007\sim 0.009 \text{ m}$ の範囲においては、一旦は氷の凝縮・凝固により質量分率は増加するが、一定時間後に昇華がはじまり質量分率が減少に転ずる。更にヒータから遠い $x=0.011\sim 0.013 \text{ m}$ の位置においては、全ての時間(0~6 h)において昇華よりも凝縮・凝固による氷質量分率の増加が上回る。これは、氷が昇華する位置と凝縮・凝固する位置が時間と共にヒータから離れる方向に移動するためと考えられる。すなわち、氷含有レゴリスを十分な熱量で加熱した場合、時間と共にヒータ近傍の乾燥域が拡大し、その外側に氷リッチな層(氷壁)が形成され、この氷壁は時間と共にヒータから離れる方向に移動すると考えられる。

初期空隙率が 0.54、氷含有率 5~15 wt% のレゴリスを $q=3.2 \text{ kW/m}^2$ で加熱した場合の 6 h 間の各位置の空隙率を図 10 に示す。加熱により固相中のソイルと氷の内、氷成分が昇華や凝縮・凝固により変化することで、レゴリス内の空隙率が変化した。ヒータ直近($x=0.003\sim 0.007 \text{ m}$ 付近)においては、いずれの氷含有率においても氷の昇華により空隙率が大きくなる。また $x=0.010\sim 0.015 \text{ m}$ のヒータから離れた位置では、凝縮・凝固により空隙率が減少した。氷含有率が多いレゴリスは、少ない場合に比べてヒータから近い位置で空隙率が大きく変化した。これはレゴリスの氷含有率が多い場合、ヒータ近傍の氷の昇華により多くの熱量が消費されるため、氷壁の広がりはややかになると考えられる。

今回の解析においては、空隙率の最小値は 0.49 程度(氷含有率 15 wt%、 $q=3.2 \text{ kW/m}^2$)であった。本研

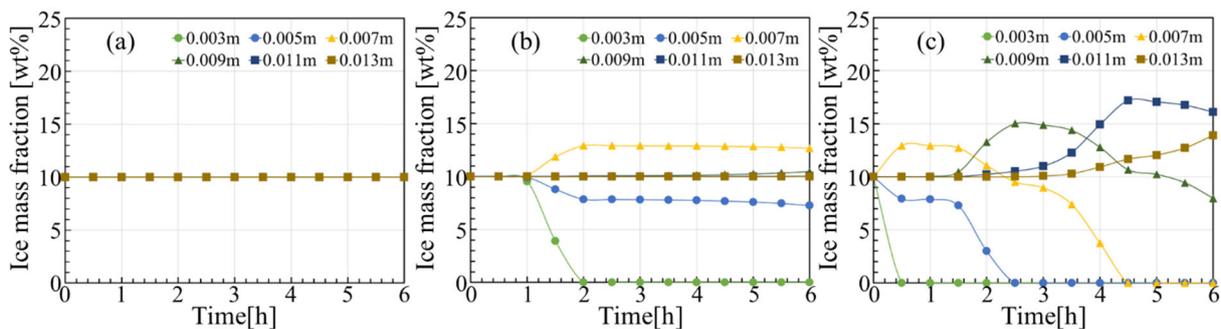


図9 氷質量分率の時間変化 (a) $q=1.1 \text{ kW/m}^2$ 、(b) $q=2.2 \text{ kW/m}^2$ 、(c) $q=3.2 \text{ kW/m}^2$

究の目的であるレゴリス層内に与圧空間を形成するためには、例えば、**図 11** のようにソイル間の微細な空隙の一部を氷粒によって閉塞すればよく、解析結果の空隙率は必ずしもゼロである必要はないと考えている。一方、解析上の空隙率は小さいほど、氷壁に閉塞された与圧空間を形成しやすいと考えられる。真空中の微細な凝縮・凝固に関する現象を現シミュレーションで再現することは難しいため、実験による検証が必要である。今後、模擬レゴリスを用いた氷壁形成の実験と併せて、解析により氷壁を形成しやすいヒータ加熱条件などを探索する。また氷含有率が小さい場合（1～5 wt%）や空隙率が変化した場合の氷壁形成の可能性についても検討していく。

7. 実験結果との比較(装置構築)

月面を模した低温・真空の環境下にて氷を含有した模擬レゴリスをヒータで加熱して氷壁形成を試みる実験を進めている。実験装置の概略図および試作した実験装置の外観を**図 12～13** に示す。模擬レゴリスを投入する実験セルは 300 mm×300 mm×50 mm の箱形状であり (**図 13(a)**)、模擬レゴリス (砂) は、米国アポロ計画で持ち帰った月レゴリスと成分や粒径などを似せた模擬物質 (米国 Exolith Lab 製 “LHS-1”) を用いた。レゴリス加熱用のヒータは直径 6 mm の棒形状カートリッジヒータであり、実験セル中心部にガラスと垂直になるようレゴリス内に埋め込んだ。また加熱時のレゴリス内の温度分布と圧力分布が測定できるようヒータと同一水平面内に等間隔に熱電対および測圧プローブを設置した。また実験セルの背面には冷却用コールドプレートを密着させ (**図 13(b)**)、実験開始前にセルごとレゴリス全体の初期温度を所定の温度 (230 K 以下) に冷却する。カートリッジヒータにより模擬レゴリスを加熱する際は、**図 13(c)** の円筒状真空チャンバー内に実験セルを設置し、真空下において氷含有レゴリスを加熱する。実験セルの前面と真空チャンバーの側面には円形のガラスがはめ込まれており、ヒータ加熱時の模擬レゴリス内の氷の相変化の様子を観察できるようにした (**図 13(d)**)。

今後、本装置を用いて、実験により低温レゴリス中への氷壁形成を確認すべく検討を進めていく。また実験結果と数値シミュレーションの結果を比較し、計算方法の妥当性を検証する。

8. まとめ

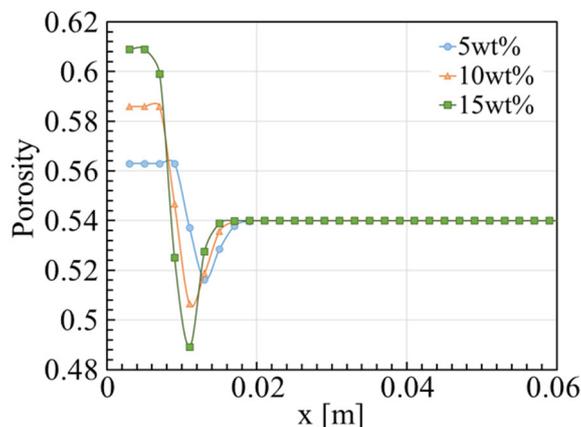


図 10 t=6 h における各氷含有率のレゴリス内の空隙率分布

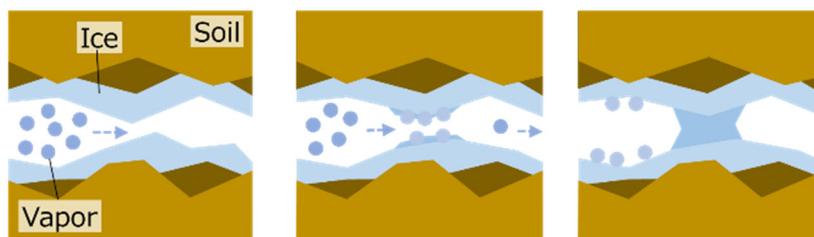


図 11 着氷による空隙の閉塞モデル

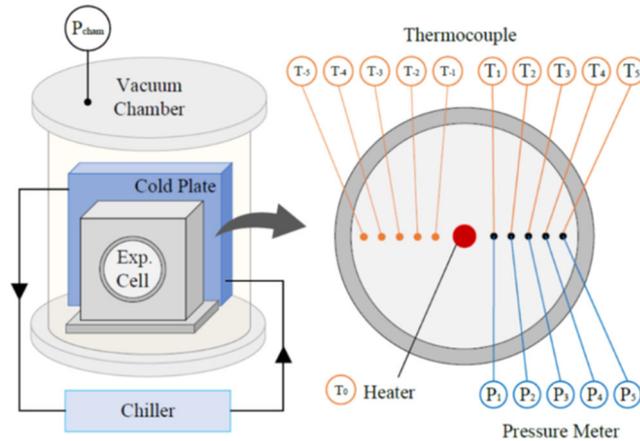


図 12 実験装置概略図

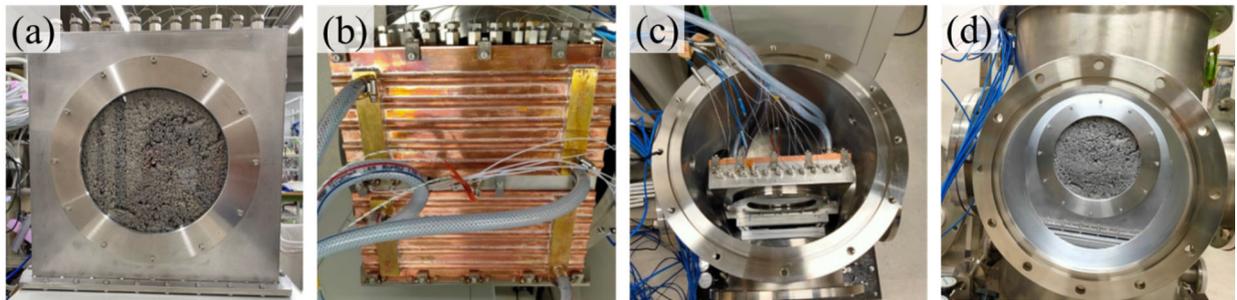


図 13 (a)模擬レゴリスを入れた実験セル、(b)セル背面のコールドプレート
(c)円筒状真空チャンパー、(d)可視化窓

月の極域に存在する氷水を効率よく採取する方法として考案した“高砂サーマルマイニング”の実現可能性を検証するため、月面下の氷レゴリス層内を加熱した場合の数値シミュレーションにより熱・物質移動現象を把握する試みを開始した。低温・真空下における氷の昇華や凝縮・凝固を考慮したレゴリス層内の伝熱解析ソフトを新規開発し、月面における氷含有レゴリスをヒータで加熱した場合の熱流動シミュレーションを行った。この結果、以下の知見を得た。

- (1) 氷含有レゴリスを十分な熱量で加熱した場合、ヒータ直近に氷含有率がゼロの乾燥域が出現し、その外側に氷リッチな層（氷壁）が形成される。
- (2) 加熱時間と共にヒータ近傍のレゴリスの乾燥域は拡大し、氷壁は時間と共にヒータから離れる方向に移動する。

本検討は将来多量の氷水を月レゴリスから採取する方法に関するが、直近では月面で少量のレゴリスから氷水をサンプリングする技術開発が盛んに行われている。レゴリスから水を取り出す最も簡便な方法は、ヒータや赤外線によりレゴリスを水の飽和水蒸気温度以上に加熱することであるが、本報の結果から、極低温・真空下では氷水が加熱面から奥に入り込み容易に取り出せない可能性が考えられる。また月レゴリスをサンプリングする際のドリル掘削においては、ドリル刃先とレゴリスの摩擦熱により、氷水が昇華し初期と異なる場所に氷が再凝縮・凝固する可能性も考えられる。月面で少量の氷水をサンプリングする際には、レゴリスに熱を加えたときの氷水の状態や位置変化を詳しく知ることが不可欠であり、昇華や凝縮・凝固を加味したレゴリス内の伝熱解析技術はますます重要になると考えている。

文 献

- 1) 内田浩基, 川上理亮, 河南治, 月面水採取サーマルマイニング技術の開発～氷水を含む月面レゴリスの熱解析～, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2023).
- 2) 加藤敦史, 森田健, フロンティアビジネス創出への挑戦-宇宙事業に関する取り組み-, 高砂熱学工業イノベーションセンター報, No. 34 (2020).
- 3) George Sowers, Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, Colorado School of Mines, NIAC Phase I Final Report (2020).
- 4) P. T. Metzger, Modeling the Thermal Extraction of Water Ice from Regolith, Earth and Space (2018).
- 5) 内田浩基, 川上理亮, 松風成美, 森田健, サーマルマイニングによる月面水採取(第一報)レゴリス内の伝熱解析と水採取方法の検討, 高砂熱学工業イノベーションセンター報, No. 35 (2021).
- 6) Shuai Li, Paul G. L., Ralph E. M., Paul O. H., Elizabeth F., Jean-Pierre W., Dana M. H., Richard C. E., Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, PNAS, vol. 115, no. 36. (2018).
- 7) 小田豊, 岩井裕, 鈴木健次郎, 吉田英生, 多孔質体内熱流動と固体壁内熱伝導の連生解析, 日本機械学会論文集 (B 編) 69 巻 679 号 (2003).
- 8) 竹内雍, 多孔質体の性質とその応用技術, フジテクノシステム (1999).
- 9) Kossacki, K. J., J. Leliwa-Kopystynski, Temperature dependence of the sublimation rate of water ice: Influence of impurities, Icarus 233 (2015).
- 10) Murphy, D. M., and T. Koop, Review of the vapor pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications, Q. J. R. Meteorol. Soc. 131, 608 (2005).

ABSTRACT

Thermal mining, which directly heats lunar regolith and captures water vapor, has been proposed as a method for mining ice in permanently shadowed regions (PSRs) on the lunar surface. This method has a problem: it is difficult to heat the deep layer because the effective conductivity of the regolith is extremely low. Therefore, we devised an original method for mining ice in PSR includes the following steps: heat the deep layer of the lunar regolith with a heater, and create a closed space surrounded by a thin ice wall that acts as a shell for water vapor, fill the inside of the shell with high-temperature inert gas to promote heating the icy regolith through convection and sublimate the ice, insert a straw into the shell and suck up the water vapor and condense on the lunar surface. We are currently investigating the feasibility of the above method from various perspectives. As one of these, we examined the feasibility of forming an ice wall through numerical analysis. First, by customizing OpenFOAM, we made it possible to simulate heat transfer in the lunar icy regolith. Next, we used this customized solver to simulate heat transfer when icy regolith was heated with a heater. As a result, ice sublimated quickly in the regolith within 2-3 mm from the heater, and a dry region appeared. The water vapor moved outside the dry region, recondensed, and solidified, forming an ice-rich region (ice wall). Finally, we could quantitatively understand the mechanism of ice wall formation.

50kW 級の高効率マイクロコージェネレーション システムの開発

増田正夫・谷野正幸・岡村明彦^{*1}・大井淳^{*1}

Development of High Efficiency 50kW-class Micro Cogeneration System

Masao Masuda・Masayuki Tanino・Akihiko Okamura・Jun Oi

コージェネレーションシステムはレジリエントなエネルギー社会の構築に向けて有望なシステムと位置付けられる。しかしながら、発電出力が数十 kW 級のマイクロコージェネレーションシステムは発電端効率が低い等の大きな課題を抱えているために、市場にあまり普及していない。筆者らは、既設の小～中規模建物に導入ターゲットを拡大するという観点で、世界最高レベルの発電端効率を実現する 50kW 級のマイクロコージェネレーションシステムを新たに開発した。本報では、システムの開発内容と開発結果、ならびに、あわせて開発した周辺ツールについて説明する。

1. はじめに

近年、東日本大震災、毎年のように発生する大規模自然災害、さらにはコロナ禍等を契機に、特に民間企業や医療施設等では、停電や電力不足に対する強靱性や BCP（事業継続計画）が求められている。一方で、世界規模でのカーボンニュートラル対応への機運がここ数年で急激に高まっており、我が国でも、官民を挙げた様々な取り組みが進められている。このように、エネルギー社会に求められる機能や役割はここ数年で大きく変化しており、レジリエントで脱カーボンに資するエネルギー社会の構築が強く求められている。

コージェネレーションシステム（以下、CGS）は、天然ガス、灯油、LPG 等を燃料として、エンジン、タービン、燃料電池等の方式で発電し、その際に生じる排熱も同時に回収・利用するシステムである。CGS は、再生可能エネルギーとの親和性、電源の多様化・分散化への対応、災害に対する強靱性、VPP（Virtual Power Plant：仮想発電所）への対応といった面で、レジリエントなエネルギー社会の構築に向けて有望なシステムと位置付けられる。しかしながら、実際に市場に導入されているのは、大規模建物に導入される大型機が殆どであり、その普及と展開には限界がある。発電出力が数十 kW 程度のマイクロ CGS（以下、 μ CGS）は、一般的に、発電端効率が低い、メンテナンス費が高い、運転騒音が大きい、筐体が大きくて重い、余剰排熱が多いために年間稼働時間が短いなど、多くの課題を抱えているため、市場にあまり普及していない。

そこで、筆者らは、既設の小～中規模建物に CGS の導入ターゲットを拡大するという観点で、これらの課題を解決すべく世界最高レベルの発電端効率を実現する 50kW 級の μ CGS を新たに開発した^{1,2)}。

μ CGS は、小型・軽量で比較的簡便に新規導入や追加増設が可能であるが故に、コロナ禍後の医療施設・病院等の社会基盤を支える建物のライフライン強化としての導入やエネルギー多消費建物であるホテル等の観光施設の省エネルギーや脱カーボンへの貢献を目的とした普及が期待される。地域のスマートエ

※本論文は、2023 年度空気調和・衛生工学会大会（福井）講演論文^{1,2)}を加筆修正したものである。

*1 TMES 株式会社

エネルギーネットワークにおける重要機器にも成り得る。

本報では、システムの開発内容と開発結果、並びに、併せて開発した周辺ツールについて説明する。

2. 開発の概要

2.1 基本構成

システムの主要構成部品は、**図 1** に示すように、ガスエンジン、発電機、排ガス HEX（熱交換器）、排熱利用 HEX（熱交換器）、冷却水ポンプ（温水 1 次ポンプ）、空冷ラジエータ、サイレンサ、切換弁、配管等である。排熱利用に関しては、シンプルなシステムを目指して、温水による回収のみとした。システムの心臓部であるエンジンは、CGS 向けに新たに開発した YGK 通商(株)製の 3,500CC、四気筒のガスエンジンである。

写真 1 には開発したエンジンの外観、**写真 2** にはこのエンジンを搭載した筐体ユニットを示す。

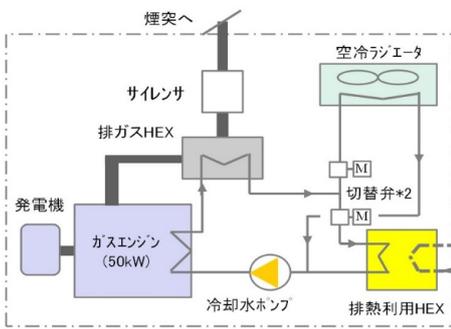


図 1 基本構成システム



写真 1 開発したエンジン本体



写真 2 開発システムの筐体ユニット

2.2 開発項目と課題

本開発は、主に、CGS 向けエンジン等の開発、システム開発、システム実証評価に分けられる。

2.2.1 CGS 向けエンジン等の開発

図 2 は、横軸がエンジンの正味平均有効圧力 P_{me} 、縦軸が LHV 基準の発電効率であり、国内外におけるガスエンジンを対象にしたシリンダ内径（Bore 径）毎（150mm、200mm、300mm）の発電効率の運転事例をプロットしたもの³⁾に、 μ CGS が一般的に採用する Bore 径 105mm の推定効率線を新たに引いたものである。この図が示すように、 μ CGS が採用するガスエンジンの発電効率は、30~33%程度と低い。

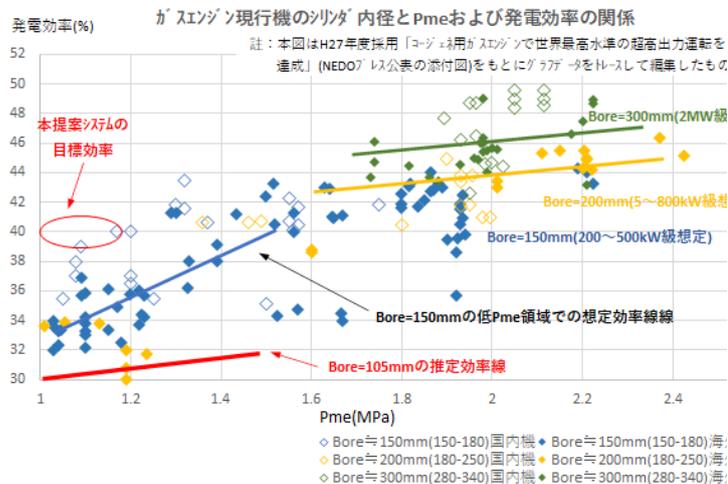


図 2 国内外のガスエンジン発電機の効率比較³⁾

本開発では、エンジンに関わる最新技術を投入してエンジンの構造や主要部品等を根本的に見直し、 μ CGS のクラスでは LHV 基準で世界最高レベルの発電端効率 40%超を目指して、50kW 級 CGS ガスエンジンを独自開発した。

2.2.2 システム開発

CGS では、一般的に熱電比が高いことから、発電に伴って多量に発生する排熱を建物内の熱需要で賄いきれないことが多い。これを防ぐためには、システムの年間稼働時間を短くせざるを得なくなり、CGS の導入メリットが低減してしまう。

図 3 は、本開発システムが目指すエネルギー効率を、既存の μ CGS と比較したものである。既存の μ CGS のエネルギー効率は、ここでは最新の性能として、LHV 基準の発電出力 33%+排熱出力 54%=総合効率 87%を示した。このときの熱電比（電気に対する熱の割合）は、 $0.54 \div 0.33 = 1.64$ となる。一方、本開発システムでは、発電端効率の向上に狙いを絞って、発電出力 40%+排熱出力 50%=総合効率 90%を目指した。このときの熱電比は、 $0.50 \div 0.40 = 1.20$ となる。

本開発システムの熱電比は、既存 μ CGS に対して 73%程度まで低減できる。すなわち、発電電力に対する排熱量を 30%程度小さくできる。このことは、余剰排熱量の低減につながり、ひいてはシステムの年間稼働時間の拡大に直結する。

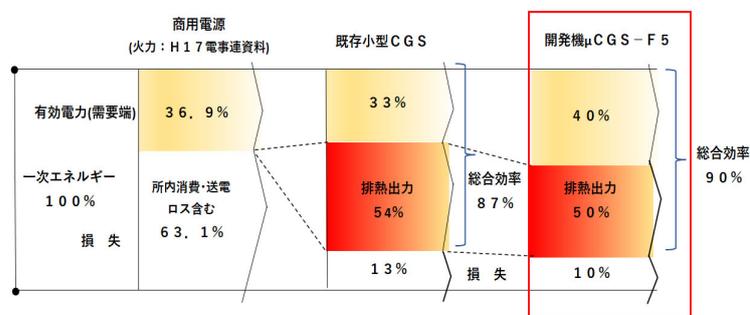


図 3 従来機と本開発システムのエネルギー効率

2.2.3 システム実証評価

本開発では、エンジン開発及びシステム開発と併行して、実フィールドへのシステム導入とシステム評価を行った。実建物での実運用におけるシステム効率の評価を行い、併せて運転の安定性やメンテナンス性等の評価を行った。

3. 具体的な開発内容

3.1 CGS 向けエンジン等の開発

3.1.1 エンジン本体の軸端効率向上

システム発電端効率 40%超を実現するためには、システム構成機器として不可欠な発電機やインバータによるエネルギーロスを考慮する必要があるため、少なくとも 44%程度のエンジン軸端効率が求められる。ここでは、エンジン軸端効率を飛躍的に向上させるための重要な要素技術として、①急速燃焼、②高膨張比化、③二点点火等を主に検討した。

①急速燃焼

図 4 に示すように、開発したエンジンでは、吸気バルブの中心線の延長線と二つの点火プラグの中心線の延長線が、燃焼室を形成する球殻の中心で交わる。この形状だと、バルブシート（弁座）や点火プラグ取り付けねじ部の燃焼室側の縁の全周が半径 R の基円上に配置されるため、燃焼室内の凹凸を避けることができる。これにより、燃焼室の表面積を減らすことで冷却損失の低減につながるだけでなく、火炎の伝播を促進できるために冷却損失を増大させるガス流動を抑えることができる。

このような急速燃焼技術の導入により、同クラスのエンジンでは類を見ない EGR（排気再循環）を採用することができ、さらなる効率向上が期待できる。

②高膨張比化

エンジンは、膨張比を高めることで軸端効率（エンジン熱効率）が向上する。開発エンジンでは、高膨張比サイクル（ミラーサイクル）を実現するために、吸気カムシャフトを油圧で制御し、バルブタイミング可変方式を採用した。吸気バルブの取付け角を変化させるのに加えて、作動角（開弁期間）も増大させた。上死点（ピストンの最上点、0°）の近傍で吸気バルブを開き、下死点（ピストンの最下点、180°）通過後の 80°程度で閉じるカムシャフトを製作して採用した。

これにより、ポンピングロス（吸排気損失）を増大させずに圧縮仕事を低減できることを実証し、エンジン軸端効率が最大限に向上するバルブタイミングを特定して採用した。

③二点点火の採用

本開発の予備実験によると、50kW 級エンジンにおいては、二点点火は、エンジンの出力と軸端効率特性の改善に有効であった。これを図 5 に示す。A+B は二点点火、A 及び B は一一点点火のエンジン軸端効率の実測結果を示す。A は燃焼室スワール（作動流体が形成する渦）の上流側に配設したものであり、B は下流側に配置したものである。この結果から、二点点火における軸端効率は優れていることが分かる。

本開発では、二点点火における諸条件での特性を実機により検証した。

3.1.2 独自の混合ミキサの開発

BCP 対応では、常用と非常用燃料（都市ガスと LPG など）の切り替えが発生する。また、バイオガスの利用では、バイオガス製造量は日変動するため、バイオガスと LPG（または都市ガス）の混焼が採用され、その日変動が大きい場合には、混焼率が大きく変動する。

一般的な混合ミキサは、所定の空燃比となるように燃料を計量して、所定の空気吸入量を混合させる機能を持つ。ガスの種類を切り替える必要がある場合、ガス密度が異なり空燃比が変わるため、通常は、変更と安定化のための調整で 1~2 日間のエンジン停止を余儀なくされる。

開発した混合ミキサでは、通常よりも小さなオリフィス径を採用して、オリフィス上流圧によるミキシング制御を採用した。これにより、ガス種類に依存しない、セミオートでのガス種類の切り替えを実現することができた。

3.1.3 メンテナンス性の向上

本開発エンジンでは、発電効率が向上するが故に従来機に比べて排熱が余剰となるケースが少なくなるために、エンジンの運転時間が長くなることが想定された。

そこで、図 6 に示すように、エンジンの骨格であるシリンダブロックを、シリンダ部分（ピストン収納部）とクランクケース（クランクシャフト収納部）に上下二分割できる構造とした。これにより、長時間運転によってシリンダ内面が摩耗した場合に、シリンダ列を単独で交換することができるようにしてメンテナンス性を飛躍的に向上させた。

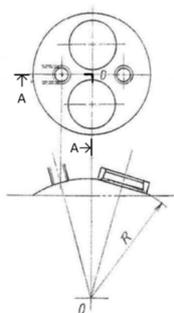


図 4 吸排気バルブと点火プラグの位置

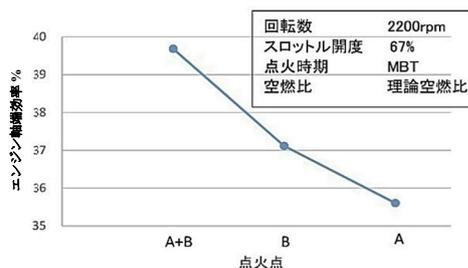


図 5 二点点火と一一点点火の比較

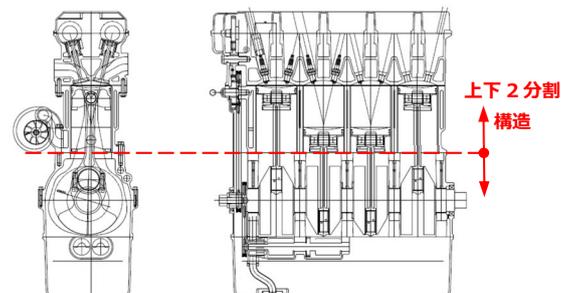


図 6 シリンダ列の二分割構造

3.2 システム開発とシステム実証評価

エンジン本体の開発、並びに、排ガス熱交換器などから構成される筐体の設計と製作を経て、実機を実フィールドに導入して評価試験を実施した。導入先は、福島県にある稼働中のホテルであり、実際の電力負荷（系統連系）と給湯負荷に接続し、LPG/都市ガスを燃料として、2021年7月から2022年3月にかけて、数か月間の実負荷運転を行った。実証試験のフローを図7に、設置した実証機の外観を写真3に示す。

総合効率の向上を図る観点から、通常は廃棄される発電機並びにインバータからの放熱分を、オイルクーラーを介して熱回収する独自の方法を採用した。

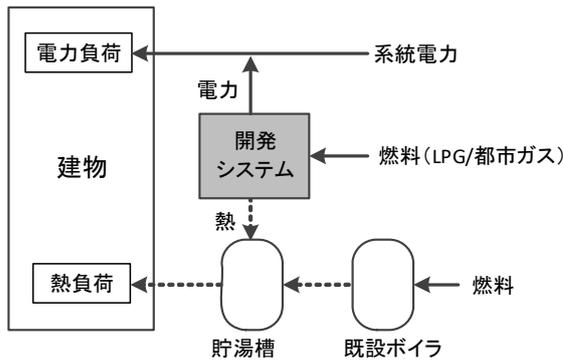


図7 実証試験のフロー



写真3 実証機の実証建物への設置

また、メンテナンスの向上を図る目的で、上下二分割構造のエンジンとしたことに加え、エンジンのオーバーホールに際しては、エンジン本体を載せ替える方式を採用した。

具体的には、図8のように、筐体からエンジン本体のみを取り外し、新エンジンに載せ替え、旧エンジンは工場にて重点検と重整備を行う方式である。この方式だと、現地でのオーバーホールに比べて、劇的にその作業時間が短縮されると共に、工場での作業であるために品質向上に資することになる。

4. 開発結果

4.1 エンジン本体の効率

標準機仕様エンジンの軸端効率は、本開発前は40%程度であった。これに対して、図9に示すように、新エンジンに対して、前述の急速燃焼（EGR）、高膨脹比化、二点点火に加えて、高圧縮比化（圧縮比を向上）、低摩擦（膨脹行程におけるピストンとシリンダの摩擦損失の低減）により効率向上を図った結果、このうち高膨脹比化は効率向上に寄与しなかったものの、テストベンチにて目標である軸端効率 44%超を

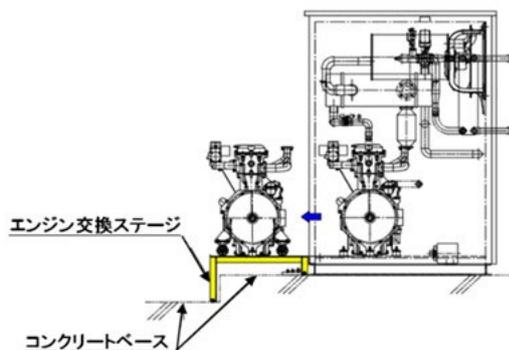


図8 エンジン本体の載せ替え



図9 エンジン軸端効率の向上

達成した。しかしEGRはエンジン出力を低下させることやコスト高につながることから、開発システムへの採用を見送ることにした。そこで、さらなる効率向上を求めて、吸気管の延長（吸気管：インテークマニホールドの長さの変更）、定格回転数の見直し等の追加検討を行った。

最終的には、**図9**の最右の棒グラフ（最終評価）に示したように、EGRを採用しなくても、目標であるエンジン軸端効率44.7%を達成することができた。

今回、開発エンジンに採用した各技術は、効率向上に対して、出力が低下するといったトレードオフの関係にないものである。

開発システムの発電端効率は、エンジン軸端効率、ならびに発電機とインバータの変換効率の掛け算で表現される。ここでは、 $44.7\% \times 91\% = 40.7\%$ となり、目標値40%超を達成できたことになる。

発電機とインバータの変換効率91%は、それぞれのカatalog値をベースに、実証試験結果をフィードバックして、補正した数値を採用した。

4.2 システム実証試験における総合効率

システム実証試験における総合効率（発電端効率と排熱回収効率の和）と排熱出力の計測結果を**図10**に棒グラフで示す。総合効率は約90%、排熱出力は70~80kWにて安定運転できていた。発電機及びインバータからの放熱分を約6kW熱回収することで、総合効率を5~6%押し上げる結果になっていた。

なお、実証試験での搭載エンジンは、標準機仕様であったため、発電端効率は35%程度にとどまっていた。これを**図10**に折れ線グラフで示す。

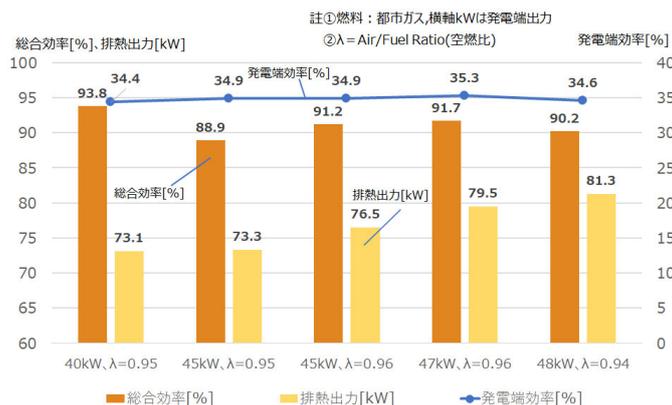


図10 実証試験における総合効率等

4.3 メンテナンス性の向上

メンテナンス性の向上を目的に、エンジン交換ステージを採用したシステムで、エンジン載せ替えの目標を3時間未満として現地作業を行った。

現地での実証では約5時間を要したが、本方式を実運用で実施できることを確認した。

5. 最終実用化

5.1 筐体の設計

実際の建物で実用運転を行った実証機を0号機、今後に商用販売を開始する商用機を1号機と定めて、その詳細設計を実施した。

商用機の詳細設計に当たっては、筐体内の換気方式を三種換気から二種換気に変更して冷却効率を高めたり、エレベータでの搬入・搬出を可能とするために機器本体の幅を1,100mm以下にできる分割構造を採用したりする等、本開発を通じて把握できた筐体の課題や改良点等を反映した。また、吸気管延長への対応など、新開発エンジンに対応した仕様とした。

5.2 商用機の仕様

商用機の仕様を図 11 に示す。

発電端効率 40% (LHV 基準) を重視した高効率 (スーパーエコ) 型、ならびに発電出力を重視した標準 (スタンダード) 型の二通りをラインナップした。ここでの効率の相違は、ハードの違いではなく、チューニングの違いによる。高効率型は運轉回転数を下げる関係で発電出力が 1 割程度低下する。

排熱利用温度は、二次側の利用先によって、低温型 (55/67°C) と吸収冷凍機等に接続可能な高温型 (68/80°C) の二通りをラインナップした。

参考までに、システムの最終ヒートバランスの運轉事例を図 12 に示す。4 章で示した発電端効率 40.7% と本数値には若干の相違があるが、最終販売においては、納入先での実機運轉条件の制約および計測誤差など含まれてくるため、ここでは、安全性を考慮した数値としている。

5.3 筐体の寸法・重量

商用機の寸法と重量を図 13 に示す。エレベータ等からの搬入・搬出時は、最大で四分割にて対応することができる。

5.4 CGS 制御システム

μ CGS 開発に伴い、ユニット内のポンプや空冷ラジエータファンの発停、ならびに冷却系 (排熱利用系) の三方弁の開閉といった CGS 制御システムをゼロベースから開発した。エンジンと排ガスの冷却機能 (排熱利用機能) と外部遠隔監視機能を有しつつ、シンプルかつ堅牢な制御とした。

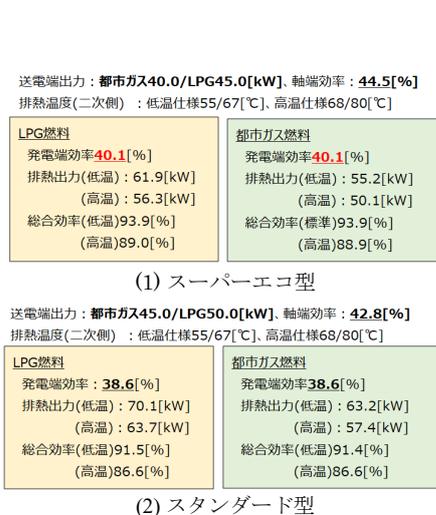


図 11 商用 1 号機の仕様

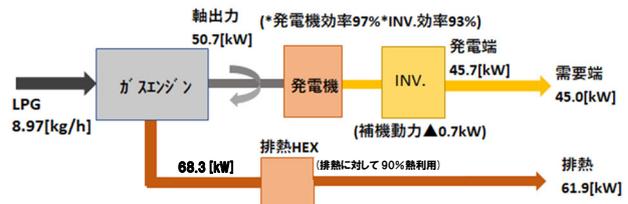


図 12 ヒートバランスの事例 (スーパーエコ型で排熱温度を低温とした場合)

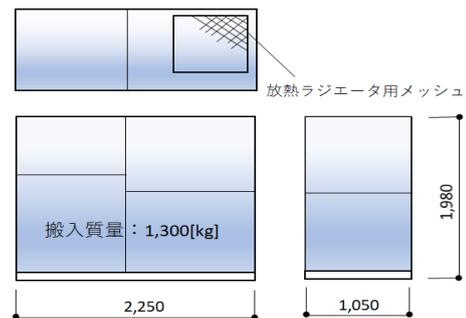


図 13 商用機の筐体寸法(参考)

6. 周辺ツールの開発

6.1 CGS 設計ツールの開発

6.1.1 開発の目的

建物への μ CGS 導入を最初に検討する際、一般的に、対象建物の月別/時刻別の電力/暖房/給湯の各負荷パターンを入手もしくは想定した上で、システム導入台数や運轉方法を変えながら、導入前後のエネルギーコストの削減効果を比較・検討して、最適な導入台数を決定する。しかし、この作業には、専門の知識や経験が必要になると共に、大変な労力を要する。たとえ優れたハードを開発しても、その良さを直ち

に判断できるツールを併せて整備しなければなかなか市場からは受け入れられない。一方で、あらゆる建物用途に対応できるツールを開発するのは容易ではない。

そこで、対象とする建物用途を限定し、空気調和・衛生工学会等から報告されている一般的な電力・熱の各負荷パターン⁴⁾を活用することにより、必要最低限の建物情報の入力のみで、 μ CGSの導入で電力料金やガス料金がどう変わるかを、誰でも容易に瞬時に判断できる専用のCGS設計ツールの開発を目指した。

6.1.2 計算フローと入力項目

開発したCGS設計ツールの計算フローを図14に示す。必要最低限の建物情報の入力だけで、 μ CGSの導入台数や運転方法に応じた年間のエネルギーコストの削減効果の大きな計算を行うことができる。

次に、具体的な入力項目について説明する。建物用途は、 μ CGSが導入される可能性の高い病院とホテルの二種類に限定した。建物負荷パターンは、以下の三通りを採用した。

- (1) 空気調和・衛生工学会「CGS設計に関する研究」の負荷パターン⁴⁾を引用
- (2) IBEC「コンパクトエネルギーシステム開発」の負荷パターン⁴⁾を引用
- (3) ユーザーによる手入力

入力データとしての負荷とその単位は、以下の通りとした。病院でもホテルでも、通常日と休日の負荷に違いはないものとした。

- (1) 電力負荷：(1~24時) × (1~12月+ピーク負荷)、単位：Wh/(h・m²)
- (2) 暖房負荷：(1~24時) × (1~12月+ピーク負荷)、単位：kJ/(h・m²)
- (3) 給湯負荷：(1~24時) × (1~12月+ピーク負荷)、単位：kJ/(h・m²)

ここでの1時とは0~1時のことであり、24時とは23~24時のことを差す。年間の負荷の積算値により、年間の電力料金やガス料金を算出し、ピーク負荷で機器容量を選定する。

暖房負荷に対しては、以下の地域係数⁴⁾を乗じた。

- (1) ピーク負荷：北海道 1.5、東北 1.3、北陸 1.1、沖縄 0.5、その他 1.0
- (2) 年間熱負荷：北海道 2.4、東北・北陸 1.4、関東 1.0、九州 0.7、沖縄 0.07、その他 0.9

また、LEDの使用等の理由で、実際の負荷と異なる場合は、全負荷に対して任意に係数を乗じることができるようにした。

導入する μ CGSの仕様に関して、燃料をLPGと都市ガスの二通りとして、次に1台当たりの発電出力、熱出力、並びに燃料消費量は、各燃料における開発システムの現行の性能を初期値とした。将来的な性能向上を見据えて、手入力による数値の変更も可能とした。

以上を整理すると、ユーザーによる入力を必要とする項目は以下の九項目のみとした。

- ① 延床面積：数値を入力
- ② 建物用途：ホテル/病院のいずれかを選択
- ③ 電力/暖房/給湯の負荷パターン：空気調和・衛生工学会/IBECから選択（もしくは手入力）
- ④ 地域：10地域から選択
- ⑤ 負荷に対する任意係数：数値を入力（初期値は1.0）
- ⑥ CGS台数：数値を入力（1~10台）
- ⑦ 運転パターン：運転開始時刻と運転終了時刻（24時間運転可）、および運転月を選択

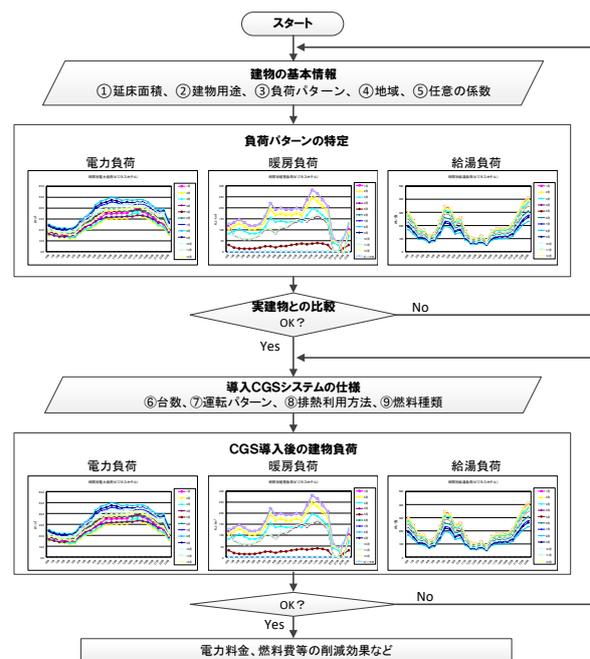


図14 計算フロー

- ⑧ 排熱利用方法：給湯優先／暖房優先／給湯のみ／暖房のみのいずれかを選択
 - ⑨ 燃料種別：LPG／都市ガスから選択
- 本ツールは Microsoft Excel のマクロで動作する。

6.1.3 計算の事例

以下の条件で計算した事例を紹介する。導入前後の各負荷の変化を図 15、導入前後のランニングコストの比較結果の事例を表 1 に示す。

- ①延床面積：15,000m²
- ②建物用途：ホテル
- ③負荷パターン：空気調和・衛生工学会
- ④地域：関東
- ⑤負荷に対する任意係数：1.0
- ⑥CGS 台数：2 台
- ⑦運転パターン：24 時間運転、1～12 月運転
- ⑧排熱利用方法：暖房優先（ピークカット）
- ⑩ 燃料種別：都市ガス

計算に際しては、初期値として用意した電力料金やガス料金を容易に変更することができる。昨今のエネルギーコストの高騰に応じた計算と評価も容易に行うことができる。

6.2 CGS 台数運転制御ツールの開発

6.2.1 開発の目的

開発した CGS 制御システムでは、単一ユニット内において発電出力と熱出力の運転制御を完結させている。また、遠隔 PC から、ネットワークを介して、ユニットの運転操作や運転データ収集を行うことができる。そこで、これらの仕組みを活用して、複数台ユニットを最適運転できるツールを開発した。

具体的には、μCGS ユニット 1 台の発電特性と熱出力特性（発電出力に対する発電端効率と熱出力）をもとに、μCGS を複数台（1～10 台）導入した場合の最適な台数運転を特定できるツールを開発した。すなわち、以下の二つの項目を同時に達成することを目指した。

- (1) システム全体で最高効率を実現する台数運転
- (2) 最適なローテーションを実現する台数運転

本ツールのシステム概要を図 16 に示す。

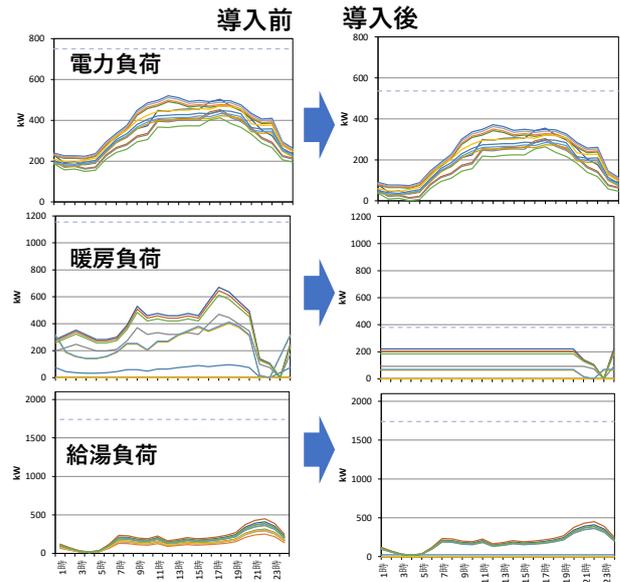


図 15 計算の事例(導入前後の各負荷)

表 1 コスト比較の事例 (単位：円)

	導入前	導入後	差分
電力	75,000,000	42,412,800	-32,587,200
暖房	19,541,666	7,848,899	-11,692,767
給湯	19,541,666	11,306,380	-8,235,286
CGS運用	0	45,727,200	45,727,200
総額	114,083,332	107,295,279	-6,788,053

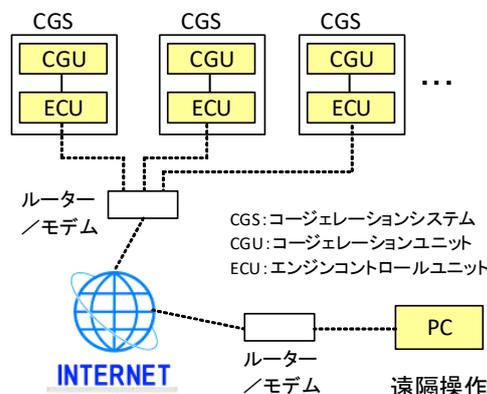


図 16 台数運転制御ツールのシステム概要

6.2.2 台数運転の考え方

本ツールで採用した台数運転の考え方を以下に示す。

遠隔からの指令は、運転するユニットの特定と各ユニットの発電出力の割合の二項目とした。すなわち、どのユニットを何%の発電出力で運転するかを指令する。

その決定方法は、エンジンにとっての高効率運転領域、ならびにエンジンの負担軽減、さらにはシンプルな組み合わせを目指すという観点から、発電出力は、第一優先を定格である80%とし、第二優先を90%、第三優先を70%、第四優先を60%と考えた。基本は、それらの四通りのみに限定して、対応不可の場合には、50%や40%等も対応できるものとした。

このルールのもとで、システム全体に必要な発電の総電力を、どのようなユニットで構成して対応するかの全ての組み合わせを想定・演算して、最もシステム全体で高効率な組み合わせを決定する。

次に、複数台ユニットのローテーションの考え方を説明する。ここでは、累積運転時間に発電負荷率を組み合わせた数値でローテーションの可否を判断することにした。あるユニットの発電負荷率を乗じた累積時間が、所定の数値に達したらそれを停止して、別なユニットの運転を開始する。どのユニットを選択するかは、全てのユニットのうちで、発電負荷率を乗じた累積時間が最も小さいものとした。

このツールはブラウザ上で動作する。

6.2.3 台数運転制御の事例

開発した台数運転制御ツールの運転事例の画面を図17に示す。この事例では、8台のμCGSユニットを対象として、その時刻の必要発電量が177.39kWであった場合に、8台のうち4台のみを運転させている。具体的には、ユニットNo.2の発電出力を80%、ユニットNo.4の発電出力を70%、ユニットNo.6の発電出力を70%、ユニットNo.7の発電出力を70%として、システム全体で181.4kWの発電出力を達成し、その際のシステム全体の発電端効率41%が実現されている。すなわち、このツールの活用により、システム全体で最も高い発電端効率を実現できている。

時刻	12月 22時			総合発電効率	41 %	
台数	8			総合発電出力	181.4 kW	
必要発電量	177.39 kW					
ユニットNo	発電出力(kW)	熱出力(kW)	発電出力(%)	連続稼働時間 (h)	累積運転時間 (h)	運転比率 (%)
1	0	0	0	0.9	101	10.81
2	50	48	80	39.6	117.4	12.56
3	0	0	0	0	102.9	11.01
4	43.8	42	70	98.2	143	15.3
5	0	0	0	0	110.7	11.85
6	43.8	42	70	82.8	139.4	14.92
7	43.8	42	70	41.7	116.8	12.5
8	0	0	0	10.6	103.3	11.05

図 17 台数運転制御ツールの運転事例

6.2.4 熱出力を対象にした台数運転

この台数運転の考え方は、発電出力だけでなく、熱出力を対象にした場合でも同様の考え方ができる。昨今の実建物では、電力の逆流を行えないケースが多いため、寧ろ、熱出力を対象にした台数運転の方が採用される可能性がある。そこで、本ツールは、熱出力を対象にした台数運転も行えるようにした。

熱出力を対象にした台数運転は、発電出力を対象にした考え方と全く同じである。熱出力においても、

第一優先を定格の 80%とし、第二優先を 90%、第三優先を 70%、第四優先を 60%とした。基本は、それらの四通りのみとして、対応不可の出力に対しては、50%や 40%等も対応できるものとした。このルールのもとで、システム全体に必要な熱量を、どのようなユニットで構成して対応するかの組み合わせを全て想定して、最もシステム全体で高効率な組み合わせを決定する。

これらの台数運転ツールは、その日に変更したい、あるいは、その週の始めに変更したいという要望にも応えられるようにした。

7. おわりに

以上のように、本報では、50kW 級 μ CGS の開発に関して、以下を説明した。

第 1 章では、昨今に求められるエネルギー社会の機能や役割、それを受けての本開発の背景や目的を説明した。第 2 章では、開発の概要として、システム基本構成、並びに開発項目と課題を説明した。第 3 章では、具体的な開発内容として、高効率な CGS 向けエンジンの開発、多種類燃料に対応する独自の混合ミキサの開発、メンテナンス性の向上、システム開発とシステム実証評価について説明した。第 4 章では、開発結果として、新エンジンの効率向上の結果、並びに、実建物での実運用によるシステム発電端効率や総合効率の実証結果等について説明した。第 5 章では、実用化に向けた取り組みについて説明した。第 6 章では、周辺ツールの開発として、CGS 設計ツールと CGS 台数運転制御ツールの開発の概要を説明した。

本開発の課題の一つにエンジンの耐久性の確認があるが、現在までに、加速度試験を含めて 20,000 時間以上の耐久性試験を継続しており、大きな問題は見つかっていない。

本開発は、YGK 通商 (株)、TMES (株)、高砂熱学工業 (株) の 3 社の共同開発のもと、2020 年度から本格的な開発を着手し、2020 年 12 月～2022 年 11 月の NEDO 実用化開発を無事に完了するに至った。その後、2023 年 5 月には一般社団法人環境共生イニシアチブによる「令和 4 年度省エネルギー投資促進・需要構造転換支援事業費補助金」の「(A) 先進事業」における先進設備・システムに採択された。2023 年 9 月の NEDO 終了時評価では、最も評価の高い「優良」を頂いた。

本開発システムは、2023 年度から TMES (株) によりシステム販売を開始するに至っている。

謝 辞

本成果は、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 2020 年度助成事業「戦略的省エネルギー技術革新プログラム／実用化開発／世界最高の発電端効率を実現する μ CGS の開発」(助成先：YGK 通商 (株) 株、共同研究者：高砂熱学工業 (株)、TMES (株)) の結果、得られたものである。

ここに、様々な局面でご指導・サポートを頂いた関係各位に改めて謝意を表す。

文 献

- 1) 岡村, 大井, 増田 : 50kW 級 高効率マイクロコージェネレーションシステムの開発 (第 1 報) 基本構成と開発結果, 令和 5 年度空気調和・衛生工学会大会 (福井) 学術講演論文集, (2023).
- 2) 増田, 岡村, 大井 : 50kW 級 高効率マイクロコージェネレーションシステムの開発 (第 2 報) 設計ツールと台数運転制御ツール, 令和 5 年度空気調和・衛生工学会大会 (福井) 学術講演論文集, (2023).
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 株式会社サステナブル・エンジン・リサーチセンター : コージェネ用ガスエンジンで世界最高水準の超高出力運転を達成, (2020).
(https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101279.html)
- 4) 都市環境エネルギー協会 : 地域冷暖房技術手引書 改訂第 4 版, (2013).

ABSTRACT

A cogeneration system is attracting attention as a promising system for building a resilient energy society. However, micro cogeneration system with power generation outputs in the tens of kW range have not been widely introduced in the market because they have a major problem such as low generating efficiency. The authors have developed a new 50kW-class micro cogeneration system that achieves the world's highest level of power generation efficiency, with the aim of expanding its installation target to existing small to medium-sized buildings. This report describes the details and results of the system development, as well as the peripheral tools that were developed.

ケミカルワッシャー[®]T-GET[®]シリーズの開発と改良

岡村 典明・井上 正憲

Development and Improvement of the Chemical Washer T-GET[®] Series for Clean Room

Noriaki Okamura・Masanori Inoue

半導体やハードディスク製造用等のクリーンルームにおいては、1990年代中頃になると従来の粒子汚染制御に加えて分子汚染制御が要求されるようになった。分子汚染を引き起こす要因のひとつとして、クリーンルームに取り入れる外気由来の酸性・塩基性の微量ガス状物質が指摘されていた。そこで、当社は取り入れ外気中の可溶性ガス成分を除去するためのケミカルワッシャー[®]T-GET[®]を1997年に開発し、市場投入を行った。外調機に組込むT-GET[®]には、高いガス除去性能を維持しつつ、低い圧力損失と小型化を実現することが常に求められていた。その後も、継続した改良やモデルチェンジによって、T-GET[®]の高性能化を図ることで、顧客のニーズに応えてきた。そして、現在も顧客への導入を継続している。

1. はじめに

半導体やハードディスクなどの電子部品製造用クリーンルームは、1960年代中頃から米国の先進技術や機器を導入しながら、国内に普及してきた。1980年代までは、歩留まり低下の要因のひとつとして粒子汚染が着目されており、当社においてもファンフィルタユニットやクリーンルーム内の気流制御・静電気除去等による粒子汚染防止のための技術開発を行ってきた。1990年代になると、クリーンルーム空気中の微量ガス状物質による分子汚染が製品欠陥を引き起こすことが指摘され、ガス状物質の発生・侵入防止と除去のための技術開発が必要となってきた。そこで、当社においてもこの様なニーズに対応するため、外気導入系での除去技術（ケミカルワッシャー[®]）、室内空気循環系での除去技術（ケミカルフィルタ）および脱ガスの少ないクリーンルーム構成材の評価・選定技術の開発に着手した。そして、1997年に取り入れ外気中に含まれる可溶性の酸性・塩基性ガス成分の除去を目的としたケミカルワッシャー[®]T-GET[®]の開発を完了し、市場投入を行った。その後も開発を継続し、得られた知見をもとに改良やモデルチェンジを行ってシリーズ商品として市場投入することで、顧客への導入を継続している。本報では、ロングセラー商品となったT-GET[®]シリーズの開発経緯や改良・モデルチェンジの変遷、商品展開などについて紹介する。

2. 技術開発の経緯と体制

当時、外気導入系での除去技術としてはエアワッシャが候補としてあがった。しかし、従来型のエアワッシャは、液滴を噴霧するスプレーノズルと下流側で液滴を補足する樹脂や金属製のエリミネータから構成されていたが、装置が大型で、多量の水をスプレーしなければならないという課題を有していた。そこで、微量ガス状物質が除去可能で、かつ外調機に組み込み可能なコンパクトな新型エアワッシャの開発を目指した。開発コンセプトとしては、低コスト（イニシャル・ランニング共に）、小型化（従来型エアワッシャに対して）、産業廃棄物の低減（ケミカルフィルタに比べて）を掲げ開発に着手した。本開発に際しては当初より親水性を有する素材をエリミネータ構成材に採用し、物質移動を行う濡れ面積を出来るだけ大きくす

ことでガス除去効率の向上を狙う方針としていたり。また、微量な可溶性のガス状物質の除去特性については、既往の研究や知見も無かったため、従来から関係が深かった東北大学化学工学専攻の三浦研究室（当時）と連携して、基本的な特性把握やガス吸収原理について並行して研究²⁻⁵⁾を進めることとした。

そして、1997年に初代モデルの「T-GET[®]」を発売して以降、1999年に改良型エリミネータを搭載した「T-GET[®]II」、2001年にはpH制御機能を追加した「T-GET[®]III」、そして2006年にはスプレアの取止めと新型エリミネータを搭載し、大きくモデルチェンジした「T-GET[®]C」を市場投入し、高いガス除去性能かつ、コンパクトで低ランニングコストの商品へと進化を遂げていった。図1にT-GET[®]シリーズのカタログ、表1にT-GET[®]シリーズの仕様一覧、図2にT-GET[®]Cを組み込んだ外調機の概要を示す。初代モデルの発売以来、国内外での「T-GET[®]シリーズ」の納入実績は、外調機台数として521台、総処理風量として11,612万m³/h（更新需要分も含む）となっている。



図1 T-GET[®]シリーズ カタログ

表1 T-GET[®]シリーズ 仕様一覧

シリーズ	T-GET	T-GET II	T-GET III	T-GET C
市場化	1997年	1999年	2001年	2006年
エリミネータ特性	親水性	親水性	親水性	親水性
エリミネータ形状	屈折型コルゲート	屈折型コルゲート (改良版)	☐	波状コルゲート
上流からの噴霧水量	L/G=0.02	L/G=0.045	☐	無
上部からの供給水量	L/G=0.005	無	☐	L/G=0.09
処理風速	2.0 m/s	2.5 m/s	☐	2.5 m/s
圧力損失	120 Pa (at 2.0 m/s)	247 Pa (at 2.5 m/s)	☐	96 Pa (at 2.5 m/s)
循環供給水水质	1次純水相当（比抵抗:1.3 MΩ・cm以上）			
循環供給水のpH制御	成行き	成行き	pH制御ユニットにより 中性域に制御	成行き
pH制御ユニット 処理水量	無	無	L/G=0.005	無
排水量	L/G=0.01	L/G=0.01	L/G=0.0013~0.002	L/G=0.01
可溶性ガス成分 除去性能	SO ₂ ガス:83% (秋・冬期平均) NH ₃ ガス:90% (秋・冬期平均)	SO ₂ ガス:83% (年間平均) NH ₃ ガス:90% (年間平均)	☐	SO ₂ ガス:83% (年間平均) NH ₃ ガス:90% (年間平均)
飽和効率	88%	90%	☐	93%
セクション長さ	1,500 mm	1,140 mm	☐	600 mm
イニシャルコスト	100	83	109	51

※L/G:Liquid/Gasの重量比。処理風量:30,000 m³/h、L/G=0.02の場合、上流からの噴霧水量=0.02×30,000 m³/h×1.2 kg/m³=720 L/h

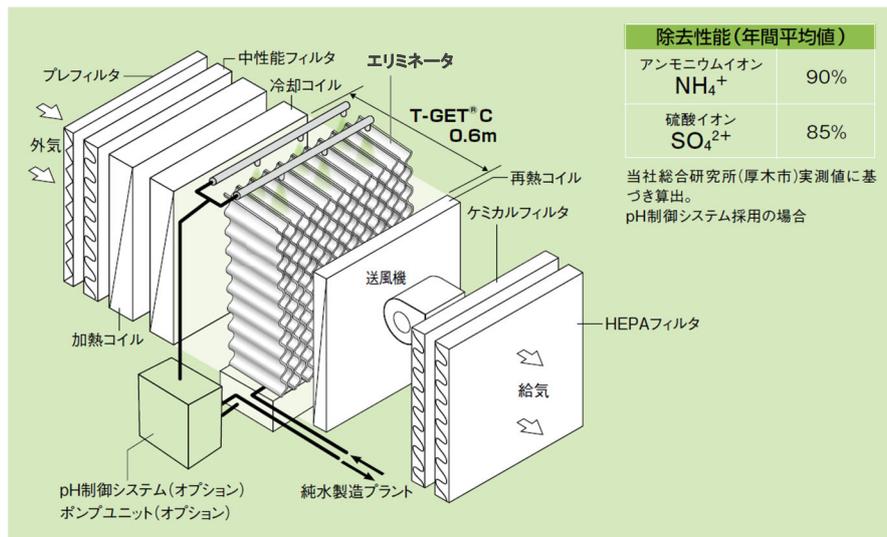


図2 T-GET®Cを組込んだ外調機の概要

3. T-GET®(初期モデル)の商品化

1997年に市場化したケミカルワッシャー®T-GET®は、エリミネータにポリエステル繊維からなる親水性素材を採用していることが大きな特徴である。

一般に、エアワッシャにおける可溶性ガス成分の除去性能は、供給水（液滴表面）と空気の接触面積（気液接触面積）に依存する。そのため、T-GET®では、図3に示すように、除去性能にほとんど寄与していなかった疎水性のエリミネータ素材を親水性に変更し、エリミネータ全面を湿潤状態にしたことで、気液接触面積が格段に大きくなり、供給水量を従来型の1/50~1/100に低減しても、高い除去性能を達成することができた。同時に、噴霧距離の短縮が可能となり、従来の長さの1/2~1/3程度のコンパクト化を達成し、外調機に組み込みやすくなった。また、クリーンルームのケミカルコンタミネーションに配慮し、供給水には1次純水を用いている。

T-GET®の開発課題の1つに、親水性エリミネータの製造方法や生産体制の確立があった。当時のケミカルワッシャー®は市場に導入事例がなく、製造メーカーも事業として成り立つのか予測困難なため、製造依頼先の探索には非常に苦労した。そのような中で、「開発者の熱意に打たれて、沈むかもしれない船に乗った」と親水性エリミネータの製造を請け負う段ボールメーカーが見つかった。開発者自身が、この技術は世の中に受け入れられる、絶対売れる、という強い信念と情熱を持って開発することが大切であり、熱意が人を動かす事例の一つとなった。

4. T-GET®シリーズの改良とモデルチェンジ

1997年にT-GET®を市場化して以降、同業他社や素材メーカーからも同様の機能をもつエアワッシャが商品化されてきた。そのため、T-GET®もT-GET®II、T-GET®IIIと改良改善を重ね、T-GET®Cでは大きくモデルチェンジを行い、競争優位性を維持することに努めてきた。

1999年に市場化したT-GET®IIでは、屈折型エリミネータを改良することにより、処理風速の高速化を図り、併せて循環供給水システムの仕様を見直すことで、コンパクト化とコスト低減を達成した。

2001年に市場化したT-GET®IIIは、T-GET®IIにpH制御ユニットを組み合わせたモデルである。T-GET®では外気中の酸性ガス成分と塩基性ガス成分の比率が偏ると供給水のpHが中性域から外れるため、図4に示すように、可溶性ガス成分の除去性能が低下して不安定になるという課題が開発当初から確認されていた。例えば、循環供給水のpHが酸性に偏ると、酸性ガス成分のイオン乖離率が低下し、酸性の可溶性ガス成分の除去性能が低下する。そこで、循環供給水のpHを常に中性域に調整するpH制御ユニットを

開発し、T-GET[®]の除去性能を常に高効率な状態に安定させることを実現した。一般的な pH 調整方法は、不足している極性の薬品を添加する薬品添加法が主流であったが、循環供給水に添加した薬品が飛散してクリーンルーム内のケミカルコンタミネーションを引き起こす懸念があった。そのため、T-GET[®]III では発想の転換を行い、過剰な極性の溶解成分を除去することで pH 制御を行うクリーン対応の pH 制御方法を新たに考案して実用化した。

2006年に市場化したT-GET[®]Cでは大幅なモデルチェンジを行なうことで、圧力損失の低減、コンパクト化、コスト低減を達成し競争力を高めた。最も大きな変更点としては、エリミネータの大幅な形状変更である。これまでの屈折型エリミネータから波状エリミネータにすることで、圧力損失をT-GET[®]IIIから60%低減することに成功した。併せて、エリミネータの積層枚数を増やす（単位容積当たりの気液接触面積を増やす）ことで、可溶性ガス成分の除去性能が高められたため、上流噴霧を中止してエリミネータ上部からの供給水のみ仕様変更した。図5に波状エリミネータ、図6にはT-GET[®]Cの外観を示す。さらに、この波状エリミネータは従来の屈折型エリミネータとサイズ互換性を持たせ、従来機への載せ替えも可能とした。

T-GET[®]Cにおいても、波状エリミネータの製造方法や生産体制の確立が課題であった。最終的には、製作機械等の開発経験のある小さな町工場に波状エリミネータの成形機の製作を依頼することができた。試行錯誤を重ね、3回にわたる成形機の試作を経て完成に至った。さらに、周囲環境の少しの違いが成形品の品質に影響することがわかり、さらに試行錯誤を重ねて最適な製造環境を整えることで、安定した品質で量産できるようになった。

ここでも、新しいものを生み出すときには、発注者と請負者という関係を超えて、純粋に「ものづくり」に対する熱意や情熱を結集することで商品化に至るという事例が得られた。

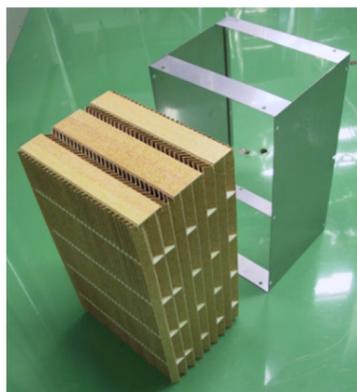


図3 屈折型エリミネータ

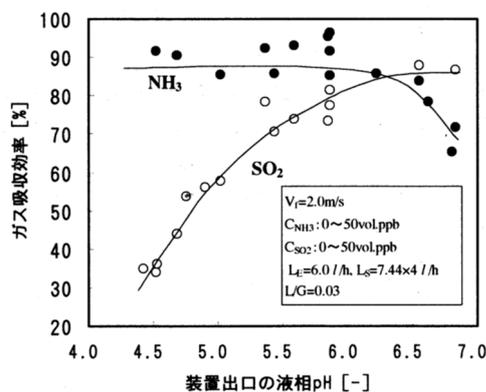


図4 液相 pH 値とガス吸収効率(純水給水)

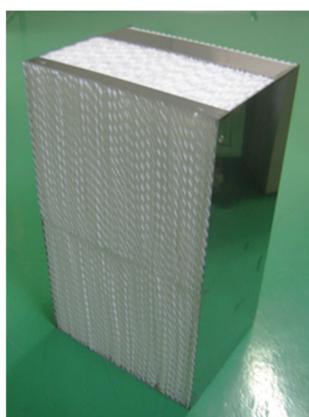


図5 波状エリミネータ



図6 T-GET[®]C 外観(上流側)

5. T-GET[®]シリーズの市場展開

1997年に市場化されたT-GET[®]は、機器単体の外販は行われていない。つまり、当社がクリーンルーム物件を受注して、外調機にケミカルワッシャー[®]設置の条件がある場合に納入される。

開発段階からT-GET[®]の情報発信に努めてきたこともあり、市場化した1997年に海外2件を含む計5物件に納入し、その後、2022年度末までの売上累計は、**図7**に示すように、国内1,539百万円、海外2,297百万円、合計3,836百万円を達成している。この間、海外での半導体製造が活況であったこともあり、海外の売上げが大きい。その一因として、某国においては、クリーンルームを中心とした設備施工・装置機器販売を行う会社からT-GET[®]を取り扱いたいとの要望があり、例外的にエリミネータ部だけを供給して拡販に繋げていたことが挙げられる。

また、2000年頃から、クリーンルームの外調機への可溶性ガス成分の除去装置の設置がデファクトスタンダードになったことや、社内の認知が広まってT-GET[®]のクリーンルーム物件への採用がスタンダードとなったことが、売上げアップの追い風となった。また、T-GET[®]導入を目的として、クリーンルーム施工を受注した物件もあった。T-GET[®]のように競争力のある要素技術は、当社のクリーンルーム施工の受注にも少なからず寄与してきている。

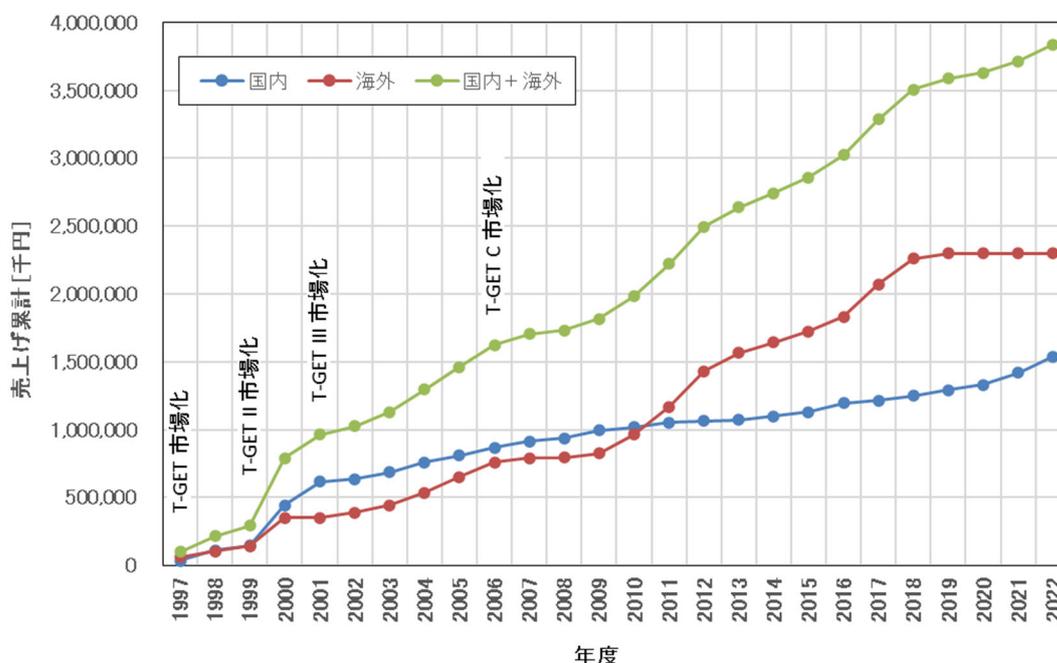


図7 T-GET[®]シリーズ 売上累計

6. おわりに

T-GET[®]シリーズは、顧客ニーズに対してタイムリーかつ継続した開発を行うことで、市場に受け入れられ続ける商品となった。優れた技術開発とは、想定する市場や顧客に対して、技術優位性（性能・品質・安全）とコスト優位性（イニシャル・ランニング）を備えた顧客価値を創造していくことである。そして、当社の様にメーカー的な機能を持たない企業にとっては、連携して「ものづくり」を行う良きパートナーの存在が極めて重要となる。そこには、「技術開発」や「ものづくり」に携わる人々の熱意や日々の努力が必要であることは言うまでもなく、今後も顧客に選ばれる商品開発が続くことを期待したい。これまでのT-GET[®]シリーズの普及展開は、社内関係部門の多くの方々のご協力やご支援の賜物であり、この場を借りて深く感謝を申し上げます。

文 献

- 1) 稲葉仁、岡村典明、高橋惇：エアワッシャーにおける親水性エリミネータの有効性，空気清浄，Vol. 37 No. 4, 308-314(1999).
- 2) 井上正憲，五味弘，青木秀之，三浦隆利：清浄水を用いた気液接触ガス吸収装置の特性解析，空気調和・衛生工学会論文集，Vol. 24 No. 75, 81-88(1999).
- 3) 井上正憲，吉田隆紀，青木秀之，猪股宏，三浦隆利：NH₃-SO₂-CO₂希薄水溶液の気液平衡特性，化学工学論文集，Vol. 25 No. 5, 677-682(1999).
- 4) 井上正憲，青木秀之，丹野庄二，三浦隆利：風洞内傘状噴霧流の特性解析，日本機械学会熱工学講演会論文集，319-321(1998)
- 5) 井上正憲，吉田隆紀，青木秀之，丹野庄二，三浦隆利：複数ノズルを配置した風洞内傘状噴霧流の特性解析，微粒化，Vol. 9 No. 26, 1-9(2000).

ABSTRACT

In the mid-1990s, molecular contamination control was required in addition to conventional particle contamination control in clean rooms for semiconductor and hard disk manufacturing. Trace amounts of acidic and basic gaseous substances derived from outside air taken into clean rooms have been pointed out as one of the factors that cause molecular contamination. Therefore, in 1997, we developed the chemical washer T-GET[®] to remove soluble gas components from the makeup air, and launched it on the market. T-GET[®] was required to achieve low pressure drop and downsizing while maintaining high gas removal performance. Since then, we have continued to meet customer needs by improving the performance of T-GET[®] through model changes. And we are currently continuing to introduce it to our customers.

高砂熱学イノベーションセンターの地域貢献について

来田 昌弘

Local contribution activities of Takasago Thermal Engineering Innovation Center

Masahiro Kitada

1. はじめに

2020年3月より茨城県つくばみらい市にて高砂熱学イノベーションセンターの運営を開始し、環境クリエイター®の発信拠点として、顧客、大学、研究機関及び地域と様々な連携活動を行ってまいりました。

その取組みの一環として、2020年8月につくばみらい市と包括連携協定を締結しました。

脱炭素社会の実現や社会課題の解決に向けて多様な分野（教育・防災・エネルギー・コミュニティ）において相互に協力することで、地域社会の持続可能な発展と「みらい都市」の実現に寄与することを目的に掲げ、これまでの3年半の活動期間において、継続した成果を上げております。

本報では、つくばみらい市との連携の主な取組み内容と、今後の地域貢献活動全般の展望をご紹介します。

2. 教育

- ・東京応化科学技術振興財団（理事長・藤嶋昭当社顧問）より、市内小中学校（14校）へ科学関連の図書を寄贈（2020年1月）
- ・夏休み自由研究展での高砂熱学賞（環境クリエイター賞）の設置と授与（2022年、2023年）
- ・あかちゃんフェスタ事業支援（体験展示出展）（2023年、2024年）



写真1 つくばみらい市との包括連携協定締結式



写真2 環境クリエイター賞案内

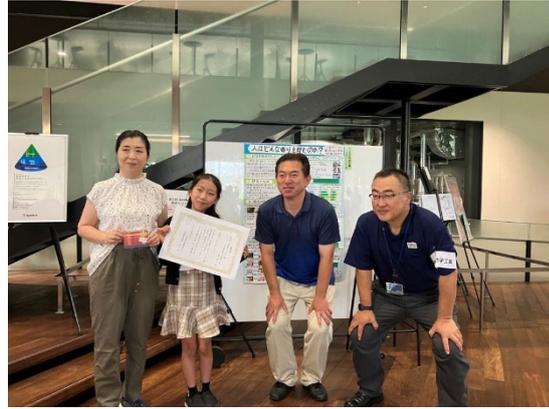


写真3 同授賞式後の記念撮影

小中学生に科学の楽しさを伝え、興味を持ってもらうように、つくばみらい市が小中学校の自由研究展での『高砂熱学工業 環境クリエイター賞』を創設しました。次世代の『環境クリエイター』が一人でも多く育ち、地球環境の未来をきりひらく存在となるよう高砂熱学は応援します。また、コロナ禍での停滞を余儀なくされた近隣小中学校への出前授業も学校関係者の方々と検討を再開し、実現に向けて取り組んでいきます。

3. 防災・エネルギー

- ・「災害時避難所用コロナ対策空調換気ブース」寄贈（2020年12月）
- ・同ブースの設営訓練（小絹小学校）をつくばみらい市担当者と実施（2021年9月）
- ・「体育館空調システム“フレッシュクール®”」の試験導入（富士見ヶ丘小学校）（2022年10月）
- ・“フレッシュクール®”の体感会実施（2023年7月）
- ・環境基本計画、地球温暖化対策実行計画の検討委員会にオブザーバー参加（2020年）
- ・市環境保全審議会への委員参画（2021年11月）
- ・省エネ再エネ導入事業の検討と再エネポテンシャル調査の支援（2022年）
- ・公共施設への環境負荷低減設備導入について市側と情報交換、勉強会を開催（2022年）

災害時の避難所としては、公共施設の体育館、集会所などを使用するのが通例です。避難所では過密化や寒暑厳しい環境での生活を強いられ、長期化に伴う体調悪化、感染症への対策が大きな課題となります。一般的に使われている布や段ボールによる仕切りでは、感染症防止効果は限定的です。高砂熱学が開発した「災害時避難所用コロナ対策空調換気ブース」はブース内部を陽圧や陰圧に保持して感染リスクの低減を図るとともに、スポットクーラーを用いてブース内を快適に保ちます。また「体育館空調システム“フレッシュクール®”」の設置は、避難用テントなどを複数配置した館内でも隅々まで新鮮空気が行き渡ります。平時はスポーツに適した省エネルギー冷暖房施設として、災害時には被災者の快適性をより向上させ、体調悪化を防ぐ防災・減災機能を有する設備とすることで公共施設などを有効活用することができます。

企業の策定するBCP（事業継続計画）は、当社施設だけが復旧しても、社会活動がままならない状態では事業活動の再生は進みません。自助を継続する一方で共助、公助へと至る過程を迅速、円滑に進める地域支援をCSR（企業の社会的責任）の観点から一層取り組みます。

また、高砂熱学の得意分野として、再生可能エネルギー活用の課題をつくばみらい市と協働して解決す

るべく、勉強会、情報交換会を継続してまいりましたが、令和6年度はその成果を形として実現することをこの包括連携の重点事項として、市と進めてまいります。



写真4 避難所用空調換気ブース贈呈式



写真5 “フレッシュクール®” 体感会パンフレット

4. コミュニティ

- ・たかさごマルシェの開催（2回/年、累計6回）（2023年度総来場者1,764名）
- ・弦楽四重奏コンサートの開催により地域住民を中心に約300名来場（2023年10月）
- ・小中高等学校向け見学会（2021年～）
- ・親子科学体験ツアー等各種イベントの開催（2022年8月）
- ・つくばみらい市総合計画審議会委員参加（2023年1月）
- ・つくばみらい市ボランティア団体の活動支援等（2022年～）

『たかさごマルシェ』（高砂熱学イノベーションセンターを会場とした農産物・クラフトの販売と研究施設紹介などを行う1Dayイベント）を中心とした地域貢献イベントをこれまで多く行ってきました。イベントも回を重ねる度に来場者の方から「高砂さんよく知っていますよ」という声を多く戴くようになりました。

テレビCM（富士見ヶ丘小学校の体育館に附設された“フレッシュクール®”を放映）を話題にしてくれる同校関係者も多く、施設を案内すると、以前は「た・か・さ・ご・ね・つ・が・く？」だった子どもたちが、親しみをこめて「たかさご♡」と呼んでくれるようになりました。

地域社会を形成する主体は、その地域で活動・居住する住民、企業、教育・医療機関など様々です。

日常においては、その主体が相互に連携し、地域発展のための行動をとれる機会は稀なことです。地域イベントはそれらの日常の社会をフラットにして、同じものを見て、聞いて、食べる、という体験を共有することで、コミュニケーションが始まり、次第に深まることが期待できます。これは地域の様々な主体を「ツナグ」こととなり、場面に応じて地域発展の為の、迅速、的確な協力や、主体毎の活動目的（例えば、ブランドイメージの向上）の成果を期待できます。

ある学校イベントをお手伝いした際に、主催者の方から「高砂さんは地域の誇りです」というお礼の言葉を戴いたときは、関係スタッフ一同感激したことを忘れられません。

一方で、『たかさごマルシェ』の会場で来場者アンケートを採らせていただくと、圧倒的に多いリクエストは体験型のアイテムをもっと多く出展して欲しいという内容でした。

地域主体を『ツナグ』仕掛けはさらに工夫の余地ありと心得て、地域発展と企業価値向上を目指してまいります。



写真6 第6回たかさごマルシェの様子

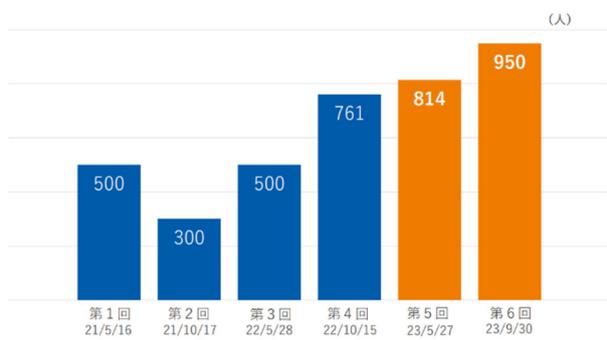


図1 たかさごマルシェ来場者数の推移



写真7 たかさごコミュニティコンサートの様子

5. ふるさとづくり大賞受賞

包括連携におけるこれらの取組みの過程で、2023年2月に『令和4年度 ふるさとづくり大賞 地方自治体表彰』という形で総務省より評価を戴きました。同賞は、急速な発展を遂げるつくばみらい市と包括連携協定により協働させていただいたことで受賞のこなった名誉であり、あらためて市に感謝申し上げます。

今後も、この包括連携事業において「みらい都市」の実現に寄与する目標を掲げて協働させていただけるよう努めてまいります。



写真8 授賞式記念撮影



写真 9 ふるさとづくり大賞受賞概要

6. おわりに

2020年の当センター開所から3年半の間に、環境クリエイター®の発信拠点として、顧客、大学、研究機関及び地域との様々な連携活動を行ってまいりました。今後も、つくば・常総地区での地域に密着した貢献活動をさらに進めるとともに、全国・海外からも注目され訪問していただける施設へと進化し、2024年度からは、茨城県次世代エネルギーパーク推進協議会での活動をはじめとして、様々な機関と連携を目指して以下のような活動を推進します。

- ・ 研究開発分野での各種機関との連携・協力
- ・ 教育分野での社会見学や職場体験の受け入れ
- ・ 再生可能エネルギー活用など脱炭素推進活動
- ・ 地域防災活動への支援
- ・ 施設を活用した文化・芸術イベントの主催
- ・ 被災地支援として一時避難所の提供

このような取組を活発化させることで、高砂熱学ファンの創造、企業価値の向上や優秀な人財の採用につなげ、社員が高砂熱学の仕事に誇りを持ち続ける企業を目指して活動してまいります。

高砂熱学イノベーションセンター報 NO.37 2023

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

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