

廃プラスチックエネルギーの高度有効利用

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

Advanced Effective Utilization of Waste Plastic Energy

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

我々は2020年度から、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」において、エネルギーリカバリー（ER）チームに参画してきた。現在までで、高効率な排熱回収のための伝熱管表面改質技術と低温排熱の有効活用のための冷熱利用技術の基盤技術を開発してきた。また、熱回収から氷スラリー利用先までの総合熱利用システムの評価技術を開発し、評価技術の検証とともに、基盤技術の実用化と社会実装のために、様々な地域での事例検討してきた。本報では、低温排熱の冷熱利用を中心にして、ERチームでの技術開発の概要を紹介する。

1. はじめに

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

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

*1 東海国立大学機構名古屋大学、*2 国立研究開発法人産業技術総合研究所、*3 東北発電工業株式会社、*4 八戸工業大学、*5 中央大学、*6 東京電機大学、*7 青山学院大学

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

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

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

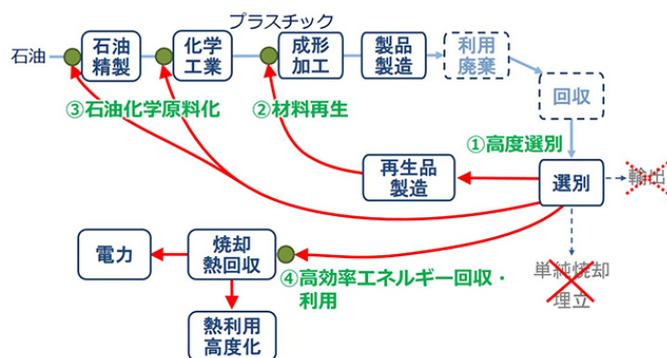


図1 NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」の概要¹⁾

2. 高効率な排熱回収のための伝熱管表面改質技術

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

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

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

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

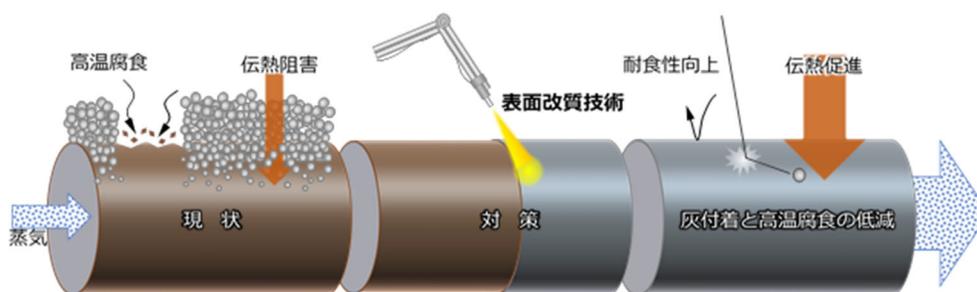


図 2 高効率排熱回収のための伝熱管表面改質技術の開発概要

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

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

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

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

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

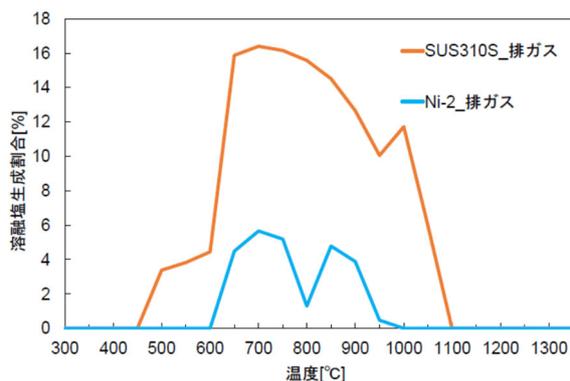


図3 溶融塩生成割合の温度変化(標準資料灰(産廃)の場合)

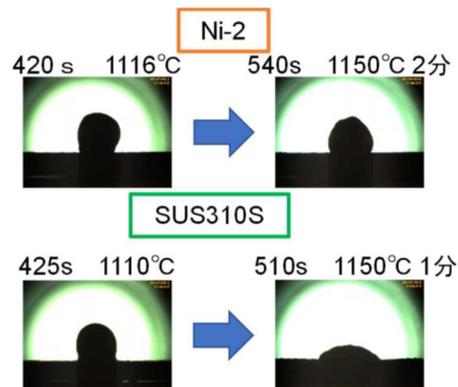


図4 標準試料灰(産廃)の溶融挙動

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



図5 開発材料の溶射施工状況

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

3. 低温排熱の有効活用のための冷熱利用技術

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

3.1 氷点下冷熱の吸収冷凍機の開発

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

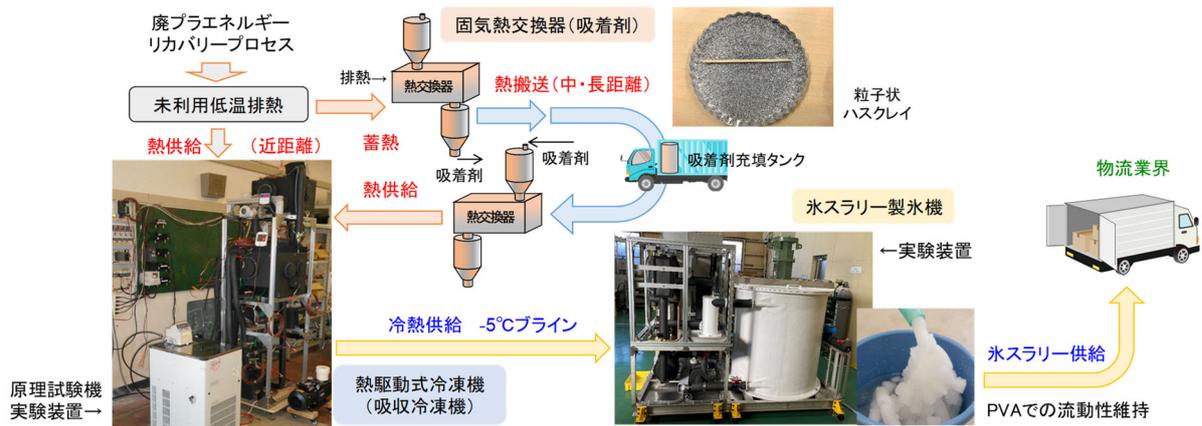


図 6 排熱の冷熱利用のための技術開発の概要図

ことにした。表 1 のように 1 元目の高温側冷凍機は従来型の吸収冷凍機であり、 $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ を作動液体とし、低温側冷凍機の吸収器の冷却水を製造する。2 元目の低温側冷凍機は $\text{LiBr-H}_2\text{O}/1\text{-Propanol}$ を作動液とし、氷点下冷熱を製造する。

開発対象の低温側吸収冷凍機は、図 7 のように低圧に保たれた蒸発器でブラインが流れる管上に冷媒を流して蒸発させ、蒸発潜熱でブラインを冷却する。蒸発した冷媒は吸収器の作動液に吸収され圧力を保つ。この圧力は作動液の濃度と温度で決まる。冷媒を吸収（凝縮）した作動液は温度が上昇するために冷却が必要であり、1 元目の高温側冷凍機では冷却塔からの冷却水で冷却するが、この 2 元目の低温側では 0.5 kPa を維持するために、1 段目の高温側冷凍機が製造した 7°C 程度の冷水やブラインで冷却する。冷媒を吸収して薄くなった作動液はポンプで再生器に送られ、排熱源からの熱で濃縮されて再び吸収器に戻る。再生器で蒸発した冷媒は凝縮器で凝縮し、蒸発器に流入して「蒸発、吸収・再生、凝縮」の冷凍サイクルを形成する。

これまでに作動液や冷媒の種々の物性値を解明して、本吸収冷凍サイクルを設計・検討を行ってきた³³⁻³⁶⁾。図 8 の冷媒の凝固点を示すように、冷媒である $\text{H}_2\text{O}/1\text{-Propanol}$ の H_2O モル分率を 0.9 以下にすることで、 -10°C 以下の蒸発温度での設計ができる。また、作動液の結晶化温度により、吸収器の最低温度を決めることができる。

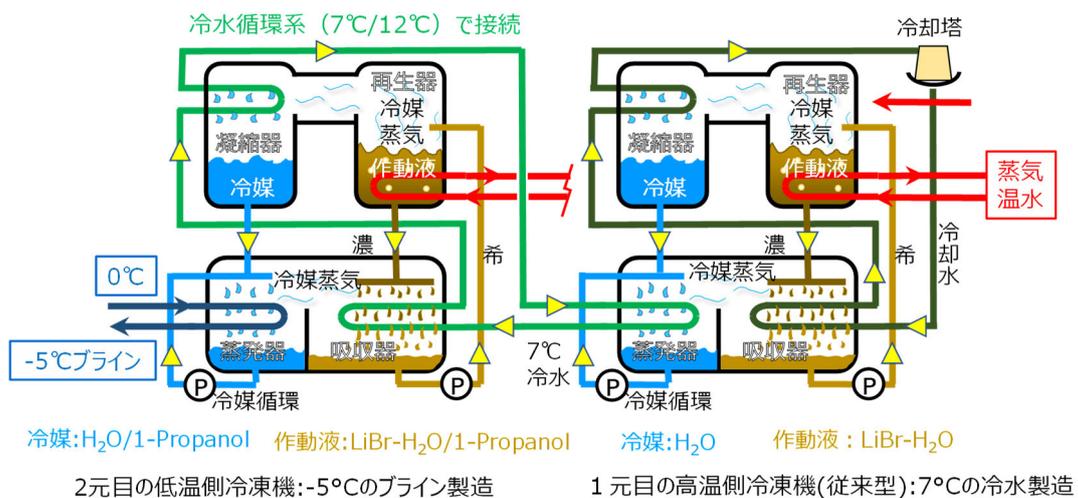


図 7 開発中の氷点下冷熱を発生する 2 元吸収冷凍機の模式図

表1 低温排熱駆動式の2元吸収冷凍機の構成

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

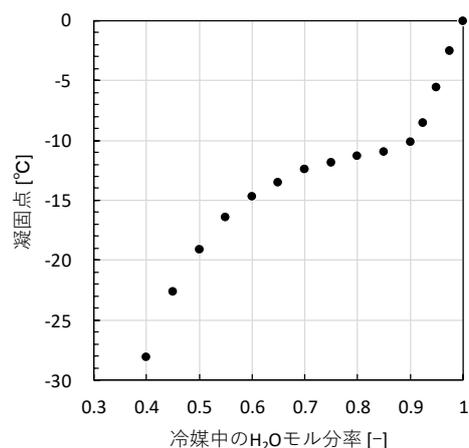


図8 冷媒の水モル濃度と凝固点の関係

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

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

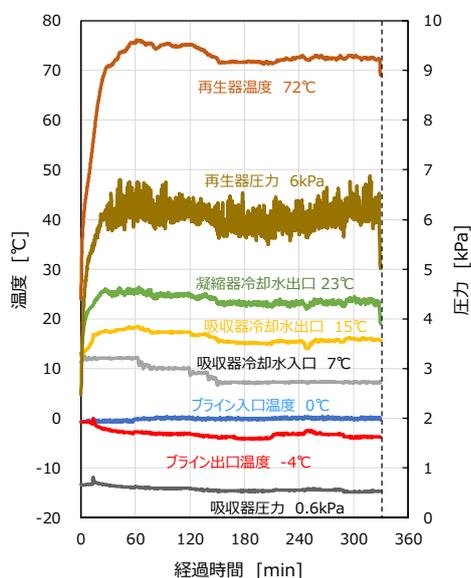


図9 原理試験機での試験結果

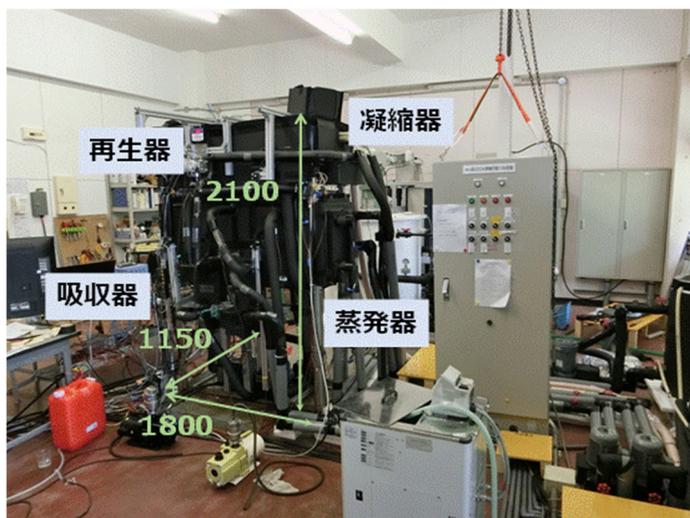


図10 氷点下冷熱を発生する3~4 kW 吸収冷凍機の試験機

3.2 製氷機の開発と氷スラリーの高度化

物流分野のコールドチェーンへの冷熱供給を想定した場合、氷スラリーには高蓄熱密度（高水分率）の条件でも十分な流動性を有していることが求められる。一方、製氷液体として塩水を使用すると、凝固点降下により製氷温度は-3℃以下となり、冷凍機のCOPは低下する。

氷スラリーの流動性が悪くなる主な要因として、氷粒子の粗大化と凝集が考えられる。本研究では不凍たんぱく質の水の凍結抑制効果の研究結果³⁷⁾に基づき、ポリビニルアルコール (PVA) によって、氷粒子の粗大化や凝集を抑制する技術の開発に取り組んでいる。PVA を添加した水であれば凝固点降下が起こらないため、製氷温度が低温化しない。図 11 と図 12 に PVA の微量添加による氷粒子の粗大化抑制の効果を示す。PVA を 0.1 mg/mL (約 100 ppm) 添加するだけで、氷粒子の粗大化を著しく抑制することが可能である^{38,39)}。

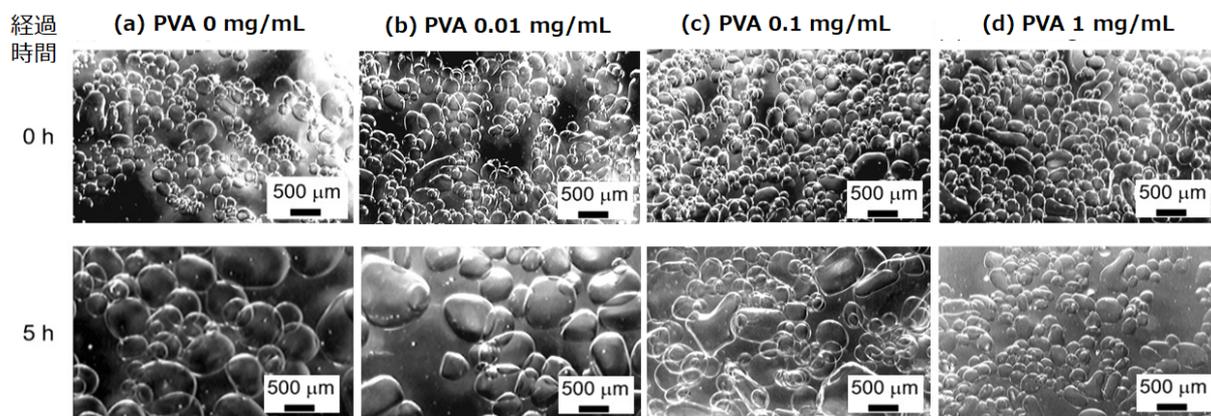


図 11 ポリビニルアルコール(PVA)添加による氷粒子の粗大化抑制

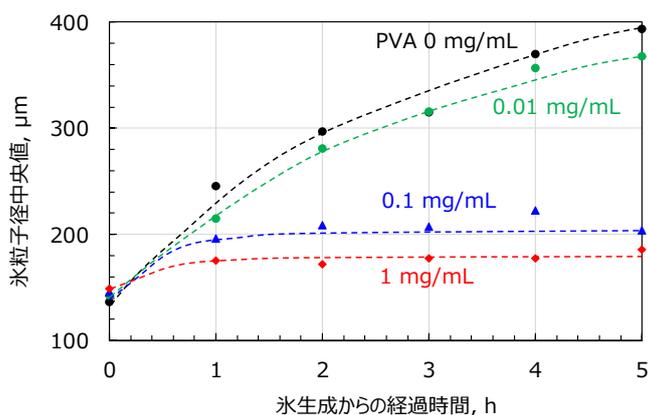


図 12 ポリビニルアルコール(PVA)添加による氷粒子径の時間変化

氷スラリーの製造方式には循環製氷方式、ダイレクト方式などあり、さらにハーベスト式、かき取り式など様々な製造方法がある。これらの氷スラリーの製造方法の中で、過冷却水 (0°C 以下の水) からの氷スラリー製造は、エネルギー効率に優れた方法として知られている⁴⁰⁻⁴⁵⁾。そこで、ここでの氷スラリー製氷機には、図 13 のような過冷却方式を採用した。水および水溶液を熱交換器 (過冷却器) にて過冷却状態にした後に、超音波照射をトリガーとして過冷却状態を解除して氷スラリーを製造する。過冷却器と過冷却解除器において、過冷却状態の生成と解除がなされる水溶液の循環運転が継続することで、タンク内の氷分率は増加する。本研究では、氷粒子の粗大化抑制効果が確認された PVA を用いて、氷スラリー中での氷粒凝集状態を評価して⁴⁶⁾、タンク内の氷スラリーの流動性³⁸⁾とタンクから取り出した氷スラリーの流動性を調べている。実験装置の概観は、前述の図 6 中の写真を参照されたい。

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

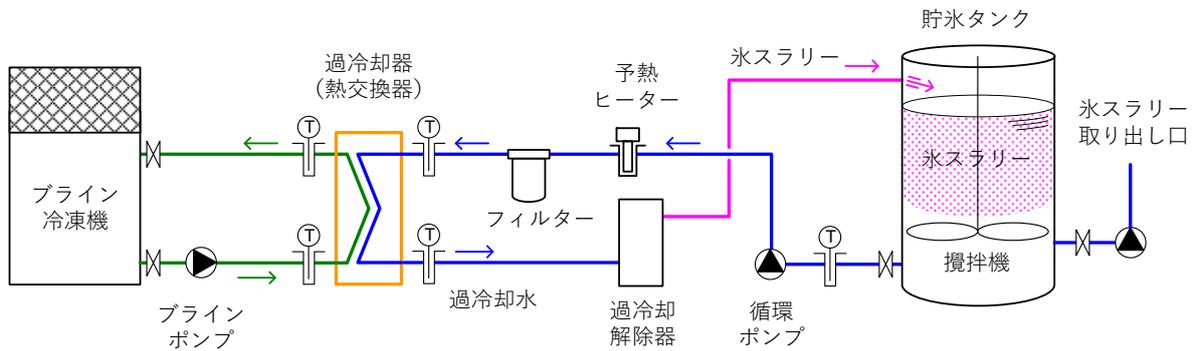


図 13 過冷却方式の製氷機の構成

4. 総合熱利用システムの評価技術

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

4.1 冷熱利用システムの評価モデルの概要

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

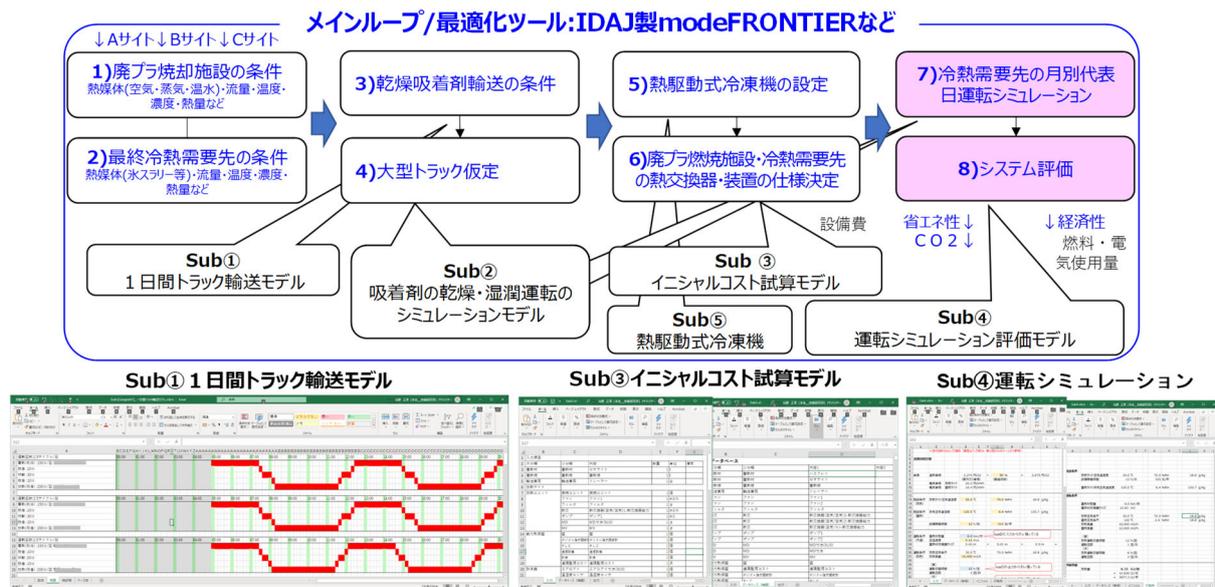


図 14 冷熱利用システムの評価モデルの概要化

先の熱交換器・装置の仕様を決定し、Sub③のイニシャルコスト試算ツールを用いてコスト算出する。最後に、Sub②吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールを用いて、7) 冷熱需要先の月別代表日運転シミュレーションを行い、Sub④の運転シミュレーション評価ツールによって年間エネルギー消費量・運転費、CO₂削減量、費用対効果などを算出して8) システム評価を行う。

図 14 中の下部は、エクセルベースのサブツールである。Sub①の一日間トラック輸送ツールでは、焼却場と配送センターの住所を入力して、それぞれの間の移動時間を Google Maps API より取得する。エクセル上において、Google Maps API によって取得した移動時間とともに、蓄熱時間、接続時間、放熱時間を設定することで、図のようにトラック輸送のタイムスケジュール表が作成できる。初期値としては、各焼却場から最短時間の配送センターの間でのトラック輸送のタイムスケジュールが表示される。

Sub②の吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールでは、蓄熱槽の形状やサイズを設定し、蓄熱・放熱運転における蓄熱槽の入口空気温湿度と流量の時間変化を入力して、出口空気の温湿度の時間変化を計算する。現在は固定層を対象にしたシミュレーションモデル¹⁷⁻²²⁾であるが、今後、研究の進捗により、流動層を対象としたモデルに拡張する予定である。

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

Sub④の運転シミュレーション評価ツールでは、運転条件や供給熱量などから、投資回収年数（費用対効果）や年間 COP の算出ができ、年間エネルギー消費量や CO₂ 削減量を算出する。今後は、熱交換器伝熱管材料ならびに表面改質技術の成果による発電効率と稼働率の向上、冷熱需要の増加による熱回収率の向上といった要素を汲み合わせた総合エネルギー利用効率も評価する予定である。

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

4.2 大都市エリアでの評価事例⁵⁰⁾

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

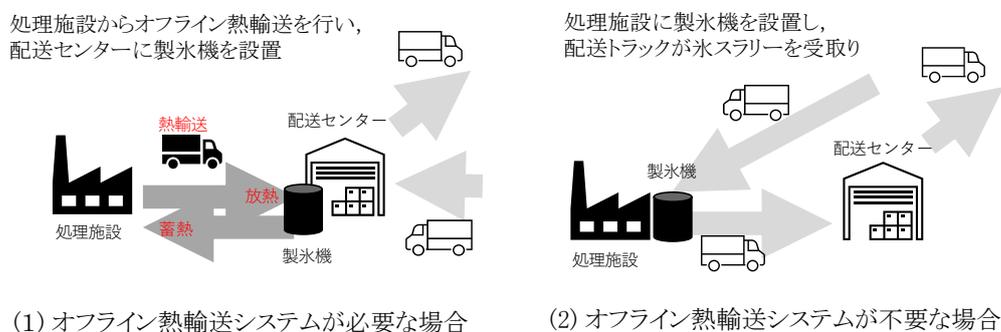


図 15 オフライン熱輸送システムのスクリーニング

4.2.1 評価対象

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

表2 計算条件と結果

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

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

4.2.2 計算結果と考察

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

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

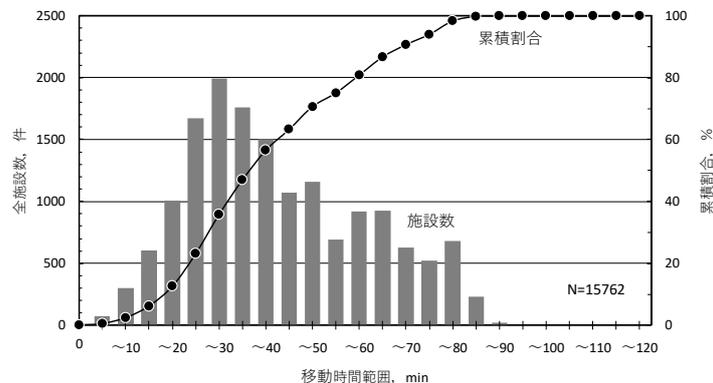


図16 東京都の産業廃棄物処理施設と配送センターの移動時間の分布

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

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

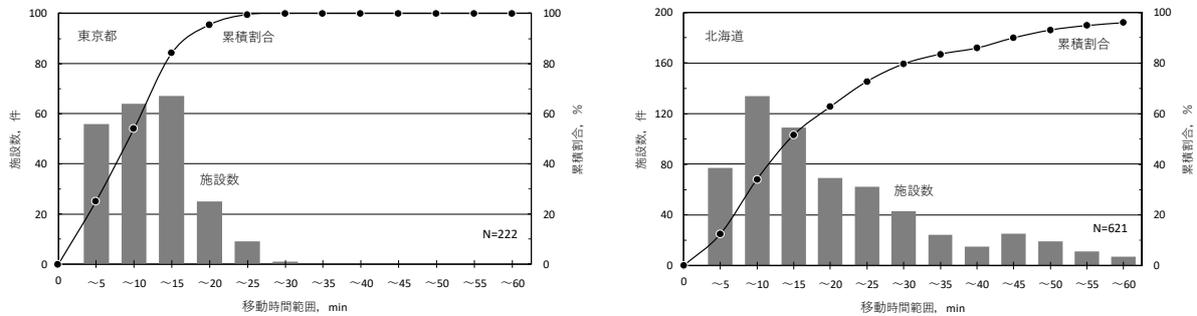


図 17 東京と北海道における、産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

4.2.3 オフライン熱輸送システムの検証結果

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

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

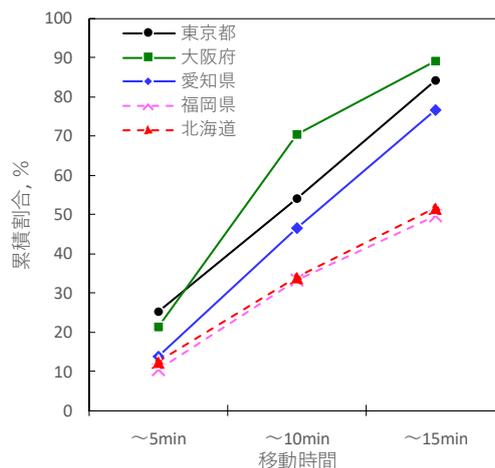


図 18 産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

4.3 離島エリアでの評価事例⁵¹⁾

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

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

表3 伊豆大島, 三宅島, 八丈島の基本情報

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

注：2023年10月1日における人口



図19 3島における廃棄物処理場と冷熱需要(漁港)の位置

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

4.3.1 評価条件と方法

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

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

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

4.3.2 評価結果と考察

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

表4 評価結果の一覧

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

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

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

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

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

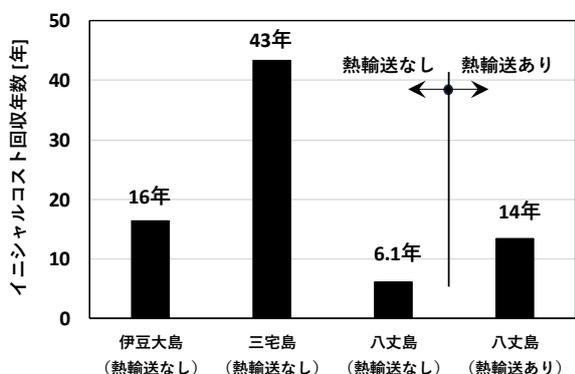


図 20 イニシャルコスト回収年数の評価結果

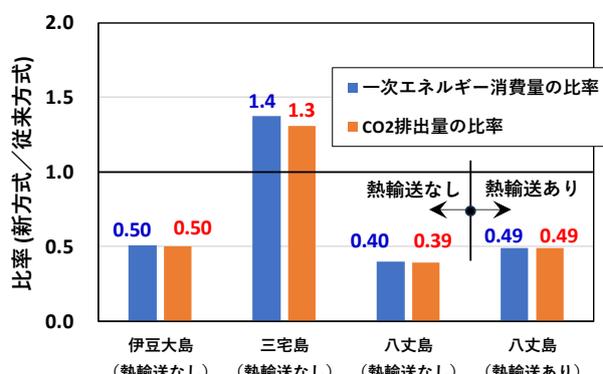


図 21 一次エネルギー消費量と CO2 排出量の評価結果

4.3.3 総合熱利用システムへの適合性の考察

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

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

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

5. おわりに

以上のように本報では、NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」での ER チームの技術開発として、伝熱管の表面改質に関する基盤研究、低温排熱の冷熱利用に関する基盤研究、および総合熱利用システムの評価技術の事例研究について説明した。2020 年度から開始された本 NEDO プロジェクトでは、来年度の 2024 年度に 5 年目の最終年度となるため、期初の研究目標の達成に向けて邁進する。併せて、研究開発成果の関連学協会での公表に努める。

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

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

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」(JPNP20012) の結果、得られたものである。また、本プロジェクトの参画企業は、経済産業省のゼロエミチャレンジ企業にリストアップされている⁵⁴⁾。NEDO や経済産業省

をはじめ、関係の皆様方に感謝を申し上げます。

文 献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）HP：
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100179.html（最終アクセス日：2023.12.27）。
- 2) 佐伯達哉, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎：産業廃棄物灰の熔融特性の解明とその制御, 日本燃焼学会第 59 回燃焼シンポジウム, 2021.
- 3) Hiroshi Naganuma, Takehito Mori, Sho Watanabe, Akihiro Sawada, Taeko Goto, Yasuaki Ueki, Ryo Yoshiie, Ichiro Naruse: Ash deposition mechanisms in waste-to-energy plants, International Conference on Power Engineering (ICOPE-2021), 2021.
- 4) 小野田海人, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎：産業廃棄物灰からの熔融塩生成特性解明と灰付着制御, 日本燃焼学会第 60 回燃焼シンポジウム, 2021.
- 5) Kaito Onoda, Yasuaki Ueki, Ryo Yoshie, Ichiro Naruse: Molten Salt Formation Characteristics of Industrial Waste Ash and Control of Ash Deposition, International Conference on Materials and Systems for Sustainability, 2021.
- 6) 長沼宏：固体燃焼における灰付着と高温腐食, 第 58 回石炭科学会議, 2021.
- 7) 産業技術総合研究所, 名古屋大学, 東北発電工業：廃プラスチックからの高温熱回収に関する研究開発の紹介, 日本機械学会動力エネルギーシステム部門, ニュースレター, 2022/09.
- 8) 長沼宏, 成瀬一郎, 堀田幹則, 幡野博之, 野田英彦, 稲田孝明, 谷野正幸：廃棄プラスチックスエネルギーの高度有効利用, - I - 高温排熱の有効利用, 化学装置, 1月号, 工業通信, 43-47, 2022.
- 9) 佐伯達哉, 義家亮, 植木保昭, 成瀬一郎：産業廃棄物処理炉内における灰付着制御, 第 31 回日本エネルギー学会大会, 2022.
- 10) 成瀬一郎：高効率排熱回収技術の開発～伝熱管表面改質・回収熱量増大・長寿命化～, NPO 法人循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 11) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition mechanisms in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, vol.9, No.4, 21-00435, 2022.
- 12) 堀田幹則：高効率エネルギー回収・利用システム開発 ～リサイクル困難な廃プラスチックからの高効率なエネルギー回収と冷熱利用～, 第 37 回新産業技術促進検討会シンポジウム「NEDO『革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発』プロジェクト進捗報告会～プラスチック資源循環を実現する技術とは～」, 2022.
- 13) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 邊章, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭：NaCl による高温加速酸化機構の速度論的解析, 第 17 回バイオマス科学会議, 2022.
- 14) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 渡邊章, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭：NaCl 存在下における高温加速酸化機構の速度論的解析, 第 60 回石炭科学会議発表論文集, 2-16, 2003.
- 15) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition and corrosion mechanisms of tubes in Waste-to-Energy plants, Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE-2022), 2023.
- 16) 森岳人, 長沼宏, 堀田幹則, 成瀬一郎：廃棄プラスチックエネルギーの高度有効利用 第 1 報:伝熱管の表面改質技術, 化学工学会第 89 年会, 2024 (予定).
- 17) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 鈴木正哉, 松永克也, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 1 報—小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, 45 巻, 281 号, 9-17, 2020.
- 18) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 谷野正幸：ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 2 報—低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着時の発熱量について, 空気調和・衛生工学会論文集, 45 巻, 285 号, 1-8, 2020.

- 19) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 3 報—吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 46 巻, 290 号, 39-46, 2021.
- 20) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 4 報—一定型蓄熱システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 46 巻, 297 号, 31-38, 2021.
- 21) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 5 報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47 巻, 301 号, 9-16, 2022.
- 22) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 6 報—塗装工程での除湿利用の実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47 巻, 308 号, 11-18, 2022.
- 23) 木村拓雅, 加藤貴大, 幡野博之: 吸着剤の流動層乾燥, 第 27 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021.
- 24) 王荀, 新井教馬, 幡野博之: 十字流式移動層を用いた吸着剤蓄熱システム, 第 27 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021.
- 25) 木村拓雅, 幡野博之, 野田英彦, 稲田孝明, 谷野正幸, 長沼宏, 堀田幹則, 成瀬一郎: 廃棄プラスチックエネルギーの高度有効利用, - II - 低温排熱の有効利用, 化学装置, 1 月号, 工業通信, 48-54, 2022.
- 26) 及川慈英, 新井一馬, 幡野博之: 低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 53 回秋季大会, 2022.
- 27) 幡野博之, 新井一馬, 及川慈英: 低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 53 回秋季大会, 2022, ST-29.
- 28) 大関泰知, 鈴木翔太, 王ジュエ, 及川慈英, 幡野博之, 村瀬和典: 低温排熱有効利用に向けた吸着剤蓄熱システムの研究- 吸着剤特性と蓄熱性能, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会 2023.
- 29) 王ジュエ, 及川慈英, 大関泰知, 鈴木翔太, 幡野博之, 村瀬和典: 蓄熱システムにおける吸着剤熱発生特性に関する研究, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会.
- 30) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之: 蓄熱システムの吸着剤連続乾燥特性, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会.
- 31) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之: 低温排熱有効利用のための蓄熱システム用吸着剤連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
- 32) 幡野博之, 王ジュエ, 及川慈英, 鈴木翔太, 村瀬和典: 吸着剤蓄熱システムの熱発生特性に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
- 33) 小田島聡, 野田英彦, 高橋晋: アルコール水溶液冷媒による氷点下冷熱製造の可能性, 化学工学会秋季大会講演要旨 DA103, 2017.
- 34) 磯嶋将, 野田英彦, 正野孝幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用動作流体 LiBr- H₂O-1-propanol の結晶化温度, 2020 年度日本冷凍空調学会年次大会要旨集, E213, 2020.
- 35) 正野孝幸, 野田英彦, 磯嶋将, 片山正敏, 折田久幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用新作動液の飽和特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会 (岡山), E321, 2022.
- 36) 磯嶋将, 野田英彦, 折田久幸, 片山正敏, 正野孝幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用動作流体 LiBr-H₂O/1-Propanol の蒸発特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会 (岡山), E321, 2022.
- 37) 小山寿恵, 稲田孝明: III 型不凍タンパク質の低濃度水溶液中で成長する氷結晶ベール面上のピット形成過程の観察, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.33, No.3, 251-259, 2016.
- 38) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 谷野正幸, 折田久幸, 野田英彦, 幡野博之: 廃プラスチックエネルギーからの冷熱を用いる氷スラリー製造, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B232, 2023.
- 39) 請川颯一, 小山寿恵, 小林佳弘, 谷野正幸, 稲田孝明: 氷スラリー製氷機で製造した氷スラリーへの PVA 添加による氷粒子の成長抑制効果, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B233, 2023.

- 40) 三戸大介, 小澤由行, 谷野正幸, 稲田孝明: 水の過冷却解除に関する能動制御技術の開発, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.17, No.2, 191-201, 2000.
- 41) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二: 氷スラリーによるチルド水供給設備に関する研究～蓄氷解氷同時運転での満蓄制御と給水制御～, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.30, No.3, 319-329, 2013.
- 42) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二: 乳製品加工工場における氷スラリーによるチルド水供給設備, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.30, No.3, 331-339, 2013.
- 43) 万尾達徳: 過冷却解除方式製氷技術による水産業へのビジネス展開, 建築とエネルギー, Vol.61, 2020.
- 44) 江崎功浩: 過冷却解除型製氷技術による水産向けシャーベットアイス製氷設備, 月刊 BE 建築設備, 6月号, 2019.
- 45) 見上皓紀: シャーベットアイスを利用した水産物の高鮮度保持, 空気調和衛生工学会誌, 第92巻, 第5号, 31-36, 2018.
- 46) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 熊野寛之, 森本崇志, 谷野正幸: 氷スラリー中での氷粒凝集状態の評価方法の提案, 第12回潜熱工学シンポジウム, G09, 2023.11.
- 47) 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機を用いた熱駆動型氷スラリー製氷機の研究開発, 日本冷凍空調学会誌4月号, 2024 (掲載予定).
- 48) 谷野正幸: 排熱の高効率利用技術～工場排熱を利用する氷蓄熱技術～, NPO 法人 循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 49) 谷野正幸, 増田正夫, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 小林佳弘, 幡野博之, 村瀬和典: 廃プラスチックエネルギーの冷熱による高度有効利用, 空気調和・衛生工学会大会, (2023.9), I-45.
- 50) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志: 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発～第1報 オフライン熱輸送の大都市エリアでの評価事例～, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024.1), 18-3.
- 51) 増田正夫, 谷野正幸, 鎌田美志: 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発～第2報 離島エリアでの評価事例, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024.1), 18-4.
- 52) 鎌田美志, 増田正夫, 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 幡野博之, 熊野寛之: 廃プラスチックエネルギーの高度有効利用 第2報: 排熱の冷熱利用技術, 化学工学会第89年会, 2024 (予定).
- 53) 東京電力パワーグリッド株式会社; エネルギー状況報告書, 2022, <https://www.tepco.co.jp/pg/company/environment/warming/> (最終アクセス日: 2023.12.27).
- 54) 経済産業省ゼロエミチャレンジ企業リスト: https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/zero-emission_challenge/index_zeroemi.html (最終アクセス日: 2023.12.27).

ABSTRACT

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