

## 廃プラスチックエネルギーの高度有効利用※

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

### Advanced Effective Utilization of Waste Plastic Energy

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

我々は2020年度から、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」において、エネルギーリカバリー（ER）チームに参画してきた。廃プラスチック焼却施設での高効率な熱回収のため、高耐久性・難灰付着性を有する金属系とセラミック系の伝熱材料と、伝熱管の表面改質に関する基盤研究を行っている。また、回収した熱を付加価値の高い冷熱として利用するため、吸着剤蓄熱、低温排熱で0℃以下の冷熱を発生する吸収冷凍機、および氷スラリー利用に関する技術の高度化を行っている。さらに、熱回収から氷スラリー利用先までの総合熱利用システムの評価技術を開発し、様々な地域での事例を検討していく予定である。本報では、本研究開発の背景とERチームでの技術開発の概要を紹介する。

#### 1. はじめに

近年の中国の廃プラスチック輸入規制に端を発したアジア諸国の廃プラスチック輸入規制強化などにより、これまで日本から輸出していた廃プラスチックを含むプラスチック資源について、リサイクルなどの適正な処理が急務となっている。また、「プラスチック資源循環戦略」（2019年5月31日策定）が策定され、革新的リサイクル技術の開発が我が国の重点戦略の一つとして掲げられている。図1に日本における廃プラスチックの処理処分量と有効利用率の推移を示す。廃プラスチックの処理処分量は減少傾向に、その有効利用率は増加傾向にあり、総排出量規制とリサイクル促進の効果が表れていることがわかる。しかし、未利用量は依然として多く、そのうち約70万トン/年は単純焼却処理となっている。そのため、マテリアルリサイクル（MR: Material Recycle）、ケミカルリサイクル（CR: Chemical Recycle）、エネルギーリカバリー（ER: Energy Recovery）および分離・選別（SR: Sorting for Recycling）の各プロセスの技術革新が必要である。さらにはライフサイクルアセスメントにより、リサイクルシステム全体の最適化と高度化が求められている。我々は2020年度から、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」<sup>2)</sup>において、ERチームに参画してきた。

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

\*1 東海国立大学機構名古屋大学、\*2 国立研究開発法人産業技術総合研究所、\*3 東北発電工業株式会社、\*4 中央大学、

\*5 八戸工業大学、\*6 東京電機大学

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

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

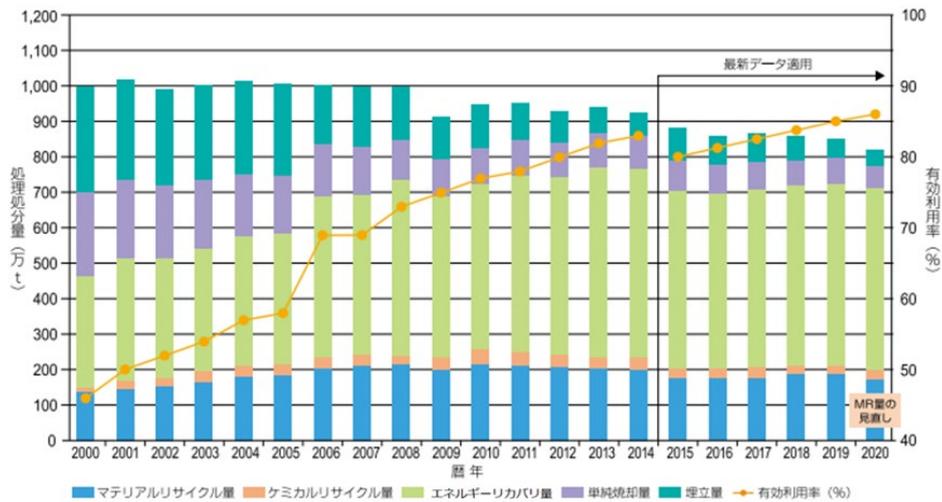


図 1 日本の廃プラスチックの処理処分量と有効利用率<sup>1)</sup>

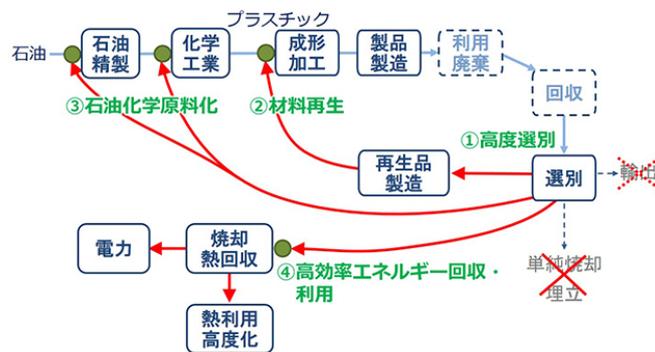


図 2 NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」の概要<sup>2)</sup>

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

## 2. 高効率な排熱回収

ER としては焼却時に発生する熱を回収して発電や熱利用がなされており、小規模・分散型の電源としてその重要性が見直されている。しかし、廃プラスチックの焼却時には塩素や硫黄を含むガスや低融点の灰が発生することがあり、ボイラなどの伝熱管表面に灰が付着して、伝熱管の高温腐食が問題になることが多い。例えば、一般廃棄物発電設備において発生する塩素は、家庭系ごみの場合、主に容器包装やラップなどのプラスチックごみに由来しており、全塩素の約 75%を占めている<sup>5)</sup>。ごみ中の塩素と実際に伝熱面上の付着層に含まれる塩素の含有率には明確な相関があるので<sup>6)</sup>、プラスチック混入はプラントの伝熱管の寿命や灰付着に直接影響することになる。

塩素を含む廃棄物燃焼 ER 施設における高温腐食に対し、経済産業省と NEDO により、高効率廃棄物発電システムに関する技術開発が精力的に実施された（平成 3 年度～平成 11 年度）<sup>7)</sup>。そのプロジェクトによって耐食性に優れた伝熱管や表面改質技術における材料開発が大きく進展した。また、同様の課題に対し、環境研究総合推進プロジェクトによって、溶射法などによる課題解決や灰付着・高温腐食機構解明が実施され、一定の成果がまとめられている<sup>8,9)</sup>。しかし、同プロジェクトで整理されたとおり、ER 施設における灰付着・高温腐食機構は多種多様かつ複雑で、より一層の耐食性向上と灰付着低減は、依然として未解決の重要課題となっている。そのため、一般的な ER 施設では、安定かつ効率的な運転を維持するために一定期間プラントを運転した後、プラントを停止させて清掃作業を行っており、比較的低い稼働率となっているのが現状である。また、灰付着や高温腐食を抑制するために蒸気温度を低くせざるを得ない状況で、発電効率も比較的強く抑えられている。

そこで本 NEDO プロジェクトでは、廃プラスチック焼却時の熱回収を安定かつ効率的に行うために、灰付着と高温腐食を低減しうる伝熱管表面改質技術の社会実装を目指している。図 3 に示すように、溶射などのコーティング技術を用いて伝熱管表面に金属やセラミックなどの薄膜を形成して表面の改質を図り、プラント運転中の灰付着と腐食の進行を抑制することでプラントの運転期間を延伸化して、稼働率向上につなげることを目標としている<sup>10-19)</sup>。

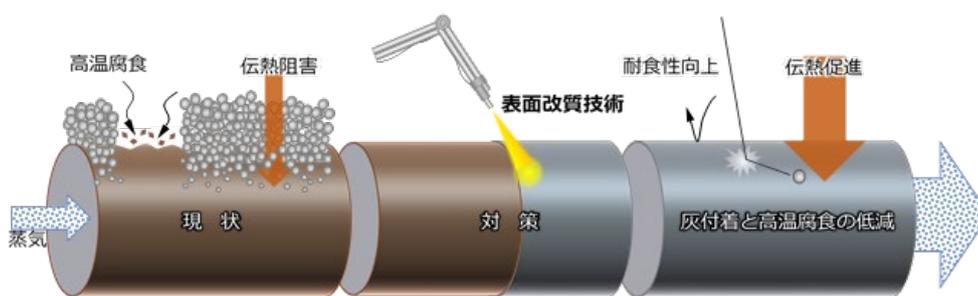


図 3 高効率排熱回収のための伝熱管表面改質技術の開発概要

### 2.1 高耐久性・難灰付着性を有する金属系・セラミック系の伝熱材料の開発

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

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

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

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

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

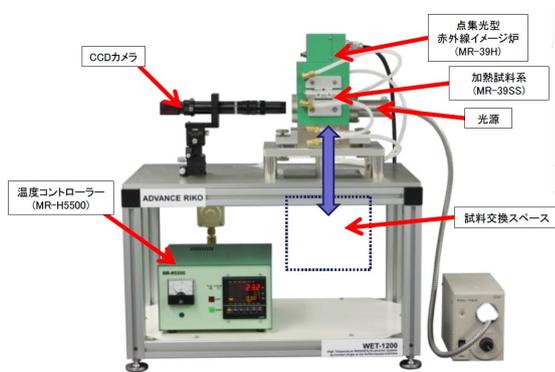


図 4 高温接触角測定試験装置

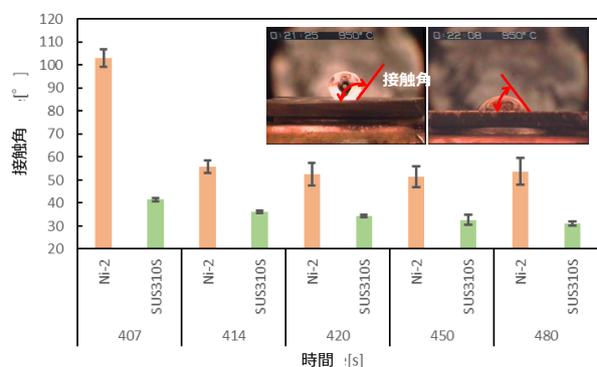
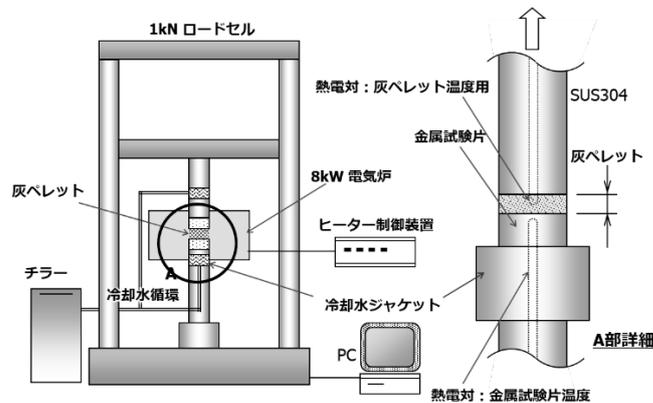


図 5 接触角測定結果(1150°C)

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

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

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



**図 6 長期付着力測定試験装置**

## 2.2 伝熱管の表面改質技術の開発

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

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

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

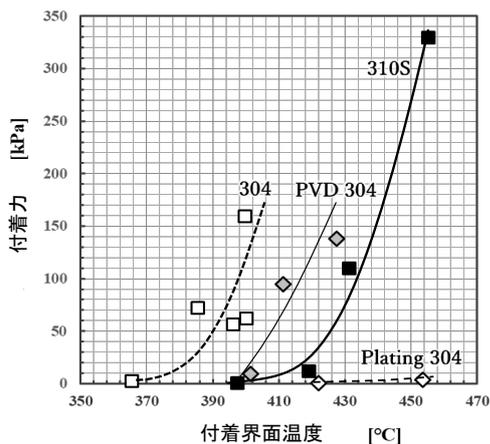


図7 各金属試験片の付着界面温度に対する付着力変化

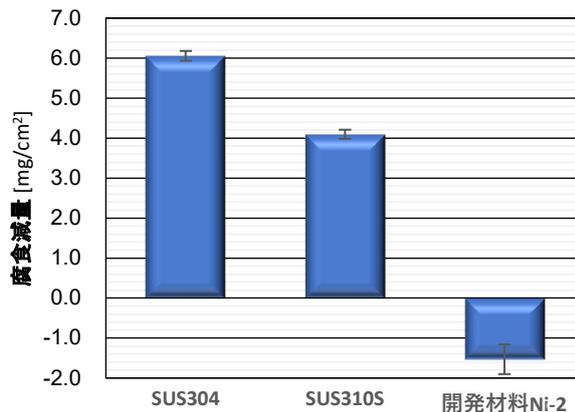


図8 耐食性評価結果例(650°C-20h, 大気)

### 3. 低温排熱の有効利用

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

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

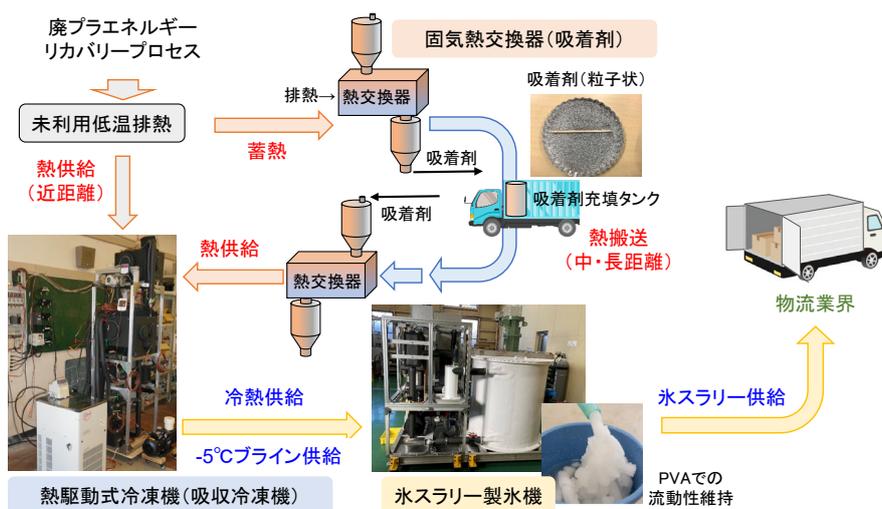


図9 排熱の冷熱利用の開発概要

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

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

### 3.1 低温排熱で 0°C 以下の冷熱を発生する吸収冷凍機の開発

吸収冷凍機は、熱を加えて冷凍・空調用の冷熱を製造する冷凍機である。冷房負荷変動にも COP が変化しないため省エネルギーであり、大規模ビル空調用冷凍機として多数導入されている。従来型の吸収冷凍機の作動液は LiBr-H<sub>2</sub>O を用いており、作動液を加熱して得られる冷媒は水である。吸収冷凍機が製造可能なブラインの最低温度は冷媒の凝固点によって決められるが、水が冷媒である場合、その凝固点は 0°C のため、0°C 以下の冷熱は製造できない。そこで、本研究では凝固点が十分に低い冷媒となる作動液の組成や物性を解明し、低温排熱を利用して 0°C 以下の冷熱を製造できる吸収冷凍サイクルを開発することを目標としている。さらに、3~4 kW の冷熱製造のプロトタイプ試験機を製作し、0°C 以下の冷熱が連続的に製造可能であることを実証する。

**図 10** に開発中の 2 段式吸収冷凍機の模式図を示す。1 段目は従来の LiBr-H<sub>2</sub>O を作動液体とした装置であり、2 段目の吸収器冷却水を製造する。2 段目は LiBr-H<sub>2</sub>O/1-プロパノールを作動液とし、氷点下冷熱を製造する。吸収冷凍機は低圧に保たれた蒸発器でブラインが流れる管上に冷媒を流して蒸発させ、蒸発潜熱でブラインを冷却する。蒸発した冷媒は吸収器の作動液に吸収され圧力を保つ。この圧力は作動液の濃度と温度で決まる。冷媒を吸収（凝縮）した作動液は温度が上昇するため冷却水が必要であり、1 段目では冷却塔からの冷却水で冷却する。2 段目では 0.5 kPa を維持するために、1 段目に製造した 7°C 程度のブラインで冷却する。冷媒を吸収して薄くなった作動液はポンプで再生器に送られ、熱源からの熱で濃縮されて再び吸収器に戻る。再生器で蒸発した冷媒は凝縮器で凝縮し、蒸発器に流入しサイクルを形成する。

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

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

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

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

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

凝縮した冷媒は蒸発器で蒸発し、吸収器で凝縮するので、

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

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

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

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

したがって、補機動力を無視すると次式となる。

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

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

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

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

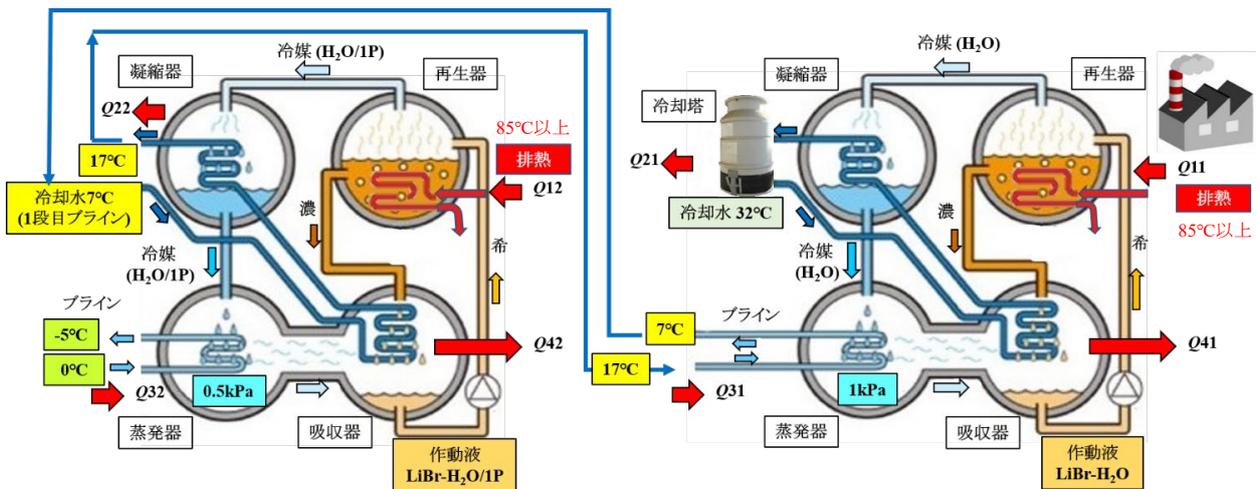


図 10 開発中の 2 段式の吸収冷凍機の模式図

### 3.2 製氷機の開発と氷スラリーの高度化

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

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

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

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

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

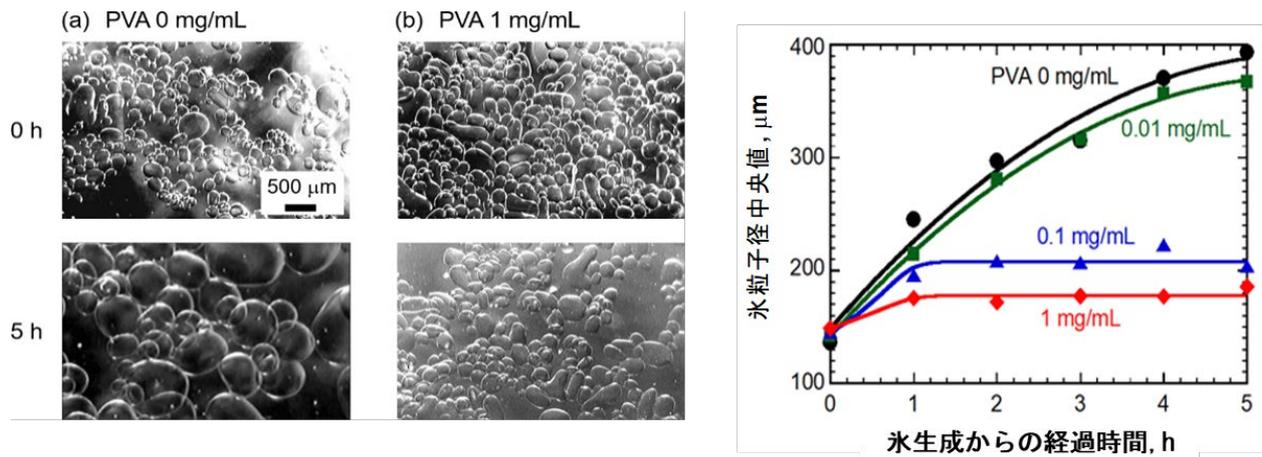


図11 ポリビニルアルコール(PVA)添加による氷粒子の粗大化抑制

#### 4. 総合熱利用システムの評価技術

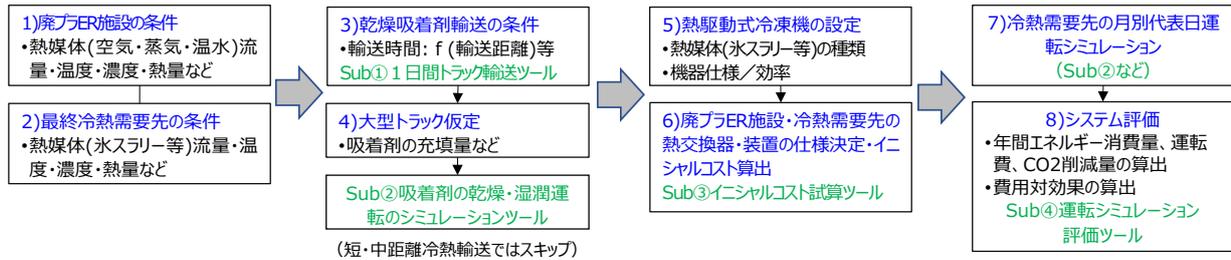
本研究では、熱発生側の熱条件（温度、熱量など）と熱需要側のそれとが合致しているか否かなどの熱マネジメントを行うために、冷熱利用システムの総合評価技術の開発を行っている。

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

つぎに、3) 乾燥吸着剤輸送の条件を想定し、Sub①の一日間トラック輸送モデルによって輸送時間を計算する。4) 大型トラックの仮定を組み合わせ条件として、Sub②の吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールによる計算を行う。これらの繰返し計算によって、吸着剤の充填量など、蓄熱槽の仕様が決定

される。5) 熱駆動式冷凍機の設定として熱熱媒体(氷スラリー等)の種類や機器仕様/効率などを定めて、6) 廃プラ ER 施設・冷熱需要先の熱交換器・装置の仕様を決定し、Sub③のインシヤルコスト試算ツールを用いてインシヤルコストを算出する。

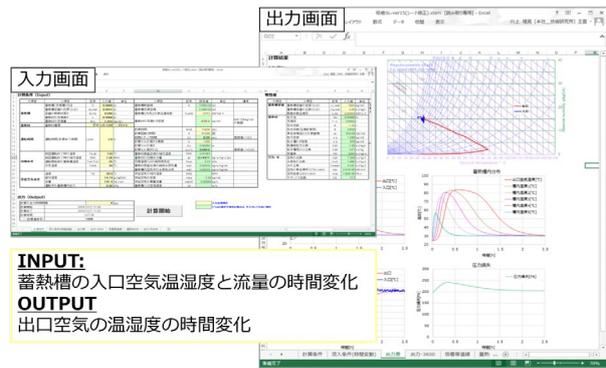
最後に、Sub②吸着剤の乾燥・湿潤運転のシミュレーションツールを用いて、7) 冷熱需要先の月別代表日運転シミュレーションを行い、Sub④の運転シミュレーション評価ツールによって年間エネルギー消費量・運転費、CO<sub>2</sub>削減量、費用対効果などを算出して8) システム評価を行う。



(a) 評価モデルのフロー

焼却場		配送センター			
焼却場	種類	A	B	C	D
1	焼却場	3119	1927	2061	3454
2	焼却場	3905	4205	4911	1354
3	焼却場	2372	1167	1737	3562
4	焼却場	1787	1430	2170	3514
5	焼却場	1655	1428	2178	3488
6	焼却場	1501	1395	2135	3088
7	焼却場	2307	1233	1803	3497
8	焼却場	2493	838	1486	3325
9	焼却場	1911	841	1381	2743
10	焼却場	2529	959	1709	3323
11	焼却場	2088	1316	1886	
12	焼却場	2981	1107	1685	
13	焼却場	3098	3153	3779	1698
14	焼却場				

(b) Sub①一日間トラック輸送ツール



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

区分	品名	単位	数量	単価	金額	備考
廃プラ処理費用	燃費	kg	1000	1000	1000000	
	燃料油	kg	1000	1000	1000000	
	電気	kWh	1000	1000	1000000	
	水	m <sup>3</sup>	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	
	廃棄物処理費	kg	1000	1000	1000000	

(d) Sub③インシヤルコスト試算モデル

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

(e) Sub④運転シミュレーション評価モデル

図 12 冷熱利用システムの評価モデルの概要化

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

Sub①の一日間トラック輸送ツールを図の (b) に示す。図のように複数の焼却場と配送センターの住所を入力して、それぞれの間の移動時間を Google Maps API より取得する。この移動時間の取得には Google Maps API とオープンソースの地理情報システム (Geographic Information System) ソフトである QGIS<sup>47)</sup> の利用を検討したが、この QGIS の特徴から、今後、多数の焼却場と多数の配送センターとの輸送計画を検討する場合には QGIS を活用することにし、現状は操作が簡便な Google Maps API を採用することにした。エクセル上において、Google Maps API によって取得した移動時間とともに、蓄熱時間、接続時間、放熱時間を設定することで、図のようにトラック輸送のタイムスケジュール表が作成できる。初期値としては、各焼却場から最短時間の配送センターの間でのトラック輸送のタイムスケジュールが表示される。

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

Sub③のイニシャルコスト試算ツールを図の (d) に示す。重量、風量、面積、排熱量、冷熱量あたりのモジュール値の単価より各々のコストを算出し、図中に示す表のように積算してイニシャルコストを算出する。このモジュール値自体が重量、風量、面積、熱量の関数であり、イニシャルコストのスケール効果が加味されている。なお、あくまで概算費用であり、実導入時には現地に合わせ詳細検討が必要である。

Sub④の運転シミュレーション評価ツールを図の (e) に示す。図のように運転条件や供給熱量などから、投資回収年数 (費用対効果) や年間 COP の算出ができ、年間エネルギー消費量や CO<sub>2</sub> 削減量を算出する。今後は、熱交換器伝熱管材料ならびに表面改質技術の成果による発電効率と稼働率の向上、冷熱需要の増加による熱回収率の向上といった要素を汲み合わせた総合エネルギー利用効率も評価する予定である。

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

## 5. おわりに

以上のように、本報では、NEDO プロジェクト「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」での ER チームの技術開発として、伝熱管の表面改質に関する基盤研究、低温排熱の有効利用に関する研究開発、および総合熱利用システムの評価技術の研究開発について説明した。

各々の研究開発の概要と今後の予定は、以下のとおりである。

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

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

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

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

## 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」（JPNP20012）の結果、得られたものである。また、本プロジェクトの参画企業は、経済産業省が2050年カーボンニュートラルの実現に向けたイノベーションに挑戦する企業として、ゼロエミチャレンジ企業にリストアップされている<sup>50)</sup>。

NEDOや経済産業省をはじめ、関係の皆様方に感謝を申し上げます。

## 文 献

- 1) プラスチックリサイクルの基礎知識 2021, 一般社団法人プラスチック循環利用協会 HP, <https://www.pwmi.or.jp/data.php?p=panf> (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）HP, [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100179.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100179.html) (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 3) 長沼宏, 成瀬一郎, 堀田幹則, 幡野博之, 野田英彦, 稲田孝明, 谷野正幸, 廃棄プラスチックスエネルギーの高度有効利用, - I - 高温排熱の有効利用, 化学装置, 1月号, 工業通信, 43-47, 2022.
- 4) 木村拓雅, 幡野博之, 野田英彦, 稲田孝明, 谷野正幸, 長沼宏, 堀田幹則, 成瀬一郎, 廃棄プラスチックスエネルギーの高度有効利用, - II - 低温排熱の有効利用, 化学装置, 1月号, 工業通信, 48-54, 2022.
- 5) 松藤敏彦, 石井翔太, 廃棄物資源循環学会論文誌, 22, No.6, 382-395, 2011.
- 6) Capablo, J.; Jensen, P. A.; Pedersen, K. H.; Hjuler, K.; Nikolaisen, L.; Backman, R.; Frandsen, F. J., Energy & Fuels, 23, 3/4, 2009.
- 7) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）HP, <http://www.nedo.go.jp/content/100087257.pdf> (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 8) 環境省 HP, [https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo\\_report/h26/pdf/3K123011.pdf](https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/h26/pdf/3K123011.pdf). (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 9) 長沼 宏, 佐々木 頼明, 成瀬 一郎, 義家 亮, 植木 保昭, 二宮 善彦, CHEN Juan, 野口 学, 長 洋光, 廃棄物発電設備の灰付着と腐食に関する現状と課題, 日本エネルギー学会誌, 95 巻, 11 号, pp.1089-1104, 2016.
- 10) 佐伯達哉, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎, 産業廃棄物灰の熔融特性の解明とその制御, 日本燃焼学会第 59 回燃焼シンポジウム, 2021.
- 11) Hiroshi Naganuma Takehito Mori Sho Watanabe Akihiro Sawada Taeko Goto Yasuaki Ueki Ryo Yoshiie Ichiro Naruse, Ash deposition mechanisms in waste-to-energy plants, International Conference on Power Engineering (ICOPE-2021), 2021.
- 12) 小野田海人, 植木保昭, 義家亮, 成瀬一郎, 産業廃棄物灰からの熔融塩生成特性解明と灰付着制御, 日本燃焼学会第 60 回燃焼シンポジウム, 2021.

- 13) Kaito Onoda, Yasuaki Ueki, Ryo Yoshie, Ichiro Naruse, Molten Salt Formation Characteristics of Industrial Waste Ash and Control of Ash Deposition, International Conference on Materials and Systems for Sustainability, 2021.
- 14) 長沼宏, 固体燃焼における灰付着と高温腐食, 第 58 回石炭科学会議, 2021.
- 15) 佐伯達哉, 義家亮, 植木保昭, 成瀬一郎, 産業廃棄物処理炉内における灰付着制御, 第 31 回日本エネルギー学会大会, 2022.
- 16) 成瀬一郎, 高効率排熱回収技術の開発～伝熱管表面改質、回収熱量増大、長寿命化～, NPO 法人 循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 17) Hiroshi NAGANUMA, Takehito MORI, Sho WATANABE, Akihiro SAWADA, Taeko GOTO, Yasuaki UEKI, Ryo YOSHIIE, and Ichiro NARUSE, Ash deposition mechanisms in Waste-to-Energy plants, Mechanical Engineering Journal, vol.9, No.4, 21-00435, 2022.
- 18) 堀田幹則, 高効率エネルギー回収・利用システム開発 ～リサイクル困難な廃プラスチックからの高効率なエネルギー回収と冷熱利用～, 第 37 回新産業技術促進検討会シンポジウム「NEDO『革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発』プロジェクト進捗報告会～プラスチック資源循環を実現する技術とは～」, 2022.
- 19) 澤田晃宏, 長沼宏, 後藤妙子, 森岳人, 邊章, 成瀬一郎, 義家亮, 植木保昭, NaCl による高温加速酸化機構の速度論的解析, 第 17 回バイオマス科学会議, 2022.
- 20) 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一, 高性能吸着材ハスクレイ<sup>®</sup>の開発, Synthesiology, 9 巻, 3 号, 154-164, 2016.
- 21) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 鈴木正哉, 松永克也, 谷野正幸, ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 1 報—小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, 45 巻, 281 号, 9-17, 2020.
- 22) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 谷野正幸, ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 2 報—低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着時の発熱量について, 空気調和・衛生工学会論文集, 45 巻, 285 号, 1-8, 2020.
- 23) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸, ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 3 報—吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 46 巻, 290 号, 39-46, 2021.
- 24) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸, ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 4 報—固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.
- 25) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸, ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 5 報—オフライン熱輸送型システムの実証試験, 47 巻, 301 号, 9-16, 2022.
- 26) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸, ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発, 第 6 報—塗装工程での除湿利用の実証試験, 47 巻, 308 号, 11-18, 2022.
- 27) 劉醇一, 高密度化学蓄熱材の開発, 伝熱, 45 巻, 190 号, 21-26, 2006.
- 28) 幡野博之, 松田聡, 上之原康弘, 川口靖夫ほか, 低圧損化した移動層型デシカント空調の除湿特性, 粉体工学会誌, 50 巻, 3 号, 212-218, 2013.
- 29) 金偉力, 坂井麻美, 岡野浩志, ドライルーム用超低露点除湿機の省エネ性研究, 日本冷凍空調学会論文集, 29 巻, 1 号, 81-88, 2012.
- 30) 西村浩一, 岡村典明, 超低露点清浄空気発生装置の開発, 化学工学論文集, 26 巻, 3 号, 332-335, 2000.
- 31) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 2019 年 3 月, 産業分野の排熱実態調査, <http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf> (最終アクセス日: 2023.01.29) .
- 32) 三菱総合研究所 環境・エネルギー開発本部,平成 29 年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査 (熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査), [https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/H29FY/000018.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000018.pdf) (最終アクセス日: 2023.01.29) .

- 33) 木村拓雅, 加藤貴大, 幡野博之, 吸着剤の流動層乾燥, 第 27 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021.
- 34) 王荀, 新井数馬, 幡野博之, 十字流式移動層を用いた吸着剤蓄熱システム, 第 27 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2021.
- 35) 及川慈英, 新井一馬, 幡野博之, 低温エネルギー貯蔵・輸送システム用吸着材連続乾燥に関する研究, 化学工学会第 53 回秋季大会, 2022.
- 36) 小田島聡, 野田英彦, 高橋晋, アルコール水溶液冷媒による氷点下冷熱製造の可能性, 化学工学会秋季大会講演要旨 DA103, 2017.
- 37) 磯嶋将, 野田英彦, 正野孝幸, 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用作動流体 LiBr-H<sub>2</sub>O-1-propanol の結晶化温度, 2020 年度日本冷凍空調学会年次大会要旨集, E213, 2020.
- 38) 正野孝幸, 野田英彦, 磯嶋将, 片山正敏, 折田久幸, 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用新作動液の飽和特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会, 岡山, 2022.
- 39) 磯嶋将, 野田英彦, 折田久幸, 片山正敏, 正野孝幸, 氷点下冷熱を製造する吸収冷凍機用作動流体 LiBr-H<sub>2</sub>O/1-Propanol の蒸発特性, 2022 年度日本冷凍空調学会年次学会, 岡山, 2022.
- 40) 射場本忠彦, 氷蓄熱空調システム概論, 日本冷凍協会誌, Vol.62, No.714, 1~11, 1987.
- 41) 三戸大介, 小澤由行, 谷野正幸, 稲田孝明, 水の過冷却解除に関する能動制御技術の開発, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.17, No.2, 191-201, 2000.
- 42) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二, 氷スラリーによるチルド水供給設備に関する研究～蓄氷解氷同時運転での満蓄制御と給水制御～, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.30, No.3, 319-329, 2013.
- 43) 三戸大介, 万尾達徳, 谷野正幸, 本郷大, 若佐和夫, 松本浩二, 乳製品加工工場における氷スラリーによるチルド水供給設備, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.30, No.3, 331-339, 2013.
- 44) 万尾達徳, 過冷却解除方式製氷技術による水産業へのビジネス展開, 建築とエネルギー, Vol.61, 2020.
- 45) 江崎功浩, 過冷却解除型製氷技術による水産向けシャーベットアイス製氷設備, 月刊 BE 建築設備, 6 月号, 2019.
- 46) 見上皓紀, シャーベットアイスを利用した水産物の高鮮度保持, 空気調和衛生工学会誌, 第 92 巻, 第 5 号, 31-36, 2018.
- 47) QGIS (キュージーアイエス, 旧称:Quantum GIS) : <https://ja.wikipedia.org/wiki/QGIS> (最終アクセス日: 2023.01.29).
- 48) 成瀬一郎, 高効率排熱回収技術の開発～伝熱管表面改質、回収熱量増大、長寿命化～, NPO 法人 循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 49) 谷野正幸, 排熱の高効率利用技術～工場排熱を利用する氷蓄熱技術～, NPO 法人 循環型社会創造ネットワーク主催「高効率エネルギー回収・利用システム開発セミナー」, 八戸プラザホテル, 2022.
- 50) 経済産業省ゼロエミチャレンジ企業リスト [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/zero-emission\\_challenge/index\\_zeroemi.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/zero-emission_challenge/index_zeroemi.html) (最終アクセス日: 2023.01.29).

## ABSTRACT

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

---