

廃プラスチックエネルギーの高度有効利用※

谷野正幸・増田正夫・鎌田美志
成瀬一郎^{*1}・堀田幹則^{*2}・長沼宏^{*3}
折田久幸^{*4}・小山寿恵^{*5}・染矢聡^{*5}
小林佳弘^{*5}・幡野博之^{*6}・村瀬和典^{*6}
三苫好治^{*6}・熊野寛之^{*7}・森本崇志^{*7}

Advanced Effective Utilization of Waste Plastic Energy

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

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

1. はじめに

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

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

※ 本論文は、日本エネルギー学会・第61回石炭科学会議²⁾、令和6年度 空気調和・衛生工学会大会³⁾、第41回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス⁷⁾の講演論文を加筆修正したものである。

*1 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学、*2 国立研究開発法人産業技術総合研究所、*3 東北発電工業株式会社、

*4 学校法人八戸工業大学、*5 学校法人東京電機大学、*6 学校法人中央大学、*7 学校法人青山学院大学

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

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」¹⁾において、社会で大量に発生している廃プラスチックに対して、高度選別技術や新しい材料再生技術などを用いることにより、環境負荷を抑制しつつ、高効率なプラスチック資源循環システムを実現するための基盤技術を開発している。図 1 のように廃プラスチックの資源価値を飛躍的に高めるため、①複合センシング・AI 等を用いた廃プラスチック高度選別技術（SR: Sorting for Recycling）、②材料再生プロセスの高度化技術（マテリアルリサイクル MR: Material Recycle）、③高い資源化率を実現する石油化学原料化技術（ケミカルリサイクル CR: Chemical Recycle）、④高効率エネルギー回収・利用技術（エネルギーリカバリー ER: Energy Recovery）の開発を連携させて行い、廃プラスチックの品質に応じた最適な処理システムを構築することによって高度資源循環と環境負荷低減の両立を目指している。その結果、図のように廃プラスチックの輸出と単純焼却・埋め立ては行わない。

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

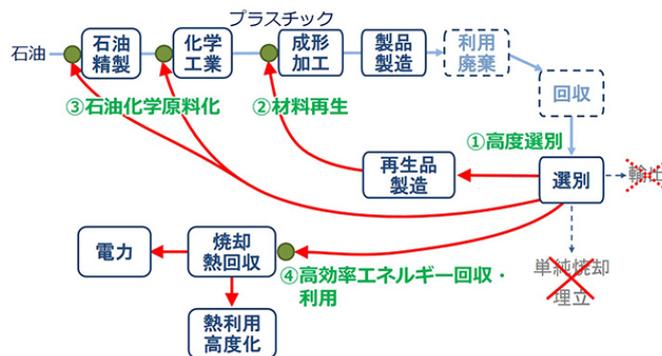


図 1 NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」の概要¹⁾

3. 高効率な排熱回収のための伝熱管表面改質技術の概要

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

っているのが現状である。また、灰付着や高温腐食を抑制するために蒸気温度を低くせざるを得ない状況で、発電効率も比較的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。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きた²⁻²⁴⁾。

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

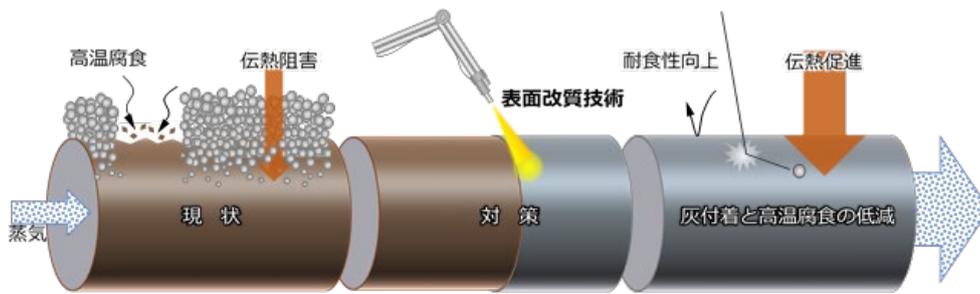


図 2 高効率排熱回収のための伝熱管表面改質技術の開発概要

本研究では、廃プラスチックを含む廃棄物由来の燃料を用いる焼却炉やボイラにおいて、高温および高圧な蒸気条件の実用化に向けて、熱力学平衡計算による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。

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

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

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

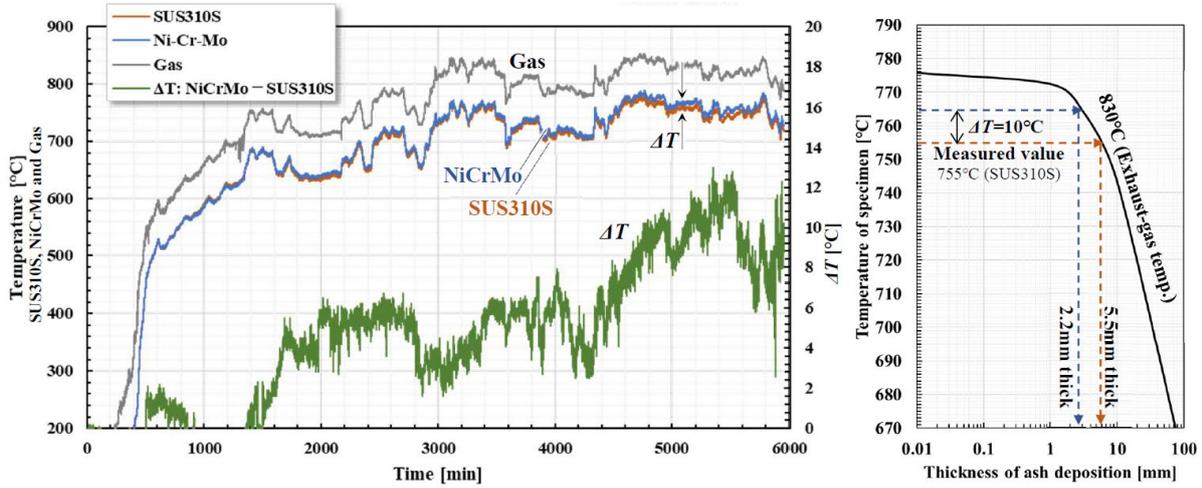


図3 各試験片と排ガスの測定温度の試料温度の計算値²⁴⁾

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

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

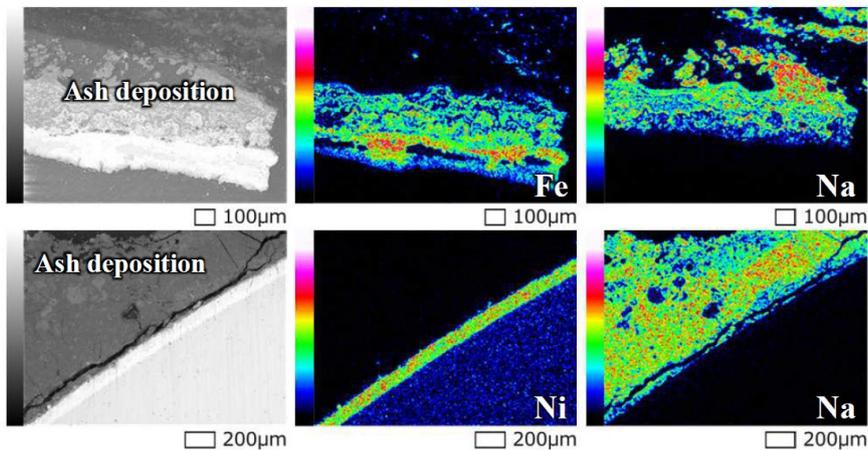


図4 SUS310S(上段)とNiCrMo(下段)の断面の走査電子顕微鏡画像(左側)とマッピング分析(右側)²⁴⁾

4. 低温排熱の有効活用のための冷熱利用技術

廃プラスチックエネルギーの有効利用には、前述の図 1 のように、まずは発電して電力利用するとともに、熱利用を高度化して、排熱需要を拡大することが重要である。そこで、温熱需要に加えて、図 5 のように物流業界などの冷熱需要の拡大のため、200℃以下の未利用低温排熱から氷スラリーを製造して供給することを想定した。図のように、0℃以下の冷熱を発生する吸収冷凍機を開発し、熱供給によって-5℃のブラインを製造し、製氷機にて0℃以下の流動性の高い氷スラリーを製造し、冷蔵車や冷蔵庫に氷スラリーを供給する。熱発生施設と熱需要施設が近距離にある場合は、直接、氷スラリーを供給するネットワークを容易に構築できるが、廃棄物処理施設を熱発生施設と想定した場合は両者が離れていることが多く、吸着剤蓄熱などのオフライン熱輸送システム²⁵⁻³⁰⁾が必要になる。この吸着剤蓄熱システムを高効率化するために、吸着剤の流動層乾燥などの研究を行っている。この研究内容の詳細については、参考文献³¹⁻⁴⁰⁾を参照されたい。

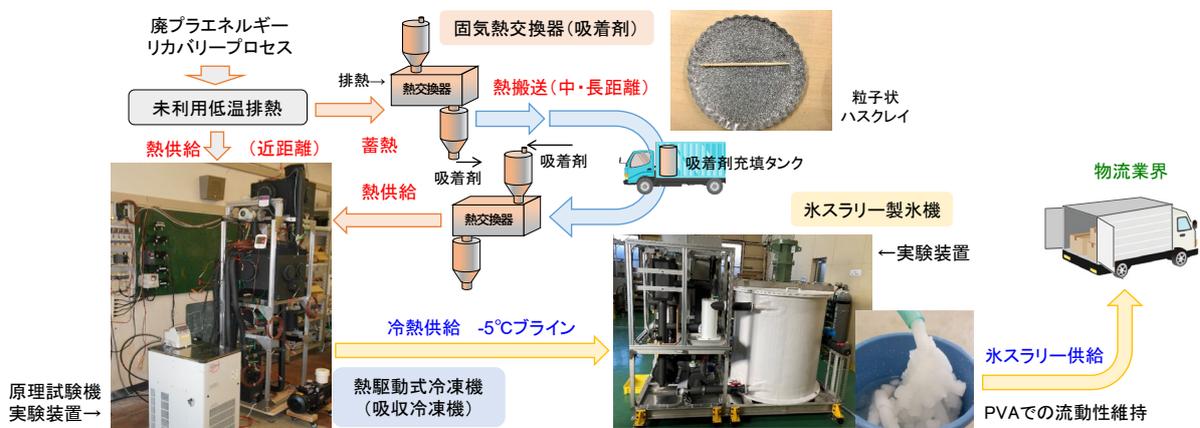


図 5 排熱の冷熱利用のための技術開発の概要図

4.1 氷点下冷熱の吸収冷凍機の開発

図 6 に示すように、氷点下冷熱製造の低温排熱駆動式冷凍機は、2 元吸収冷凍サイクルの構成で開発することにした。1 元目の高温側冷凍機は H₂O を冷媒とした従来型の吸収冷凍機であり、LiBr-H₂O を作動液体として、低温側冷凍機の吸収器の冷却水を製造する。2 元目の低温側冷凍機は H₂O/1-Propanol を冷媒とし、LiBr-H₂O/1-Propanol を作動液として、氷点下冷熱を製造する。

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

これまでに作動液や冷媒の種々の物性値を解明して、本吸収冷凍機内の冷媒および作動液の循環挙動の検討を行ってきた⁴¹⁻⁵⁰⁾。種々の冷媒の凝固点温度を検討し、ここでの冷媒である H₂O/1-Propanol の H₂O モル分率を 0.9 以下にすることで、-10℃以下の蒸発温度での設計ができることを確認した。作動液の結晶化温度により、吸収器の最低温度を決定した。また、冷凍能力 1kW 級の低温側吸収冷凍機の原理試験機を製作し、氷点下冷熱の製造を実験的に確認した。実験装置の概観は、前述の図 5 中の左側の写真を参

照されたい。なお、この原理試験機の再生器の模擬熱源には電気ヒータを用いた。

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

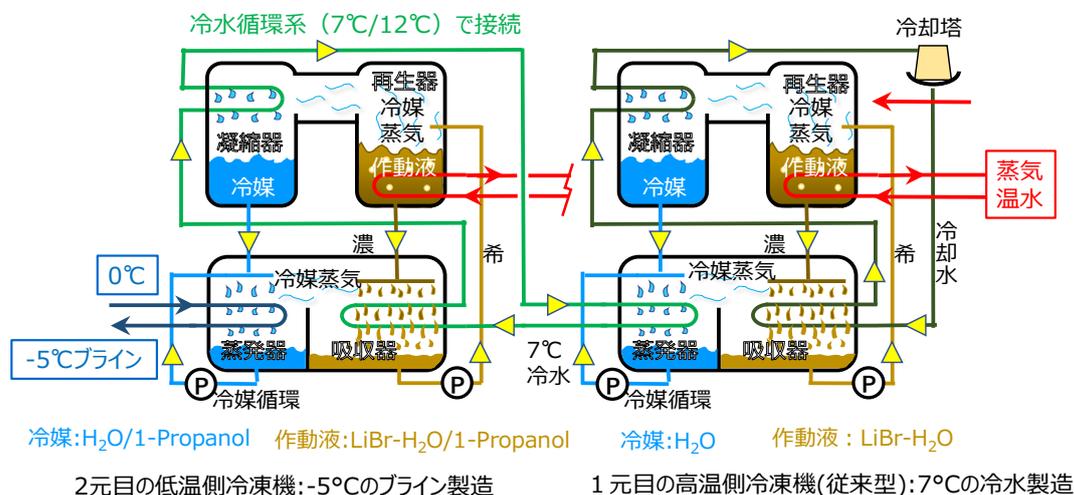


図6 開発中の氷点下冷熱を発生する2元吸収冷凍機の模式図

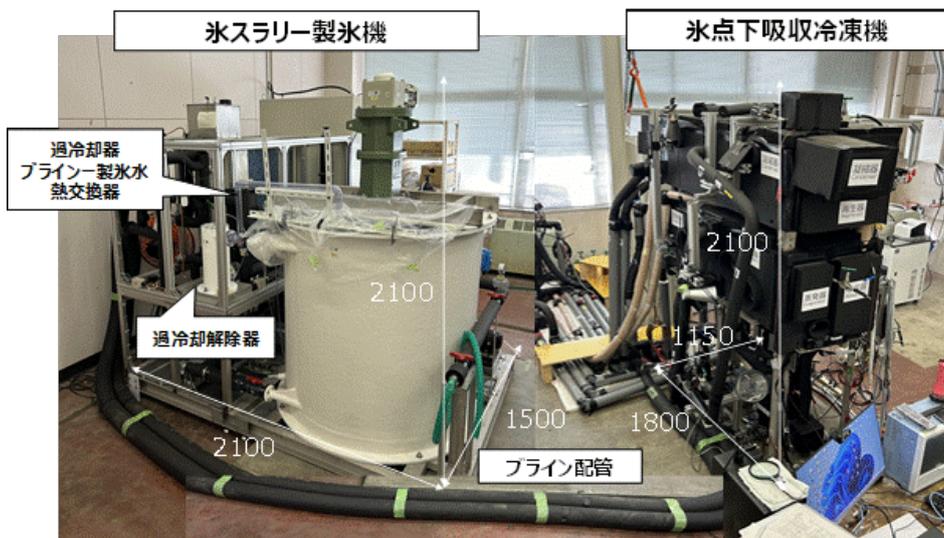


図7 排熱駆動型氷スラリー製氷機(熱リサイクルパッケージ)の試験装置の外観

4.2 排熱駆動型氷スラリー製氷機(熱リサイクルパッケージ)の開発

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

4.2.1 試験装置と方法

熱リサイクルパッケージの試験装置の構成機器を**表1**に示す。表のように1元目の冷凍機、2元目の吸収冷凍機、排熱を模擬した加熱器、冷却塔、製氷機、ブライン配管などで構成されている。開発対象ではない1元目の冷凍機には汎用の電動式冷凍機、加熱器には汎用の給湯器を使用した。また、製氷機は過冷却方式の氷スラリー製氷機⁵⁵⁻⁶⁰⁾である。

主要機器である氷点下吸収冷凍機と氷スラリー製氷機は図8のように、ブライン配管で接続されている。吸収冷凍機は主に凝縮器/再生器、蒸発器/吸収器の高圧/低圧の容器で構成されている。また、過冷却方式の氷スラリー製氷機は主に貯氷タンク、予熱器、過冷却器、過冷却解除器で構成されている。製氷水は0.75wt% NaClの低濃度塩水に、0.05 wt%のポリビニルアルコール (PVA) を添加したものである。本研究では不凍たんぱく質の水の凍結抑制効果の研究成果に基づき、PVAによって氷粒子の粗大化や凝集を抑制する技術の開発に取り組んでいる。氷粒子の粗大化抑制効果や氷スラリーの流動特性などについては、参考文献⁶¹⁻⁷⁰⁾を参照されたい。

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

表1 排熱駆動型氷スラリー製氷機(熱リサイクルパッケージ)の試験装置の構成機器

構成機器	仕様	備考
1 元目冷凍機	汎用/水冷冷凍機、冷凍能力：15 kW	試験用の1元目の冷凍機として使用
2 元目吸収冷凍機	氷点下吸収冷凍機、冷凍能力：3 kW	開発対象、設計冷凍能力：3~4 kW
加熱器	汎用/灯油炊き給湯器、出力：13.6 kW	排熱を模擬
冷却塔	汎用/小型冷却塔	1元目冷凍機放熱
製氷機	過冷却方式の氷スラリー製造装置	製氷水は塩水 (PVA 添加)

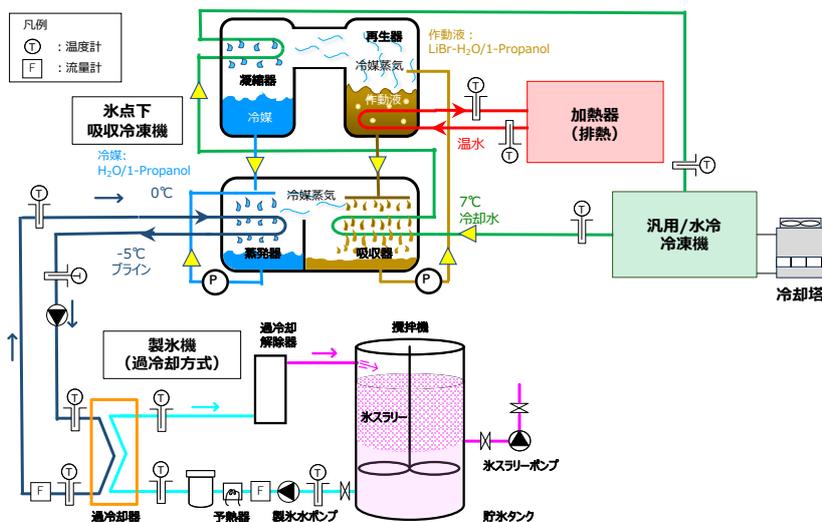


図8 排熱駆動型氷スラリー製氷機(熱リサイクルパッケージ)の試験装置の系統図

4.2.2 試験結果と考察

1元目の冷凍機、2元目の吸収冷凍機、排熱を模擬した加熱器、冷却塔、製氷機の全ての機器を運転した後、時間の経過とともに系内の水温が低下して、過冷却器で過冷却状態まで冷却され、過冷却解除器で氷スラリーが製造された。この製氷開始から約8時間にわたって蓄水運転を実施した。

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

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

下して-5°Cの定常状態に到達した。製氷機の過冷却器では過冷却状態が維持されるとともに、図のように製氷 IPF が 3.5%での約 8 時間の連続製氷を確認した。この連続製氷運転での冷凍能力は図 9 のように、約 3.2 kW であった。この冷凍能力や製氷 IPF は、吸収冷凍機から製氷機の過冷却器に送られるブラインの温度と流量から算出した。このような連続製氷運転の間、貯氷タンク内に氷スラリーが蓄積され続け、図 10 に示すように約 8 時間後の貯氷 IPF は 38wt%に到達した。

また、前述の図 8 のような貯氷タンク内の攪拌により、氷スラリーの流動性は維持されていることを観測した。連続製氷試験・蓄氷運転の終了の後、前述の図 8 の氷スラリーポンプ（汎用ポンプ）によって貯氷タンク内の氷スラリーを取り出すことが可能であり、低濃度塩水に 0.05 wt%の PVA を添加することで、氷スラリーの流動性が維持できることを確認した。

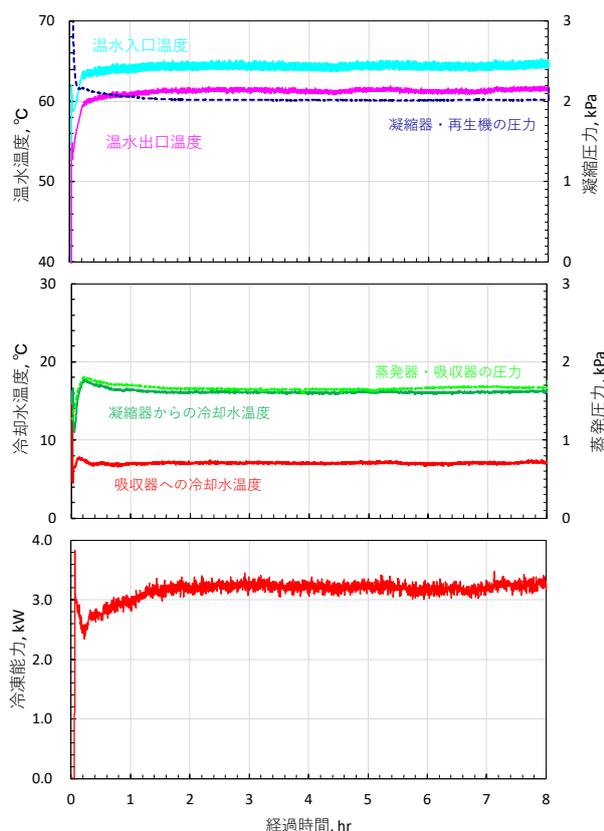


図 9 温水温度、冷却水温度、冷凍能力の経時変化

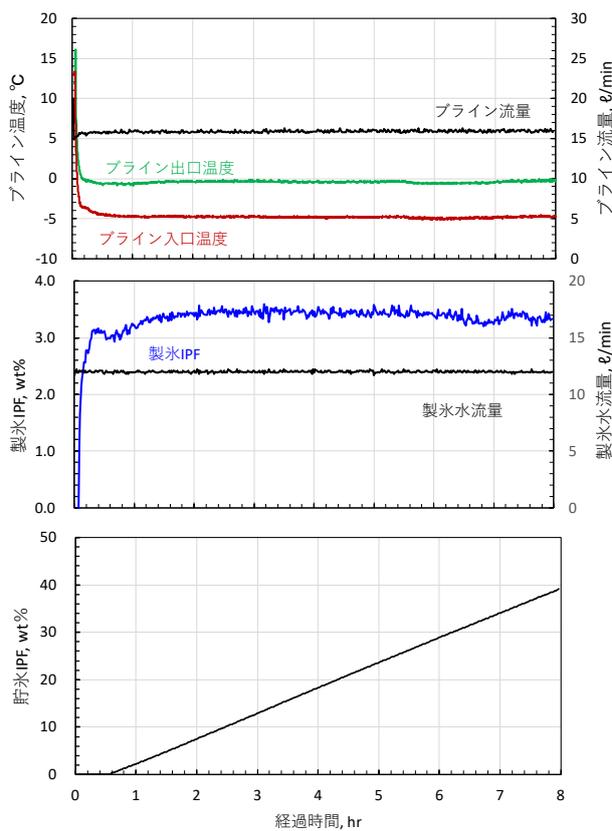


図 10 ブライン温度、製氷 IPF、貯氷 IPF の経時変化

5. 総合熱利用システムの評価技術

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

5.1 冷熱利用システムの評価モデルの概要^{71,72)}

冷熱利用システムの評価モデルの概要を図 11 に示す。図のように、評価モデルは 1)~8)の検討項目と Sub ①~④のサブツールで構成した。1) 廃プラ焼却施設と 2) 最終冷熱需要先の条件が入力条件であり、各々の熱量の最小値が熱利用システムの容量になる。つぎに、3) 乾燥吸着剤輸送の条件を想定し、Sub①の一日間トラック輸送モデルによって輸送時間を計算する。4) 大型トラックの仮定を組合せ条件として、Sub②の

吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールによる計算を行う。これらの繰返し計算によって、吸着剤の充填量などの蓄熱槽の仕様が決定される。5) 熱駆動式冷凍機の設定として、熱駆動式冷凍機を含め、水スラリーなどの熱媒体の種類や機器仕様・効率などを定めて、6) 廃プラ焼却施設・冷熱需要先の熱交換器・装置の仕様を決定し、Sub③のインシヤ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 11 中の下部は、エクセルベースのサブツールである。Sub①の一日間トラック輸送ツールでは、焼却場と配送センターの住所を入力して、それぞれの間の移動時間を Google Maps API より取得する。エクセル上において、Google Maps API⁷⁸⁾によって取得した移動時間とともに、蓄熱時間、接続時間、放熱時間を設定することで、図のようにトラック輸送のタイムスケジュール表が作成できる。初期値としては、各焼却場から最短時間の配送センターの間でのトラック輸送のタイムスケジュールが表示される。

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

Sub③のインシヤ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ンシヤ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、インシヤ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。

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

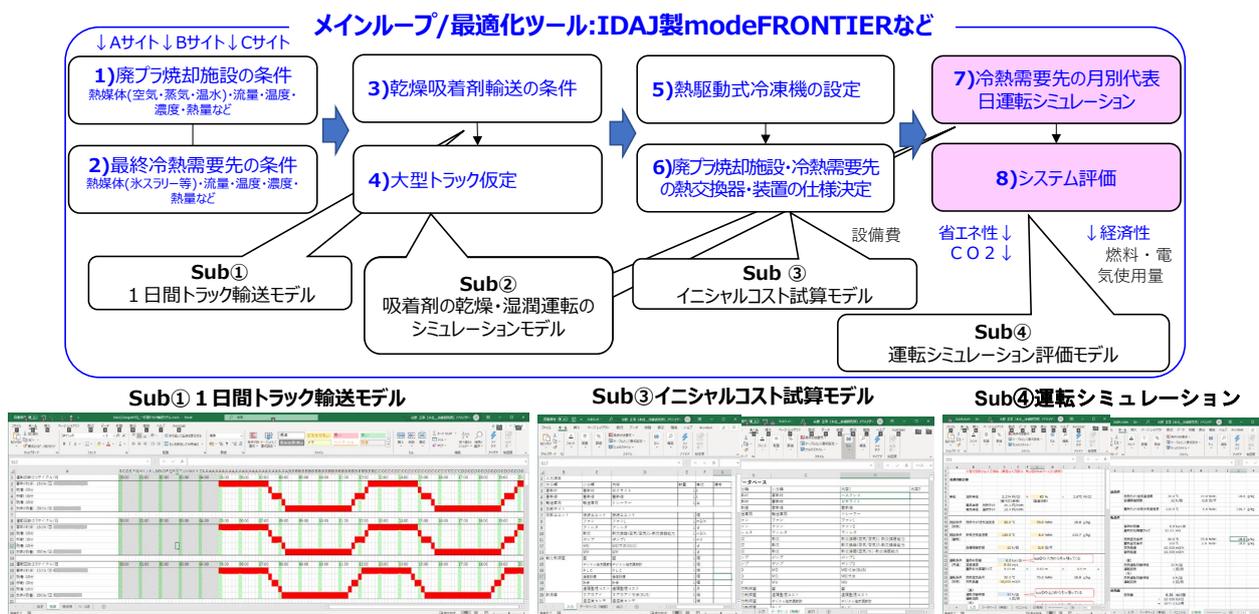


図 11 冷熱利用システムの評価モデルの概要化

5.2 大都市エリアでの評価事例 ^{73,75)}

ここでは、Sub①の一日間トラック輸送ツールを検証することを目的にして、大都市エリアの物流業界を対象にしてオフライン熱輸送システムが必要な場合と不要な場合をスクリーニングすることを試みた。図12のように、(1)のオフライン熱輸送システムを必要とする場合は、配送エリア外に廃プラスチックを焼却する処理施設があり、オフライン熱輸送を必要とする。これに比較して、(2)のオフライン熱輸送システムが不要な場合は配送エリア内に処理施設があり、配送トラックが配送センターに戻る前に処理施設に設置された氷スラリー製氷機に立ち寄って、輸送トラックの冷蔵庫に氷スラリーを供給することが可能になると考えた。

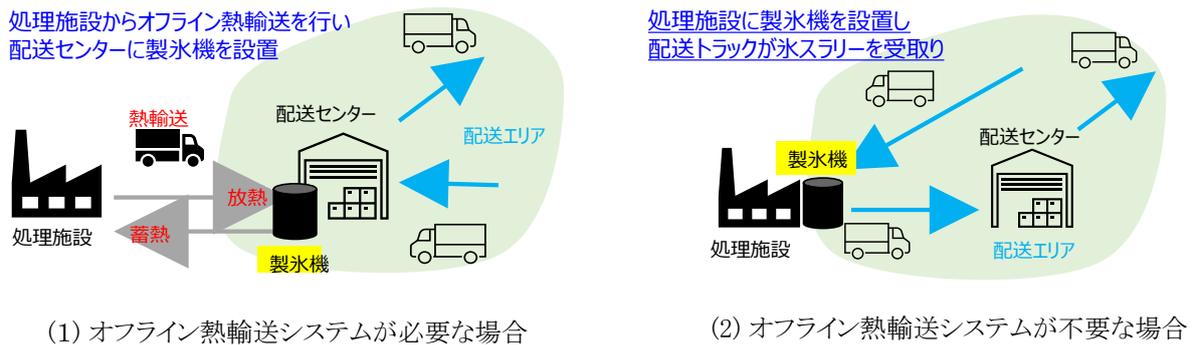


図12 オフライン熱輸送システムのスクリーニング

5.2.1 評価対象

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

表2 計算条件と結果

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

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

5.2.2 計算結果と考察

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

図13には東京都の産業廃棄物処理施設の場合について、配送センターへの移動時間の結果を詳細に示す。図の棒グラフは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、北海道の場合はその地域自体が広域であることを考慮したい。

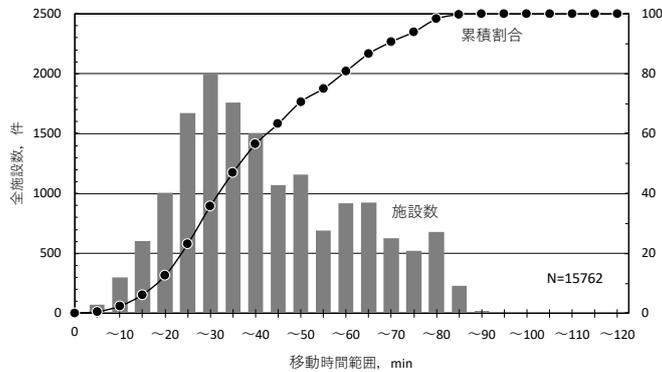


図13 東京都の産業廃棄物処理施設と配送センターの移動時間の分布

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

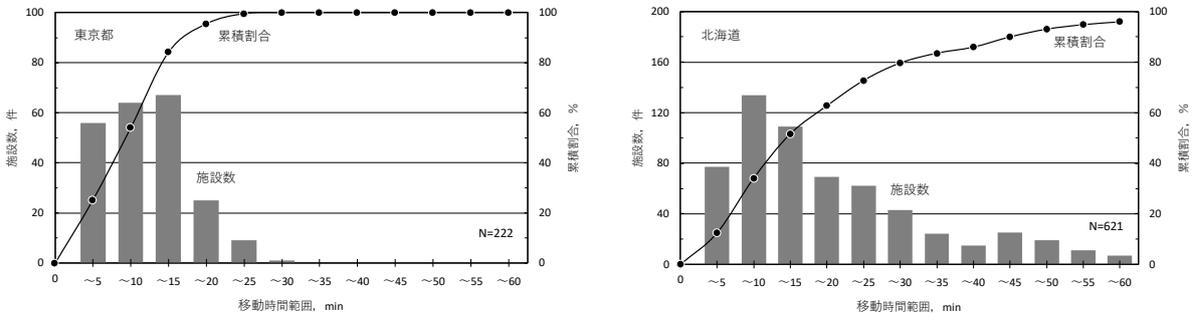


図14 東京と北海道における産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

5.2.3 オフライン熱輸送システムの検証結果

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

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

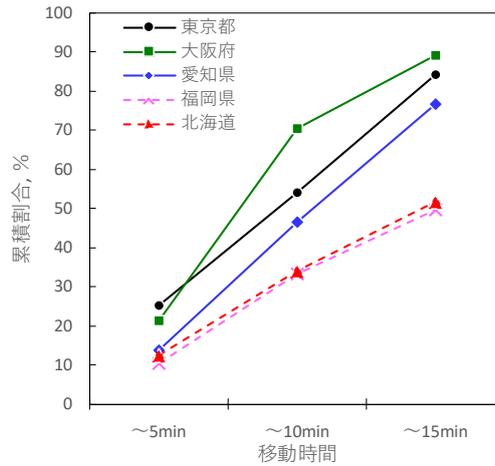


図 15 産業廃棄物処理施設毎の最短の配送センターまでの移動時間の分布

5.2.4 隣接する場合の評価結果⁷⁵⁾

前述のように東京都のような大都市エリアでは、製氷需要地の配送センターと排熱発生地の処理施設が隣接するケースが多く存在する。ここでの評価対象の基本情報を表 3 に示す。熱の需要と供給が隣接するケースでは配管接続ができる場合もあるので、ここでは 3 つのケースで評価を行った。氷スラリーで熱搬送するケースを「①配送トラック/氷」、需要と供給を配管で接続して熱搬送するケースを「②パイプライン」、吸着材で熱搬送することを「③オフライン熱輸送」とした。評価結果を図 16 と図 17 に示す。図 16 のようにイニシャルコスト回収年数は、「①搬送トラック/氷」で 10 年、「②パイプライン」で 12 年、「③オフライン熱輸送」で 22 年であった。また、図 17 のように一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量は、「①配送トラック/氷」と「②パイプライン」で 30%、「③オフライン熱輸送」で 66%であり、従来方式よりも有利になった。このように熱の需要と供給が隣接するケースでは、従来方式に比べて一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量を 30%まで低減できることが、本システムの大きな魅力の一つと考える。

表 3 東京都の清掃工場と某物流支店の基本情報

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

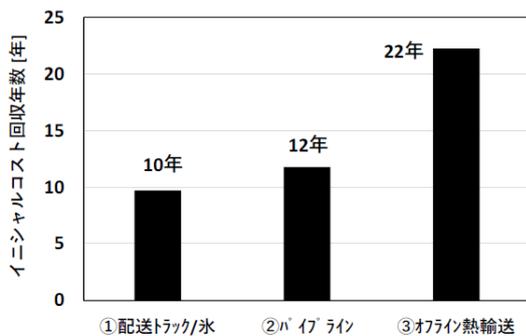


図 16 イニシャルコスト回収年数の評価結果

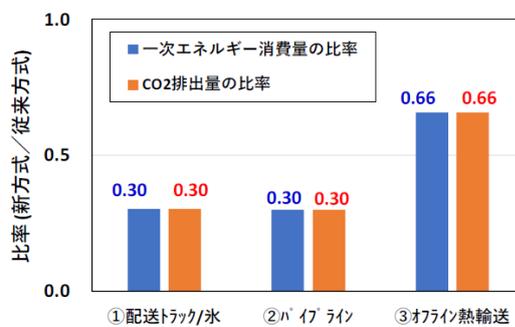


図 17 一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量の評価結果

5.3 地方エリアでの評価事例^{74,75)}

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

今回、評価対象としたのは、伊豆諸島にある伊豆大島（東京都大島町）、三宅島（東京都三宅村）、八丈島（東京都八丈町）の3島である。表4に各島の基本情報を示す。図18には、各島における排熱発生場所である廃棄物処理場、並びに、主な冷熱需要である漁港の位置関係を示す。

表4 伊豆大島, 三宅島, 八丈島の基本情報

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

注：2023年10月1日における人口

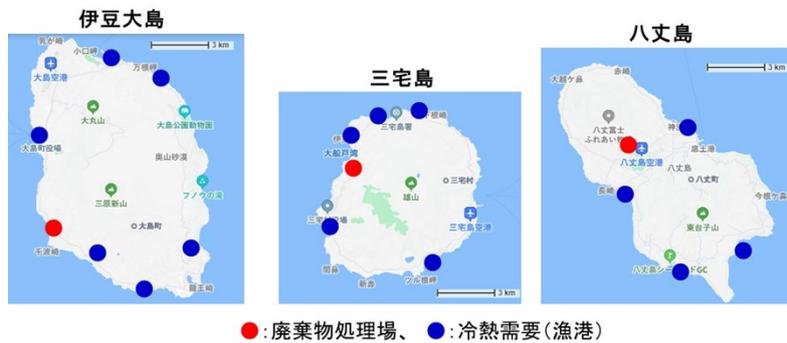


図18 3島における廃棄物処理場と冷熱需要(漁港)の位置

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

5.3.1 評価条件と方法

システム適合性を評価するに当たり、今回は一般的な廃棄物処理場を対象としたので、廃棄物処理量当たりの推定排熱量は一般的な値である 8.8MJ/kg とした。本 NEDO 事業で開発中の低温排熱対応型の吸収式冷凍機の COP（排熱量当たりの発生冷熱の割合）は暫定的に 0.3 として、比較対象となる従来方式の製氷用冷凍機の COP（消費電力量当たりの発生冷熱の割合）は 3.0 とした。氷の販売価格を氷 1 トン当たり 0.5 万円、電気料金を 25 円/kWh とした。吸着剤やシャーベット氷を輸送するトラックの燃費は、搭載重量毎に小型（3 トン未満）を 11km/L、中型（3 トン以上、6.5 トン未満）を 7km/L、大型（6.5 トン以上）を 4km/L に設定した。電力や軽油の原単位（一次エネルギー消費量原単位や CO₂ 排出量原単位）は、離島独自の値を採用した⁷⁹⁾。

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

5.3.2 評価結果と考察

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

表 5 評価結果の一覧

	伊豆大島 (熱輸送なし)	三宅島 (熱輸送なし)	八丈島 (熱輸送なし)	八丈島 (熱輸送あり)	
1. 焼却ゴミからの排熱量と製氷可能量					
焼却ゴミ処理量	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 19 に示す。「熱輸送なし」の八丈島では、回収年数が 6.1 年になり最も良好な評価結果が得られた。それ以外のケースでは全て 10 年以上になった。これは、八丈島が他の島と比べて冷熱需要が大きいためである。一方、図表には示していないが、伊豆大島や三宅島の「熱輸送あり」の評価では、回収年数が数十年と極端に大きくなった。これは、システム規模に対する冷熱需要量が小さいために、導入システムのイニシャルコストが相対的に割高になったからである。

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

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

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 20** の右側の赤色の棒グラフで示す。「熱輸送なし」の伊豆大島と八丈島、並びに「熱輸送あり」の八丈島のケースでは、従来方式に比べて CO₂ 排出量を半分程度かそれ以下まで低減できた。一方、三宅島では「熱輸送なし」であっても、従来方式よりも 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。

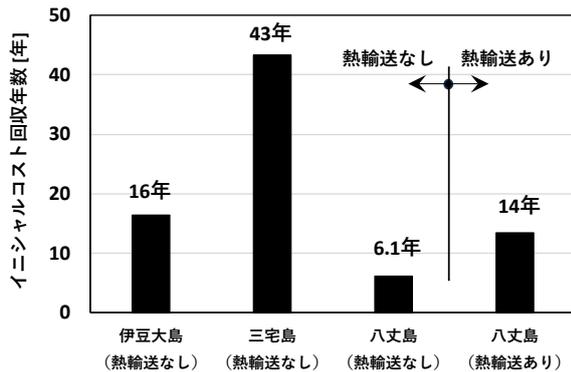


図 19 イニシャルコスト回収年数の評価結果

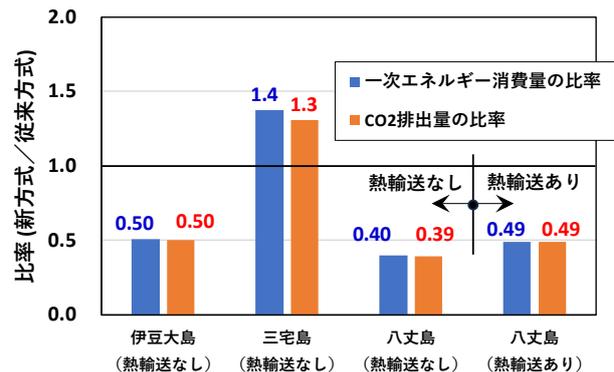


図 20 一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量の評価結果

5.3.3 総合熱利用システムへの適合性の考察

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

本報で評価を行った伊豆大島、三宅島、八丈島に関しては、イニシャルコスト回収年数、一次エネルギー消費量、並びに 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。

5.3.4 冷熱需要の大きい大規模漁港での適合性の考察⁷⁵⁾

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

表 6 彦岐と下関の事例の基本情報

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

評価結果を図 21 と図 22 に示す。図 21 はイニシャルコスト回収年数であり、図 22 は従来方式に対する一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量の割合である。

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

一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量は、双方とも、「熱輸送なし」で従来方式に比べて 37～43%、「熱輸送あり」で 69～73%であった。熱輸送の有無にかかわらず、従来方式よりも有利になることが分かった。

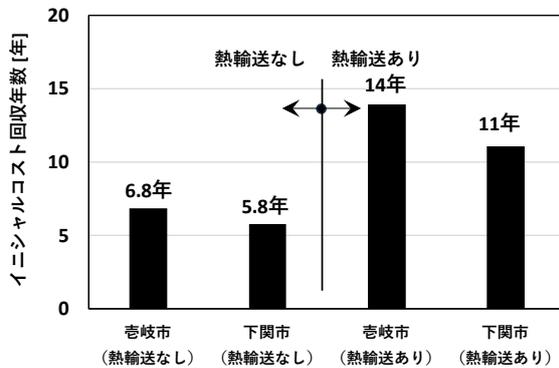


図 21 イニシャルコスト回収年数の評価結果

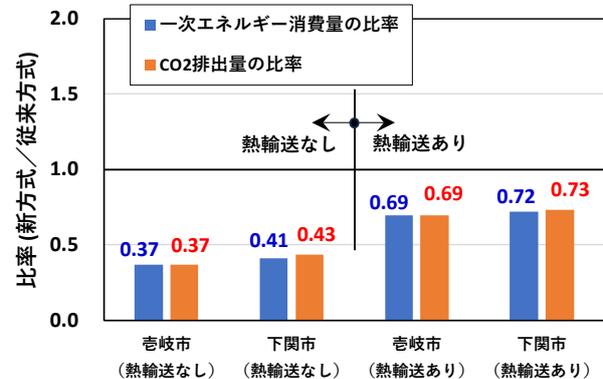


図 22 一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量の評価結果

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

一方、一次エネルギー消費量と CO₂ 排出量は、殆どのケースで従来方式よりも有利になることが分かった。これは、本システムの大きな魅力の一つと考える。

5.4 中核都市エリアでの評価事例^{76,77)}

八戸港には排熱供給が可能なリサイクル工場エリアと漁港などの氷スラリー消費エリアが隣接しており、八戸湾岸エリアは総合熱利用システムや熱リサイクルパッケージの実証に好適な中核都市エリアである。ここでは、八戸工業大学での熱リサイクルパッケージの製氷試験のプレスリリース⁴⁷⁾を通じて、八戸湾岸エリアのリサイクル工場の関係者との情報共有を行ってきた^{10,71)}。

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

6. おわりに

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

2050 年のカーボンニュートラルに向けて、電化・水素化とともに省エネルギーが重要であり、排熱利用の拡大は 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。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」（JPNP20012）の結果、得られたものである。NEDOをはじめ、関係の皆様方に感謝を申し上げます。

文 献

- 1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）HP：
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100179.html（最終アクセス日：2023.12.27）
- 2) 佐伯達哉, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎：産業廃棄物灰の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) 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.
- 4) Kaito Onoda, Yasuaki Ueki, Ryo Yoshie, Ichiro Naruse: Molten Salt Formation Characteristics of Industrial Waste Ash and Control of Ash Deposition, International Conference on Materials and Systems for Sustainability, 2021.
- 5) Hiroshi Naganuma, Takehito Mori, Sho Watanabe, Akihiro Sawada, Taeko Goto, Yasuaki Ueki, Ryo Yoshiie, Ichiro Naruse: Ash deposition mechanisms in waste-to-energy plants, International Conference on Power Engineering (ICOPE-2021), 2021.
- 6) 長沼宏：固体燃焼における灰付着と高温腐食, 第 58 回石炭科学会議, 2021.
- 7) 長沼宏, 成瀬一郎, 堀田幹則, 幡野博之, 野田英彦, 稲田孝明, 谷野正幸：廃棄プラスチックスエネルギーの高度有効利用, - I - 高温排熱の有効利用, 化学装置, 1 月号, 工業通信, 43-47, 2022.
- 8) 産業技術総合研究所, 名古屋大学, 東北発電工業：廃プラスチックからの高温熱回収に関する研究開発の紹介, 日本機械学会動力エネルギーシステム部門, ニュースレター, 2022/09.
- 9) 佐伯達哉, 義家亮, 植木保昭, 成瀬一郎：産業廃棄物処理炉内における灰付着制御, 第 31 回日本エネルギー学会大会, 2022.
- 10) 成瀬一郎：高効率排熱回収技術の開発～伝熱管表面改質・回収熱量増大・長寿命化～, NPO 法人循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 11) 堀田幹則：高効率エネルギー回収・利用システム開発 ～リサイクル困難な廃プラスチックからの高効率なエネルギー回収と冷熱利用～, 第 37 回新産業技術促進検討会シンポジウム「NEDO『革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発』プロジェクト進捗報告会～プラスチック資源循環を実現する技術とは～」, 2022.
- 12) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 渡邊章, 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.
- 13) 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：塩化物環境下における高温加速酸化機構の速度論的解析, 日本エネルギー学会・第 59 回石炭科学会議, 2022.
- 14) 長沼宏, 後藤妙子, 澤田晃宏, 森岳人, 渡邊章, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭：廃棄物系バイオマス処理プラントにおける灰付着と高温腐食機構, 日本エネルギー学会・第 59 回石炭科学会議, 2022.
- 15) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition mechanisms in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, vol.9, No.4, 21-00435, 2022.
- 16) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 渡邊章, 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, 日本エネルギー学会・第 60 回石炭科学会議発表論文集, 2-16, 2023.
- 17) 長沼宏, 後藤妙子, 澤田晃宏, 森岳人, 渡邊章, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭：廃棄物燃焼条件における高温腐食機構の速度論的考察, 日本エネルギー学会・第 60 回石炭科学会議発表論文集, 2-17, 2023.
- 18) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, Ichiro NARUSE: Ash deposition and corrosion mechanisms of tubes in Waste-to-Energy plants, Proceedings of the International

Conference on Power Engineering (ICOPE-2022), 2023.

- 19) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIE, Ichiro NARUSE : Ash deposition and corrosion mechanisms of tubes in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, 11, 2, 2024.
- 20) 森岳人, 長沼宏, 堀田幹則, 成瀬一郎: 廃棄プラスチックエネルギーの高度有効利用 第1報:伝熱管の表面改質技術, 化学工学会第89年会, 2024.
- 21) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 山崎拓矢, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭: 塩化物存在下における高温加速酸化機構の解析, 材料と環境 2024.
- 22) 長沼宏, 後藤妙子, 澤田晃宏, 森岳人, 山崎拓矢, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭: 廃棄物燃焼条件におけるアルカリ塩化物による加速酸化機構, 材料と環境 2024.
- 23) 長沼宏, 森岳人, 成瀬一郎: 固体燃焼装置における灰付着・高温腐食の機構と対策, 工業加熱, 61, 4, 20, 2024.
- 24) 長沼宏, 澤田晃宏, 森岳人, 後藤妙子, 小坂祥枝, 成瀬一郎: 廃棄物処理プラントにおける灰付着・高温腐食の低減技術, 日本エネルギー学会・第61回石炭科学会議, 2024.
- 25) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 鈴木正哉, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第1報—小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, 45巻, 281号, 9-17, 2020.
- 26) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第2報—低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着時の発熱量について, 空気調和・衛生工学会論文集, 45巻, 285号, 1-8, 2020.
- 27) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第3報—吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 46巻, 290号, 39-46, 2021.
- 28) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第4報—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.
- 29) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第5報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47巻, 301号, 9-16, 2022.
- 30) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第6報—塗装工程での除湿利用の実証試験, 空気調和・衛生工学会論文集, 47巻, 308号, 11-18, 2022.
- 31) 王荀, 新井教馬, 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.
- 32) 木村拓雅, 加藤貴大, 幡野博之: 吸着剤の流動層乾燥, 第27回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021.
- 33) 木村拓雅, 幡野博之, 野田英彦, 稲田孝明, 谷野正幸, 長沼宏, 堀田幹則, 成瀬一郎: 廃棄プラスチックエネルギーの高度有効利用, - II - 低温排熱の有効利用, 化学装置, 1月号, 工業通信, 48-54, 2022.
- 34) 及川慈英, 新井一馬, 幡野博之: 低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第53回秋季大会, 2022.
- 35) 幡野博之, 新井一馬, 及川慈英: 低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第53回秋季大会, 2022, ST-29.
- 36) 大関泰知, 鈴木翔太, 王ジュエ, 及川慈英, 幡野博之, 村瀬和典: 低温排熱有効利用に向けた吸着剤蓄熱システムの研究- 吸着剤特性と蓄熱性能, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会 2023.
- 37) 王ジュエ, 及川慈英, 大関泰知, 鈴木翔太, 幡野博之, 村瀬和典: 蓄熱システムにおける吸着剤熱発生特性に関する研究, 化学工学会, 流動層に関する学生オンライン発表会.
- 38) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之: 蓄熱システムの吸着剤連続乾燥特性, 化学工学会, 流動層に関する学生

オンライン発表会.

- 39) 鈴木翔太, 王ジュエ, 村瀬和典, 幡野博之: 低温排熱有効利用のための蓄熱システム用吸着剤連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
- 40) 幡野博之, 王ジュエ, 及川慈英, 鈴木翔太, 村瀬和典: 吸着剤蓄熱システムの熱発生特性に関する研究, 化学工学会第 54 回秋季大会, 2023.
- 41) 小田島聡, 野田英彦, 高橋晋: アルコール水溶液冷媒による氷点下冷熱製造の可能性, 化学工学会秋季大会講演要旨 DA103, 2017.
- 42) 磯嶋将, 野田英彦, 正野孝幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用作動流体 LiBr- 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.
- 43) 正野孝幸, 野田英彦, 磯嶋将, 片山正敏, 折田久幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用作動液の飽和特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会 (岡山), E321, 2022.
- 44) 磯嶋将, 野田英彦, 折田久幸, 片山正敏, 正野孝幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用作動流体 LiBr-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.
- 45) 折田久幸: 氷点下冷熱を生成する吸収冷凍機の研究歴史から学ぶカーボンニュートラルへのアプローチ, 第 60 回伝熱シンポジウム, 2023.5.
- 46) 折田久幸: 南部地方のカーボンニュートラルに関する研究, 青森県新産業創造課主催研究シーズプレゼン会, 2024.2.
- 47) NEDO ニュースリリース “温水を使用した氷スラリー製造の連続化に成功 —未利用熱を活用し、高い熱利用効率を実現—”, : https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101748.html, 2024.5.29 (最終アクセス日: 2025.1.24).
- 48) 折田久幸: 八戸工業大学のカーボンニュートラル教育, 化学工学会東北支部ニュースレター, 2024.7.
- 49) 千葉祐聖, 正野孝幸, 佐藤恵, 折田久幸: 3kW 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機実験, 化学工学会第 55 回秋季大会, 2024.9.
- 50) 佐藤恵, 正野孝幸, 千葉祐聖, 折田久幸: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機の冷媒循環挙動の検討, 化学工学会第 55 回秋季大会, 2024.9.
- 51) 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵: 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機を用いた熱駆動型氷スラリー製氷機の研究開発, 日本冷凍空調学会誌 4 月号, 2024.
- 52) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 折田久幸, 小山寿恵, 熊野寛之: 廃プラスチックエネルギーの氷スラリーによる冷熱での高度有効利用, 令和 6 年度 空気調和・衛生工学会大会, F-10, 2024.9.
- 53) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志, 折田久幸, 小山寿恵, 熊野寛之: 廃プラスチックエネルギーの高度有効冷熱利用 第 1 報: 熱駆動型氷スラリー製氷機の開発, 2024 年度日本冷凍空調学会年次大会, E211, 2024.9.
- 54) 折田久幸, 小山寿恵, 谷野正幸, 小山俊隆: 低温排熱の温水から氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機と氷スラリー製氷機により構成される熱リサイクルパッケージ, クリーンエネルギー, 日本工業出版, 55-59, 2024.11.
- 55) 三戸大介, 小澤由行, 谷野正幸, 稲田孝明: 水の過冷却解除に関する能動制御技術の開発, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.17, No.2, 191-201, 2000.
- 56) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二: 氷スラリーによるチルド水供給設備に関する研究〜蓄氷解氷同時運転での満蓄制御と給水制御〜, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.30, No.3, 319-329, 2013.
- 57) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二: 乳製品加工工場における氷スラリーによるチルド水供給設備, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.30, No.3, 331-339, 2013.
- 58) 万尾達徳: 過冷却解除方式製氷技術による水産業へのビジネス展開, 建築とエネルギー, Vol.61, 2020.
- 59) 江崎功浩: 過冷却解除型製氷技術による水産向けシャーベットアイス製氷設備, 月刊 BE 建築設備, 6 月号, 2019.
- 60) 見上皓紀: シャーベットアイスを利用した水産物の高鮮度保持, 空気調和衛生工学会誌, 第 92 巻, 第 5 号, 31-36, 2018.
- 61) 小山寿恵, 稲田孝明: III 型不凍タンパク質の低濃度水溶液中で成長する氷結晶ベール面上のピット形成過程の観察, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.33, No.3, 251-259, 2016.
- 62) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 熊野寛之, 森本崇志, 谷野正幸: 氷スラリー中での氷粒凝集状態の評価方法の提案, 第 12 回潜熱工学シンポジウム, G09, 2023.11.

- 63) 小山寿恵, 小林佳弘, 稲田孝明, 谷野正幸, 折田久幸, 野田英彦, 幡野博之: 廃プラスチックエネルギーからの冷熱を用いる氷スラリー製造, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B232, 2023.
- 64) 請川颯一, 小山寿恵, 小林佳弘, 谷野正幸, 稲田孝明: 氷スラリー製氷機で製造した氷スラリーへの PVA 添加による氷粒子の成長抑制効果, 日本冷凍空調学会大会 (東京), B233, 2023.
- 65) Yuta Komiya, Ryo Sakamoto, Takashi Morimoto, Hiroyuki Kumano, Toshie Koyama, Yoshihiro Kobayashi, Masayuki Tanino: Effect of pipe shape on flow characteristics of ice slurry with dilute agglomeration inhibitor, The 11th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, 2024,4.
- 66) 小山寿恵, 染矢聡, 小林佳弘, 谷野正幸, 折田久幸, 森本崇志, 熊野寛之: 廃プラスチックエネルギーの高度有効冷熱利用 第2報: 氷スラリー中の氷粒子の凝集に対してポリビニルアルコールが与える影響, 2024 年度 日本冷凍空調学会 年次大会, 2024.9.
- 67) 石垣匠, 小宮佑太, 森本崇志, 小山寿恵, 谷野正幸, 熊野寛之: 氷粒子の速度分布に基づくアイススラリーの流動様相の分類, 水蒸気性質シンポジウム —日本の GX と水素・アンモニア利用技術 の最前線—, 2024.10.
- 68) 渡辺拓登正, 森本崇志, 小山寿恵, 谷野正幸, 熊野寛之: アイススラリー中における氷粒子の凝集力評価, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2024, 2024.10.
- 69) Hiroyuki Kumano, Takashi Morimoto, Kohta Tanaka, Toshie Koyama, Masayuki Tanino: Effects of solutes and additives on ice growth prevention in ice slurry production, International Journal of Refrigeration, 2024.10.
- 70) Yuta Komiya, Takumi Ishigaki, Takashi Morimoto, Toshie Koyama, Masayuki Tanino, Hiroyuki Kumano: Effect of Solute Concentration and Pipe Geometry on Flow Characteristics of Ice Slurry, The 3rd Pacific Rim Thermal Engineering Conference, , 2024.12.
- 71) 谷野正幸: 排熱の高効率利用技術〜工場排熱を利用する氷蓄熱技術〜, NPO 法人 循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 72) 谷野正幸, 増田正夫, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 小林佳弘, 幡野博之, 村瀬和典: 廃プラスチックエネルギーの冷熱による高度有効利用, 空気調和・衛生工学会大会, (2023.9), I-45.
- 73) 谷野正幸, 増田正夫, 鎌田美志: 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発〜第1報 オフライン熱輸送の大都市エリアでの評価事例〜, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024.1), 18-3.
- 74) 増田正夫, 谷野正幸, 鎌田美志: 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発〜第2報 離島エリアでの評価事例, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2024.1), 18-4.
- 75) 増田正夫, 谷野正幸, 鎌田美志: 廃プラスチックエネルギー有効利用のための総合熱利用システム評価技術の開発〜第3報 地方都市エリア等での評価事例, 第41回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, (2025.1), 3-2.
- 76) 鎌田美志, 増田正夫, 谷野正幸, 野田英彦, 折田久幸, 小山寿恵, 幡野博之, 熊野寛之: 廃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, (2024.3), E214.
- 77) 鎌田美志, 増田正夫, 谷野正幸, 折田久幸, 小山寿恵: 廃プラスチックエネルギーの高度有効利用—排熱による製氷技術の漁港への適用検討—, 化学工学会第90年会, (2025.3), K308.
- 78) Google Maps API , <https://developers.google.com/maps/apis-by-platform?hl=ja>
- 79) 東京電力パワーグリッド株式会社; エネルギー状況報告書, 2022 : <https://www.tepco.co.jp/pg/company/environment/warming/> (最終アクセス日: 2025.1.24).
- 80) 経済産業省ゼロエミチャレンジ企業リスト: https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/zero-emission_challenge/index_zeroemi.html (最終アクセス日: 2025.1.24).

ABSTRACT

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