

No. **34**

■ **高砂熱学** ■

▼
2020

■ **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. 34 2020

目 次

巻頭言	(小島和人)	1
基礎から応用まで～マイケル・ファラデーとレイ・パスツールに学ぶ	(東京理科大学名誉教授 藤嶋昭)	2
【イノベーションセンター特集】		
エネルギー自立型サステナブル研究施設		
1. 全体概要および ZEB に向けた建築・設備計画と環境評価	(清水昭浩・平原美博・木村健太郎・羽鳥大輔・滝澤知史・高西茂彰・武藤友香・牧野内絵理・粕谷文・フランサジオニジオ・柳瀬真紀)	5
2. 木質バイオマスガス化 CHP を利用したエネルギー自立型自家消費システム	(元田治・平原美博・清水昭浩・木村健太郎・羽鳥大輔・武藤友香)	17
3. 二次側空調システム及びセンシングシステムの概要	(木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦・平原美博・羽鳥大輔・武藤友香)	25
4. ICT を活用した先進の中央監視と今後の取組	(柴田克彦・鈴木徳利・平原美博・清水昭浩・木村健太郎・羽鳥大輔・武藤友香)	37
5. 新素材・新材料を用いた施工の合理化	(湯浅憲・鈴木崇浩・千葉俊・平原美博・清水昭浩・柴田克彦・羽鳥大輔・武藤由香)	48
【技術紹介】		
1. 過冷却水方式の製氷技術を用いた水産業への事業開発	(江田真英)	57
【技術論文】		
1. アルミ冷媒配管システムの開発－冷媒配管の材質を銅からアルミに代える－	(込山治良・権田勝美・湯浅憲)	64
2. 室外機の噴霧冷却時におけるフィン表面のスケール付着抑制	(石井秀一・佐藤峰彦)	76
3. 微生物汚染対策効果評価のためのバイオリジカル・インジケータの迅速判定方法	(五味弘・荒川宏樹・高橋秀人・藤井修二・柳宇・田中毅弘)	82
4. 粘着テープ製造工程でのクロロズド VOC 回収システムの実証	(河岡将行・高橋秀人・伊藤衛)	89
5. 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発－一定置型とオフライン熱輸送型の蓄熱システムの実証試験－	(川上理亮・鎌田美志・鈴木美穂・中田拓司・大山孝政・谷野正幸・宮原英隆・山内一正・名和博之・佐藤敦史・鈴木正哉・松田聡)	95

6. 藻類培養への排ガス CO ₂ 利用の研究	(増田正夫・宮下真一) 106
【レビュー】	
1. 吸着式冷凍機の技術動向の調査研究	(内田浩基・馬場大輔・谷野正幸) 112
2. フロンティアビジネス創出への挑戦ー宇宙事業に関する取り組みー	(加藤敦史・森田健) 131
【総説】	
1. 水素概論	(石塚朋弘・加藤敦史) 139
創刊にあたって	(山分弘史) 148

Report of Innovation Center
of Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

No. 34 2020

CONTENTS

Preface	(Kazuhito Kojima)	1
Fundamental to Application~Study Michael Faraday and Louis Pasteur	(Tokyo University of Science)	
	(Akira Fujishima)	2
【Special Issue of Innovation Center】		
The Energy Self-Sufficient Innovation Center		
1. Overall overview of the project, and planning and environmental evaluation of architecture and equipment for ZEB	(Akihiro Shimizu · Yoshihiro Hirahara · Kentaro Kimura · Daisuke Hatori · Tomofumi Takizawa · Shigeaki Takanishi · Yuka Mutoh · Eri Makinouchi · Aya Kasuya · Dionisio Franca · Maki Yanase)	5
2. Energy Self Sufficient System Using Combined Heat & Power System (CHP) of Woody Biomass Gasification Type	(Osamu Motoda · Yoshihiro Hirahara · Akihiro Shimizu · Kentaro Kimura · Daisuke Hatori · Yuka Mutoh)	17
3. Outline of Secondary Air Conditioning System and Indoor Environmental Sensing System In the Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center	(Kentaro Kimura · Katsuhiko Shibata · Akihiro Shimizu · Yoshihiro Hirahara · Daisuke Hatori · Yuka Mutoh)	25
4. The Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center Advanced Central Monitoring System Utilizing ICT	(Katsuhiko Shibata · Narutoshi Suzuki · Yoshihiro Hirahara · Akihiro Shimizu · Kentaro Kimura · Daisuke Hatori · Yuka Mutoh)	37
5. The Energy Self-Sufficient Innovation Center Construction rationalization with new materials	(Ken Yuasa · Takahiro Suzuki · Suguru Chiba · Yoshihiro Hirahara · Akihiro Shimizu · Katsuhiko Shibata · Daisuke Hatori · Yuka Mutoh)	48

【New Technologies】

1. Business Development in the Fishing Industry with Ice Making Technology using Super-cooled Water
(Masahide Eda) 57

【Technical Papers】

1. Development of Aluminum Refrigerant Plumbing Systems -Changing the Plumbing Material from Copper to Aluminum-
(Haruyoshi Komiyama・Katsumi Gonda・Ken Yuasa) 64
2. Suppressing Scale Adhesion of Outdoor Units' Fin Surfaces That Was Caused by Spray Cooling
(Shuichi Ishii・Minehiko Sato) 76
3. Rapid Judgment Method of Biological Indicators for Evaluation of Microbial Pollution Control Effect
(Hiroshi Gomi・Hiroki Arakawa・Hideto Takahashi・Shuji Fujii・U Yanagi・Takehiro Tanaka) 82
4. Demonstration Test of Closed-loop VOC Recovery System
(Masayuki Kawaoka・Hideto Takahashi・Mamoru Ito) 89
5. Development of Adsorption Thermal Storage System Utilizing Low-temperature Waste Heat - Demonstration Test for Thermal Storage System of Stationary Type and Offline Heat Transportation Type -
(Yoshiaki Kawakami・Haruyuki Kamata・Miho Suzuki・Takuji Nakata・Takamasa Oyama
Masayuki Tanino・Hidetaka Miyahara・Kazumasa Yamauchi・Hiroyuki Nawa
Atsushi Sato・Masaya Suzuki・Satoru Matsuda) 95
6. Study on Using CO₂ in Exhaust Gas for Algae Culture
(Masao Masuda・Shinichi Miyashita) 106

【Review】

1. Research and Study of Technological Trends of Adsorption Refrigerators
(Hiroki Uchida・Daisuke Baba・Masayuki Tanino) 112
2. Challenge for Creation of Frontier Business - Action for Space Business -
(Atsushi Kato・Ken Morita) 131

【Technical Explanation】

1. Introduction to Hydrogen (Tomohiro Ishizuka・Atsushi Kato) 139

Notes for the First Publication (Hiroshi Yamawake) 148

巻 頭 言

Preface

代表取締役社長 COO

小島 和人



高砂熱学グループは、全員の創意を發揮しお客様のニーズに対応する特色ある技術を開発するという経営理念のもと、研究開発基本方針を掲げて、研究開発を推進しております。この度、イノベーションセンター報の創刊にあたり、一言ご挨拶を申し上げます。

高砂熱学イノベーションセンターは、多様な人々が集い夢を育む成長の場、社内外の知識・知恵を結ぶ創造の場、高砂の技術を世界に広げる発信の場をテーマに、研究開発拠点として2020年3月に茨城県つくばみらい市に開設致しました。当センターは、展示エリア・ホールなどの多目的エリアや執務エリアから成るオフィス棟、実証・実験室・研究室から成るラボ棟、ならびに、二つの棟を連結する形で設けられた展示スペース・プレゼンルームで構成されています。本センターは、エネルギー自立型のサステナブル研究施設を目指したシステム構築を行っています。また、オフィス棟の執務エリアは、当社が取り組んでいるワークスタイル変革の考え方をベースに、イノベーションを喚起する環境づくりと、生産性を高めるオフィス設計を採用しています。

本創刊号はイノベーションセンター特集として、当センターに導入された技術内容の紹介を中心に、技術紹介、技術論文、研究レビュー、総説から構成されています。今後も年1回の発刊により、お客様をはじめ多くの皆様に、高砂の技術をタイムリーに発信して参ります。

当社は、新型コロナウイルス感染症などの環境変化を踏まえ、昨年発表した中期経営計画においては「経営基盤の強靱化」を基軸とし、「国内事業の強靱化」、「国際事業の変革」、「環境事業への挑戦」という三つの成長戦略を掲げました。これら成長戦略の実現に寄与すべく、イノベーションセンターにおいては、生産システムの変革技術、先進的な環境提供技術、エネルギーバリューチェーン技術および資源の循環利用技術の研究開発に取り組んで参ります。また、多様化するお客様のニーズや社会情勢の変化に迅速に対応するため、当イノベーションセンターを拠点として、他分野の企業や大学・研究機関とも積極的に外部連携を図り、オープンイノベーションによる新たな価値創出に挑んでいきます。この様な取組みの中から、当社の基盤事業の大きな変革や、環境クリエイターとして脱炭素社会の実現に向けて、地球環境に貢献する事業の創出を目指し、邁進してまいります。お客様や関係各位におかれましては、引き続きご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

【寄稿文】

基礎から応用まで～

マイケル・ファラデーとルイ・パスツールに学ぶ

Fundamental to Application

～Study Michael Faraday and Louis Pasteur

東京理科大学 名誉教授
総合研究院 光触媒国際研究センター

藤嶋 昭

Distinguished Professor, Tokyo University of Science
Director, Tokyo University of Science,
Photocatalysis International Research Center
Akira Fujishima, Ph. D.



先人に学ぶ研究の基本

私は最も尊敬する科学者2人に学びたいと思っています。

1人目がイギリスのマイケル・ファラデー (1791–1867) です。2人目がフランスのルイ・パスツール (1822–1895) です。

科学の基礎を中心にそれぞれ独力で研究し、素晴らしい発見の数々をあげ、現在に生きる私たちにも欠かせない大きな貢献をした方々です。

電気を作ったファラデー

ファラデーは、ロンドンの鍛冶職人の家に10人兄弟の次男として生まれました。家族の暮らしは苦しく、13歳になると製本屋に住み込みで働き始めました。楽しみは仕事の合間をぬって読む本でした。ファラデーは、科学に興味をもち、わずかな収入で実験道具を買っては独学で科学実験を行いました。

ある日、ファラデーは有名な科学者ハンフリー・デービーの講演会に行きました。デービーは、電気分解によりカリウム、ナトリウムなど6つの元素を発見した若手の化学者です。講演に感動したファラデー

は、科学者になることを決意し、デービーに「助手として雇ってほしい」と手紙を送り、この手紙がきっかけとなりイギリスの王立研究所の助手になることができました。ファラデー21歳の時でした。

屋根裏に住み、1人実験に取り組みました。70歳で退任するまでの実験ノートが残っていますが、1冊400ページほどのノートが合計7冊になっています。毎日得たデータをまとめ、又新しいアイデアが記されています。私はこの本を入手することができ、時に読んでいますが、各ページにはその時考えられた色々なアイデアが図と共に記されています。

ファラデーは沢山の成果をあげていますが、代表的成果をあげてみますと、次の3項目になります。

1) 電磁回転

1821年、ファラデーは、世界で初めて電磁回転の実験に成功しました。実験の装置は簡単で、水銀を入れた2つのカップの片方に可動式の磁石と固定した銅線、もう片方に固定した磁石と可動式銅線を取り付けたものでした。このしくみは今利用されている電気モーターの原点となったものです。

2) 電磁誘導

1831年、ファラデーは、電気から磁気を生み出すのとは逆に、磁気からも電気をつくれると考えました。強力な磁石を電線コイルの中に入れると、一瞬だけ電線に電流が流れることを確かめました。発電の原理の発見でした。

3) 電気分解

電解質の水溶液に2つの電極を入れ、それらに直流電圧をかけると、電気分解がおこります。ファラデーは、1833年に電気分解によって変化する物質の量は、移動した電気量に比例することを実験で証明しました。

ファラデーのもう1つのすばらしさは、市民のための科学講演会を熱心に行ったことです。一般市民向きの金曜講演ほかに、子供たちに科学の楽しさを伝えようと、クリスマス講演を行いました。この講座は、現在も王立研究所で毎年クリスマス時期に開催されていますし、現在では日本を含め各地で実施されています。ファラデー退任の時のロウソク1本を用いての6日間に渡る講演は「ロウソクの科学」の本として、1861年から現在まで世界中で読みつがれています。

バイオの基本のパスツール

新型コロナウイルスで世界中が大変です。有効なワクチンが一刻も早く開発されることをどの人も待ち望んでいます。

130年ほど前になりますが、狂犬病が猛威をふるい、ヨーロッパで狂犬にかまれた人の多くが亡くなるという時代が続きました。今でももちろん狂犬病は恐れられてはいますが、この狂犬病に対するワクチンを開発した人がフランスのルイ・パスツールです。

狂犬病になった犬の血液からワクチンを作り、犬に噛まれて発熱している少年にこのワクチンを注射して治すことに成功した最初の例として、パスツールの伝記にはワクチンを注射するところの写真をみるこ

とができます。

この少年は病気が治ったあともパスツール研究所の門番として務め、パスツール死去の後にはパスツールの墓守りとして一生を送ったとのことでした。

パスツールはフランスのワイン業界を救ったことでも知られています。ワインの樽を開けてみないと美味しいワインができていないのか、酸っぱい乳酸ができていないのかがわからず、ワイン業界が困っていたそうです。

パスツールはワイン発酵の様子を詳しく調べ、良好なワインができる時と、乳酸ができる時では酵母の形が違うことを解明しました。棒状の酵素があると乳酸ができることを突き止めました。60℃に熱すると乳酸となる棒状酵母はなくなりました。この温度処理つまり低温殺菌法が開発され、フランスのワイン業界に大きな貢献をしています。今ではこの方式は牛乳などの殺菌法としても使われています。

そのほか「カイコ」の病気の原因の細菌を突き止めるなどフランスの絹糸産業にも貢献しています。

ルイ・パスツールと言えばほかにも重要な研究があります。ギリシャ時代の権威アリストテレスが言った「微生物は自然に発生する」との考えに真っ向から反対し、有名な「白鳥の首形フラスコ」を作り、市内の汚れた空気を吸入させた時とアルプス山上の綺麗な空気をういた時での培養実験から、生命は無からは発生しないことを実験で証明しています。

このようにルイ・パスツールは基本的な研究から人類に実際に役立つ研究までを行い、今でも世界中から尊敬されている研究者です。

中国古典にも学ぶ

基本的なことから人類に役立つ研究まで、マイケル・ファラデーとルイ・パスツールの行った研究の素晴らしさを私たちはこのお二人の研究者に学び、世の中に役立つ研究をしていきたいものです。

中国古典の1つ書経に次のような言葉があります。『知ることの難きに非ず、行なうことこれ難し』一非知之難、行之惟難一

どんなことも効果的な実行は難しいものです。特に研究に於いては、いざ実行となると計画通りにはできないものです。いろいろな人の協力を得て実行したいものです。

エネルギー自立型サステナブル研究施設

ー全体概要および ZEB に向けた建築・設備計画と環境評価ー

清水昭浩・平原美博・木村健太郎
羽鳥大輔^{*1}・滝澤知史^{*1}・高西茂彰^{*1}
武藤友香^{*1}・牧野内絵理^{*2}・粕谷文^{*2}
フランサジオニジオ^{*3}・柳瀬真紀^{*3}

The Energy Self-Sufficient Innovation Center - Overall overview of the project, and planning and environmental evaluation of architecture and equipment for ZEB -

Akihiro Shimizu・Yoshihiro Hirahara・Kentarō Kimura
Daisuke Hatori^{*1}・Tomofumi Takizawa^{*1}・Shigeaki Takanishi^{*1}
Yuka Mutoh^{*1}・Eri Makinouchi^{*2}・Aya Kasuya^{*2}
Dionisio Franca^{*3}・Maki Yanase^{*3}

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を両立したエネルギー自立型研究施設を目指して、2015年より建設プロジェクトを開始し、2019年2月に工事に着手、2020年3月より運用を開始した。本報では、まず本プロジェクトの計画に関わる経緯および設計コンセプト、建築概要について説明する。次に、本施設の建築計画において留意した点と創エネルギー・電気・空調・衛生設備の概要について紹介する。最後に、本施設の環境性能評価結果について述べる。

1. はじめに

高砂熱学工業は、2023年の創立100周年に向けて、2015年11月に神奈川県厚木市の既存の技術研究所の移転計画に着手、2017年4月に茨城県より開発用地を購入するとともに、技術研究所と本社開発部門を統合した新たな研究開発組織を設立した。2019年2月に高砂熱学イノベーションセンター（以下、本施設、写真1参照）の工事に着手、2020年1月に竣工引渡を受け、3月より運用を開始した。本プロジェクトでは、設計コンセプトとして「地球環境負荷低減と知的生産性向上を両立したサステナブル建築」を掲げ、以下の項目を具体的な目標とした。



写真1 高砂熱学イノベーションセンター全景^{※4}

※ 2019年度及び2020年度空気調和・衛生工学会大会講演論文^{1),2),3)}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 Sekkei Inc、^{*2} 株式会社竹中工務店, Takenaka Corporation、^{*3} 株式会社ヴォンエルフ, Woonerf Inc.

- ・心と身体の健康を実現する建築・設備プランを提供し、社員の生産性向上に寄与
- ・再生可能エネルギーを積極的に採用し、ZEB（Zero Energy Building、ZEB の評価については図 1⁴⁾ 参照）を達成
- ・施工現場での生産性向上に寄与する技術の活用
- ・オープンイノベーションや地域貢献に供する空間の提供

これらの目標の実現により環境やエネルギーの分野で社会貢献する研究施設を構築するとともに、図 2 に示すように、オフィス棟は実績値にて一次エネルギー消費量が正味 0 となる『ZEB』を、施設全体としては ZEB Ready 相当を目指した。社員の生産性向上に関しては、フリーアドレスを採用し建築計画と設備計画が融合した新しい働き方の変化に柔軟に対応する執務空間を計画した。オープンイノベーションに関しては、社外の研究者との研究開発を進めるための共創研究室や共創パートナー執務室を設け、社外の知識と知恵を取り込む創造のための空間を計画した。地域貢献に関しては、カフェレストランや隣接する小学校を意識した体験学習としての展示スペースやプレゼンテーションルームを設け、地域住民との交流の場を積極的に提供する計画とした。

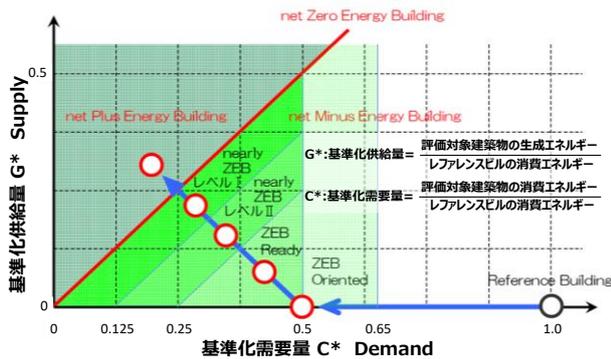


図 1 ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の段階的評価



図 2 本プロジェクトでの ZEB の目標値

2. 建築概要

名称：高砂熱学イノベーションセンター
 所在地：茨城県つくばみらい市富士見ヶ丘 2-19
 建築主：高砂熱学工業(株)
 用途地域：準工業地域
 敷地面積：22,746.18 m²
 建築面積：7,129.74 m²
 延床面積：11,763.97 m²
 構造：S 造
 階数：地上 2 階、塔屋 1 階
 主用途：研究所
 工期：2019 年 2 月～2020 年 1 月
 基本設計：(株)三菱地所設計
 実施設計：(株)竹中工務店（建築・構造・昇降機）
 (株)三菱地所設計（空調・衛生・電気設備）
 監理：(株)三菱地所設計
 施工：建築・昇降機 (株)竹中工務店
 衛生設備 (株)ヤマト（コストオン）
 電気設備 (株)関電工（コストオン）
 空調設備 高砂熱学工業(株)



図 3 配置図

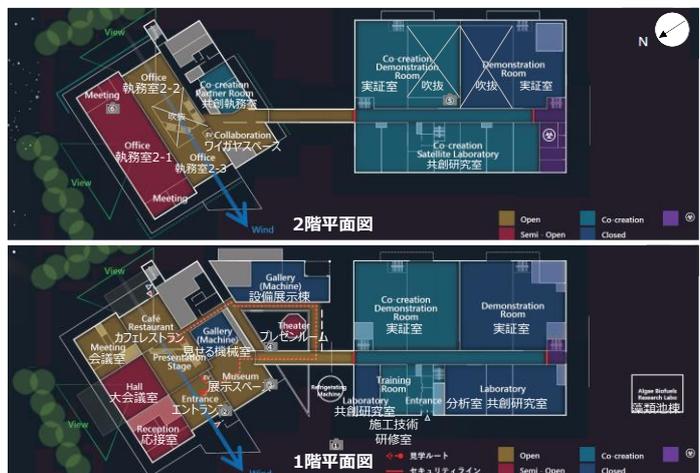


図 4 平面図

3. 建築計画

3.1 建築配置計画

図3に本施設の配置図、図4に平面図を示す。本施設は、展示エリアやカフェレストランと執務スペースを持つオフィス棟（約4,750㎡）と、研究開発のためのラボ棟（約6,050㎡）の主に2棟で構成される。

オフィス棟は、北東からの卓越風を効果的に取り入れるとともに、環境に即したファサードとなるように敷地北東側に南北に正対して配置し、周囲に地域との共生・調和を意図した広場を設置した。ラボ棟は、屋上に設置した太陽光パネルの効率を配慮して敷地南西に配置した。オフィス棟とラボ棟の間には本計画の主エネルギー源である木質バイオマスガス化CHP（以下、バイオマスCHP、CHP：Combined Heat & Power（熱電併給システム）の略）を有する設備展示棟を設置し、各棟を水盤と渡り廊下でつなぐ配置とした。

3.2 風と光を建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、東西方向の間仕切りをなくして一体空間とし、使い方の面からもオープンなエリアとした。中央には上部開口を設けた吹抜けを配置し、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面には、展示スペース・ワイガヤスペースを設け、空調が必要な執務エリアや大会議室は北側に配置した。また、常時人が滞在しない会議室や更衣室、WCなどバックヤードは建屋4隅に配置し、1辺45mの正方形が用途の異なる9つのエリアに分けられる明快なゾーニングとした。

3.3 環境スクリーンとしての外皮計画

有効な自然換気と、直達日射を遮蔽しつつ必要照度を確保するために、全方位に2.5mはねだしたバルコニー（庇）を設けた。図5にシミュレーションによる自然採光・換気計画の概要を示す。CFDシミュレーションと照度解析手法を用いて得られた解析結果より、建物の開口位置及びサイズを決定した。

南面のバルコニーには、画像による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。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。図6に示すように東西面の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、室内光環境等を目的関数として、ルーバーの形状と角度の最適化を行った。

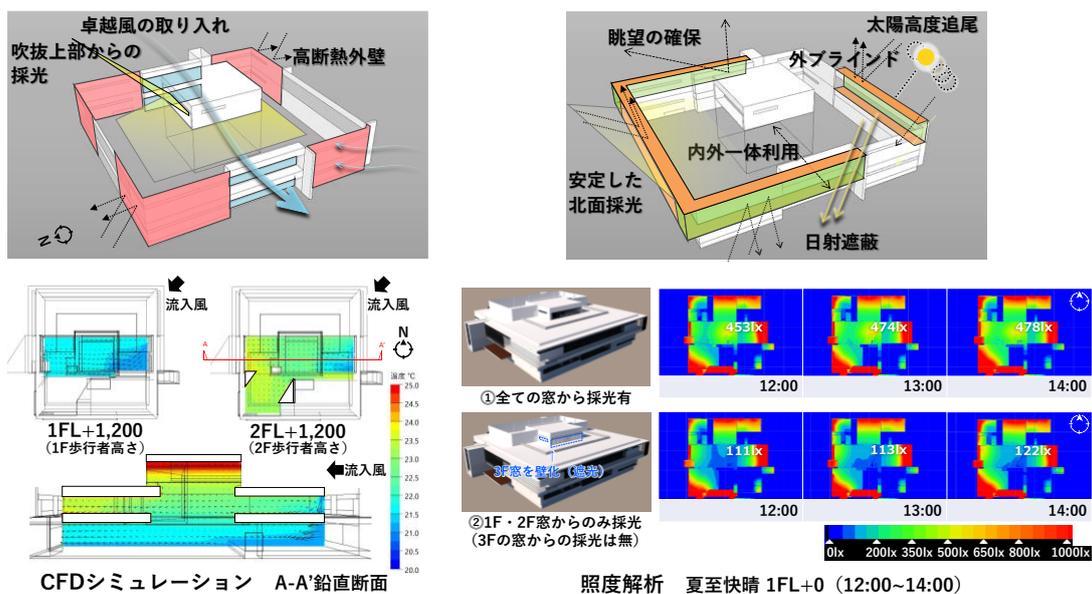
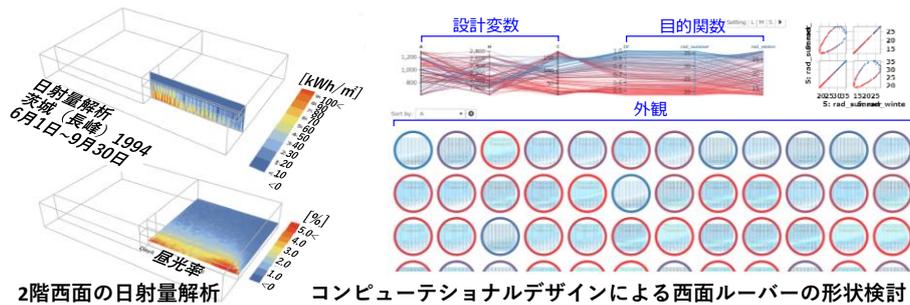
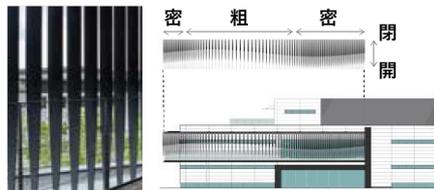


図5 シミュレーションによる自然採光・換気計画

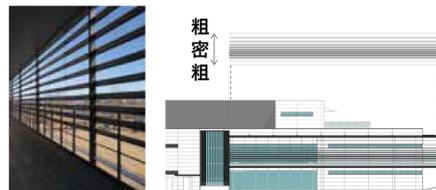


2階西面の日射量解析

コンピュータシミュレーションによる西面ルーバーの形状検討



「空気の揺らぎ」 光のsine curveが浮かび上がる、87本の形状の異なる縦ルーバー
西面縦ルーバー形状



「吹き抜ける風」 対面道路と視線が交錯せず、外観の豊かな緑と空へ視線が抜ける横ルーバー
東面横ルーバー形状

図6 コンピュータシミュレーションによる東西ルーバー形状の決定

3.4 断熱性と日射遮蔽を考慮した外皮性能

表1に窓及び外壁の仕様を示す。オフィス棟の外壁には押出成形セメント板（ECP）を採用し、断熱は不燃ウレタンフォーム吹付 $t=35\text{mm}$ を行うことで熱貫流率 $U=0.61\text{W/m}^2$ とした。屋根面は外断熱 35mm に加え内断熱 35mm を行うことで熱貫流率 $U=0.27\text{W/m}^2$ とし、断熱性の高い建物としている。また、直達日射が入る東西・南面のガラスは $SC=0.29$ と日射遮蔽率の高い Low-E ガラスを採用した。東西面には前述の外ルーバー、南面には外ブラインドを採用し日射遮蔽を図った。

ラボ棟の実験室側はオフィス棟同様 ECP+断熱 35mm とした。また、半屋外空間である実証室の外壁には鋼板断熱パネルを採用し、屋上には断熱材入りのダブル折半屋根を採用し、断熱性に考慮した設計とした。

3.5 バイオフィリックデザイン

オフィス棟は、光・風・緑・水といった自然を居住者が感じることができるよう、人と自然の調和を目指したバイオフィリックデザインを取り入れた。

オフィス棟中央の吹抜け部（写真2参照）は、1階にプレゼンテーションステージ、1階から屋上までをつなぐ大階段、2階吹抜け周囲は回廊のように動線を配し、コミュニケーションや創造性の生まれる空間を目指した。プレゼンテーションステージには、茨城県の形を模倣したベンチを設置し、そのセンターには樹木を配している。

南側居室からは水盤が望められ、北側執務室前には豊かな植栽帯が広がり、仕上素材には石や木材を多く取り入れるとともに、執務空間やカフェレストランには植栽を配することにより、バイオフィリックデザインと環境負荷低減を両立した建築計画とした（写真3参照）。

表1 窓及び外壁の仕様

オフィス棟	外皮仕様	U値
窓	東・西 Low-e ペアガラス：単体SC=0.31、内ブラインド	1.6
	南 Low-e ペアガラス：単体SC=0.31、外ブラインド	1.6
	北 Low-e ペアガラス：単体SC=0.52、内ブラインド	1.6
外壁	ECP ($t=60, \lambda=0.43$) +不燃ウレタンフォーム吹付 ($t=35, \lambda=0.026$)	0.61
主な屋根	押えコンクリート ($t=80, \lambda=1.4$) +押出法ポリスチレンフォーム保温板（3種bA） ($t=50, \lambda=0.028$) +RC ($t=150, \lambda=1.6$) +内断熱材不燃ウレタンフォーム吹付 ($t=35, \lambda=0.026$)	0.29
ラボ棟	外皮仕様	U値
窓	Low-e ペアガラス：単体SC=0.52	1.6
外壁 (低層部)	ECP ($t=60, \lambda=0.43$) +不燃ウレタンフォーム吹付 ($t=35, \lambda=0.026$)	0.61
	外壁 (高層部)	鋼板断熱パネル ($t=91, \lambda=0.049$)
陸屋根 (実験室)	RC ($t=150, \lambda=1.6$) +硬質ウレタンフォーム保温板A種（2種1号） ($t=50, \lambda=0.023$)	0.41
ダブル折板屋根 (実証室)	グラスウール（インシュレーション工法） ($t=100, \lambda=0.05$)	0.46
床	RC ($t=200, \lambda=1.6$) +ポリスチレンフォーム保温版（3種） ($t=25, \lambda=0.028$)	0.81

注) U値：熱貫流率 [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]、SC：日射遮蔽係数 [-]、t：厚さ [mm]
 λ ：材料の熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]



写真2 オフィス棟 吹抜け空間※4



b) オフィス棟1階 カフェレストラン



a) オフィス棟2階 執務室2-1



c) プレゼンルームと水盤

写真3 バイオフィリックデザイン※4

4. 設備概要

本章では、ZEB と創エネルギー及び電気・空調・衛生設備概要⁵⁾について述べる。

4.1 ZEB と創エネルギー設備

4.1.1 ZEB 達成のための目標値の設定

図7にZEBを目指した環境への取組概念図を、表2に一次エネルギー消費量の目標値を示す。ZEB達成のため、施設全体では既存の技術研究所の過去4年間の平均値以下でかつZEB Readyを達成するために16,340,000MJ/年を目標値とした。オフィス棟は既存の技

表2 一次エネルギー消費量の目標値

		一次エネルギー消費量 [MJ/年]	延床面積 [㎡]	一次エネルギー消費量原単位 [MJ/(㎡・年)]
敷地全体	既存研究所	同値 16,340,000	5,187	3,150
	本計画(目標値)	16,340,000	11,610	1,407 ↓55%減
オフィス棟	既存研究所	2,451,000	1,764	1,389
	本計画(目標値)	1,979,974	4,750	417 ↓74%減

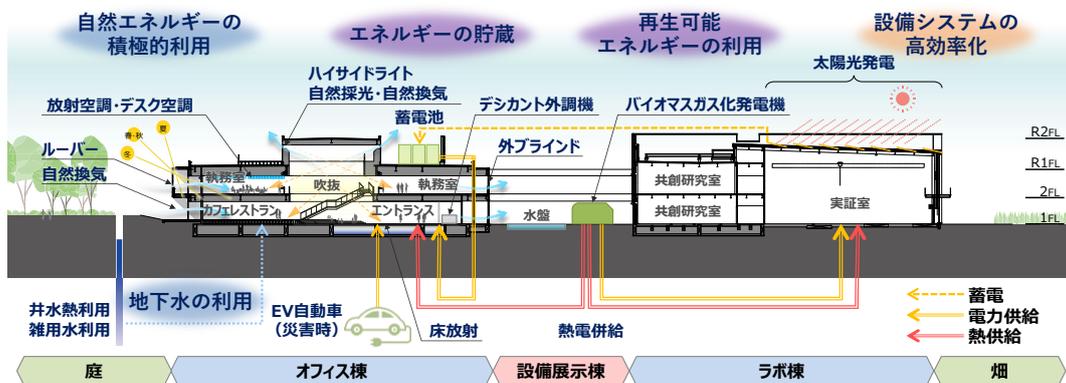


図7 ZEBを目指した環境への取組概念図

術研究所のオフィス部分の原単位の 70% 減である 417MJ/(m²・年)を目標値とした。

なお、設計段階でのコミッションングにおける実施設計段階での発注者要件書⁶⁾では、オフィス棟の目標値は 440MJ/(m²・年)、敷地全体では 1,480MJ/(m²・年)としていたが、その後の延床面積の増加や仕様の変更により、原単位の目標値はさらに小さな値とした。

4.1.2 BEST を用いたエネルギー消費量試算

オフィス棟の『ZEB』達成を確認するために、設計段階で本施設の設計内容に基づき建築物総合エネルギーシミュレーションツール BEST を用いて、一次エネルギー消費量の算出を行った。図 8 にオフィス棟の一次エネルギー消費量試算結果を示す。

比較として①空冷パッケージ空調、②空冷チラー+空調機、③空冷チラー+高温冷水空調の場合を試算した。①の一次エネルギー消費量原単位は 607.8MJ/(m²・年)となり、省エネルギー性能の高い建物であることを確認した。また、熱搬送を空気から水に変更することにより②③の順に数値が小さくなった。さらに本施設計画の④は、地下水熱やバイオマス CHP の排熱を利用することにより原単位は 343.6MJ/(m²・年)まで削減され、太陽光発電量の計画値 429 MJ/(m²・年)を下回ることにより、オフィス棟は『ZEB』が達成可能であることを確認した。

4.1.3 創エネルギー設備

表 3 に創エネルギー関連設備の概要を示す。天候により変動する太陽光発電に対し蓄電池を設置することで安定化を図るとともに、連続運転可能であるバイオマス CHP (詳細については別報⁷⁾参照)を導入することで電力自給率の向上を目指した。バイオマス CHP は常時電力需要があるラボ棟に給電し、太陽光発電は日中に電力需要が増加するオフィス棟に給電する計画とした。蓄電池は充放電効率に優れたリチウムイオン蓄電池を採用した。

なお現在、当施設の立地する地域は電力会社の配電網容量が逼迫しており電力逆潮が不可である。電力逆潮受入れについては国で検討中のノンファーム接続を試験採用する方向で電力会社と協議中であるとともに、将来のオフグリッド化も見据えて蓄電池の増設工事を進めているところである。

4.2 電気設備^{8),9)}

表 4 に電気設備概要を、表 5 に昇降機設備概要を示す。昇降機設備としては、オフィス棟とラボ棟に 1 基ずつエレベータを設置している。

4.2.1 受変電設備

6.6kV 一回線受電で計画し、ラボ棟、オフィス棟それ

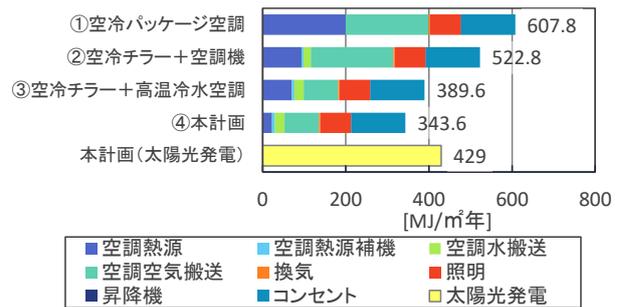


図 8 オフィス棟の一次エネルギー消費量試算結果

表 3 創エネルギー関連設備概要

項目	概要	
発電設備	木質バイオマス	発電量 40kW/台、2台
	ガス化発電設備	排熱量 100kW/台
	太陽光発電設備	発電量 約200kW
蓄電池設備	リチウムイオン電池	入出力 216kW 蓄電容量: 430kWh

表 4 電気設備概要

項目	概要	
受変電設備	受電方式	6.6kV 1回線
	受変電形式	屋外設置、一般キュービクル形
	変圧器容量 (ラボ棟)	1φ3W 300kVA 3φ3W 1,300kVA
	変圧器容量 (オフィス棟)	1φ3W 200kVA、3φ3W 600kVA 3φ4W 700kVA、スコット 50kVA
	変圧器形式	油入
幹線・動力設備	動力負荷	3φ3W 210V
	電灯コンセント負荷	1φ3W 210/105V
	配線方式	ケーブルラック方式
照明設備	照度	執務室 300lx、研究室 500lx
	照明制御	昼光制御、人感センサー点滅制御、タイムスケジュール制御、初期照度補正
コンセント設備	OAコンセント	50VA/m ²
	その他	執務室コンセントタイムスケジュール制御
中央監視設備	監視点数	空調設備工事中中央監視にて統合監視
	監視項目	受変電・バイオマス発電機・太陽光発電・蓄電池・動力電灯盤他
	その他	BACnet・Modbus他
情報通信設備	拡声設備	アンプ容量 720W、非常業務兼用
自火報・防排烟制御設備	主受信機	GR型 1,020回線
	感知器	煙、差動式、定温式
避雷・接地設備	避雷方式	JIS A4201 2003 クラスⅣ (自主設置)
	接地方式・性能	単独接地方式
その他	インターホン設備	来訪者用、夜間用
	ITV設備	デジタルネットワークカメラ
	セキュリティ設備	非接触式ICカード

表 5 昇降機設備概要

項目	概要	
昇降機設備 (エレベータ)	常用 (オフィス棟)	15人乗り 45m/min 1台
	人荷共用 (ラボ棟)	30人乗り 45m/min 1台

ぞれの屋上に屋外型一般キュービクルを設置した。ラボ棟キュービクルで商用電力を受電し、高压でオフィス棟キュービクルへと送電する。キュービクルは中通路型として保守メンテナンス性に配慮するとともに、ラボ棟の屋上に設備架台を全面的に敷設し、将来の機器増設にも柔軟に対応できる計画とした。

4.2.2 幹線設備

幹線はケーブルラック方式とし、商用電力のみの AC 系統、太陽光発電・蓄電池の AC-GC 保安系統、及びバイオマス発電の AC-GC 保安系統の 3 系統としている。

4.2.3 照明設備

(1) 照明制御

全館 LED とし、在・不在制御、明るさ検知制御、スケジュール制御、初期照度補正等の照明制御手法を施設全体で採用した。運用段階でも自由に点灯区分等を変更できるように DALI 照明制御システムを導入し、働き方の変化に追従可能な計画としている。また、中央監視設備と連動させ、自然換気が有効な時間帯には窓の開閉を促すサインを照明で表現するようにしている。

(2) 放射パネルと組合わせた間接照明システム

主執務室には天井面設置の放射パネルと組合わせた間接照明システムを計画した(図 9 参照)。放射パネルはツヤが少なく反射率の高いものとし、かつ放射パネルの表面を上向き照明にて照射することで、グレアを抑制しつつ明るさ感を向上させている。なお、本執務室はタスクアンドアンビエント照明を採用しており、アンビエント照明は机上面照度 300lx に調光して運用している。

4.2.4 コンセント設備

待機電力削減のため、オフィス棟執務室の 1/2 程度のコンセントは夜間スケジュールにてオフとなる計画としている。主執務室の OA フロアコンセントは、OA 機器、デスク空調、タスクライトに分け、用途毎に電力計量を行い、OA タップの色や口数も使い分けしている。

4.2.5 エネルギー計量計画

運用段階での ZEB 実証分析のため、オフィス棟は負荷種別ごと(照明、コンセント、空調、給湯等)に計測ユニットを設置し、電力量の計量を行っている。単相負荷は盤ごと、動力負荷は系統ごとの計測とした。計量された電力量は、空調設備の中央監視設備で一括管理される。

4.3 空調設備

表 6 に空調設備概要を示す。以下では主として熱源設備を中心として説明する。

4.3.1 熱源設備

本計画における熱源システムは ZEB の実現とエネルギーの自立化のため、地下水熱とバイオマス発電機の排熱を使用した中央熱源方式としている。図 10 に熱源フロー図を示す。

(1) 冷熱源

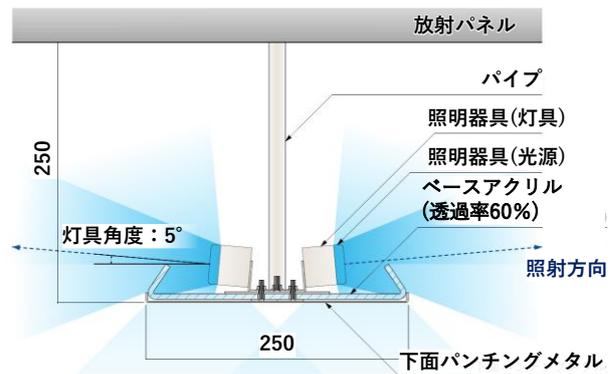


図 9 間接照明システム

表 6 空調設備概要

項目	概要	
熱源設備	熱源方式	地下水熱利用+排熱利用+空冷ヒートポンプチラー方式
	空冷ヒートポンプチラー	118kW 1台
	その他	地下水 500L/min 発電機排熱 100kW 2台
二次側空調設備	空調方式	会議室・応接室系統 水熱源個別空調方式 カフェレストラン・エントランス・展示系統 デシカント外調機方式 執務室系統 DCFCU・放射空調方式
	配管方式	冷温水、高温冷水×2、排熱温水
	主要空調機器	デシカント外調機 3台 外調機 2台、DCFCU 105台
換気設備	換気方式	各居室系統 1種換気 WC系統 3種換気
排煙設備	排煙方式	自然排煙方式
	監視点数	5,500点
	監視項目	状態・計測・計量・室内環境他
中央監視設備	その他	クラウド監視・BACnet・Modbus・JSON・API・WiFi・特小無線他
	制御方式	PLC・DDC方式
自動制御設備	その他	無線・人位置検知他によるシステム構築
	省エネルギー	地下水熱利用、全熱交換機、排熱利用、DCファンを用いた空調
その他	環境配慮対応	昼光利用、自然通風
	ユーティリティ設備	空冷ヒートポンプチラー 85kW×3台(冷水・温水用)
		空冷ブラインチラー 95.2kW

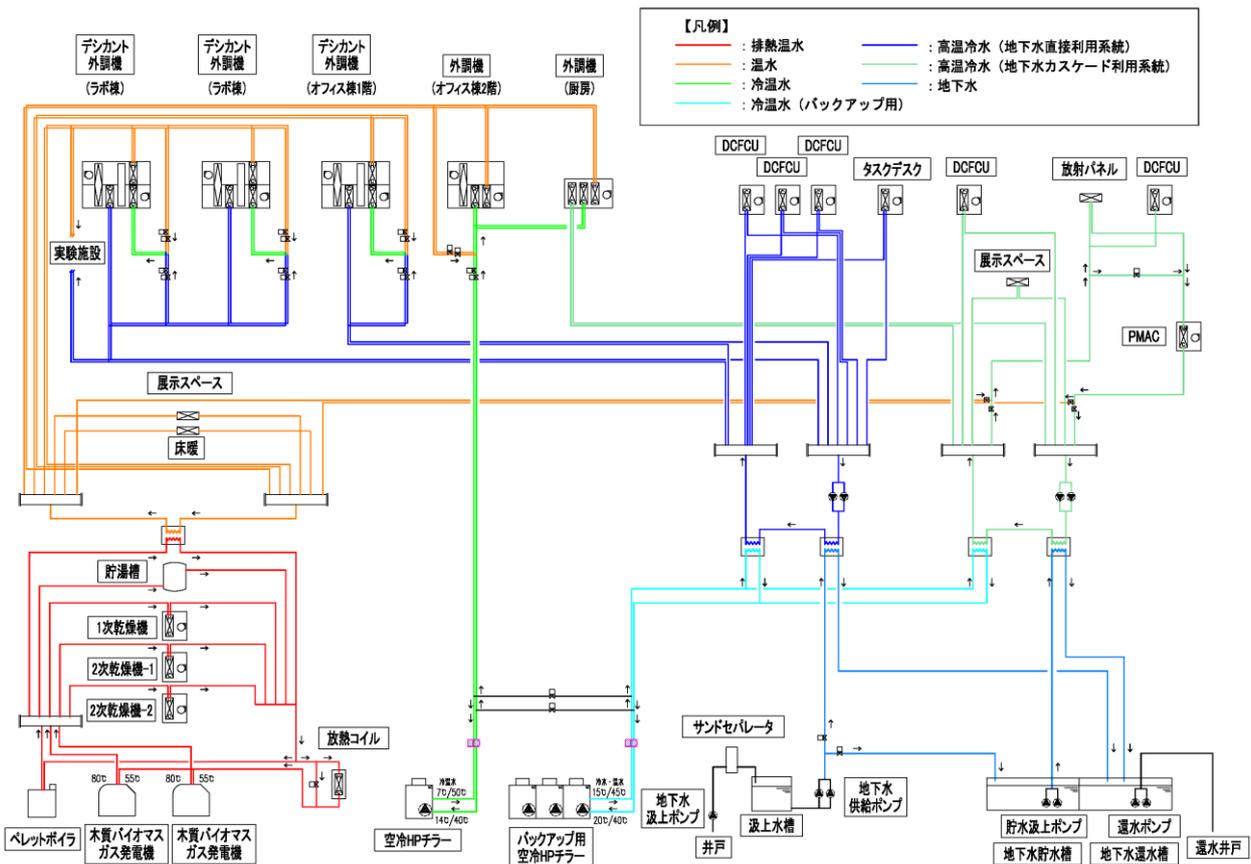


図 10 熱源フロー図

地下水熱利用 2 系統および空冷ヒートポンプチャラーの冷温水系統の 3 系統とし、さらにバックアップ用の空冷ヒートポンプチャラーを設けている。

図 11 に地下水熱利用の利用概念図を示す。地下水の汲上げ量に制限があるため、汲上げ時間を延ばすことを目的に、夜間に地下水を汲上げ貯水槽に貯留するカスケード利用系統と、日中の利用時に汲上げる直接利用系統の 2 系統とした。カスケード利用系統は、最初に 0 次利用として貯水槽の上部床を利用してオフィス棟 1 階エントランスの放射冷房を行い、その後 1 次利用で放射空調や DCFCU (直流ファンコイルユニットの略称) の冷熱源に利用、最後に 2 次利用として水熱源ヒートポンプユニット (PMAC) の熱源水として利用する。直接利用系統は、デシカント外調機、デスク空調機等に使用する。空冷ヒートポンプチャラーは屋上に設置し、7°C 冷水 (設計往還温度差 7°C)、50°C 温水 (温度差 10°C) をオフィス棟 2 階外調機に送水する。

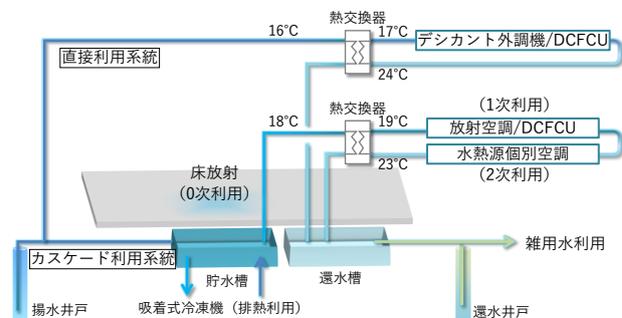


図 11 地下水熱利用の概念図

(2) 温熱源

バイオマス CHP の排熱が主で、70~80°C の排熱温水を熱交換後 60°C で温水供給している。温水は、暖房、給湯の他に、冷房時のデシカント外調機のロータの再生、オフィス棟 2 階外調機の再熱、燃料の木質チップの乾燥工程に利用する。

4.3.2 二次側空調設備

二次側空調設備は、外調機で外気を含めたベース負荷を処理し、不足分を放射空調や個別型空調で処理する方式を基本とし、各室の働き方に合わせてその組合せを決定している。詳細に関しては、別報¹⁰⁾で紹介する。

4.3.3 中央監視及び自動制御設備

現地に設置された中央監視を遠隔地のモバイル端末でも監視、操作できるようにクラウド型の中央監視システムを構築した。合わせて、温湿度、CO₂濃度、照度の他に、放射温度や制気口風量、個別型空調機の発停状態等を無線でデータ収集するシステムを構築した。詳細に関しては、別報¹⁾で紹介する。

4.4 衛生設備

表7に衛生設備概要を示す。以下に給水設備、給湯設備、排水設備の概要について説明する。

4.4.1 給水設備

上水は市水を引き込み、外構に設置した受水槽より飲料用、厨房、空調加湿用に供給している。井水は、汲上げた水を徐鉄・除マンガン処理し、空調で熱利用を行った後、還水槽に貯留する。貯留した井水の一部は井水受水槽へ送水し、WC手洗いや実験用水に供給している。建物内で使用しない井水は灌水や水盤への補給水に供給し、残りは還水井戸より地中に戻している。

4.4.2 給湯設備

オフィス棟の厨房やWCの給湯はバイオマスCHPからの排熱を熱源とした中央給湯方式とし、ラボ棟は電気温水器を設置し局所給湯方式とした。

4.4.3 排水設備

本地域の下水道は分流方式のため、汚水は汚水下水道へ放流し、雨水は外構に設置した雨水浸透・貯留槽を介して雨水下水道へ放流している。厨房排水は水処理を行い、オフィス棟トイレの洗浄水として使用している。また、ラボ棟の実験排水はPH処理を行った後、下水道に放流している。

5. 建物環境性能の評価

本施設はエネルギー自立型サステナブル研究施設として、高い環境性能を確保することを目的として設計している。建物環境性能を評価する指標は、国内や欧米を中心として開発されているが、本施設では省エネルギー性能をBELSで、総合的な建物環境性能をLEED[®]※5で、快適性・健康性をCASBEE-ウェルネスオフィス（以下、CASBEE-WOと略す）で評価するとともに、第三者による認証を取得した。

5.1 省エネルギー性能評価 BELS

建物のエネルギー性能をBELSにて評価した。BELSとは、(一社)住宅性能評価・表示協会が運用を行う省エネルギー性能に特化した評価・表示制度で、省エネ性能に優れた建築物が、社会で適切に評価される環境を整備することを目的に、建物の一次エネルギー消費量の評価指標BEI^{※6}をもとに省エネルギー性能を客観的に評価し、5段階の星マークで示される評価制度である。

本施設では、BEIは標準入力法(Webプログラム)を用いて算出した。計算の結果BEI=0.09となり、BELS評価の星★5つを獲

表7 衛生設備概要

項目	概要	
給水設備	水源	上水、井水
	系統	上水系統、井水処理系統、雑用水系統
	給水方式	受水槽+加圧給水方式
	受水槽概要	上水受水槽 5m ³ 、井水受水槽 5m ³ 、雑用水受水槽 5m ³
給湯設備	給湯方式	オフィス棟 中央給湯方式
		ラボ棟 局所給湯方式
排水設備	排水方式	建屋内 汚水雑排水合流式
		建屋外 汚水雑排水分流式
		自然流下、実験排水のみポンプアップ
衛生器具設備	主な特記仕様	節水器具の採用
消火設備	設置設備	オフィス棟 屋内消火栓設備
		ラボ棟 屋外消火栓・屋内消火栓設備
その他	厨房排水処理	膜分離活性汚泥法
	その他	水景ろ過設備、PH調整水処理設備、特殊ガス設備

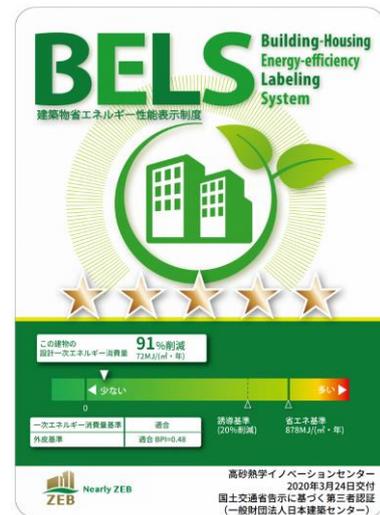


図12 BELS表示認証

表8 項目別 BEI

項目	BEI/AC	BEI/V	BEI/L	BEI/HW	BEI/EV
値	0.42	0.27	0.20	1.93	1.00

注) AC: 空調、V: 換気、L: 照明、HW: 給湯、EV: 昇降機

得、同時に Nearly-ZEB の認証を獲得している。図 12 に 2020 年 3 月に公布された BELS の表示認証のプレート板を示す。

表 8 に設備ごとの項目別 BEI を示す。最も基準一次エネルギー消費量に比べて削減した項目は照明であり、BEI/L=0.20 (基準値より 80%削減) であった。次に換気設備 BEI/V=0.27 (基準値より 73%削減)、空調設備 BEI/AC=0.42 (基準値より 58%削減) であった。太陽光発電の創エネルギーを含めて BEI=0.09 となり、創エネルギーを除くと BEI=0.33 となった。なお、BPI^{*7}=0.48 であった。

5.2 建物の総合環境性能 LEED®

LEED®は、米国グリーンビルディング協会 (USGBC:U.S. Green Building Council®) が開発・運用を行っている建物や都市についての環境性能評価システムである。今回、認証取得した LEED v4 BD+C (NC) は、建築設計と建築 (BD+C) の新築 (NC) にあたる認証で、必須項目を全て満たした上で、110 点満点の得点で Certified (40~49 点)、Silver (50~59 点)、Gold (60~79 点)、Platinum (80 点以上) の 4 段階で建物が評価される。本施設の認証結果は得点 72 点で 2020 年 7 月に Gold の認証を得た。図 13 に LEED®認証ロゴを示す。



図 13 LEED®認証ロゴ

図 14 に LEED®の各評価項目での得点割合を示す。統合的プロセス、水の効率的な利用、エネルギーと大気、革新性、地域別重み付の項目においては 80%以上の得点を獲得した。エネルギーと大気の項目では、必須項目「最低限求められるエネルギー性能」の必須条件を満たすために、オフィス棟執務室の 100V コンセントの 50%をスケジュール制御とした。また、本施設が ZEB を目指した建物であることから、「エネルギー性能の最適化 (18 点)」、「再生可能エネルギーの創出 (3 点)」の項目で満点を獲得することができた。革新性では、本施設がエネルギー自立を目指した計画であることやバイオフィリックデザインに配慮した設計であること、外構の植栽に果実を採用することで加点できた。

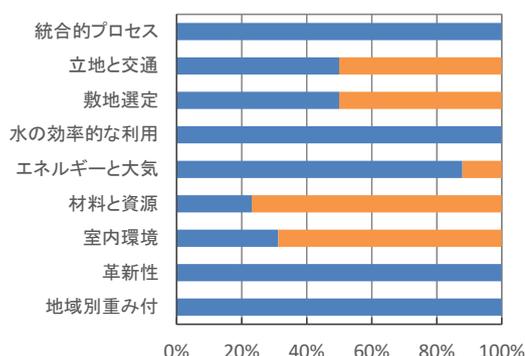


図 14 LEED®の各項目での得点割合

一方、材料と資源、室内環境の 2 項目においては 40%未満の得点となった。材料と資源の項目では、歴史的建造物の再利用やリノベーションの場合に高得点となる「建物のライフサイクル環境負荷低減」や建材の原材料の産地や成分の情報が必要な「建材の情報開示と最適化」の項目で、室内環境に関しては、VOC の含有量やその発散量の情報が必要となる「低発散材料」や「昼光利用」の項目で得点できなかったため低い評価となった。

5.3 快適性・健康性 CASBEE-ウェルネスオフィス (CASBEE-WO)

CASBEE-WO は、建物利用者の健康性、快適性の維持・増進を支援する建物の仕様、性能、取組みを評価するツールである。

CASBEE-WO の総点数は 100 点であり、得点によって C ランク (40 点未満)、B-ランク (40~49 点)、B+ランク (50~64 点)、A ランク (65 点~74 点)、S ランク (75 点以上) の 5 段階で評価される。今回の認証申請時は先行評価認証期間となっており、(一財)建築環境・省エネルギー機構による評価認証に申請し、2020 年 10 月に総合評価 86.6 で S ランクの認証を得た。図 15 に CASBEE-WO の認証ロゴを示す。



図 15 CASBEE-WO 認証ロゴ

図 16 に CASBEE-WO の評価結果を示す。CASBEE-WO では、健康性・快適性、利便性、安全・安心、運営管理、プログラムの 5 つの大項目で評価するが、さらにその中には、図 16 に示すような中項目が含まれる。例えば健康性・

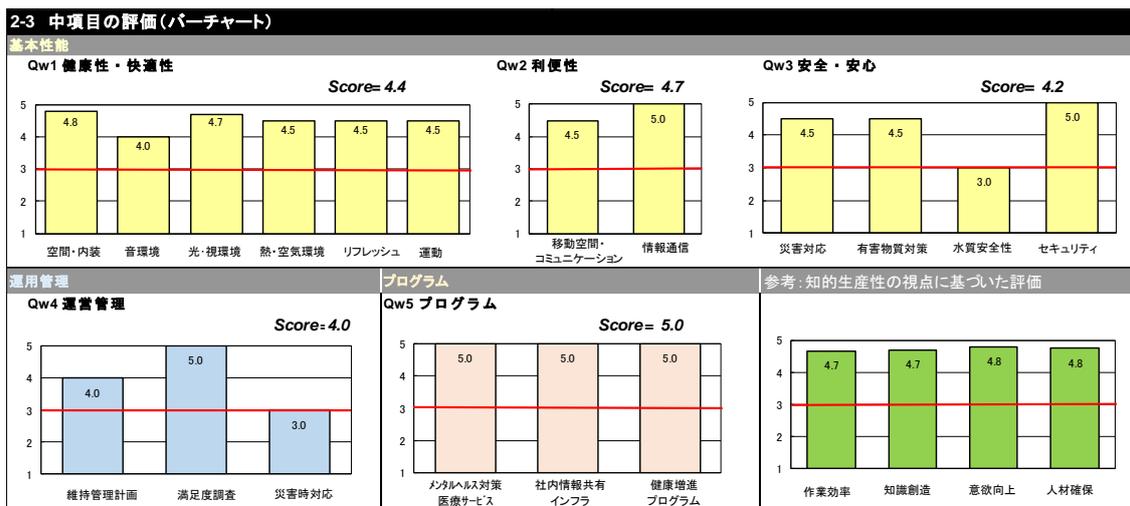


図 16 CASBEE-WO の評価結果

快適性の中には空間・内装という中項目があり、その項目に対してはさらにレイアウトの柔軟性、荷重のゆとり、設備機器の区画別運用の変異性等 10 項目の評価項目があり、採点基準に基づき評価項目ごとに 5 点満点で採点を行う。本施設では、中項目の項目に関しては概ね 4 点以上と高評価となっているが、水質安全性や災害時対応の項目が 3 点であり、まだ改善の余地があると考えられる。さらなる高得点を目指すとする、水質安全性に関しては、各階にミネラルウォーターサーバを設置、災害時対応に関しては、BCP 対策や消防訓練の充実、AED の適正な配置と教育活動といった対策が必要となってくる。

6. おわりに

2020 年 3 月から運用を開始した茨城県つくばみらい市に建つ高砂熱学イノベーションセンターに関して、本建設プロジェクトの経緯および設計コンセプト、建築概要について説明するとともに、本施設の建築計画での留意点や創エネルギー・電気・空調・衛生設備の概要について紹介した。また、環境性能評価として省エネルギー性能を BELS で、総合的な建物環境性能を LEED®、快適性・健康性を CASBEE-WO で評価し認証を受けた結果について述べた。運用開始から早 1 年が経とうとしているが、2020 年初旬からの新型コロナウィルスの影響で、当初の目標であった地域貢献等、まだ実施できていない項目もある。しかしながら、夏期、秋期、冬期の環境実測やアンケート調査の解析や BEMS に蓄積されたデータの解析等を行い、いくつかの知見を得られるようになってきている。それらの知見については、また別の機会でご報告することとする。

謝辞

本施設の建設に当たっては、設計関係者、施工関係者を含め多数の方々にご協力頂きました。また、設計段階では NPO 法人建築設備コミッション協会様に性能検証管理チームとしてご参加頂き、ご指導を頂きました。関係者の方々には誌面を借りてお礼申し上げます。

注釈

※4: 写真 1~3 は、(株)竹中工務店提供、小川重雄氏撮影。

※5: LEED®認証ロゴは、米国グリーンビルディング協会所有の登録商標であり、許可を得て使用。

※6: BEI⁽²⁾: Building Energy Index の略。BEI とは、エネルギー消費性能計算プログラムに基づく、基準建築物と比較した時の設計建築物の一次エネルギー消費量の比率のことで、再生可能エネルギーを除き $BEI \leq 0.50$ の場合に ZEB Ready、さらに再生可能エネルギー導入によって $0.00 < BEI \leq 0.25$ となる場合には Nearly ZEB、 $BEI \leq 0.00$ となる場合には『ZEB』と判定される。BEI の定義は以下の式で表される。

BEI=設計一次エネルギー消費量/基準一次エネルギー消費量

※7 : BPI⁽²⁾ : Building Palstar Index の略。BPI とは、省エネ法改正に伴い設けられた PAL* (外皮基準の指標) により算出される年間熱負荷の基準のこと。BPI の定義は以下の式で表される。

$BPI = \text{設計 PAL}^* / \text{基準 PAL}^*$

※PAL* (パルスター) は、建物の屋内周囲空間の床面積当たりの年間熱負荷のことを表す。

文 献

- 1) 武藤ほか: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証(第 1 報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, p185-188(2019)
- 2) 羽鳥ほか: 同上(第 2 報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, p149-152(2020)
- 3) 武藤ほか: 同上(第 9 報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, p177-180(2020)
- 4) 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)
- 5) 高砂熱学工業作成、性能検証管理チーム協力: 「(仮称) TNK イノベーションセンター 新築工事発注者要件書(企画・設計フェーズ(実施 設計))」, p16(2018.6)
- 6) 武藤ほか: 高砂熱学イノベーションセンター, 建築設備士 第 52 巻・第 8 月号, p17-25, 建築設備技術者協会, (2020.8)
- 7) 元田ほか: エネルギー自立型サステナブル研究施設, 2020 年度イノベーションセンター報, p17-24(2021.3)
- 8) 高ほか: エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画, 2019 年電気設備学会全国大会, p7-8(2019)
- 9) 高ほか: 金属製放射空調パネルを利用した間接照明システム, 2020 年電気設備学会全国大会, p204-207(2020)
- 10) 木村ほか: エネルギー自立型サステナブル研究施設, 2020 年度イノベーションセンター報, p25-36(2021.3)
- 11) 柴田ほか: エネルギー自立型サステナブル研究施設, 2020 年度イノベーションセンター報, p37-47(2021.3)
- 12) 環境省ホームページ: 「ZEB PORTAL(ゼブ・ポータル) 用語集」, (2021),
<http://www.env.go.jp/earth/zeb/terms/index.html>

ABSTRACT

The construction project of Takasago Innovation Center has started in November 2015 with the aim of becoming an energy self-sufficient research facility that achieves both reduced environmental impact and intellectual productivity. Construction of this facility began in February 2019, was completed in January 2020, and started operation in March. In this report, we will first explain the background, design concept, and architectural outline of this project. Next, we will introduce the points to keep in mind in the construction plan of this facility and the outline of energy creation, electricity, air-conditioning, and sanitary facilities. Finally, the results of the environmental performance evaluation of this facility will be described.

エネルギー自立型サステイナブル研究施設 ー木質バイオマスガス化 CHP を利用した エネルギー自立型自家消費システムー

元田 治・平原美博・清水昭浩
木村健太郎・羽鳥大輔^{*1}・武藤友香^{*1}

The Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center - Energy Self-Sufficient System Using Combined Heat & Power System (CHP) of Woody Biomass Gasification Type -

Osamu Motoda・Yoshihiro Hirahara・Akihiro Shimizu
Kentaro Kimura・Daiduke Hatori・Yuka Mutoh

高砂熱学イノベーションセンターでは「エネルギー自立型」「サステイナブル」を実現するために太陽光パネル（200kW）や蓄電池、地下水熱利用などのクリーンエネルギーが採用されており、その中でも超小型木質バイオマスガス化 CHP（Combined Heat & Power）は重要な役割を果たしている。通常の CHP では、電気とともに生産される熱を処理できない場合、エンジンが冷却されないため発電機を停止する必要があるため、熱負荷の少ない夜間の運転は難しい。しかしながら、燃料である木質チップの含水率を低くする必要のある木質バイオマスガス化 CHP は、生産される熱を自身の燃料の乾燥に用いることで安定した熱負荷を得ることができ、24 時間の安定稼働が可能となる。本稿では、当イノベーションセンターに導入したこの木質バイオマスガス化 CHP を主力電源としたエネルギー自立型の自家消費システムを紹介する。

1. はじめに

高砂熱学イノベーションセンター（以降、本施設）では、超小型木質バイオマスガス化 CHP（以降、バイオマス CHP）を主力電源としたエネルギー自立型の自家消費システムを構築している^{1) 2)}。このバイオマス CHP の燃料は木質チップであるため太陽光発電とともに創エネルギーは全て再生可能エネルギー由来となっている。さらには、温熱源として蒸気供給を行うバイオマスペレットボイラ（以降、バイオマス蒸気ボイラ）も導入している。本稿では、本施設に導入されているバイオマス^{*2}をエネルギー源としたバイオマス CHP を用いた 24 時間安定稼働可能なエネルギー自立型の自家消費システムおよびバイオマス蒸気ボイラについて紹介する。

2. バイオマス CHP の導入と選定の経緯

※2020 年度空調和衛生工学会講演論文を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計

*2 バイオマス：再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの。廃棄物系バイオマス、未利用バイオマス（林地残材等）、資源作物がある。農林水産省 HP より

2.1 導入経緯

本施設は実験装置を 24 時間稼働させる可能性がある研究施設であることから、24 時間安定稼働ができる主力電源装置が必要であった。加えて、ZEB 化を実現するため環境負荷の少ない 100%再生可能エネルギーを作ることができ、太陽光発電および木質バイオマス燃料にしたバイオマス CHP (表 1) を採用することとした。再生可能エネルギーである木質バイオマスを利用した発電設備は、国内では FIT (固定価格買取制度) を活用した売電目的の発電所での採用実績は数多くあるが、施設での自家消費を目的とした採用事例は希少であり、今回採用したメーカーにおいては国内では初めての導入である。

表 1 ZEB における自立型電源の比較

	太陽光発電	バイオマスCHP	コージェネレーション (ガス・油利用)
環境負荷	○	○	△ (化石燃料)
導入の容易性	○ (適用可能な場所が多い)	△ (燃料の調達条件により立地条件に制約がある)	○ (適用可能な場所が多い)
メンテナンス性	○	△ (定期的な保守が必要)	
周辺環境への配慮	○	△ (騒音、排気ガス等に対する配慮が要)	
設置スペース	△	○	
電源としての安定性	△ (天候により出力が不安定、連続稼働は不可)	○ (外気条件等による運転の制限がない、24時間連続運転が可能)	
イニシャルコスト	○		△
ランニングコスト	○	△ (燃料・運搬費、メンテナンス費)	



図 1 木質バイオマス発電の比較³⁾

2.2 バイオマス発電方式

木質バイオマス発電では、図 1 に示すように発電出力が大きい場合は燃料の燃焼より発生する蒸気を利用する蒸気タービン方式や ORC (オーガニックランキンサイクルシステム) 方式が主流であり、蒸気タービン方式は発電所向け、ORC 方式は熱需要の高い欧州で地域熱供給に利用されることが多い。一方、燃料を加熱して生成した可燃性ガスを利用するガス化発電 (ガスエンジン方式) は、蒸気タービン方式等比べて小規模でも発電効率が高いため、電力需要の小さい施設に利用されることが多い。そのため、本施設では、建物規模や発電効率等を考慮してガス化発電方式のバイオマス CHP を採用した。以降では、本施設におけるバイオマス関連のシステムの概要、設備機器の構成やフロー、導入に当たっての課題と対策について述べる。

3. バイオマス CHP を利用したシステムの概要

3.1 バイオマス CHP 本体の概要

本施設では、実験装置を含めて夜間、休日でも 70kW 程度の電力負荷が想定されるため、燃料調達の容易性、機器の信頼性、安定性等を考慮して、表 2 に示すように欧州を中心として採用実績の多い木質チップを燃料としたバイオマス CHP 40kW×2 台を採用した。バイオマス CHP 本体の機器フロー、外観およびエネルギーフローを図 2~4 に示す。ガス化炉に投入された木質チップは、高温で熱分解、酸化処理され可燃性ガスを生成する。高温の可燃性ガスはクーラで冷却、ガスフィルタで不純物を除去された後、ガスエンジンに投入され発電に使用される。この時、クーラやエンジンの冷却に使用して加熱された冷却水は、熱交換器を介して温水として供給される。投入されたエネルギーのうち、電気として使われるものは 22%、熱としては最大 56% (図 4) であるが、総合効率を設計仕様値 78% まで上げるためには、熱の利用先の確保が課題である。本施設では熱の 24 時間利用を可能とし総合効率 78% を目指したシ

システム構築を計画した。

3.2 バイオマス CHP 導入における課題と対策

バイオマス CHP の燃料として使用する木質チップに関しては、機器本体の安定稼働のために表 2 に示すようにサイズや含水率等、高い燃料品質が要求されている。バイオマス CHP 導入に当たっては、機器本体の要求仕様を含めて表 3 に示すような課題が挙げられた。ここでは、バイオマス CHP 導入に当たってのこれらの課題の概要とそれに対する対策について述べる。

表 2 採用したバイオマス CHP の機器仕様

型式	台数	仕様	備考
バイオマス ガス化 発電機	2	供給電力：40kW 熱供給能力：100kW 温水温度 85℃ 温水流量 4,500L/h 燃料条件：種類 スギ、ひのき、 広葉樹等 形状 切削チップ サイズ 長さ 63mm以下 厚み 15mm以下 含水率 15%wb [※] 以下 かさ密度 0.1~0.2t/m ³ 燃料消費量：37kg/h (含水率 15%wb基準)	最大稼働時間： 7,800h/年 発電効率：22% 総合効率：78%

$$\text{※\%wb} : \text{湿量基準含水率 (ウエットベース)} = \frac{\text{水分重量}}{\text{木材乾燥重量} + \text{水分重量}} \times 100$$



図 2 バイオマス CHP 外観

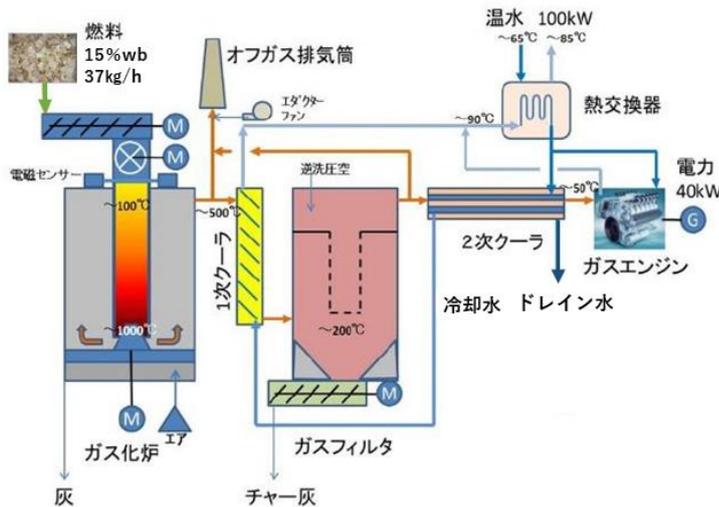


図 3 採用したバイオマス CHP の機器フロー⁴⁾

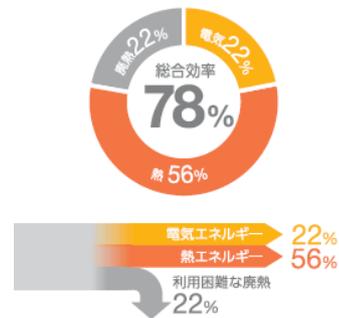


図 4 バイオマス CHP のエネルギーフロー⁴⁾

表 3 バイオマス CHP 導入における課題と本施設での対策

課題	対策
燃料の安定供給	県内でチップ製造を行う製材会社を選定
燃料の形状、サイズに関する要求品質	ふるい機を設置し適合しない微粉等を除去
熱需要の確保	発生する排熱は、昼間は空調や給湯に使用、夜間は木質チップの乾燥工程で利用することにより安定稼働を実現
燃料の含水率に関する要求品質	乾燥ラインを2工程とし低含水率チップを製造
メンテナンス性の確保	定期的な保守サイクルを確保しつつ安定した連続稼働を行うため2台並列

(1) 燃料の安定供給

燃料の安定供給及び、運搬コストの低減、地産地消による地域貢献の観点から、調達先として本施設が立地する茨城県内でチップ製造を行う製材会社を選定した。燃料の貯蔵は、調達先からの供給が止まる土日を含んでも影響のない量を確保するため、ウェットサイロで約4日分の貯蔵が可能な容量とした。

(2) 燃料の形状、サイズに関する要求品質

形状の安定しない燃料はコンベアやスクレーパー等の供給・搬送システムのトラブルを招く恐れがある。今回採用したバイオマス CHP では、燃料のサイズに関して、長さ 63mm 以下の切削チップで、範囲は 16mm～50mm が 80%超、樹皮は混入なしという要求品質となっている。通常の供給品では規格外のチップも含まれるため、当システムでは後述の二次乾燥機の前にふるい機を設置し、適合しない微粉やチップ等を除去することとした。

表 4 乾燥システムの仕様

型式	台数	仕様	機能
バッチ式 一次乾燥機	1	乾燥能力：200kg/h 含水率：50%wb → 25%wb	二次乾燥機の排熱使用量により変動する余剰排熱を利用し乾燥を行う
連続式 二次乾燥機	2	乾燥能力：37kg/h 含水率：30%wb → 15%wb	バイオマスCHPの投入前に基準の含水率15%wbに低減する

(3) 熱需要の確保

バイオマス CHP より発生する排熱 200kW (100kW×2 台) は、昼間は夏期のデシカント外調機のロータの再生用や冬期の暖房、給湯に使用されるが、空調設備が停止する夜間は建物に熱需要がなくなる。そのような際に、通常の CHP では熱を処理できなければエンジンの冷却ができなくなって発電機を停止する必要がある。バイオマス CHP を用いて自身の燃料となる木質チップの乾燥工程を夜間に設けることで 24 時間の安定稼働を可能とした。

(4) 燃料の含水率に関する要求品質

含水率の高いチップが混入した場合、ガス化炉底部の温度が下がりタールが燃え尽きずにクリンカと呼ばれる塊状物が発生する。クリンカはガス化炉へ付着し燃焼スペースや燃焼灰排出のスペースを塞いだり、エンジン内に流入し機器に固着し破損につながるといったトラブルの原因となる。そのため、今回採用したバイオマス CHP では投入するチップの含水率は 15%wb 以下という厳しい要求品質となっている。一方、間伐材を原料とした木質チップは、含水率が 50%wb 前後と高く、バイオマス CHP に燃料を投入する前に別途乾燥工程を設ける必要がある。そこで、木質チップの乾燥熱源にバイオマス CHP の排熱を活用し、乾燥ラインはバッチ式の一次乾燥と連続式の二次乾燥の 2 工程とした。表 4 に一次、二次乾燥機の仕様を示す。一次乾燥機は木質チップの含水率を 50%wb から 25%wb にまで低減しドライサイロに貯留する。その後、二次乾燥機はバイオマス CHP の稼働と連動して含水率を 30%wb から 15%wb まで低減し、バイオマス CHP の運転に必要な乾燥チップを供給する。ここで、二次乾燥機の入口含水率を 30%wb としているのは、ドライサイロでの貯留中に外気条件により含水率が上昇することを想定したためである。

(5) メンテナンス性の確保

バイオマス CHP では、定期的な保守が必要とされている。採用したバイオマス CHP は、24h 稼働した場合 25 日間 (600h) に 1 回の定期保守が必要となる。定期的な保守サイクルを確保しつつも安定した連続稼働を行うために、バイオマス CHP を 2 台並列設置とするとともに、2 台の機器を同時に停止することのないよう保守の周期を 1 週間ずらした計画としている。また、定期保守時や 2 台同時に故障が発生しても昼間の熱負荷に対応できるように、別途設置したバイオマス蒸気ボイラ (詳細は後述) で温水供給をバックアップしている。

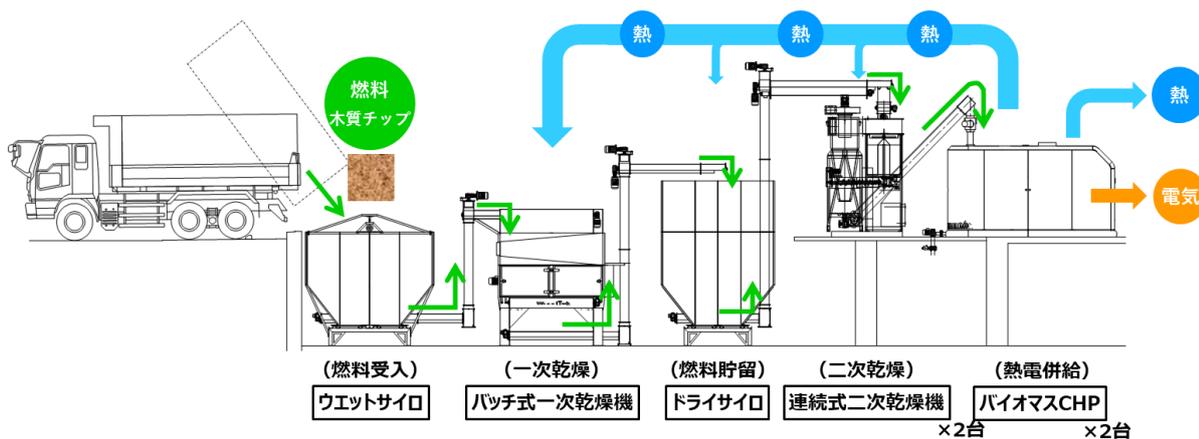


図5 燃料供給システムの全体フロー

3.3 エネルギー自立型自家消費システム

(1) システム概要

3.2の対策を踏まえて本施設に導入した24時間安定稼働を実現するエネルギー自立型自家消費システムの燃料供給の全体フローを図5に示す。トラックで搬入された木質チップはウエットサイロに投入され、バッチ式一次乾燥機で乾燥されドライサイロに貯留される。貯留されたチップはバイオマスCHPの稼働に合わせて連続式二次乾燥機で乾燥され、バイオマスCHPのガス化炉に投入される。投入された木質チップは、高温で熱分解、酸化処理され可燃性ガスを生成し、ガスエンジンの燃料として消費され発電が行われる。バイオマスCHPで発電が行われた際に、電気と熱が発生する。電気は日中は空調に、夜間は24時間稼働させる実験装置や蓄電に使用される。熱は日中は空調や給湯に、夜間はチップの乾燥工程（一次乾燥機、ドライサイロ、二次乾燥機）に用いられる。

(2) 太陽光発電との発電量比較

本システムの定格出力は電力80kW、熱200kWであるが、年間7,800時間（メーカー公表の最大稼働時間）のフル稼働を想定した場合、設備稼働率は89%、最大で電気62.4万kWh/年、熱156万kWh/年の熱電併給が可能となる。本施設に別途設置されている太陽光発電は、出力200kWに対して設備稼働率は約10%とすると年間の発電量は約20万kWhである。両者を比較するとバイオマスCHPは太陽光の4割の出力で、年間約3倍の発電量となる。

(3) 買電とのコスト比較

電力会社からの買電とのコスト比較を表5に示す。バイオマスCHPの燃料消費量は高含水率の切削チップ（含水率50%wb）62.9kg/hで、チップ価格が10円/kgの場合、ランニングコストは629円/hとなる。ランニングコストのみで比較すると買電に比べてバイオマスCHPの方が3割ほど有利となり、排熱を加味するとさらに有利となる。しかし、保守費用やイニシャルコストの増加を考慮したLCC比較では買電の方が優位であり、低コスト化は課題の一つである。今回の導入を機に、顧客の要求に応じて木質バイオマスを含む再エネ電源の利活用を提案でき、システム構築できれば当社にとっては優位性の確保につながるものと思われる。

表5 買電とのコスト比較

		バイオマスCHP	買電
チップ	投入量	62.9kg/h ^{※1}	-
	出力	40kW ^{※2}	40kW
電気	時間あたりランニングコスト	629円 (10円/kgの場合)	880円 (22円/kWの場合)
	出力	100kW ^{※2}	-
熱	ランニングコスト	発電時の排熱のため0円	-

※1：含水率50%の切削チップの場合

※2：バイオマスCHPの1台あたりの出力（電気：40kW、熱：100kW）

4. バイオマス蒸気ボイラ

本施設では、バイオマス CHP のバックアップと実験用の蒸気供給を目的として、バイオマス蒸気ボイラが導入されている。バイオマス蒸気ボイラは、換算蒸発量で 500kg/h×1 台、木質ペレットを燃料とするタイプである。燃料をペレットとしたのは、木質ペレットに限らず草本系の資源作物であるエリアンサスをペレット化して利用することを想定しているためである。

エリアンサスとは、東南アジアを始め熱帯・亜熱帯地域に自生するイネ科の草本である（写真 1）。農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）及び、国際農林水産業研究センターで共同開発された品種である「JES1」（農林水産省品種登録番号 27533 号）は、種子を作ることがないため雑草化せずに栽培可能（日本では九州以北、東北部以南で栽培可）な草本として品種登録されている。多年生で毎年 4m ほどの高さまで成長し、栽培コストがかからず、木質ペレットと同等の熱量があるため、耕作放棄地や休耕地の活用により計画栽培のできるバイオマスとしてその利用が期待されている。本施設では 2020 年 5 月に敷地内圃場にエリアンサスを定植し（写真 2）、約 9 ヶ月で 2m を超える高さにまで成長している。今後、2021 年 3 月に収穫し本施設に設置されているペレット製造装置でペレットにし、バイオマスボイラで消費するペレット燃料の一部として利用する予定である。



写真 1 成長したエリアンサス⁵⁾



写真 2 本施設でのエリアンサスの栽培（左より 2020 年 5 月、2020 年 9 月、2021 年 1 月）



図6 森林蓄積の状況⁶⁾

5. おわりに

安定稼働できる電源でZEB化を推進するためにバイオマスCHPを採用し、それを主力電源とした自立型自家消費システムを構築した。今後は7,800h/年の安定稼働を目標にノウハウを蓄積し、再生可能エネルギー100%のオフグリッド化を目指す予定である。

国土の約7割が森林であり資源小国の日本においては、森林資源は重要な資源の一つと考えられるが、現状は有効活用されるまでには至っていない(図6)。さらに、再生可能エネルギーの普及は、FIT(固定価格買取制度)に依存している。木質バイオマスにおいては、FITの約8割がPKS(パーム椰子殻、Palm Kernel Shellの略)等の低価格な輸入材である。しかしながら、今後は自立型の個別分散電源として、地産地消のエネルギーの自給率向上が重要な課題となってくる。本施設では地産地消が可能なバイオマスエネルギーを主力電源とし、エネルギー自立型の自家消費システムを構築した。今回のバイオマス活用に関する報告が、エネルギーの強靱化を必要とする公共施設や民間産業施設等において、バイオマス活用のための一助になれば幸いである。

謝辞

ご指導いただきました一般社団法人日本有機資源協会、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構をはじめとする関係者の皆様に御礼申し上げます。

文献

- 1) 武藤ら: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1報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp185-188, 2019.
- 2) 羽鳥ら: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2報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2020 発表.
- 3) 株式会社バイオマスアグリゲーション HP:<http://bioaggr.co.jp/report/461/>, 2020.5.
- 4) ボルタージャパン合同会社 HP:http://www.volter.jp/pdf/Volter40_pamphlet.pdf, 2020.5.
- 5) 日本農業新聞 HP:https://news.livedoor.com/article/image_detail/13875701/?img_id=15477661, 2020.5.
- 6) 林野庁 HP「森林面積・蓄積の推移」:<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/attach/pdf/2-1.pdf>, 2020.5.

ABSTRACT

In the Takasago Thermal Engineering Innovation Center, an energy self-sufficient system was installed to achieve “Net Zero Energy Building (ZEB)”. In the system, combined heat & power system (CHP) of woody biomass gasification type plays an important role, that uses renewable biomass energy “wood chips”.

In this report, countermeasures for challenges of the Biomass CHP are introduced such as securing required fuel quality and heat demand. Furthermore, the biomass pellet boiler used in this facility is also described.

エネルギー自立型サステナブル研究施設 二次側空調システム及びセンシングシステムの概要

木村健太郎・清水昭浩・柴田克彦
平原美博・羽鳥大輔*1・武藤友香*1

Outline of Secondary Air Conditioning System and Indoor Environmental Sensing System In the Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center

Kentaro Kimura・Katsuhiko Shibata・Akihiro Shimizu
Yoshihiro Hirahara・Daisuke Hatori*1・Yuka Mutoh*1

高砂熱学イノベーションセンターでは、環境負荷低減と知的生産性を両立したエネルギー自立型研究施設を実現するため、本建物の空調方式は外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機で処理し、個人の行動や好みで負荷が変化する人体負荷に対しては個別空調機で処理する方式を採用した。本報では、二次側空調ゾーニングの考え方や本建物で新たに導入した放射空調や個別空調機などの開発概要、及び室内環境のセンシングシステムについて紹介する。

1. はじめに

本建物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いる。本目的を達成するため、空調方式は外調機で外気を含めたベース負荷を処理し、不足分を放射空調や個別型空調機（タスクデスク空調機、直流ファンコイルユニット（以下 DCFCU））の組合せで処理する方式を基本とし、各室での働き方に合わせてその組合せを決定している（図 1 参照）。本報では、二次側の空調ゾーニングの考え方や二次側空調システムで採用した潜頭分離空調システム、放射パネルや個別空調機の開発概要、及び室内環境センシングシステムについて報告する。

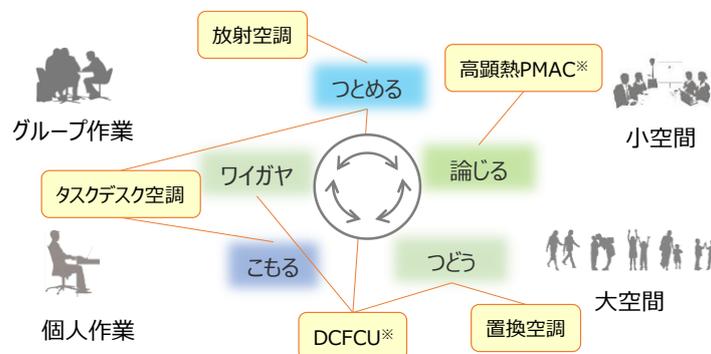


図 1 様々な活動空間と空調方式の組合せのイメージ

※2020 年度空気調和・衛生工学会大会講演論文^{1,2)}を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計

2. 働き方に呼応した空調ゾーニング

本建物での働き方に呼応した空調ゾーニングの考え方を棟屋や階ごとに以下に示す。

2.1 オフィス棟 1 階の空調ゾーニング

オフィス棟 1 階の空調ゾーニングを図 2 に示す。オフィス棟 1 階は、エントランスホール、カフェレストラン、会議室等、外来者が利用可能な空間となっており、外気処理にはデシカント外調機（詳細は後述）を用いている。

会議室や応接室の個室は、手元で操作可能なように高頭熱型水熱源ヒートポンプユニット（以下 PMAC）を採用し、内部負荷を処理する方式としている。

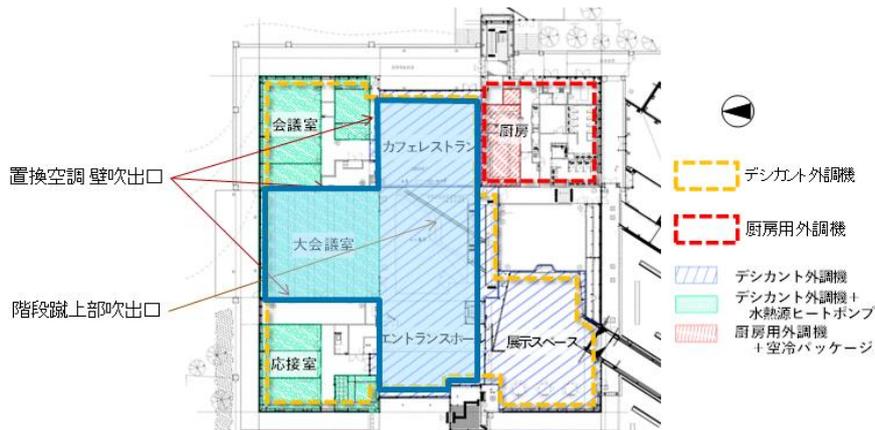


図 2 オフィス棟 1 階の空調ゾーニング

エントランスホールや大会議室、カフェレストランは、一体としての使用が可能であるとともに、中央に吹抜けを有し天井が高いことを考慮して、置换空調を採用し搬送動力の低減を図っている。外調機での処理外気は、壁面に設置した旋回流誘引型置换空調吹出口（SWIT）や階段の蹴上部分に設置した吹出口から給気され、負荷が増加した場合は付設の PMAC で追従運転を行う。大空間であるため温度ムラが懸念されるが、事前に行った夏期ピークでの CFD 解析（図 3 参照）で、居住域（床上 1,100 mm）が有効に冷房されることを確認している。

エントランスホールは、既報³⁾で報告したように、貯水槽に蓄えられた地下水を利用して床放射空調を行っている。エントランスホール及びカフェレストランでは、中間期に東西面の全面窓を開放することにより、積極的に自然換気を行うことが可能である。また、厨房系統は単独系統とし、専用の外調機と空冷パッケージで負荷を処理する方式としている。

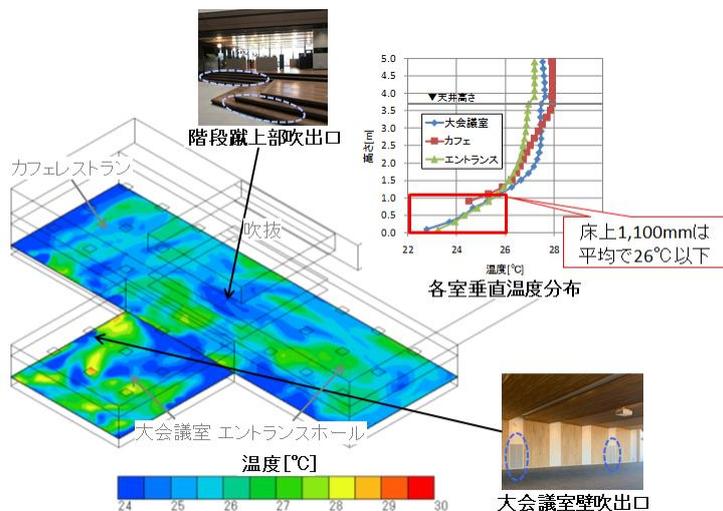


図 3 CFD 解析結果（夏期ピーク、床上 1,100 mm の温度コンタ図）

2.2 オフィス棟 2 階の空調ゾーニング

オフィス棟 2 階の空調ゾーニングを図 4 に示す。オフィス棟 2 階は、主として従業員の執務空間として計画しており、フリーアドレス制を採用している。主執務室である北面の執務室 2-1 は、知的生産性の向上の観点から、快適性を重視し静音で外乱の少ない空間とするために天井放射空調を採用するとともに、個人の好みに応じて機器の発停や環境調整が可能ないようにタスクデスク空調機や DCFCU を併設している。

吹抜けに面する執務室 2-2、2-3 やワイガヤスペースは、より開放的な空間として通常のデスクワークの他にブレンドミーティングや図書コーナーとしての利用を想定しており、空調としては個々人が必要に応じて操作を行うタスクデスク空調機や DCFCU を採用している。また、中間期は換気窓や扉の開放により、積極的に自然換気を行うことで半屋外空間として利用できるようにしている。

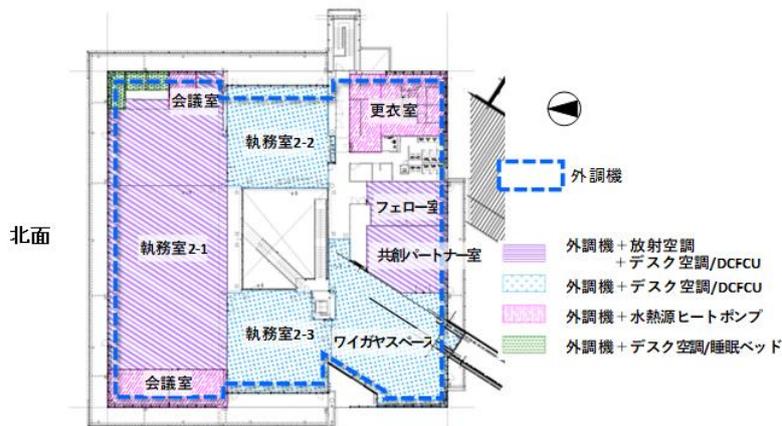


図 4 オフィス棟 2 階の空調ゾーニング

2.3 ラボ棟の空調ゾーニング

ラボ棟の空調方式は、デシカント外調機による負荷処理を基本とし、ユーティリティ設備としての冷水及び温水配管は諸室入口までとしている。将来の実験装置の改装に柔軟に対応するために、内部負荷処理は実験内容に合わせて必要なファンコイルユニットを設置する運用としている。

3. 省エネと快適性の両立を目指した潜顕分離空調

先述したように本建物は、潜熱処理を主体とした外調機と顕熱処理用の放射空調や個別型空調で構成する潜顕分離空調システムを採用している。採用した外調機の概要を以下に示す。

3.1 オフィス棟 1 階システムデシカント外調機

図 5、6 にオフィス棟 1 階システムの全熱交換器組込型デシカント外調機廻りの機器構成と空気線図上での状態変化を示す。冷房運転時のデシカント外調機では、取入外気は全熱交換器を通過した後、予冷コイルで冷却、デシカントロータで除湿、冷却コイルで再冷却される。コイルでの冷却用には地下水を、デシカントロータの再生や暖房用にはバイオマス発電機の排熱を利用することにより、搬送動力以外は化石燃料に頼らないシステムとしている。また、再冷却のコイルでは、地下水で取り出せる最低限の温度まで冷却することにより、室内顕熱負荷の一部が処理可能となっている。

外調機の風量は $9,000 \text{ m}^3/\text{h}$ の定風量で、単位床面積当たりでは約 $6 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ の外気量を常時確保している。給気及び還気系統に設置した VAV は、系統ごとでの負荷変動に合わせた可変風量制御（室内温度制御と CO_2 制御の 2 モードを用意）としているが、トータル風量は一定となる運転としている。また、トイレ排気等も全量全熱交換器に戻し外気量と排気量を同量とすることにより、全熱交換器の高効率運転を実現している。

なお、ラボ棟にも同様のデシカント外調機を 2 台設置している。

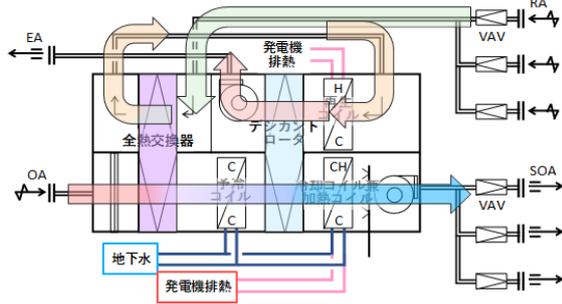


図5 デシカント外調機周りの機器構成

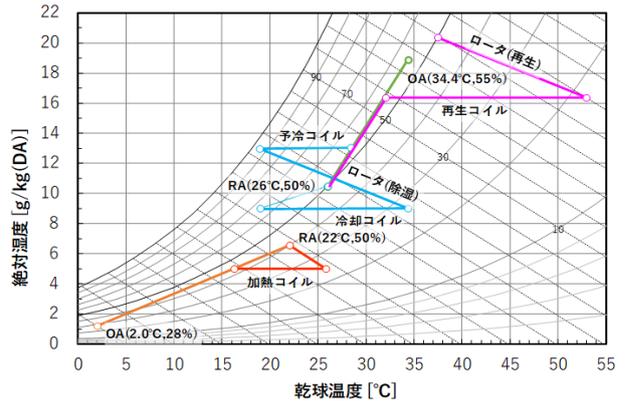


図6 1階デシカント外調機周りの空気状態変化

3.2 オフィス棟2階系統外調機

図7にオフィス棟2階系統の全熱交換器組込型外調機の空気線図上での状態変化を示す。地下水や排熱の供給停止でも稼働できるように通常の冷却除湿方式を採用しているが、再熱及び暖房用の加熱プロセスにはバイオマス発電機の排熱を利用している。

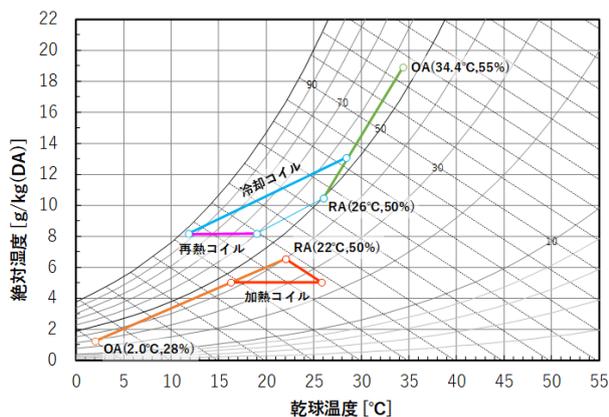


図7 2階外調機周りの空気状態変化

表1 オフィス棟の設計内部負荷

室用途	人員密度 [人/m ²]	照明 [人/m ²]	OA [人/m ²]	顕熱負荷 合計 [人/m ²]
会議室	0.4	10	12	48.8
執務室 2-1	0.15	7	12	29.4
執務室 2-2, 3	0.11	10	8	25.6
ワイガヤ	0.1	10	12	28.9

※人体の顕熱負荷は、会議室は67W/人、その他は69W/人で計算

外調機の風量は、6,850 m³/hの定風量で、単位床面積当たりでは約4 m³/(h・m²)の外気量を常時確保している。既報³⁾でも報告したように、事務室系統の人員密度や照明・OA負荷は通常的设计条件より小さく、ピーク時の顕熱の内部発熱原単位は会議室を除くと25~30 W/m²程度(表1参照)である。そのため、冷房時の負荷が小さいときは外調機だけの運転でも負荷処理が可能である。

外調機の制御はデシカント外調機と同様にトータル風量一定のVAV制御を採用しているが、その制御には人位置検知情報システム(図8参照)を用いて在室人数に応じた風量制御を取り入れている。人位置検知情報システムは、在室者の持つ携帯端末からのBluetoothの無線信号をスキャナで検知しその位置を特定するもので、室内の在籍人数を把握することが可能である。なお、トイレ排気については1階デシカント外調機と同様に全量を全熱交換器へ戻している。

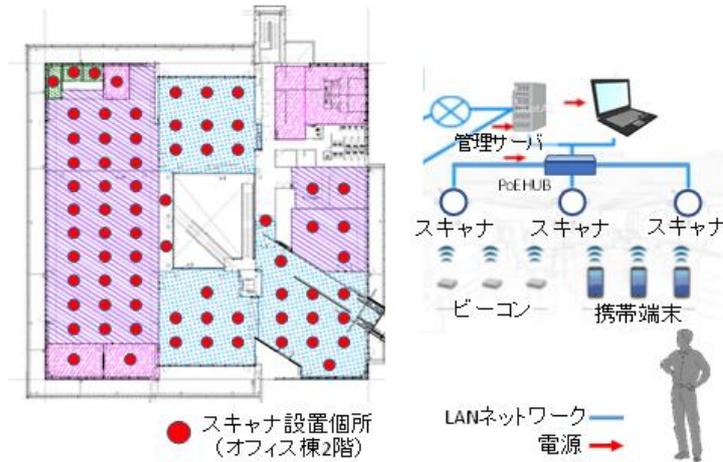


図8 人位置検知情報システムの概要

4. 執務室の放射空調

4.1 従来の放射空調

放射空調は、地下水などの高温冷水を利用でき、かつ気流感を抑えながら室内の温度均一化を図ることができるため、省エネルギー性の高いシステムとして多くの ZEB 建築に採用されている。本建物で採用した水方式は、空気搬送動力は低減するが、水側の往還温度差を 2℃程度で運用することが一般的であるため、更なるエネルギー削減には水搬送動力の削減が課題となっている。

4.2 放射パネルの開発

放射パネルは、一般的にシステム天井 2 枚分 (600 mm×1,200 mm) の大きさであるが、本建物では、新たに 600 mm 角グリットの放射パネルを開発し導入した。このサイズ変更により、パネル間の継ぎ手数は増えるもののシステム天井の下地検討が不要となり、新築だけでなく改修工事でも既存天井への適用が可能となる。また、ブランクパネルと放射パネルの入れ替えも容易なことから、レイアウト変更にも容易に対応が可能となる。

4.3 流量検討

デスク 1 席分に相当するパネル 6 枚 (3 枚×2 列) を直列に接続した時の適正な流量を検討した。図 9 に放射パネルの表面温度分布、図 10 に流量と温度差、流量と冷却能力の関係を示す。検証は断熱された環境試験室で行い、室温 24℃、冷水往 17℃を一定とし、熱電対により 10 秒ピッチで計測して温度が安定した 2 分間の平均値とした。この結果、流量が多いほどパネル間の温度差は小さくなるが、冷却能力はある流量を超えると横ばいとなる。冷却能力とパネル温度差、搬送動力を総合的に判断して 2 L/min を定格流量とした。

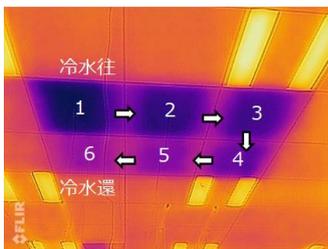


図9 放射パネルの表面温度分布

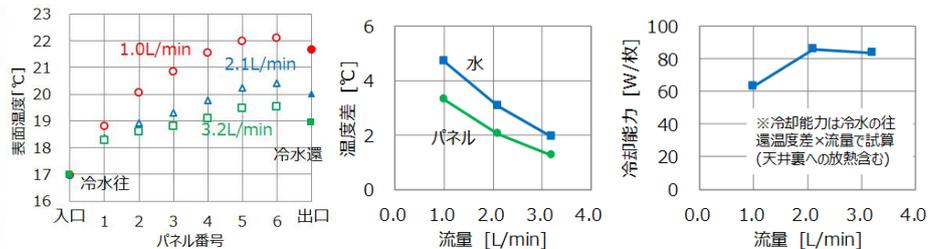


図10 放射パネルの流量と温度差、冷却能力の関係

4.4 導入システム概要

執務室 2-1 等に設置した天井放射パネルの設計仕様及び設置状況を表 2 に示す。パネルの設置面積は、各室の天井の面積の約半分を占めており、冷却能力としては床面積当たりでは約 35 W/ m²に相当し、冷房ピーク時の室内内部発熱と外壁からの貫流負荷を合わせた顕熱負荷を処理できる能力となっている。

放射パネルの制御は、隣り合うデスク 2 席分に相当するパネル 12 枚毎に電動弁を設け、パネルの表面温度が設定値となったとき ON/OFF する。従来よりも細かいゾーニングによる流量制御を行うことで負荷に応じて通水するシステムとなり、パネル表面温度の均一化と水搬送動力低減の両立を図ることができる。パネル表面温度の設定値は今後の運用により決定する。

表 2 天井放射パネルの設計仕様及び設置状況

仕様		室名	パネル枚数	設置面積
サイズ	600mm×600mm(パネル 1 枚あたり)	執務室 2-1	872 枚	314 m ²
重量	保有水量 0.3L/枚 運転重量 2.0 kg/枚	フェロー室	90 枚	32 m ²
能力	69 W/m ² (夏期、送水温度 18~20℃)	共創パートナー室	140 枚	50 m ²
流量	1.0~2.0 L/min(1set パネル 6 枚あたり)			

5. DCFCU

5.1 装置概要

4 章で説明した天井放射空調は、細かいゾーニングでタスク負荷に応じたシステムであるものの、水の熱容量で時間遅れが生じること、また放射だけでは時々刻々変化する個人の快適感を満足させることは困難である。そこで、システム天井に組み込むことができ、消費エネルギーが微小でありながら個人の好む空気を瞬時に得られる DCFCU を開発した。

5.2 DCFCU の仕様検討

要求仕様を以下に示す

- 1)システム天井に対応 (照明器具と同サイズ)
- 2)ドレンレス (顕熱負荷のみ処理)
- 3)冷却能力 200 W 以上
- 4)低消費電力 (DC ファン使用)
- 5)吹出し気流の変更が可能

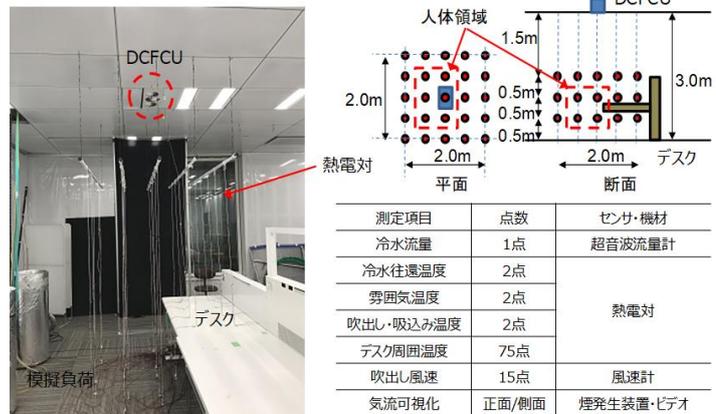


図 11 実験条件

上記を満足させるため、冷却能力や発生騒音、PMV、コンパクト化などを評価項目としてコイルやファンなどを選定した。実験条件を図 11、外観と構成を図 12、実験により最適化した最終仕様を表 3 に示す。検証は断熱された環境試験室で行い、室温は夏期を想定した 26℃、冷水往温度は地下水を想定した 17℃で固定し、各パラメータを変えた時の値を比較した。温度測定には熱電対を用い、DCFCU 下部を中心に、0.5 m グリッドの温度を測定した。

表 4 にファンをパラメータとした実験結果を示す。残風速は、DCFCU 直下の FL+1.0 m とする。評価に用いる PMV と PPD では、放射温度は乾球温度+1℃、相対湿度 50 %、代謝量 1.1 met、着衣量 0.7 clo と仮定した。ここで、局所冷却効果とは、図 11 に示す人体領域と周囲との平均温度差とし、スポット的に効率よく冷却しているかの指標とした。最終仕様を赤字で示す。DCFCU は、システム天井に設置できる小型顕熱処理機でありながら、消費電力約 3 W に対し顕熱 400 W 以上を処理でき、省エネルギー性の高い仕様となっている。

写真 1 にフェース形状と気流可視化を示す。パンチングのフェースは乱れの少ない気流の為、スポット的な冷却効

果が高い環境となる。また、旋回翼を複数配置したフェースは、周囲の空気を誘引しながら下降する気流となり、スポット的な冷却効果は低下するが、気流感の少ない環境となる。フェースは室内側から簡単に交換できるようになっており、異なるフェースを配置することで執務者は好みの環境を選択できる。

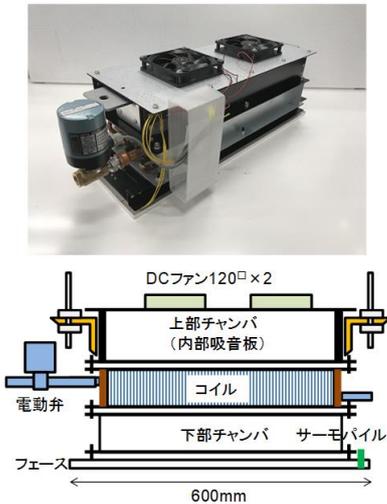


図 12 DCFCU 外観と構成

表 3 最終仕様

部材	項目	仕様
コイル	流路	単管(一筆書き)
	流量	2 L/min
ファン	配置	コイル上流側
	外形	120 mm
	個数	2 個
上部チャンバ	風量	4 種類(F、H、M、L)
	高さ	75 mm
	消音	吸音板有/バツフル板無
フェース	形状	パンチング・旋回翼

表 4 ファンをパラメータとした実験結果

項目 (フェース)	ファン 型番 [-]	風量 [m³/h]	定格 電力 [W]	冷却 能力 [W]	残風速 [m/s]	局所冷 却効果 [°C]	発生 騒音 [dB]	PMV [-]	PPD [%]
パンチング	F	250	4.6	586	0.35	1.28	83.3	-0.10	5.2
	H	378	9.3	684	0.56	1.37	76.1	-0.36	7.7
	M	236	3.1	469	0.26	1.38	37.7	-0.05	5.1
	L	190	1.9	394	0.20	1.34	35.9	0.08	5.1
旋回翼	M	130	3.1	303	0.03	0.41	38.7	0.62	13.2

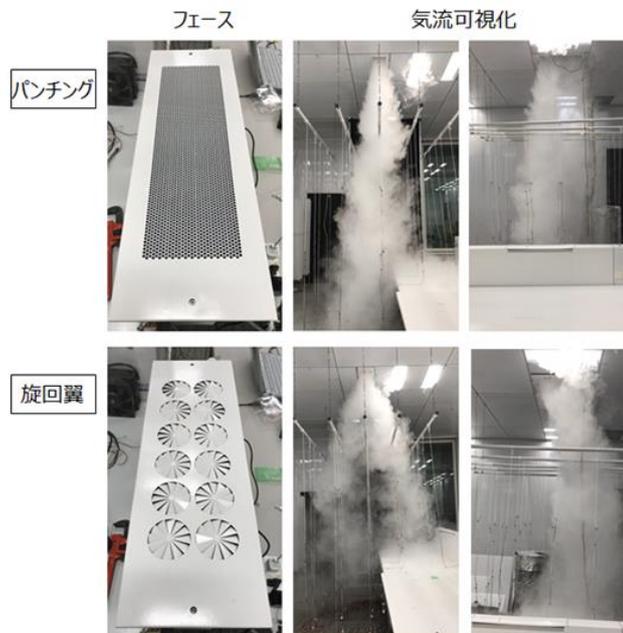


写真 1 フェース形状と気流可視化

5.3 導入状況

写真 2 に各執務室の DCFCU 設置状況を示す。DCFCU は、天井の異なる執務エリア全体に 1.8 m ピッチで配置した。これにより、執務室内であればどこにいても自分の好む空気を得られる。また、DCFCU 用には専用の受信基板と操作アプリを開発し、個人のスマートフォン端末で個別操作し、消し忘れ防止のため 30 分で自動停止する仕様としている。フリーアドレスであっても機器毎の操作履歴を確認することが可能なため、執務者の性別や年齢層の違いなど、空調の使用状況を関連付けた特性を把握し今後の空調方式の研究に役立つデータを収集することができる。なお、次章で紹介するタスクデスク空調機も同じアプリで操作する。

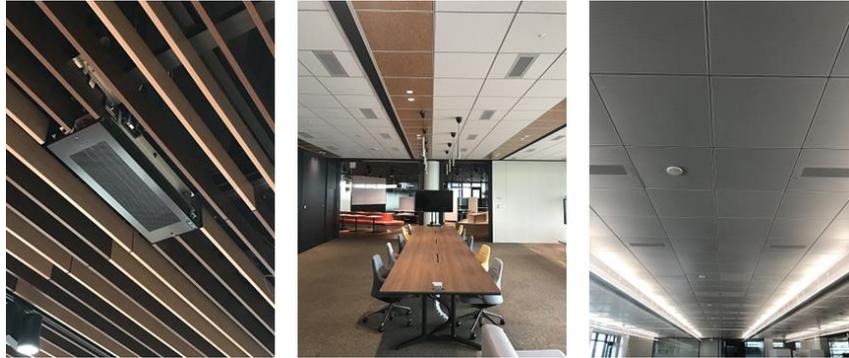


写真 2 執務室の DCFCU 設置状況
(左:ルーバ天井、中:在来天井、右:システム天井)

6. タスクデスク空調機

6.1 装置概要

これまで当社が製作したタスクデスク空調機は、空調装置とデスクが一体化されており、立位作業ができる上下昇降デスクなど、ユーザの要望に対応することが困難となっていた。そこで、汎用デスクにも対応可能なオフィス向けタスクデスク空調機を開発することとした。

6.2 衝立型タスクデスク空調機

図 13 に衝立型タスクデスク空調機の外観と構成を示す。膝元からフィルタを通して吸込まれた空気は、コイルを通してデスク上部より吹出す。ファンと電動弁の電源は DC12 V を利用し、搬送動力の小さいシステムとなっている。衝立型タスクデスク空調機は自立が可能で、両面それぞれから空調空気を出すことができるため、衝立型デスク空調を汎用の什器で挟むように設置することで、個人用空調として使用することができる。また、手で風量を可変することができるので、個人の好みに合わせた気流を作り出すことができ満足感を得られるシステムとなっている。



図 13 衝立型タスクデスク空調機の外観と構成

表 5 衝立型タスクデスク空調機の仕様

サイズ	高さ固定 1,200mmW・100mmD・1,200mmH 上下昇降 1,200mmW・100mmD・1,400mmH
冷却能力	約 150 W
消費電力	2.3~6.6 W
風量	約 130 m ³ /h

6.3 後付型タスクデスク空調機

フリーアドレスを想定して開発した後付型タスクデスク空調機は、天板下に引き出しが無いデスク向けのタスク空調機である。写真3に後付型タスクデスク空調機の外観とコイル配管接続口を示す。既存デスクに後からでも取り付け可能なタイプとなっており、腰から上半身にかけて気流を与えることができ、好みによって手で風向を変えることができる。フレキシ配管にて床下のメイン配管と接続することを想定しているが、上下昇降デスクへの接続にはコイル配管でカプラ接続する。これにより、空調機の取り外しが容易となっており、デスクやレイアウト変更時にも対応が可能である。

6.4 後付型デスク放射パネル

写真4に後付型デスク放射パネルの外観と設置状況を示す。デスクに後からでも取り付け可能なタイプとなっており、手で冷温水流量を変えることで好みの温度に変更できる。本パネルは、駆動部が無い構成のため壊れにくく、暖房時は炬燵のような温かさを感じられる。



写真3 後付型タスクデスク空調機の外観とコイル配管接続口

サイズ	700mmW・300mmD・80mmH
冷却能力	約 70 W
消費電力	1.9 W
風量	約 50 m ³ /h



写真4 後付型デスク放射パネルの外観とコイル配管接続口

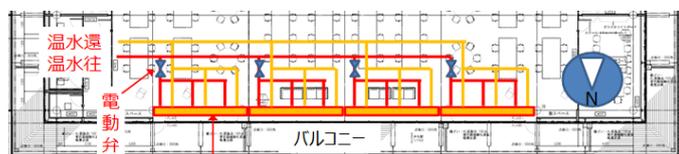
7. 局所空調用機器

7.1 OAフロア対応パネル空調

写真5にOAフロア対応パネル空調の外観と内部、図14に本建物の設置位置を示す。OAフロアに必要な強度確保と熱伝導性を考慮して外板は鋼材で構成し、裏面に水放射パネルを貼り付け、バイオマス CHP の排熱で作った温水を流すことで局所の暖房要求に対応できる。静荷重試験や衝撃試験は、JIS A1450 (フリーアクセスフロア試験方法) に準じて行い、ともに载荷点の変位は基準値以下となるように補強した。温熱性能試験において、パネル上部にカーペットを敷設する場合には温度低下するが、室温 26℃、温水 55℃とした場合でもカーペット表面温度は 38℃程度であり、直接素足で触れても火傷の恐れは少ない。なお、本センターでは、直達日射を避けるために主執務室が北面配置されており、冬期のコールドドラフト防止を主目的としてOAフロア1列分に床暖房パネルを設置している。今回は暖房用での使用であるが、直達日射の当たる箇所に設置することにより、負荷を吸収する冷房パネルとしての適用も期待される。



写真 5 OAフロア対応パネル空調の外観と内部



O Aフロア対応パネル
4スパン分 (7.5m×4=30m) 500mm×500mmOAフロア×60個分

図 14 本物件の設置位置と系統図

7.2 カウンター空調

吹抜けに面した2階カウンターの足元には、アルミ三層管で構成されたカウンター空調を設置した。図15にカウンター空調の外観とイメージを示す。吹抜けの周辺部は開放感があり気持ちよい反面、1階は置換空調を行っているため温熱環境をコントロールすることが難しい。そこで、人の近傍で放射による空調を行うことで、夏期の冷涼感や冬期の足元暖房により快適性を向上させる計画とした。また、タスクデスク空調システムの還水をカスケード熱利用することで水搬送動力の削減を図った。

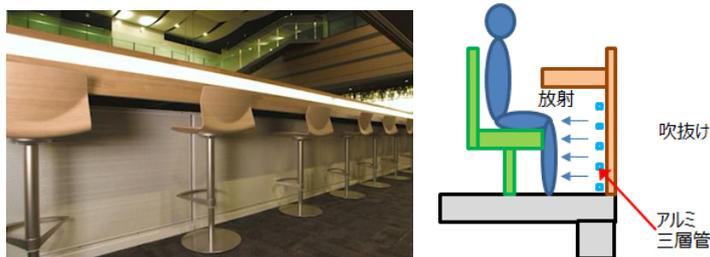


図 15 カウンター空調の外観とイメージ

7.3 クールスポット

写真6にクールスポットを示す。執務者がスイッチを押すと3台のDCファンが稼働し、給気チャンバ内の低温冷風を供給して即座にクールダウンを図る。消し忘れが無いようにタイマー機能を持たせている。従業員出入口から執務室までの導線上に壁面設置できるよう奥行を200mmに薄型化した。



写真 6 クールスポットの外観



写真 7 空調ソファ(左:送風タイプ、右:接触タイプ)

7.4 空調ソファ

写真 7 に 2 種類の空調ソファを示す。いずれも水冷式で、ファンコイルによる送風タイプと冷温水マットを座面の裏面に設置した接触タイプの 2 種類を構築し、それぞれ冷水と温水を供給する。今後は 4 つの異なるタイプを運用することで、年齢や性別の違いだけでなく、季節に応じて快適なソファが何かを検証していく。

8. 室内環境センシングシステムの概要

本建物では室内環境や人の行動履歴を詳細に把握するために、通常の建物での計測ポイント以外により細かく室内環境情報等の収集を行っている（図 16 参照）。無線計測の詳細については別報⁴⁾で記載するが、無線計測を含めた室内の主要な計測ポイントを表-7 に示す。この中で代表的なものを以下で説明する。なお、今後はこれらのデータを用いて室内環境の評価を行うとともに、空調設備を含めた運用方法の改善につなげていく予定である。

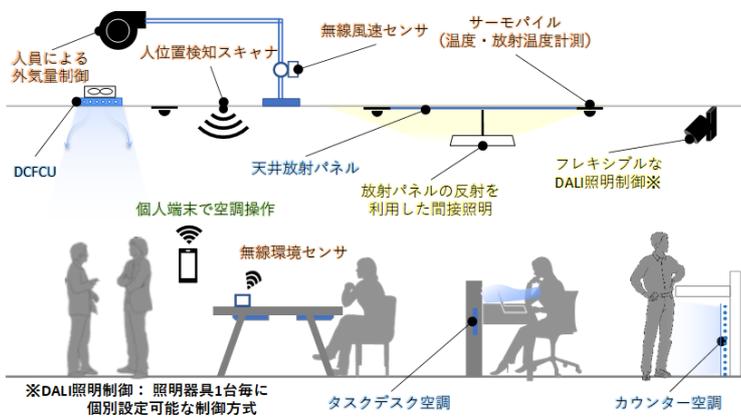


図 16 センシングシステムの概要

表 7 センシング項目

センサ等種別	計測項目	点数
無線環境 センサ	室内温度、湿度	200
	CO ₂ 濃度、照度	
サーモ パイル	天井近傍温度 放射温度	1,100
無線風速 センサ	制気口風量 (SA、RA 各制気口)	310
状態信号他	DCFCU 発停	200
	タスクデスク 空調機発停	100
	放射パネル往還温度 2方弁開閉	700
人位置検知 スキャナ	在室者の位置情報 検知用	106

8.1 サーモパイル

室内の温熱環境をリアルタイムで把握する仕組みとして、赤外線センサにより表面温度を測定するサーモパイルを活用した。天井に設置した本センサ（日本セラミック社製）は、天井近傍の空気温度とともに視野角 22 度で下面の放射温度を計測するため、天井高さ 3 m の執務室では床面レベルで直径約 1.2 m の範囲の放射温度を計測できる。本センサはオフィス棟の小部屋を除く部屋の天井に 1.8 m 間隔で、550 個（計測ポイントで 1,100 点）設置している。

図 17 にサーモパイルで計測された放射温度分布の一例を示す。天井面に設置されたセンサで計測される放射温度は、床表面温度だけでなく人体や OA 機器等の発熱体の影響を受けるためその部分は周囲に比べて高温となる。今後は、得られた温度分布をもとに負荷の偏在を特定し空調の運転方法の改善につなげていく予定である。

8.2 無線風速センサ

外調機の制気口全てに無線風速センサを設置している。センサ設置の主目的は、施工時の試運転での風量調整用であるが、運用開始後も引き続き風速を計測し、中央監視装置に取り込んでいる。

8.3 人位置検知情報システム

2 章で述べたように外調機の外気量制御用に人位置検知情報システムを採用しているが、これらのデータの時系列データを解析することにより、個々人の移動履歴や特定の空間での滞在時間等を把握することが可能となる。今後は、室内の物理環境情報だけでなく人の位置情報や個別の空調機の操作履歴等のデータと合わせて解析し、空調制御にフィードバックすることにより、更なる省エネ性や快適性の向上につなげていく予定である。

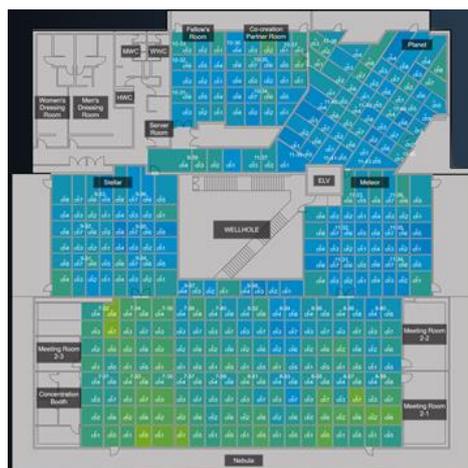


図 17 サーモパイルでの計測結果の一例
(オフィス棟 2 階床表面温度分布)

9. おわりに

本報では、二次側空調システムにおける働き方に呼応した空調ゾーニングの考え方や省エネと快適性の両立を目指した潜顕分離空調システム、空調機器の開発経緯と設置状況、及び室内環境評価と居住者の行動把握のためのセンシングシステムについて報告した。今後は、中央監視装置に蓄積されたデータの解析や季節ごとでの環境実測、アンケート調査により、運用段階でのシステム検証を行っていく予定である。

文 献

- 1) 清水ほか:エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第4報)二次側空調システム及びセンシングシステムの概要, 2020年度空衛学会大会(オンライン), J-33, pp.157-160(2020)
- 2) 木村ほか:エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第5報)二次側空調機器の開発, 2020年度空衛学会大会(オンライン), J-34, pp.161-164(2020)
- 3) 清水ら:エネルギー自立型サステナブル研究施設, 2020年度イノベーションセンター報, pp.5~16(2021)
- 4) 柴田ら:エネルギー自立型サステナブル研究施設, 2020年度イノベーションセンター報, pp.37~47(2021)

ABSTRACT

This building aims to be an energy self-sufficient innovation center that achieves both reduction of environmental impact and improvement of intellectual productivity. In the secondary air conditioning system as well, we plan not only to actively utilize renewable energy, but also to improve the indoor environmental comfort, working style and intellectual productivity. In this report, we describe the leading secondary air conditioning system, air conditioning equipment, and indoor environmental sensing technology adopted to achieve these objectives.

エネルギー自立型サステナブル研究施設 ICT を活用した先進の中央監視と今後の取組

柴田克彦・鈴木徳利*¹・平原美博
清水昭浩・木村健太郎・羽鳥大輔*²・武藤友香*²

The Energy Self-Sufficient Innovation Center Advanced Central Monitoring System Utilizing ICT

Katsuhiko Shibata・Narutoshi Suzuki*¹・Yoshihiro Hirahara
Akihiro Shimizu・Kentaro Kimura・Daisuke Hatori*²・Yuka Mutoh*²

高砂熱学イノベーションセンターには、ICT を活用した先進の中央監視システム（BACS: Building Automation and Control System）を導入している。この BACS は、クラウドコンピューティングを基盤に、クラウドの中央監視サーバとクライアント、オンプレの監視サーバとクライアント、モバイル操作端末で構成されている。さらに、ビッグデータ計測として無線通信技術を採用し、オフィス空間の詳細な温度計測等を実現した。これらの中央監視システムについて、今後の展開として次世代通信網である 5G を活用したクラウド監視システムを実証中である。また、オフィス内はフリーアドレス・レイアウトにより、空調負荷がダイナミックに変動する。今後、負荷変動を予測しながら最適な運用に向けて、その前段階として居室内温熱環境の自動制御と数値流体力学（CFD）との連成解析を試みた。

1. はじめに

環境負荷削減と知的生産性向上の両立を目指したエネルギー自立型研究施設の高砂熱学イノベーションセンター（以下 TIC）には³⁾、最新の省エネルギー技術と働き方に呼応した新規開発の空調システムが導入されている。これら装置の性能を最大に発揮させるには、情報通信技術（ICT）との連携が必須である。ICT の進歩は著しく、業務分野もしくは産業分野に関わらず様々なシステムの概念実証（POC）が行われている。特に、クラウド事業者が提供するサービスでシステム構築できるクラウドコンピューティング（以下クラウド）、無線通信ネットワーク、そしてシミュレーションを活用したデジタルツインが目を引く。しかしながら稼働の安定性や便益性など不確実な面が多く、建物の中央監視システム（以下 BACS）にまで普及していないのが現状である。サステナブル建築や ZEB 化実現が必須となっている今日において、中央監視システムの機能として、エネルギーマネジメントや運用の最適化の必要性がより高まってきている。ビッグデータと言われる多くの計測データを短い周期で収集するなど、その役割を最大に発揮するには、これらの技術を活用したシステム構築が必要となってくる。さらに、働き方改革に伴い働く人びとが個々の事情に応じた多様で柔軟な働き方を、自分で選択できる環境要求は、オフィス自体の有り様を大きく変化させている。これには、知的生産性の向上と居住者満足度が対でなければならない。この解決策として、TIC にも導入されたフリーアドレス・オフィスがあり、負荷がダイナミックに変動するオフィススタイルに適合した空調の運用が課題としてある。

今回これらの解決として、TIC に先進の中央監視システムを構築した。それらのシステム紹介と、空調負荷のダイナミックな変動に対する自動制御の今後の取組について紹介する。

※2020 年度空調調和・衛生工学会大会講演論文^{1,2)}を加筆修正したものである。

*1 東京本店電気計装部、*2 株式会社三菱地所設計

2. 中央監視システムの構築

2.1 システムの狙い

従来 BACS は建物の監視室に設置され、建物の設備運転管理員のみが現地設置のシステムであるオンプレミス（以下オンプレ）で設備の運転状況を監視操作するものであった。しかし、遠隔地で運転管理以外の観点から閲覧が可能となると、運転管理やエネルギー管理などの役割分担体制の適正化が図れる。また、近年省エネルギー性や知的生産性向上の目的でエネルギー分析の高度化が求められ、今まで以上に計測データの収集が必要となってきている。

このような状況を踏まえ、TIC の BACS ではオンプレ以外にも BACS 閲覧を可能とするクラウド中央監視システムと、無線ネットワークを活用し、システムとして構築することで今後のあらゆるニーズに対応するものとした。

構築したシステム全体概要を図 1 に示す。①部分がクラウド、②部分が無線を活用した構成箇所である。プライベートクラウドネットワーク環境と社内ネットワーク環境により通信速度を確保し、社内プライベートクラウドとして公開する形で構築した。

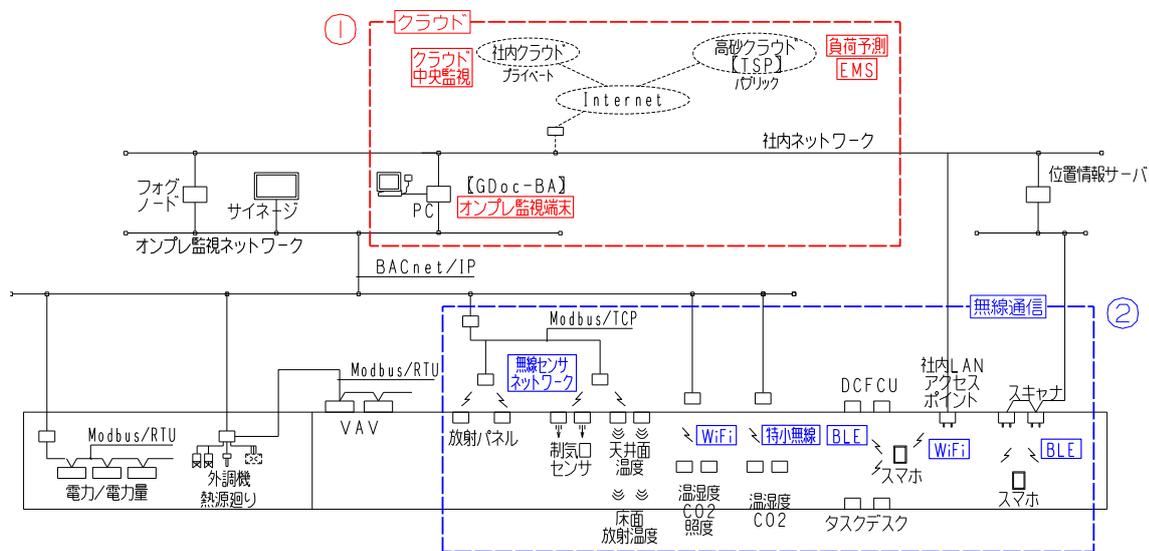


図 1 中央監視システムの概要

2.2 クラウド化の特徴

BACS においてクラウドを採用することにより、

- ・オンプレのシステム機器資産の保守修繕が最小に抑えられる
- ・ソフトウェア資産のバージョンアップ・更新をクラウド上で実施可能となる
- ・保守サービスコストの平準化など、ランニングコストのメリットが得られる

また、建物に導入する際には、

- ・オンプレに設置するシステム機器を最小限に抑える
- ・オンプレシステムにおけるエンジニアリング作業の低減など、インシャルコスト低減および工期短縮を図ることが出来る

以上の通り建物オーナー、設備エンジニアリング会社ともに採用効果が得られることが特徴である。

2.3 クラウドシステム構築の課題

クラウドを採用する際にはオンプレとクラウドをインターネット回線により接続する必要があり、BACS においては通信回線に大量のデータを伝送する。そのため通信容量が非常に大きいインフラの準備が必要となり、クラウド通信サービス費が高くなるなど、ランニングコストが導入効果以上にかかることが、BACS での展開が進んでいない原因

因の一つである。

これらを解決する方法として、昨年から本格的に展開された 5G を活用したクラウドネットワーク環境の構築がある。これにより通信容量およびランニングコストを抑えることができ、クラウド中央監視システムにおいても実際の展開が現実的となる。

また、クラウド環境に構築するためインターネット上でのセキュリティ対策を万全とする必要がある。クラウドではセキュリティ対策を考慮した通信方式 (IoT Hub 技術など) が開発されている。クラウドで構築する際にはそれらの通信方式を採用することにより対策できる。5G 以降も将来的に Beyond5G、6G が展開されていくことから、クラウドを採用した BACS のシステム導入は、設備エンジニアリング会社、システムインテグレータに求められるニーズである。

2.4 先進のクラウド型中央監視

前述の通り 5G 以降の次世代ネットワークの採用が必要となるが、今回はプライベートクラウドを採用しクラウド環境を構築した。5G 採用については 3.5 節にて詳述するが、別システムとして 5G ネットワークを構築し並行して検証を実施しており、本システム実証と合わせ将来展開を現実的なレベルとすることができる。

クラウド中央監視システムを構築する上で下記 3 つの運用パターンを想定した。

① オンプレと遠隔地の双方で役割の異なる監視

監視する側がある程度の規模の建物の場合には、オンプレに常時運転管理員などが配置する必要がある。オンプレの運転管理員がすべての業務を行うことより、日常点検や設備の運転管理など実機の確認を伴う業務と、設備の運転計画、エネルギー管理などの業務役割分担を分けて行うことの方が多くは効率的である。オンプレで常時監視、操作ができる BACS を配置、さらに遠隔地でも監視が行えるクラウド監視システムを構築することでオンプレ、遠隔地双方での業務に必要な監視が実施することが出来る。(図 2 参照)

② 多拠点を遠隔地で統合監視

監視対象の拠点が小規模、中小規模な場合は必ずしも常時運転管理員が監視している必要性がない、または運用人員、コスト低減のため削減を求められている建物もある。ただし、この場合においても設備の異常時などでは緊急対応する必要がある。代表異常のみを移報する仕組みを構築しているのはそのためである。しかしながら異常発生のみ把握では不足する設備内容や建物用途の場合は、本来はそこまで必要ではないがオンプレに BACS を構築し運転管理員を配置している。

このような建物において遠隔地にて統合してリアルタイム監視を行うことで、オンプレにおける作業を定期巡回などの最小限の業務に絞り込むことが出来る。(図 3 参照)

③ モバイル端末による操作

ビルなどの建物においてテナントへのサービスとしてテナント内設備の運転操作をテナント執務者のモバイル端末で実施できるシステムは、近年様々な物件で展開されている。クラウド中央監視システムとは少し異なる内容ではあるが、実際の導入に際してはクラウドを活用したテナント実務者向けのサービスとして必要な機能であり、今回の設計コンセプトに含める。

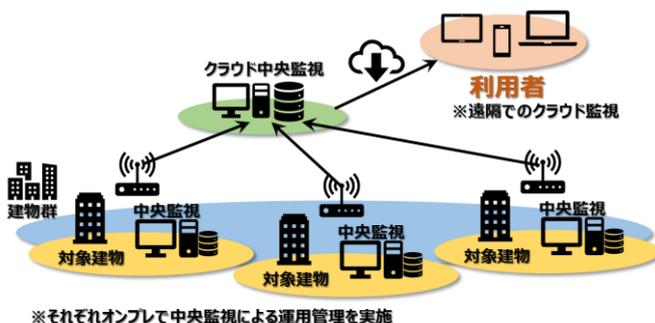


図 2 クラウド想定パターン①

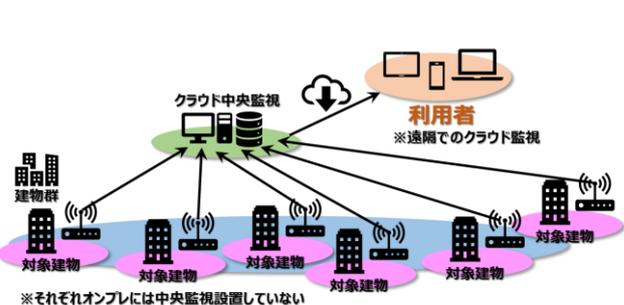


図 3 クラウド想定パターン②

2.5 構築事例

これらのコンセプトをもとに、図4に示すクラウド中央監視システムを今回構成した。また、図5に監視表示例を示す。構成機器の詳細は次の通りである。

①クラウド

プライベートクラウドを採用し、オンプレとクラウド間の通信は社内ネットワークで接続した。インターネット回線を利用したVPN網であるが、パブリッククラウド環境ではないため、今後5Gを採用した際でも対応できるようクラウドとの通信はIoTHub技術およびJSONコード（現在クラウド事業者で多く採用されているデータ処理に使用するデータ形式）に対応したシステムとしている。

②クラウド中央監視サーバ

クラウド上に配置する中央監視サーバはクラウド構成に対応した監視ネットワークアプリケーションを利用した。IoTHub技術に対応しており汎用的なクラウドプラットフォーム上に構築が可能である。

③クラウド監視クライアント

監視クライアント端末はクラウド監視サーバへブラウザを利用しアクセスすることで監視画面を表示操作可能である。

④オンプレ監視サーバ

前節の想定パターン①②ともに対応できるようにオンプレ側も監視サーバを配置した。想定パターン②の場合オンプレ側にはサーバではなく、クラウドとデータ通信するデータ通信装置（以下G/W）を配置することで対応可能である。G/Wにおいては今回構築したオンプレ監視サーバと同様のシステムで実現できるが、クラウド監視サーバとのデータ通信に必要な機能のみとすることが出来るため、連続稼働に強い通信端末でも稼働できるシステム負荷とすることが出来る。

⑤オンプレ監視クライアント

前節の想定パターン①ではオンプレ側で単独に監視操作が必要となる。クラウド監視サーバへのアクセスによる監視も可能であるが、通信負荷軽減のためオンプレ監視サーバへ直接アクセスした監視も可能である。

⑥モバイル操作端末

クラウド監視サーバでは監視クライアントからのアクセスで監視表示できるとともに、モバイル端末からのアクセスで設備機器のWeb操作表示を可能とした。監視クライアントと別のWebサーバとすることで、テナント実務者からの集中アクセスに対して監視クライアント側への影響を最小限にしている。

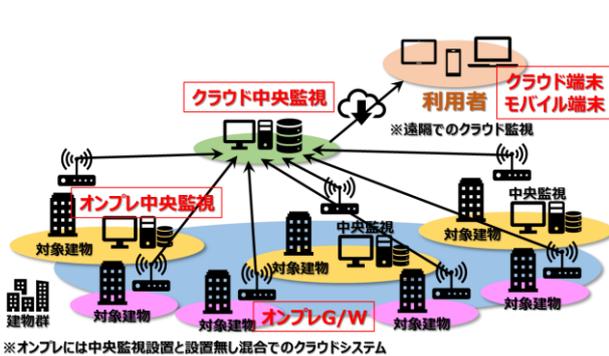


図4 クラウド中央監視システム構成

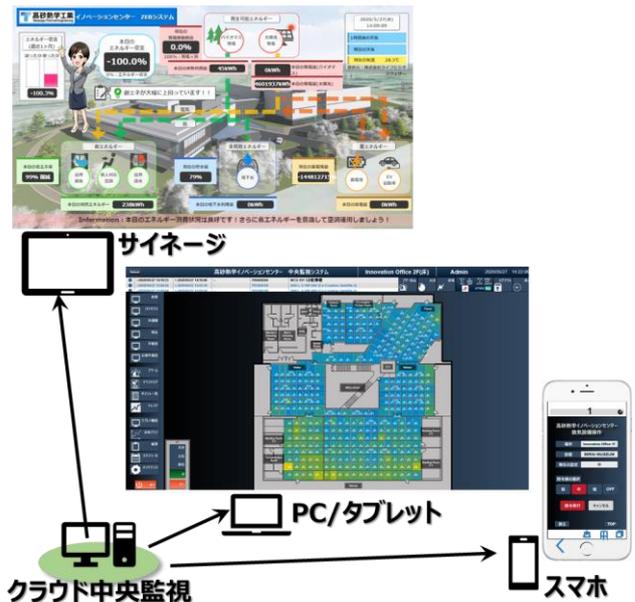


図5 中央監視の画面表示例

3. 無線通信ネットワーク

3.1 無線通信技術の採用効果

前途の通り今後さらにビックデータ計測が必要となってくる。当建物では室内環境計測を今まで以上に詳細に行うことを目的に挙げた。天井面温度および床面放射温度ではオフィス棟居室空間のみで約 1,100 点の計測を計画した。

多くの計測を実現するには、多数の計測センサ類への配線にかかるコストが、導入を妨げる要因となる。そこで無線通信技術を活用し導入コストを最小限に抑えることで、より多くの計測データを監視できるシステムとする。

3.2 無線通信の特徴

無線通信は様々な方式が規格されており、通信用途により適切な規格やプロトコルを選択し、無線ネットワークを構築している。電波法で定義されている無線局の中で、中央監視などのシステム構築に採用できる無線局および特徴は、以下の通りである。

①特定小電力無線局

特定小電力無線とは、電波法による“免許を必要としない無線局”の内の小電力無線局の一種である。使用する周波数は 429MHz 帯であり、空中線電力 10mW 以下と小さいことが特長である。

②小電力データ通信システム無線局

この無線局には以下が含まれる。1)無線 LAN (IEEE 802.11) 2)無線センサネットワーク (IEEE802.15.4) 3)Bluetooth (IEEE 802.15.1)。いずれも 2.4GHz 帯での無線通信であるが、最大接続台数、通信速度などそれぞれ特徴が違うが、使用する周波数は 2.4~2.5GHz 帯である。

これら無線局は、総務省規定に用途毎の技術基準が定められており、これへの適合が認証された機器（適合表示無線設備）のみしか利用できない。

3.3 導入の無線システム

計測項目と計測点数の概略は以下の通りである。

- ・温度/湿度/CO₂濃度/照度 : 100 点 (各居室毎)
- ・天井面温度/床面放射温度 : 1,100 点 (2 m² 毎)
- ・制気口風量 : 310 点 (各制気口)

また、前報⁴⁾ で詳細を示している執務者個別対応のタスク空調についての監視点数は下記の通りである。

- ・DCFCU : 200 点
- ・タスクデスク空調機 : 100 点
- ・放射パネル : 700 点

上記すべてを無線通信による BACS への接続とした。採用した無線通信は以下である。

- ・特定小電力無線 : 室内温湿度 CO₂センサ
- ・無線 LAN : 室内温湿度照度 CO₂センサ
- ・無線センサネットワーク : 風量センサ、放射パネル、タスクデスク空調機
- ・Bluetooth (BLE) : DCFCU

3.4 無線通信電波強度状況

下記に設置範囲が広く電波強度が影響されると想定していた、特定小電力無線での温湿度計測センサ無線ネットワークの電波強度の測定による無線通信実証結果を図 6 に示す。電波強度に影響のある躯体、間仕切りや、建屋間（渡り廊下接続）などを介しての無線ネットワーク構築であるが、経路が遮断されことなく通信が出来ていることが分かる。また、各無線局は複数の経路を確保しており、一部の機器のトラブル時でも別の経路で正常機器の通信を確保できるようメッシュ型ネットワークが形成されていることも確認できた。

3.5 次世代通信網への対応

前途の通りクラウド中央監視システムについて今後の展開を進めていくため、通信回線の課題を解消するべく次世代通信網である 5G を活用したクラウドネットワークを利用したクラウド中央監視システムを構築し実証中である。

将来的な対応を見据え、自営のローカル 5G と通信キャリアによる 5G の双方を活用し実証環境構築を進めている。現在実証中の 5G クラウドネットワーク概念図を図 7 に示す。

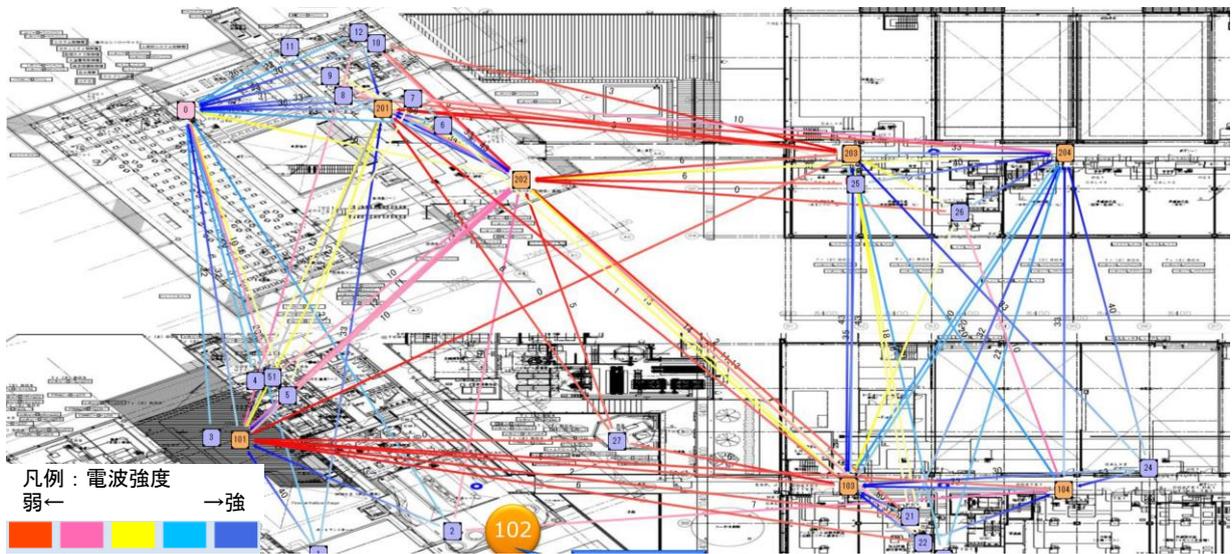


図 6 無線通信電波の強度検証

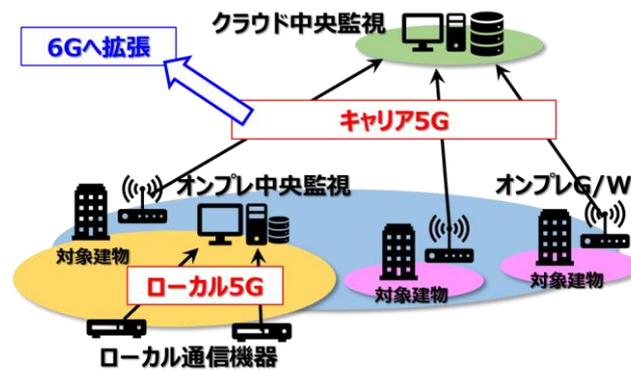


図 7 5G クラウドシステムの概要

4. 今後の自動制御に向けた連成解析の取組

4.1 連成解析のモデル化

室内温熱環境シミュレーションの要である数値流体力学 (CFD) の汎用ソフトウェアには、解析モデル作成・メッシュ生成・計算実行・結果表示の一連の操作を一つのアプリケーションの中で実行することができる。しかし、その操作の一部を外部プログラムと連携して実行することが連成解析である。本報では、CFD のソフトウェアに FlowDesigner(アドバンスト・ナレッジ研究所製)、外部プログラムに Excel(マイクロソフト製)のマクロを使用した。2つを連携させるには、次の機能が必要である⁵⁾。

①オートメーション機能

Excel から FlowDesigner の起動/終了を含め各操作をコントロールする。これにより、操作の自動化で解析作業の効率化が図れる。

②外部連携

Excel から FlowDesigner に対し反復計算における各条件をコントロールする。FlowDesigner では、連携でのターゲットとして解析結果をセンサ情報として出力するようにプログラムされている。センサ情報を基に Excel で制御ロジ

ックの演算などの処理を実行し、再度計算条件のコントロールをすれば、自動制御による室内環境の動的変化を模擬する連成解析が可能となる。

図8に外部連携の概要を示す。

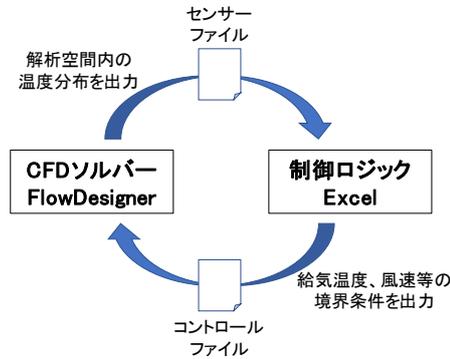


図8 シミュレーションと外部連携の概要

4.1.1 解析モデル

図9および図10に解析対象の建築及び空調システム、図11に解析モデルを示す。フリーアドレス・オフィスの運用のため人体負荷の位置が適宜変動し、オフィスの一部を切り出してのモデル化が不可能である。そこで、オフィスの全空間（約36 mL×15.6 mD×3 mH）をモデル化した。实在設備への実装ではシミュレーションとオンタイムでの自動制御を想定しているため、計算時間の短縮が必要となる。そこで、システム天井のモジュール600 mm×600 mmに合わせた簡略モデルとした。室温評価として人体の前方100 mmにセンサを配置した。

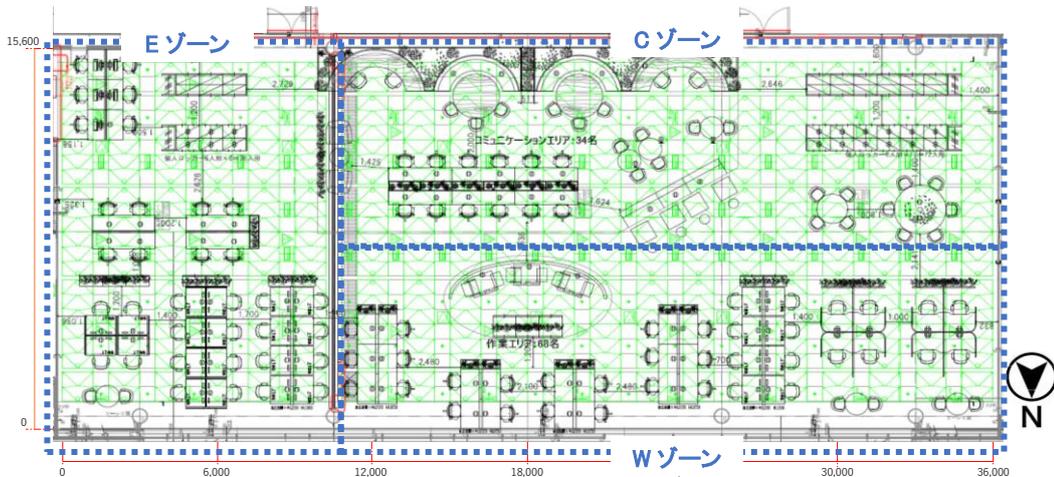


図9 解析対象室のキープラン



図10 空調システムの概要

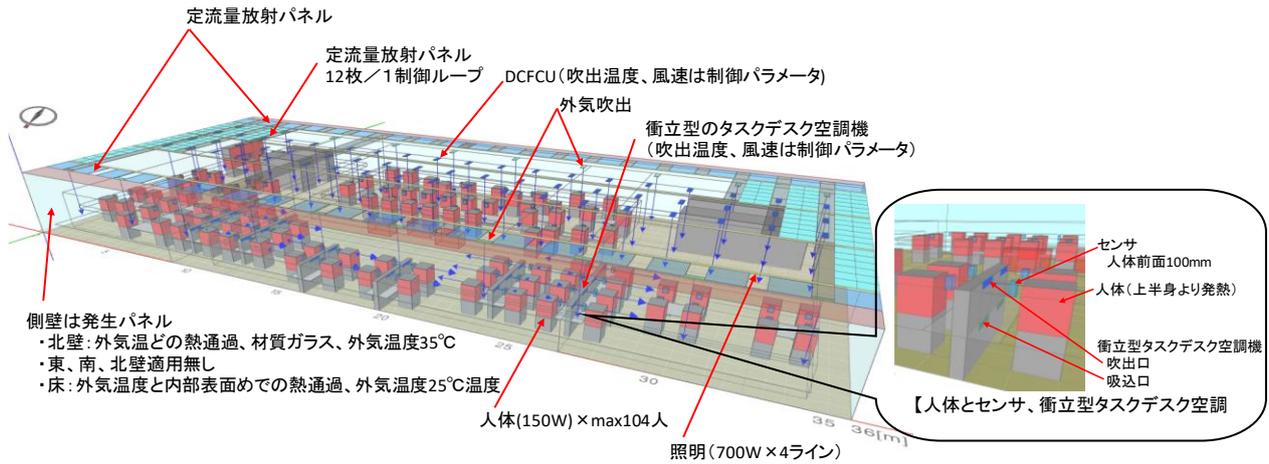


図 11 CFD の解析モデル

4.1.2 解析フロー

解析フローを図 12 に示す。FlowDesigner の実行を計算の始点として、センサ情報を出力する。外部プログラムの Excel では、ファイルの読み込みを起点に制御ロジックとして記載の演算を実行し、境界条件となる給気温度、風量などをファイル出力する。以降、これらの処理を演算終了判定条件まで繰り返す。なお、本報の連成解析では出力ファイルをインターフェースとしているので、FlowDesigner と Excel で計算のステップ数を合わせる必要がある。

4.1.3 解析条件と解析ケース

解析条件と解析ケースを表 1 に示す。解析条件は、通常の CFD と同様の設定である。解析空間外との境界条件は、壁、床は熱授受を考慮し、天井面は外気および DCFCU の吹出風量をブランクパネルから自然流入条件としている。解析ケースは、外気給気および南北の定流量放射パネルをベース空調とし、空間内部の変流量放射パネル、DCFCU、衝立型タスクデスク空調機の運転/停止をパラメータとしている。

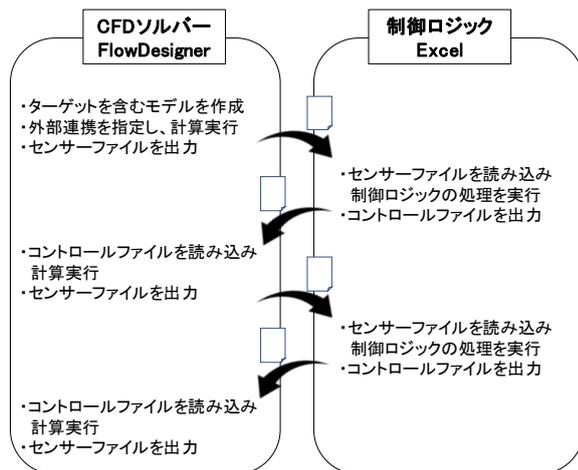


図 12 連成解析のフロー

表 1 解析条件と解析ケース

【CFD解析条件】							
メッシュ数	480(X) × 208(Y) × 40(Z) = 3,993,600						
乱流モデル	Kε						
吹出口	外気 タスク						
吸込口	自由流入条件						
壁面境界	速度 一般化対数則						
	温度 対流熱伝達率(6.0 W/m ² K)						
隣室温度	25°C						
内部発熱	照明	700 W × 4列					
	人体	PC含め150 W/人					
	プリンタ	150 W × 3台					
	大型モニタ	200 W × 2台					
【解析ケースとパラメータ】							
case	外気給気		天井放射パネル		個別空調		解析方法
	風量 (m ³ /min)	温度 (°C)	定流量型冷却能力 (W)	変流量型 (W)	DCFCU 吹出風速 (m/sec)	衝立型 吹出風速 (m/sec)	
Case-1	2.28 × 20 ^{*1}	20	80 × 38 ^{*2}	240 × 57 ^{*3}	0	0.3	定常
Case-2				0			
Case-3				240 × 57 ^{*3}	0		
Case-4				0			
Case-5	1.14 × 20 ^{*1}	0.68 × 20 ^{*1}			OFF/ 0.1/0.3/0 .5	OFF/ 0.1/0.2/0 .3	連成、 非定常
Case-6							
連成解析	2.28 × 20 ^{*1}						

*1: 吹出口の個数 *2: 定流量型放射パネルの組数
*3: 変流量型放射パネルのグループ数

4.2 解析結果

4.2.1 空調方式による温度分布の違い

CFDの解析事例として、図13に冷房運転時ケース1での居住者座位に相当する床上1.1mのZ面温度コンターを示す。プリンター、大型モニタなど局所的な発熱負荷周辺は温度が高くなるものの、人体周辺の温度分布はさほど大きくない。図14に解析ケースごとのゾーン別センサ位置での最高最低と平均温度を示す。Case-1,2とCase-3~6の比較からタスクデスク空調機を運転した場合は、最高最低の温度差が大きくなるのがわかる。また、Case-1とCase-2、Case-3とCase-4の比較から天井放射を停止すると、各ゾーンともわずかに温度差が大きくなることを確認した。さらに、空調方式の組合せ、外気給気量の変更に伴い、センサ部の温度変化が見られた。

以上の結果、空調方式による温度分布の違いが確認できた。なお、実測値との比較ができていないため、解析モデルの妥当性は今後の検証となる。ただし、発熱近傍のブルームなど基本的な流れ場が再現されていることから、相対的な比較は可能と判断する。

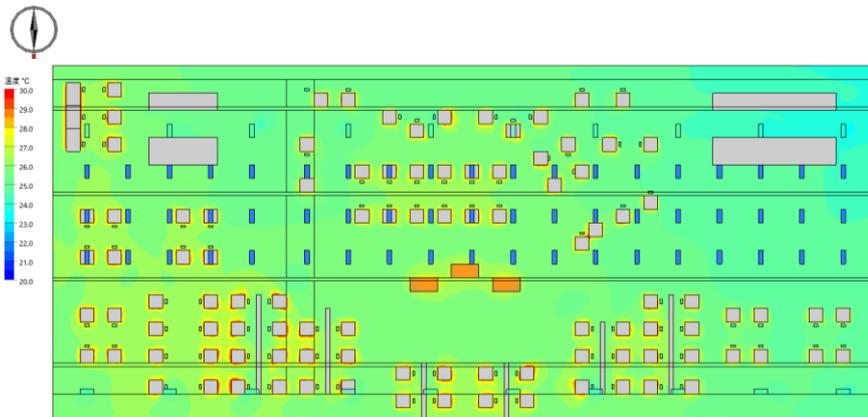


図13 CFDの解析結果の一例(Case-1 Z=1.1m)

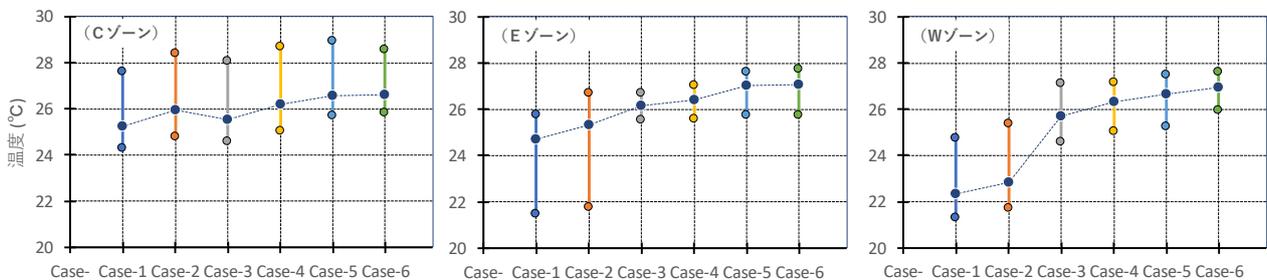


図14 解析ケースによる温度変化

4.2.2 連成解析による個別空調の効果

図15に人体の前方100mmに位置するセンサ温度から個別空調を自動制御した連成解析の一例を示す。センサ温度が26°Cを超えると冷風を送風し、さらに温度が高くなると冷風の風速を大きくし、給気温度を下げるという制御ロジックが組み込まれている。図16にセンサ温度の制御目標値が26°Cと25°Cの解析結果を示す。室温の初期値を25°Cとして30分間の変動を示しているが、解析の収束性と目標値の違いよりゾーン内での室温変化の違いが確認できた。さらに、今回の制御ロジックでは、個別空調の稼働率が平均35%程度となる結果を得た。これらから、本解析手法は、搬送動力の削減と居住域の快適性を両立させる個別空調の運転検討に有用なものとする。

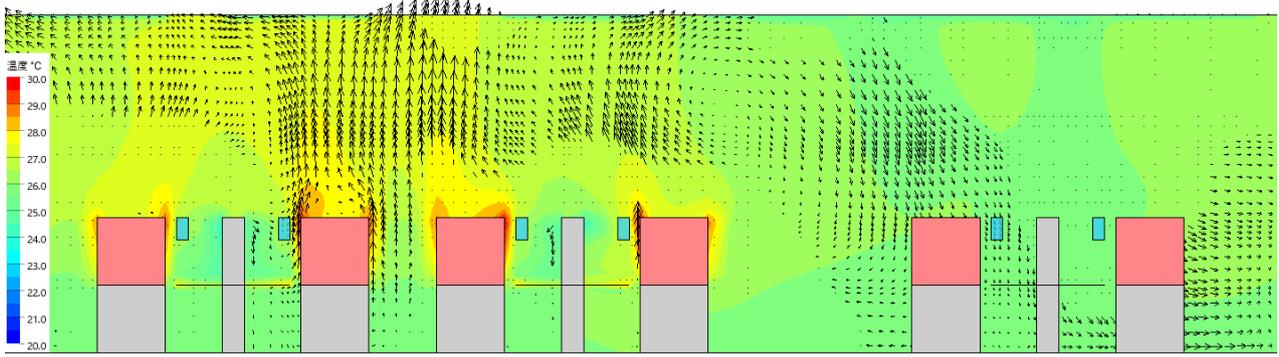


図 15 連成解析結果の一例

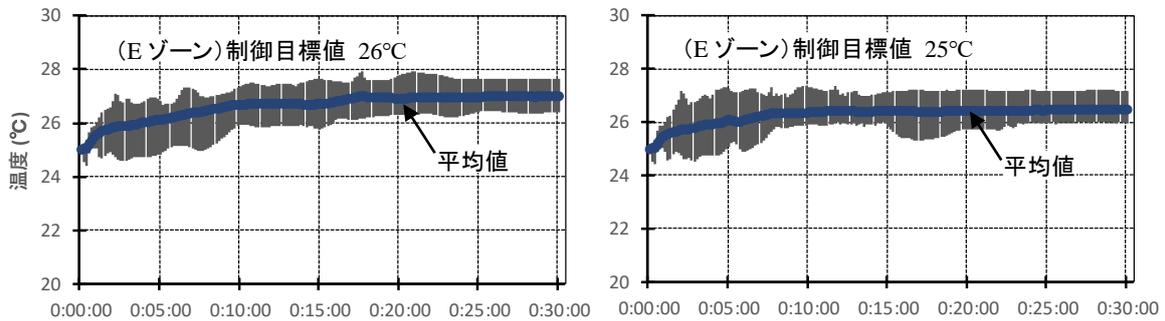


図 16 連成解析による温度分布の推移

5. おわりに

クラウド技術および無線通信技術という最新の ICT を活用した中央監視を実装し、約 4,750 m² の TIC オフィス棟において管理点数 4,500 点という詳細な運転データを収集記録している。さらに、クラウド中央監視システムを構築したことで、24 時間稼働設備に対しても夜間無人での管理が実現できている。

また、オフィス内の空調自動制御と CFD の連成解析が実現できたことで、フリーアドレス・レイアウトのオフィスにおいてダイナミックな負荷変動と執務者の環境要求の変化に応えながら、快適性と省エネルギーが両立できる運転の可能性を得た。これには、モデル予測制御など先進の制御アルゴリズムが必要で、今後の課題となる。

ICT は日々進化しているので、今回実装の技術に留まらず中央監視関連の機能向上に寄与する技術を今後も取り入れ、システムのブラッシュアップとここで実証した技術の普及展開に取り組んでいくつもりである。

文 献

- 1) 鈴木ほか: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6報)クラウド中央監視システムと無線通信システムの構築, 2020 年度空衛学会大会(オンライン), J-35, pp.165-168(2020.9)
- 2) 柴田ほか:フリーアドレス・オフィスにおける空調システムの最適化制御 CFD と制御ロジックの連成解析, 2020 年度空衛学会大会(オンライン), J-27, pp.133-136(2020.9)
- 3) 武藤ら:エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第1報), 2019 年度空衛学会大会, B-24, pp.185~188, (2019.9)
- 4) 木村ら:エネルギー自立型サステナブル研究施設 二次側空調システム及びセンシングシステムの概要, 2020 年度イノベーションセンター報, (2021.3)
- 5) フローデザイナー2019リファレンスガイド, p.788

ABSTRACT

Takasago Thermal Engineering Innovation Center has introduced an advanced central monitoring system (BACS) that makes full use of ICT. Based on cloud computing, this BACS consists of three parts: a central cloud monitoring server and clients, an on-premise monitoring server and clients, and a mobile operation terminal. Furthermore, wireless communication technology is adopted for big data measurement, and realized detailed temperature measurement of the office space. Aiming to develop these central monitoring systems, we are demonstrating a cloud monitoring system with the 5G, which is the next-generation communication network. In addition, the air conditioning load dynamically fluctuates in the office due to the non-territorial office layout (hot-desking). In the future, we plan to perform automatic control for optimal operation while predicting load fluctuations. As the preliminary step, we attempted a coupled analysis of automatic control in the office space and computational fluid dynamics (CFD).

エネルギー自立型サステナブル研究施設 ～新素材・新材料を用いた施工の合理化～

湯浅憲・鈴木崇浩・千葉俊
平原美博・清水昭浩・柴田克彦
羽鳥大輔*¹・武藤由香*¹

Construction Rationalization with New Materials in the Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center

Ken Yuasa・Takahiro Suzuki・Suguru Chiba
Yoshihiro Hirahara・Akihiro Shimizu・Katsuhiko Shibata
Daisuke Hatori・Yuka Mutoh

我々は現場施工業務の効率化を目的とし新しい工法の開発、新材料の探索や検証、業務効率化ツール等を開発してきた。今回、高砂熱学イノベーションセンターの建設にあたり、配管設備においては、アルミ複合ポリエチレン管（以降、アルミ三層管）を、ダクト設備においては、内貼断熱ダクトを採用した。実現場での採用にあたり、施工の際に課題となるポイントの抽出とその解決方法を確立するとともに、新素材・新材料の持つ性能の検証を実施した。最終的に、実現した施工の合理化を定量的に検証した。

1.はじめに

建設業就業者は、55歳以上が34%、29歳以下が約11%と高齢化が進んでおり¹⁾、将来の大量離職に伴う作業員の減少が大きな問題となっている。なかでも、配管工や保温工のような専門技術を必要とする作業員の不足は顕著であり、早急な対策が求められている。

施工の現場では、上記問題の解決を目的とし、管理方法、施工方法、新しい材料、等に対して様々な検討・提案を行っている。今回、高砂熱学イノベーションセンターの建設において施工の合理化を実現するために、新素材・新材料として、アルミ三層管と内貼断熱ダクトを用いた省力化工法を採用した。本報では、その効果について報告する。

2. アルミ三層管

2.1 アルミ三層管の特徴

2.1.1 構造と仕様

採用したアルミ三層管は、図1に示す構造であり、耐圧性能、防食性能に優れている。重量は、従来使われる

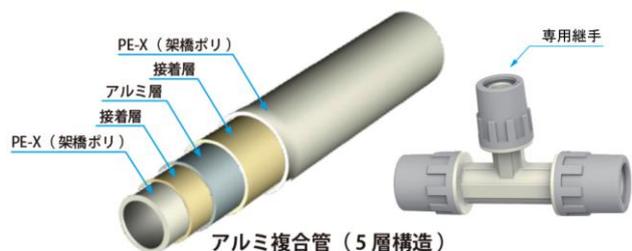


図1 アルミ三層管部材(配管径 13A～65A)²⁾

※1 株式会社三菱地所設計

配管用炭素鋼鋼管（以下、SGP 配管）の 1/5 と軽量なため、搬入や組付け作業等において扱いやすく、安全性の向上も期待できる。また、配管の組付けは袋ナットを締切るだけの専用継手が用意されており、作業者の技能に依らず接合部の漏れを防止できる構造である（図 2）。

2.1.2 技能習得のしやすさ

SGP 配管では、ねじ切り作業に熟練度を要するが、本部品材は、ねじ切り作業が不要である。誰でも同じ品質の作業が行えるよう専用工具で作業が標準化されている（図 3）ため、技能習得しやすい。数時間の技能認定研修で作業を習得可能で、研修修了者には技術認定書が発行される。作業工数は配管切断、拡管、組付けと SGP 配管に比べて少なく、作業時間も短縮できる（図 4）。本部品材の特徴を活かし、専門技術を有さない多能工でも配管工事を行えないか検討を進めた。

2.2 作業工程の見直しと現場作業の改善

2.2.1 技能習得への課題

継手接続部の直管端部を拡管するため、拡管前後で直管の長さが増える（表 1）。接合部は、継手部品材に直管が呑まれる仕様となっている（表 2）。継手部品材は、継手同士の接続が可能なものも含め、多種多様なものが用意されている（図 5）。

知見の少ない未熟練者では、配管サイズごとに異なる拡管時の短縮寸法や、継手の種類ごとに異なる配管呑込み寸法を考慮して、施工図通りに直管を加工し、組付けることには課題がある。

そこで、現場作業を組付けのみとし、工場でのプレハブ加工をする分業化を進めた。

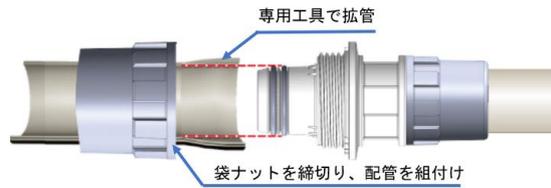


図 2 接合部の構造²⁾



図 3 作業フロー²⁾

(SGP) 直管切断 → ねじ切り → 洗浄 → シール
→ 組付 → 錆止め塗装

(アルミ三層管) 直管切断 → 拡管 → 組付

図 4 作業工数比較

表 1 直管拡管時の短縮長さ²⁾

配管外径	拡管後短縮寸法 (mm)
13A	-1.0 ~ -2.0
15A	-1.0 ~ -2.0
20A	-1.0 ~ -2.0
25A	-1.5 ~ -2.5
32A	-2.0 ~ -3.0
40A	-3.0 ~ -4.0
50A	-4.0 ~ -5.0
65A	-4.0 ~ -5.5

表 2 継手部品材の直管呑込み長さ²⁾

配管外径	直管呑込み寸法 (mm)
13A	21.0
15A	22.0
20A	26.5
25A	29.0
32A	33.0
40A	42.0
50A	54.0
65A	66.0



図 5 継手部品材(一部を記載)¹⁾

2.3 工場作業の改善

2.3.1 プレハブ工法の課題

工場ではプレハブ加工を行うことで、現場内の工数削減と安定した品質の確保を図れる。その反面、プレハブ工法では、現場加工で不要な加工図や部材表等（以下、工場製作図）の作成や組付け品の管理や現場搬入が必要になり（図6）、作業が増える課題がある。そこで、工場作業を改善すべくプロセスの見直しを図った。

2.3.2 プレハブ工法のプロセス見直し

従来、工場製作図は施工図とは別に作成しており、作図と調整に時間と手間を要する。施工図データに、加工管製作に必要な情報を追加できれば、施工図から製作図の自動作成が可能になりデータを一元化できる。そこで、施工図作成時の部材データに、プレハブ加工に関する情報を持たせた BIM パーツを整備することにした。

2.4 BIM データ整備

2.4.1 BIM パーツの整備

直管部材は、組付け後の配管長さだけでなく、配管サイズごとの拡管時の短縮寸法を持つ BIM パーツにすることで、直管切断長さを施工図作成時、自動的に算出できる。継手部材は、外形寸法や継手の構成部品の寸法、直管の呑込み長さ、継手芯の寸法、それ以外に継手同士を接続した際の寸法情報を、継手種類、サイズ、組み合わせごとに持つ BIM パーツにすることで、選択した継手に合わせて直管長さを自動更新できるようになる。施工図上の寸法、加工用の寸法、加工時の確認用の寸法と各工程で必要な寸法を算出できるように、メーカーに値を確認し、複数の寸法情報を持つ BIM パーツを作成した（表3）。

2.4.2 製作図作成作業の削減

BIM パーツを利用して施工図を描けるように、継手部材の組み合わせ、各部材の接続条件、寸法の基準点、作図手順、加工ユニットの割付方法の調整を行った。これにより、施工図データ（図7）から加工管図（図8）、部材表、部材集計表（表4）、を自動生成できるようになった。

加工管図は、平面図に記載のユニット番号ごとにシートが作成される。加工管の平面図、断面図、3D 図と使用部材、加工寸法等の情報を確認できる。部材表は、ユニット番号ごとに使用している部材情報の一覧で、直管部材は組付け後の長さや切断寸法の記載がある。部材集計表は、部材の品番ごとに必要数を集計したものであり、直管部材は定尺長さの必要数に計算されているため、本数量をそのまま発注に利用できる。

製作図が自動生成できるようになったことで、施工図を確認し、サイズ、継手種類、組み合わせごとに直管切断の寸法計算や、従来別様となっていた工場製作図の作成が不要になった。

図面に記載する情報は、配管施工者及び工場加工担当者と相談して詳細を詰めた。加工管は、現場への搬入や現場内の組付け作業のしやすさを考え、シンプルな形状とした。加工管図は、切断寸法、拡管後の寸法、組付け後の確認に必要な寸法と、各工程の作業が必要の情報を見やすく記載した。寸法の基準点は、関係者と意見交換し、継手ごとに確認しやすいポイントとした。

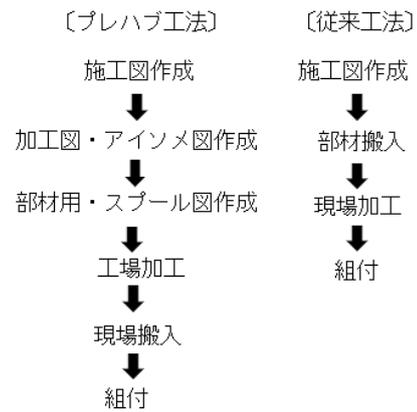
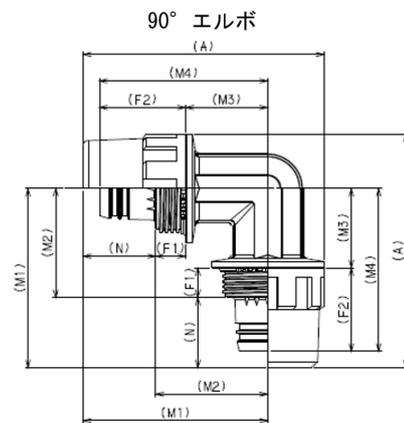


図6 プレハブ工法のプロセス

表3 継手部材の設計情報²⁾



品番	配管外径	寸法 (mm)							
		A	M1	M2	M3	M4	F1	F2	N
TOYX-20382	13A	68.5	55.0	34.0	24.5	52.5	9.5	28.0	21.0
TOYX-20386	15A	74.6	58.3	36.3	26.3	55.5	10.0	29.2	22.0
TOYX-20388	20A	88.0	67.5	41.0	30.0	61.5	11.0	31.5	26.0
TOYX-20390	25A	101.5	76.5	47.5	35.0	69.0	12.5	34.0	29.0
TOYX-20392	32A	118.0	88.0	55.0	40.5	77.5	14.5	37.0	33.0
TOYX-20394	40A	140.5	104.0	62.0	46.0	91.0	16.0	45.0	42.0
TOYX-20396	50A	178.5	131.0	77.0	57.0	112.0	20.0	55.0	54.0
TOYX-20398	65A	212.0	154.5	88.5	68.5	131.5	20.0	63.0	66.0

従来は、施工図と工場製作図が別管理となり整合が取れていないなどの問題が発生することがあったが、施工図データで情報を一元管理できるようになり、施工図と工場製作図の整合も取り、現場と工場の調整がしやすくなった。

2.5 工場加工の検証

検証用図面から作成した加工管図を元に、工場加工が可能か、作成した加工管で施工図通りに施工ができるか検証した。加工管図は、図面の見やすさや、工場加工に必要な情報が整理されているため工場加工担当者から高評価であったが、組付けした配管長さと同面上の長さに一部差異が生じた。

継手部材にレジャーサー部材を接続する場合(図9)は、継手についていた袋ナットを取り外し、レジャーサー部材を接続するが、その情報がBIM パーツにないことが原因であった。全ての部材の組み合わせを検証し、図面と製作物の寸法が一致することを確認した。

2.6 実物件での導入効果

2.6.1 工場製作

今回の取り組みにて、プレハブ加工で従来別途行っていた工場製作図の作成が施工図作成と同時にできるようになり、製作図作成の手間を削減できた。

部材の手配は、施工図から生成した部材集計表で行ない、誤発注を防ぎ不要材を削減できた。アルミ三層管の工場加工は、切断、拡管、継手部材の組付けであり、加工に必要な情報は、加工管図に

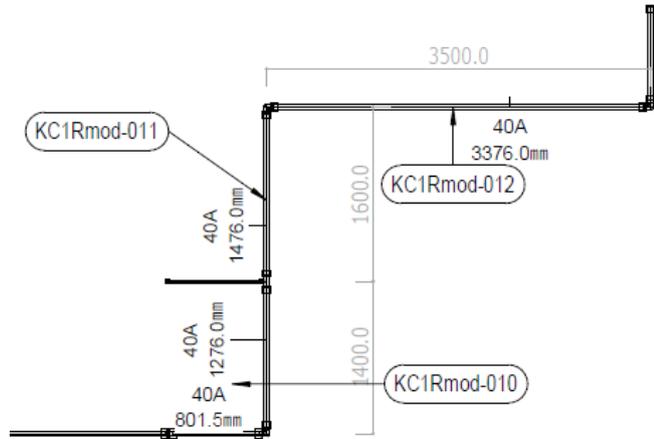


図7 施工図

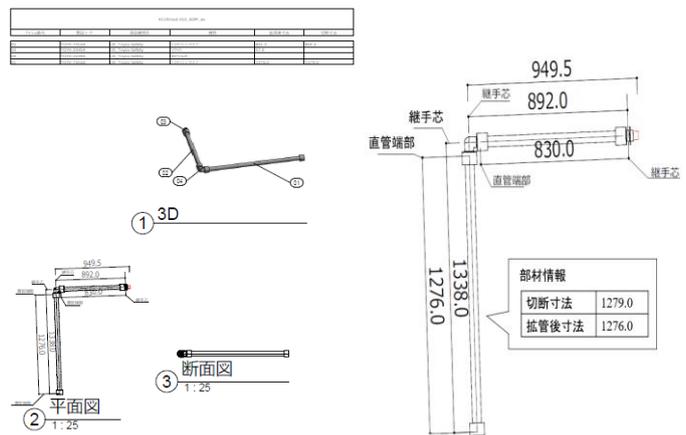


図8 加工管図

表4 部材表、部材集計表²⁾

部材表					
加工図番号	部材	品番	サイズ	長さ (mm)	切寸法
KC1Rmod-008	ニップルレジャーサー	TOYX-20156	40-25A		2.5
KC1Rmod-008	直管	TOYX-74160	25A	3998.0	4000.0
KC1Rmod-009	直管	TOYX-74164	40A	3997.0	4000.0
KC1Rmod-009	ソケット	TOYX-20454	40A	57.0	
KC1Rmod-010	配管	TOYX-74164	40A	801.5	804.5
KC1Rmod-010	ソケット	TOYX-20454	40A	57.0	
KC1Rmod-010	90° エルボ	TOYX-20394	40A		
KC1Rmod-010	直管	TOYX-74164	40A	1276.0	1279.0
KC1Rmod-011	レジャーサーチース	TOYX-20756	40-20A	92.0	
KC1Rmod-011	配管	TOYX-74164	40A	1476.0	1479.0
KC1Rmod-012	配管	TOYX-74164	40A	3376.0	3379.0
KC1Rmod-012	90° エルボ	TOYX-20394	40A		

部材集計表				
部材	品番	サイズ	必要数	規格
直管	TOYX-74160	25A		1L=4000
直管	TOYX-74164	40A		3L=4000
90° エルボ	TOYX-20394	40A	2	
ソケット	TOYX-20454	40A	2	
ニップルレジャーサー	TOYX-20156	40-25A	1	
レジャーサーチース	TOYX-20756	40-20A	1	

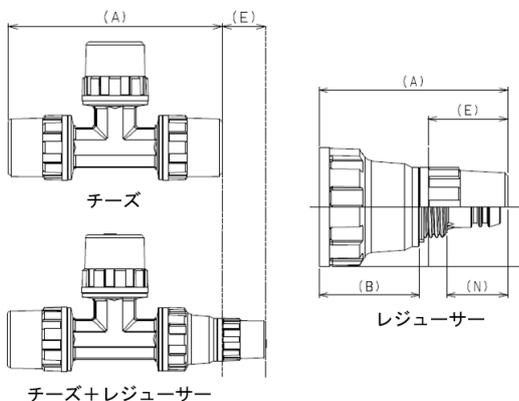


図9 部材とレジャーサー部材の接続²⁾

全て記載しているので、工場加工担当者の技能習得もしやすくなった。

2.6.2 現場施工

施工範囲の一部を配管工事の経験のない多能工にて組付けを行った（写真 1）。短時間の研修を受けたのち、配管工事業者と共に、指導を受けながら施工したが、しばらくすると指導なしに施工が行えるようになった。

SGP 配管で必要な錆止め塗装が不要になり、アルミ三層管は、軽量で袋ナットを締切るだけの作業のため、SGP 配管に比べ施工人工数を 6 割程度削減できた。更に、多能工にて墨出し作業や壁貫通部の開口作業、防火区画の耐火処理など、配管工事の前後作業に対応できるため一貫した作業が可能になった。

2.6.3 施工管理

加工図データに組付け後の加工管寸法が記載されているので受入検査記録のシートとして活用できる。納品管理は、加工管ごとに付与したユニット番号で行うことで工場と調整しやすくなった。平面図に現地の取付状況を記録し、データを共有することで工場担当者は、現場施工の進捗状況を把握しやすくなった（図 10）。

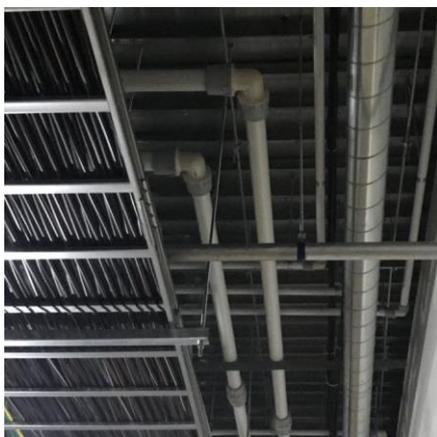


写真 1 施工写真

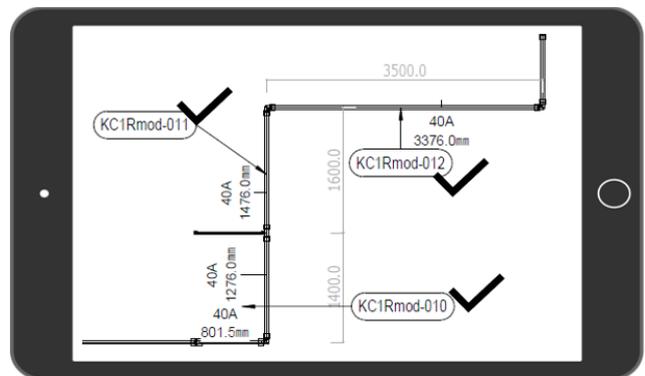


図 10 部材とレジャーサー部材の接続²⁾

2.6.4 従来の方法とのコスト比較

空調配管へのアルミ三層管の採用事例はまだ少なく、海外製の部材であるため、材料費が高くなる。今回の取り組みにて、現場作業の工数削減、作業の効率向上を行ったことで、施工人工数を削減できたが、材料費・工費を合わせたコストを SGP 配管と比較すると 3 割増であった。コスト面の課題が残るが、多能工にて配管工事の前後作業も含めて一貫した作業が行えるため、将来的なコスト削減が期待できる。

3. 内貼断熱ダクト

3.1 新材料の提案

建築設備工事において、ダクト設備関連の工事は「施工図面に準じてダクトを工場製作し現場にて組付けする」作業が行われており、プレファブ化が進んでいる施工業種である。今回、共板フランジ工法を用いたダクト設備施工において、さらなる現場作業の省力化を目的とし、新材料の開発を行った。

開発した新材料による工法では、工場において内面に断熱材を貼付けたダクトを製作し現場へ納入することで、現場におけるダクト保温作業の削減（現場作業人工数の低減）や品質の均一化を実現する。

3.1.1. 内貼断熱ダクトの特長

表面をポリクロスアルミ箔で覆った独立気泡断熱シートを、カットした亜鉛鉄板に貼り付け、そのまま折り返しダクトとして成形した。内貼断熱材の貼付け範

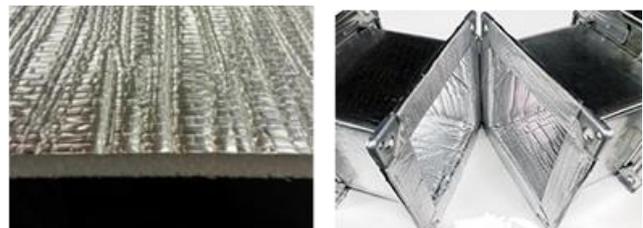


写真 2 内貼り断熱材表面、ガスケットとの一体化

囲をフランジ部まで広げることで、断熱材とガスケットを一体化した（写真2）。この形状によって、内貼断熱材をフランジで挟み込むことになり、内貼断熱材の脱落が防止できると同時に、現場におけるダクト組付時にフランジ部へのガスケット取り付けが不要となり作業工数が低減できる。また、内貼断熱材とガスケットの一体化により、フランジ部からの漏気を減少させる効果が期待できる。

3.1.2. 検証項目

内貼断熱ダクトは従来のダクトと比較し、断熱材厚さ分の断面欠損が生じる。同風量においては、風速が増大するため通風抵抗が増加し、送風機に求められる能力（静圧）が増大する。通風抵抗の増大を考慮した場合、内貼断熱材の厚さは極力薄くする必要があるが、断熱材の薄肉化によってダクトの熱貫流率が大きくなり、放熱ロスの発生や外面結露の発生が懸念された。

一方で、フランジ部のガスケット機能を内貼断熱材と一体化することで、より高いシール性能を得ることができ漏気量が低減されることが期待できた。

施工導入前の性能検証として「漏気量の減少効果」「断熱性能の確認」「通風抵抗（圧力損失）の確認」を実施した。

3.2 性能検証試験

3.2.1 漏気量減少効果に関する検証

(1) 試験方法

ブローファンと、測定レンジが異なる4台の流量計を組み込んだ気密性能測定装置（図11）を用いて漏気量の検証を行った。測定装置の流量計で試験ダクトへの送風量を計測し、ダクト内外圧力差が定常状態と判断された時の送風量をそのダクト内外圧力差におけるダクトからの漏気量として検証を行った。

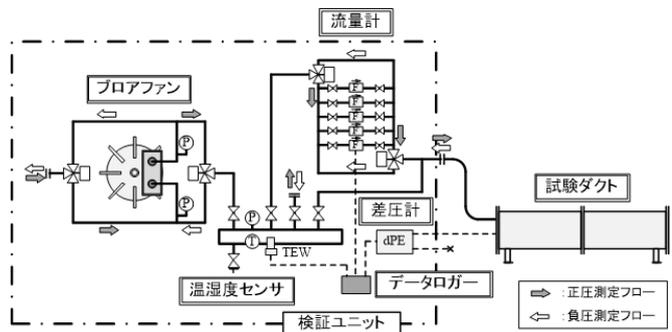


図11 気密性能測定装置

試験サンプルは板厚0.5mm、継目にボタパンチはぜ、のダクトを用い、下記①～④に示す断熱を施した。400W×400H×1,740Lのダクトを2本接続し、その両端は封止した。また、その支持ピッチは3,000mmとし、SHASEでの確認試験同様に中心に80kgの載荷を行った。

- ① ブランクダクト（断熱を貼り付けない）
- ② 外貼断熱ダクト（フランジカバー（FC）無）
- ③ 外貼断熱ダクト（フランジカバー（FC）有）
- ④ 内貼断熱ダクト

(2) 試験結果

漏気量測定試験結果を表5と図12に示す。

ブランクダクトと比較し、外貼断熱ダクトでは漏気量を48.7%低減し、フランジカバーを取り付けることでさらに8.6%低減した。また断熱材を内貼りとすることで、ブランクダクトと比較して漏気量を88.7%低減した。

外貼断熱ダクト、内貼断熱ダクトともに、ブランクダクトと比較して継手、継目を断熱材でふさぐため、漏気量の低減効果がみられた。特に、内貼断熱ダクトでは断熱材を、はぜ部からフランジ部に対して継目なく貼り付けることができ、漏気量を大幅に低減できた。外貼断熱ダクトでは、凹凸が大きいフランジ部を密閉する

表5 各ダクトの仕様における気密係数（K値）

試験体	ブランクダクト	断熱ダクト	
		外貼10mm FC無	FC有
気密係数 K値	1.91	0.98	0.82
指数表示	100	51.3	42.7

SHASE 制限空気漏量 低圧：1.5, 高圧1：0.75

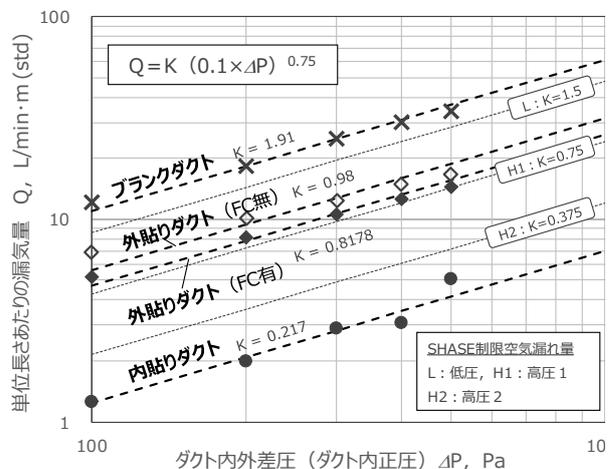


図12 各条件における漏気量

ことが難しいためフランジ部からの漏気量を十分防止することができず、漏気量低減効果は内貼断熱ダクトと比較して小さくなったと推察される。

内貼断熱ダクト（共板フランジダクト）は、高圧2仕様のダクト以上の気密性能を有していることが分かった。漏気量の低減は、送風機の搬送動力の削減に寄与する。

3.2.2 断熱性能に関する検証

内貼断熱で使用した断熱材（独立気泡断熱材：0.041W/mK）は、従来工法でダクトに使用する断熱材（グラスウール保温板40kg/m³）：0.052W/mKと比較すると素材単体の断熱性能は優れているが、実際に使用する際の断熱材厚さが、4mm（もしくは10mm）となり、従来工法（厚さ25mm：天井内隠ぺい仕様3）より熱貫流率が大きくなる懸念があるため、断熱性能に関する検証を実施した。

(1) 試験方法

夏期冷房時を想定し、ダクト内送風空気の状態を、風速2.5m/s、乾球温度12°CDBとし、外周囲温度を25～35°CDBに変化させてダクトの外表面温度を計測し、結露発生の周囲温湿度条件をまとめるとともに、目視による結露発生の状況を確認した（図13）。

(2) 試験結果

測定したダクト外表面温度を図14に示す。測定結果は、30°CDB条件下でダクト表面温度は20.5°Cを示した。これは、ダクト周囲環境が30°CDB、57%RHで結露が発生することを示す。

送風温度=12°CDBの条件で、ダクト外表面へ結露が発生する条件を空気線図上に示す（図15）。RA天井チャンバ方式を採用している場合、天井内（SAダクト周囲）の温湿度は部屋と同程度と考えられるため、内貼断熱ダクト外面への結露の発生は少ないと考えられる。

従来ダクトと比較し、SAダクトから周囲への冷熱のロスが大きくなるが、RA天井チャンバ方式の場合、漏洩した冷熱はRAの冷却に使用されることで回収され、その影響は小さいといえる。

同条件で、外貼断熱ダクトの試験も行った。外貼断熱ダクトは、フランジカバーの周囲で結露が発生した。これは漏気がフランジ付近に集中することが原因と考えられる。

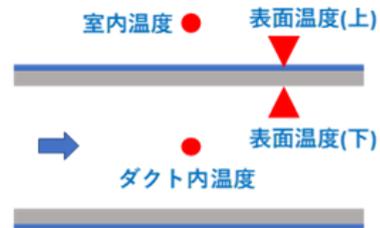


図13 ダクト内外の温度測定箇所

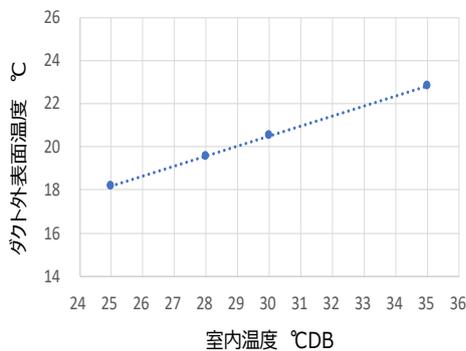


図14 ダクト外表面温度

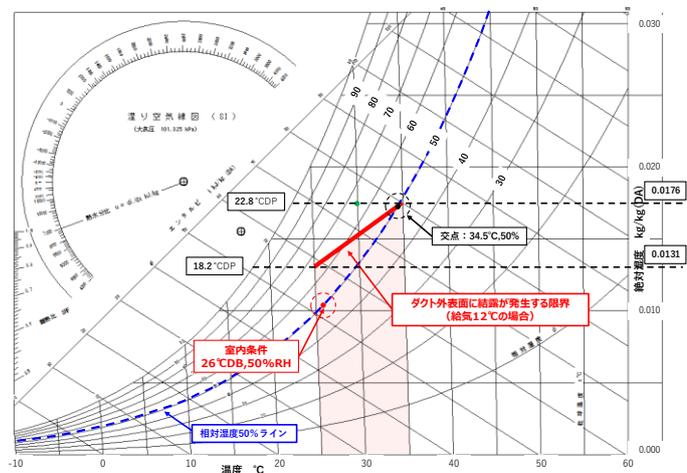


図15 結露発生条件(送風温度=12°CDB)

3.2.3 通風抵抗(圧力損失)増大に関する検証

(1) 試験方法

本工法は、ダクト内面に断熱材を貼付するため、従来のダクトと比較して、断熱材厚さの分だけ断面欠損が生じる(400W×400Hのダクトに厚さ4mmの内貼断熱を施した場合、有効断面積が約2%減少)。また、発泡断熱シートは写真2に示すように、内表面のアルミシートに凹凸があり、従来の亜鉛メッキ鋼板ダクトと比較して圧力損失が増加することが考えられた。そのため、従来のダクトに対して発泡断熱シートを内貼りすることによってどの程度通風抵抗が増加するかを実測によって検証した。

圧力損失を計測するための送風試験装置を写真3に示す。インバータを用いて送風機の回転数を任意に制御した。多点ピトー式風速センサと微差圧計を用いて計測した風速と、ダクト面積より送風量を算出した。供給口以降に設置された試験サンプルの圧力損失を制御盤上の微差圧計を用いて計測した。

試験サンプルには400W×200Hのブランクダクト(一般亜鉛めっき鋼板ダクト)およびそれに厚さの異なる2種類の内貼断熱を施したダクト(t=4mm、10mm)で試験を行った。

追加試験として、400×200のダクトに厚さ10mmの内貼断熱を施したダクトと、有効断面積を揃えたダクト(380×180)で比較試験を行った。

(2) 試験結果

400×200ブランクダクト、内貼4mm、内貼10mmの3種類に対して、断面積、風速、風速より算出した圧力損失を、ブランクダクトを100とした指数表示にて表3-2に示す。内貼断熱材の厚さが10mmでは、断面積の減少率が大きく(▲15%)、圧力損失はブランクダクトの1.4倍程度になることが予測された。ただし表6の数値は、400×200のサイズのダクトに関する結果であり、サイズが大きくなるにつれその影響は小さくなる。

圧力損失の実測結果を図16に示す。圧力損失は内貼10mm>内貼4mm>ブランクダクトの順で大きかった。圧力損失の増加割合は、表6の数値よりやや大きい結果となった。これは写真2に示す通り断熱材の表面に凹凸があり、ブランクダクトと比較して内面粗度が大きいためと考えるものの、内面形状の定式化までには至らなかった。

追加試験(断面積を揃えて実測)の結果を図17に示す。ほぼ同値の圧力損失を示しているものの、内貼断熱ダクトのほうがわずかに圧力損失が大きいことが分かった。内面粗度の違いが圧力損失に影響したと考えられる。

試験結果より、「内貼断熱により圧力損失は僅かに増大するが、内貼断熱厚による断面欠損を考慮したサイズのダクトとして圧力損失の計算が可能」といえる。



写真3 送風試験装置

表6 断面積、風速、圧力損失の比較

	断面積	風速	圧力損失
	ブランクダクトを100とする		
内貼4mm	94.1	106	113
内貼10mm	85.5	117	137

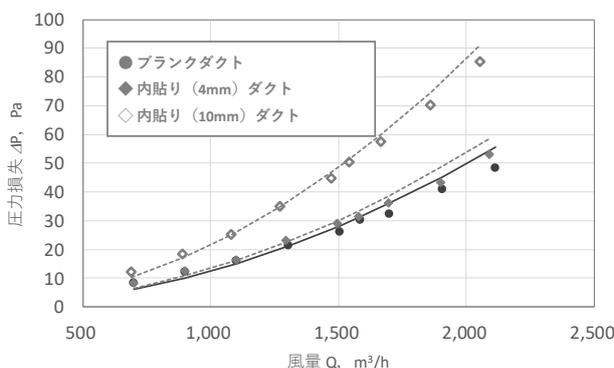


図16 通風抵抗の実測

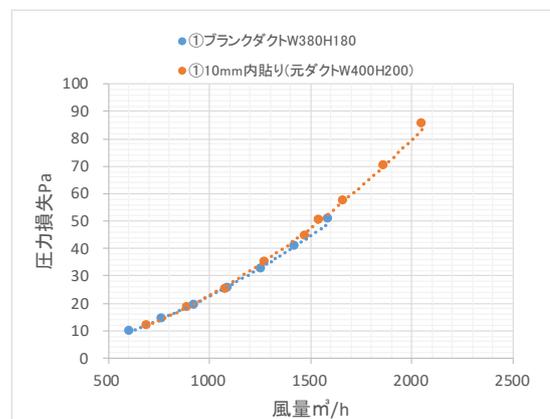


図17 断面積を揃えて圧力損失を測定した結果

3.3 現場作業員数の低減効果の試算

内貼断熱ダクトを用いた施工は、ダクト断熱の工程をダクト製造工場で行うため、建築現場における作業員数削減が可能となる。ダクト施工に関する現場作業員数の低減効果を試算した。

3.3.1 試算条件

比較のためのモデル現場条件を以下に記す。比較するダクトは、共板フランジ工法、天井内隠ぺい仕様とした。

- ・ 想定するダクト面積 : 1,000m²
- ・ ダクト施工歩掛⁴⁾ : 0.22 人/m²
- ・ ダクト保温施工歩掛⁴⁾ : 0.15 人/m²

3.3.2 試算結果

従来工法では、ダクト施工にかかる作業員数は、1,000m²×0.22 人/m²=220 人となり、ダクト保温工事に必要な作業員数は、1,000m²×0.15 人/m²=150 人となる。内貼断熱ダクトを使用した場合は、上記現場作業のうち、ダクト施工のみとなるため、保温施工に要した 150 人が削減されることとなる。その結果ダクト施工にかかる現場作業員数は、40%削減された。

作業員数の削減により、現場安全管理が容易になるとともに、業種が 2 種（ダクト工+保温工）から 1 種（ダクト工のみ）に減ることで、工程の管理の簡略化、工程遅延の防止が図られる。

4. おわりに

アルミ三層管の採用において、従来専門工の知恵と技術により成り立っていた施工プロセスを見直し、配管工事を経験したことのない多能工でも現場作業を行うことができる新しいプロセスを実現した。現場施工者の確保・育成に有効な手段となる。

また、BIM データの活用により施工図から工場製作図ができ、配管加工の自動化も見込める。今後は、オートメーション化を見据え、まだ手作業で行っている加工管の割り付け作業等の自動化や、施工図データをもとに加工機を自動設定する仕組み等、更なる作業効率の向上を図る。

内貼断熱ダクトの使用に関しては、「高温多湿環境を通過するダクトには使用しない」「送風機必要静圧の計算に留意する」等の注意を要する点があるが、「現場作業員の不足」を解決する手段として有効であることが分かった。また従来工法で、ダクト施工と保温施工で仮設足場の盛替えが必要な場面でも、内貼断熱ダクトを使用することでダクト吊込のみで施工が完了するため、仮設足場にかかる業務が削減できるなど、作業の削減効果は多岐にわたる。

文 献

- 1) 建設工事従事者安全健康確保推進会議，資料 3：建設業及び建設工事従事者の現状（国土交通省、平成 29 年）
- 2) 株式会社トヨックス：トヨセフティ技術資料，(2019)
- 3) 公共建築工事標準仕様書（機械設備工事編）（平成 31 年版）
- 4) 公共建築工事積算基準（平成 31 年版）

. ABSTRACT

We have developed new construction methods, new materials, and work efficiency tools to improve the efficiency of on-site construction work.

This time, aluminum composite polyethylene pipes were adopted in the construction of the Takasago Thermal Engineering Innovation Center. In the duct equipment, internal insulation ducts were adopted. By adopting the new construction method at the actual site, we detected the problems and verified the solutions. As the result, the rationalization of construction was quantitatively confirmed.

過冷却水方式の製氷技術を用いた水産業への事業開発※

江田真英

Business Development in the Fishing Industry with Ice Making Technology using Super-cooled Water

Masahide Eda

高砂熱学工業株式会社は、蓄熱式空調用冷熱源設備向けに、過冷却水方式の製氷技術を用いたダイナミック型氷蓄熱システム「スーパーアイスシステム：SIS®」を開発し、種々の建物の熱源設備に納入してきた。この製氷技術を応用して、水産業向けシャーベットアイス製氷・供給システム「スーパーアイスシステムーハイフレッシュネス：SIS-HF®」を開発し、水産業への事業展開に着手した。事業展開に際しては、製氷機の納入に留まらず、実際の水産現場でシャーベットアイスによる鮮魚の急速冷却効果、低温維持効果、および鮮度保持効果を定量的に評価してきた。それらの結果、遠隔地から都市圏への輸送や、海外輸出など鮮魚が消費者に届くまでに長時間を要する流通においても、鮮魚の低温と高鮮度が維持されることで、水産物の付加価値向上につながることを確認した。

1. はじめに

水産物の鮮度保持・高鮮度流通の実現のためには、漁獲から流通の各過程での低温管理が必須となる。シャーベットアイスは、それに含まれる氷粒と冷却対象物との接触面積が大きく、冷却対象物を急速に冷却することができる。

高砂熱学工業株式会社（以下、当社）は蓄熱式空調用冷熱源設備向けに、水の過冷却現象を利用したシャーベット状の水を生成するダイナミック型氷蓄熱システム「スーパーアイスシステム：SIS®」を開発し、地域冷暖房施設、商業施設、事務所ビル等、種々の建物の熱源設備に納入してきた。

2016年に、この製氷技術を応用した水産物の高鮮度保持・流通に活用する水産業向けシャーベットアイス製氷・供給システム「スーパーアイスシステムーハイフレッシュネス：SIS-HF®」を上市し、水産業への事業展開に着手した。

本報では、SIS-HF®の水産用途特有の機能、それにより製造されるシャーベットアイスの水産現場での活用事例、および鮮魚に対する低温維持と高鮮度保持の定量評価を説明する。さらに定量評価に基づいて、水産事業者の販路拡大を支援し、顧客の価値向上への貢献を目指す事業展開に向けた当社の取り組みについて説明する。

2. SIS-HF®の水産用途特有の機能

水産用途のシャーベットアイスには、一度に多量の水産物を冷却できる冷熱量と対象魚種に応じた最適な温度が求められる。加えて、空調用途での間接熱媒体としての利用とは異なり、シャーベットアイスを直接接触させて水産物の冷却を行うために、供給タンクから取り出すための流動性と利用場所までの配管搬送による供給が求められる。また、一日のシャーベットアイス利用量が海況の影響を受ける漁獲量に応じて変動することから、長時間貯水時の保冷機能も必要となる。さらに、産地市場では入場する関係業者の水需要に対して、シャーベットアイスの販売（計量と課金をする）機能が必要となる。ときには海岸直近に機器を設置することから、塩害等厳しい環境下においても機器を安定稼働する必要があり、遠隔にて機器の稼働状況を常時監視しながら、問題の予兆があれば予防措置を講ずる

「※建築とエネルギー, Vol.61, (2020年)¹⁾とBE建築設備, 6月号, (2019年)²⁾を複合し再掲」

事が可能であることが望ましい。なお、従来のブロックアイス製氷設備と比較して省エネルギー性が高いことも重要になる。

このような水産向けのシャーベットアイス製氷設備に対するニーズを具現化した SIS-HF[®]のシステム構成の概略を図 1 に示す。SIS-HF[®]は、製氷、製氷タンク、供給タンクの各ユニット、シャーベットアイス供給配管、およびシャーベット課金装置で構成されており、以下の 6 つの特長的機能を有している。

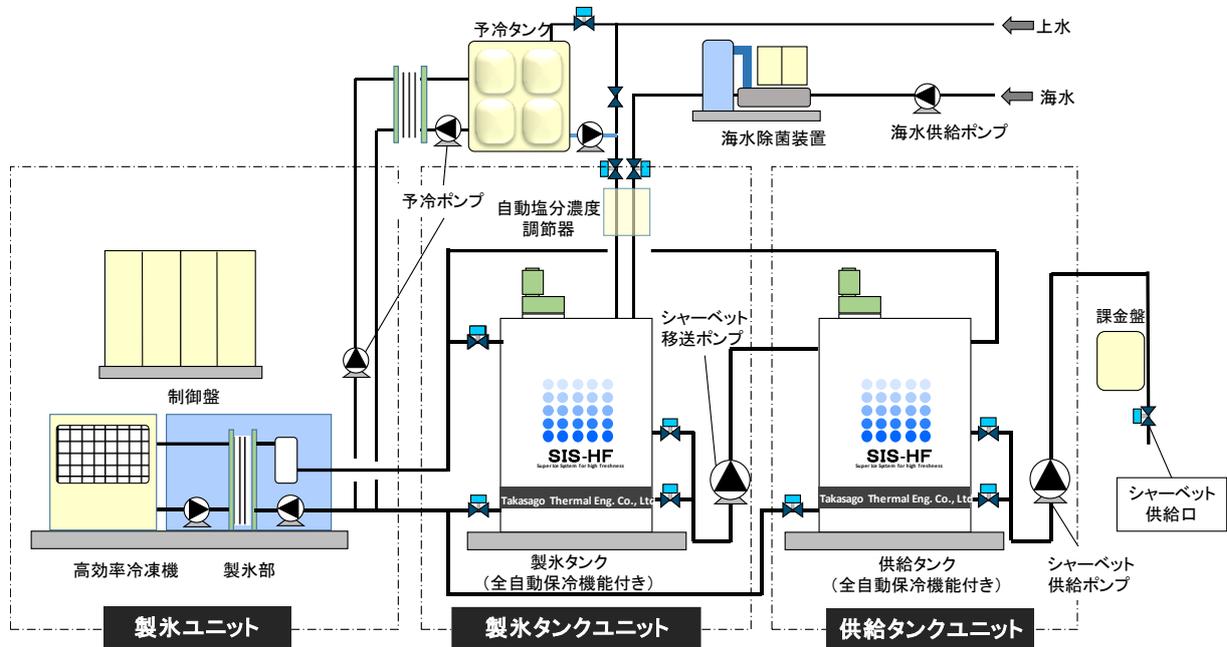


図 1 SIS-HF[®]のシステム構成

2.1 広範囲塩分濃度での 50%までの高濃度製氷

図 2 に SIS-HF[®]と、他のシャーベットアイス製氷装置の製氷部の概略を示す。冷却面に生成する氷結晶を剥離する「かきとり方式」では、製氷原水の塩分濃度が低くなると氷結晶が冷却面から剥離し難くなるため、安定製氷可能な塩分濃度の範囲は制約される。

「過冷却水方式」を採用する SIS-HF[®]では、製氷部に流入する過冷却海水に超音波の衝撃を付与することでシャーベット状の氷に相変化させて製氷を行う。これにより、製氷原水の塩分濃度に影響されることなく、対象魚種に適した温度のシャーベットアスを 50%の高い氷濃度まで安定して製氷できる。

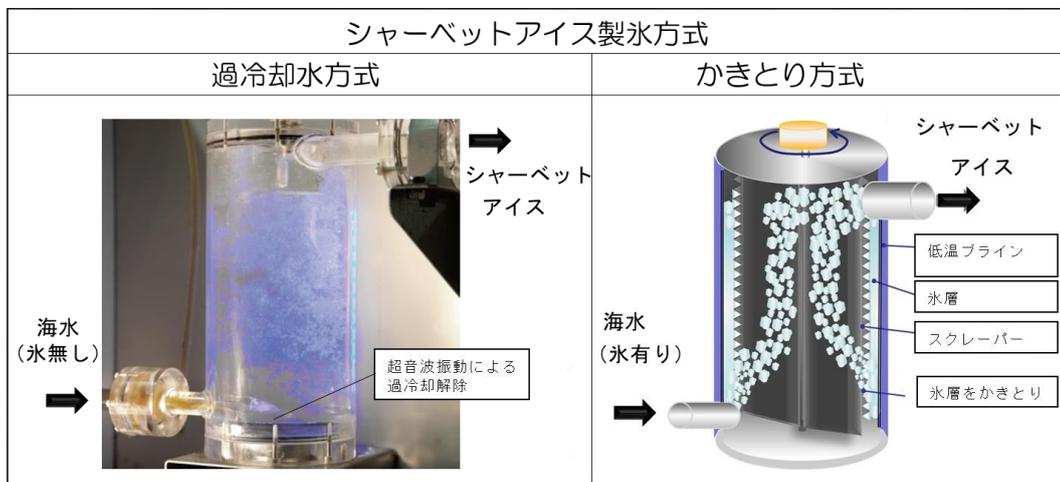


図 2 シャーベットアスの製氷方式 (「SIS-HF[®]」の製氷方式(左)と従来方式(右))

2.2 高い流動性と長距離輸送

製氷および供給タンク内のシャーベットアイスは、その流動性を維持するために常に攪拌されている。過冷却水方式で生成される氷結晶粒はきめ細かく、氷結晶粒周囲は塩分膜で覆われておりなめらかなため、高い氷濃度でも攪拌によって流動性が維持できる。

SIS-HF[®]は、この高い氷濃度での流動性を利用して、汎用の渦巻きポンプによる長距離搬送が可能である。このことで供給タンクから任意の利用場所までの配管搬送により、氷運搬作業の省力化を図ることができる。

2.3 製氷タンクと供給タンクの自動保冷機能

製氷後にシャーベットアイス貯えるタンクは、外気とタンク内との温度差による熱貫流と日射による熱負荷を受ける。そのため長時間の貯氷ではタンク内の氷が融解してシャーベットアイスの氷濃度が低下する。そこで SIS-HF[®]は、タンク内のシャーベットアイスの氷濃度が所定値以下になることを検知して、再度製氷運転を行い、一定の範囲で高い氷濃度を維持する自動保冷機能を有している。

2.4 シャーベットアイスの課金供給

水産現場では製氷設備を所有する顧客内での利用だけでなく、関連業者（例えば産地市場では、生産者や仲卸業等）にシャーベットアイス販売・供給することで、水揚げ後の鮮度を保持したまま、鮮魚を小売り店舗や消費者へ輸送する高鮮度輸送を実現している。

SIS-HF[®]では、当社独自開発のシャーベットアイス課金装置が備えられている。この課金装置では、利用者に貸与するカードキーの I.D. により利用者ごとのシャーベットアイス使用量を集計・課金することで販売管理を行うことができる。

2.5 遠隔監視システム

SIS-HF[®]は遠隔による監視システムを有しており、常時稼働状況を確認することができる。図 3 および写真 1 に SIS-HF[®]Web 監視システムのパソコン画面、スマートフォンによる監視状況の様子をそれぞれ示す。機器不具合の予兆があれば予防措置を実施できる他、万が一異常運転が発生した場合にも迅速な対応が可能であり、機器の安定稼働に寄与している。



図 3 SIS-HF[®] Web 監視システム

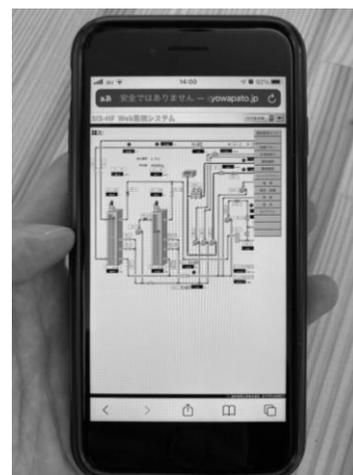


写真 1 スマートフォンによる監視状況

2.6 省エネルギー性

当社シャーベットアイス製氷設備「SIS-HF[®]」と一般的なブロックアイス製氷機の製氷能力あたりの導入コスト、製氷効率（製氷 COP）、および製氷コストの一例を表 1 に示す。

導入コストについては、従来のブロックアイス製氷設備は、製氷設備用建屋・貯氷用冷凍庫等が必要であり 70～200

百万円/(ton/日)となる。これに対して、SIS-HF®は専用建屋が不要であり、貯氷・保冷機能を有するため貯氷用冷凍庫等の付帯設備も不要となる。このため従来設備に比べて設置規模が小さくなり、導入コストは約10百万円/(ton/日)である。製氷コストの面では、ブロックアイス製氷では-20℃程度の低温冷媒を使用した製氷方式となっており、製氷施設には大型の冷凍機が必要になるため製氷コストは電気代、水道代を入れて1,790円/tonとなる。SIS-HF®で採用している冷凍機は、一般的に空調でも使用されるような-6℃程度の冷媒を使用した製氷方式であるため、冷凍機自体の省エネルギー性が高く製氷コストは1,080円/ton(氷濃度50%S.I)となり、より安価に製氷できる。また、SIS-HF®は完全自動化されているため運用上の人件費が不要となる。このようにシャーベットアイス製氷設備(当社SIS-HF®)は、従来のブロックアイス製氷設備と比較して省エネルギー性が高いと評価できる。

表1 シャーベットアイス製氷機の導入・製氷コスト比較

	シャーベットアイス製氷設備 (当社「SIS®-HF」)	ブロックアイス製氷設備 (従来式)
製氷能力あたりの導入費 百万円/(ton/日)	10	70~200
冷凍機 冷媒温度	-6℃程度	-20℃程度
製氷効率※1	2.1	1.48 ³⁾
製氷コスト (電力料金+水道料金)※2 円/ton	1,080(氷濃度50%S.I.)	1,790

※1：製氷のための「冷却熱量/投入エネルギー」

※2：製氷原水温度29℃からの製氷、電力従量料金15円/kWh、水道料金500円/m³時

3. 水産現場での活用事例

SIS®-HFを導入した平戸魚市株式会社(以下、平戸魚市)でのシャーベットアイスを利用した高鮮度保持の取組みについて紹介する。

3.1 漁獲・水揚げ時の急速冷却

巻網漁船等にシャーベットアスを積載し、漁獲直後にシャーベットアイスへの浸漬冷却に利用している。写真2に魚体の冷却状況を示す。これにより漁獲時の高鮮度を保持した状態での産地市場への水揚げが可能となる。さらに水揚げ後の選別時にシャーベットアイスへの浸漬を行うことで、魚体の低温を維持した状態で競り時まで保管できる。

3.2 競り時の低温維持

競り時には、水産物が直接外気に晒されることになる。写真3に競り中の低温維持状況を示す。このときの魚体の温度上昇による鮮度劣化を防ぐために、シャーベットアスを利用して魚体全体をムラなく覆うことで均一に冷却し、低温維持することができる。

3.3 流通時での低温維持

輸送時の魚体保冷を目的に、脱水シャーベットアイスが用いられている。写真4に脱水シャーベットアイスによる流通状況を示す。雪状の脱水シャーベットアイスによって魚体全体を覆うことにより、魚体に傷が付くことなく、また上記で述べたような魚体全体を均一に低温維持したまま輸送することが可能となっている。

以上の取り組みで、平戸魚市では輸送可能地域の拡大へと繋がっており、近年では、九州の最西端に位置する平戸魚市から東京都内の飲食店への高鮮度輸送も実施している。



写真2 シャーベットアイスによる魚体冷却状況



写真3 競り中の低温維持状況



写真4 脱水シャーベットアイスによる流通状況

4. 鮮魚に対する冷却と鮮度維持効果

4.1 急速冷却効果の定量評価

シャーベットアイスへの浸漬による急速冷却効果の例として、アジを用いて魚体芯温の経時変化を調べた結果を図4に示す。-1.5℃、氷濃度50%のシャーベットアイスに体重約150gのアジを浸漬し、魚体芯部に挿入した温度センサで芯温の経時変化を測定した。図4のようにシャーベットアイスに浸漬した直後から芯温が急速に低下し、9分後には鮮度保持効果のある5℃まで、38分後には0℃まで低下した。氷濃度50%と高濃度のシャーベットアイスへの浸漬冷却では、氷粒が魚体をムラ無く包み込むことにより高い冷却効果が得られることがわかった。

4.2 輸送時の低温維持と鮮度保持効果の定量評価

鮮魚輸送時の低温、鮮度保持効果の例として、脱水シャーベット（シャーベットアイスから水分を抜いた雪状の氷）でアジを覆い冷蔵保管した際の、K値と魚体芯温の経時変化を図5に示す。

ここでK値とは、水産物の生化学的な鮮度評価指標であり、一般的にK値20%未満が生食可能、20%~40%が可食（要加熱調理）、60%以上が腐敗状態の目安とされている。⁴⁾

この検証では、まず活アジをシャーベットアイスに1時間浸漬し、魚体芯温が約-1℃になるまで急速冷却した。その後、脱水シャーベットを敷いた発泡容器内にアジを入れ、さらに脱水シャーベットで魚体を覆った上で、冷蔵輸送を想定して冷蔵庫内に保管し、K値と魚体芯温の経時変化を測定した。なお、発泡容器を保管した冷蔵庫内温度は、2℃から4℃の間で変動した。図5からわかるように、アジの魚体を脱水シャーベットで覆うことで、魚体芯温が-1℃~0℃に維持され、保管開始から5日間が経過してもK値は13%程度と生食可能範囲にあった。

このように生食可能時間を拡大することにより、産地から消費地への輸送距離の拡大に寄与できる。また、小売店舗での販売期間の延長で、店舗での廃棄率の低減が可能となり、水産資源の有効活用にもつながる。

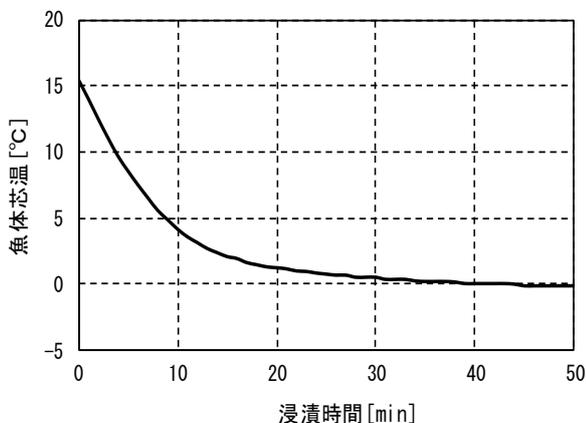


図4 シャーベットアイス浸漬によるアジの芯温変化

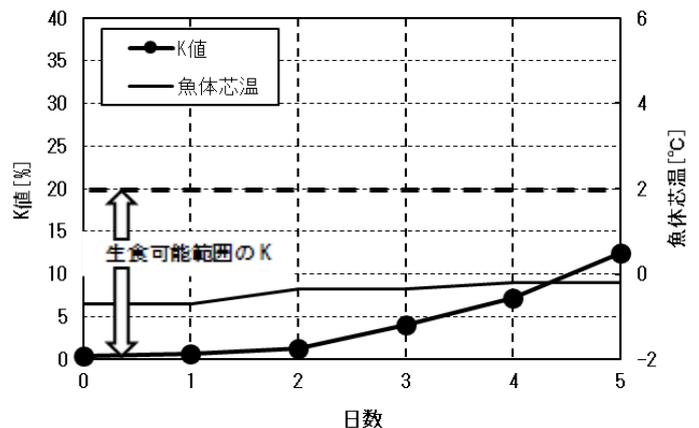


図5 脱水シャーベット保蔵によるアジのK値変化

5. 顧客価値向上への取り組み

当社では、単に水産向けシャーベットアイス製氷機を顧客に提案、導入するだけでなく、顧客の価値向上の観点に立ち、顧客と一体となって、導入前の高鮮度保持等の効果検証と導入後の水産物販路拡大に関わる支援に注力している。具体例として、当社が実施してきたシャーベットアイスによる急速冷却、鮮度保持効果の定量評価、および海外高鮮度流通、販路拡大の取り組みについて紹介する。

2019年3月に、沖縄県国頭漁業協同組合との協業で、ムロアジを沖縄からシンガポールへ空輸し、シャーベットアスの有効性を検証した。水揚げ直後にシャーベットアイスへの浸漬で急速冷却し（写真5）、その後、脱水シャーベットで魚体を覆い（写真6）、発泡スチロール容器で国頭漁業協同組合の冷蔵庫で保管した。翌日に那覇空港までの陸送後、シンガポールまで空輸した。

図6に、水揚げ～冷蔵保管～陸送～那覇空港～空輸～シンガポールに至るまでの発泡スチロール容器周囲温度と魚体芯温の経時変化を示す。図6のように魚体芯温は、水揚げ直後のシャーベットアイス浸漬で約1℃まで低下し、24時間の冷蔵保管中には0℃を維持した。輸送過程では、外気温度は各工程で変動するものの、輸送開始から29時間後のシンガポールの店舗到着時まで1℃以下を維持し、鮮魚の温度管理の目安となる4℃を大幅に下回っていた。

このように、水揚げ後にシャーベットアイスへの浸漬で魚体芯温を十分に下げ、保管、流通過程では脱水シャーベットを用いることで、海外向けの長時間輸送も可能なことを実証した。

以上のような高鮮度保持、流通の定量的な検証結果と併せて、国内の小売業者や海外のバイヤが魚体の状態を直接確認する機会を設けることにも顧客との協業で取り組んでいる。

これらの結果として、SIS-HF®を導入した長崎県の産地市場では販路、取引先の拡大、青森県の漁業協同組合では首都圏への高品質出荷と魚価の向上につながっている。また、SIS-HF®導入を検討している沖縄県の漁業協同組合では、シンガポールへの定期的な商業輸送の販路を開拓した。



写真5 水揚げ直後のシャーベット浸漬冷却



写真6 脱水シャーベットによる輸送

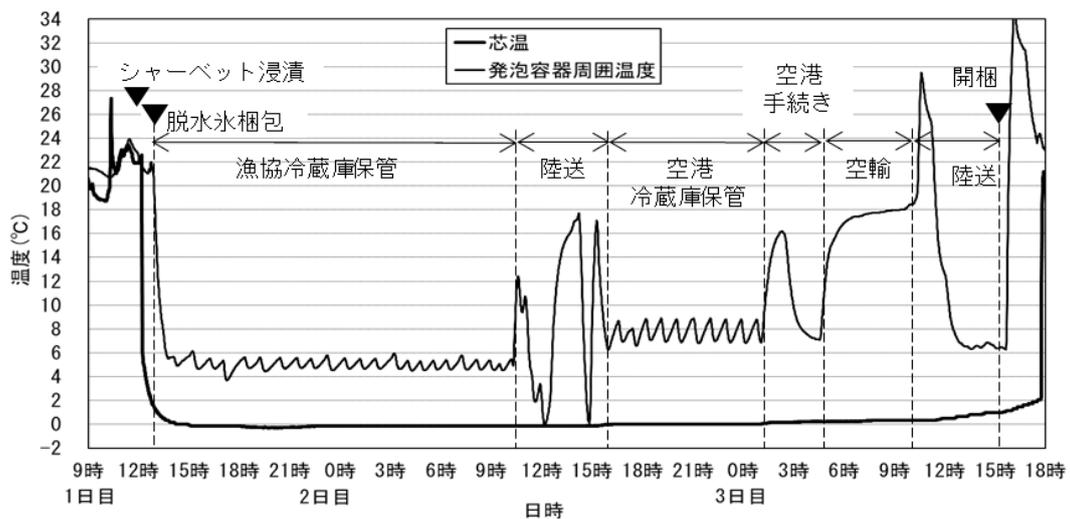


図6 ムロアジの沖縄からシンガポールへの輸送試験結果

6. おわりに

本報では、当社の空調用蓄熱式熱源設備向けのダイナミック型製氷技術を基にした、水産業向けのシャーベットアイス製氷機 SIS-HF®の機能と、シャーベットアイスを用いた鮮魚の高鮮度保持の定量評価による顧客価値向上に向けた当社の取り組みについて紹介した。

今後、顧客との協業による、高鮮度保持の市場評価、販路拡大等を支援する事業展開をさらに推進することで、顧客価値の向上、ひいては水産資源の有効利用、国内水産業の持続的な発展に貢献していきたい。

謝 辞

本成果は、当社 SIS 事業室の業務に関わる水産関係者の皆様のご協力の結果得られたものです。関係各位に御礼申し上げます。

文 献

- 1) 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 年).
- 2) 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 年).
- 3) 長岡順吉:冷凍の原理とその応用, 共立出版, P233, (1966 年) (改新版 1 刷発行)
- 4) 小関聡美, 北上誠一, 加藤登, 新井健一:魚介類の死後硬直と鮮度(K 値)の変化 海一自然と文化, Vol.4, No.2, pp.31-46, (2006 年).

ABSTRACT

A dynamic type ice storage system called "Super Ice System: SIS®", by using super-cooled water for air conditioning had been developed by Takasago Thermal Engineering Co., Ltd. This ice making technology have been applied to fishery industry for starting business development. It is called "Super Ice System for High Freshness : SIS-HF®". In developing the business, my department members and I quantitatively evaluated the effects of sherbet-like ice for rapid cooling, low temperature maintenance, and high freshness maintenance of the fish at actual fishery sites. In addition to the introduction of ice machines. As a result, even in areas where it takes long time for fresh fish to reach consumers, (ex. transportation from remote areas to metropolitan areas and overseas exports), the low temperature and high freshness of fresh fish where maintained. We expect that it will lead to an increase in the value of marine products and also, an increase in the income of fishermen.

アルミ冷媒配管システムの開発

～冷媒配管の材質を銅からアルミに替える～

CO₂ 排出量 30%削減、施工 20%省力化、材料 10%低減

込山治良・権田勝美・湯浅憲

Development of Aluminum Refrigerant Plumbing Systems
~Changing the Plumbing Material from Copper to Aluminum~
30% Cutdown in CO₂ Emission, 20% Reduction in Construction
Labor, 10% Saving in Material Amount

Haruyoshi Komiyama・Katsumi Gonda・Ken Yuasa

アルミ冷媒配管の開発は、2011年のアルミ冷媒配管の実用検証がきっかけとなっている。2015年から本開発が開始され、2017年5月～8月、各支店9箇所の現場事務所等にてアルミ冷媒配管を使用してビルマルチエアコンや業務用エアコンを運転させるフィールド検証を開始し、現在も継続検証中である。2019年から市場展開を行った。

また、空気調和・衛生工学会大会（2018～2020年）や日本建築学会大会（2018～2019年）で、アルミ冷媒配管システムの開発に対する報告を発表した。さらに、プレスリリースとして、3件発表している。

本稿では、空気調和・衛生工学会大会で発表した第1報から第5報をまとめて再掲・加筆し、これまでのアルミ冷媒配管システムの開発と、実現場導入の報告を行う。

1. アルミ冷媒配管システムの概要¹⁾

アルミ冷媒配管は、銅配管と比べて1/3と軽量なため、作業員への負担を軽減できる。しかも、建築設備業界でアルミ材のリサイクル率を85%までに上げれば、銅管をアルミ管に替えることでCO₂排出量を約30%削減できる²⁾。

当社が開発した、被覆アルミ冷媒配管・アルミ機械式継手・アルミ冷媒配管用分岐管ユニット・アルミろう付工法を称して、「アルミ冷媒配管システム」と呼ぶ。

1.1 アルミ機械式継手の開発³⁾

2017年12月、アルミ押出加工メーカーと共同してアルミ冷媒配管（写真1）の仕様を定めると共に、アルミ冷媒配管用の機械式継手を東尾メック株式会社と共同開発したことをプレスリリースした。

従来の銅配管接続で火無し工法として使用されている機械式継手「おっぞんくん」は、東尾メックの継手主要製品であり、トップのシェアを有する豊富な実績と漏洩事故ゼロの高信頼製品であることから、当社でも火無し工法時には従来から採用してきた。当社との共同開発によるアルミ機械式継手「アルミおっぞんくん」（写真2）は銅配管用継手の基本構造を踏襲して、アルミ配管用に開発したもので、耐食性と強度に優れ、モンキーレンチを使うだけで容易に施工可能である。（写真3）



写真1 アルミ冷媒配管写真



写真2 アルミ機械式継手「おっぞんくん」

1.2 アルミ冷媒配管用分岐管ユニットの開発⁴⁾

当社と株式会社バンカンは、設計・施工の現場で培ったノウハウとステンレス製継手メーカーの高い製品開発力を融合して、ビル用マルチ空調システムで使えるアルミ冷媒配管用の分岐管継手を開発した。2018年10月にプレスリリースを行った。

アルミ冷媒配管用分岐ユニットは、中心のコア部と配管部で構成されている。特長として、分岐形状が流体の均等な分配と低圧損を最大限に考慮した形状になっている。

写真4にアルミ冷媒配管用分岐ユニットを示す。中央のコア部は、アルミブロックの削り出しで成形して、配管部とろう付により接合している。



写真3 モンキーレンチ使用



写真4 アルミ冷媒配管用分岐管ユニット

2. アルミろう付工法の開発⁵⁾

一般的な加工工場等において、ろう付作業の加熱量や加熱時間を制御できる環境下では、アルミろう付作業は一般的に行われている。しかし、建築現場でのアルミろう付は、前述のような制御が可能な環境は難しく、今まで非常に困難とされてきた。

2.1 アルミ冷媒配管のろう付作業の課題

「ろう付」は金属を接合する方法の一種で、接合する金属よりも低い融点で熔融する「ろう材」を用いる。金属（母材）を熔融せずに管の隙間にろう材が吸い込まれるのに適した温度になるまで接合部を手際よく昇温させ、ろう材を差して接合する方法である（写真5）。

アルミの融点は660℃、ろう材の融点が580℃で差が80℃しかないため、ろうを熔融し隙間に吸い込まれるまでに配管温度が上昇して、アルミ管までもが熔融してしまうことが多かった。

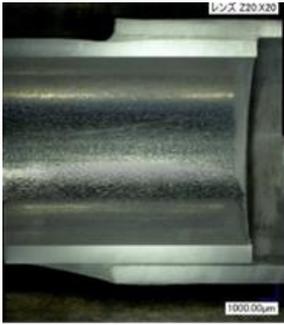


写真5 ろう付断面(半断面状態)

表1 アルミ管と銅管の熔融温度の比較

	融点(°C)		温度差(°C)
	アルミ	配管	
アルミ用ろう材		580	
銅	配管	1085	
	銅用ろう材	800	

これに対し銅管ろう付は、銅とろう材の融点差が約 280°C以上あり、ろう付時に銅管が熔融することはない(表1)。また、銅管は加熱すると表面の色が変化するが、アルミ管は表面の色に変化が無く、管の昇温状況が視覚的に把握できない。

アルミ冷媒配管をろう付する場合の課題は以下の通り。

- (1)アルミ管とアルミろう材との熔融温度差が小さいため、加熱時にアルミ管表面が溶け出すリスクが高い。
- (2)加熱してもアルミ管表面の色の変化がなく、視覚的にアルミ管表面の温度を確認できない。

これらの課題を解決するために、アルミ管の昇温状況を把握するために「加熱時間管理手法」を考案した。

2.2 アルミ配管のサイズ毎の熔融温度

銅管とアルミ管のろう付作業の決定的な違いは、アルミ管とろう材の熔融温度差が、極端に小さいことである。

このためアルミ管の加熱時間が長いと、アルミ管の表面が溶け出す。この溶け出す時間をアルミ管のサイズごとに記録し、データを収集して検証した。

予熱：ろう材投入前に配管表面温度を昇温させること 加熱：予熱～ろう付完了までの広義の昇温の意

2.3 アルミ配管の表面温度

従来工法の銅配管は、予熱すると表面の色が変化するため、ろう材の投入タイミングが分かりやすい(写真6)。

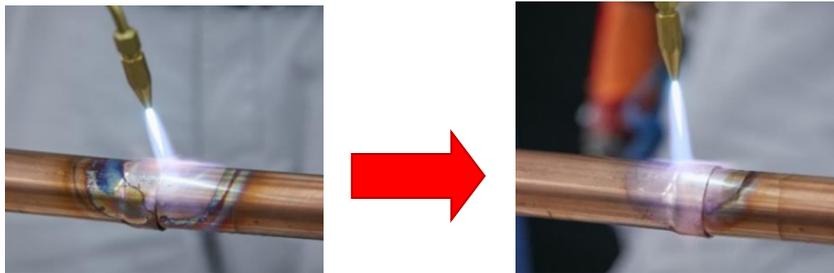


写真6 銅管の予熱時の交換表面色の変化

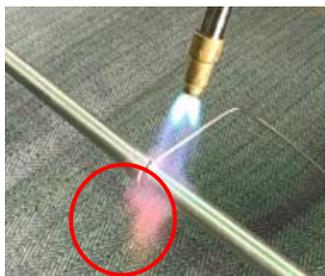


写真7 アルミ管の予熱時の火炎色の変化

ろう材使用量 (mm)

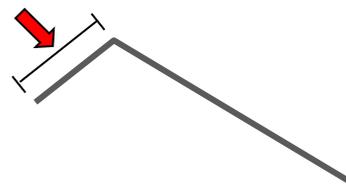


図1 ろう材の使用量

一方、アルミ管は予熱しても管の表面の色は変化せず、予熱している火炎の色のみがオレンジ色になる。このときのアルミ管の表面温度が約 500℃であり、ろう材を投入する目安になっている（写真 7 に示すように赤丸内がオレンジ色になっている）。しかし、このオレンジ色の変色は火炎の色なので、特に屋外の場合、アルミ管表面が太陽光の反射を受けると、火炎のオレンジ色の見極めが非常に難しくなる。室内でも照明の具合によって、加熱炎のオレンジ色の識別が困難となる。

2.4 アルミ配管の「加熱時間管理」

アルミろう付作業の課題解決として、アルミ配管の「加熱温度管理」から「加熱時間管理」にすることを考案した。アルミろう付作業の検証は、配管サイズ 10 種類に対して春夏秋冬（4 シーズン）ごとにアルミろう付作業の工程ごとの作業時間のデータを収集した（表 2、3）。

表 2 アルミろう付作業の工程ごとの作業時間

①	ろう付予熱時間
②	加熱炎がオレンジ色になる時間
③	ろう材を投入する時間
④	完了時間

表 4 配管サイズによる接続方法区分

配管サイズ φ	配管の種類	接続方法
6.35～15.88	コイル管 A3003	アルミろう付
19.05～38.1	直管 A6063	アルミ機械式継手

表 3 アルミろう付標準作業時間表の例（作業前の管表面温度 10～30℃）

配管 サイズ φ	標準作業時間 (s)					ろう材 使用量 (mm)	加熱 MAX 時間
	① 下方予熱	上方予熱	② 加熱炎オレンジ	③ ろう材投入	④ 完了時		
6.35				8			
9.52	0～6				16～30		
12.70		9～16				70	
15.88			27				70

4 シーズンのデータは、作業場所の温度に影響する管表面温度別とし、春・秋のデータは同じなので、以下のよう
にまとめた。

(1) 中間期：管表面温度 10～30℃ (2) 真夏：管表面温度 31～39℃ (3) 真冬：管表面温度 5～9℃

さらに、予熱の方法として 1 点だけに集中的に予熱すると、管表面が溶け出すので、最低 2 方向から予熱すれば管表面が溶け出さないことが検証により分かった。

よって予熱は、作業がしにくい下方から行い、その後に上方を予熱することにして、その時間は加熱炎がオレンジ色になる時間の半分とした。これらの検証結果の代表例を表 3 に示す。

ろう付け作業時のろう材の推奨形状は、図 1 のように折り曲げた状態とする。ろう付作業前にアルミ冷媒配管のサイズによりあらかじめろう材使用量を確認し、その使用量（長さ）に折り曲げてろう付作業を行うことが望ましい。

この標準時間で必要ろう材の使用量を収集し、平均値を算出した。このろう材使用量でろう付作業を行えば、挿入管と拡管の隙間に十分ろう材が充填され、最適な接合ができることを検証した。

2.5 アルミろう付工法の適用範囲

ろう付するアルミ管の範囲は、コイル管の 4 種類（配管サイズ：6.35φ、9.52φ、12.7φ、15.88φ）とした。

口径が大きい 19.05φ～38.1φの直管 6 種類は、加熱して管を昇温させる際、温度むらによるろう材の充填が不十分となる懸念がある。また、ろう材を投入する工程では管全体を適切に昇温するために、難易度の高い火口ローテーションが必要となる。これらは、作業員の技量に大きく依存するため、ろう付工法でなく、アルミ機械式継手で施工することとする。配管サイズによる接続方法の区分を、表 4 に示す。

2.6 ろう付作業の標準化

2.6.1 加熱する火炎の温度の標準化

アルミろう付作業は銅管に比べ管の熔融温度が低いため、アセチレンガスだけを使用する。一方、従来の銅管のろう付はアセチレンガスと酸素ガスが必要である。本工法を実施するにあたり、推奨するアセチレンバーナーを写真8に示す。これは、火炎温度の調整が簡単で、口径6.4mmの火口で調整ダイヤル最大値の状態で使用するものとする。



写真8 アセチレンバーナー火口一式

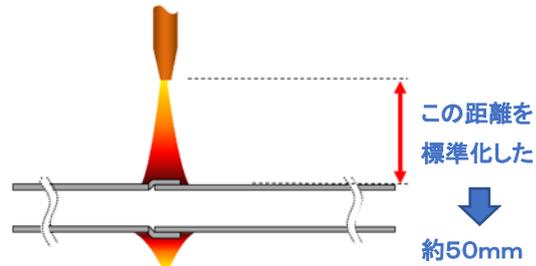


図2 管表面とバーナー火口の距離

2.6.2 加熱する管と火口の距離の標準化

数多くの実験を重ねた結果、効率よく管を加熱するための条件として、管表面とバーナー火口の距離を50mmに標準化した(図2)。これは、火炎が近いと管が熔融してしまうし、逆に火炎が遠いと加熱に時間がかかるためである。

2.6.3 予熱する方向の標準化

従来の銅管のろう付の場合、予熱方向は定められていないが、本アルミろう付工法は予熱する方向を上下2方向とする(写真9)。

また、ろう材のサイズは、太さ2.0mmで長さ500mmのものを規定した。作業者へのヒヤリングの結果、このサイズと長さが最も作業しやすいとの意見を得た。

使用ろう材は、ナイス株式会社製のアルミろう付用フラックスコアードワイヤ「Alu 19FCW-Cs60D」を、推奨している⁶⁾。

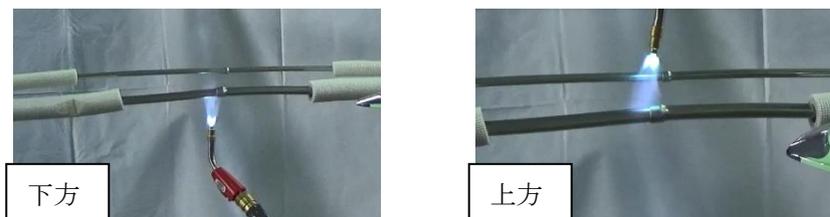


写真9 管を予熱する方向(2方向)

2.7 アルミろう付作業の品質管理

アルミろう付作業の品質管理は、ろう材の使用量が適正であることで判定をする。表3のろう材の使用量でろう付を行うと、管のろう付部(管差し込み部)にしっかりとろう材が入っていて、しかも内部フィレットが形成されることが検証の結果でわかっている。(写真10の赤丸が内部フィレットと外部フィレット)

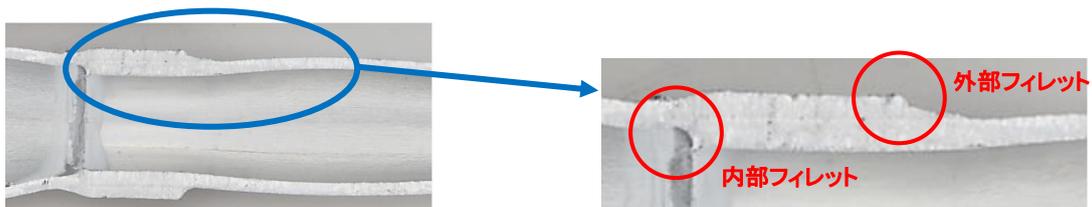


写真10 ろう材充填状況

フィレットとは、拡張と挿入管の境界部にろう材を予盛りして、配管の気密性を担保する役割を担うものである。認定講習会では、実技時に必ずバンドソー等で配管を縦に切断して、ろう材の充填状況と内部フィレットの形成の確認を実施する。

2.8 ろう付工法の認定講習制度

アルミろう付工法は、新工法で、新たな知見を習得してから施工する事になる。そのため、本工法の認定講習会（座学、動画講習、実技、認定試験）を受講し、合格したものが施工できることとした。

特に実技試験の可否判定の方法は、実技でろう付した配管をバンドソー等で切断し、ろう付接合部のろう材の充填状況を目視で確認する（写真 11）。



写真 11 バンドソーで切断した配管



写真 12 合格の状態



写真 13 不合格の状態

次に、切断した配管を万力で平衡にプレスして、ろう付部が頂点になるように裏曲げする。裏曲げした結果、ろう材が十分に充填されて内部フィレットが形成されれば、写真 12 のように、ろう付部にすき間は発生しない。ろう材が充填されずに内部フィレットが形成されなければ、写真 13 のように、ろう付部にすき間が発生する。この状態になる場合は、ろう材使用量が不足しているということである。

このすき間を発生させないようにするためには、①適切なろう材量を使用する事、②加熱時間と加熱方法を順守する事が重要である。

写真 12 の状態を各サイズで確認できれば、本工法の認定者として合格とする。

現場では、配管内の内部フィレットやろう付面積は確認できない。しかし、規定されたろう材使用量をすき間に投入できれば、内部フィレットが形成されているとみなせるし、ろう付接合部のせん断耐力も充分満足できる。アルミ冷媒配管の気密性は、内部フィレットが万が一形成できなくても外部フィレットが担保する。

尚、アルミろう付工法の開発のプレスリリースは、2019 年 4 月に行った⁶⁾。

3. アルミろう付作業ガイダンスシステムの開発⁷⁾

建築現場での冷媒配管工事のアルミろう付作業を実現させるために、スマートフォン用アプリケーションを開発した。音声ガイドを、Bluetooth イヤホンを使用して聞くことにより、アルミろう付標準時間通りに作業できることを可能とした。これを「アルミろう付作業ガイダンスシステム」という。

3.1 開発概要

第 2 章で説明した「アルミろう付作業標準時間」通りの、予熱・炎色反応・ろう材投入・完了のそれぞれの時間・予熱する方向、フィレットの形成のタイミングを、音声にてガイダンスする。

銅ろう付作業との大きな違いは、配管の予熱時間と、ろう材を投入する時間、ろう付完了時間、ろう材の使用量である。この部分を音声ガイドで聞き取れば、銅ろう付作業の経験者であれば、容易にアルミろう付作業が出来ることが、検証で分かっている。

3.2 アプリの説明

アプリ起動画面で、「配管サイズ」と「配管表面温度」を選択する。そして、「スタート」ボタンより、音声ガイドが開始する。写真 14-1 の例では、配管サイズ 15.88 φ、配管表面温度は 10～30℃である。

3.3 アプリのその他の機能

本アプリのその他の機能は、以下のとおりである。

- (1) サンプル動画 (2)色表示機能 (3)バイブレーション機能

3.3.1 サンプル動画

実際のろう付作業を行う前に、動画で作業手順を確認することが出来る。この動画は、認定講習で使用している。

3.3.2 色表示機能とバイブレーション機能

これらの機能は、このアプリの使用に慣れた熟練者のためのもので、アルミろう付作業ごとの作業時間（第 2 章表 2 参照）の①～④の作業工程のうち、①の上部からの予熱（写真 14-2）、③ろう材投入（写真 14-3）、④作業完了時間 5 秒前（写真 14-4）を、色と振動でガイドするものである。これらの 3 工程は、アルミろう付作業を行う上で重要なタイミングであり、このタイミングさえ押さえおけば、このアプリに慣れた熟練者であればアルミろう付作業は簡単にできる。

色表示機能は、現場の状況にもよるが、作業する場所にスマートフォンを置いて画面を見ることができれば、音声ガイドがなくても、この色が変わるタイミングで次工程の作業に移れば良い。

バイブレータ機能は、スマートフォンを作業着のポケットに入れて、振動の合図に合わせて、次工程の作業を行うものである。写真 14-2～4 の作業を、振動の階数（1 回、2 回、3 回）でガイドする。



写真 14-1 アプリの起動画面

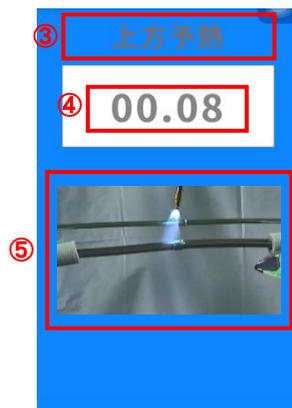


写真 14-2 青色表示



写真 14-3 赤色表示



写真 14-4 緑色表示

- ① 配管サイズ ②配管表面温度 ③作業工程名 ④作業カウント ⑤作業停止画

4. アルミ配管拡管機の開発

4.1 現状の拡管器の課題

アルミ冷媒配管の仕様を決める際、銅配管の設計基準に合わせるために、配管自体の耐圧性能を銅配管と同様とした。このことにより、配管の肉厚が銅配管よりもアルミ配管の方が厚くなる。そこでアルミ配管専用の拡管器を開発した。

4.2 アルミ冷媒配管専用拡管機の開発

基本構造は、銅冷媒配管用拡管機と同じとし、拡管挿入ヘッドに新たにアルミ専用の技術を駆使して、開発を行った。特許は現在出願中である。写真 15 にアルミ冷媒配管用拡管機を示す。



写真 15 アルミ拡管機とヘッドアダプター

表 5 設備概要

場 所	北海道札幌市豊平区
工 期	2017年10月竣工
冷媒配管総長	約 150m
機器メーカー名	パナソニック株式会社
室 外 機	12HP
室 内 機	4方向カセット型：9台 2方向カセット型：2台

5. アルミ冷媒配管システムの実現場導入⁸⁾

2017年10月、当社グループ会社の空調設備更新工事に合わせて、「アルミ冷媒配管システム」を導入した。2021年2月までの約3年間、問題なく運転は継続している。

5.1 設備概要

表 5 に設備概要、図 3 に冷媒配管系統図、写真 16～18 に施工状況を示す。

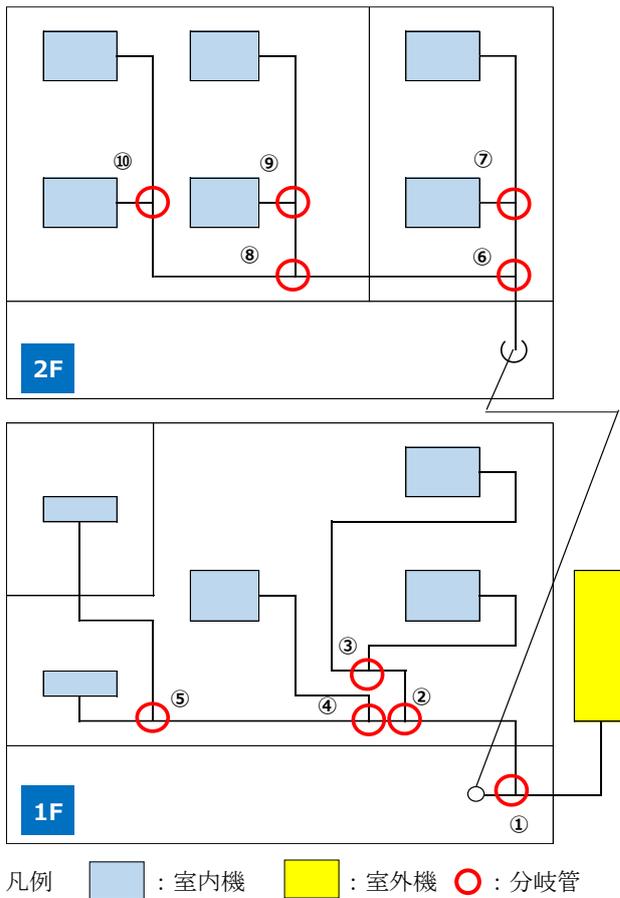


図 3 冷媒配管系統図 (模式図)



写真 16 室外機搬入状況



写真 17 アルミ機械式継手とアルミ分岐管施工状況



写真 18 室外機まわり施工状況

6. 機器能力の性能検証

アルミ冷媒配管システムを使用した、ビルマルチエアコンの機器能力の性能検証を、2018年8月・2019年8月及び2020年2月に行なった。

アルミ配管では、銅配管と同等の耐圧力を得るために、銅配管よりも配管の厚みを増している。銅配管施工と同じ被覆管と機械式継手を使用するために、配管外径は銅配管と同じにする必要がある。そのため、配管内径が銅配管と比べ小さくなるので、圧力損失が大きくなる。

以下の2つの懸案事項が考えられ、それに対して性能検証を行った。

(1) 懸案事項1：圧力損失

ガス管内の冷媒圧力損失に起因する性能低下の恐れがある。ガス管のデータより導いた圧力損失係数により、冷房時暖房時の銅配管に対するアルミ配管の能力比は、表6のようになる。圧力損失比は、銅に対するアルミの比率である。

(2) 懸案事項2：分岐管の分流の具合

アルミ分岐管の分流の具合が不明である。分流が悪いと、室内機能力不足や、返油難となる。

(3) 性能検証方法

2018年8月、2019年8月、2020年2月に収集したデータを用いて、全体のシステム能力Aと、室内機空気側能力Bを算出して、妥当計算式Cより評価した。

能力A：全体システム能力

メーカーの設計技術資料に基づき、定格能力をベースとして、設置状況（内外容量比、配管長、高低差）及び使用状態（外気温度、室内機運転負荷）から能力を算出、アルミ配管への変換は、表6の冷暖房能力比に基づき、配管長補正して算出した値を、能力のベース値とする。

能力B：実際の室内機空気側能力

室内機吸込み温度、湿度から入口エンタルピーを算出、室内機吹出し温度、湿度（95%R.H.固定）で出口エンタルピーを算出、風量はカタログ掲載値を引用して、実際の室内機の空気側能力値とする。

妥当性計算式C：能力B÷能力A×100

(4) 機器能力の性能検証

室外機まわりで、外気温度・室外機液配管表面温度・室内機の高圧圧力や低圧圧力などのデータを収集した。室外機まわりの収集したデータを表7に示す。

表6 冷媒配管(アルミ管、銅管)の内径の差異による冷暖房能力比の推定

ガス管径φ(mm)	12.7	15.88	19.05	25.4
圧力損失比[-]	1.8	2.1	1.0	1.1



冷房時	アルミ	銅
能力比	97.2%	100%
暖房時	アルミ	銅
能力比	99.0%	100%

表7 室外機まわり収集データ

各種測定データ	2018・8	2019・8	2020・2
	運転60min後の値	運転70min後の値	運転40min後の値
外気温度(°C)	26.8	30.9	-6.4
室外機液管温度(°C)	22.6	34.5	10.6
圧縮機1吐出温度(°C)	63.6	80.2	83.5
圧縮機2吐出温度(°C)	50.5	82.2	87.8
高圧圧力(MPaG)	2.11	2.63	2.24
高圧飽和温度(°C)	36.3	45.1	38.9
低圧圧力(MPaG)	0.75	0.82	0.32
低圧飽和温度(°C)	1.7	4.6	-18.5
吸込み温度(°C)	5.1	11.4	-13.6
圧縮機1オイルレベル	十分	十分	十分
圧縮機2オイルレベル	十分	十分	十分

室内温度は、各部屋に設置したおんどり（10個）にて測定した。その結果を、表8に示す。

2018年～2020年ともに、制御動作を含む室内機運転状態・部屋内の温度状態に問題はなかった。

(5) 夏季の機器能力の性能検証結果

性能検証のため、定常状態に達した時点でのデータを平均化し使用した。その結果を表9に示す。

表 9 の①～④の時間範囲は以下の通り。

- ② : 運転開始後 30～40min ③ : 運転開始後 55～65min
 ③ : 運転開始後 65～75min ④ : 運転開始後 95～105min

表 8 室内温度データ

	2018・8		2019・8		2020・2	
	リモコン設定	室内気温度℃	リモコン設定	室内気温度℃	リモコン設定	吸込み温度℃
部屋						
1F ロビー	冷 22℃	22.0	冷 18℃	22.6	暖 30℃	30.5
1F 応接室	冷 22℃	22.5	冷 18℃	23.8	暖 30℃	30.0
1F事務所	冷 27℃	24.0	冷 22℃	22.7	暖 30℃	31.0
	冷 27℃	24.0	冷 22℃	22.7	暖 30℃	33.0
2F事務所	冷 27℃	24.0	冷 22℃	22.7	暖 30℃	33.0
	冷 22℃	22.5	冷 18℃	23.3	暖 30℃	34.0
	冷 22℃	22.5	冷 18℃	23.3	暖 30℃	32.5
	冷 22℃	22.5	冷 18℃	23.3	暖 30℃	32.0
2F会議室	冷 22℃	22.0	冷 18℃	23.4	暖 30℃	24.5
	冷 22℃	22.0	冷 18℃	23.4	暖 30℃	26.0

表 9 夏季の定常運転データ

	2018/8月		2019/8月	
	①	②	③	④
全体システム能力 (A)	98.15%	98.14%	98.16%	98.16%
室内機空気側能力 (B)	87.57%	86.09%	93.08%	90.92%
妥当性 (B÷A×100)	89.22%	87.72%	94.82%	92.62%

表 10 冬季の定常運転データ

	2020/2月	
	①	②
全体システム能力 (A)	99.27%	100.00%
室内機空気側能力 (B)	100.56%	101.70%
妥当性 (B÷A×100)	101.30%	101.70%

表 7～9 より以下のことがわかる。

2018 年は測定時において外気温度が低く、圧縮機 1、2 ともに吐出温度も低下し、“運転停止”を繰り返す低負荷運転となった。この反省点を踏まえ、2019 年は室内設定温度や室内の負荷環境を改善し、かつ外気温度も 30.9℃と天候に恵まれて、圧縮機が連続して運転することができた。高負荷運転となる非常に良いデータが収集できた。

妥当性において、2018 年は、実際の室内機空気側能力 (B) は、全体システム能力 (A) に対して 90%弱の能力であるが、2019 年に関しては、高負荷運転ができたため、能力 B は、能力 A に対して 90%以上の能力が出ていることが分かる。

(6) 分岐管の影響

2018 年のデータ (表 7) より、高圧飽和温度と室外機出口の液面温度の差の過冷却度は十分とれており、十分に液化した状態で液管内を冷媒が流通している事から、分岐管での分流影響は小さかったと予測できる。これは、本物件の配管長が短く、高低差もさほど大きくないためと考えられる。

2019 年のデータ (表 7) も同様で、室外機出口の過冷却度は十分とれているので分岐管の影響はないと分かる。

(7) 冬季の機器能力の性能検証結果

2020 年 2 月外気温度 -6.4℃と低温環境となり、暖房として高負荷運転のデータを取集できた。

表 10 より、能力 B は、能力 A に対し 100%以上となり、アルミ冷媒配管システム配管でも、想定通りの能力が出ていることが確認できた。

表 10 の①～②の時間範囲は以下の通り。

- ① : 運転開始後 20～40min ② : 運転開始後 120～140min

(8) 除霜状態の確認

除霜運転を伴う暖房運転状態を確認したが、特に問題となる運転挙動は無かった。(写真 19-1～3)



写真 19-1 徐霜運転徐霜前



写真 19-2 徐霜開始 3min



写真 19-3 徐霜運転(徐霜完了 15min)

以上より、本稿の導入現場の設備規模の冷媒システムでは、機器の空調能力に対して、銅配管の施工時とほぼ同等の機器能力が確保でき、アルミ配管による運用でも問題ないことが確認できた。今後の展開では、今回の導入実績を考慮して、冷媒長が長く、高低差が大きい設備の場合には空調能力低下の可能性を十分留意して、設備規模に適した設計をする必要がある。

7. アルミ配管設備工業会(APEA)の活動

2018年1月31日、株式会社ベンカンを中心にして、「アルミ冷媒配管の仕様を統一すること」を目的として設立した。工業会の取組としては、1)仕様の標準化 2)官公庁・関連団体との協力 3)広報活動 4)技術関係である。

2020年12月現在、入会会員は、機器メーカー・機器代理店・総合建設会社・設備施工会社等65社である。当社も会員であり、今年度の活動としては、機器メーカーと委員会を立ち上げて、アルミ冷媒配管選定の技術資料を作成して、現場施工ができる体制を構築した。また、各総合建設会社へ説明会を設けて、アルミ冷媒配管の普及展開を行っている。将来的には、アルミ冷媒配管の仕様内容を、国土交通省標準仕様書と、JIS規格へ採用されることを目標にしている。

8. 今後の展開

銅の価格は2021年も上昇は継続し、LME銅3カ月物の年平均価格は、1トン=8625ドルになると見込まれている。さらに、2011年に記録した過去最高値である1万170ドルを22年前半までに超す可能性は非常に高いとの見方も示されている(2020年12月1日7743ドル。ちなみに新型コロナ第1波の最中の2020年3月9日では、4371ドルまで落込んだ⁹⁾)。それに比べアルミの価格は、1676ドル(2020年1月~12月3日の平均価格)である¹⁰⁾。今後の銅の価格上昇は、アルミ冷媒配管システムの展開に追い風となり、より建築設備業界への普及に拍車をかけることになるだろう。

また、「現場作業の効率化」は「働き方改革への寄与」、「CO₂排出量の削減」は「ゼロカーボン社会への寄与」と、政府が打ち出した環境対策に大きく貢献する工法として、より広く普及するように尽力していきたい。

謝 辞

本研究にあたり、当社の案浦茂樹氏、遠藤裕司氏、大浦秀和氏、大西健滋氏、岡村典明氏、五味弘氏、佐藤順氏、佐藤正氏、澤永芳彦氏、田島典和氏、中川修氏、中村邦昭氏、布上博昭氏、平林芳弘氏、村松貴之氏、山根誠氏に協力いただいた。感謝の意を表します。

文 献

- 1) 権田勝美、込山治良、山本一郎、五味弘、黒木祥児:アルミ冷媒配管システムの開発-第1報-アルミろう付の建設施工現場への実用化,平成30年度空気調和衛生工学会大会,(2018.9.12-14)
- 2) アルミと銅のCO₂排出量の試算、新技術開発部試算,(2017)
- 3) 高砂熱学プレスリリース「アルミニウム冷媒配管工法の展開に向けアルミ配管用の機械式継手「アルミおっぞんくん」を共同開発」,2017.12.6
- 4) 高砂熱学プレスリリース「アルミニウム冷媒配管工法の展開加速に向けアルミ冷媒配管用分岐管ユニットを共同開発」,2018.10.19
- 5) 込山治良、権田勝美:アルミ冷媒配管システムの開発-第3報-アルミ冷媒配管用ろう付工法の開発,令和元年空気調和衛生工学会大会,(2019.9.18-20)
- 6) 高砂熱学プレスリリース「業界初、施工現場でのアルミ冷媒配管用ろう付工法を開発」,2019.4.4
- 7) 権田勝美、込山治良:アルミ冷媒配管システムの開発-第4報-アルミろう付作業ガイダンスシステムの開発,令和元年空気

調和衛生工学会大会, (2019.9.18-20)

- 8) 権田勝美、込山治良:アルミ冷媒配管システムの開発-第5報-アルミ冷媒配管システムの実現場導入の報告, 2020年度空気調和衛生工学会大会, (2020.9.9-30(オンライン))
- 9) 銅価格の推移, ゴールドマンサックス報告, https://www.ig.com/jp/news-and-ideas/_21_8625_22_1_copper-praice-to-test
- 10) アルミニウム価格の推移、世界経済のネタ帳—World Bank -Commodity Markets, <https://ecodb.net/commodity/aluminum.html>

ABSTRACT

A demonstration experiment of aluminum refrigerant plumbing in 2011 was a trigger to develop plumbing systems of that new material. The full-scale development started in September 2015, our branch offices started the field validations to operate building multi air conditioners and commercial air conditioners adopting aluminum refrigerant plumbing in May 2017, and it expanded into the market in 2019.

This development report of aluminum refrigerant plumbing systems was presented in the annual meetings of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (2018-2020), and the AIJ Annual Conventions (2018-2019) (AIJ: Architectural Institute of Japan).

This paper is a summary of the five reports presented in the former meetings with some additions, showing the development of aluminum refrigerant plumbing systems and the installations to actual sites.

室外機の噴霧冷却時における フィン表面のスケール付着抑制

石井秀一*1・佐藤峰彦

Suppressing Scale Adhesion of Outdoor Units' Fin Surfaces That Was Caused by Spray Cooling

Shuichi Ishii・Minehiko Sato

空冷パッケージエアコンで冷房する際、夏季の高圧カット防止や運転効率向上を目的として、室外機を噴霧冷却する場合がある。通常噴霧水には水道水が用いられるが、カルシウムやシリカなどのスケール成分が室外機フィン等に付着する問題があった。我々は噴霧水を間欠的に水道水から純水に切り替える方式を考案し、そのスケール付着抑制効果を確認した。

1. はじめに

空冷パッケージエアコンでサーバ室を冷房する都心型データセンターでは、限られた屋上スペースに室外機を密集配置することが多い。騒音抑制や目隠しのため、屋上周囲に遮音壁を設置することもある。このような設置環境では、夏季に室外機の吸排気がショートサーキットして室外機吸込空気温度が上昇しやすく、高圧カットによる冷房停止が起きるケースがある。これを防止するため、室外機に水を噴霧して凝縮温度を低下させる対策を採ることがある¹⁾。

しかし、噴霧水に水道水を使用した場合に室外機フィンのスケール付着や腐食が生じるという課題があった。スケールは炭酸カルシウム (CaCO_3) とシリカ (SiO_2) を主成分とし、水道水がフィン表面で蒸発する際に析出する。アルミフィンを傷めずにスケールだけを溶解する洗浄剤が少ない上、フィンが薄く柔らかく物理的な洗浄が難しいことから、一度フィン表面に固着したスケールを除去するのは容易でない。噴霧水に純水 (RO水) を使用するシステムもあるが²⁾、高価な純水を大量に使うとともに、純水製造時に排水 (濃縮水) を捨てるため水使用量が倍程度になり、ランニングコストが高い。軟水を使用すると硬度成分 (カルシウム・マグネシウム) は除去できるがシリカ成分が残るため、スケール防止対策として十分ではない。

そこで我々は、水道水をベースとした噴霧に間欠的に純水噴霧を行うシステムを考案し、そのスケール付着抑制効果をサンプル板による試験で検証した。本報にてその結果を報告する。

2. 検証の概要

2.1 試験方法

室外機に水を噴霧すると、ノズルに近いフィン表面では水滴が凝集し濡れ面を形成する。噴霧が継続すると濡れ面では水滴中の不純物が濃縮し、飽和濃度を超えるとフィン表面に析出する。この現象を試験で再現するため、室外機フィンを模擬したサンプル板 (10cm×30cm) に対して、水道水で濡らしては乾燥させるという操作を繰り返し、人為的にスケール成分を付着させた。同時に、乾燥させる途中で純水 (RO水) を掛けて水道水を希釈・洗浄する操作 (以

*1 東京本店設計部

降「リンス」を行い、間欠的に純水噴霧する操作を模擬した。水道水で濡らしてからリンス開始までの時間を「リンス間隔」、リンスを継続する時間を「リンス時間」と、以降表現する。ワンサイクルの時間は3時間である。

スケール付着速度は、1日8回の濡らし／乾燥によって、1[m²]の濡れ面に付着するスケールの重量で評価した。スケールの重量は週に一度程度、サンプル板ごと電子天秤で測定した。濡れ面積は目視による概算で、サンプル板投影面積の7割とした。スケール付着速度はサンプル板表面の水が蒸発しやすいほど増加するので、サンプル板廻りの絶対湿度差とスケール付着速度の相関を求めた。式(1)にスケール付着速度、式(2)に絶対湿度差の算出式を示す。

$$V_n = \frac{(W_b - W_a)/(b - a) + (W_c - W_b)/(c - b)}{2S} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$\Delta x = x_w - x_\infty \quad \dots \text{式(2)}$$

$$V_n : \text{試験開始開始後}n\text{日目のスケール付着速度} \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^2 \text{日}} \right]$$

$$W_n : \text{試験開始開始後}n\text{日目のサンプル板の重量}[\text{mg}]$$

$$a, b, c : \text{試験開始開始後の経過日数} [\text{日}]$$

$$S : \text{サンプル板の濡れ面積}[\text{m}^2] = 0.1 \times 0.3 \times 0.7$$

$$\Delta x : \text{サンプル板廻りの絶対湿度差} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}'} \right]$$

$$x_w : \text{周辺空気湿球温度と等温の飽和空気の絶対湿度} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}'} \right]$$

$$x_\infty : \text{周辺空気の絶対湿度} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}'} \right]$$

2.2 試験条件

サンプル板の材質は室外機フィンと同じアルミとし、一部の試験で銅とステンレスを加えた。サンプル板は30°程度傾け、上方の端部に濡らし用とリンス用の配管を設け、2箇所の孔(φ2mm)から各サンプル板に散水した。試験装置の外形図と散水状況の写真を図1、試験で使用した水のICP発光分光分析装置(バリアン720-ES)による水質分析結果を表1、試験条件を表2に示す。

試験装置を設置した部屋は常時換気し、エアコンにて夏季は冷房、梅雨時はドライ運転、冬季は暖房した。また試験装置近くの床上にサーキュレータを設置し、試験装置廻りの空気を攪拌した。

新品のサンプル板は水を弾き表面に水膜が広がらないため、試験開始前に#1500紙やすりで表面を研磨し、「飽和炭酸カルシウム水溶液を30ml滴下して乾燥させる」という操作を5回繰り返す前処理を行なっている。またサンプル板上のスケール成分は、試験の経過とともにサンプル板の下部に集中して固着したため、10~15週間(濡らし／乾燥560~840回)ごとにサンプル板を交換した。図2に試験開始前と試験終了時のサンプル板の写真を示す。

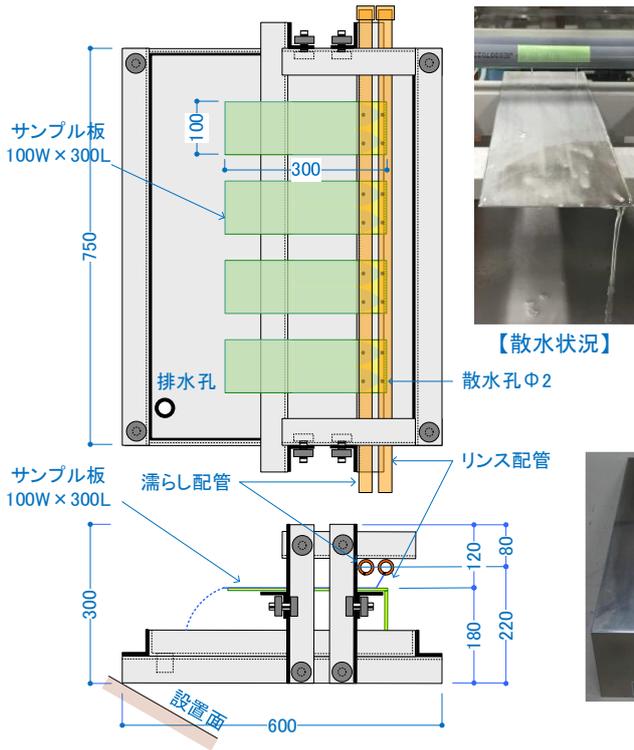


図1 試験装置

表1 ICP 発光分光分析装置による水質分析結果
(2019年12/20)

元素名	水道水 (※1)	軟水 (※2)	純水 (※3)
	mg/L	mg/L	mg/L
Si	11.44	11.63	0.23
Ca	10.34	0.03	0.25
Na	6.17	18.20	0.37
Mg	4.18	0.02	0.09
K	1.33	0.34	0.06

※1: 神奈川県厚木市の市水

※2: ディスボタイプ のイオン交換フィルタ (オルガノ製 DCPS-002) で処理

※3: ポリアミド系RO膜 (LANXESS 製 B085 FR4040) で処理

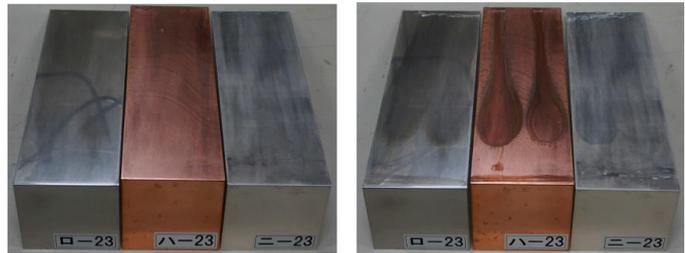


図2 サンプル板の写真 (SUS, Cu, Al)
左: 試験開始前、右: 試験終了後

表2 試験条件

試験条件のパラメータ				リンス間隔	リンス時間	水質, リンスの有無, サンプル板材質			
試験期間	開始日	-	2018/10/26	2018/7/30	2019/1/8	2019/6/7	2019/8/27	2019/12/6	
	終了日	-	2018/12/27	2018/10/25	2019/3/26	2019/8/23	2019/12/3	2020/2/7	
	サンプル板重量の測定回数	回	10	13	11	10	15	10	
周囲条件	気温	°C	21.0~24.0	20.9~23.8	21.0~23.0	21.1~23.8	22.5~25.0	20.6~24.9	
	相対湿度	%RH	26~49	50~76	12~29	67~93	33~70	12~35	
	サンプル板廻りの絶対湿度差	g/kg'	2.41~4.36	1.16~2.62	3.89~5.20	0.89~1.78	1.42~4.08	3.67~5.26	
サンプル板材質 (Al: アルミニウムA5052, Cu: リン脱酸銅, SUS: SUS304)				Al	Al	Al, Cu, SUS	同左	同左	同左
運転方法 ①	濡らし方	水質	-	水道水	水道水	水道水	同左	同左	同左
		時間	min	1	1	1	同左	同左	同左
	リンス前の乾かし方	時間 (= リンス間隔)	min	10	30	-	同左	同左	同左
	リンスのやり方	水質	-	純水	純水	-	同左	同左	同左
時間 (= リンス時間)		min	1	1	-	同左	同左	同左	
運転方法 ②	濡らし方	水質	-	水道水	水道水	軟水	同左	同左	同左
		時間	min	1	1	1	同左	同左	同左
	リンス前の乾かし方	時間 (= リンス間隔)	min	20	30	-	同左	同左	同左
	リンスのやり方	水質	-	純水	純水	-	同左	同左	同左
時間 (= リンス時間)		min	1	2	-	同左	同左	同左	
運転方法 ③	濡らし方	水質	-	水道水	水道水	水道水	同左	同左	同左
		時間	min	1	1	1	同左	同左	同左
	リンス前の乾かし方	時間 (= リンス間隔)	min	30	30	20	同左	同左	同左
	リンスのやり方	水質	-	純水	純水	純水	同左	同左	同左
時間 (= リンス時間)		min	1	3	1	同左	同左	同左	

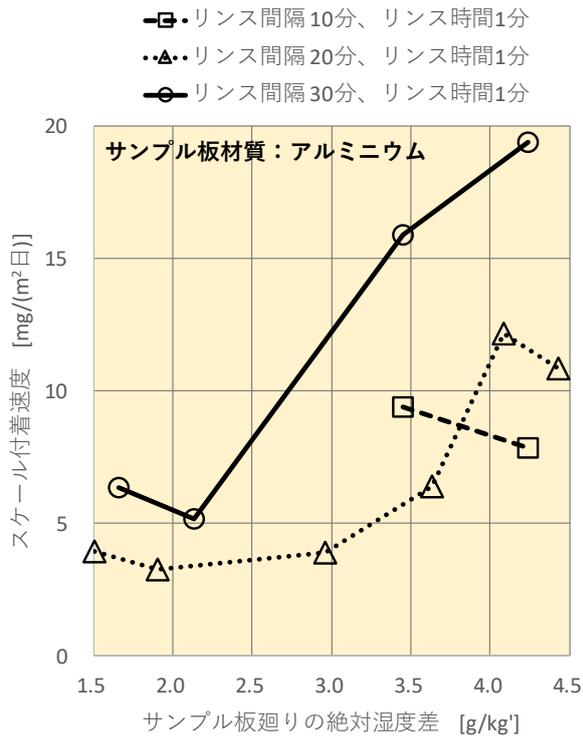


図3 リンス間隔とスケール付着速度の関係

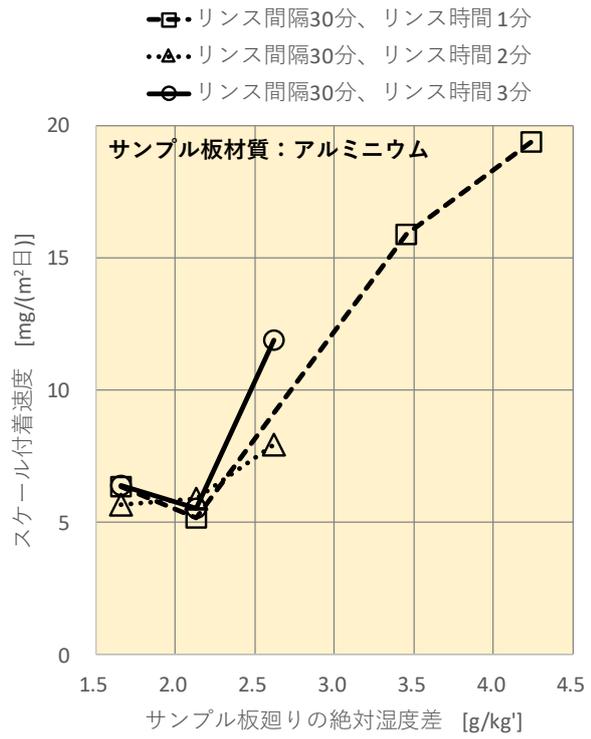


図4 リンス時間とスケール付着速度の関係

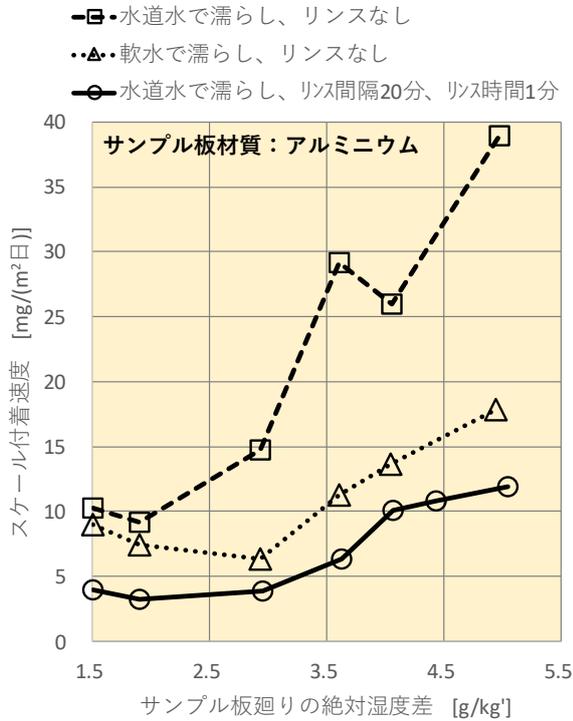


図5 水質とスケール付着速度の関係

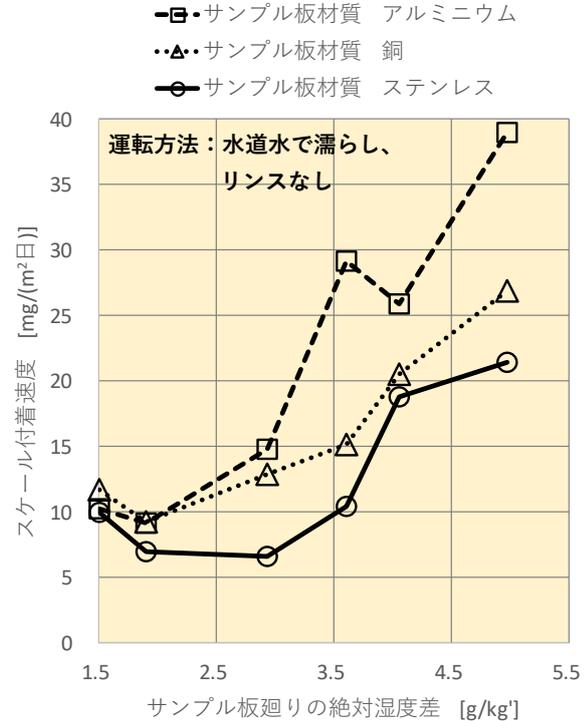


図6 サンプル板材質とスケール付着速度の関係

3. 検証結果

検証にて得られた最適なリンス運転条件と、その効果について述べる。なお本検証に用いた水道水の硬度は表1より約43mg/Lであるが、日本全国の浄水量から計算した水道水の平均硬度が約51mg/Lである³⁾ので、ややスケール成分が少なめの水道水と言える。

3.1 最適なリンス間隔

リンス時間を1分、リンス間隔を10分・20分・30分とした場合の、スケール付着速度とサンプル板廻りの絶対湿度差の相関を図3に示す。リンス間隔が10分と20分では、スケール付着速度に大きな差は無い。しかしリンス間隔を30分とすると、スケール付着速度は20分の時の1.5~2.5倍となる。リンス間隔が20分を超えると、水道水からスケール成分がサンプル板の表面に析出して固着し、リンスによって希釈・洗浄できない可能性が大幅に高まる。このことから、リンス間隔の最適値は20分と判断した。

3.2 最適なリンス時間

リンス間隔を30分、リンス時間を1分・2分・3分とした場合の、スケール付着速度とサンプル板廻りの絶対湿度差の相関を図4に示す。リンス時間によるスケール付着速度の有意な差はみられなかった。サンプル板表面に1分を超えて純水を流しても、スケール成分の希釈・洗浄効果は向上しない。リンス時間が短いほど純水使用量が減り濃縮排水のロスが抑えられるが、室外機に噴霧する純水は純水製造装置からノズルに至る配管を通過するのに一定の時間を要することから、リンス時間の最適値は1分と判断した。

3.3 リンスの効果

水道水で濡らしてリンスしない場合、軟水で濡らしてリンスしない場合、水道水で濡らしてリンスする場合のスケール付着速度とサンプル板廻りの絶対湿度差の相関を図5に示す。リンス間隔は20分、リンス時間は1分とした。軟水で濡らしてリンスしない場合のスケール付着速度は、水道水で濡らしてリンスしない場合の約1/2であった。この結果から、室外機に噴霧する場合、噴霧水を水道水から軟水に変更することでスケール付着を約半分を抑えられると考えられる。

水道水で濡らしてリンスをした場合のスケール付着速度は、水道水で濡らしてリンスしない場合の約1/3、軟水で濡らしてリンスしない場合の約2/3になった。噴霧水を水道水から間欠的に純水に切り替える手法は、水道水のみを噴霧する場合に比べてスケール付着を約1/3に抑える効果があり、軟水のみを噴霧する場合に比べて約2/3に抑える効果があると言える。

3.4 サンプル板の材質の影響

水道水で濡らしてリンスしない条件で、サンプル板の材質をアルミ・銅・ステンレスとした場合の、スケール付着速度とサンプル板廻りの絶対湿度差の相関を図6に示す。銅とステンレスの場合もアルミ同様、サンプル板廻りの絶対湿度差が大きくなるほどスケール付着速度は大きくなる。しかしその速度はアルミ>銅>ステンレスの順となり、軟らかい金属ほど大きかった。本試験ではサンプル板表面を研磨しているが、軟らかい金属ほど表面が凸凹になり、表面に水分が留まりやすかったためではないかと推測される。

4. まとめ

空冷パッケージエアコン室外機を噴霧冷却する際、室外機フィンにスケール付着を抑制するため、噴霧水のベースを水道水とし間欠的に純水（RO水）に切り替えるシステムを考案した。そのスケール付着抑制効果をサンプル板による試験で検証した結果、下記の知見を得た。

- ①噴霧水を水道水から純水に切り替えるまでの時間（リンス間隔）は、20分が最適値。
- ②純水噴霧を継続する時間（リンス時間）は、1分が最適値。
- ③本システムはスケール付着を、水道水噴霧した場合の約1/3、軟水噴霧した場合の約2/3に減らせる。
- ④本システムの純水使用量は、純水噴霧した場合の約1/20になる。

文 献

- 1) 石井秀一, 鈴木俊一郎, 涌田有紀: 電算PAC室外機の省エネ対策とその検証, 平成 30 年度冷空講論, 13, 東京 (2018).
- 2) 石井秀: 空調室外機 RO 純水散水システム, 建築設備と配管工事 Vol.48, No.14, p.51-54 (2010).
- 3) <http://softwater.jp/what/000052.html>

ABSTRACT

Outdoor units of air-cooled packaged air conditioners are often densely installed on the top of buildings and so on. In such environment, especially in summer, the air conditioners may be automatically shut down to avoid excessive refrigeration pressure. Spray cooling on outdoor units is a solution of this phenomenon, but it causes scale adhesion of the outdoor units' fin surfaces if you use city water. Our spray cooling system mainly uses city water and intermittently uses pure water. We verified the effect of suppressing scale adhesion in this system and revealed the best operating method.

微生物汚染対策効果評価のための バイオロジカル・インジケータの迅速判定方法*

五味弘・荒川宏樹・高橋秀人
藤井修二^{*1}・柳宇^{*2}・田中毅弘^{*3}

Rapid Judgment Method of Biological Indicators for Evaluation of Microbial Pollution Control Effect

Hiroshi Gomi・Hiroki Arakawa・Hideto Takahashi
Shuji Fujii・U Yanagi・Takehiro Tanaka

本研究では、無菌製剤工場等で定期的実施される室内除染の効果の判定に用いる BI (バイオロジカル・インジケータ) に関して、生菌の有無を迅速に測定できる方法を確立することを目的とした。安価で簡便な測定方法を目指し、培養法と市販の ATP (アデノシン三リン酸) 測定器による計数法を組み合わせた迅速で信頼性の高い測定プロトコルを考案し、検証した。その結果、12 時間以内に除染効果の判定が可能であることが確認された。

1. はじめに

2019 年度より検討を行っている浮遊細菌濃度の簡易迅速測定法¹⁾に加えて、無菌製剤工場等で微生物汚染を排除するために定期的に行われている室内除染の効果の簡易迅速試験法について検討した。上記の工場等で行われる除染の成否の判定には、バイオロジカル・インジケータ(BI)が用いられている。現在一般的な、BI の菌を培養して判定する方法(ガス測定法²⁾、平板培地培養法)では、判定に数日～数週間を要するため、施設の使用の制限、製造再開後の陽性判定によるリスクなどが生じおり、迅速な BI の判定方法が求められている(図 1)。

本研究では、高価な測定器等を用いず、現場で簡便に、かつ迅速な BI の判定が可能なる方法を確立することを目的として、生菌の増殖能を利用してコロニー数を増やして、市販の ATP (Adenosine Triphosphate) 測定器³⁾で測定する方法、言わば「マイクログロニーATP 法」に着目して、迅速測定プロトコルと信頼性の高い判定法を考案し、検証した。

2. 本測定方法について

本測定法で用いる菌体、培地、測定器等の諸元を表 1 に示す。二酸化塩素ガス除染の効果判定用の BI 菌である *Bacillus atrophaeus* (枯草菌)⁴⁾⁵⁾ は、芽胞を形成し、温度他の環境耐性が強いためにインジケータに用いられている。培養液は、SCD (Soybean casein digest) 液体培地に芽胞の発芽促進剤を加えたものを用いた。ATP 測定器、捕集キット並びに ATP 消去試薬はキッコーマンバイオケミファ(株)が市販⁶⁾しているものであり、捕集キットは液体用である。なお、この捕集キットの試薬は、ATP に加えて、ATP が加熱、発酵、酵素反応等によって変化する ADP (アデノシン二リン酸)、AMP (アデノシン一リン酸) も測定が可能であり、ATP 単独に比べて感度が高くなっている。

本測定方法の測定手順を図 2 に示す。本測定法は、回収した BI を①専用培養液に浸して一定時間培養し、②培養液を攪拌後に取り分けて ATP 消去試薬を加え、再度攪拌して 30 分間保持することで培養液成分その他菌体内以外にバックグラウンドと

※2020 年度空気調和衛生工学会講演論文¹³⁾を加筆修正したものである。

*1 東京工業大学名誉教授 *2 工学院大学 *3 東洋大学

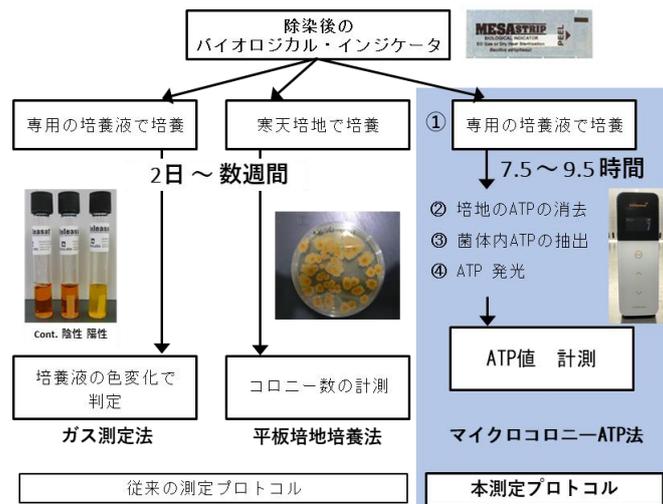


図1 BI評価のための従来法と本測定方法の比較

表1 測定諸元

芽胞菌懸濁液	SSGE/6(Mesa Laboratories, Inc.)
・指標菌	<i>Bacillus atrophaeus</i> (ATCC9372)
・指標菌数	2×10 ⁶ CFU/0.1mL
・溶媒	エタノール 40 vol%
培養液	SCD 培地 + 発芽促進剤
・培養条件	35° C × 0, 3, 5, 7, 9, 11 hr
ATP 測定	(キッコーマンバイオケミファ社製)
・測定器	ルミテスター Smart
・捕集キット	ルシパック A3 Water
・補助試薬	ルシフェール ATP 消去試薬
平板培地培養法	SCD 寒天培地
・培養条件	35° C × 5 日間

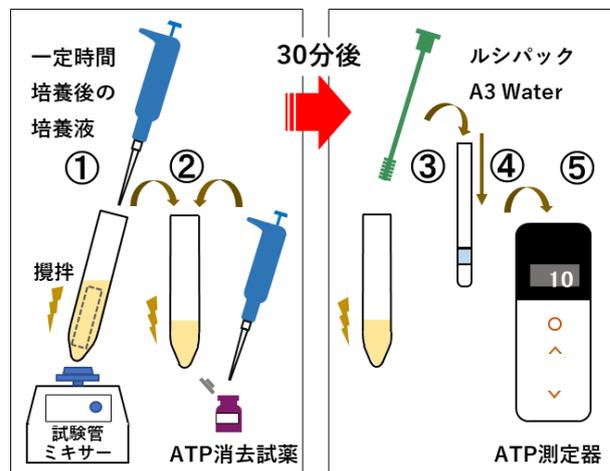


図2 本測定プロトコル

して存在する ATP を消去し、③その培養液を攪拌後、捕集スティックで約 150 μ L サンプルングし、④捕集キット内で、ATP 抽出液を混合して 25 秒間菌体内の ATP を抽出し、その溶液に ATP 発光試薬を混合して 10 秒間後に、⑤発光量を測定器により RLU (Relative Light Unit) として数値化するものである。

3. 試験方法と試験結果

3.1 試験方法

BI の判定を想定して、試験的に培養液のサンプルを作成して評価した。試験用のサンプルとしては、SCD 液体(以後 SCD) 培養液 1mL 当たり生菌 10⁰CFU と死菌 10⁶CFU を含むサンプル(生菌サンプル)と死菌のみ 10⁶CFU を含むサンプル(死菌サンプル)を作成し、35° C で培養時間 0、3、5、7、9、11 時間後の ATP 量を測定した。生菌サンプルの生菌 10⁰CFU は、表 1 に示す市販の芽胞菌懸濁液を用いて 10 段階希釈法により作成した。生菌サンプルおよび死菌サンプルに含まれる死菌 10⁶CFU は、前記の懸濁液をシャーレに塗布した BI を作成し、BI 菌を 6 Log 減少できる CT (濃度×時間) 値⁷⁾ の 2 倍の条件で二酸化塩素ガスに暴露して作成した。

また、ATP 法と従来の平板培地培養法の相関を調べるために、ATP 測定と同じ培養時間の SCD 培養液を平板培地に塗抹し、35° C で 5 日間培養後、コロニー数を計数した。

4.2 陰性の判定

陰性の判定も前記の上側信頼限界となる ATP 値を超えなければ良いのであるが、どの時点で陰性と判断するかが判定上の課題となる。この判定に使うのが、各 SCD 培養時間における生菌データで、生菌データが死菌データと一致しないにも関わらず一致すると判定する確率を β とすると、 $1-\beta$ はサンプリング試料中に生菌が存在した場合に、同じ培養時間での死菌データと異なる(すなわち陽性)と判定する場合の検出力となる⁸⁾。換言すれば、この培養時間において死菌データから求めた上側信頼限界を超えなければ、 $1-\beta$ の検出力で陰性と判定できる。 β は、(2)式により t 値を求め、その t 値より外側の t 分布の面積(積分値)になるが、例えば、エクセルでは(3)の関数式を用いて簡易に計算できる。

$$t = (\text{XLT} - \text{上側信頼限界}) / \text{SELT} \quad (2)$$

ここで XLT :ある培養時間での生菌データの平均値

SELT :同上生菌データの標準誤差

$$\beta = \text{T.DIST}(-t, \text{自由度}, \text{TRUE}) \quad (3)$$

ここで T.DIST はエクセル関数

サンプル数 n を 3~5、死菌データから上側信頼限界を求めた時の危険率を 5%、1% とした場合の β 値を表 3⁹⁾ に示す。5 時間培養では、いずれの危険率、 n 数において検出力 $(1-\beta) \times 100$ は数パーセントで、生菌が存在していても信頼限界より高い RLU 値を示す確率は小さいため生菌の存在を検出できない。従って、死菌データから求めた上側信頼限界以下の測定値であっても、それを陰性とは判定出来ないことになる。7 時間培養では、検出力が 95%~99% となるので、上側信頼限界を超えない場合には、95%~99% の検出力で検出されない、すなわち陰性であると判断できる。

表 3 各サンプル数と培養時間における β 値

サンプル数	危険率 α	上側信頼限界 [RLU]	β 値		
			培養時間(hr)		
			5	7	9
3	0.05	20.6	0.969	0.031	0.026
4		17.6	0.971	0.009	0.008
5		16.4	0.972	0.003	0.003
3	0.01	34.0	0.995	0.049	0.027
4		23.9	0.996	0.013	0.009
5		20.5	0.996	0.004	0.003

例えば、現場で測定した 5 サンプルの培養 7 時間後の ATP 平均値 (RLU 値) が、死菌データの上側信頼限界 20.5RLU を超えなければ、7 時間培養の生菌データから計算される検出力 99% 以上 ($\beta=0.004$) で陰性と判定できる。要約すれば、SCD 培養 7 時間以降であれば、相当の信頼確率で判定できる。

なお、今回提示した統計的数値は不偏的なものではなく、データ数が増えれば信頼性が向上するので、その場合には例えばサンプル数を低減することも可能になる。

5. 測定結果の考察

5.1 枯草菌に対する ATP 法と寒天培地培養法の相関

生菌試料の ATP 値と平板培地培養法でのコロニー数の関係を図 4 に示す。コロニー数は、数千 CFU/mL 以降で ATP 値と明確な相関が見られた。参考に、メーカー取説に記載された大腸菌の検量線を同図中に実線で示す。細胞当りの ATP 含量は細菌によって異なると考えられるが、CFU と ATP 値 (RLU) の関係を両対数グラフにすると、菌種が違えば切片は異なるが勾配は同じになると考えられ、本図でも同様な結果が得られている。枯草菌に対しても大腸菌同様に寒天培地培養法に相関する定量性が得られることが判った。

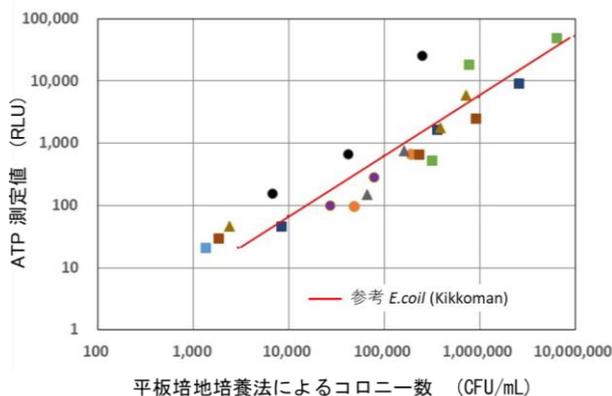


図4 枯草菌のATP測定値とコロニー数の関係

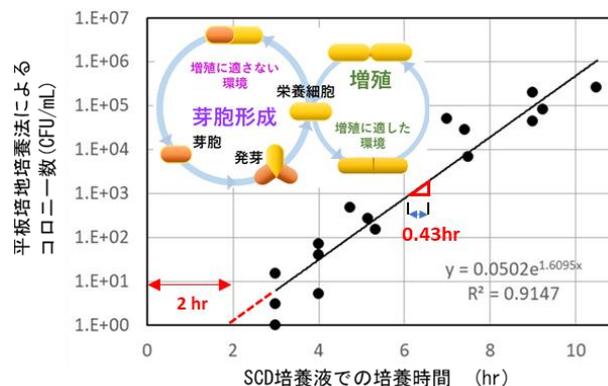


図5 枯草菌の培養での増加特性

5.2 枯草菌の増殖特性

前記の平板培地培養法で測定したコロニー数を縦軸に、SCD培養時間を横軸にして図5に示す。なお、死菌試料を同法で測定したコロニー数は、いずれのSCD培養時間においても全て0CFU/mLであった。

本図より本培養条件での枯草菌の倍加(2倍に増殖する)時間は、0.43hrであった。また、近似曲線を外挿して縦軸1CFU/mLになる時間を求めると、2時間程度となり、この時間以降からコロニー数の増加傾向が始まると想定できる。この時間遅れは、芽胞が発芽して増殖を開始⁽¹⁰⁾するまでに本培養条件では2時間程度を要するためと考える。

なお、図3で培養5時間までATP値が増加しないのは、この増殖開始の遅れと使用した本測定法の検出下限レベル(本測定結果では11RLU程度)が重なったためである。

5.3 生菌の検出限界に関する考察

今回作成した生菌試料は、 10^6 CFU/0.1mLレベルのメーカ菌液を10倍段階希釈法によって 10^0 CFU/mLとしている。そのため、実際に存在する菌数は1mL当たり1~9CFUに分布している可能性がある。仮に生菌数が最も少ない1CFU/mLの場合に培養7時間でATP値がどの程度になるかを枯草菌の増殖特性とATP測定の感度から検討してみる。

図5の結果より、発芽及び増殖までの時間遅れを2時間、倍加時間を0.43hrとすると、最初にSCD培養液中に1CFU/mLの生菌が存在した場合に7時間後の生菌数 C_7 は、2の実質増殖時間/倍加時間のべき乗、すなわち $C_7=2^{[(7-2)/0.43]}=3,165$ (CFU/mL)となる。図4より、この時のATP値は30RLU程度となり、死菌サンプルのATP測定値の平均値11RLU(図3)より大きくなるので、1CFU/mLの生菌の存在は検出可能なレベルになると言える。

次に、BIに生菌が1CFU生き残っていた場合に検出可能な培養時間を検討する。この場合は培養液を何ミリリットルにするかで初期濃度が変わることになる。あまり培養液が多いと初期濃度が小さくなる。BIが全て浸漬される最少の培養液の量として、2mL程度が適当と考えられる。この量であればATP測定1サンプルで150 μ Lを使うので、5サンプル分を使っても余裕はある。この場合には、初期濃度は計算上0.5CFU/mLとなるので、前出の計算で7時間後の生菌数 C_7 は、3,165の半分の1,580CFU/mL程度となる。この生菌数では、図4を見ると10RLUに近くなり、死菌サンプルの平均値と近くなるので判定が難しくなる可能性が高い。したがって、BIに残存する1CFUの生菌を判定するには、培養時間を9時間程度にすることが推奨される。

なお、判定の期限に余裕があれば、9時間丁度に測定する必要はなく、9時間以上であれば作業に都合の良い時間に測定すれば良い。例えば11時間後に測定した場合、生菌が存在すれば必ず9時間後よりはATP値は大きくなるので、より高い信頼確率で判定できる。

6. おわりに

本測定法は、比較的安価な測定器で測定でき、測定操作も簡単で、結果を数値として扱うことが出来るのでそれ自体、大変、利便性が高く、信頼性も高い測定方法と言える。また、BIの培養液を継続して培養しておけば再測定も可能なため、測定ミス等に対する冗長性もあると言える。

現在、除染ガスとしては、従来から用いられてきたホルムアルデヒドがWHOから発癌性を警告されたことから、

代替ガスとして過酸化水素、二酸化塩素ガス等が用いられるようになった。これらのガスの除染は、ホルムアルデヒドよりも短時間で済むことも利点となっている。除染の工程としては、①除染対象室の養生、除染用機器の設置、BIの設置等の前準備、②除染対象室への除染ガスの導入と保持、③除染終了後、人体や製品等に影響がない濃度まで除染ガスを分解あるいは換気するエアレーション、④BI回収、後片付け、⑤BI判定による除染効果の確認、に大きく分けることが出来る。ホルムアルデヒド代替ガスで除染工程時間を比べると、二酸化塩素ガスは過酸化水素に比べて前記③のエアレーションの時間が比較的短く、トータルとしても若干短い。作業内容や機器の台数、養生の割合にもよるが、二酸化塩素ガス除染の①前準備～③エアレーションまでの工程時間は9時間程度¹²⁾で済み、朝の9時から作業を開始して除染作業当日の夕刻までにはBI回収が可能となることが多い(図6)。BIの判定が12時間以内であれば、除染作業翌日の早朝までに判定が出来、除染の完了を確認して操業を開始出来るので、除染対象施設使用者の利便性をさらに増すことが出来る。

また、枯草菌を使った測定は除染効果の判定目的以外にも多いと考えるので、本技術が微生物汚染対策に広く貢献できれば幸いである。

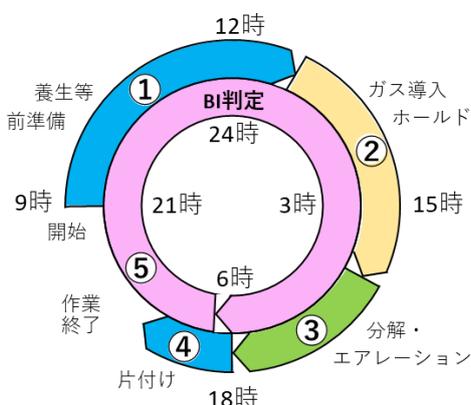


図6 二酸化塩素ガスによる除染工程の一例

謝辞

統計的判定法に関してご指導を頂いた長岡技術科学大学生物機能工学専攻、高原美規准教授に感謝の意を表します。

文献

- 1) 藤井修二,柳 宇,田中毅弘,荒川宏樹,那須正夫,浮遊微生物濃度の簡易迅速測定法の検討,第 36 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会講演論文集,177-178(2019).
- 2) 富塚一路,藤井修二,柳宇,田中毅弘,荒川宏樹,工場における品質管理への応用を念頭においた浮遊細菌の簡易モニタリング方法の検討,空気調和・衛生工学会大会学術論文集,137-140(2019).
- 3) 第十七改正日本薬局方—参考情報、参 114-115(2016).
- 4) United States Pharmacopeia,chapter 1229.7(2013).
- 5) JIS B 9918-1(2008)クリーンルーム及び関連制御環境—微生物汚染制御—第1部:一般原則及び基本的な方法.
- 6) キッコーマンバイオケミファ社ホームページ <https://biochemifa.kikkoman.co.jp/> .
- 7) 荒川宏樹,高橋秀人,二酸化塩素ガスを用いた微生物除染特性の把握,第 34 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講演論文集,241-244(2017).
- 8) 大垣俊一,Type II error と Power analysis,Argonauta 11:3-16(2005).
- 9) 荒川宏樹,高橋秀人,五味弘,藤井修二,柳 宇,田中毅弘,那須正夫,除染効果判定のための微生物迅速試験法の開発,第 37 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講演論文集,165-168(2020).
- 10) 蜂須賀養悦:芽胞(細菌性孢子)発芽のメカニズム,化学と生物,7(9),509-516(1969).

- 11) 枯草菌の孢子形成と発芽に関する研究、摂南大学微生物学研究室資料、1-2(2018).
- 12) 株式会社イカステリファームホームページ <https://www.ikari-sterifirm.co.jp/service/> .
- 13) 五味弘,荒川宏樹,高橋秀人,藤井修二,柳 宇,田中毅弘:微生物汚染対策効果評価のためのバイオロジカル・インジケータの迅速判定方法,令和2年度空気調和・衛生工学会大会学術論文集,141-144(2020).

ABSTRACT

Aseptic pharmaceutical manufacturing factories regularly carry out indoor decontamination to eliminate microbial contamination, and it is hoped to promptly determine the decontamination effect in order to promptly resume operations. The purpose of this study is to establish a method that can easily and quickly determine BIs(Biological Indicators) in the field using inexpensive measuring instruments, and we devised and validated a rapid and reliable decision protocol by a Micro Colony - ATP(Adenosine Triphosphate) method that combines culture method with measurements by a commercially available ATP measuring instrument. As the result, it was confirmed that the judging decontamination effect was possible within 12 hours.

粘着テープ製造工程での クローズド VOC 回収システムの実証

河岡将行・高橋秀人・伊藤衛

Demonstration Test of Closed-loop VOC Recovery System

Masayuki Kawaoka・Hideto Takahashi・Mamoru Ito

VOC 排ガスを処理したのちに製造装置側へ空気を循環再利用することで VOC の大気放出をゼロにする、『クローズド VOC 回収システム』を開発した。粘着テープメーカーである寺岡製作所の量産製造工程に設置したクローズドシステム実機にて、装置性能および顧客製品品質に対する影響を検証した。その結果、装置性能の目標を達成し、かつ本システムが顧客製品品質に対して影響がないことを世界で初めて実証した。本実証において、VOC 回収性能、省エネ性能の確認に加えて、回収溶剤はほぼ新規品と同等の品質を有すること、クローズド化により顧客製造環境が安定化することを確認した。

1. はじめに

トルエン、キシレン、酢酸エチルなどを代表とする揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds : VOC) は、塗料、インキ、接着剤、粘着剤などに含まれ、多くの産業で使用されている。VOC は大気中に放出されると浮遊性粒子状物質 (Suspended Particulate Matter : SPM) や光化学オキシダントの原因物質となり、光化学スモッグの発生など呼吸器系や粘膜に健康被害を与えることが知られている¹⁾。2006 年の大気汚染防止法の改正以来、印刷会社や粘着テープメーカーなどの VOC を大量に取り扱う企業が積極的に排ガス処理装置を導入したことで、大幅に VOC の排出量は削減されたものの近年は下げ幅が鈍化しており、2018 年度の日本国内における総排出量は 64 万トン以上にのぼる²⁾。

近年では、ESG 投資 (環境・社会・ガバナンスを考慮した投資) のように、投資家からの見方も変わりつつあり、企業の持続的な成長のためには VOC 排出と CO₂ 排出の削減は優先的に解決すべき課題となっている。多くの企業では、すでに VOC 処理装置を導入しており、処理装置単体の性能向上だけでは VOC 排出量を削減することは難しい。そこで当社では、排ガスを処理した空気を循環再利用させるクローズドシステムを開発した³⁻⁵⁾。本システムは、VOC の大気放出量を大幅に削減するうえに、VOC を非燃焼で回収処理をするため CO₂ の排出量も大幅に削減できる、これまでにない画期的なシステムである。本報では、開発した VOC 処理システムを粘着テープの実製造工程に適用した実証システムの運転結果について報告する。

2. 従来システムとの比較

図 1 に粘着テープ製造工程における従来の排ガス処理システムと開発したクローズドシステムを示す。

排ガス中の VOC の処理方法としては、燃焼法と吸着回収法が一般的に使用されている。燃焼法は、VOC を燃焼して酸化分解させる方法であり、吸着回収法は、活性炭などの吸着剤に VOC を吸着させて排ガスを処理する方法である。いずれの場合も VOC が完全に分解または吸着除去されるわけではなく、数十から数百 ppm といった VOC 濃度で常に大気放出されている。VOC 濃度としては十分低濃度になっているが、排気風量が多い工場では VOC の大気放出量が年間数百トンになるケースもあり、CSR (Corporate Social Responsibility) や環境経営の観点から VOC の大気放出

量を削減したいという企業のニーズが高まっている。

一方で、開発したクローズド VOC 回収システムは、製造工程（ドライヤ）から発生した VOC を吸着ロータで吸着処理し、浄化した空気をドライヤの給気へ循環再利用する。ドライヤの給排気の系統をクローズド化することにより、排出口がなく VOC の大気放出量を原理上ゼロにすることができる。

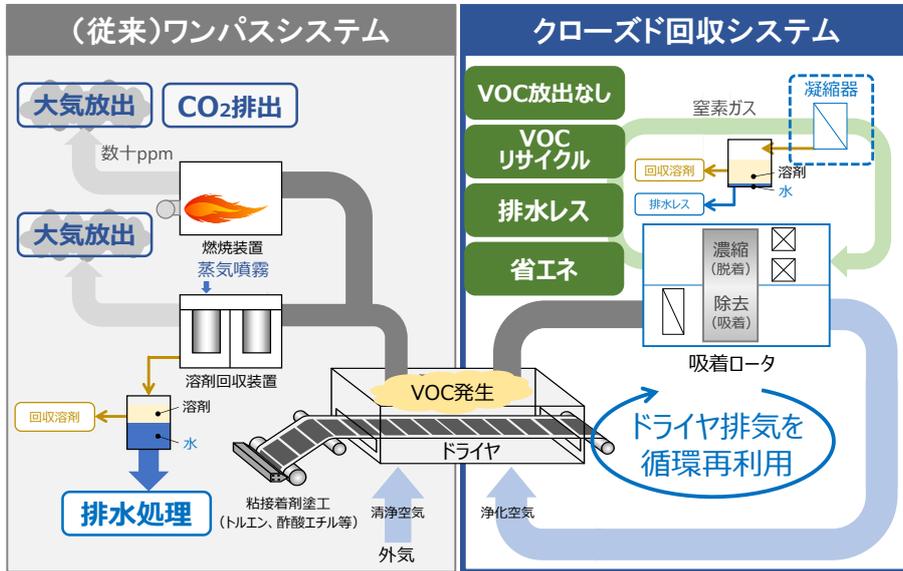


図 1 VOC 処理システムの比較

3. クローズドシステムの概要

当社が開発した新しい VOC 回収システムを図 2 に示す。塗工機やドライラミネータのドライヤ（乾燥設備）（図中①）から出た VOC を含む排ガスを吸着ロータ（図中②）にて吸着処理し、浄化した空気をドライヤの給気へ循環再利用する（図中③）クローズドシステムである。ドライヤの給排気の系統をクローズド化することにより、排出口がなく VOC の大気放出量を原理上ゼロにすることができる。吸着ロータ（図中②）は疎水性のゼオライトロータを使用しており、水分より VOC を選択的に吸着する。吸着ロータに吸着した VOC は、加熱した窒素ガス（図中④）で脱着され、高濃度の VOC を含んだ窒素ガスは凝縮器で液化回収（図中⑤）する。液化回収後の窒素ガスは、再度吸着ロータの加熱に利用されるため、再生系統もクローズド化されており VOC が大気中に放出されることはない。

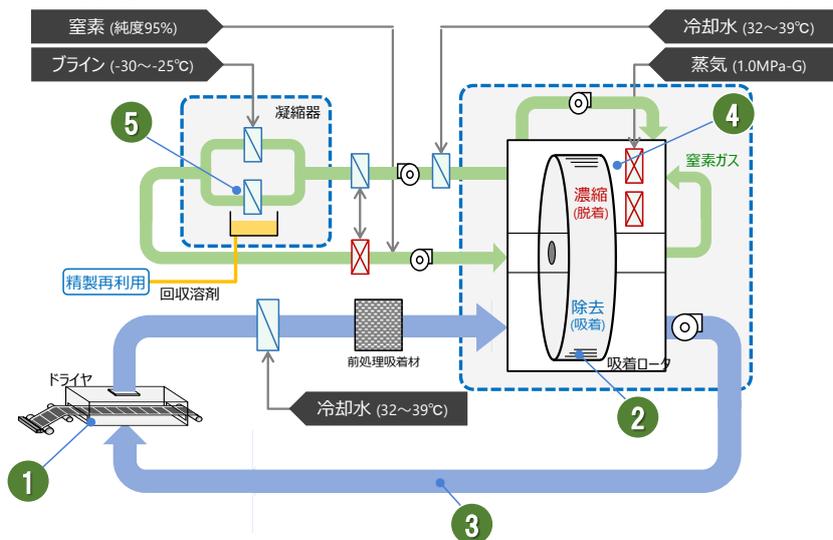


図 2 クローズド VOC 処理システム

4. 粘着テープ製造工程での実証試験

クローズド VOC 回収システムの有効性を検証するために、粘着テープメーカーである株式会社寺岡製作所（茨城工場）において、排気風量 5,000m³/h のドライヤ（使用溶剤：主にトルエン）に本システムを導入し（写真 1）、VOC 排出量の削減効果、CO₂ の排出量削減効果、製造環境の安定性、回収溶剤の性状、製品（粘着テープ）品質などを評価した。

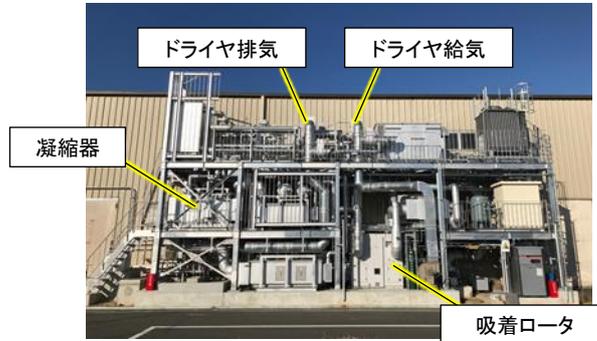


写真 1 実証システム

4.1 実証設備概要

図 3 に、実証システムのフローを示す。建屋内に設置されたドライヤから排出された VOC を含む排ガスは、屋外に設置された VOC 回収装置にて処理される。従来システム（以降、ワンパス）とクローズドシステムでの比較が出来るように、給排気ダンパの切替が可能である。ワンパス時には、建屋内空気を吸引し給気加熱コイルで加熱したのちにドライヤへ給気しており、ドライヤからの排気は回収装置で処理したのちに屋外へ排気した。クローズド時には、建屋内空気の取入ダンパおよび屋外排気ダンパを閉めることにより、給排気が循環するように調整した。給排気風量を調整するには、VOC を含んだドライヤ内の空気が室内に漏洩しないように、ドライヤ内を微負圧にした。

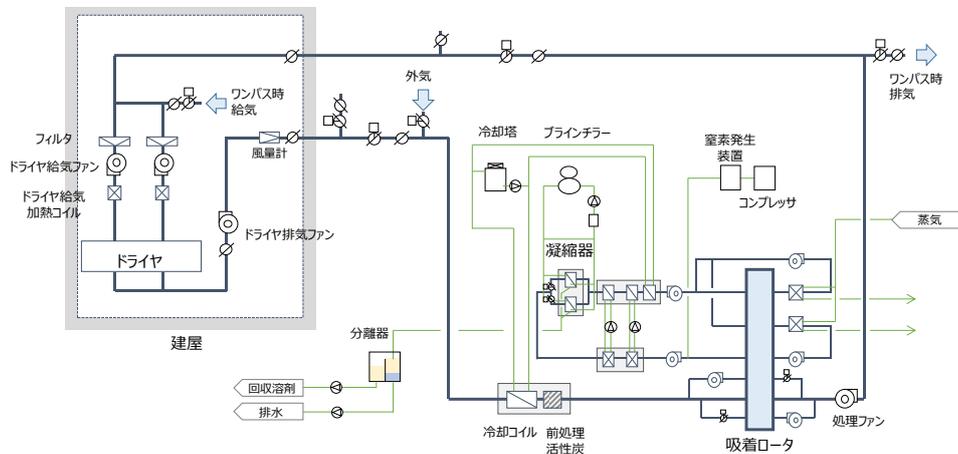


図 3 実証システムフロー

4.2 実証試験結果

ここでは、クローズド運転時の実証試験結果を示し、ワンパス運転とクローズド運転の比較、および季節間の影響について考察を行った。

4.2.1 VOC 排出量結果

図 4 に、ドライヤ排気の VOC 濃度と溶剤回収装置で処理したあとの空気の VOC 濃度を示す。排気濃度 1,000 から 1,200ppm において処理後の VOC 濃度は 20ppm 以下であり、除去率 98%以上と高い除去性能であることを確認した。クローズドシステムでは、理想的には大気放出量はゼロとなるが、ドライヤ内の空気が室内に漏洩しないように微

負圧にして室内空気を取り込むため、取り込んだ空気量を外部に放出する必要がある。本実証システムにおいては、約 250m³/h 程度の空気を屋外に放出していることを確認した。これは、排気風量 5,000m³/h の 5%にあたる。従来の処理済み空気を大気に放出するワンパスシステムと年間の VOC 大気放出量を比較すると、図 5 に示すように 95%の削減効果があることが分かった。

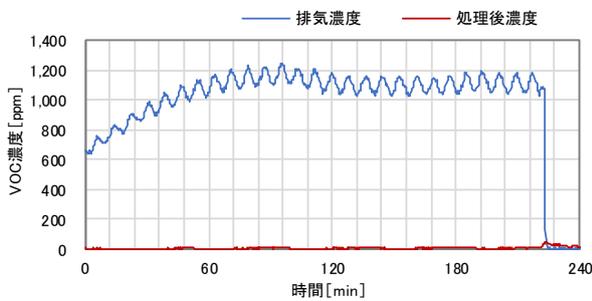


図 4 VOC 濃度の経時変化

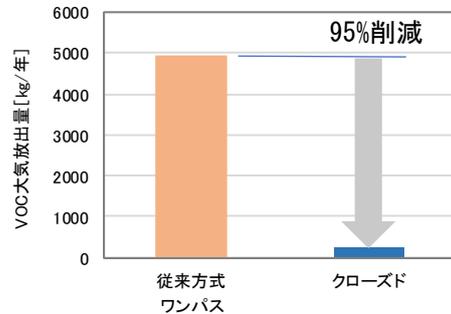


図 5 年間 VOC 大気放出量比較(試算)

4.2.2 CO₂ 排出量結果

従来の処理方法とクローズドシステムにおける CO₂ 排出量の比較を図 6 に、試算に用いた係数を表 1 に示す。クローズドシステムを導入する前は溶剤を燃焼処理していたので、従来処理方法では VOC の燃焼にともなう CO₂ 排出量を試算した。また、溶剤の新規購入に必要な CO₂ 排出量についても試算項目に入れた。クローズドシステムでは、回収した溶剤の 90%を再利用でき、残り 10%を新規購入すると仮定した。装置運転に関わる CO₂ 排出量は、蒸気使用量と電気使用量の実績値から算出した。

図 6 より、従来の処理方法よりもクローズドシステムの方が 78%の CO₂ 排出削減効果があることを確認した。VOC の燃焼および溶剤購入にともなう CO₂ 排出量が多く、非燃焼で溶剤の再利用率が高いほど、排出削減効果が高いことが示された。

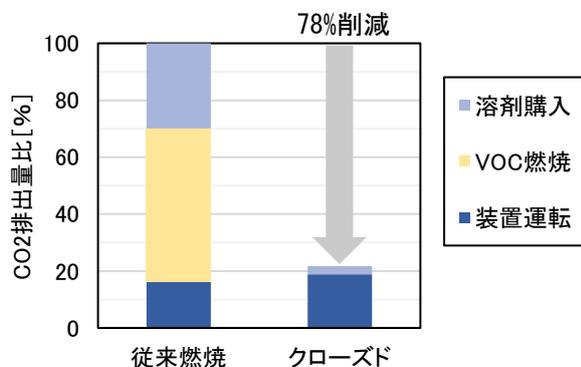


図 6 CO₂ 排出量比較(試算)

表 1 CO₂ 排出量試算時の排出係数

トルエン燃焼	kg-CO ₂ /kg	3.343
トルエン生産	kg-CO ₂ /kg	1.86
蒸気 ^{※1}	kg-CO ₂ /kg	0.126
電力 ^{※2}	kg-CO ₂ /kWh	0.468

※1 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧(環境省)

※2 電気事業者別排出係数、東京電力、R2 環境省・経済産業省公表値

4.2.3 製造環境の安定化と省エネルギー化

従来ワンパスシステムでは、ドライヤの給気に建屋内空気を使用しているため、天候や季節変化によってドライヤ内の湿度が変化していた。実証試験期間中においても、夏期と冬期で外気の絶対湿度が 20g/kg(DA)から 2g/kg(DA)と、大きく変化していた。本システムを導入した工程で製造された製品は、湿度変化の影響が少ない製品であったが、製品や使用溶剤によってはとくに高湿度の場合に製品品質が低下することが知られている。また、溶剤の乾燥効率の観点からも低湿度の方が望ましいと考えられる。クローズド化すると外気の流入がほとんどなくなり、ドライヤ内は低湿度になることが期待されるため、ワンパスとクローズドでの給気湿度を比較した。結果を図 7 に示す。ワンパス運転時は外気と同じ絶対湿度 8g/kg(DA)であったが、クローズドにすると絶対湿度 1g/kg(DA)以下の低湿度になることを確認した。また、長時間連続で運転しても湿度変化することなく、低湿度を維持できることを確認した。

ドライヤの給気に外気を使用した場合のもう一つの問題点として、冬期の加熱エネルギーの増大が挙げられる。ドライヤは100℃程度に加熱されるが、冬期の低温外気を100℃まで加熱するには多大なエネルギーを要する。一方クローズドシステムでは、吸着ロータで処理したあとの空気は外気より温度が高いため、ドライヤの給気に必要な加熱エネルギーの削減が期待できる。図8にワンパスのときとクローズドのときのドライヤ給気加熱コイルの入口温度の変化を示す。クローズドのときは約45℃であり、ワンパスのときよりも高温の空気を供給できることが確認できた。本実験結果をもとに年間の加熱量を試算した結果を図9に示す。従来ワンパスと比べて、ドライヤ給気加熱量を年間で42%削減できる試算結果となった。また、従来ワンパスでは、外気の季節変動により加熱量が変化する一方で、クローズドのときは年間を通じて加熱量が安定しており、加熱負荷の平準化が図れることも分かった。

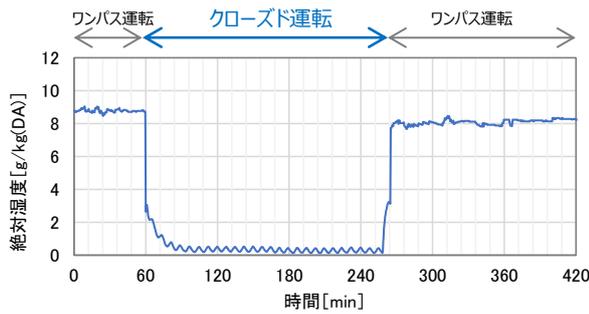


図7 ドライヤ給気絶対湿度

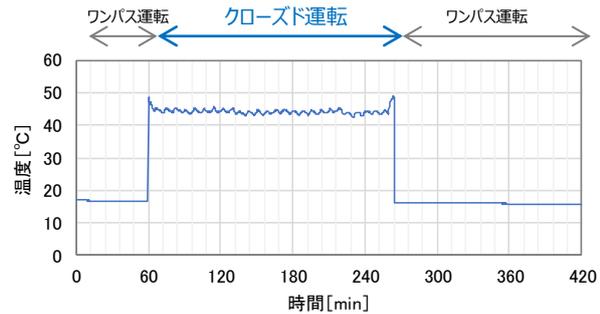


図8 ドライヤ給気加熱コイル入口温度

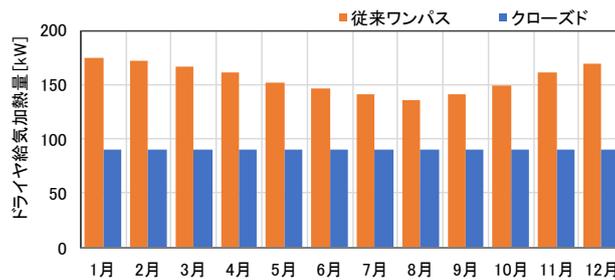


図9 ドライヤ給気コイルの年間加熱量(試算)

4.2.4 回収溶剤品質の検証

回収溶剤(写真2)の品質分析結果を表2に示す。参考として試薬としてのトルエンのJIS規格⁶⁾を併せて記す。写真2でも確認できるように、非常に透明度が高く、純度も99.9%以上であり新規品と同程度の品質であることを確認した。回収溶剤の再利用方法については、今後検討していく予定である。



写真2 回収溶剤

表2 回収溶剤の成分結果

	回収溶剤	JIS K8680:2006
トルエン	99.92%	99.5%以上
低沸点成分類	0.01%	—
高沸点成分類	0.04%	—
水分	0.03%	0.03%以下
不揮発分	0.001%以下	0.001%以下
外観	無色透明液体	無色透明液体
APHA	5以下	—
密度(20℃)	—	0.864~0.868
比重(15℃/4℃)	0.868	—
pH	7.1	—
臭気	異臭無し	—
ハロゲン	無し	—
不揮発分性状	目視不可	—
発泡性	無し	—
浮遊物	無し	—

4.2.5 顧客製品品質の検証

同一製品の製造中にワンパス運転とクローズド運転を切替え、製品品質に影響がないかを確認した。顧客が管理する検査項目において、ワンパスとクローズドで差が無いことが確認できた。

5. おわりに

粘着テープメーカーである寺岡製作所の量産製造工程に設置したクローズドシステム実機にて、装置性能および顧客製品品質に対する影響を検証し、システムの有効性を確認した。

現在日本国内で排出されている VOC は年間で 64 万トン以上あり、近年では、前年からの VOC 排出削減量が 1 万トン程度である。本クローズドシステムの展開先である印刷インキや粘着剤などの製造工程では、年間で約 5 万トン排出しており、本クローズドシステムによる VOC 大気放出量の削減効果は大きい。また、VOC の非燃焼処理により CO₂ の発生量を大幅に削減でき、本クローズドシステムが国内の粘着テープ・包装材料用乾燥施設とグラビア印刷用乾燥施設の全施設に設置された場合を試算すると、年間約 300 万トンの CO₂ 排出量を削減できる可能性があり、地球温暖化防止に大きく貢献できる。

今後は、ドライヤ（溶剤乾燥炉）の立上げ、立下げなどの運転状態の変更や排気風量、VOC 濃度の変動に応じた省エネルギー運転について検討していき、さらなる地球温暖化防止、地球環境保全に貢献できるよう努力する所存である。

謝 辞

クローズドシステムの実証にあたり、多大なご協力をいただいた株式会社寺岡製作所の関係者のみなさまに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 環境省ホームページ, 揮発性有機化合物について 光化学スモッグのないくらし,
<https://www.env.go.jp/air/osen/voc/pamph2/index.html>
- 2) 環境省ホームページ, 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリ報告書 (令和 2 年 3 月),
<https://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory.html>
- 3) 河岡将行、布川雄大 (2019)、「VOC の大気放出をゼロにするクローズド VOC 回収システム」, コンバーテック 2019 年 10 月号、Vol.55、No.47、pp72-76
- 4) 高橋秀人、伊藤衛 (2019)、「VOC 排出抑制の将来像 (総論)」, 空気清浄、57 巻 2 号、pp4-8
- 5) 河岡将行、伊藤衛 (2020)、「VOC 排出規制の現状と展望」クリーンテクノロジー、2020 年 1 月号、Vol.30 No.1、pp39-42
- 6) 日本産業規格, JIS K8680:2020, トルエン (試薬)

ABSTRACT

We have developed a "closed VOC recovery system" that reduces VOC emissions to the atmosphere by treating VOC exhaust gas, circulating, and reusing in the manufacturing process. We verified impacts on the equipment performance and the customer product quality with closed system equipment installed in the actual adhesive tape manufacturing process. As a result, it was demonstrated that the target equipment performance was achieved and that this system did not affect the quality of customer products. In this demonstration, in addition to confirming VOC recovery performance and energy-saving performance, it was confirmed that the recovery solvent had almost the same properties as unused products and that the customer manufacturing environment was stabilized by the closed system.

低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 — 一定置型とオフライン熱輸送型の蓄熱システムの実証試験 —

川上理亮・鎌田美志・鈴木美穂
中田拓司・大山孝政・谷野正幸
宮原英隆^{*1}・山内一正^{*2}・名和博之^{*3}
佐藤敦史^{*4}・鈴木正哉^{*5}・松田聡^{*6}

Development of Adsorption Thermal Storage System Utilizing Low-temperature Waste Heat - Demonstration Test for Thermal Storage System of Stationary Type and Offline Heat Transportation Type -

Yoshiaki Kawakami・Haruyuki Kamata・Miho Suzuki
Takuji Nakata・Takamasa Oyama・Masayuki Tanino
Hidetaka Miyahara・Kazumasa Yamauchi Hiroyuki Nawa
Atsushi Sato・Masaya Suzuki・Satoru Matsuda

我々は HAS-Clay 吸着材を用いて、低温廃熱が利用できるオープンサイクル形式の吸着材蓄熱システムを開発し、一定置型蓄熱システムとオフライン熱輸送システムの実証試験を実施した。一定置型蓄熱システムでは吸着材充填槽を排気で蓄熱し、蓄熱槽からの熱風を商業プラントの乾燥工程に供給した。一方、オフライン熱輸送システムではコージェネレーションシステムで蓄熱し、スイミングセンターヘトラートラックで蓄熱材を輸送してプールの水などの昇温熱源として供給した。夏季・中間期・冬季のシーズンに渡って吸着蓄熱システムを評価し、この実証試験によって 90%以上の再生効率が確認された。本システムの蓄放熱特性を評価した結果から、ヒートポンプのような昇温機能を追加することが可能であり、吸着剤の特性や工程に合わせた最適な運転条件での設計が必要であることがわかった。

1. はじめに

各種工場などでは省エネ・環境意識の高まりにより、高温廃熱の発電・蒸気利用が推進されているが、低温廃熱は発生場所における用途が限定されることから、大部分が捨てられているのが現状である¹⁻³⁾。

高砂熱学工業(株)、石原産業(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、森松工業(株)、日野自動車(株)、(国研)産業技術総合研究所は、産業技術総合研究所が 2008 年に開発した吸着材「ハスクレイ^{4,5)}」^[注1]をベースに、2015 年度から(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業において、100℃程度の低温廃熱が利用可能な吸着材蓄熱システムを提案し研究開発を行ってきた⁶⁻⁴⁹⁾。2015 年 7 月～2018 年 3 月には実用化開発フェーズ「80℃以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材及びシステムの開発」において、ハスクレイ充填量が 10kg 級と 100kg 級の蓄熱槽での小規模試験装置を用いて蓄放熱性能を確認し、簡便な数値解析モデルを作成して設計ツールを開発した^{17,27,41)}。また、これ

※2020 年度空気調和衛生工学会講演論文^{42,43)}を加筆修正したものである。

*1 石原産業(株) 化成品生産部 *2 日野自動車(株) 統括生技部 *3 森松工業(株) 研究開発室 *4 東京電力エナジーパートナー(株) 販売本部 *5(国研)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 *6(国研)産業技術総合研究所 エネルギープロセス研究部門

らの試験結果を受けてハスクレイ充填量が2ton級の蓄熱槽での蓄放熱性能を確認し、実際の工場に蓄熱槽を搬送して放熱性能の現地検証試験も行った。さらに、2018年7月～2020年2月のNEDOの実証開発フェーズの助成事業である「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」において、石原産業四日市工場で定置型蓄熱槽での産業プロセスに対する実証試験と、日野自動車の羽村工場周辺でオフライン熱輸送型での実証試験を行った³⁶⁻⁴⁹⁾。

本報では、定置型蓄熱システム^[注2]と、オフライン熱輸送システム^[注3]の実証試験の概要と試験結果を説明する^{42,43)}。

2. 定置型の実証試験

図1に、定置型蓄放熱実証試験の概要を示す。石原産業四日市工場の酸化チタン製造工程における乾燥ラインで実証試験を行った。乾燥ラインからの100℃以下の排気から廃熱を回収・蓄熱し、乾燥ラインに必要な熱源負荷低減のために、ラインへの給気に蓄熱槽からの放熱空気を供給した。2つの蓄熱槽を設置し、乾燥ラインの運転と廃熱の放出状態に合わせて、それぞれ蓄熱/放熱を切り替えるバッチ式の運転を行った。

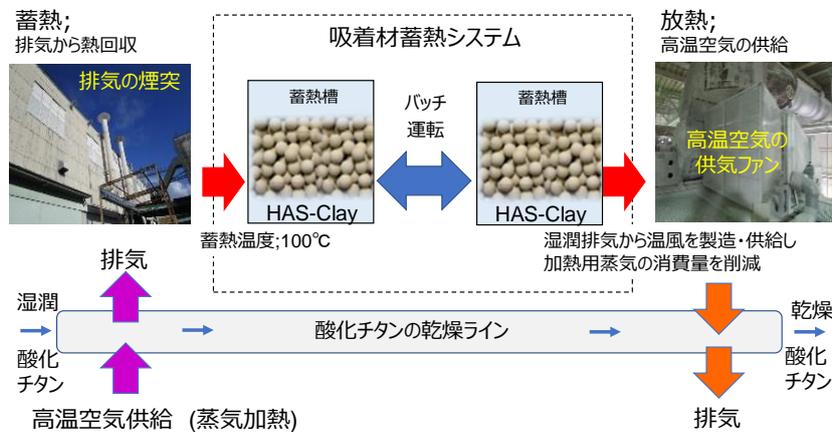


図1 定置型実証試験

2.1 設備概要

写真1に、定置型蓄熱槽の外観を示す。乾燥ラインは建屋内にあるが、建屋内スペースの制約上、今回は蓄熱システムの設備を屋外に設置して実証試験を行った。

図2に定置型蓄放熱実証試験の系統図を示す。本図は、蓄熱槽1が蓄熱運転の状態を、蓄熱槽2が放熱運転の状態を模式的に示している。図中の左側の廃熱回収/熱供給先である酸化チタンの乾燥ラインに、湿潤状態で投入された酸化チタンが、ベルトコンベアによる搬送中に高温空気によって乾燥され、装置外に送出される。高温空気の加熱源は蒸気ヒーターであり、室内空気を吸引・昇温している。また、酸化チタンを乾燥させた後の高温空気は、100℃以下の低温湿潤状態で排気される。

今回設置した実証試験設備は、熱交換器、ファン、2つの蓄熱槽、切り替えダンパ、およびそれらを接続するダクト系から構成される。乾燥ラインからの排気を分岐し、室内空気と熱交換させることで廃熱を回収して、これを蓄熱用空気として蓄熱槽1に供給する。放熱用空気には外気を使用し、乾燥ラインから廃熱回収した後の排気を一部混合調整された湿潤放熱用空気が蓄熱槽2に供給されている。これは、排気に含有する水分も回収利用することで、放熱用空気の相対湿度を上げ、蓄熱材の吸着熱の向上を図るためである。既設の乾燥ラインの運転状態に合わせて、一定時間毎に、それぞれの蓄熱槽の運転を切り替えることで、連続的な蓄熱/放熱運転を可能としている。

2.2 実証試験結果

ここでは、蓄放熱の実証試験結果の概要を説明し、蓄放熱量の評価をした上で、運転切り替え時間による放熱特性の変化について考察した。



写真 1 定置型実証設備

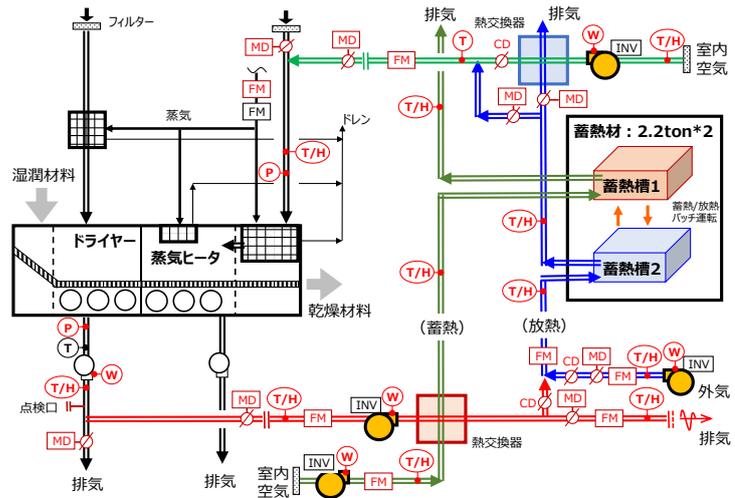


図 2 定置型実証設備の系統図

2.2.1 蓄放熱実証試験結果

図 3 に、運転切り替えを 4 時間で行った時の、蓄熱槽廻りの運転に関わる各箇所における温度および相対湿度の経時変化の一例を示す。(a)が各空気の状態、(b)が各空気の相対湿度の経時変化であり、蓄熱槽の出入口は蓄熱槽 1 の値である。0～4 時間が放熱運転であり、4～8 時間が蓄熱運転である。以降も同様に繰り返される。青色の実線は蓄熱槽入口温度湿度を示しており、蓄熱運転では廃熱から回収した蓄熱用の高温空気、放熱運転では放熱用の湿潤空気となる。放熱用の湿潤空気の温度湿度は、外気と乾燥ラインからの排気を混合して、所定温度湿度に制御されている。赤色の実線は蓄熱槽出口温度湿度を示しており、蓄熱運転では蓄熱後の排気となり、放熱運転では放熱空気（乾燥ラインへの供給空気）となる。黒色が乾燥ラインからの排気温度湿度を示し、緑色が室内空気温度湿度を示している。

この運転条件の場合、30～35℃の室内空気が 85～95℃程度の排ガスと熱交換され、約 65～70℃の蓄熱用空気として蓄熱槽へと供給されている。放熱運転では、温度 50℃、相対湿度 90%の空気を蓄熱槽に供給することで、およそ 75～85℃、相対湿度 17%RH の高温低湿空気を得られている。このように、吸着材蓄熱システムは、本実証試験のような運転条件の場合、蓄熱温度以上の放熱温度を得ることが可能であり、ヒートポンプのような昇温機能を得られることを実証した。なお、放熱運転で蓄熱槽出口温度が運転時間とともに低下するのは、蓄熱材ハスクレイの吸着等温線の特性に起因するものである。また、蓄熱運転で運転後半に蓄熱槽出口空気温度が上昇するのは、蓄熱材の乾燥が完了に近づいていることを示している。

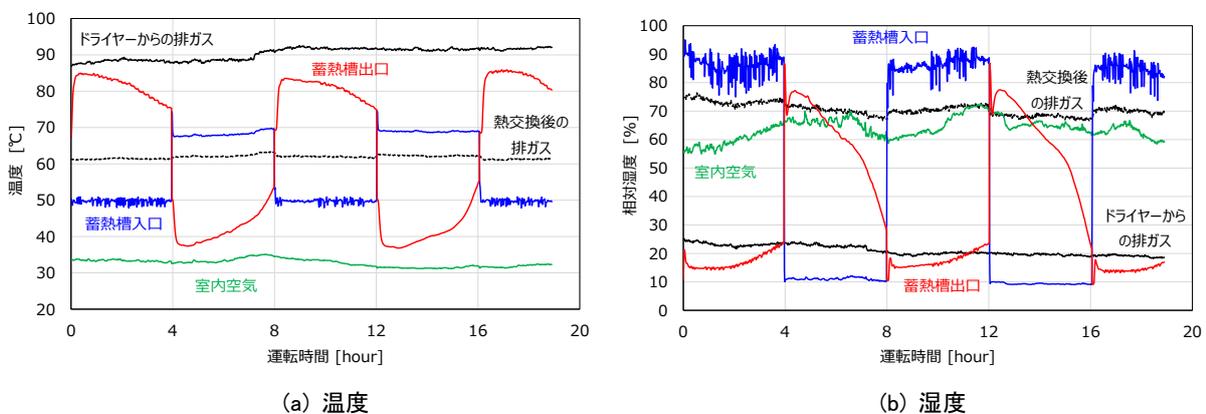


図 3 実証試験の経時変化(蓄熱槽 1)

2.2.2 蓄放熱量

図4に、本システム全体を連続的に運転した場合の蓄熱量／放熱量の一例を示す。この図4は前述の図3と同一時刻であり、蓄熱槽1は放熱運転から、蓄熱槽2は蓄熱運転から始まっている状態を示している。蓄熱槽1が放熱運転の間に蓄熱槽2に蓄熱される。それぞれの熱量は、蓄熱槽の出入口空気温度差に空気比熱と密度、風量を乗じて算出した。青い実線が放熱量、赤い実線が蓄熱量である。蓄熱運転の後半に蓄熱量が低下するのは、前述の図3で示したように、蓄熱槽出口温度が上昇するためであり、蓄熱材の乾燥が平衡状態に近づいていることを示している。このように、それぞれの蓄熱槽をバッチ運転することにより連続して安定した熱量を得ることができた。

乾燥プロセスに供給される空気は既設の蒸気ヒーターで最終的に調整することになるが、その蒸気消費量は本システムの運転によって大幅に削減された。なお、現在、既設の蒸気システムでのロスを含めた原単位を確認して、省エネ効果への寄与度を算出中である。

2.2.3 運転切り替え時間による放熱特性の変化

図5に、前述の図4のように連続的に運転した場合、運転切り替え時間を2～6時間に変更したときの、放熱運転1回あたりの平均放熱量と最大放熱温度を示す。最大放熱温度は運転切り替え時間に関わらず、ほぼ同じ90℃程度となった。一方で、放熱運転1回あたりの平均放熱量は、運転切り替え時間が短い場合に高い値が得られた。これは、蓄熱槽から得られる放熱空気の温度が、図4のように運転時間とともに低下するためである。ハスクレイの吸着等温線では、相対湿度の上昇に伴い吸着量が直線的に増加するため、蓄熱材を通過する空気の流れ方向に対して吸着帯が広範囲となる¹⁰⁾。そのため、運転初期に最も吸着帯が広範囲であるので吸着速度が大きく、徐々に低下する。その結果、運転時間とともに出力も低下する。

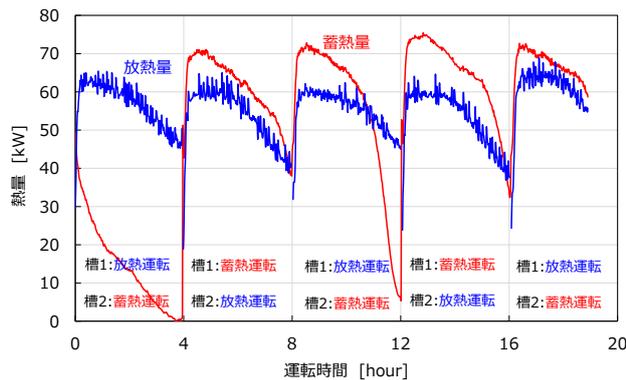


図4 放熱量と蓄熱量の経時変化

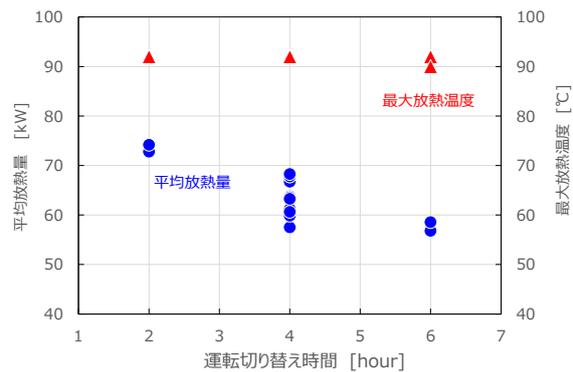


図5 切り替え時間の影響

3. オフライン熱輸送型の実証試験の概要

オフライン蓄放熱実証試験の概要を、図6に示す。日野自動車羽村工場内のコージェネレーションシステム (CGS) の廃熱を蓄熱し、羽村市スイミングセンターに高温低湿空気を供給した。本実証試験では、羽村市の支援を受けて実施した。

3.1 設備概要

ここでは、蓄熱槽と搬送トレーラーの概要、廃熱源と蓄熱設備の概要、熱需要先と放熱設備の概要を説明し、実証試験の工程を示す。

3.1.1 蓄熱槽および搬送トラックの概要

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



図 6 オフライン熱輸送型実証試験

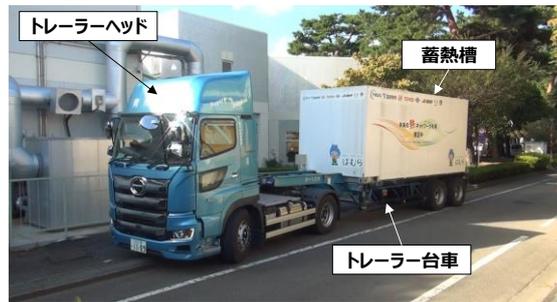


写真 2 蓄熱槽と運搬トレーラー

3.1.2 廃熱源と蓄熱設備の概要

写真 3 に、日野自動車羽村工場の CGS・蓄熱設備の外観を示す。蓄熱サイトでは、100°C以上の排ガスと 88°Cのジャケット温水から熱回収し、蓄熱材に蓄熱する。CGS のガスエンジンや発電機など主な設備は建屋内にあるが、排ガス蒸気ボイラは屋外にあり、そのボイラ後段のダクトを分岐してボイラ排気からの廃熱を回収した。

図 7 に、蓄熱サイトの実証設備の系統図を示す。図の右側の黒色の系統が既存 CGS 設備であり、左側の赤色の系統が今回設置した熱回収・蓄熱設備である。CGS 設備はガスエンジン、排ガス蒸気ボイラ、ポンプ、配管・ダクトなどから構成されている。また、熱回収・蓄熱設備は、空気/水と空気/空気の熱交換器、ポンプ、配管・ダクトなどから成る蓄熱システム、接続ユニット、および蓄熱槽から構成されている。



写真 3 コージェネレーションシステムの蓄熱サイト

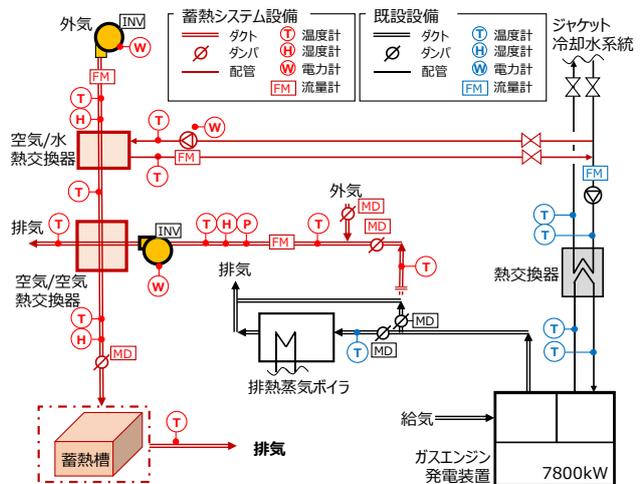


図 7 蓄熱サイトの設備の系統図

蓄熱運転では、図7の左上のファンによって外気が蓄熱システムに送られ、空気/水熱交換器で昇温され、さらに空気/空気熱交換器で昇温され、100℃程度の空気が蓄熱槽に供給される。この空気/水熱交換器の温水は、工場で熱利用後に、CGS 設備への戻り温水から分岐している。このように、通常の運転では利用されない 88℃のジャケット温水と 100℃以上の排ガスから熱回収し蓄熱する。なお、88℃のジャケット温水のみの有効利用も求められているので、その場合は空気/空気熱交換器に 100℃以上の排ガスを供給せず、88℃のジャケット温水のみで 80℃程度の空気が蓄熱槽に供給される。ここで、蓄熱槽への供給空気の温度などは既存の CGS の設備の蒸気や温水の需要によって、蓄熱運転の各種制御が行われている。

3.1.3 熱需要先と放熱設備の概要

写真4に、熱利用先施設である羽村市スイミングセンターに蓄熱槽が設置された様子や放熱設備を示す。羽村市スイミングセンターでは、プールや浴槽を温めるための熱源として放熱し、既設ボイラ燃料の消費量を削減する。写真のトレーラー左側には、温水製造の熱交換器やポンプが内蔵された熱交換器ユニットが配置されている。

図8に、羽村市スイミングセンター実証設備の系統図を示す。放熱設備は、蓄熱槽、空気/水熱交換器、ポンプ、配管、ダクトなどから構成されている。図中では羽村市スイミングセンターの負荷側施設を、25m プール、プール天井内、プール室内、および浴室に分けて模式的に示している。25m プールにはボイラにより熱交換器を介して循環温水が供給される。浴槽などにはボイラや貯湯槽により温水が供給される。また、暖房時のプール天井内とプール室内には、ボイラや空調機・熱交換器により温風が供給される。図のように、蓄熱槽にプール室内の湿潤空気が供給され、蓄熱槽内での吸湿・発熱反応で昇温した空気は、熱交換器を介してボイラ循環水やボイラ給水を昇温する。このように顕熱回収された空気は常温低湿状態になるため、プール天井内の換気やプール室内の暖房のために利用される。特に、プール室内とプール天井内では結露防止の効果が期待される。

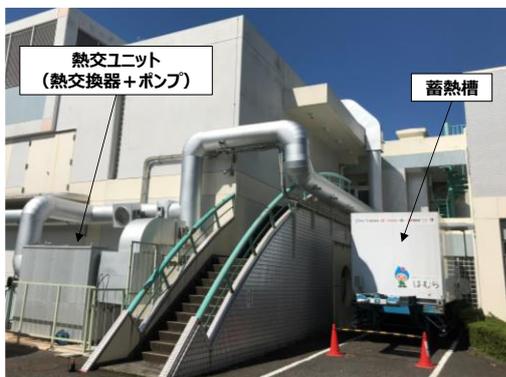


写真4 羽村スイミングセンターの放熱サイト

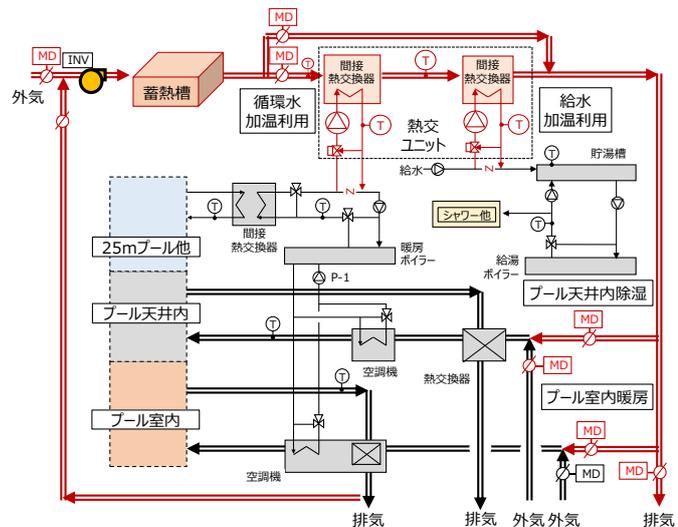


図8 放熱サイトの設備の系統図

3.1.4 実証試験の工程

年間を通じた運転状態を確認するために、夏季、中間期、冬季の期間として 2019 年 7 月から 2020 年 1 月にかけて蓄放熱試験を 50 サイクル実施した。1 回の運転サイクルは、蓄熱運転を夕方 19 時頃から 4～6 時間程度、放熱運転を朝 8 時頃から 10 時間程度とした。これは、放熱サイトの熱負荷が朝に施設が稼働し始めるときに最も大きくなるため、蓄熱槽からの最大放熱出力をそのタイミングで供給できるように計画した結果である。蓄熱運転は、トレーラー運転手が蓄熱槽を蓄熱設備に接続することで運転開始可能とした。蓄熱運転の終了は、蓄熱槽出口温度が規定値に達した時点で自動停止とした。放熱運転は、トレーラー運転手が蓄熱槽を放熱設備に接続し、プール設備が稼働している状態で運転開始可能とした。放熱運転の終了は、定格時間終了時点とした。

3.2 実証試験結果

ここでは、蓄放熱の実証試験結果の概要を説明し、放熱検証をした上で、季節間の評価を行った。

3.2.1 蓄熱実証試験結果

図9に、蓄熱運転における各箇所の空気温度の経時変化の一例を示す。外気が20℃を超えた状態で温水との熱交換後の温度が80℃以上を保持していた。蓄熱運転中における蓄熱槽入口空気温度と相対湿度の平均値はそれぞれ100℃、1.3%RHであった。運転開始後、3時間が経過する前から蓄熱槽出口空気温度が上昇し始め、約4時間後に蓄熱槽出口温度が所定の温度に達して運転が終了した。図中の破線は、既報の数値解析モデル^{17,27,41)}による蓄熱槽出口空気温度の計算結果である。実測結果と比較して、蓄熱完了となる時間が短くなっている。これは、実際の蓄熱槽内では通気分布が発生しているためと考えられる。そこで、蓄熱材充填部で±5%の通風量の偏りが発生していると仮定して、再計算を行った結果、図のように実測値とほぼ一致した。なお、通風量の偏りを考慮しない場合でも、安定に推移する蓄熱槽出口の温度レベルや蓄熱完了時間は推算できるので、本数値解析モデルは設計ツールとして活用できる。

3.2.2 高温低湿空気を供給する放熱検証試験結果

図10に、放熱運転時の空気温度の経時変化の一例を示す。赤い実線が蓄熱槽出口空気温度である。運転開始直後は80℃以上と高温であるが、25～30℃の蓄熱槽入口空気温度からの大幅な昇温は吸着熱によるものである。緑色の実線が熱交換器中間の空気温度であり、つまりボイラ循環水との熱交換後の放熱空気温度である。黒い実線が熱交換後の放熱空気温度であり、この日は外気よりも温度が高かったためプール室内の暖房用空気として供された。このように、施設の熱負荷が大きいタイミングで放熱運転を開始し、放熱空気をカスケード的に熱利用することで、放熱量を施設で有効利用することができた。なお、熱交換器出口温度のバラツキは、給水加熱利用のポンプの起動停止によるものである。また、図のように、既報の数値解析モデル^{17,27,41)}による蓄熱槽出口空気温度の計算結果は、実測値とほぼ一致した。前述の蓄熱試験と同様に、放熱試験においても本数値解析モデルが設計ツールとして活用できることを確認した。

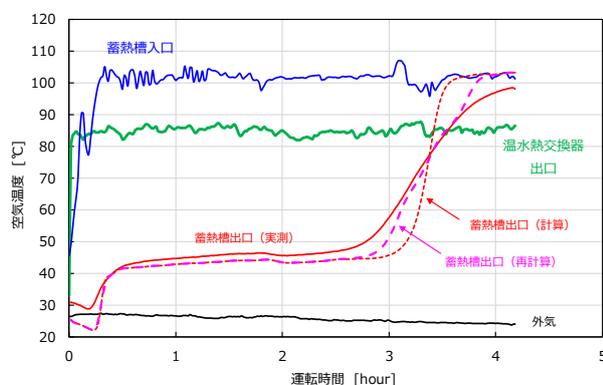


図9 蓄熱運転の空気温度の経時変化

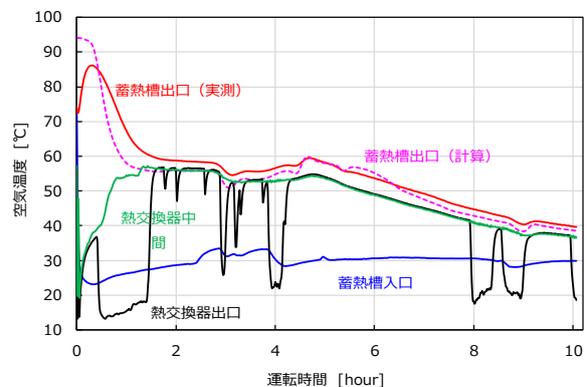


図10 放熱運転の空気温度の経時変化

3.2.3 オフライン熱輸送の季節間評価

図11に、今回の実証試験における再生効率の結果を、左から試験の順番に示す。ここでの再生効率は、放熱量を放熱運転後の蓄熱量で除した割合と定義し、それぞれの熱量を蓄熱槽出入り空気温度差から算出した。グラフ中の棒グラフ1つが、蓄放熱サイクル1回の再生効率を示している。青い棒グラフが夏季、緑が中間期、赤が冬季である。再生効率の全体平均値は91%であり、各季節における平均値はそれぞれ91%、91%、90%である。

今回の実証試験では、蓄熱側および放熱側の都合上蓄熱運転終了から放熱運転開始まで6時間以上経過しているが、90%以上の再生効率であった。また、冬季に再生効率が低下しないことも確認できた。なお、再生効率が100%を大きく超えているのは、蓄熱温度の設定値を下げた時であるが、その後の設定値を上げた運転をしているため、平均値としては変わらない。

4. おわりに

本報では、定置型蓄熱槽での産業プロセスに対する吸着材蓄熱システムの実証試験を行い、システムの蓄放熱特性を評価し、ヒートポンプのような蓄熱温度以上に放熱温度を昇温する機能を付加できること、バッチ運転制御によって連続的・安定的な熱供給が得られること、蓄熱材特性と導入対象に合わせた最適な運転条件での設計が必要であることを確認した。

また、トレーラー型蓄熱槽を製作し、日野自動車工場と羽村スイミングセンター間を大型トレーラーによってオフライン熱輸送する実証試験を行い、羽村スイミングセンターでの夏季・中間期・冬季を通じた蓄放熱特性を確認した。なお、日野自動車工場内における熱輸送および産業用空調機へ適用した実証試験も行っており、その結果については別途に報告したい。

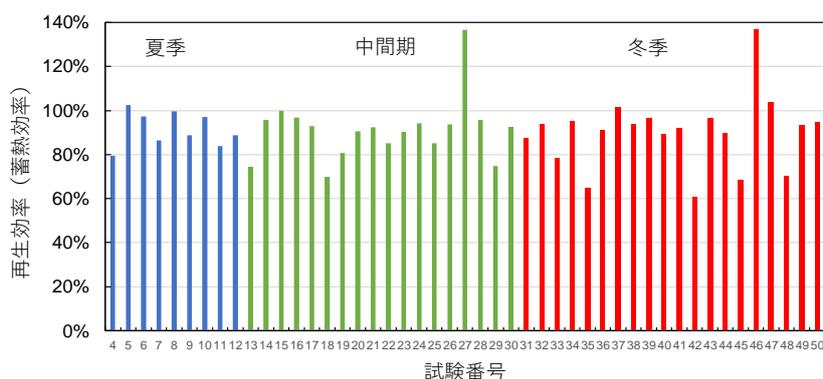


図 11 再生効率(蓄熱量に対する放熱量の割合)

謝 辞

本成果は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」の結果得られたものである。関係各位に御礼申し上げます。

[注 1] ハスクレイ (HAS-Clay) ;

安価な工業用原料から合成される、非晶質アルミニウムケイ酸塩 (HAS : Hydroxyl Aluminum Silicate) と低結晶性粘土 (Clay) からなる複体の無機系吸放湿材である。繰り返しの耐久性が高く、また相対湿度 40%RH 以上に於いて他の吸着材より吸着量が多いことが特長である。

[注 2] 定置型蓄熱システム ;

熱発生サイトから熱需要サイトまでパイプラインをつなぎ、水や蒸気などの熱媒体を熱輸送するオンライン方式システムのことである。蓄熱槽 2 槽を切り替えることで交互に蓄放熱を行うことにより、稼働率が高く回収年数が短いことが特長である。

[注 3] オフライン熱輸送システム ;

定置型システムと異なり、蓄熱媒体をトレーラーなどでオフライン輸送するシステムのことである。パイプラインの導管方式に比べてインフラ整備コストが安価であり、地下埋設物の制限を受けないなどが特長である。

文 献

- 1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター, 産業分野の排熱実態調査報告書, (accessed Apr. 30th 2020), <https://thermatdb.securesite.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf>
- 2) 平野聡: 産業分野の排熱実態調査の紹介, 動力エネルギーシステム部門ニュースレター, 日本機械学会, (2020.5.15).

- 3) 平野聡:工場における未利用熱の排出・活用状況, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2020.8).
- 4) 産総研 HP, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr_2008/pr20081008_2/pr20081008_2.html.
- 5) 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一:高性能吸着剤ハスクレイ®の開発, 学術誌「Synthesiology」, 産総研, Vol.9 No.3, pp.154-164(2016.8).
- 6) 電気新聞「低温排熱で高効率蓄熱」, (2016.8.17).
- 7) Sorption Thermal Storage System by using Exhaust Heat of International Linear Collider (国際リニアコライダー排熱利用の吸着材蓄熱システム), リニアコライダー国際会議 LCWS2016(企業展示ブース/ポスター発表), 盛岡, (2016.12.6-8).
- 8) NEDO ニュースリリース「100℃以下の廃熱を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システムを開発—低温廃熱を工場間でオフライン輸送する実用化検証試験を開始—」, (2017.3.13).
- 9) 山内一正, 馬込英明, 井守正隆, 川上理亮, 谷野正幸:100℃以下の廃熱利用が可能な吸着材蓄熱システムの開発, 自動車技術, (公社)自動車技術会, (2017.7).
- 10) 川上理亮, 鎌田美志, 大山孝政, 鈴木美穂, 谷野正幸, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 小室匠, 名和博之, 丸毛謙次, 山内一正, 馬込英明, 井守正隆, 鈴木正哉, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三, 永井恒輝:100℃以下の廃熱を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システムの開発, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2017.8).
- 11) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 小室匠, 名和博之, 丸毛謙次, 山内一正, 馬込英明, 井守正隆, 鈴木正哉, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三:100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 建築設備と配管工事, 日本工業出版, (2017.8).
- 12) 谷野正幸:排熱回収技術, 先端加速器科学技術推進協議会(AAA)グリーン ILC・WG, (2017.5.17).
- 13) 小久保孝, 吉岡正和:吸着材蓄熱技術を活用したILCの排熱利用の提案, 第 14 回日本加速器学会年会, WEP139, (2017.8.1-3).
- 14) 鈴木正哉, 森本和也, 前田雅喜, 犬飼恵一, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 谷野正幸:蓄熱材ハスクレイの性能評価, 化学工学会第 49 回秋季大会, EB114, (2017.9.20).
- 15) 松田聡, 鈴木善三, 名和博之, 井守正隆, 谷野正幸:蓄熱材粒子充填層の振動試験, 化学工学会第 49 回秋季大会, EB115, (2017.9.20).
- 16) 鈴木美穂, 大山孝政, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木正哉, 名和博之, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行:低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実験による評価-第 1 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA101, (2017.9.20).
- 17) 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 宮原英隆:低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの数値解析による評価-第 2 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA102, (2017.9.20).
- 18) 川上理亮:100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, Energy Storage Summit Japan 2017, (2017.11.8).
- 19) 谷野正幸:廃熱回収のための蓄熱技術, 日本粉体工業技術協会/第2回乾燥分科会, (2017.11.17).
- 20) 鈴木正哉:吸着で熱を運ぶ技術:コンパクト型高性能蓄熱システム, INCHEM 産学官マッチングフォーラム/化学工学会, (2017.11.20).
- 21) 名和博之, 松田聡, 鈴木善三, 井守正隆, 川上理亮:搬送時における蓄熱材粒子充填層内の対流現象, 第 23 回流動化・粒子プロセッシングポジウム/化学工学会, (2017.12.7-8).
- 22) 谷野正幸, 川上理亮, 鎌田美志, 大山孝政, 鈴木美穂・宮原英隆, 川村正行, 名和博之, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 永井恒輝:100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システム, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 25-30(2017).
- 23) 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの研究—吸着材蓄熱槽の数値解析モデル—, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 31-38(2017).
- 24) 鎌田美志:Development of adsorption thermal storage system utilizing waste heat, 第7回 NEDO-CDTI 合同ワークショップ, (2018.2.13-14).
- 25) 鎌田美志:100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, ENEX2018, (2018.2.14-16).

- 26) 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 丸毛謙次, 山内一正, 鈴木正哉, 陶昇, 谷野正幸:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー第 1 報ーシステムの開発コンセプトと蓄熱材の検討, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018.9.12-14).
- 27) 鎌田美志, 川上理亮, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三, 谷野正幸:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー第 2 報ー吸着材蓄熱槽の蓄放熱特性と数値解析モデル, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018.9.12-14).
- 28) 鈴木美穂, 大山孝政, 名和博之, 井守正隆, 馬込英明, 川上理亮, 井上正憲, 谷野正幸:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー第 3 報ー実際の工場・設備で蓄放熱特性の検証試験, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018.9.12-14).
- 29) 名和博之, 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 第 8 回潜熱工学シンポジウム, 潜熱工学研究会, (2018.12.3-4).
- 30) 鈴木美穂, 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 名和博之, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー工場の実設備における蓄放熱特性の検証試験ー, 高砂熱学工業総合研究所報, 32, 15-24(2018).
- 31) 松田聡, 鈴木善三, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 名和博之:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー吸脱着の過渡特性, 化学工学会 第 84 年会, F302, (2019).
- 32) 谷野正幸:ハスクレイ蓄熱材を活用した低温廃熱の活用, ENEX2019, 東京ビックサイト, (2019.1.30-2.1).
- 33) 谷野正幸:ハスクレイ蓄熱材を活用した低温廃熱の活用, モノづくり日本会議, 日刊工業, (2019.3.4).
- 34) 谷野正幸, 高砂熱学工業の熱エネルギー貯蔵システム 技術研究所の開発技術を中心に, Energy Storage Summit Japan ESSJ, (2019.6.3).
- 35) 谷野正幸:熱エネルギー貯蔵システムの先端研究について, 生態工学会年次大会, 6.29 (2019).
- 36) NEDO ニュースリリース「100℃以下の廃熱を利用可能な蓄熱システムの本格実証試験を開始ーオフライン熱輸送型と定置型での通年実証ー」, (2019.7.25).
- 37) 谷野正幸:オフライン輸送型と定置型の HAS-Clay を用いた吸着蓄熱システムの実証開発 Development and demonstration of offline transportation type and stationary type adsorption thermal storage system applying HAS-Clay, 第 10 回 日独エネルギー環境フォーラム, NEDO, (2019.10.29-30).
- 38) 川上理亮・鎌田美志・鈴木美穂・中田拓司・谷野正幸:100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 「ヒートポンプとその応用」, ヒートポンプ研究会, No.93, (2019.11).
- 39) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 中田拓司, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 山内一正, 名和博之, 松永克也, 鈴木正哉, 松田聡:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ー定置型とオフライン熱輸送型の実証試験での設備概要ー, 高砂熱学工業総合研究所報, 33, 41-50(2019).
- 40) 鎌田美志, 川上理亮, 鈴木美穂, 中田拓司, 谷野正幸, 宮原英隆, 平井恭正, 松永克也, 久保滋, 原田浩司, 柿内秀介, 名和博之, 山内一正, 井守正隆, 岩下真輝, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 鈴木善三:100℃以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2020.1).
- 41) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 鈴木正哉, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 松永克也, 谷野正幸:ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発ー第 1 報小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデルー, 空気調和・衛生工学会論文集, No.281(2020.8).
- 42) 川上理亮, 鈴木美穂, 宮原英隆, 鈴木正哉, 谷野正幸:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発(第4報) 産業プロセスに対する定置型蓄熱槽の蓄放熱特性の実証試験, 2020 年度空気調和衛生工学会大会, (2020.9.9-30(オンライン)).
- 43) 鎌田美志, 中田拓司, 松永克也, 名和博之, 山内一正, 松田聡, 谷野正幸:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発(第5報)トレーラー型蓄熱槽によるオフライン蓄放熱特性の実証試験, 2020 年度空気調和衛生工学会大会, (2020.9.9-30(オンライン)).
- 44) 鎌田美志, 鈴木美穂, 川上理亮, 谷野正幸, 宮原英隆, 松永克也, 久保滋, 名和博之, 丸毛謙次, 山内一正, 井守正隆, 鈴木正哉, 松田聡:低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実証試験<定置型蓄熱システムおよびトレーラー型蓄熱によるオフライン熱輸送の実証試験>, 建築設備と配管工事, 日本工業出版, (2020.9).

- 45) 谷野正幸, 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 松永克也, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 鈴木正哉, 松田聡:ハスクレイを用いた吸着材蓄熱システムの開発, 動力エネルギーシステム部門ニューズレター, 日本機械学会, (2020. 9.15).
- 46) 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 山内一正, 井守正隆, 丸毛謙次, 宮原英隆, 松永克也, 鈴木正哉, 松田聡:100°C以下の低温廃熱を利用可能なハスクレイ吸着材蓄熱・オフライン熱輸送システムの実証開発, クリーンエネルギー, 日本工業出版, (2020.9).
- 47) 鎌田美志, 中田拓司, 川上理亮, 谷野正幸, 丸毛謙次, 名和博之, 宮原英隆, 松永克也, 山内一正, 松田聡:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ーコンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験, 化学工学会第 51 回秋季大会, J116, (2020.9.24(オンライン)).
- 48) 丸毛謙次, 名和博之, 谷野正幸, 鎌田美志, 宮原英隆, 松永克也, 井守正隆, 松田聡:低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ーコンテナ型蓄熱槽の槽内熱挙動の検証, 化学工学会第 51 回秋季大会, J117, (2020.9.24(オンライン)).
- 49) 川上理亮:Development of adsorption thermal storage system utilizing low-temperature wasteheat about 100°C, IEA Energy Storage TCP Annex 35, (2020.9.30).

ABSTRACT

With HAS-Clay adsorbent we have developed a new thermal storage system that is the open-cycle type to utilize the low-temperature waste heat. The demonstration tests were performed in a stationary type and an offline heat transportation type. In the stationary type, thermal storage tanks filled with adsorbent were charged with exhaust hot air and the air from the tanks was supplied to a drying process of a commercial plant. On the other hand, in the offline heat transportation type, the thermal storage tank charged in the co-generation system was transported by the tractor-trailer and used to heat up water and air in a swimming center. The adsorption heat storage system was evaluated through three kinds of seasons: summer, interphase, and winter. By the tests the regenerating efficiency of 90% or more was confirmed. The charge/discharge characteristics of the system were also evaluated. As a result, we found that it is possible to add a heat-up function such as a heat pump and it is necessary to design under optimal operating conditions that match the characteristics of adsorbent and the process.

藻類培養への排ガス CO₂ 利用の研究

増田正夫・宮下真一

Study on Using CO₂ in Exhaust Gas for Algae Culture

Masao Masuda・Shinichi Miyashita

微細藻類は、将来の有望なバイオマス燃料として期待されている。一方、産業分野から排出される排ガス中の CO₂ の有効な利用先の一つとして藻類バイオマスが挙げられる。本研究では、火力発電所からの実排ガス CO₂ と廃熱を同時利用した藻類培養効果を確認し、併せて、実排ガスの CO₂ 利用率を把握することを目的とした。その結果、高い藻類生産性と高い CO₂ 利用率を同時に実現できることを確認した。また、培養池を廃熱で加温・冷却することにより、40%以上の高い CO₂ 利用率を実現できることを確認した。

1. はじめに

植物は太陽光を利用して二酸化炭素を固定化して炭水化物を合成する光合成を営み、その副産物として炭水化物、タンパク質や脂質を産生する。なかでも微細藻類は、生産面積当たりのオイル生産能力が、脂質を多く含む作物よりも数 10 倍から数 100 倍も高いので、広い耕作地を必要としない。また食糧と競合しないことなどから、特に欧米において将来の有望なバイオマスとして期待されている¹⁾²⁾。我が国では、藻類バイオマス燃料の実用化の目途を 2030 年頃として、数多くの藻類関連プロジェクトが稼働している。これらのプロジェクトでは、オイル生産能力の優れた藻類の生産効率化が主要な課題であるが、藻類燃料単価は、現状でおおむね 300~1,000 円/L-Oil と見積られている³⁾。

筆者らは、2013~2015 年度の福島復興プロジェクト（復興庁を経由した経済産業省によるプロジェクト）を経て、2016~2018 年度の「微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業費補助金」事業（経済産業省資源エネルギー庁によるプロジェクト）に参加して、福島県の土着藻類を対象に、バイオ燃料生産コスト低減を目的に、藻類培養工程における廃熱の利活用の研究を進めてきた。その結果、廃熱利用を想定した培養池の加温・冷却により、培養池の平均温度が 20℃前後になると藻類の生産性が向上すること、廃熱の利用方法としては吸着材による熱搬送が適していることなどを確認した⁴⁻⁸⁾。

一方、工場や発電所などの排ガスから CO₂ を回収・搬送・利用することは、今やグローバルな課題となっている。IEA（国際エネルギー機関）によると、世界のエネルギー起源 CO₂ 排出削減量のうち、2050 年に CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）に期待されている割合は 14%（年間 40 億 ton-CO₂）、バイオマスに期待されている割合は 12%（年間 35 億 ton-CO₂）にもおよぶ⁹⁾。これを図 1 に示す。日本からの年間 CO₂ 排出量が 18 億 ton-CO₂（2018 年）であることを踏まえると、将来に向けた CCUS やバイオマスへの期待の大きさが伺える。現在、既に多くの CCU を目的とした研究開発が行われている¹⁰⁻¹²⁾。しかしなが

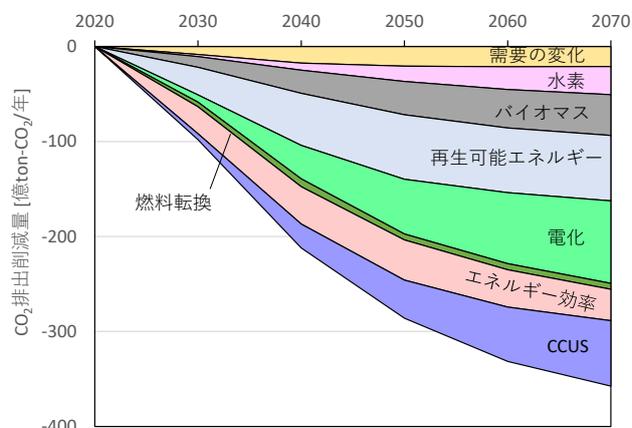


図1 世界のエネルギー起源 CO₂ 排出削減貢献量⁹⁾

※第 16 回バイオマス科学会議（2021/1/20-21）で発表した内容を加筆修正したものである。

ら、それらの技術の多くは発展途上であり、実用化には依然として時間を要する。また、CO₂の回収・搬送・利用の過程で、新たに多量のCO₂が排出されるならば本末転倒になる。したがって、当面の有効なCO₂利用先の候補として、農作物や藻類などのバイオマスへの利活用が挙げられる。これらの用途ならば、革新的な技術開発をせざとも、余計に多くのCO₂を排出せずに、CO₂を有価物に固定化できる可能性が高い。

筆者らは、現実的で確実な実排ガスCO₂の利用先の一つとして、藻類バイオマスへの利活用を想定した。しかしながら、工場や発電所などからの実排ガスを藻類培養に利用した研究はこれまで殆ど見当たらない。そこで、本研究では、火力発電所からの実排ガスCO₂と廃熱を同時利用した藻類培養効果を確認し、併せて、実排ガスのCO₂利用率を把握することを目的とした。

2. 実験

2.1 実験条件

東北電力株式会社および一般社団法人藻類産業創成コンソーシアムと協働で、原町火力発電所内（福島県南相馬市原町区金沢字大船）で実験を実施した。藻類は、福島県の土着藻類を用いた。

表1に実験条件を示す。実験は、夏期・秋期・冬期にそれぞれ約1ヵ月強にわたって実施した。発電所内のビニールハウス内に、パドル式水車を備えたレースウェイ型水槽（受光面積3.5m²、水深0.2m、水量700L、流速350~400mm/s）を設置して培養を行った。ビニールハウスは、横窓を常に開放状態として屋外とほぼ同じ環境下とした。

2.2 実験方法

実験は、発電所からの実排ガスを藻類培養池へ24時間投入した。実験の概要を図2に示す。発電所の煙突下部に設置された小口径の分岐口から耐熱樹脂チューブで排ガスを取り出し、コンプレッサで吸引して培養池に直接バブリングした。培養池への排ガス通気量は0.5L/minと2.0L/minの二通りで行った。排ガス中のCO₂濃度はいずれの場合もほぼ15%であった。

また、培養池は、廃熱利用を想定して加温・冷却を行った。但し、加温・冷却のための熱源は廃熱ではなく、ここでは別途に熱源機器を設置して実験を行った。廃熱利用を想定した場合、目まぐるしく変動する自然環境下において、培養池の水温を一定に制御するのは現実的ではないと考え、所定の温度・流量（20℃・9L/min）で熱交換器に水を循環させるだけのシンプルな方法を採用した。

表1 実験条件

	夏期	秋期	冬期
実験期間	2018/8/22 ~9/26 (36日間)	2018/10/3 ~11/5 (34日間)	2018/11/21 ~12/25 (35日間)
培養池	レースウェイ型オープンポンド 受光面積3.5m ² 、水量700L		
排ガス通気量	0.5L/min、2.0L/min		
排ガスCO ₂ 濃度	約15%		
熱交換器	伝熱面積0.81m ²		
通水温度	20℃ (主に冷却)	20℃ (加温・冷却)	20℃ (主に加温)
通水流量	約9L/min		

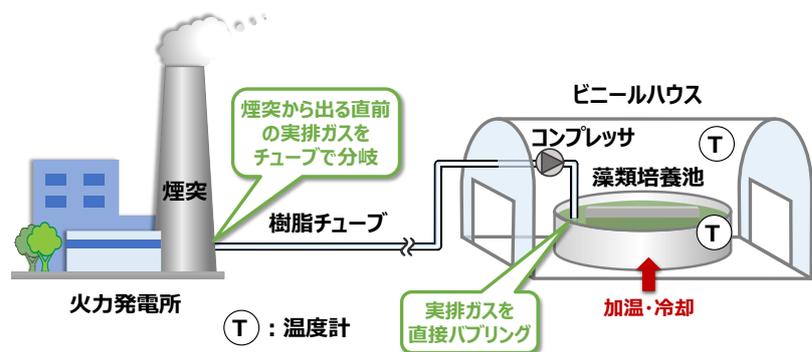


図2 実験の概要

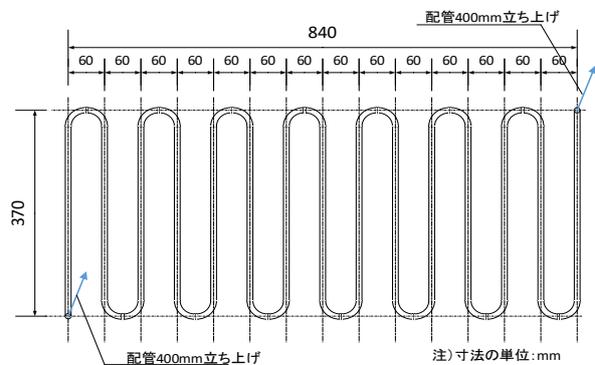


図3 培養池の加温・冷却で使用した熱交換器



(A) 発電所の煙突とビニールハウス (B) 藻類培養池の熱交換器 (C) 藻類培養池への排ガス投入

写真1 実験の様子

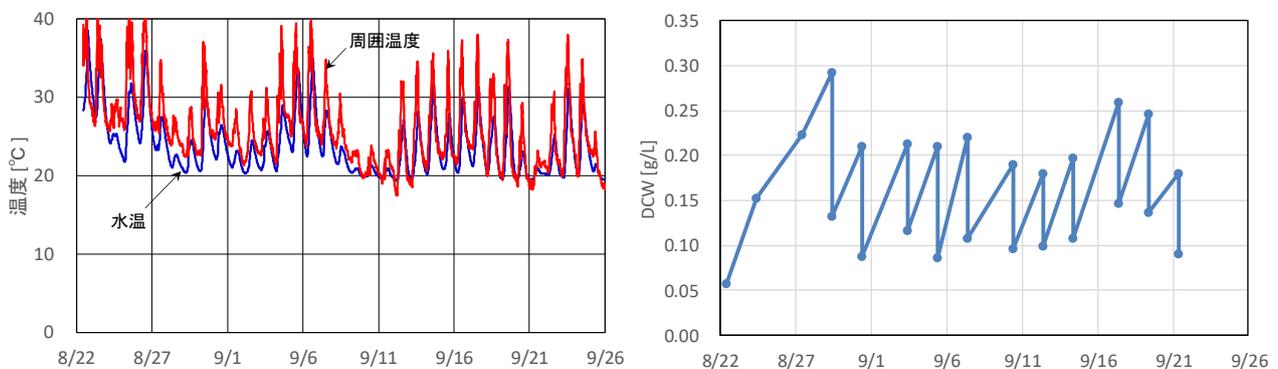
熱交換器は、これまでの藻類培養池の加温・冷却実験における伝熱性能の実績に基づき、SUS 製の伝熱面積 0.81m² の U 字型の熱交換器を設計・採用した。これを図 3 に示す。

計測対象としては、培養池の水温を水中用サーミスタ温度計（精度±0.3℃）、周囲の気温をサーミスタ温度計（精度±0.3℃）、加温・冷却のための配管内の水温度を T 型シーす熱電対（精度±0.3℃±読み値の 0.3%）、配管内流量を電磁流量計（精度±0.6% of F.S. (50 L/min)）で測定した。データは全て 10 分間隔で計測した。実験の様子を写真 1 に示す。

3. 実験結果

3.1 夏期の実験結果

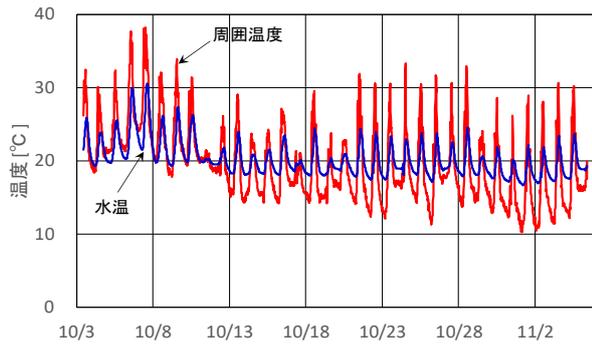
夏期（2018/8/22～9/26）の冷却実験の結果を図 4 に示す。20℃の水を熱交換器に循環させることで 3.5m² 培養池を冷却した。図 4 (1) に示すように、周囲温度が 30～40℃の猛暑の中、熱交換器による冷却効果により、培養池は 20～30℃に冷却されていた。ここでは水温を所定の温度に制御している訳ではないので、昼と夜で水温は大きく変動していた。図 4 (2) が DCW（固形物の乾燥重量）の測定結果である。水温が大きく変動していた割に、試験を開始してから終了するまで、DCW は比較的安定に推移していた。なお、DCW が 2～3 日おきに大きく変動したのは、これまでの藻類培養の実績に基づき、藻類を HRT（Hydraulic retention time：水理的滞留時間）=4 日で培養したからである。培養池の半分を 2 日（週末を挟んだ際は 3 日）おきに収穫して、残りの培養池に水を追加投入して培養を継続したために、このような波形になった。



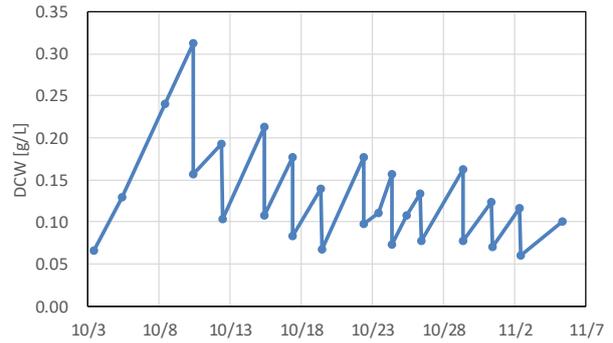
(1) 培養池の水温と周囲温度

(2) DCW の推移

図4 夏期の実験結果

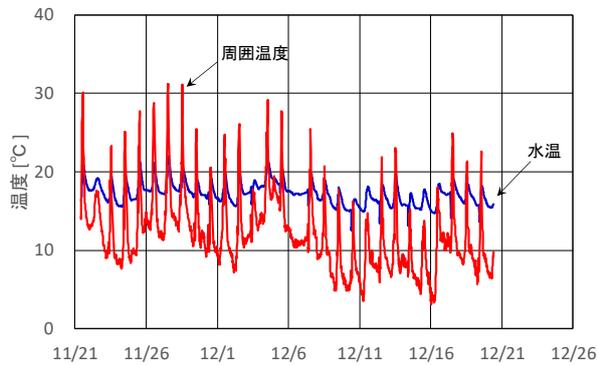


(1) 培養池の水温と周囲温度

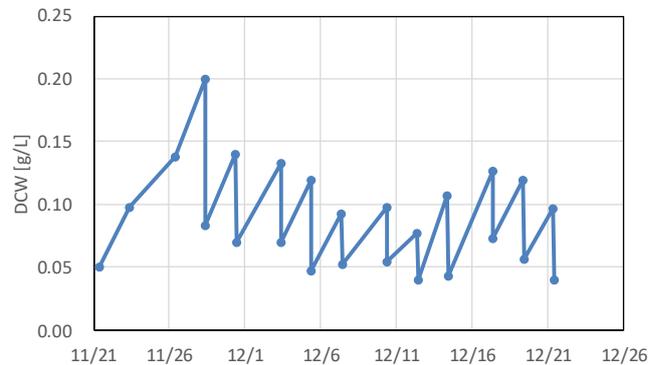


(2) DCW の推移

図5 秋期の実験結果



(1) 培養池の水温と周囲温度



(2) DCW の推移

図6 冬期の実験結果

3.2 秋期の実験結果

秋期 (2018/10/3～11/5) の加温・冷却実験の結果を図5に示す。20℃の水を熱交換器に循環させることで3.5m²培養池を加温・冷却した。図5(1)に示すように、周囲温度が10～38℃と大きく変動する中で、熱交換器による効果により、培養池は18～30℃に加温・冷却されていた。秋期は、夏期よりも昼夜による水温の変動幅は小さくなっていた。図5(2)がDCWの測定結果である。実験の前半よりも後半の方がDCWは低下していた。これは、前半の平均水温が20℃を越えていたのに比べて、後半の平均水温は20℃を下回っていたためであり、20℃を下回る水温だと、わずかな温度差で、DCWに大きく影響することがわかった。

3.3 冬期の実験結果

冬期 (2018/11/21～12/25) の加温・冷却実験の結果を図6に示す。20℃の水を熱交換器に循環させることで3.5m²培養池を加温した。図6(1)に示すように、周囲温度が5～30℃と大きく変動する中で、熱交換器による加温効果により、培養池は16～20℃に加温されていた。冬期は、昼夜による水温の変動幅が秋期よりもさらに小さくなっていた。図6(2)がDCWの測定結果である。水温が安定していたにもかかわらず、試験の後半の方がわずかにDCWは低下していた。これは、日没が早くなり日射量が低下したことによる影響が大きいものと推察された。

3.4 総合的な評価

これまでの実験結果を全て整理したものを図7に示す。この図の横軸は、収穫から次の収穫までの平均水温であり、縦軸は、収穫から次の収穫までの一日当たりm²当たりのDCW増加量である。

大きな三角のプロットが今回の夏期・秋期・冬期の実験結果である。参考までに、小さなプロットを併記したが、これらは、本実験の前に実施した無機と有機(酢酸)の栄養を加えた培養実験の結果である。有機の栄養を加えると、CO₂を別途に供給しなくても、藻類の生産性がほぼ倍になることを事前に確認している。火力発電所の実排ガスを吹き込んだ培養では、有機の栄養を加えなかったにもかかわらず、それに匹敵する高い生産性を挙げており、年間を通じて5～

10g/(m²・day)の藻類生産量を見込めることがわかった。

次に、各実験期間を通してのCO₂利用率を算出した。これを表2に示す。日中の通気量に対するCO₂利用率は、夏期の実験で41.9%、秋期の実験で43.3%という非常に高い値が得られた。

まだ培養の実施例は少ないものの、夏期から秋期の加温・冷却しなかった時と比べて、加温・冷却した際のCO₂利用率は約1.8倍に向上した。これは、培養池の加温・冷却が藻類の生産性を高められたので、より多くのCO₂を利用でき、結果的にCO₂利用率を高められたことを意味するものである。排ガス通気量を最適化すれば、さらに利用率を高めることも可能と考える。

なお、ここで算出したCO₂利用率は、開放系水槽に通気した実排ガスの炭素の総量とDCWの増加量から単純に計算した見かけのCO₂利用率である。培養液と大気とのガス交換は考慮していない。また、実験期間中でバイオマス中の炭素量も一定と仮定して算出した。

本来は、水中の溶存CO₂濃度、さらにはHCO₃⁻とCO₃²⁻も含めた全炭酸濃度を昼夜で測定し、そのときの温度やpHを含めた培養環境が光合成の有無でどのように変化したか把握しなくては、正確なCO₂利用率を算出することはできないものとする。これらは今後の課題とする。

4. おわりに

本研究により、藻類培養に火力発電所の実排ガスと廃熱を同時利用することで、高い藻類生産性と40%以上の高いCO₂利用率を同時に実現できることを確認した。

以上のことから、今後益々注目されるであろうCCU技術の一つとして、藻類バイオマスへのCO₂利用が有力な選択肢の一つになる可能性は高いと考える。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁による「微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業費補助金(2016~2018)」の成果の一部である。関係者各位に感謝の意を表す。

文献

- 1) 渡邊信ほか:藻類ハンドブック, 株式会社エヌ・ティー・エス, (2012).
- 2) 渡邊信:新しいエネルギー藻類バイオマス, みみずく舎, p.106, (2011).
- 3) 高橋惇:微細藻類バイオマスの燃料化技術, 高砂熱学工業技術研究所報 No.32, pp.59-84, (2018).
- 4) 増田正夫, 高橋 惇:藻類バイオマス培養への排熱利用の研究, 第 29 回環境工学総合シンポジウム 2019, pp.156-159,

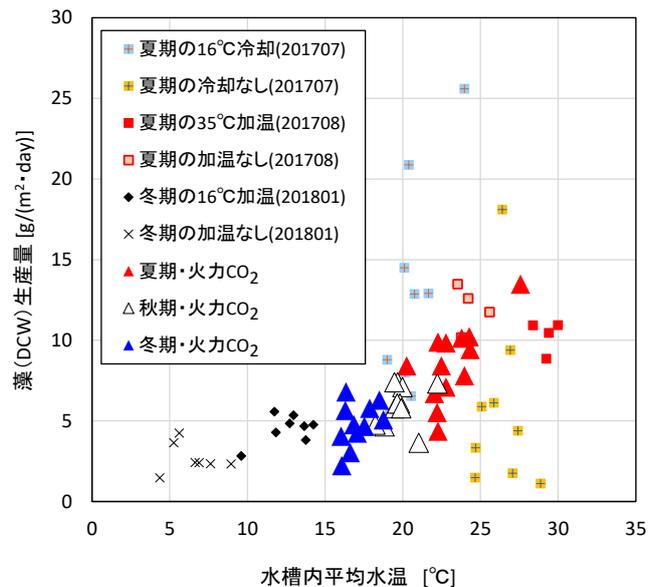


図7 秋期の実験結果

表2 CO₂利用率の結果

実験期間	加温・冷却	排ガス通気量 [l/min]	CO ₂ 利用率 [%]	
			24時間通気量に対して	日中の通気量に対して
2017/11/7 ~11/14	なし	2.0	3.7	9.2
2018/8/22 ~9/26	あり	2.0	6.7	13.3
	あり	0.5	21.1	41.9
2018/10/3 ~11/5	あり	0.5	19.4	43.3

- (2019).
- 5) 増田正夫:藻類培養への排熱利用の研究, 第 15 回バイオマス科学会議発表論文集, pp.5-6, (2019).
 - 6) 増田正夫, 高橋惇:微細藻類を活用したバイオ燃料生産のための実証事業における廃熱利用の研究, 高砂熱学工業技術研究所報 No.33, pp.51-58, (2019).
 - 7) 増田正夫, 宮下真一:藻類培養への廃熱の回収・搬送・利用の研究, 第 16 回バイオマス科学会議発表論文集, pp.55-56, (2021).
 - 8) 宮下真一, 増田正夫:藻類培養への廃熱・排ガス CO₂ 利用の研究, 第 16 回バイオマス科学会議発表論文集, pp.57-58, (2021).
 - 9) IEA:Energy Technology Perspectives 2020, (2020).
 - 10) 経済産業省資源エネルギー庁:CO₂ 回収, 利用に関する今後の技術開発の課題と方向性, 次世代火力発電協議会(第2回会合)資料1, (2015).
 - 11) 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット:CCUS/カーボンリサイクル, 第 1 回グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ, (2020).
 - 12) 経済産業省資源エネルギー庁:カーボンリサイクル技術事例集, (2020).

ABSTRACT

Microalgae are expected as promising biomass fuels. On the other hand, algae biomass is one of the effective uses of CO₂ in industrial exhaust gas. The purpose of this study is to confirm the algae cultivation effect using waste heat and CO₂ in the actual exhaust gas from a thermal power plant at the same time and to determine the CO₂ utilization rate of the actual exhaust gas. As a result, it was confirmed that high algae productivity and high CO₂ utilization rate could be simultaneously achieved. We also verified that heating and cooling the culture pond with waste heat improved the CO₂ utilization rate by 40% or more.

吸着式冷凍機の技術動向の調査研究

内田浩基・馬場大輔・谷野正幸

Research and Study of Technological Trends of Adsorption Refrigerators

Hiroki Uchida・Daisuke Baba・Masayuki Tanino

2050年のカーボンニュートラルに向けて、産業分野においては脱炭素化のハードルが高く、熱のカスケード利用、コージェネレーション利用、未利用熱利用、排熱・廃熱利用などによるサーマルマネジメントがこれまで以上に重要になると考えられる。産業分野で現在捨てられている低温の廃熱（200℃以下）を民生部門のビル空調システムやIT機器の冷却に積極的に利用することを考えた場合、廃熱から需要の高い冷水を作り出すことが可能な熱駆動冷凍技術はキーテクノロジーになると考えられる。熱駆動冷凍技術の中でも、より低温な廃熱（100℃以下）で駆動可能な吸着式冷凍方式が有望視され、性能向上や高効率化のための研究開発が盛んに行われている。カーボンニュートラルをにらんだ社会全体の省エネ化のため、これらの技術の社会実装と早期の普及拡大が期待されている。本報では、はじめに熱駆動冷凍機の開発経緯として吸収式冷凍機と吸着式冷凍機を概観した。また、低温廃熱で駆動可能な吸着式冷凍機の開発と商品化について説明した。さらに、大学や企業などの研究機関における吸着材料や吸脱着装置に関する最新の研究開発の動向を調査したので報告する。

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルに向けて、電力部門以外では電化が中心となり、熱需要には水素化やCO₂回収で対応する社会の実現が描かれている¹⁾。産業分野においては脱炭素化のハードルが高く、熱のカスケード利用²⁾、コージェネレーション利用³⁾、未利用熱 unused heat・排熱 exhaust heat・廃熱 waste heat⁴⁾⁹⁾利用などによる、サーマルマネジメントが今まで以上に重要になると考えられる。

空調システムは環境温度に近い冷熱/温熱の熱利用のサブシステムであるため、空調システム系外からの熱を大量導入し利用することができれば、空調システムの電力消費やガス消費を限りなくゼロに近づけられる可能性がある。そこで、産業分野の未利用熱や廃熱を民生部門の空調システムに利用することで、カーボンニュートラルに向け、部門や分野を超えた大幅なエネルギー消費の削減が可能になる。大量の熱を時間的/空間的に有効利用するためには、多くの与条件が整う必要があり、これら導入・普及を経済的に成立させるためには、導入設備の稼働率を高めることが重要である。そこで、広義の蓄熱式ヒートポンプシステムの研究開発が、我々の最重要の研究開発課題の1つと考えている^{7,8)}。

熱を時間的/空間的に有効利用するために、多くの蓄熱技術やオフライン熱輸送技術の研究開発が行われている。近年の蓄熱技術の開発状況については、当社が開発してきた低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システム^{9,10)}も含めて、多くの参考文献¹¹⁾を参照されたい。空調システムでの熱利用を目的に蓄熱やオフライン熱輸送の設備稼働率を向上させるためには、暖房や給湯用途の熱利用だけでなく、除湿や冷却の冷房運転に対する熱利用が重要であり、空調システムの熱源機器として熱駆動冷凍機や熱駆動ヒートポンプがキーテクノロジーになると考えられる。現在まで、熱駆動冷凍機としては臭化リチウム/水系の吸収式冷凍機が広く導入・普及されており^{12,13)}、吸収式冷凍機が普及されて

いることが我が国の空調分野の熱源機の特長として、海外からも認識されているようである。以前は電力や電力会社との競争のために、ガス会社が吸収式冷凍機などのガス利用機器を導入・普及を推進していたが、今後は真にナチュラルチャー¹⁴⁾として、吸収式冷凍機や吸収式ヒートポンプによる熱利用を拡大するようなサーマルマネージメントを行うことが、2050年のカーボンニュートラルの実現に必要となるであろう。

本報では、熱駆動冷凍機の概要として、まず、吸収式冷凍機と吸着式冷凍機を概観する。その後、吸着式冷凍機の開発とその商品化について説明する。最後に、大学や企業の研究機関などの研究機関における吸着式冷凍機に関する最近の研究内容を説明する。

2. 熱駆動冷凍機の概要

様々な熱駆動サイクルの方式や熱駆動冷凍機を概観した上で、ひと昔までの吸収式冷凍機と吸着式冷凍機の歴史を紹介することで、熱駆動冷凍機の概要を説明する。

2.1 熱駆動冷凍機の概観

日本冷凍空調学会の講座「熱駆動の基礎・応用技術の解説」¹⁵⁻³⁹⁾の全25回の記事によって、熱駆動サイクル技術の研究開発の状況を整理して熱駆動冷凍機を概観した。第1回の記事¹⁵⁾では熱駆動ヒートポンプ、除湿、蓄熱に関する概要が横断的に解説され、第2回以降の記事では「デシカント」「吸着」「吸収」「ケミカル」などを複数のキーワードによって掲載された。図1のように、記事数は「デシカント」で8件、「吸着」で10件、「吸収」で8件、「ケミカル」で8件であった。本講座を企画した日本冷凍空調学会のデシカント・吸着・吸収・化学系技術委員会には、デシカント空調システム、吸着式冷凍機、吸収式冷凍機、化学蓄熱の4分野の研究者や技術者が参画していたため、各々のキーワードの記事は、ほぼ同数であった。

筆者は延べ56名であり、企業に所属する筆者は21名だった。図1での企業に所属する筆者の記事は「デシカント」で5件(全数8件の63%)、「吸着」で3件(30%)、「吸収」で4件(50%)、また「ケミカル」で1件(13%)であった。このようにデシカント空調システムや吸収式冷凍機は導入・普及段階にあるため、企業に所属する筆者の記事が多い傾向になっている。一方、吸着式冷凍機は開発段階であり、化学蓄熱は研究段階であるため、大学や国研などの研究機関の筆者が多い傾向にある。

本講座での「吸着」に関連する記事において、キーワードの詳細は「吸着」「吸着冷凍機」「吸着冷凍サイクル」「吸着材」「吸着/収着材」「吸着ヒートポンプ」「吸着ヒートポンプ」「吸着冷凍サイクル」「吸着熱交換器」であった。とくに、第24回「吸着冷凍機・ヒートポンプの研究動向」³⁸⁾のように、一層の高性能化や高効率化の開発成果が待たれる。

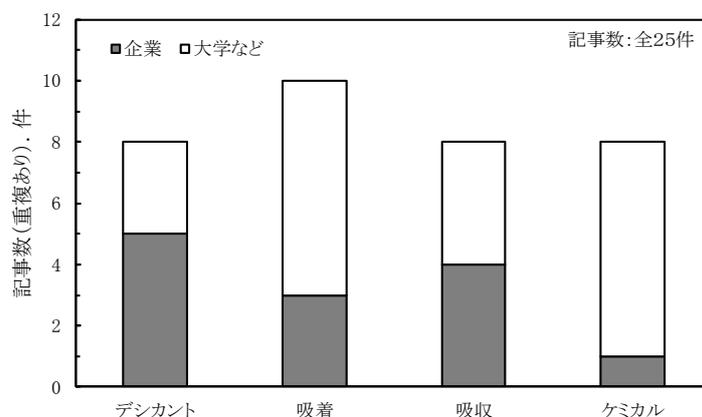


図1 講座¹⁵⁻³⁹⁾のキーワードに対応する記事数

表 1 吸着式冷凍機の主な吸着系と開発主体¹³⁾

作動媒体	吸着物質	開発主体	規模	備考
各種ゼオライト		日本 化学技術研究所	基礎	排熱(100℃), 昇温(170~190℃)
		米国 Zeopower	商業化	暖冷房
		フランス Orsay(CNRS)	20kW	ガス焚き(200℃)COPc=1.2, COPh=1.8
		フランス Cltergaz	プロトタイプ	太陽熱冷凍, H.P.
		フランス BLM	実証	冷凍, コンテナ, 貯蔵庫
		ドイツ München工大	325kW 実証	H.P., ボイラー焚き(260℃)温水(60℃) COPh=1.45
		ドイツ München工大	20kW 実証	H.P., 昇温, 蓄熱(250kWh)COPh=1.4
		日本 西淀空調機	商業化	工場排熱(65~85℃), 冷凍(7℃)
シリカゲル		前川製作所	350kW	COPc=0.6
		東大生研	プロトタイプ	太陽熱, 冷凍
		米国 JGT	実証	太陽熱, 冷凍
		日本 化学技術研究所	基礎	排熱(100℃), 昇温(170~190℃)
新吸着剤		フランス Burugogne大	基礎	排熱, 冷凍
		フランス BLM	商業化	太陽熱, 冷凍(-10℃), COPc=0.08~0.12
メタノール	活性炭	フランス Orsay(CNRS)	プロトタイプ	排熱(120℃), 冷凍(-20~-30℃) COPc=0.49
		米国 W.A.C	実証	サーマル・ウェーブ方式, ガス焚き(255℃)
アンモニア	活性炭	GRI	10kW	冷凍(5℃), COPc=0.7

式冷凍機は先進的な熱源機器であり、非常に高価であった。また、当時の西淀空調機の吸着式冷凍機のリーフレットには、納入実績として高砂熱学の本社が記載されていた。

日本冷凍空調学会の講座「熱駆動の基礎・応用技術の解説」の第25回「化学反応を用いたケミカルヒートポンプの研究動向」において、我が国で実用化・研究開発がなされている反応系について、蓄熱温度（再生温度）と放熱温度の関係が図3のように纏められた。図中では、放熱温度 $T_{放熱}$ が蓄熱温度 $T_{蓄熱}$ に比べて高温の場合を昇温モード、 $T_{蓄熱}$ が $T_{放熱}$ の方が低温か同等温度の場合を蓄熱モードと分類され、 $T_{放熱}$ が環境温度 $T_{環境}$ よりも低温である場合が冷凍モードとされている。また、吸収式冷凍機・ヒートポンプと吸着式冷凍機・ヒートポンプの各技術の位置づけが纏められた。以下の表に、吸収式冷凍機と吸着式冷凍機の説明を抜粋する³⁹⁾。

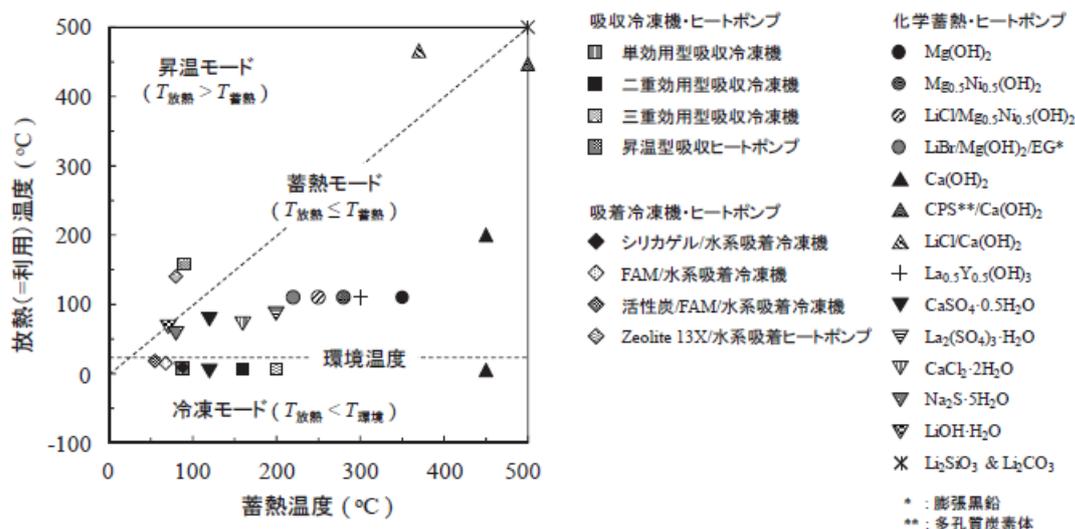


図 3 日本で実用化・研究開発がなされている熱駆動ヒートポンプ³⁹⁾

表 2 吸収式冷凍機・ヒートポンプと吸着式冷凍機・ヒートポンプの各技術の位置づけ³⁹⁾

(ここでは、原著に従って記載する)

<p>吸収式冷凍機・ヒートポンプの位置づけ</p> <p>吸収冷凍機・ヒートポンプは臭化リチウム／水溶液を用いた系が古くから実用化されており、地域冷暖房システムなどに大規模導入されてきた。空調冷房用途としてはCOPの向上を目指して再生器の数を変化させた単効用～三重効用型までが実用化された。このうち、低温排熱回収用の単効用型では 80 ～ 90 ℃、吸収冷凍機の主流である二重効用型では 0.8 MPa の蒸気(飽和温度 170 ℃)を駆動熱源としている。また、吸収剤が流動性、伝熱性能の高い液体であるためスケールアップが容易であり、17.6 kW(5 USRT)～17 600 kW(5000 USRT)と非常に幅広い冷凍能力を有する製品が市販されている。</p>
<p>吸着式冷凍機・ヒートポンプの位置づけ</p> <p>吸着冷凍機・ヒートポンプについては、シリカゲル／水系あるいはFAM(Functional Adsorbent Material)／水系を用いた空調冷房向けの冷凍機が実用化されている。吸着式冷凍機は使用する吸着材により駆動熱源温度が異なるが、シリカゲルを用いる場合は 80～90 ℃、FAM の場合は 60～80℃の低温熱源で駆動する。単効用型吸収冷凍機の駆動下限温度は 70℃付近とされている。この点から、FAM を用いた吸着式冷凍機は、吸収式冷凍機に比べてより低温の作動温度域をターゲットとすることで、競合技術である吸収冷凍機との差別化を図っている。吸着式冷凍機は、吸着現象が気固反応であるため吸着器内の伝熱性が低く、かつバッチ運転にならざるを得ないため単機としてのスケールアップには限界があり、実機では 499 kW(141 USRT)が最大である。</p>

3. 吸着式冷凍機の開発と商品化

吸着式冷凍機は、吸収式冷凍機に比べてより低温の作動温度域をターゲットにしており、低温廃熱を利用しやすい特徴がある。特に 100℃以下のより低温である未利用熱や廃熱を利用するため、吸着式冷凍機・ヒートポンプの開発が期待されている。本章では吸着式冷凍機に焦点をあて、装置の仕組みを説明した上で吸着材の開発の状況とそれを用いた各社の製品、さらに吸着式冷凍機の今後の展望を説明する。

3.1 吸着式冷凍機の仕組み

図 4 に吸着式冷凍機の動作原理図を示す⁴⁶⁾。装置は、底部の蒸発器、上部の凝縮器、および蒸発器と凝縮器に挟まれた 2 つの冷媒吸脱着器から構成される。作動サイクルは図 4 の(a)と(b)の 2 工程であり、5 分程度の間隔で切り替わる。2 つの吸脱着器は一方が吸着器として作動しているときは、もう一方は脱着器として作動する。内部の冷媒は、水やエタノール、アンモニアなど環境負荷が少ないものを用いることができる。近年は、後述するゼオライトなど親水性の吸着材の開発が進み、水を冷媒として用いた装置が主流となっている。大気圧における単位重量あたりの蒸発潜熱量は、水が 2,257 kJ/kg と他の冷媒(例えば、アンモニア: 1,372 kJ/kg、エタノール: 838 kJ/kg)に比べて大きく、吸着式冷凍機の冷媒として最適と考えられる。装置内部は冷媒が蒸発しやすいように減圧され、(冷媒が水の場合は)水の飽和蒸気圧に保たれる。図 4 中の装置底部の蒸発器において、冷媒が冷水製造ラインの表面に供給され、冷水製造ラインから気化熱を奪って蒸発する。蒸発器内部は飽和蒸気圧に保たれているため、例えば冷水製造ラインの表面温度が 18℃の場合、約 2.1 kPa の水蒸気を発生する。蒸発器で発生した水蒸気は蒸発器上部に設置・連通した吸着器(図 4 (a)の場合、左側)の表面に吸着される。後述する改良ゼオライト(例えば、AQSOA-Z02)の場合、以下の(1)式で計算される相対蒸気圧が 0.1 以上(吸着材温度 60℃以下、吸着材温度での飽和蒸気圧 20 kPa 以下)で吸着材表面に水分が吸着する。

$$\text{相対蒸気圧} = \frac{\text{吸着材周囲の水の飽和蒸気圧}}{\text{吸着材(バルク)温度での水の飽和蒸気圧}} \quad \dots \dots (1)$$

吸着器に水分が吸着すると吸着熱を発生するため吸着材温度が上昇し水分を吸着しにくくなる。このため、写真 1 のように熱交換器に吸着材を塗布して、水蒸気との接触面積を増加すると同時に冷却水により吸着材を冷却する方法が考案されている^{47,57)}。凝縮反応に比べて吸着反応はゆっくり進むため、吸着材が十分に水を吸着するのに 5 分程度を要する。

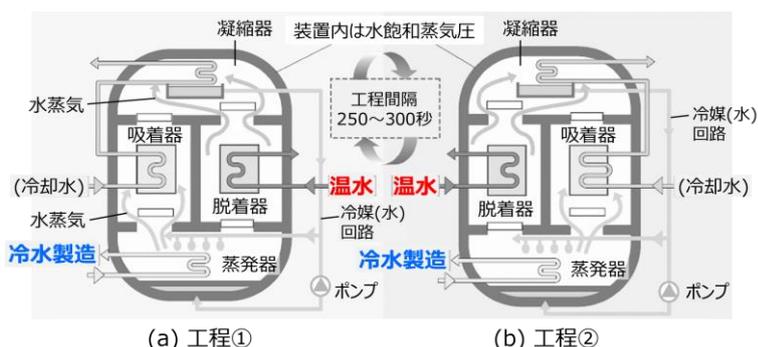


図 4 吸着式冷凍機の作動原理図

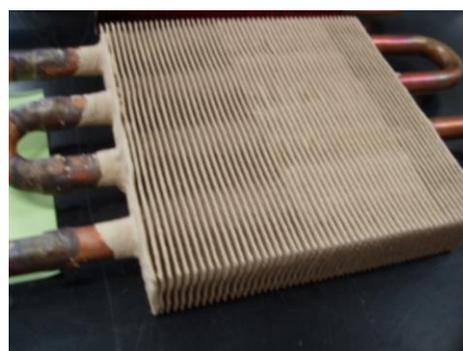


写真 1 吸着材(AQSOA)を塗布した熱交換器

次工程（図 4 (b)）において、図 4 (a)の吸着器は水分を脱着する脱着器として機能する。吸着器では吸着熱を除去するため冷却水を導通したが、脱着器では吸着材から水分を取り除くため写真 1 の熱交換器に温水を導通して加熱する。脱着器の表面は（例えば吸着材が AQSOA の場合）相対蒸気圧が 0 に近いほど水分が脱着しやすい。利用する温水が高温であり吸着材温度での水の飽和蒸気圧が高く、かつ吸着材周囲の水蒸気圧が低い場合に水分を脱着しやすい。吸着材周囲の水の飽和蒸気圧は、脱着器の上部に設けられ連通する凝縮器表面の温度に依存する。温水ラインに 80°C の温水を流した場合、吸着材温度での水の飽和蒸気圧は約 48 kPa である。凝縮器の表面温度が 20°C 程度の場合、吸着材周囲の水の飽和蒸気圧は約 2.3 kPa、相対蒸気圧は 0.05 程度が得られ、吸着材への水の吸着量は 0.1 kg/kg 以下となる（図 5 参照）。図 4(a)の前工程において、吸着器(左側)に 0.25 kg/kg の水分が吸着している場合、図 4 (b)の脱着器(左側)から温水ラインの熱により 0.15 kg/kg の水分を取り出すことができる。脱着器から取り出した水蒸気は脱着器の上部に設置され連通した凝縮器に流れて凝縮する。水蒸気が凝縮管表面で凝縮する際には凝縮熱を発生するため冷却水ライン（図 4 (b)では吸着器の下流に位置）で冷却する必要がある。凝縮器で凝縮した水は蒸発器に還流しポンプにより冷水ラインの表面に再び供給される仕組みである。図 4 (a)と(b)を一定時間間隔で交互に繰り返すことで連続した冷水の生成が可能である。

3.2 吸着材の開発

吸着式冷凍機に求められる吸着材の性能は、最大吸着量が大きく、かつ小さい相対蒸気圧の範囲で冷媒の脱着が行われるのが理想的と考えられる。図 5 に一般ゼオライトや活性炭、シリカゲルなどの従来吸着材と三菱樹脂が新規に開発した改良型ゼオライト（商品名：AQSOA）各種吸着材の相対蒸気圧に対する水分吸着量の関係と比較した⁴⁶⁾。縦軸の吸着量は乾燥重量 1kg あたりの吸着材が吸着可能な水分量である。横軸の相対蒸気圧は前述の(1)式で計算される。

各温度における水の飽和蒸気圧を図 6 に示す⁴⁸⁾。水の飽和蒸気圧は温度に依存して水蒸気の温度が高いほど飽和蒸気圧も高くなる。図 5 の各吸着材は相対蒸気圧の変化に対する吸着量の変化の様子に大きな差があるが、いずれの吸着材も相対蒸気圧が高いほど吸着量が増加する傾向がある。このことから、吸着材に水分を吸着させる工程を考えた場合、吸着材周囲の水蒸気温度が高く（飽和蒸気圧が高く）、吸着材温度が低い（吸着材温度での飽和蒸気圧が低い）ほど、吸着材に水分が吸着されやすい。逆に、吸着材から水分を脱着する工程を考えた場合、吸着材周囲の水蒸気温度が低く（飽和蒸気圧が低く）、吸着材温度が高い（吸着材温度での飽和蒸気圧が高い）ほど、吸着材から水分を除去しやすい。このような理由から、吸着材の温度を図 4 の(a)と(b)の 2 工程間で切り替える必要があり、2 工程間の温度差は小さいほど、吸着器の熱容量によるヒステリシスの影響を小さくでき吸着式冷凍機をスムーズに運転できると考えられる。また AQSOA-Z02 のように Z05 や Z01 に比べて小さい相対蒸気圧で吸着量が変動する場合、吸着材から水分を脱着するためには吸着材をより小さい相対蒸気圧下で使用する必要があり、AQSOA-Z05 や Z01 に比べて AQSOA-Z02 はより高温の温水の利用が必要となる。

デューリング線図は熱駆動冷凍サイクルの熱力学的特性を表現するためによく利用される⁵⁴⁾。図 7 にシリカゲルと AQSOA(Z01)を吸着材として用いた場合のデューリング線図を比較した。両吸着材を用いて同量の水分の吸脱着量

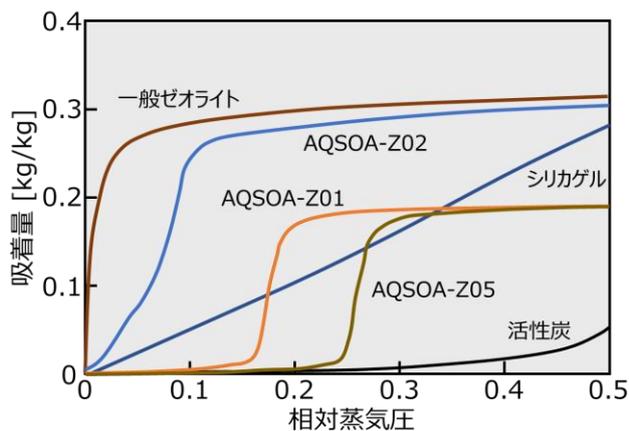


図 5 各種吸着材及び AQSOA の吸着等温線

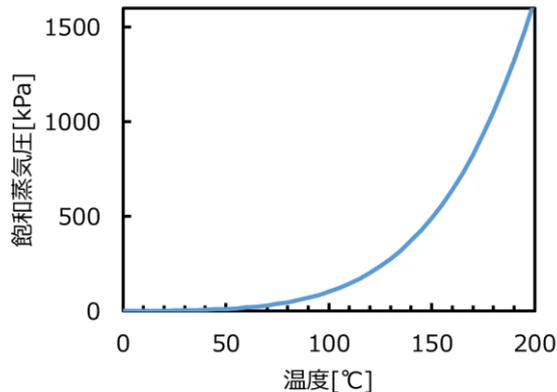


図 6 各温度における水の飽和蒸気圧

($0.18 \text{ kg/kg} - 0.01 \text{ kg/kg} = 0.17 \text{ kg/kg}$)の冷凍サイクルを考えた場合の線図であり、図中の Q_e 、 Q_c 、 Q_a 、 Q_d はそれぞれ蒸発熱、凝縮熱、吸着熱、脱着熱である。10°Cで水蒸気が蒸発した場合、シリカゲルが 0.18 kg/kg の水分を吸着するには吸着器を 28°Cまで冷却する必要があるのに対して、AQSOA の場合は 34°Cまで冷却すればよい。水分を脱着して吸着量を 0.01 kg/kg とするためには、シリカゲルの場合は 128°Cまで加熱する必要があるが、AQSOA の場合 78°Cまで加熱すればよい。シリカゲルの温度の変化量が 28~128°Cと 100°Cであるのに対して、AQSOA の場合は 34~78°Cと 44°Cの変化量であり、AQSOA と同量の水分吸脱着をシリカゲルで得るには AQSOA の 2 倍以上の温度変化量が必要となる。

これらのことから、吸着式冷凍機に使用する吸着材としてはなるべく高い相対蒸気圧において狭い相対蒸気圧の範囲で、かつ水分の吸着量が大きく変化する材料が好ましいと考えられる⁶³⁾。図 5 中の一般ゼオライトは、最大吸着量が 0.3 kg/kg 以上と最も大きいが相対蒸気圧を 0 近傍で大きく変化させるため、高温の温水が必要となる。シリカゲルや活性炭の場合、吸着量を大きく変化させるためには、相対蒸気圧を大きく変化させる必要があり、このためには吸着材の温度を大きく変化させる必要がある。三菱樹脂が開発した AQSOA-Z01、Z05 は最大吸着量が約 0.2 kg/kg と一般ゼオライトと比べて小さいものの、狭い相対蒸気圧の範囲でステップ状に大きく吸着量に変化し、吸着式冷凍機に

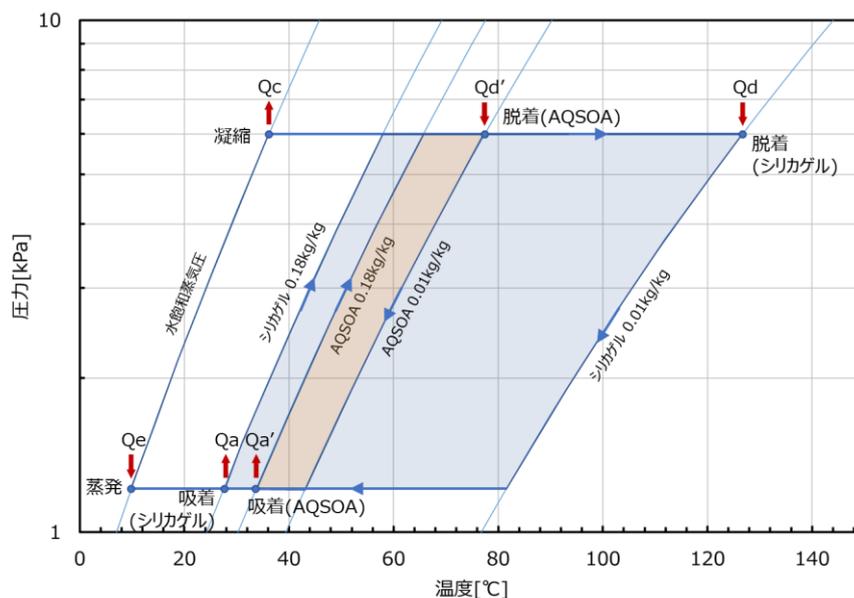


図 7 吸着式冷凍サイクルのデューリング線図

使用する吸着材として理想的な特性と考えられる^{61, 62)}。また AQSOA-Z02 は相対蒸気圧が 0 付近の吸着量は一般ゼオライトほど急激に立ち上がらず、最大吸着量は一般ゼオライトとほぼ同等であり AQSOA-Z01 や Z05 と比較して 1.5 倍以上の最大吸着量が得られる。AQSOA-Z02 は冷却性能あたりの吸脱着器を小型化でき、コンパクトな吸着式冷凍機が実現できると考えられる^{60, 62)}。

3.3 各社の製品

2012～2013 年にかけて、三菱樹脂が開発した新規吸着材 AQSOA を用いた吸着式冷凍機がユニオン産業、前川製作所、InvenSor 社(インベンソー社、独)からそれぞれ商品化された⁴⁹⁻⁵¹⁾。表 3 に各社の吸着式冷凍機の概要を示す。最も初期に販売開始されたユニオン産業の吸着式冷凍機は AQSOA の型式 (Z01～Z05) を限定せず用途に応じたカスタマイズが可能である。以降、前川製作所から AdRef-Noa-L (アドレフ・ノア・エル) が販売され、吸着材としては AQSOA-Z05 の使用を前提とし、50～60℃のより低温の温水で駆動可能としているが、用途に応じて AQSOA-Z01 や Z02 への変更も検討されている^{50, 50)}。また最も後発のインベンソー社の LTC シリーズは AQSOA-Z02 を使用しており、駆動には前川製作所の吸着式冷凍機よりも高温である 60℃以上の温水が必要であるが、よりコンパクトなサイズの吸着式冷凍機を商品化している。駆動に必要な温水の温度や装置サイズ、最大冷却能力は、使用する吸着材に大きく依存する。前述の図 5 において、相対蒸気圧 0.25 付近で水分の吸着量が大きく立ち上がる AQSOA-Z05 を用いた前川製作所製の装置はインベンソー社より低温の温水が利用可能である。一方、相対蒸気圧 0～0.1 付近で吸着量が増加する AQSOA-Z02 を用いたインベンソー社の装置は、前川製作所製に比べて高温の温水が必要であるが、吸着器をより小型化できコンパクトな吸着式冷凍機を実現したと考えられる。

高砂熱学イノベーションセンター (つくばみらい市、2020 年 1 月竣工) においても、オフィス空調に使用する冷水を製造する目的で吸着式冷凍機を導入している。熱源として、木質バイオマス発電機や木質ペレットボイラで発生する廃熱から 80℃前後の温水を利用できるため、省スペースなインベンソー社製の吸着式冷凍機「LTC 30 e plus」を選定し、最大 35kW の冷却を可能としている。

3.4 今後の展望

一般的な家庭で使用される冷房時のエアコンのエネルギーの消費効率 (COP : Coefficient Of Performance、消費電力に対する冷房能力の割合) は 5 程度であり、1kW の電力で 5kW の冷房能力が得られる。これに対して吸着式冷凍機の COP 値は、利用する温水の熱量に対する製造できる冷水の熱量の割合であり、インベンソー社が公開している値は最大でも 0.7 程度と小さい。吸着式冷凍機の最大のメリットは、ごみ焼却施設などからの捨てられる廃熱を熱源として利用できることであるが、吸着式冷凍機をより広く普及させるためには、更に効率よく冷水が製造できることが望ましい。このために、上述した改良型ゼオライト (AQSOA) など吸着式冷凍機に適した吸着材が開発され、低コス

表 3 各社の吸着式冷凍機

	ユニオン産業	前川製作所	InvenSor(独)	InvenSor(独)
商品名	ユニウェーブ・ミニ Mタイプ	AdRef-Noa-L	LTC 10 e plus	LTC 30 e plus
吸着材	AQSOA	AQSOA-Z05	AQSOA-Z02	AQSOA-Z02
冷却能力	10 kW	80 kW	10 kW	35 kW
温水温度	50～80℃	50～60℃	60～70℃	60～99℃
製造冷水温度	---	12～20℃	7～25℃	10～25℃
販売時期	2012年1月	2012年4月	2013年7月	2015年2月
寸法[m] L x H x W	2.3 x 2.4 x 1.0	3.9 x 2.4 x 2.1	1.1 x 1.4 x 0.7	1.6 x 1.8 x 0.8
外観				

ト化も進んでいる。

前述の通り、AQSOA は吸着式冷凍機に使用する吸着材として理想的な特性をもつが、AQSOA-Z02 は収率（化学プロセスにおいて理論収量に対する実際に得られる物質量の割合）が低いため高コストである問題があった。このため、AQSOA 開発元の三菱樹脂では、製造時に発生する未反応原料の回収・再使用技術を新規に開発することにより、市販の一般ゼオライトと同等の製造コストを実現している^{47,52}。また AQSOA-Z05 についても、製造プロセスの見直しにより収率を改善し大量生産による製造コストの低減が試みられている⁴⁷。

吸着式冷凍機の小型・軽量化への取り組みは、デンソー^{53,55}やカルソニックカンセイ⁵³など輸送機器関連メーカーで熱心に取り組まれている。カルソニックカンセイにおいては、自動車エンジンやモーターからの排熱を冷熱に変換し冷房することで燃費を向上させる吸着式冷凍機を開発中である。従来は、客室用エアコンを作動するためエンジンの車軸からコンプレッサの動力を取り出しており燃費悪化の要因になっていた。車載向けのコンパクトな吸着式冷凍機を開発することで、エンジンやモーターから棄てられる排熱を有効に利用できるため、輸送機器の省エネルギー化に寄与すると考えられる。

吸着式冷凍機の製品展開として、60℃以下のより低温の廃熱を利用できるよう適用先を拡大しようとしている。例えば、IT 分野ではデータセンターの消費電力が増大している問題があり、吸着式冷凍機を用いてコンピュータからの廃熱をデータセンターの空調に利用することが考えられている^{58,59}。コンピュータからの廃熱は自動車などの輸送機器やごみ焼却施設からの廃熱（100℃以上）に比べて低温（60℃以下）であるため、従来の吸着材を用いた場合は冷熱製造能力が不十分なことや装置が大型化するなどの問題があった。三菱樹脂製の AQSOA-Z01 や Z05 など低温の温水を有効活用できる新規吸着材やこれらを用いた前川製作所やインベンゾー社の装置が開発されており、IT 分野においても吸着式冷凍機を活用した省エネ化やコンピュータ冷却に要する電力削減による低コスト化が期待される。

4. 吸着式冷凍機の研究

現在大量に廃棄されている 100℃以下の低温未利用廃熱の有効利用は、脱炭素技術の確立に不可欠である。冒頭の解説の通り、低温熱エネルギーの利用システムとして、導入実績のある吸収式冷凍機がよく知られているが、近年では多孔質固体（吸着材）を用いた吸着式冷凍機が注目を集めている。その理由として、吸着式冷凍機は吸収式冷凍機に比べて再生温度の低下に伴う性能低下が小さいからである。また近年では、低温再生型の吸着式冷凍機の導入は、熱源空調システムの多様化につながり、ZEB を実現する熱源構成要素として有効であると報告されている⁶⁴。本章では、吸着式冷凍機の要となる吸着材および吸着器の研究開発状況について概説し、次に今後の研究の方向性について述べる。

4.1 吸着材に関する研究

吸着式冷凍機の吸着材に求められる研究課題は、以下の 4 項目に大別される^{66,67}。

- 1) システム動作内における大きな吸着量（単位重量・単位体積当たり）
- 2) 高い吸・脱着速度と伝熱速度
- 3) 吸・脱着サイクルに対する高可逆性・耐久性
- 4) 低温熱源に対する十分な脱着性能

吸着式冷凍機は、吸着分子（吸着質）に主に水が用いられており、吸着材にはシリカゲル、ゼオライト、活性炭などが用いられている。前章で説明した通り、吸着材に対する要求性能としては、システムの作動相対湿度間で大きな最大吸着量を持つことが重要である。表 4 に各種吸着材の作動範囲における吸着量を示す⁶⁷。具体的な条件として、相対湿度 9～29%（発生冷熱温度：10℃、環境温度：30℃、再生熱源温度：80℃）を仮定している。表 4 より、ゼオライト系機能性吸着材である AQSOA やシリカゲルが大きな有効吸着量を有しているのが分かる。以下にシリカゲル、ゼオライト、活性炭についての研究状況についてまとめる。

表 4 各種吸着材の作動範囲における吸着量⁶⁷⁾

吸着材	吸着冷凍機		
	吸着量	充填密度	吸着量
	Δq [kg/kg]	[kg/m ³]	Δq [kg/m ³]
シリカゲル			
A型シリカゲル	0.12	730	87.6
B型シリカゲル	0.05	500	25.0
ゼオライト系			
ゼオライト NaX	0.02	650 ^{*)}	117.0
機能性吸着材 (AQSOA-FAM-Z01)	0.18	650 ^{*)}	156.0
(AQSOA-FAM-Z02)	0.24	650 ^{*)}	6.5
(AQSOA-FAM-Z05)	0.01	650 ^{*)}	52.0
メソポーラスシリカ (TMPS-1.5)	0.08	650 ^{*)}	32.5
低温再生型ゼオライト (HPA)	0.05	650 ^{*)}	
その他			
ハスクレイ	0.11	650 ^{*)}	71.5
稚内層珪質頁岩	0.02	650 ^{*)}	13.0
高分子吸着材	0.14	-	-
メソポーラスシリカ-CaCl ₂ 複合体	0.13	650 ^{*)}	84.5

^{*)}推定値

4.1.1 シリカゲルに関する研究⁷¹⁻⁷⁵⁾

シリカゲルは、①物理的・化学的に安定している、②極性分子の吸着量が多い、③比較的値段が安いという特長を有している。その特性により、吸着式冷凍システムの吸着剤として多数研究⁶⁹⁾がなされており、水を冷媒としたシステムは既に実用化されている。また近年、均一な細孔を有するメソポーラスシリカが開発され、従来のシリカゲルの問題点であった特定の相対圧域での有効吸着量の少なさが改善されている。この他、メソポーラスシリカの吸着特性をさらに向上させる試みとして、他の材料との複合化も検討されている。Tokarev ら⁷⁰⁾は、メソポーラスシリカ MCM-41 と CaCl₂ の複合材料を合成し、その水蒸気吸着特性から吸着式冷凍機の COP が 0.71 まで向上すると報告している。この複合材料は、まだ基礎的検討段階であるが、今後も更なる機能向上の有力な手法として開発が進められると考えられる。

4.1.2 ゼオライトに関する研究^{76-78, 113,117)}

ゼオライトは、親水性が強く、細孔が小さいため、低温での再生温度には適していないが、細孔径や組成、交換カチオン種などを調整することにより、再生温度の低温化を実現するものが報告されている。シリカゲルと同様に吸着式冷凍システムの吸着剤として現在活発な研究がなされており、近年では機能性吸着材 AQSOA を代表とする水を冷媒としたシステムが商用化されている。

垣内ら⁷⁶⁾は、再生温度 60℃ で運転可能なゼオライト系吸着剤 (FAM-Z01) を開発し、相対圧 0.15~0.19 における水蒸気の有効吸着量が 0.16 kg/kg であることを示した。また、彼ら⁷⁷⁾は、再生温度 90℃ での運転を想定したゼオライト系吸着剤 (FAM-Z02) も開発した。図 8 は FAM-Z02、Y 型ゼオライト、シリカゲルの 313K の水蒸気吸着等温線と 363K の水蒸気脱着等温線を示しており、FAM-Z02 は相対圧 0.11~0.17 における水蒸気の有効吸着量が 0.19 kg/kg であることを示した。図 9 は 328K で吸着、373K で脱着を繰り返して FAM-Z02 の吸・脱着耐久試験を行った結果である。図より、10 万回以上の吸着/脱着サイクル試験を経ても劣化が起きないことを実証している。なお、この試験で使用された吸着材は、三菱樹脂株式会社より機能性吸着材 AQSOA として商用化されているものである。

弘中ら¹¹⁵⁾は、再生温度 45~60℃ で運転可能な新型の AQSOA¹¹⁹⁾を用いた吸着式冷凍機の開発を行っている。冷熱出力は、冷却水温度が大きく影響を及ぼし、開発機において冷却水温度が 25℃時に、冷熱出力が 15.4kW および COP の最大値が 0.54 であったと報告している。低温再生用の新規吸着材としては最も展開が進んでおり、今後の大規模普及が期待される。

4.1.3 活性炭に関する研究⁷⁹⁻⁹¹⁾

活性炭は古くから吸着剤として用いられており、粉末状、粒状、円柱状、繊維状などの多様な形状に成形されたも

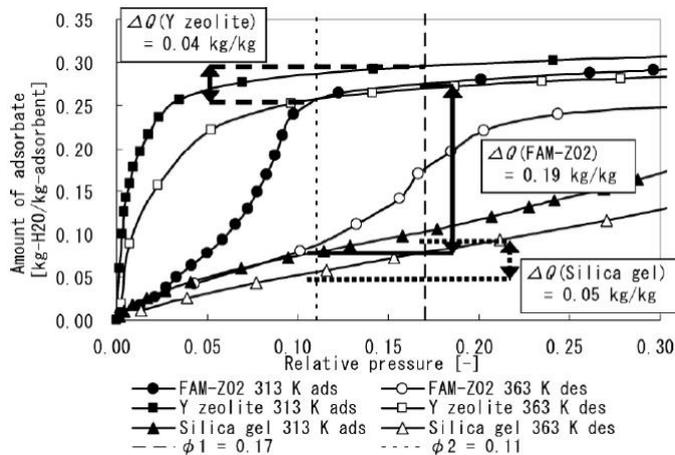


図 8 水蒸気吸脱着等温線⁷⁷⁾

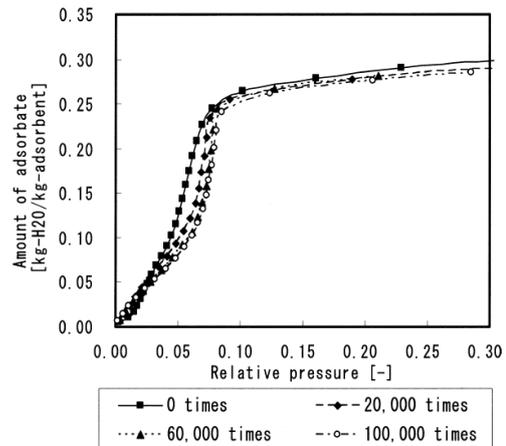


図 9 吸・脱着耐久試験結果⁷⁷⁾

のが作られている。活性炭は疎水性であるため、吸着式冷凍システムの運転圧力域での水蒸気吸着量が小さい。その為、水以外の冷媒の検討や親水性処理が施された活性炭の開発がなされている。

Hamamoto ら⁸⁶⁾は、2種類の活性炭素繊維 (FX-400、KF-1000) へのメタノール蒸気の吸着特性を測定し、FX-400 および KF-1000 の吸着量はそれぞれ 0.4 kg/kg および 0.28 kg/kg であることを示した。さらに彼ら⁸⁷⁾は、上記の2種類の活性炭素繊維/メタノールおよびシリカゲル/メタノールに関する熱力学的サイクル解析を行い、様々な温度条件の下で吸着剤単位質量当たりの冷凍効果および COP を算出した。そして、蒸発温度 -15°C 以下において活性炭素繊維/メタノール系の COP はシリカゲル/メタノール系を上回ることを明らかにしている。

El-Sharkawy ら⁸⁹⁾は、活性炭素繊維 (A-20) へのエタノール蒸気の吸着特性を測定し、Dubinin-Raduskevich 式で吸着等温線を作成するとともに、最大吸着量は 0.797 kg/kg であることを示した。また、彼ら⁹⁰⁾は、2種類の活性炭 (Maxsorb III、HC-20C) へのメタノール蒸気の吸着特性を測定し、吸着温度 20°C および蒸発温度 15°C のときメタノール蒸気吸着量がそれぞれ 1.16 kg/kg および 0.6 kg/kg となることを示した。さらに、彼らは2種類の活性炭/メタノールの吸着等温線を Dubinin-Raduskevich 式で近似して、熱力学的サイクル解析によって再生温度 80°C 、冷却温度 30°C 、蒸発温度 7°C での冷凍効果および COP は、Maxsorb III/メタノール系でそれぞれ 640 kJ/kg および 0.78、HC-20C/メタノール系でそれぞれ 371 kJ/kg および 0.76 であることを明らかにしている。

4.1.4 その他の吸着剤に関する研究⁹²⁻⁹⁵⁾

近年では、金属イオンおよび有機架橋から構成される多孔性配位高分子 (PCPs) や有機金属構造体 (MOFs) といった多孔性物質が注目されている。これらの吸着剤は、表面積および細孔容積の大きさおよび配合の制御の容易性から、様々な用途への応用が期待されている⁹¹⁾。Ehrenmann ら⁹²⁾は、MOFs 系吸着剤 (MIL-101) の水蒸気吸着量を測定し、その吸着等温線は相対圧 0.3~0.6 で S 字曲線を描き、 1.01 kg/kg の吸着量を有することを明らかにしている。

Henninger ら⁹³⁾は、テレフタル酸クロム (III) を添加した MIL-101 の水蒸気吸着特性を評価しており、水蒸気吸着量が 1.43 kg/kg であることを示した。また吸着等温線は相対圧 0.35~0.6 で急激に変化することを明らかにしている。Akiyama ら⁹⁴⁾は、3種類の MOFs 系吸着剤 (MIL-100) の水蒸気吸着特性を測定し、いずれの吸着剤においても I 型の吸着等温線を有することを明らかにした。また、フッ化水素基を有する吸着剤は、相対圧 0.22~0.58 の範囲で 0.5 kg/kg の水蒸気吸着量を有することを示し、3種類の吸着剤の中で吸着式冷凍システムの吸着剤として最も適していると報告している。

4.2 吸着剤に関する研究⁹⁶⁻¹¹³⁾

これまでは、吸着材が持つ平衡論的 (静的) 特性について述べた。しかし、実用上は冷熱出力が重要であり、シス

テムの速度論的（動的）特性が重要となる。大きな水蒸気吸着量を有する吸着材の場合、吸着に伴うエネルギー量は冷却水による冷却能力に対して2~3倍にもなる。その熱の迅速な供給・除去が実現されなければ、吸着材本来の性能を発揮できなくなるため、吸着器の熱・物質移動速度は非常に重要な因子となる。吸着現象に限らず発熱を伴う固気系の反応を扱う装置の場合には、概ね固体吸着材充填層の伝熱速度が律速となる。従って、吸着材充填層の有効熱伝導率の向上と吸着材—伝熱面の接触抵抗の低減を図ることが吸着式ヒートポンプの熱出力性能向上と装置の小型化にとって最大の課題となる。現状では吸着材の熱交換器表面への塗布やメタルフォーム上への吸着材への直接合成⁹⁶⁾による熱・物質移動促進などが試みられており、塗布厚みやバインダの最適化、伝熱面の工夫などの研究展開が考えられる。以下に吸着器の熱・物質移動促進についての研究状況についてまとめる。

本間ら⁹⁷⁾は、シリカゲル/水系について、酢酸ビニル樹脂をバインダとしてシリカゲル粒子をフィンチューブに塗布したフィンチューブ型吸着器のフィンピッチが吸着量に及ぼす影響を実験的に評価した。その結果、吸着量が極大値を示すフィンピッチが存在し、フィンピッチが最適値より小さい場合は充填量の減少により、最適値より大きい場合は熱移動特性の低下により、いずれも吸着量が低下することを明らかにした。また、彼ら⁹⁸⁾はフィン高さが吸着器見かけ体積単位時間当たり吸着量に及ぼす影響も実験的に評価しており、フィンが高いほど低圧域での物質移動抵抗の影響が大きく、低いほどシリカゲル充填量が少ないことによる影響が大きいことを明らかにした。さらに、伝熱管径12.7 mm、フィンピッチ4 mmのフィンチューブではフィン高さは8 mmの場合が最も効率が優れていると結論付けた。

渡辺ら⁹⁹⁾は、シリカゲル/水系について、吸着剤とフィン付伝熱管を一体にした伝熱管一体構造型熱交換吸着(FST)モジュールの熱および物質伝達に関する実験および解析を行い、フィンピッチおよびフィン高さの最適値がそれぞれ1.0~2.0 mm および11~14 mmであることを示した。また、彼らは最適化されたフィン付熱交換器を用いて連続運転試験を行い、再生温度75℃、冷却温度30℃、蒸発温度15℃での吸着器単位見かけ体積当たりの冷凍能力が107 kW/m³であり、市販品の約2倍であることを示した。

間宮と二階¹⁰⁵⁾は、吸着剤充填層の伝熱機構と吸着剤の粒径との関係に着目し、水蒸気の吸脱着実験および有効熱伝導率をパラメータとした吸着器に関する数値解析を行った。計算結果と実験結果との比較により、吸着式冷凍システムに適した吸着剤の粒径は0.1 mmであり、その有効熱伝導率は約0.15 W/(m·K)であることを示した(図10)。また、彼ら¹⁰⁶⁾は、伝熱実験より得られた有効熱伝導率を用いて、熱交換器形状および吸着剤充填量がシステム性能に及ぼす影響を評価した。図11はCOP、1回の吸着過程に必要な時間 τ 、1冷凍トンの冷熱出力を得るのに必要な吸・脱着反応器の伝熱面積Aを吸着材層厚さとフィンピッチの相関を示している。計算条件は、加熱水温度100℃、冷却水温度30℃、冷水温度10℃であり、バッチに伴う凝縮器から蒸発器へ変更する際の冷却水温度レベルから冷水温度レベルへシフトするのに要する顕熱を考慮に入れている。その計算によると、フィンピッチ5 mm、吸着剤充填層の厚さ10 mm、伝熱面積5 m²の吸着器を有するシステムは、再生温度100℃、冷却温度30℃、蒸発温度10℃で、COPが0.4~0.45、

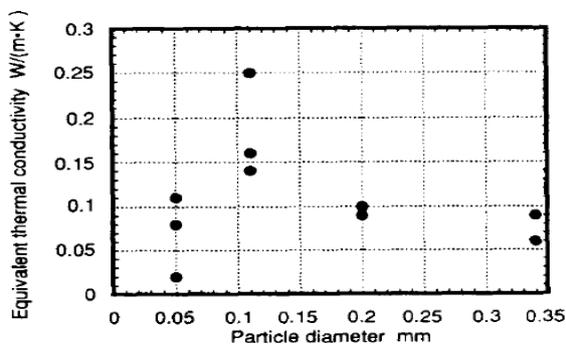


図10 等価熱伝導率と吸着材粒径の関係¹⁰⁵⁾

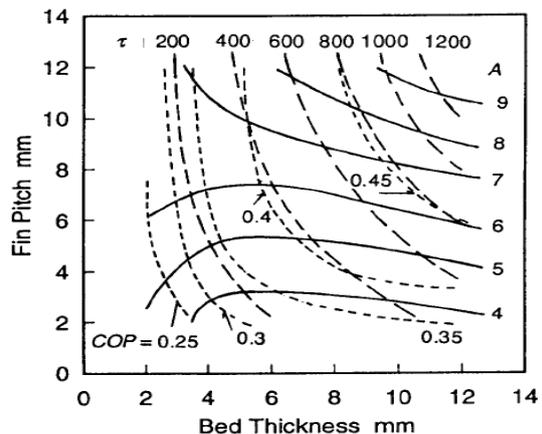


図11 COPに及ぼす各因子の影響¹⁰⁶⁾

冷凍出力が1冷凍トン(3.86kW)となることを明らかにした。

仮屋ら¹⁰⁷⁾は、活性炭素繊維/エタノール系に着目し、フィンチューブ型吸着器に関する数値解析を行った。彼らは、熱交換器形状が冷凍能力および吸着時間に及ぼす影響を評価し、フィンピッチおよびフィン高さが冷凍能力に影響を与えることを明らかにした。また、熱交換器の材質も評価しており、熱伝導率が100 W/(m・K)を超える素材であれば、冷凍能力および最適吸着時間はほぼ同じであることも明らかにした。さらに、彼ら¹⁰⁸⁾は、同系について熱交換器形状がシステム性能に与える影響も評価しており、システム性能は伝熱管外径に最も影響されることを示した。

4.3 今後の研究開発動向

研究開発の方向性として、システムが作動する温度範囲内でより低温で再生可能であり大きな有効吸着量を持つ吸着材の開発、高い吸・脱着速度と伝熱速度の実現が可能な吸着器の開発が挙げられる。また、吸着材の再生温度の低温化および運転条件内で最大の有効吸着量ができるシステム運転制御なども今後の研究開発テーマとして挙げられる。吸着式冷凍機は熱と物質の同時移動が生じる機器であり、吸着材とそれを構成する機器とのマッチングによる高冷熱出力が鍵となってくると考えられる。

5. おわりに

2050年のカーボンニュートラルに向けて、廃熱などの未利用熱を徹底的に利用しなければならない。その熱源機器としては熱駆動冷凍機・ヒートポンプ、特に、低温の廃熱駆動が可能な吸着式冷凍機・ヒートポンプが有望であると考えられる。本報では吸着式冷凍機の開発とその商品化と、吸着式冷凍機に関連する最新の研究動向を概観し、以下の知見を得た。

- 1) 吸着式冷凍機に適した吸着材が開発されてきた。吸着式冷凍機の更なる高性能化、高効率化、低コスト化を目指して、新規吸着材の探索や高い吸・脱着速度を実現する吸着器の開発など継続した検討が必要である。また吸着材と構成機器の最適なマッチングや吸着式冷凍機の最適制御方法などの研究開発が期待される。
- 2) これまでの大学や企業などの研究開発の成果を元に、廃熱などの未利用熱を有効利用したZEBや民生部門の空調システム、データセンターなど社会基盤への実装を推し進め、実証実験を通して吸着式冷凍機の有効性を明らかにしてゆく必要がある。

カーボンニュートラル社会の実現において、エンジニアリング企業である高砂熱学が担う役割は大きい。熱のカスケード利用、コージェネレーション利用、未利用熱利用、廃熱利用などによるサーマルマネジメント技術や、当社が得意とするシステム設計技術、施工技術などを通して、社会に貢献してゆく。今後も吸着式冷凍機・ヒートポンプの開発・商品化の状況や新規の高効率・高性能な吸着材の研究開発に継続して注目したい。

文 献

- 1) 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」：<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>
- 2) 矢部彰ほか、「ハンドブック 次世代技術と熱」, 日本機械学会, 技報堂出版(1993).
- 3) 柏木孝夫, 「コージェネ革命」, 日経BPコンサルティング, 日経BPマーケティング(2015).
- 4) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター, 産業分野の排熱実態調査報告書, (accessed Apr. 30th 2020), <https://thermatdb.secsite.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf>
- 5) 平野聡: 産業分野の排熱実態調査の紹介, 動力エネルギーシステム部門ニュースレター, 日本機械学会(2020).
- 6) 平野聡: 工場における未利用熱の排出・活用状況, クリーンエネルギー, 日本工業出版(2020).
- 7) 谷野正幸, 増田正夫, 加藤敦史, 川上理亮, 大山孝政, 鎌田美志, 鈴木美穂: エネルギー貯蔵技術の開発, 高砂熱学工業技術研究所報, 30, pp.5-24(2016).
- 8) 谷野正幸, 増田正夫, 加藤敦史, 川上理亮, 大山孝政, 鎌田美志, 鈴木美穂: ヒートポンプ技術の開発, 高砂熱学工業

技術研究所報, 30, pp.25-41(2016).

- 9) 川上理亮, 鈴木美穂, 宮原英隆, 鈴木正哉, 谷野正幸, 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発(第4報) 産業プロセスに対する定置型蓄熱槽の蓄放熱特性の実証試験, 2020年度空気調和衛生工学会大会(2020).
- 10) 鎌田美志, 中田拓司, 松永克也, 名和博之, 山内一正, 松田聡, 谷野正幸, 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発(第5報)トレーラー型蓄熱槽によるオフライン蓄放熱特性の実証試験, 2020年度空気調和衛生工学会大会(2020).
- 11) 「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).
- 12) 「空気調和・衛生設備技術史」, 空調調和・衛生工学会編集, 丸善, pp.10,29(1991).
- 13) 「日本冷凍史」, 日本冷凍空調学会編, 興英文化社, pp.381(1998).
- 14) ガス吸収冷温水機(ナチュラルチラー); <https://eee.tokyo-gas.co.jp/product/naturalchiller/index.html>
- 15) 秋澤淳: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第1回: 熱駆動サイクル(総論), 冷凍, 92, 1074, pp.294-299(2017).
- 16) 児玉昭雄: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第2回: 吸着の基礎とエネルギープロセスへの応用, 冷凍, 92, 1075, pp.384-388(2017).
- 17) 宮崎隆彦: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第3回: デューリング線図とサイクル設計, 冷凍, 92, 1076, pp.433-436(2017).
- 18) 加藤之貴: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第4回: 化学反応を用いた熱エネルギー貯蔵の基礎と応用, 冷凍, 92, 1077, pp.519-523(2017).
- 19) 山口誠一, 齋藤潔: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第5回: 液体への熱・物質移動-吸収システムにおける吸収溶液と冷媒蒸気を例に-, 冷凍, 92, 1078, pp.578-581(2017).
- 20) 山口誠一, 辻口拓也: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第6回: デシカントシステム-動作原理と基本構成-, 冷凍, 92, 1079, pp.623-627(2017).
- 21) 齋藤潔, 山口誠一: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第7回: 吸収式サイクルの基本動作原理, サイクルの基本構成, 冷凍, 92, 1080, pp.704-708(2017).
- 22) 濱本芳徳: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第8回: 吸着冷凍機/ヒートポンプの動作原理, サイクルの基本構成, 冷凍, 92, 1081, pp.766-772(2017).
- 23) 窪田光宏: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第9回: 化学反応を用いたケミカルヒートポンプの動作原理, 冷凍, 92, 1082, pp.827-831(2017).
- 24) 岡野浩志, 西田良祐, 長野克則, 鈴木正哉: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第10回: デシカントシステム-水蒸気吸着材-, 冷凍, 93, 1083, pp.38-46(2018).
- 25) 武田伸之, 藤居達郎: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第11回: 吸収ヒートポンプと低温駆動サイクルの応用事例, 冷凍, 93, 1084, pp.107-113(2017).
- 26) 小嶋満夫, 伊藤陸弘, 武脇隆彦, 堀部明彦: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第12回: 材料の特性とサイクルの性能(吸着), 冷凍, 93, 1085, pp.160-165(2018).
- 27) 劉醇一, 汲田幹夫: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第13回: 化学蓄熱材材料, 冷凍, 93, 1086, pp.234-240(2018).
- 28) 児玉昭雄, 松本翔馬, 長野克則, 吉本周平, 堀部明彦: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第14回: デシカント空調機・空調ユニット, 冷凍, 93, 1087, pp.314-319(2018).
- 29) 百瀬信仁: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第15回: 吸収式の廃熱利用と応用事例, 冷凍, 93, 1088, pp.368-373(2018).
- 30) 赤平亮, 秋澤淳, 江崎丈裕, 小林敬幸, ビデユット バラン シャハ, 宮崎隆彦: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第16回: 吸着冷凍サイクルの高性能化, 冷凍, 93, 1089, pp.471-478(2018).
- 31) 小倉裕直, 小林敬幸: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第17回: 化学蓄熱・ヒートポンプシステムの高性能化, 冷凍, 93, 1090, pp.543-549(2018).
- 32) 松井伸樹, 長谷川巖, 小松富士夫: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第18回: デシカント空調ユニット・システム・導入事例, 冷凍, 93, 1091, pp.616-623(2018).
- 33) 野副哲司: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第19回: 吸収冷温水機の再生可能エネルギー利用と応用事例(太陽熱), 冷凍, 93, 1092, pp.688-693(2018).
- 34) 前多信之介, 河井秀介, 丸山智弘, 宮崎隆彦, 宮脇仁: 熱駆動サイクルの基礎と応用, 第20回: 自動車における吸着蓄熱技術の紹介, 冷凍, 93, 1093, pp.768-773(2018).

- 35) 畑田直行, 志連陽平, 大塚泰弘:熱駆動サイクルの基礎と応用, 第 21 回:化学蓄熱・ヒートポンプシステムの実用化に向けて, 冷凍, 93, 1094, pp.843-841(2018).
- 36) 篠原正明, 山口雅弘:熱駆動サイクルの基礎と応用, 第 22 回:デシカント空調システムの導入事例, 課題と将来性, 冷凍, 94, 1095, pp.44-50(2019).
- 37) 檜山修:熱駆動サイクルの基礎と応用, 第 23 回:木質ペレット焚吸収冷温水機, 冷凍, 94, 1096, pp.111-115(2019).
- 38) 汲田幹夫, 宮崎隆彦:熱駆動サイクルの基礎と応用, 第 24 回:吸着冷凍機・ヒートポンプの研究動向, 冷凍, 94, 1097, pp.176-181(2019).
- 39) 窪田光宏:熱駆動サイクルの基礎と応用, 第 25 回:化学反応を用いたケミカルヒートポンプの研究動向, 冷凍, 94, 1098, pp.251-255, 2019.
- 40) 高橋惇:我が国の空気調和の父 柳町政之助氏の偉業, 高砂熱学工業技術研究所報, 33, pp.97-105(2019).
- 41) Handbuch Der Kältetechnik, 83-85(1954).
- 42) 「冷凍」, 日本空調冷凍学会, 50 (578), 982(1975).
- 43) 柏木孝夫ほか, 「炎で冷やした半世紀」, 日本冷凍空調学会編(2020).
- 44) 吉田善一, 「酒井佐保の熱学教科書」, 富山房インターナショナル, pp.66(2007).
- 45) 山口尚二, 栢原義孝, 米澤泰夫, 中野博樹, コージェネ排熱駆動型低温出区吸着式冷凍機の開発(その 1), 空気調和衛生工学会大会, 学術講演会論文集 E38(1997).
- 46) 窪川清一, 新吸着剤 AQSOA(アクソア)を適用した製品開発, Adsorption News Vol. 25 No. 4 (2011).
- 47) 経済産業省製造産業局化学課, 三菱化学(株)他, 新規高性能吸着材の開発 評価資料, 第一回省エネルギー型化学技術創成研究開発等評価検討会 資料 12(2009).
- 48) Tetens, O., Über einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys., 6, pp.297-309 (1930).
- 49) 三菱ケミカルホールディングスホームページ等参照, <https://www.mitsubishichem-hd.co.jp/innovation/achievement/>
- 50) 前川製作所ホームページ, 2012 年ニュースリリース等参照, <http://www.mayekawa.co.jp/ja/news/2012/0418.html>
- 51) InvenSor 社ホームページ等参照, <https://invensor.com/en/products/>
- 52) 国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合機構 (NEDO) ホームページ等参照, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100735.html
- 53) 井上哲, 三枝弘, 吸着式冷凍機の小型化の研究, デンソーテクニカルレビュー vol.8, No.1, pp.14-19(2003).
- 54) 宮崎 隆彦, 講座 熱駆動サイクル技術の基礎と応用 第 3 回:デューリング線図とサイクル設計, 冷凍 2017 年 6 月号第 92 巻第 1076 号, pp.33-36(2017).
- 55) 井上 誠司, 井上 哲, 小林 敬幸, 自動車用吸着式冷凍機の小型吸着器仕様に関する研究, デンソーテクニカルレビュー Vol.11 No.1, pp.121-129(2006)
- 56) 小松 富士夫, 吸着冷凍機による低温排熱の利用, 日本食品工学会誌, vol. 15, No.3, pp.195-198(2014).
- 57) 江崎 丈裕, 水蒸気吸着・水和反応を用いる冷凍サイクルの高度化に関する研究(博士論文), 名古屋大学学術機関リポジトリ(2016).
- 58) 安曾 徳康, 吉田 宏章, 真鍋 敏夫, 近藤 正雄, IT 機器廃熱を利用した冷却技術, FUJITSU. 62, 5, pp.617-621(2011).
- 59) 江崎丈裕, 小林 敬幸, 低温廃熱で駆動する二段吸着式冷凍機の出力特性に関する研究, Journal of Japan Society of Energy and Resources, vol. 37, No. 1, pp.43-50(2015).
- 60) 垣内 博行, 下岡 里美, 岩出 美紀, 大島 一典, 山崎 正典, 寺田 秀, 渡辺 展, 武脇 隆彦, 水蒸気吸着材 FAM-Z02 の基礎特性評価および吸着ヒートポンプへの適応性検討, 化学工学論文集, 第 31 巻, 第 4 号, pp.273-277(2005).
- 61) 垣内 博行, 下岡 里美, 岩出 美紀, 大島 一典, 山崎 正典, 寺田 秀, 渡辺 展, 武脇 隆彦, 新規水蒸気吸着材 FAM-Z01 の基礎特性評価および吸着ヒートポンプへの適応性検討, 化学工学論文集, 第 31 巻, 第 5 号, pp.361-364(2005).
- 62) 下岡 里美, 大島 一典, 武脇 隆彦, 垣内 博行, 吸着ヒートポンプ用機能性吸着材の開発, 伝熱 vol.45, No. 190, pp.8-13(2006).
- 63) 汲田 幹夫, 吸着式冷凍機用吸着材料の高密度化, 伝熱 vol. 45, No. 192, pp.20-25(2006).

- 64) 松縄 堅, 加藤 信介, 湯澤 秀樹, 近藤 武士, 杉原 義文, 林立也, 森川 泰成, 関根 賢太郎, 河野 仁志, 岩本 静男, 小金井 真, 樋山 恭介:業務用ビルを対象とする液冷空調システムの開発(第1報)液冷システムの導入の必要性, および開発課題, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, G-27, pp.17-20(2013).
- 65) 国立研究開発法人新エネルギー産業技術総合機構(NEDO)ホームページ等参照, <https://www.nedo.go.jp/content/100890920.pdf>
- 66) 亀山秀雄:骨太のエネルギーロードマップ, 化学工学社(2005).
- 67) 加藤之貴, 安永裕幸, 柏木孝夫:骨太のエネルギーロードマップ 2, 化学工学社(2010).
- 68) 宮崎 隆彦, 小山 繁:吸着技術を利用した冷凍・空調システムの研究・活用動向, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 50-4, pp.80-85(2015).
- 69) E. Boelman, B. Saha, 田中 愛治, 柏木 孝夫, シリカゲル・水系の吸着冷凍サイクルにおける駆動熱源低温化の可能性について(従来単段型及びアドバンス3段型の検討を中心に), 日本冷凍空調学会論文集, 11-3, pp.357-369(1994).
- 70) Tokarev, M., : International Journal of Thermal Science, 41, pp.470-474(2002).
- 71) K. C. Ng, A. Chakraborty, N. M. Oo, M. A. Othman, Adsorption Characteristics of Silica Gel + Water Systems, Journal Chemical Engineering Data, 47-5, pp.1177-1181(2002).
- 72) 遠藤 明, 小森 晃, 稲木 由紀, 藤崎 里子, 山本 拓司, 大森 隆夫, 中岩 勝, 低温再生型吸着剤としてのメソポーラスシリカの合成と水蒸気吸着特性, 日本冷凍空調学会論文集, 21-4, pp.329-335(2004).
- 73) 市橋 利夫, 中野 義夫, 感温性を有するメソポーラスシリカゲル/高分子ゲルの水蒸気吸脱着特性, 化学工学論文集, 第34巻, 第4号, pp.471-476(2008).
- 74) Y. I. Aristov, M. M. Tokarev, G. Cacciola, G. Restuccia, Selevtive water sorbents for multiple applications, 1. CaCl₂ confined in mesopores of silica gel: Sorption properties, Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 59-2, pp.325-333(1996).
- 75) Y. I. Aristov, M. M. Tokarev, G. Cacciola, G. Restuccia, Selevtive water sorbents for multiple applications, 2. CaCl₂ confined in micropores of silica gel: Sorption properties, Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 59-2, pp.335-342(1996).
- 76) 垣内 博行, 下岡 里美, 岩出 美紀, 大島 一典, 山崎 正典, 寺田 秀, 渡辺 展, 武脇 隆彦, 新規水蒸気吸着材 FAM-Z01 の基礎特性評価および吸着ヒートポンプへの適応性検討, 化学工学論文集, 31-5, pp.361-364(2005).
- 77) 垣内 博行, 下岡 里美, 岩出 美紀, 大島 一典, 山崎 正典, 寺田 秀, 渡辺 展, 武脇 隆彦, 水蒸気吸着材 FAM-Z02 の基礎特性評価および吸着ヒートポンプへの適応性検討, 化学工学論文集, 31-4, pp.273-277(2005).
- 78) L. Bonaccorsi, L. Clabresse, D. Di Pietro, E. Proverbio, A. Freni, G. Restuccia, Development of new hybrid materials based on zeolite SAPO and carbon supports for adsorption heat pump applications, Proceedings of International Sorption Heat Pump Conference 2011, pp.477-486(2011).
- 79) 小林 潤, 藤田 拓也, 杉山 征輝, 福田 宣弘, 小林 敬幸, 渡辺 藤雄, 架谷 昌信, 低KOH賦活法による吸着ヒートポンプ用活性炭の製造, 化学工学論文集, 29-4, pp.562-564(2003).
- 80) 下岡 里美, 山崎 一典, 武脇 隆彦, 赤繁 悦史, 池畑 登美代, 垣内 博行, 渡辺 藤雄, 窪田 光宏, 松田 仁樹, 高性能吸着ヒートポンプのための親水性活性炭の開発, 化学工学論文集, 32-6, pp.528-534(2006).
- 81) E. Yamamoto, J. Kobayashi, K. Kanamaru, T. Miura, F. Watanabe, N. Kobayashi, M. Hasatani, Hydrophilication of Activated Carbon by Impregnating Silica into Pores, Journal of Chemical Engineering of Japan, 36-3, pp.348-352(2003).
- 82) 渡辺 藤雄, 杉浦 敏史, 架谷 昌信, 構造状活性炭/水蒸気系吸着ヒートポンプの作動範囲, 化学工学論文集, 15-1, pp.38-43(1989).
- 83) 渡辺 藤雄, 小塚 淳, 汲田 幹夫, 架谷 昌信, シリカゲル・活性炭/水蒸気・エタノール系の吸着平衡および各吸着系のヒートポンプへの適用性の検討, 化学工学論文集, 19-6, pp.1165-1170(1993).
- 84) R. E. Critoph, Evaluation of Alternative Refrigerant- Adsorbent Pairs for Refrigeration Cycles, Applied Thermal Engineering, 16-11, pp.891-900(1996).
- 85) Y. Zhong, R. E. Critoph, R. Thorpe, Evaluation of the performance of solid sorption refrigeration systems using carbon dioxide as refrigerant, Applied Thermal Engineering, 26-16, pp.1807-1811(2006).
- 86) Z. Tamainot-Telto, S. J. Metcalf, R. E. Critoph, Y. Zhong, R. Thorpe, Carbon-ammonia for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping, International Journal of Refrigeration, 32-6,

- pp.1212-1229(2009).
- 87) Y. Hamamoto, K. C. A. Alam, B. B. Saha, S. Koyama, A. Akisawa, T. Kashiwagi, Study on adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon fibers. Part 1. Adsorption characteristics, *International Journal of Refrigeration*, 29-2, pp.305-314(2006).
 - 88) Y. Hamamoto, K. C. A. Alam, B. B. Saha, S. Koyama, A. Akisawa, T. Kashiwagi, Study on adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon fibers. Part 2. Cycle performance evaluation, *International Journal of Refrigeration*, 29-2, pp.315-327(2006).
 - 89) S. K. Henninger, M. Schick Tanz, P. P. C. Hügenell, H. Sievers, H.-M. Henning, Evaluation of methanol adsorption on activated carbons for thermally driven chillers part I: Thermophysical characteristics, *International Journal of Refrigeration*, 35-3, pp.543-553(2012).
 - 90) I. I. El-Sharkawy, K. Kuwahara, B. B. Saha, S. Koyama, K. C. Ng, Experimental investigation of activated carbon fibers/ethanol pairs for adsorption cooling system application, *Applied Thermal Engineering*, 26-8-9, pp.859-865(2006).
 - 91) I. I. El-Sharkawy, M. Hassan, B. B. Saha, S. Koyama, M. M. Nasr, Study on adsorption of methanol onto carbon based adsorbents, *International Journal of Refrigeration*, 32-7, pp.1579-1586(2009).
 - 92) S. K. Henninger, F. Jeremias, J. Ehrenmann, C. Janiak, The potential of PCPs/MOFs for the use in adsorption heat pump processes, *Proceedings of International Sorption Heat Pump Conference 2011*, pp.415-424(2011).
 - 93) J. Ehrenmann, S. K. Henninger, C. Janiak, Water Adsorption Characteristics of MIL-101 for Heat-Transformation Applications of MOFs, *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2011-4, pp.471-474(2011).
 - 94) S. K. Henninger, F. Jeremias, H. Kummer, C. Janiak, MOFs for Use in Adsorption Heat Pump Processes, *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2012-16, pp.2625-2634(2012).
 - 95) G. Akiyama, R. Matsuda, S. Kitagawa, Highly Porous and Stable Coordination Polymers as Water Sorption Materials, *Chemical Letters*, 39-4, pp.360-361(2011).
 - 96) Bonaccorsi, H., *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 40-13, pp.1307-1312(2007).
 - 97) 本間 寛己, 荒木 信幸, GHP 排熱を駆動熱源とするシリカゲル-水吸着サイクルによる冷房強化-吸着器モデルにおける熱および物質移動特性の最適化-1, *日本冷凍空調学会論文集*, 20-2, pp.143-154(2003).
 - 98) 本間 寛己, 増田 鎮, 荒木 信幸, バインダで粒子を固定したシリカゲル-水吸着冷凍サイクル用フィンチューブ型充填層におけるフィン高さの最適化, *空気調和・衛生工学会論文集*, 145, pp.21-28(2009).
 - 99) 渡辺 藤雄, 窪田 光宏, 吸着ヒートポンプの吸着器内熱・物質移動現象, *伝熱*, 45-190, pp.27-32(2006).
 - 100) M. Kubota, T. Ueda, R. Fujisawa, J. Kobayashi, F. Watanabe, N. Kobayashi, M. Hasatani, Cooling output performance of a prototype adsorption heat pump with fin-type silica gel tube module, *Applied Thermal Engineering*, 28-2-3, pp.87-93(2008).
 - 101) 廣田 靖樹, 小林 敬幸, 渡辺 藤雄, 架谷 昌信, 宇田 敏, 稲岡 宏弥, 高圧型 NH₃/AC 系吸着式冷凍機に適用する吸着器の開発, *エネルギー・資源学会論文誌*, 29-3, pp.35-41(2008).
 - 102) M. Kanamori, M. Hiramatsu, K. Katsurayama, F. Watanabe, H. Matsuda, M. Hasatani, Production of cold heat energy by alcohol/activated carbon adsorption heat pump with a disk-module-type adsorber, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 30-3, pp.434-439(1997).
 - 103) 金森 道人, 葛山 弘一, 渡辺 藤雄, 松田 仁樹, 架谷 昌信, 辻本 聡一郎, 栢原 義孝, 平板状スーパー活性炭/伝熱板一体型吸着器で構成されるエタノール系吸着ヒートポンプの冷熱生成特性, *化学工学論文集*, 24-1, pp.131-133(1998).
 - 104) 井上 誠司, 井上 哲, 小林 則幸, 自動車用吸着式冷凍機の小型吸着器仕様に関する研究, *日本器械学会論文集(B編)*, 72-716, pp.127-134(2006).
 - 105) 間宮 尚, 二階 勲, プレート型吸着式ヒートポンプの伝熱解析 (吸着反応器における伝熱実験), *日本機械学会論文集(B編)*, 59-564, pp.176-181(1993).
 - 106) 間宮 尚, 二階 勲, プレート型吸着式ヒートポンプの性能解析 (吸・脱着反応器の熱設計), *日本機械学会論文集(B編)*, 59-565, pp.96-101(1993).
 - 107) 仮屋 圭史, 桑原 憲, 小山 繁, フィンチューブ型吸着器内の吸着特性に関する数値解析 -活性炭素繊維/エタノール

- 系の場合-, 日本冷凍空調学会論文集, 24-4, pp.485-494(2007).
- 108) 仮屋 圭史, 桑原 憲, 小山 繁, ACF/C₂H₅OH 系フィンチューブ式吸着器の最適設計に関する研究, 日本冷凍空調学会論文集, 26-3, 283-294(2009).
- 109) R. E. Critoph, S. J. Metcalf, Specific cooling power intensification limits in ammonia-carbon adsorption refrigeration systems, Applied Thermal Engineering, 24-5-6, pp.661-678(2004).
- 110) H. T. Chua, K. C. Ng, W. Wang, C. Yap, X. L. Wang, Transient modeling of a two-bed silica gel-water adsorption chiller, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47-4, pp.659-669(2004).
- 111) S. D. Waszkiewicz, M. J. Tierney, H. Saidani Scott, Development of coated, annular fins for adsorption chillers, Applied Thermal Engineering, 29-11-12, pp.2222-2227(2009).
- 112) W.-S. Chang, C.-C. Wang, C.-C. Shieh, Experimental study of a solid adsorption cooling system using flat-tube heat exchangers as adsorption bed, Applied Thermal Engineering, 27-13, pp.2195-2199(2007).
- 113) A. Freni, L. Bonaccorsi, E. Proverbio, G. Maggio, G. Restuccia, Zeolite synthesised on copper foam for adsorption chillers: A mathematical model, Microporous and Mesoporous Materials, 120-3, pp.402-409(2009).
- 114) 森 英夫, 濱本 芳徳, 吉田 駿, 吸着剤充てん層の有効熱伝導率, 日本冷凍空調学会論文集, 17-2, pp.171-182(2000).
- 115) 弘中 完典, 小金井 真, 樋山 恭介, 山下 哲生, 湯澤 秀樹, 杉原 義文, 近藤 武士, 加藤 信介:低温再生型吸着材を用いた吸着式冷凍機の開発 第 1 報 試作機による基本性能の把握及び吸着材熱交換器増設の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, 223, pp.45-53(2015).
- 116) 弘中 完典, 小金井 真, 樋山 恭介, 山下 哲生, 湯澤 秀樹, 杉原 義文, 近藤 武士, 加藤 信介:低温再生型吸着材を用いた吸着式冷凍機の開発 第 2 報 試作機による基本性能の把握及び吸着材熱交換器増設の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, 223, pp.45-53(2015).
- 117) 樋山 恭介, 山下 哲生, 弘中 完典, 小金井 真, 湯澤 秀樹, 杉原 義文, 近藤 武士, 加藤 信介:低温再生型吸着材を用いた吸着式冷凍機の開発 第 3 報 冷却水流路の逆流による吸脱着速度の調整と機器性能の効率化の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, 230, pp.21-25(2016).
- 118) 松田 祐貴, 小金井 真, 山下 哲生, 樋山 恭介, 近藤 武士, 加藤 信介:低温再生型吸着材を用いた吸着式冷凍機の開発 第 3 報 冷却水バイパス流路による冷水出口温度一定化の検討, 空気調和・衛生工学会論文集, 262, pp.15-21(2019).
- 119) 窪川 清一:低温水利用 AQSOA 吸着式冷凍機, 日本機械学会会誌, 113-1094, pp.56(2010).
- 120) 湯澤 秀樹, 杉原 義文, 近藤 武士, 林 立也, 関根 賢太郎, 河野 仁志, 松縄 堅, 加藤 信介:業務用ビルを対象とする液冷空調システムの開発(第 2 報)モデル建物とモデル空調システムの検討, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, G-28, pp.21-24(2013).
- 121) 弘中 完典, 小金井 真, 樋山 恭介, 山下 哲生, 湯澤 秀樹, 杉原 義文, 近藤 武士, 松縄 堅, 加藤 信介:業務用ビルを対象とする液冷空調システムの開発(第 19 報)回収熱利用吸着機の開発, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, I-65, pp.153-156(2014).

ABSTRACT

Toward carbon neutrality in 2050, decarbonization will be required in the industrial field, and then the thermal management through utilizations of heat cascade, cogeneration, unused heat, waste heat, exhaust heat, etc. will become more important. In order to utilize unused heat and waste heat in the industrial field for air conditioning systems in the consumer sector, we consider that the development of heat-driven refrigerators will be a key technology. This report gave an overview of absorption chillers and adsorption chillers as the history of heat-driven refrigerators. We also explained the development and commercialization of adsorption refrigerators. In addition, we stated recent research and development contents at institutes such as universities and companies. In the future, it is expected that the unused and waste heat-driven adsorption refrigerators will spread widely along with the improvements in performance, efficiency, and cost reduction.

【レビュー】

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-

加藤 敦史・森田 健*¹

Challenge for Creation of Frontier Business - Action for Space Business -

Atsushi Kato・Ken Morita

我々はフロンティアビジネス創出活動の一環として、宇宙事業開発に取り組んでいる。近年、月に水資源がある可能性が示されたりことから、月面探査・開発は世界的に注目を集めており世界各国で熾烈な開発競争が進められている。我々は既に保持している技術を月面開発に高度に適用する開発を進めており、特に水の電気分解装置に関しては、月面用に開発した装置を実際に月着陸船に搭載して月面で水素と酸素の製造を実証する計画である。この計画を皮切りに宇宙産業に進出し、事業創出機会を獲得することを目指している。

1. はじめに

国内の建設投資額は今後徐々に減少することが予想されており、そのような外部環境の中で当社がさらなる成長を遂げるには、空調設備業だけではなく、事業分野を拡大していくことが不可欠である。今年度発表された当社中期経営計画“iNnovate on 2023 go beyond!”では、その基本方針として「総合設備業への確実な進化」、「第2第3の柱となる事業を構築」、「エンゲージメントの更なる向上」の3つが謳われている。この中の「第2第3の柱となる事業を構築」の方策として、フロンティアビジネスの育成による新たな収益源を構築することが謳われている。これを実行するために設立されたのが経営企画本部経営企画部フロンティアビジネス開発室である。長期経営構想の第3ステップで掲げる「夢の実現と更なるステップ」の実現を目指して、社是や経営理念に表されている“高砂のDNA”を呼び起こし、長期的な企業価値向上を追求すると共に、将来の成長市場の獲得を目標に2020年度に設立された。

本報では、フロンティアビジネス開発室の活動の1つであり、研究開発本部技術研究所と共同で取り組んでいる「月面での水電気分解ミッション」の概要と、宇宙事業開発を取り巻く世の中の状況について紹介する。

2. 宇宙事業開発の現状

表1に世界的な宇宙産業のセグメントを示す。表中の番号は、市場が広がるセグメントの順番を示している。現在はロケット打上産業や衛星製造・衛星サービスなどが主流であるが、今後は軌道上サービス（衛星が衛星に対して行うサービス）や、深宇宙（地球の大気圏より外側の宇宙空間。例えば月や火星など）探査・開発、宇宙旅行やホテルなどの個人向けサービスなどに広がっていき、2030年以降に市場が急拡大することが予想されている（図1参照）。近年、深宇宙探査・開発の中でも再び注目を集めているのが“月”である。以降でその具体的な内容を紹介する。

*1 本社 経営企画部

表 1 宇宙産業のセグメント²⁾

深宇宙 (月・火星・小惑星)	⑥ 深宇宙探査・開発		⑤ 個人向けサービス (宇宙旅行・ホテルなど)
地球近傍 宇宙	② 衛生インフラの構築 (宇宙・地上)	④ 軌道上サービス (微小重量実験など)	
地上から 宇宙へ	① 宇宙へのアクセス (ロケット・宇宙機の開発・製造・打ち上げ)		
地上	③ 衛星および衛星データ利活用 (イネーブラーとしての宇宙技術)		



図 1 宇宙産業の全世界市場規模³⁾

2.1 月探査プログラム

これまでに実施された月探査プログラムの代表例にアポロ計画がある。これは米国航空宇宙局 (NASA) による人類初の月への有人飛行計画であり、1961 年から 1972 年にかけて実施された。アポロ計画では「月には水の痕跡がない」ということでほぼ結論付けられ、それ以降月探査は実施されてこなかった。しかし、10 年程前から再調査が始まり、月に水などの資源が存在する可能性が示された。¹⁾

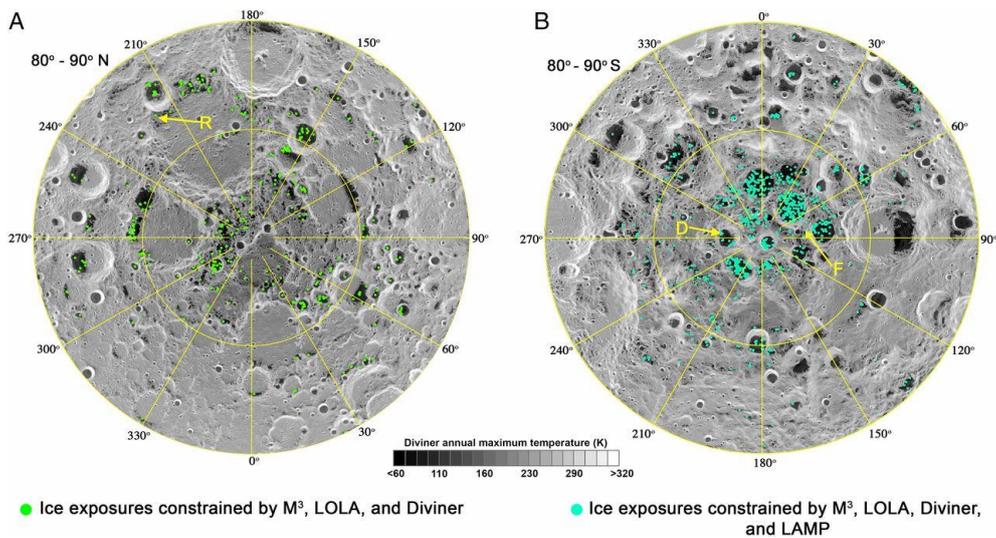


図 2 月の北極(左)と南極(右)の水氷の分布¹⁾

月において“水”は大変貴重な資源である。水は生活用水に利用できるだけでなく、電気分解により水素と酸素に分解すれば水素は燃料として利用でき、酸素は人の呼吸用及び燃料の支燃剤として利用できる。月面で水資源を獲得できれば、人類が長期間月面で活動できるようになるだけでなく、月面から他の惑星、例えば太陽系の中で自然環境が最も似ており、人類が移住できる可能性が最も高いとされる火星に行くための燃料を調達できるようになる。月に水が存在する可能性が示されたことで、その資源を活用して人類の活動領域を深宇宙へ拡大しようとする構想が世界各国で次々と打ち出され始めた。具体的には、月に人類が長期滞在できる住環境を構築する構想や、他の惑星に行く際の中継基地として月を活用する構想などである。その中の代表的なプログラムが、現在米国が主導しているアルテミス計画（図3）である。以下に計画の概要を示す⁴⁾。

- ・月周回有人拠点（Gateway）を経由した有人月面探査を2段階で進める
 - 第1段階：2024年までの月南極への有人着陸を実現し、水資源を探索する
 - 第2段階：2028年までに持続可能な月面探査を実現する
- ・数ヶ月以上、月で持続的に活動できる能力を実証し、2030年代の有人火星着陸を実現するための能力を養う
- ・アポロ計画とは異なり、国際パートナーや産業界とも協力する

本計画には日本やカナダなど、多くの国が参画をしているが、これに参画しない国々でも独自に月面探査計画を立ち上げており、国レベルでの熾烈な開発競争が進められている。

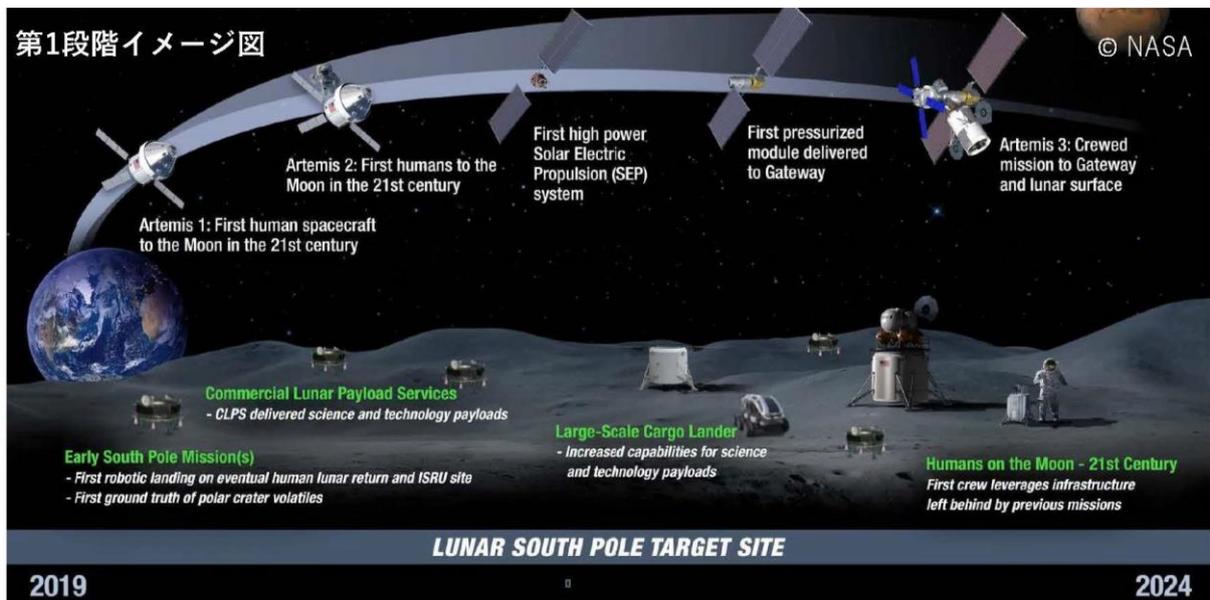


図3 アルテミス計画(第1段階)⁵⁾

2.2 商業的月利用に向けた国内企業の活動

上記の流れを受け、民間主導の商業的な月利用構想が世界各国で打ち出されている。国内においても複数の研究会などが活動を進めており、従来から宇宙産業に携わってきた企業や機関だけでなく、これまで宇宙産業とは無関係の民間企業が多数参加しているのが注目すべき点である。代表的な活動とその概要を以下に示す。

① 有人と圧ローバが拓く月面社会勉強会⁶⁾

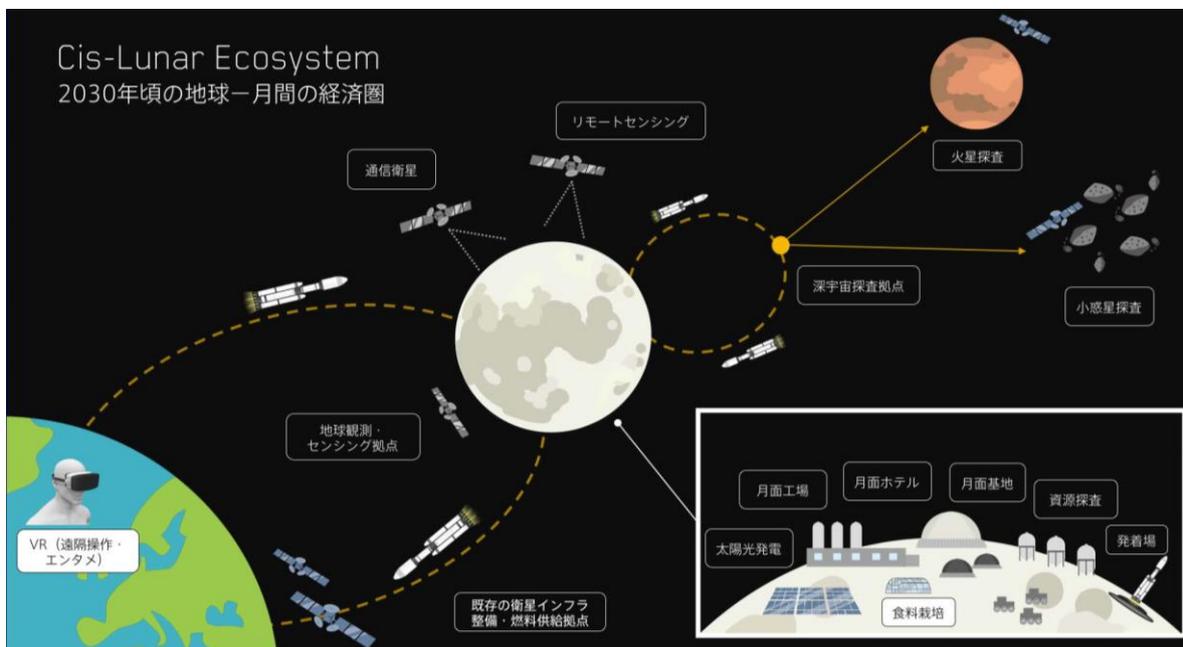
- ・設立：2019年
- ・目的：有人と圧ローバ（図4）を議論の出発点として、将来の月面社会のビジョンについて、様々な業種間で横断的に意見交換を行い、持続的な月面活動の実現に向けた検討を促進すること
- ・幹事法人：宇宙航空研究開発機構（JAXA）、トヨタ自動車（株）、三菱重工業（株）
- ・参加企業：日本国内の民間企業40社程度で構成、当社も2020年から当勉強会に参画



図4 有人圧ローバ“ルナ・クルーザ”のイメージ図⁶⁾

②フロンティアビジネス研究会⁷⁾

- ・設立：2016年
- ・目標：以下の3点
 - 1.月や月近傍の経済圏（図5）の成立可能性と認知度の向上
 - 2.日本発の宇宙資源ビジネスの創出とエコシステムの構築
 - 3.人類の活動圏／経済圏の拡大
- ・幹事企業：(株)三菱総合研究所、(株)ispace
- ・参加企業：日本国内の民間企業30社程度で構成、当社も2019年から当研究会に参画



Copyright (C) Mitsubishi Research Institute, Inc.

8

出所) フロンティアビジネス研究会

図5 月・月近傍の経済圏イメージ⁷⁾

3. 当社の取組み

将来の成長市場を探索する中で、その候補の1つとして宇宙産業が挙げられた。そこで、宇宙産業とは無縁である当社に何ができ得るのかのヒアリングを行うことから活動を開始した。情報収集のために前述のフロンティアビジネス研究会に参加している。宇宙飛行士を始め複数の宇宙関係者や、宇宙業界で事業展開している企業などへのヒアリングを実施した。その結果、熱を利用する場面や、水から水素と酸素を製造する場面で当社の技術が活かせる可能性があるため、それを具体化させるための取組みを開始した。

3.1 当社の構想

図6に月面のエコシステムのイメージを示す。2章で述べた通り、月面での水資源の確保は最も重要なミッションである。月の南極付近のクレーターには太陽光が当たらない場所があり、その砂の中に氷がまざっているとされている。この氷を、当社の蓄熱・伝熱技術を応用して、太陽熱等を活用して水を採取するのが図中の「月面水採取システム」である。また、採取した水を太陽光エネルギー由来の電力を使って電気分解し、水素と酸素を製造するのが「水電解装置」である。どちらの技術も月面エコシステムでは不可欠な技術であり、当社はその技術のサプライヤーになることを目指している。他の部分は様々な企業と連携して、月面エコシステムを構築する計画である。

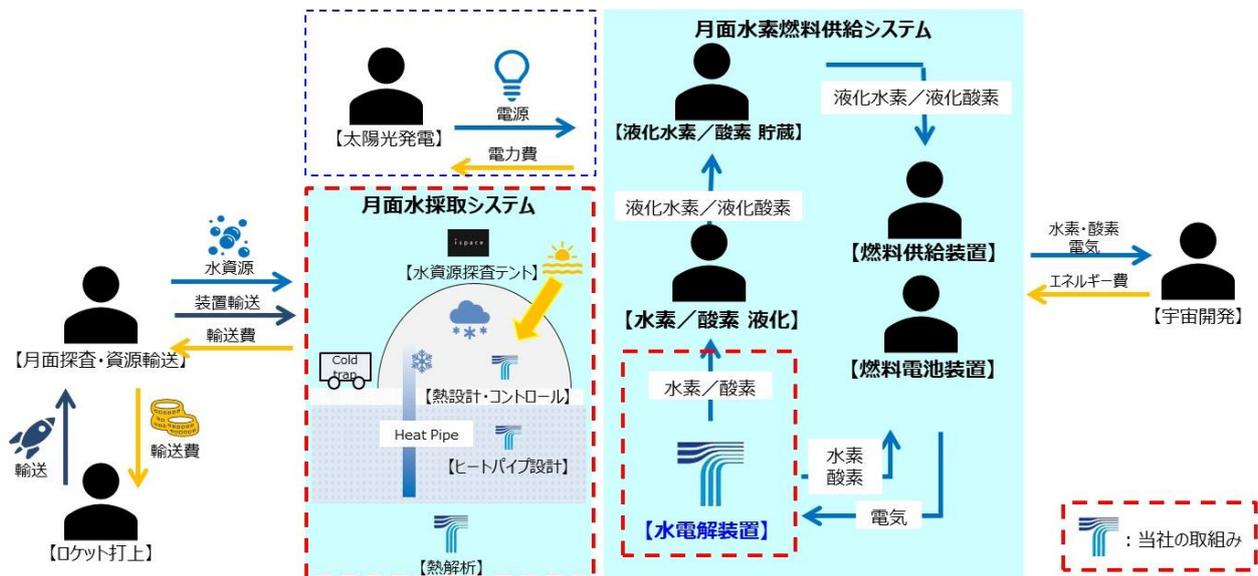


図6 月面エコシステム

3.2 宇宙業界の企業との協業

宇宙産業に無縁である当社が宇宙産業に進出するには、業界に精通したパートナーを構築することが不可欠と考えた。そこで当社は、専門家の意見も参考に、業界に精通しており世界的にも知名度があるスタートアップ企業の(株) ispace (アイスペース) を協業先として選定。同社への出資を通じて事業パートナーの関係を構築し、同社が持つコネクションを活用して各国の宇宙開発機関や企業と連携して宇宙事業の事業創出機会を獲得することにした。同社は HAKUTO-R[®] と呼ばれる日本初の民間月面探査プログラムを推進している。独自の月着陸船「ランダー」(図7)と月面探査車「ローバー」を開発して、2022年の月面着陸 (Mission 1) と、2023年の月面探査 (Mission 2) を目指している。

なお、ispace社は自社のランダーに荷物を載せ、その荷主から輸送費用を受け取るという、地球-月輸送サービスを展開する企業である。いわば地球から月面まで荷物を運ぶ“宇宙版の運送屋”である。



図 7 ispace のランダー⁸⁾

3.3 月面での水電気分解ミッション

当社では現在、前述の HAKUTO-R プログラムの Mission2 において、ispace 社のランダーへ当社水電解装置を搭載する計画を検討しており、月面環境下での世界初の水素と酸素の製造を目指している。月で必要とされる技術を世界に先駆けて実証することは当社が宇宙産業に進出するきっかけとなり、事業創出の機会獲得に繋がっていくと考えている。今回のミッションでは ispace 社のランダーに搭載できる程度の極めて水素製造量が少ない小型装置での実証を計画しているが、将来的に必要な水素製造量は、現在当社が地上で展開している製造量（数 Nm³/h）からその 10 倍以上のオーダーになると想定している。

ここで本ミッションは、経営企画本部と研究開発本部が連携して進めており、経営企画本部が事業開発を、研究開発本部が技術開発を担当している。このような連携によるプロジェクトは当社では初の試みであり、今後も本ミッションを進める中で当社初の試みを行うことになると考えている。本ミッションはフロンティアビジネス創出活動の一環であり、従来のやり方にとらわれずに進めることも本ミッションが担うべき活動の 1 つである。

4. 要素技術の取組み状況

当社が宇宙産業に進出するにあたって注力する技術分野は、3 章で述べた通り月面での水採取に係わる部分、水の電気分解に係わる部分である。これに加えて、将来的に月面に住空間が建設されれば、当社が地上で展開している室内の空気環境制御に係わる部分でも技術の活用が可能と考えている。以下ではそれらの要素技術について現状の取組み状況を説明する。

4.1 水採取の取組み

水の採取方法は世界中から様々な提案がされている。その一例を図 8 に示す。この方法はドーム式と呼ばれており、月面にテント状のカバーを設置し、そのテントの上面に設けた集光レンズで太陽光を集める。集めた太陽光の熱エネルギーを利用して月表面を加熱して地中に存在するとされる氷を水蒸気にする。その水蒸気を吸引・冷却することで水を採取するという方法である。この方法の他にも機械採掘式などの方法が提案されているが、現時点で確立されている技術は無い。そこで我々は、まずどのような方法が現在提案されているかの情報を収集して、それぞれの方法の利点や課題を整理することにした。現在はその結果を受けて、これまでに提案されている以外の独自の方法で水を採取できないかの検討を進めている段階である。

なお、水採取技術の開発で難しいのは、地上では月面環境（超真空、重力 1/6 など）を模擬することが困難なため、水採取方法を提案できたとしても有効な実験実証が困難な点にある。そのため、本取組みに関してはシミュレーションによる検討を主体に進めている。

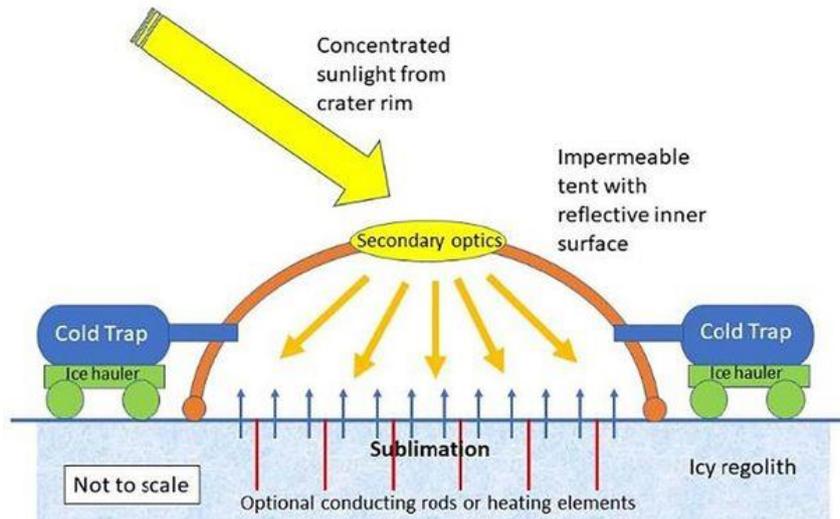


図 8 水採取方法の一例 サーマルマイニング⁹⁾

4.2 水電解装置の取組み

水電解装置は本年度から市販を開始しており、地球上では完成した技術である。現在、これまでに培ってきた技術をベースに月面環境での稼働が可能で、かつ ispace 社のランダーに搭載できるサイズの装置開発を進めている。

月面向け装置を開発する上で考慮する必要があるのが、地球上で使用する場合と月面で使用する場合とでの使用環境の違いである。地球上とは異なる月面の環境として、真空環境、1/6 重力環境、放射線環境などが挙げられる。また、装置はロケットで打ち上げられることから、ロケット打ち上げの際の振動や衝撃環境も考慮する必要がある。さらに、装置の運用面においても、装置に問題が発生したとしても地球上で使用する装置と異なり現物を見ることが出来ないこと、また、装置の問題発生箇所がわかったとしても修理には行けないことなどが挙げられる。よって月面向け装置においては、機器の選定から設計、製作のあらゆるプロセスにおいて、発生しうるあらゆるトラブルを事前に想像し、不安要素や不確定要素を完全に排除する必要がある。さらに、1つ1つの機器や部品に対しては、それを構成する全ての構成部材に対して宇宙適合性を調査し各種評価（アウトガス試験、真空環境試験、熱環境試験、振動・衝撃試験など）をする必要がある。その点が地球向け装置との大きな違いと言える。よって、地上で完成した技術といっても、それを月面環境で稼働できる装置に仕上げるには極めて高いハードルがあり、現在それを1つ1つ検討し、装置設計を進めている段階である。

4.3 住空間関連の取組み

国際宇宙ステーションなどの閉鎖空間では、既に長期間に渡り人が滞在して生活を送っていることから、人が暮らすための環境を構築すること自体は既に完成した技術がある。しかし、調査を進めると解決が求められている課題が複数あることがわかってきた。現在、どの課題に取組むことがこの分野に進出する上で有効であるか、また、当社として取組める課題は何かを調査している段階である。

5. おわりに

本報では、フロンティアビジネス創出活動の1つである宇宙事業開発に関する現在の取組みについて紹介した。当社の

フロンティアビジネス創出活動にふさわしいテーマとして、「当社の社是・経営理念を体現するテーマ」、「10～20年後を見据えた長期的な視点でのテーマ」、「当社にとって新規市場や未知の領域の開拓に挑むテーマ」と謳われている。宇宙事業開発はこれらの要件に合致するテーマである。将来にわたる当社事業の発展に対して本取組みが寄与できるよう、今後も経営企画本部と研究開発本部が一体となってビジネス開発と技術開発を進めて行く。

文 献

- 1) Shuai Li et al.: Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, PNAS September 4, 2018 115 (36) 8907-8912
- 2) New Space 革命の全貌 宇宙ビジネス入門, 日経 BP 社
- 3) ULA Innovation Cis-Lunar -1000
- 4) 文部科学省科, 国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会参考資料, 2020.8.27.
- 5) NASA HP
- 6) JAXA HP, <https://iss.jaxa.jp/future/lunar/index.html>.
- 7) フロンティアビジネス研究会, フロンティアビジネス研究会の活動とビジョン, 2018,11,1.
- 8) HAKUTO-R HP, <https://ispace-inc.com/hakuto-r/jpn/about/>.
- 9) ScienceDirect “Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production”

ABSTRACT

We have been engaging in space business development as part of our frontier business creation. Recently, the possible presence of lunar water resources was indicated. Therefore lunar exploration and development have attracted worldwide attention and fierce development competition is underway in various countries around the world. In our company, even before it, we have been honing certain and unique technologies that are vital for lunar development. Especially as for water-electrolyzer, we plan to demonstrate to generate hydrogen and oxygen on the moon by mounting on the lunar lander. Starting with this plan, we aim to enter and create businesses in the space industry.

水素概論

石塚朋弘・加藤敦史

Introduction to Hydrogen

Tomohiro Ishizuka・Atsushi Kato

水素は様々な特異な性質を持つ、原子番号1番の最も軽い“金属”である。近年、この活用について注目が集まっており、特にエネルギー部門では、「環境負荷低減」、「エネルギーセキュリティ対応」の観点から、多くを中東に依存する化石燃料の代替として利用する取り組みが進められている。

本稿では、水素の特徴、我が国におけるエネルギー分野での水素利活用方針、技術開発の状況等について整理する。

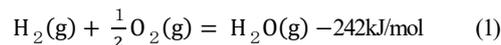
1. 水素の概要

1.1 水素とは

水素は原子番号1番の最も軽い元素であり、基本的に1個の陽子と1個の水素から構成されており、宇宙全体における原子構成において質量で全体の70%を占めている。地球表面では、質量でケイ素、酸素について3番目であり、約9%を占めている。しかしそのほとんどが海水の状態で存在するため、大気中における水素分子濃度はわずか1ppm以下である。

1.2 水素の燃料としての性質

水素は燃焼すると酸素と反応して以下のように発熱しながら水（水蒸気）を生成する。



近年、物質が持つ総エネルギー量である「エンタルピー」に対して、実際に使うことができるエネルギー量（仕事として取り出すことが可能なエネルギー量）として「エクセルギー¹⁾」という概念が生まれている。仮にエンタルピーが大きい物質があったとしても、エクセルギーが小さければ仕事として取り出すことができるエネルギーが少ないことから、効率的なエネルギー源とは言えない。主な物質、エネルギーのエクセルギー率（エクセルギー/エンタルピー）を表1に示す。

表1の通り、メタン、水素等の燃料はエクセルギー率が高い。一方で熱はエクセルギー率が低い。これは、熱は広く分散して回収

表1 エクセルギー率の比較

物質、エネルギー	エクセルギー率(%)
水素	83
メタン(天然ガス)	92
電気	100
熱	44(600°C)、11(100°C)

が難しくなってしまうためであり、質の低いエネルギーといえる。一方、電気はエクセルギー率 100%であり、どのような使い方もできる万能なエネルギーであるといえることができる。

一般的に、燃料からエクセルギー率 100%である電気を得る方法として、①燃料を燃焼し、②熱を得て蒸気を生成し、③タービンを回すという汽力発電方式が一般的に用いられているが、この方法では大量の熱を発生し、エネルギーを無駄にしている。コージェネレーション等の方法では低温の熱を回収し、温水供給等により総合エネルギー効率を向上させることもある。一方で電力会社等が系統用に用意している石炭火力や LNG 火力等の大規模電源では冷却水である海水を温めているだけであり、ほぼすべての熱は回収できない廃熱となっている。つまり、エネルギーを効率的に利用する（電気を得る）ためには、燃料の燃焼工程を排除する（熱を発生させない）ことが重要であることがわかる。

図 1 に汽力発電（ボイラ-蒸気タービン）に加えて燃料電池発電（ガス化-燃料電池、自己熱再生時）のエンタルピーフローを示した。理論上、汽力発電では一次エネルギーの約 30%しか電気に転換することができない。一方、後者では、燃料電池（この場合は高温で作動する固体酸化物形燃料電池を想定）をガス化炉内に組み込み、燃料電池で発生した 850°C程度の熱を、エクセルギーをロスしないようにそのままの温度でガス化に利用して水素を発生させることができる。その結果、エクセルギーロスを最小限に抑えることで 70%以上の発電効率を達成することが可能となり、効率的に一次エネルギーを二次エネルギーである電気へ転換、利用できることがわかる。

このため、水素は表 1 の通りエクセルギー率だけをみると化石燃料であるメタンより低いですが、燃焼工程を経ないで利用可能であることから、化石燃料と比較して高品質な燃料として活用することができる。

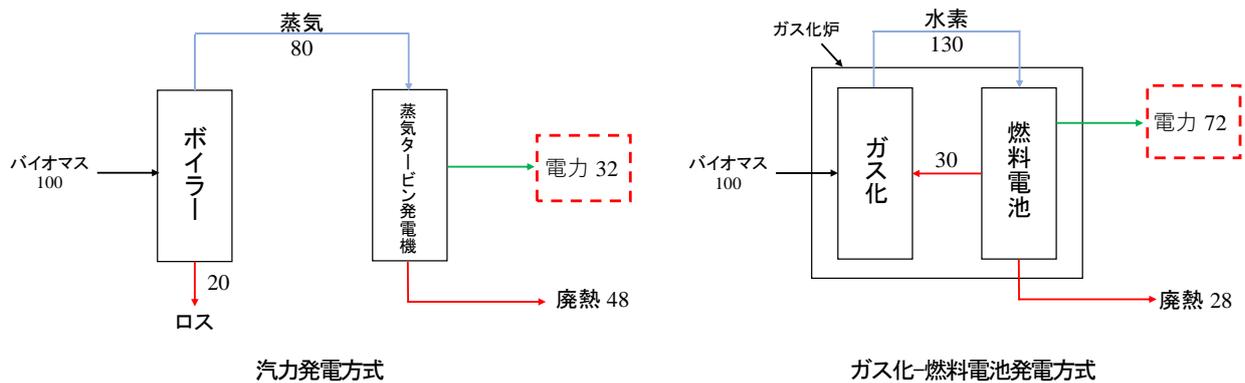
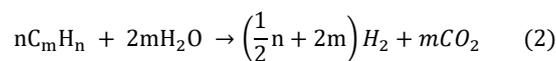


図 1 発電方式による発電効率

1.3 水素の製造方法

水素を得るにはいくつかの方法があり、その主な製造方法を図 2 に示す。現状、水素を得る方法としては、大きく「副生水素」、「目的生産水素（既存設備）」の二つがある。副生水素で最も多く水素を発生するのは、規模的観点から鉄鋼製造過程において発生する副生水素である。ただし、これは水素純度が 50%程度と低く、さらには硫化水素などの不純物を含んでいることから、その精製、高純度化に多大なコストが必要であり、利活用は進んでいない。一方、苛性ソーダ由来の副生水素は、電気分解により製造されていることから、水分以外の不純物がほとんど含まれておらず、除湿するだけで 99.99%以上の高純度水素を製造することが可能であり、広く利用されている。

このほか、必要に応じて新たに水素を製造する方法として、「目的生産水素（新規設備）」による水素供給が考えられ、化石燃料の改質または水電解装置により水素を製造することができる。化石燃料の改質は、主に石油精製企業によって実施されている技術を採用するものであり、(2)式のとおりプロパン等の炭化水素類を、触媒を使用して 800°C程度の温度で水蒸気改質することで水素を得る。



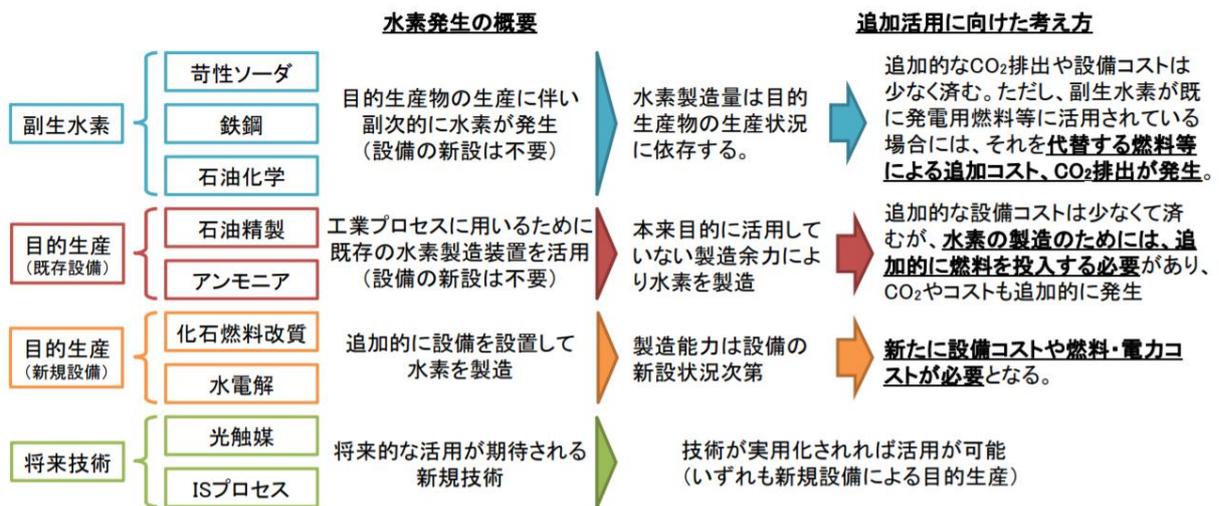


図2 水素製造方法²⁾

水電解装置は水を電気分解することにより水素を得るものであるため、電源として風力発電由来電力等の再生可能エネルギーを使用することでカーボンフリーな水素を得ることが可能である。水電解由来水素は苛性ソーダ由来水素と同様、比較的簡単に高純度水素を得ることが可能であるが、現状は装置コストが高額であることが普及上の課題となっている。

これらの水素製造方法のうち、現在、主な水素利用先である水素ステーション向けに水素を供給しているのは、苛性ソーダ由来副生水素である。理由は、目的生産の場合は必要に応じて水素を製造するために余剰水素がほとんど発生しないこと、また苛性ソーダ以外の副生水素は純度が低いために精製工程が必要になり、水素ステーション向け水素を製造、供給するにはコスト上見合わないことが挙げられる。しかし、苛性ソーダ副生水素に関しても、すでに余剰分の殆どを水素ステーション向けに供給しており、さらなる供給は難しい状況にある。換言すると、現状において水素を大規模、安価に供給できる方法は存在しないことになる。

2. 水素普及に関する我が国の動向

2.1 水素・燃料電池戦略ロードマップ

我が国は2019年3月12日に策定した「水素・燃料電池戦略ロードマップ³⁾」において、図3のとおり水素関連技術の開発、実用化目標を示している。

ここで重要となるのが水素製造価格である。水素を発電に利用する場合、LNG発電との比較が用いられることが多く、大規模水素発電の普及にはLNG発電と同程度の発電単価（17円/kWh）であることが必要であり、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」における水素価格は、この発電単価を目標に設定されている。水素の熱量は天然ガスの約1/4であることから、仮にLNG発電と水素発電の建設コスト、発電効率が同等とした場合、水素価格は天然ガス価格の1/4であることが求められる。

2020年7月現在における天然ガスの輸入価格は約4万円/t（天然ガス通関統計より）であるが、今後、脱炭素化社会構築に向けた化石燃料の使用量低減が進み、例えば炭素税の導入などによる化石燃料使用量抑制に向けた制度設計が進められることが想定される。これを加味し、2030年頃の天然ガス価格が現状より割高になり、10万円/tと推定した場合、水素価格は2.5万円/t（22円/m³）程度、高めに見積もったとしても3.5万円/t（32円/m³）程度の価格であることが必要になる。

これに対し、我が国は2030年頃を目標に水素価格を30円/m³以下に下げることが目標と設定し、具体的な方策として豪州において安価な褐炭を改質し、製造した水素を液体水素で日本へ大量輸送することを計画し、技術開発を進めている。なお、本計画において改質反応により発生するCO₂はCCS（Carbon Capture and Storage）により地下に埋め戻すことを想定していることから、本技術はカーボンフリーとの扱いである。概要を図4に示す。

水素・燃料電池戦略ロードマップ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～（全体）

- 基本戦略等で掲げた目標を確実に実現するため、
- ① **目指すべきターゲットを新たに設定(基盤技術のスペック・コスト内訳の目標)、達成に向けて必要な取組を規定**
- ② **有識者による評価WGを設置し、分野ごとのフォローアップを実施**

	基本戦略での目標	目指すべきターゲットの設定	ターゲット達成に向けた取組		
利用	モビリティ	FCV 20万台@2025 80万台@2030	2025年 ● FCVとHVの価格差 (300万円→70万円) ● FCV主要システムのコスト (燃電池 約2万円/kW→0.5万円/kW) 水素貯蔵 約70万円→30万円	● 徹底的な規制改革と技術開発	
		ST 320か所@2025 900か所@2030	2025年 ● 整備・運営費 (整備費 3.5億円→2億円) 運営費 3.4千万円→1.5千万円) ● ST構成機器のコスト (圧縮機 0.9億円→0.5億円) 蓄圧器 0.5億円→0.1億円)	● 全国的STネットワーク、土日営業の拡大 ● ガリノスボ/エビゴ併設STの拡大	
		バス 1200台@2030	20年代前半 ● FCバス車両価格 (1億500万円→5250万円) ※トラック、船舶、鉄道分野での水素利用拡大に向け、指針策定や技術開発等を進める	● バス対応STの拡大	
供給	化石+CCS 再エネ水素	発電	商用化@2030	2020年 ● 水素専焼発電での発電効率 (26%→27%) ※1MW級ガスタービン	● 高効率な燃焼器等の開発
		FC	グリッドパリティの早期実現	2025年 ● 業務・産業用燃料電池のグリッドパリティの実現	● セルスタックの技術開発
供給	化石+CCS 再エネ水素	水素コスト 30円/Nm ³ @2030 20円/Nm ³ @将来	20年代前半 ● 製造：褐炭ガス化による製造コスト (数百円Nm ³ →12円/Nm ³) ● 貯蔵・輸送：液化水素タンクの規模 (数千m ³ →5万m ³) 水素液化効率 (13.6kWh/kg→6kWh/kg)	● 褐炭ガス化炉の大型化・高効率化 ● 液化水素タンクの耐燃性向上・大型化	
		水電解システムコスト 5万円/kW@将来	2030年 ● 水電解装置のコスト (20万円/kW→5万円/kW) ● 水電解効率 (5kWh/Nm ³ →4.3kWh/Nm ³)	● 浪江実証成果を活かしたE1地域実証 ● 水電解装置の高効率化・耐久性向上 ● 地域資源を活用した水素サプライチェーン構築	

図3 水素・燃料電池戦略ロードマップ概要

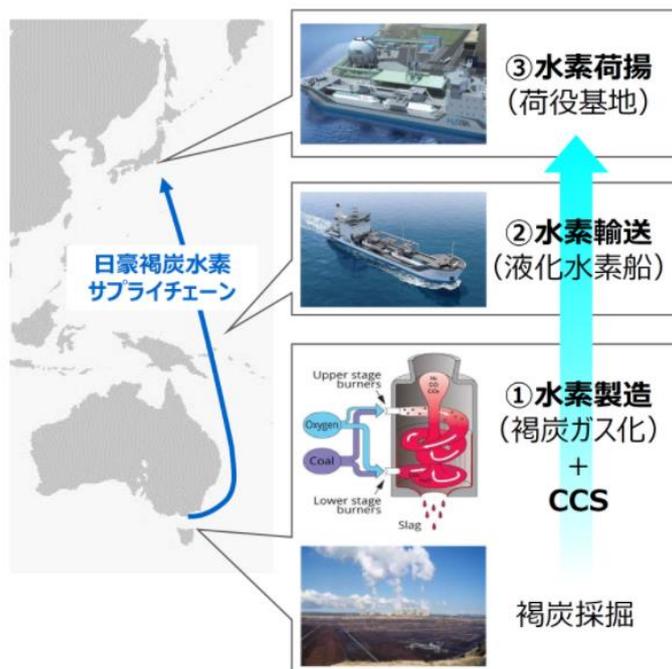


図4 日豪褐炭水素サプライチェーン概要⁴⁾

2.2 技術開発のための資金提供

我が国は、最近の他国における脱炭素化の急激な取り組みへの協調姿勢を示す一環として、2050年を目標にCO₂排出ゼロを目標にすることを表明した。これを達成するためには、多くを化石燃料に依存する運輸、エネルギー分野において、水素や再生可能エネルギー利用の強力な推進が必要であると考えられる。

本目標に向け、我が国は2020年12月4日に「脱炭素に向けた研究・開発を支援する2兆円の基金創設」を表明した。具体的な支援方法や対象分野は明確に示されていないが、今回の資金投入はこれまでにない規模のものであり、FCV（燃料電池車）や再生可能エネルギー発電機器の低コスト化に加えて、革新的な脱炭素化技術創出への資金拠出が期待される。

水素をエネルギーとして活用するにあたり、重要なことは安価な水素製造システムと高効率な発電機器の開発である。これらが一体化することにより、前述したように、より効率的にエネルギーを活用することが可能になり、脱炭素化につながる。

3. 当社における水素の位置づけ

当社では、2020年度に策定された「中期経営計画 iNnovate on 2023 go beyond!」（図5）において、成長戦略の一環として環境事業への挑戦を明記し、この中で水素を核とした環境事業創生に注力していくことを宣言している。今後、当社が水素に関してどのような取り組みを進めていくことが可能であるかは議論していくことが必要であるが、基本的な考え方として、環境貢献可能な技術であることが求められる。現在、当社が持つ水素関連技術に固体高分子形水電解装置があるが、その電源として再生可能エネルギーを使用し、カーボンフリー水素を供給することを一義的に考えていくことが最も当社として取り組みやすく、かつ強みを発揮できると考えられる。この一環として、当社は2020年度から水電解装置“Hydro creator™”（図6）の一般販売を開始した。また、主に国や地方自治体が進める再生可能エネルギー由来の電力を使ってカーボンフリー水素を製造、貯蔵し、利活用する実証事業等への導入も開始した。再生可能エネルギー由来の電力を用いた水素製造は、世界的に見てもカーボンフリー水素を製造する上での重要技術の1つと位置付けられており、Hydro creator™の販売開始は、当社が水素技術を用いた環境事業を創生していくための第1歩である。一方で水電解以外にもさらに安価な水素製造技術や高効率な水素利用技術を用いた製品のラインナップを増やす必要がある。

4 成長戦略③ 環境事業



● 環境事業への挑戦：高砂熱学が培ってきた環境技術を拡大し、成長事業を創出

- 当社が培ってきた“環境技術”は、地球環境の改善に資するものであり、こうした技術を社会に実装していくことが、当社の使命である

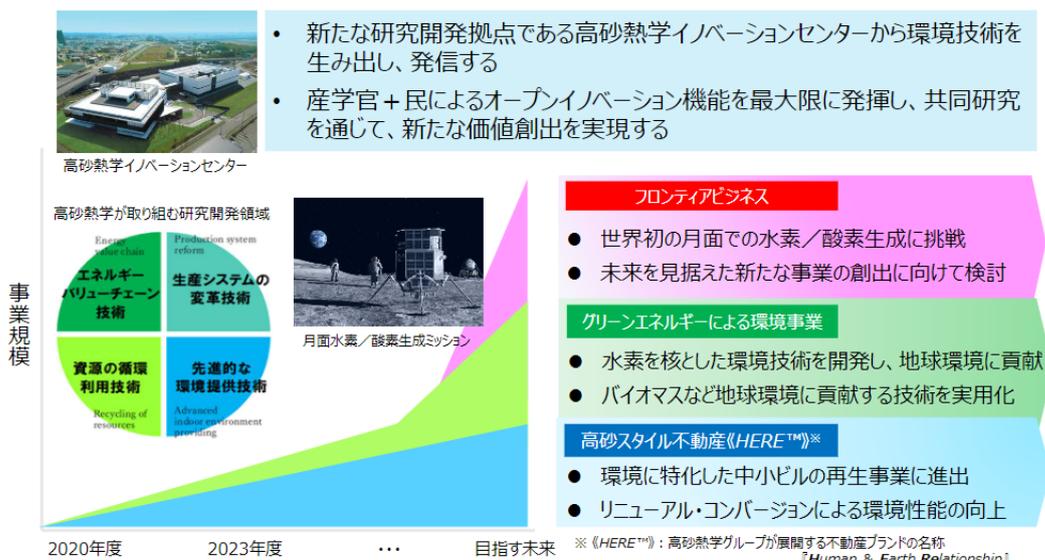


図5 当社における水素事業の位置づけ⁵⁾



図6 Hydro creator™外観

4. 技術開発動向

4.1 低炭素化の考え方

低炭素化とは何かをよくよく考えてみる。文字通り、炭素排出量を低減することであるが、2050年までは少なくとも炭素を排出する化石燃料にエネルギー供給の一部を依存せざるを得ないことは明白であり、脱炭素化を達成することは難しい。このため、当面は化石燃料を無駄なく活用することにより炭素排出量を可能な限り低減する低炭素化が先行して実施されることになる。例えば、現実的にはあり得ないことではあるが、現状40%前後の石炭火力発電の発電効率が80%になれば、同量の電気を得る際の炭素排出量は1/2になる。つまり、低炭素化と省エネルギーは同義であると考えられる。この観点に立った場合、1.2で示したエクセルギーの考え方が重要になってくる。回収できないエネルギーを生むことは省エネルギー化につながらず、低炭素化対応が難しい。これを解決する最も簡単な方法は、化石燃料等の一次エネルギーを、エクセルギーロスを抑えつつエクセルギー率100%の電気に転換することである。

東京電力ホールディングス^(株)は、2018年に「Utility3.0[®]」という考えを表明した。これは、エネルギーの利用方法（電気事業の歴史）が3世代目に入ることを示すものである。1世代目は19世紀後半からの系統電力供給による電気事業の始まり、2世代目は現在の発送電分離に伴う事業形態の変容と競争の開始、そしてこれから予想される電気事業形態が3世代目にあたり、それは「他事業との連携・融合」がキーワードである。「Utility 3.0」では3世代目の変革を促す要素として、「自由化」、「人口減少」、「脱炭素化」、「分散化」、「デジタル化」の5つが示されている。

このうち、「脱炭素化」を達成するには、現状、主に化石燃料に依存している電力以外のエネルギーを極力電化し、電化が難しい部分をカーボンフリー水素で補完することでことが必要としている（図7）。具体的には、「脱炭素化」を達成するためには「省エネルギー（低炭素）」が不可欠であり、「省エネルギー」を進めることで脱炭素化達成に必要となる水素量を実現可能な量にすべきであることを示しているものである。これは、今後の日本のエネルギー供給の在り方を示す一つの方法論と考えられる。

以上のことから、脱炭素化を進めるには、化石燃料を再生可能エネルギー等のカーボンフリーエネルギーで代替し、省エネルギー機器の開発、特に燃料電池や水電解装置等の高効率化を進めることでエネルギー消費量を極力減らしていくことが必要であると考えられる。つまり、低炭素化に対応することは将来の脱炭素化を目指すうえで重要な取り組みであると考えられる。

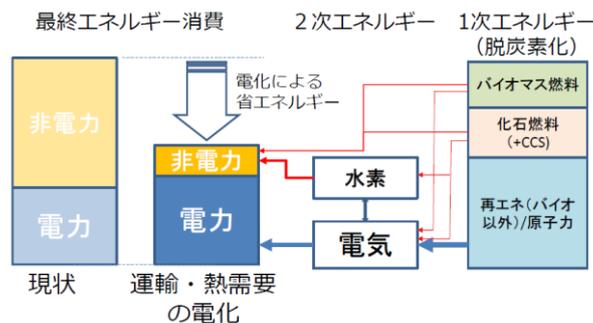


図7 Utility3.0における将来のエネルギー供給の予測

4.2 水素関連機器の開発状況

4.2.1 燃料電池

図8に、これまでに開発実用化されている燃料電池の原理と特徴を示した。現在、エネファームやFCV用で広く使われている燃料電池は「固体高分子形 (PEFC)」および「固体酸化物形 (SOFC)」である。PEFCは作動温度が常温に近く、早くから開発が進められている燃料電池であるが、発電効率が高くないこと、電極に貴金属を使用すること等が課題である。SOFCの発電効率はPEFCよりも高いが、作動温度が800℃程度と高温であること、温度低下を防止するために持続的運転が必要であること等の課題がある。発電効率だけで比較するとアルカリ形燃料電池 (AFC) が最も高いことがわかる。これは作動温度が常温域であり、熱に転化されるエネルギーが比較的少ないことに起因しているが、一方でコストが非常に高く、宇宙開発利用などの限定されたニーズでのみ使用されている。今後の燃料電池開発の方向性としては、既存技術であるPEFCやSOFCの効率向上、またはAFCのコスト低減が必要と考えられ、前者についてはNEDOを中心に高効率化を含めた技術開発が進められている。

種類	アルカリ形 (AFC)	固体高分子形 (PEFC)	りん酸形 (PAFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)	
電解質	水酸化カリウム水溶液	陽イオン交換膜 (フッ素樹脂系)	リン酸	リチウム・カリウム炭酸塩 リチウム・ナトリウム炭酸塩	セラミック	
媒体イオン	OH^-	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}	
作動温度	50~150℃	80~120℃	190~200℃	600~700℃	600~1000℃	
使用可能燃料	純水素	都市ガス、LPガス、石油、メタノール、石炭ガス、純水素、等				
動作原理						
反応式	燃料極	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{O}_2^- + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	
	空気極	$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$1/2\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$	
	全体	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
主な用途	・宇宙開発等特殊用途	・家庭用(小規模発電) ・携帯・可搬用 ・車載用	・産業・業務用 ・事業用(大規模発電) ・非常電源用	・産業・業務用 ・事業用(大規模発電) ・非常電源用	・家庭用(小規模発電) ・産業・業務用 ・可搬用 ・事業用(大規模発電)	
発電効率	HHV	60%(純水素の場合)	30~40%	35~42%	40~60%	40~65%
	LHV	70%(純水素の場合)	33~44%	39~46%	44~66%	44~72%

図8 燃料電池の種類と原理⁷⁾

水素を燃料とする燃料電池の普及にはもう一つ大きな課題が存在する。現在、人口が集中する都市部では概ね都市ガス導管が敷設されているが、そのようなエリアでは、改質器を使用することにより都市ガスを燃料電池の燃料として使用することができるため、水素を直接燃料として使用する燃料電池の普及が進む可能性は低い。また、都市ガス導管敷設エリアに水素導管を新たに敷設することは、コスト面に加え、二重導管敷設になり効率的ではないことから実現は難しいものと考えられる。

一方、地方部では都市ガス導管が敷設されていない地域が多く存在し、新たに水素導管を敷設することは可能である。しかし、人口密度が低いことに加え、もう一つの重要な水素利用手段であるFCVの普及が、人口が少ない地方部で拡大していくことは難しいと考えられる。このため、地方部では総合的な水素活用が進まないことが推察され、結果として燃料電池の普及も進み難いことが予想される。

今後、規制緩和や脱炭素社会実現に向けた都市ガス利用の縮小、さらには都市ガスの水素転換等が進むことにより、まずは都市部を中心に水素を燃料とする燃料電池の普及が進むことが期待される。

4.2.2 燃料電池車(FCV)

現在、日本では自家用車としてトヨタ自動車㈱が「MIRAI」、本田技研工業㈱が「CLARITY FUEL CELL」を販売しており、2019年時点での累積販売台数は国内で3,500台に達している(経済産業省調べ)。

政府は今後10年でFCVの普及台数を1000万台に増やすとしているが(2020.10.14、水素閣僚会議⁸⁾) これまでの販売台数、および今後のメーカーの販売計画から考えると政府目標の達成は極めて難しい。またFCV普及の障壁として、価格がガソリン車やハイブ

リッド車等と比べて割高であることに加え、水素ステーションの普及が進んでいないことも考えられる。2020年12月現在、首都圏における水素ステーション設置台数は53カ所であるが（（一社）次世代自動車振興センター調べ⁹⁾）、首都圏で1万カ所程度設置されているガソリンスタンドとは比較にならないほど少なく、利便性という点で課題が存在する。

また、現状のFCVに搭載されている水素タンクの充填圧は700気圧であるが、これに水素を充填するためのエネルギー消費が大きく、結果的にガソリン車と同程度のCO₂を排出していることも課題である。350気圧程度の充填圧であればCO₂排出量は格段に低減するが、走行距離が半分になることが課題となる。これを解決する方法は、高効率燃料電池を開発する他に見出すことは難しいと推察される。

5. 水素社会実現に向けて

我が国は資源に乏しい国であり、旧来、エネルギーのほとんどを海外に依存している。2011年に施行された「固定価格買い取り制度（FIT法）」により、再生可能エネルギーの導入が加速されているが、2019年末時点におけるその発電量は全国発電量の18.5%程度に過ぎず、原子力が停止している現状では、エネルギーの多くを依然として化石燃料に依存していることになる。

我が国で再生可能エネルギーの普及が進まない最も大きな要因として、そもそも、日本は自然変動電源（太陽光、風力）の適地ではないことが考えられる。風力に関しては例えば台風の影響、太陽光に関しては、梅雨、降雪などによる稼働率の低下がおこるため、化石燃料由来の発電方式と比較すると発電単価が高くなる。さらには風向きの変化、日照量の変化による発電量変動が起こるため、これを平準化するための調整力が必要になり、よりコストが高くなる。

日本における再生可能エネルギー電力の平準化は主に蓄電池で対応しているが、水素は水電解と燃料電池を組み合わせることで蓄電池と同じ機能を持つことができ、蓄電池の代替として調整力を担うことが可能である。現在における水素の利活用は、水素価格および関連機器のコストがともに高いことにより、事業採算性の面で我が国が期待するように進んでいない状況である。一方で水素の大量利用の道筋がつき、それに向けた供給方法が確立できればコストもそれに合わせて低減することが期待でき、調整力としての水素利用も加えた中で、そう遠くない将来に水素社会が実現できることが期待される。

当社もこの一助となるよう、革新的な技術開発を含め、水素関連技術の開発を進めていく。

文 献

- 1) 東京大学 エネルギー工学連携研究センターHP (https://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/html_seminar/20080229/20080229tsutsumi.pdf、2021年2月10日閲覧)
- 2) 経済産業省 HP (https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/005_02_00.pdf、2021年2月10日閲覧)
- 3) 経済産業省 HP (<https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-1.pdf>、2021年2月10日閲覧)
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁 HP (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/kattansuisoproject.html>、2021年2月10日閲覧)
- 5) 高砂熱学工業株式会社 HP(https://www.tte-net.com/ir/pdf/medium_term_plan_202011_1.pdf、2021年2月10日閲覧)
- 6) 自然エネルギー財団 HP (https://www.renewable-ci.org/pdfdownload/activities/S2_Hiroshi_Okamoto.pdf、2021年2月10日閲覧)
- 7) 一般社団法人 日本電気工業会 HP (https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/images/syurui_01.pdf、2021年2月10日閲覧)
- 8) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP (https://www.nedo.go.jp/events/report/ZZHY_00007.html、2021年2月10日閲覧)
- 9) 一般社団法人 次世代自動車振興センターHP (http://www.cev-pc.or.jp/suiso_station/area01.html、2021年2月10日閲覧)

ABSTRACT

Hydrogen is the lightest "metal" of atomic number 1 with various unique properties. In recent years, attention has been focused on this utilization, and especially in the energy field, efforts are being made to use most of it as a fossil fuel alternative that depends on the Middle East from the viewpoints of "reducing environmental load" and "energy security measures".

This paper summarizes the characteristics of hydrogen, the hydrogen utilization policy in the energy field in Japan, the status of technological development, etc.

創刊にあたって

Notes for the First Publication

取締役常務執行役員
研究開発本部管掌 兼 環境事業開発部管掌

山分 弘史



当社は、1984年12月神奈川県厚木市に技術研究所が設立し、基礎技術、応用技術の研究、新商品の開発、施工面に関する技術開発に取り組んでまいりました。そしてその成果を『技術研究所報』として1987年より33年にわたり発刊して参りました。

このたび、2020年3月のイノベーションセンター開所を契機に、「技術研究所報」を「イノベーションセンター報」と改め、これまでの紙冊子からホームページで閲覧するデジタル冊子として創刊することといたしました。

今回の刊行にあたっては、技術内容を出来るだけわかりやすく、興味を持っていただける内容とするよう心がけました。編集員や執筆者全員が一丸となり、今後の研究開発を創造していくという、力強いメッセージを随所に盛り込んでいます。不十分な点もあるかと存じますが、本趣旨をご理解のうえ、ご高配いただければ幸いです。

今、我々を取り巻く社会環境は、脱炭素社会の実現へ向けての取組みやデジタルトランスフォーメーション（DX）の加速等、大きくそして急激に変化しつつあります。諸先輩方が作り上げてきた“技術力”と“ないものは自分でつくる”という精神を継承し、皆様のニーズに的確に応えられる技術や商品を提供すべく、なお一層努力してまいりたいと考えております。今後とも更なる御支援、御指導の程、宜しく願い申し上げます。

高砂熱学イノベーションセンター報 NO.34 2020

発行日 2021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 山分 弘史



高砂熱学工業株式会社

高砂熱学イノベーションセンター	〒300-2417	茨城県つくばみらい市富士見ヶ丘2-19	☎0297(55)1337
本社	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8212
東京本店	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8221
横浜支店	〒220-8126	神奈川県横浜市西区みなとみらい2-2-1(横浜ランドマークタワー)	☎045(224)1570
関信越支店	〒330-0854	埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-10-16(シーノ大宮ノースウイング)	☎048(637)3500
東北支店	〒980-0811	宮城県仙台市青葉区一番町2-4-1(読売仙台一番町ビル)	☎022(227)9552
札幌支店	〒060-0003	北海道札幌市中央区北3条西4-1-1(日本生命札幌ビル)	☎011(261)2531
大阪支店	〒530-0013	大阪府大阪市北区茶屋町19-19(アプローズタワー)	☎06(6377)2800
名古屋支店	〒450-6037	愛知県名古屋市中村区名駅1-1-4(JRセントラルタワーズ)	☎052(582)8400
九州支店	〒812-0011	福岡県福岡市博多区博多駅前2-19-24(大博センタービル)	☎092(431)8050
中四国支店	〒730-0017	広島県広島市中区鉄砲町10-12(広島鉄砲町ビルディング)	☎082(221)2871
エンジニアリング部	〒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
国際事業部	〒160-0022	東京都新宿区新宿6-27-30(新宿イーストサイドスクエア)	☎03(6369)8233