

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公 募 区 分 : 革新型研究開発 (若手枠)

研 究 実 施 期 間 : 令和3 (2021) 年度 ~ 令和5 (2023) 年度

課 題 番 号 : 【3RF-2101】

体 系 的 番 号 : (J P M E E R F 2 0 2 1 3 R 0 1)

研 究 課 題 名 : 「廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で回生する蓄熱輸送技術の
出熱過程実証」

Research Title : Demonstration of Heat Discharging Process of Thermal Energy
Storage and Transport System for Recovering Unused Heat from
Waste Incineration Plant in Vicinal Industries

研 究 代 表 者 名 : 藤井 祥万

研 究 代 表 機 関 名 : 国立大学法人東京大学

研 究 分 担 機 関 名 :

研 究 協 力 機 関 名 :

研 究 領 域 : 資源循環領域

キ ー ワ ー ド : 再生可能エネルギー、地域エネルギーシステム、未利用熱、廃棄物
処理、地域循環共生圏

令和6 (2024) 年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
[課題概要].....	3
1. はじめに（研究背景等）.....	5
2. 研究開発目的.....	5
3. 研究目標.....	5
4. 研究開発内容.....	8
5. 結果及び考察.....	13
6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献.....	26
(1) 研究目標の達成状況.....	26
(2) 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	29
7. 研究成果の発表状況.....	31
(1) 成果の件数.....	31
(2) 誌上発表.....	31
(3) 口頭発表.....	32
(4) 知的財産権.....	33
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	33
(6) マスメディア等への公表・報道等.....	33
(7) 研究成果による受賞.....	34
8. 国際共研究等の状況.....	34
9. 研究者略歴.....	34
Abstract.....	35

別紙 公募審査・中間評価等への対応

[課題概要]

<課題情報>

公募区分：	革新型研究開発（若手枠）
研究実施期間：	令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課題番号：	【3RF-2101】
研究課題：	「廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で回生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証」
研究代表者：	藤井祥万（東京大学、特任講師）
重点課題（主）：	【重点課題⑩】地域循環共生圏形成に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発
重点課題（副）：	
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	非該当
研究領域：	資源循環領域

<キーワード>

再生可能エネルギー
地域エネルギーシステム
未利用熱
廃棄物処理
地域循環共生圏

<研究体制>

サブテーマ1 「廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で回生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証」

<サブテーマ1 リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
東京大学	未来ビジョン研究センター	特任講師	藤井祥万	2021年4月～2024年3月
東京大学	未来ビジョン研究センター	教授	菊池康紀	2021年4月～2024年3月
東京大学	未来ビジョン研究センター	特任講師	尾下優子	2021年4月～2024年3月

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	4,101千円	1,230千円	5,331千円
2022	4,006千円	1,201千円	5,207千円
2023	3,624千円	1,087千円	4,712千円
合計	11,731千円	3,518千円	15,250千円

＜研究の要約＞

バイオマス残渣や廃棄物処理施設の未利用地域資源は効率的に地域内で活用すべきである。現在、廃棄物を用いた発電は積極的に行われているが、多種多様な燃料の発熱量が原因で発電効率が低く、未利用熱が大量に発生している。一方で、周辺他産業では化石資源を燃焼する熱利用が行われている場合が多く、地域資源を効率的に循環するためには、未利用熱の回収や融通技術の開発・適用が必要である。未利用熱の発生と化石燃料の需要には時間的・空間的なギャップを埋める必要があり、トラック等で蓄熱材を輸送する可搬式の蓄熱輸送技術の構築要素の実証試験による確立が必要である。本研究では、廃棄物処理施設を地域の安定的なエネルギー創出拠点とするための蓄熱材であるゼオライトを用いた未利用熱の近隣産業への蓄熱輸送システムの提案を目指し、産業用途に耐えうる加圧蒸気の連続生成を実現する独創的な出熱装置の小規模な実証試験とそのシステム評価を目的とした。ゼオライトを用いた加圧蒸気の連続生成が可能な移動床間接熱交換方式を採用した「ゼオライトボイラ」の小規模実証試験設備を構築し、種子島内の化石燃料ボイラが設置されているクリーニング工場に設置した。実証試験はゼオライト流量15 kg/hの規模で実施し、蓄熱材を用いることで蒸気の増熱効果があることを実証した。また、熱・物質保存式を連成した数値解析モデルを構築し、実証試験を模擬可能であることを確認し、その妥当性を確認した。実験により妥当性を確認した数値解析モデルを用いて商用機の概念設計を実施し、事業化規模(ゼオライト流量0.1-2.0 t/h程度)におけるライフサイクルアセスメント、コスト構造分析、産業連関分析といったシステム評価を実施し、地域資源を循環する蓄熱輸送システムにおける支配要因を特定、さらなる技術開発へのフィードバックが可能であることを確認した。

特に重要な研究成果：図11、図13

1. はじめに（研究背景等）

地域の自立・分散・補完を目指すためには、地域資源の効率的利用が重要である。現在、バイオマスプラントや廃棄物処理施設などでは、廃棄物を用いた発電は積極的に行われているが、多種多様な燃料の発熱量が原因で発電効率が低く、未利用熱が大量に発生している。一方で、周辺他産業では化石資源を燃焼する熱利用が行われている場合が多く、地域資源を効率的に利用し化石資源の使用を削減するためには、未利用熱の回収や融通技術の開発・適用が必要である。日本では、欧州などと比較し地域熱供給システムが整備されておらず、未利用熱発生と熱需要が同時期かつ隣接していなければ熱供給できないこと、蓄熱融通ではこれまで温湯供給がメインで（Tatsidjodoung, P. et al., 2016）、主に加圧蒸気を消費する産業用途に耐えられないことなどが原因で、工業団地やオフィスビル内以外での熱融通システムの適用事例は少ない。発生と需要の時間的・空間的なギャップを埋め、廃棄物処理施設等の未利用熱回生のネットワークを普及させるためには、トラック等で蓄熱材を輸送する可搬式の蓄熱輸送技術の構築要素の実証試験による確立が必要である。

並行して実施しているJSPS科研費22K18061にて、基礎自治体レベルのエネルギーフローを作成する研究を実施中であり、そのエネルギーフローに本研究において廃棄物処理施設のデータを組み込むことにより、廃棄物処理の未利用熱の蒸気としての回生ポテンシャルの算出が可能である。また、科学技術振興機構JST、COI-NEXT（JPMJPF2003）を実施しており、新規技術を参画自治体や住民が見学し、最先端の技術を学ぶとともに地域の実装に必要なローカルデータを研究開発者が学びあうco-learningを展開している。本研究による開発をCOI-NEXTプロジェクトで見学し、co-learningを実施することで地域への実装の加速というシナジー効果が期待できる。

2. 研究開発目的

本研究では、廃棄物処理施設を地域の安定的なエネルギー創出拠点とするための未利用熱の近隣産業への蓄熱輸送システムの提案を目指し、産業用途に耐えうる加圧蒸気の連続生成を実現する独創的な出熱装置の実証試験を行う。具体的には、蓄熱輸送システムの実装候補地の1つである種子島を対象に、技術実装の鍵を握る出熱過程に着目した実証試験を行い、ゼオライトの水蒸気吸脱着による発熱、蓄熱サイクルを採用した蓄熱輸送システムを提案する。さらに、当該システムの脱炭素効果、地域経済への波及効果を、実証データを用いて分析することで、地域熱供給システムの配管インフラが普及していない我が国において、「日本式」の未利用熱の融通システム普及の足掛かりにすることを目的とする。

3. 研究目標

全体目標	地域の廃棄物処理施設由来の未利用熱を地域内で融通する可搬式の蓄熱輸送技術を対象にする。技術の実現可能性を高める、連続的な加圧蒸気の生成が可能な独創的な出熱装置を実証すること、その実証データをもとに、蓄熱輸送技術を適用したときの脱炭素効果、経済性効果を評価することが本研究の主目標である。 主目標を達成するための具体的な7つの目標を以下に示す。 ① 実証試験では、移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置を用いることで、最大 0.2MPa/120 °C の飽和蒸気（熱需要の蒸気条件に合わせる）の連続的な送出に成功する。 ② 既設ボイラから導入する 0.6 MPa/160 °C を減圧した 0.1 MPa・140 °C の過熱蒸気の導入熱量に対して、出熱装置が送出する 0.2MPa/120 °C の飽和蒸気の熱量が増大していること（燃料削減できていること）を実証する。
------	--

	③ 事業化規模においてゼオライトの発熱ポテンシャルに対する熱回収率約 70%で、オペレーションベースにおいて経済循環を考慮しない場合の運用コストが重油価格と同等以下になることを見込んでおり、熱回収率 70%達成が技術的な目標地点となる。 ④ 実証試験中に電力計などを用いて蓄熱・出熱装置の運転に必要な補助動力を算出し、実証データに基づく GHG 排出原単位を求める。 ⑤ 事業化規模レベルにおける装置の建設時に発生する GHG や蓄熱材輸送時のトラックが消費する軽油由来の GHG、熱需要地において削減可能な化石資源由来の GHG などを考慮したライフサイクル GHG 排出量を評価し、蓄熱輸送システム導入における脱炭素効果を示す。 ⑥ システムの評価として、実証試験結果に基づき事業化規模での各装置の性能を予測し、各種運用コストを見積もり、オペレーションベースで運用可能であることを示す。 ⑦ 地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を分析するために、種子島地域の経済構造を対象に調整された種子島産業連関表を用い、蓄熱輸送システムの複数の事業化パターンの社会経済効果を分析する。具体的には、 1. 実証試験結果を基に、蓄熱輸送システムに必要な財・サービス（以後、製品）の投入量と投入元、熱の供給量と供給先などを整理し、蓄熱輸送部門を新規部門として設置するための部門情報を作成する。 2. さらに想定される副次的な材料製品の供給元や現在の材料供給構造などから、蓄熱輸送システムの導入によって新たに発生した需給をバランスングし、システム導入後の種子島の経済構造を表す産業連関表を作成する。 3. このシステム導入後の経済構造と、蓄熱輸送技術を適用しなかった場合（すなわち現状のまま島外から購入する化石資源を消費し続けた場合）の経済構造や地域外との取引収支を比較し、システム導入による地域経済への影響を定量化する。 以上の実証データとそれに基づくLCA、産業連関分析の結果を自治体、蓄熱輸送実施事業者に提示し、実装の規模やビジネスモデル等をまとめる。
--	---

サブテーマ 1	廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で回生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証
サブテーマ 1 実施機関	東京大学
サブテーマ 1 目標	地域の廃棄物処理施設由来の未利用熱を地域内で融通する可搬式の蓄熱輸送技術を対象にする。技術の実現可能性を高める、連続的な加圧蒸気の生成が可能な独創的な出熱装置を実証すること、その実証データをもとに、蓄熱輸送技術を適用したときの脱炭素効果、経済性効果を評価することが本研究の主目標である。 主目標を達成するための具体的な7つの目標を以下に示す。 ① 実証試験では、移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置を用いるこ

	とで、最大 0.2MPa/120 °C の飽和蒸気（熱需要の蒸気条件に合わせる）の連続的な送出に成功する。 ② 既設ボイラから導入する 0.6 MPa/160 °C を減圧した 0.1 MPa・140 °C の過熱蒸気の導入熱量に対して、出熱装置が送出する 0.2MPa/120 °C の飽和蒸気の熱量が増大していること（燃料削減できていること）を実証する。 ③ 事業化規模においてゼオライトの発熱ポテンシャルに対する熱回収率約 70%で、オペレーションベースにおいて経済循環を考慮しない場合の運用コストが重油価格と同等以下になることを見込んでおり、熱回収率 70%達成が技術的な目標地点となる。 ④ 実証試験中に電力計などを用いて蓄熱・出熱装置の運転に必要な補助動力を算出し、実証データに基づく GHG 排出原単位を求める。 ⑤ 事業化規模レベルにおける装置の建設時に発生する GHG や蓄熱材輸送時のトラックが消費する軽油由来の GHG、熱需要地において削減可能な化石資源由来の GHG などを考慮したライフサイクル GHG 排出量を評価し、蓄熱輸送システム導入における脱炭素効果を示す。 ⑥ システムの評価として、実証試験結果に基づき事業化規模での各装置の性能を予測し、各種運用コストを見積もり、オペレーションベースで運用可能であることを示す。 ⑦ 地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を分析するために、種子島地域の経済構造を対象に調整された種子島産業連関表を用い、蓄熱輸送システムの複数の事業化パターンの社会経済効果を分析する。具体的には、 1. 実証試験結果を基に、蓄熱輸送システムに必要な財・サービス（以後、製品）の投入量と投入元、熱の供給量と供給先などを整理し、蓄熱輸送部門を新規部門として設置するための部門情報を作成する。 2. さらに想定される副次的な材料製品の供給元や現在の材料供給構造などから、蓄熱輸送システムの導入によって新たに発生した需給をバランシングし、システム導入後の種子島の経済構造を表す産業連関表を作成する。 3. このシステム導入後の経済構造と、蓄熱輸送技術を適用しなかった場合（すなわち現状のまま島外から購入する化石資源を消費し続けた場合）の経済構造や地域外との取引収支を比較し、システム導入による地域経済への影響を定量化する。 以上の実証データとそれに基づくLCA、産業連関分析の結果を自治体、蓄熱輸送実施事業者に提示し、実装の規模やビジネスモデル等をまとめる。
--	---

4. 研究開発内容

＜【サブテーマ1】「廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で回生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証」の研究開発内容＞

【技術実証】目標①～③に対応

図1に本研究で実証するゼオライトを用いた蒸気発生装置「ゼオライトボイラ」を示す。廃棄物処理場等の排熱で蓄熱したゼオライトを上部から連続的に投入する。既設ボイラからの蒸気の一部を大気圧まで減圧し、ゼオライトボイラ上部から噴射し、ゼオライトが蒸気を吸着することで発熱する。発生した吸着熱は内部に設置されている熱交換器内の給水に伝熱される。水は熱交換器下部から給水され、吸着熱により蒸発し、加圧蒸気として連続的に熱交換器上部から排出される。発熱を終えたゼオライトは装置最下部より排出される。この機構により、噴射した蒸気よりも増熱した蒸気を送出することで既設ボイラの燃料を焚き減らす。また、同様に図1に蓄熱装置「ヒートチャージャー」の概要を示す。排熱と熱交換した温風を装置下部から導入する。ゼオライトボイラで吸着を終えたゼオライトは上部から投入され、温風と熱交換して昇温されながら脱着が進行し、目標吸着量まで蓄熱されたゼオライトは下部から連続的に排出される。

種子島内の熱需要地であるクリーニング工場のボイラ室より、ボイラ配管を一部ブランチし、出熱装置「ゼオライトボイラ」に噴射できるラインを設計・製作した。図2にゼオライトボイラ試験設備配管・電気系統図を示す。各ラインは以下のようになっている

＜噴射蒸気系統＞

まず、ボイラ室横に図3に示すように実証設備を格納するコンテナを設置した（台風対策済み）。ボイラの主蒸気配管から一部分岐し、0.6 MPa程度の蒸気をバルブVS0、VS1にて段階的に減圧し、ほぼ大気圧とした状態でボイラ室からコンテナに送気する。コンテナ内部に到達した蒸気は、面積式蒸気流量計FL1を通過し流量を規定した上でゼオライトボイラ上部より噴射される。なお、ボイラ室からゼオライトボイラ噴射点まで距離があり、放熱による蒸気の凝縮が予想される。そこで試験開始前にバルブVS4を大気放出側、グローブバルブVS5を閉状態にしておき、試験での噴射蒸気流量（2 kg/h程度を想定）よりも多い、10 kg/h程度を蒸気流量計で測定したうえで大気放出する。次にその流量を保ったうえでグローブバルブVS5を徐々に開き、蒸気流量計を通過する蒸気をゼオライトボイラ内部への噴射蒸気流量になるように調整する。調整が完了し、蒸気状態が安定した段階で、バルブVS4をゼオライトボイラ内部側へ切り替え、ゼオライトボイラ内部への噴射を開始する。以上の方式により、蒸気流量計直前までは試験流量よりも多い10 kg/h程度の蒸気を流すことが可能であり、凝縮を防ぐことが可能である。なお、試験地のクリーニング工場ではボイラを停止する期間もあるため、図2に示すようにバブラーとコンプレッサーも設置しており、ボイラからの蒸気ではなくバブラーで加湿した湿り空気を蒸気の代替として上部から噴射できる構造とすることで、あらゆる試験条件に耐えうる構造とした。

＜給水系統＞

給水タンクをコンテナ内に独立して設け、既設ボイラの軟水器を通過後の水をボイラ室より運び、試験に必要な重量のみ補充する構造とした。給水タンク下部に設置したマグネットポンプにて送水する。ポンプから出た水は、一部分岐して給水タンクに戻るサーキット配管を構築し、制御を容易にしている。また、面積式流量計FL2およびFL3、流量計付随のニードル弁で流量を調整し、ゼオライトボイラ内部の熱交換器に送水する。ゼオライトボイラ内部で蒸発した蒸気の圧力をゼオライトボイラ出口の背圧弁VW6で調整し、大気圧まで減圧したうえで、大気開放する。

＜蓄熱系統＞

本研究では、ゼオライトボイラに隣接して蓄熱装置「ヒートチャージャー」を設置し、電動熱風器にて試験に必要なゼオライトを蓄熱する。ボイラ室の電源容量および電圧を考慮し、試験可能な電動温風発

生器を選定した。また、ワイヤダクトを用いて円筒型のヒートチャージャー下部の枝管に接続し、充填層に温風を送り込む構造とした。蓄熱後の空気は大気開放する。なお、後述のように2023年11月以降、種子島のサトウキビ残渣由来の未利用熱での蓄熱が可能となったため、蓄熱装置については製糖工場内に移設した。

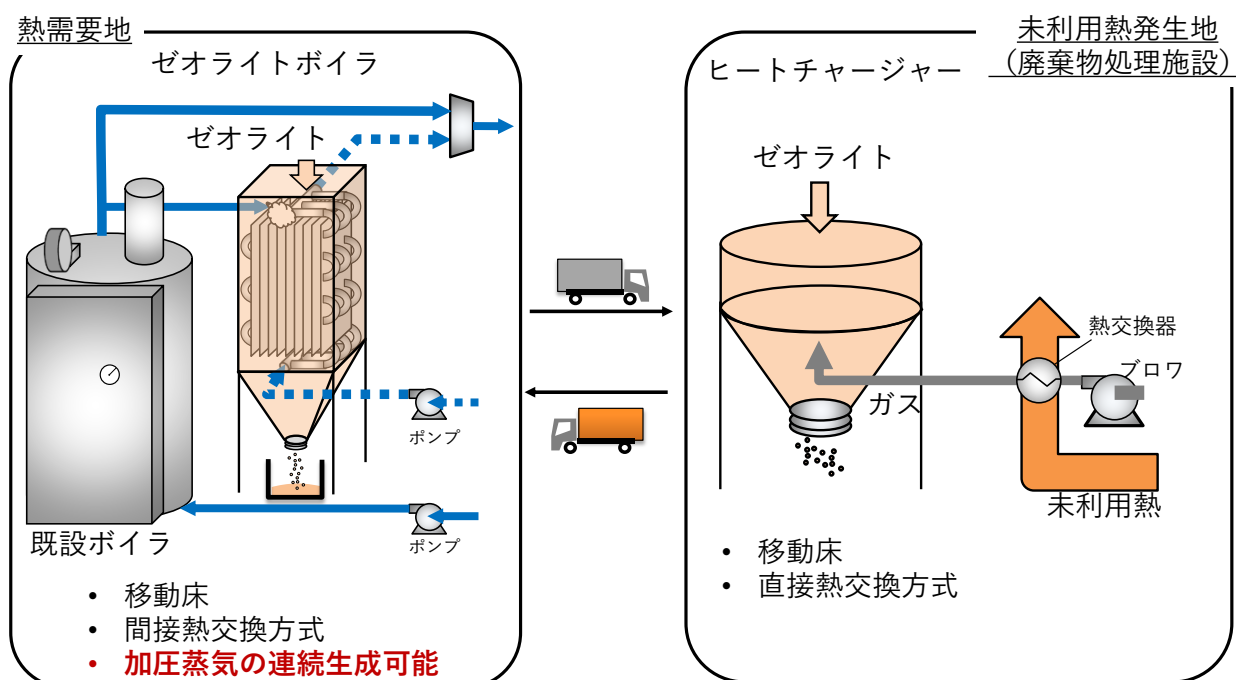


図1 出熱装置ゼオライトボイラと蓄熱装置ヒートチャージャーの概要

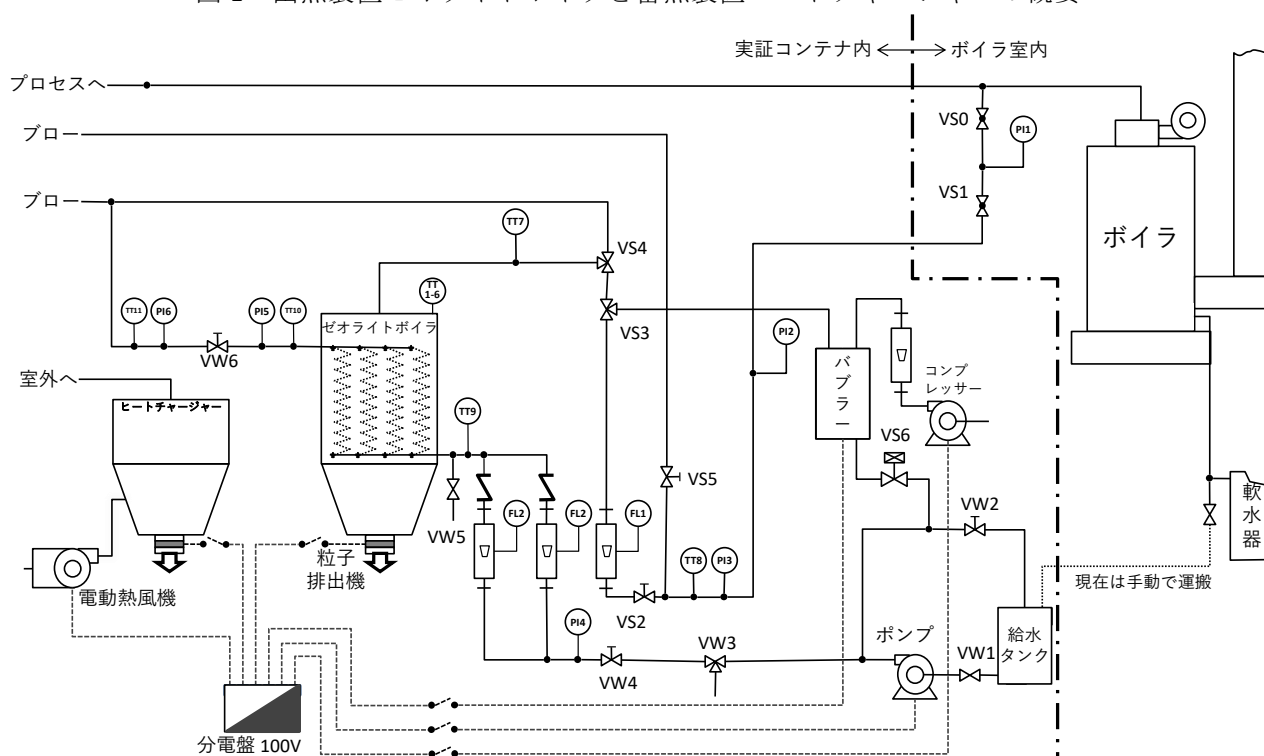


図2 ゼオライトボイラ試験設備の配管・電気系統図



図3 実証コンテナ

また、当初は熱需要地にて系統電力で電動温風器を駆動し、温風でゼオライトに蓄熱する計画であったが、種子島の製糖工場にて2023年11月～2024年4月の製糖期間中に場内で小規模蓄熱試験を実施可能となった。よってこの期間は図4に示すように蓄熱装置を製糖工場内に移設し、製糖工場のサトウキビ残渣由来の余剰電力を用いて温風発生器を駆動し、蓄熱する方式を採用した。製糖期間中に電力を用いてゼオライト200 kgを蓄熱、クリーニング工場での蒸気生成試験を実施する前に工場から蓄熱したゼオライトを運び出し、クリーニング工場まで輸送して蒸気生成試験を実施することで、ごく小規模ながら未利用熱と熱需要地の間での蓄熱輸送実証を実施した。

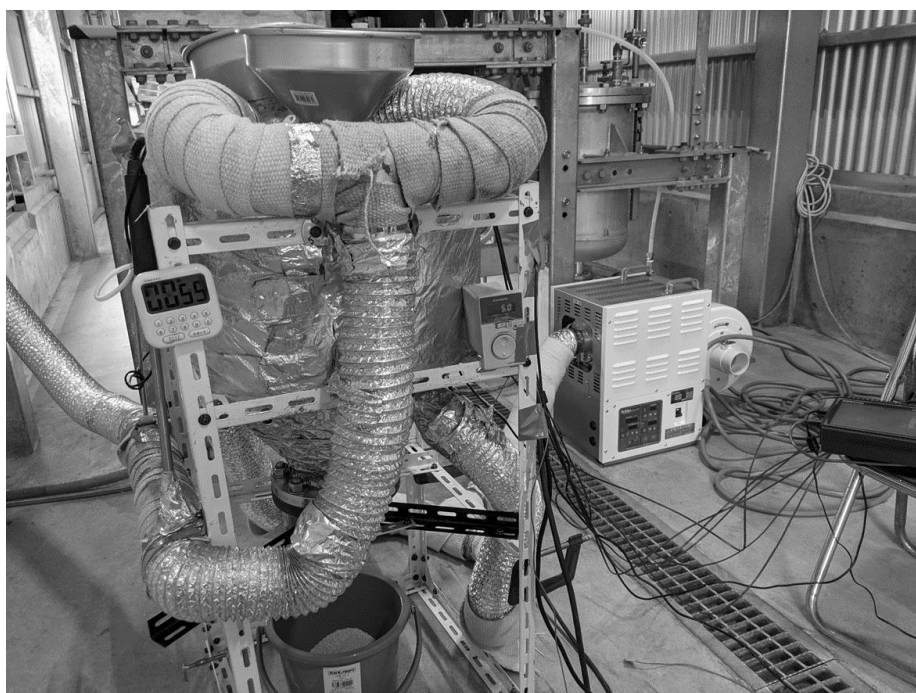


図4 小規模ヒートチャージャー試験設備

次にシステム評価につなげるために、ゼオライトボイラ、ヒートチャージャーの性能を予測する、物質移動と熱移動、吸着現象を連成した数値解析モデル（式(1), (2)）を開発した。移流拡散方程式の各項については、表1に示す。各装置のパラメータの連関を整理した上で、事業化規模モデルの感度解析を実施することで、ヒートチャージャーにおいては補助動力最小化、ゼオライトボイラにおいては燃料削減効果最大化の目的関数の下、各スケール（＝ゼオライト流量）における最適設計を実施した。

$$a \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} = b \nabla(\Gamma \cdot \nabla \phi) + s \quad (1)$$

$$a \frac{\partial(\rho u c_p \phi)}{\partial x} = b \nabla(\Gamma \cdot \nabla \phi) + s \quad (2)$$

なお、特にゼオライト粒子から給水への熱交換については実証試験の結果を受けて熱伝達のモデルを、フィン効率を考慮したモデルに修正した。

表 1 移流拡散方程式の各項

	a	b	ϕ	Γ	s
質量保存（ゼオライト）	1	0	1	-	$\rho_{\text{zeo}0} r_{\text{ad/des}}$
質量保存（ガス）	1	0	1	-	$-\rho_{\text{zeo}0} r_{\text{ad/des}}$
蒸気保存	1	1	x_s	D_{ax}	$-\rho_{\text{zeo}0} r_{\text{ad/des}}$
エネルギー保存（ゼオライト）	1	1	T_{zeo}	$\lambda_{\text{zeo_eff}}$	吸着熱： $\rho_{\text{zeo}0} r_{\text{ad/des}} \Delta H$
					熱伝達（ゼオライトーガス）： $\alpha_{\text{zeo-g}} \sigma_{\text{zeo-g}} (T_{\text{zeo}} - T_g)$
					熱伝達（ゼオライトー給水）： $\alpha_{\text{zeo-w}} \sigma_{\text{zeo-w}} (T_{\text{zeo}} - T_w)$
					放熱： $\alpha_{\text{zeo-amb}} \sigma_{\text{zeo-amb}} (T_{\text{zeo}} - T_{\text{amb}})$
エネルギー保存（ガス）	1	1	T_g	$\lambda_{\text{gax_eff}}$	熱伝達（ガスーゼオライト）： $\alpha_{\text{zeo-g}} \sigma_{\text{zeo-g}} (T_g - T_{\text{zeo}})$
					熱伝達（ガスー給水）： $\alpha_{\text{g-w}} \sigma_{\text{g-w}} (T_g - T_w)$
					放熱： $\alpha_{\text{g-amb}} \sigma_{\text{g-amb}} (T_g - T_{\text{amb}})$
エネルギー保存（給水）	-1	0	T_w	-	熱伝達（給水ーゼオライト）： $\alpha_{\text{zeo-w}} \sigma_{\text{zeo-w}} (T_w - T_{\text{zeo}})$
					熱伝達（給水ーガス）： $\alpha_{\text{g-w}} \sigma_{\text{g-w}} (T_w - T_g)$

<記号>

ρ ：密度 [kg/m³]、 c_p ：比熱 [J/(kg·K)]、 D_{ax} ：充填層軸方向有効拡散係数 [m²/s]、 $r_{\text{ad/des}}$ ：吸着・脱着速度 [1/s]、 T ：温度[K]、 u ：流速 [m/s]、 x_s ：蒸気質量分率 [-]、 α ：熱伝達率 [W/(m²·K)]、 ΔH ：吸脱着熱 [kJ/kg]、 σ ：比表面積 [m²/m³]、 λ ：熱伝導率 [W/(m·K)]

<添字>

amb：大気、ax：軸方向、eff：有効、g：ガス、w：給水、zeo：ゼオライト

【システム評価】目標④～⑦に対応

目標④、⑤はLCAに関連する目標である。本研究におけるLCAの目的は、蓄熱輸送システムが低環境負荷で既存システム（ボイラによる0.2 MPaの蒸気生成）を代替可能か確認し、技術開発へフィードバックすることである。まず図5に示すようなライフサイクルバウンダリを設定した。機能単位は、現在は化石燃料焚きボイラで供給されている蒸気の蓄熱輸送実施期間中の運用とした。実証地のクリーニング工場は製糖期間中、1日8時間運転を想定しているが、リファレンスケースとしてシステムを単純化し、蓄熱サイト、出熱サイトともに24時間300日稼働と想定した場合も試算した。種子島ケースにおいては、ブ

ロワ動力は製糖工場のサトウキビ残渣由来のエネルギーであるため、環境負荷の算定からは除外した。また、ゼオライトを輸送するトレーラーはサトウキビ運搬用のユニック車が使用可能であることから、算定から除外した。一方、リファレンスケースにおいてはブロワ動力由来の排出量を考慮した。

上述の実証試験の結果を受けて修正した数値解析を用いて燃料削減や必要補助動力、装置や熱交換器の大きさなどのフォアグラウンドデータを生成し、バックグラウンドデータは既存のデータベース(AIST, 2019)を用いた。環境影響評価手法としてLIME2(Itsuno, N. 2012)を選択し、ミッドポイントにおける影響領域として、気候変動と、資源消費を選択して熱のcradle-to-gateのLCAを実施した。

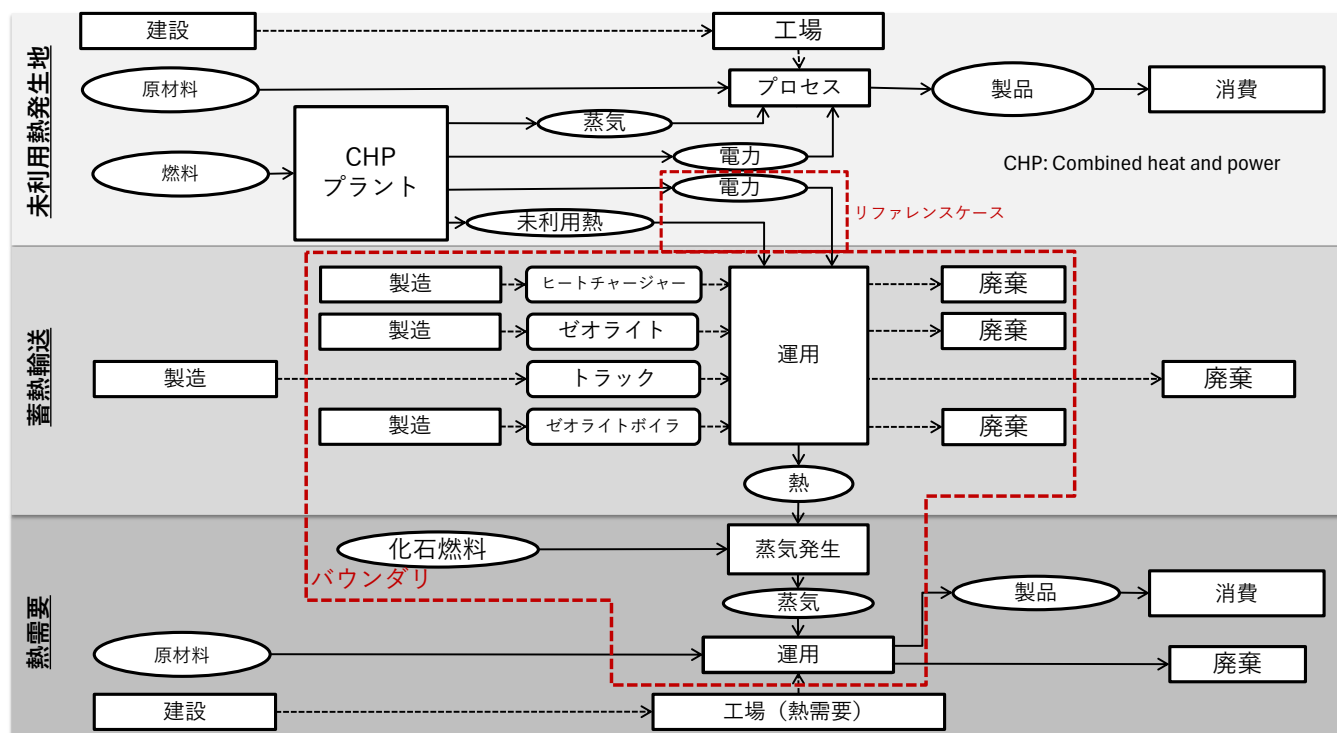


図5 ライフサイクルバウンダリ

目標⑥、⑦はコスト評価および産業連関分析に関連する目標である。図6に示すように蓄熱サイト、出熱サイトそれぞれに必要な各装置をリストアップし、上述した数値解析により設計された装置サイズを基に、化学装置コストハンドブック(Saito Y., 2000)等を用いてコストを算出した。また、得られたコスト表と種子島における各産業項目の移入率を用いて、産業連関表に対応した蓄熱輸送技術の投入係数表を作成した。設計結果から算出できる項目（メンテナンス、輸送など）についてはそのまま反映し、設計結果から反映が困難な項目については既存産業である熱供給業の投入係数表をベースとし、メンテナンスに対する他産業への投入比率を用いることで投入係数表を作成した。作成した投入係数表と種子島産業連関表を用いて、蓄熱輸送システム導入時における域内外への波及効果を解析した。

さらに、本研究による熱融通の全国へのインパクトを評価するために、科研費22K18061で作成している基礎自治体レベルのエネルギーフロー（都道府県レベルのデータからの活動量指標での按分が中心）に、本研究で一般廃棄物処理施設のデータを加えて、バイオマスと廃棄物由来の排熱の融通ポテンシャルを検討した。熱の可搬距離は既に商用化されている事例を見ても、数km～10 km程度である。1741の基礎自治体の90%以上が、等価半径で15 km以内に収まる面積であることから、熱融通を検討する最小単位を基礎自治体として、エネルギーフローに温度情報（三菱UFJリサーチ&コンサルティング,2016）を付与し、廃棄物やバイオマス由来の排熱を蓄熱輸送することにより、自治体内の低温蒸気需要を代替することを検討した。本研究で対象とするゼオライトを用いた蓄熱輸送システムは、200℃程度の排熱を回収し、100～150℃程度の蒸気として回生するため、200℃以上の排熱を150℃まで回収した場合の未利用熱ポテンシャル、そこにヒートチャージャー、ゼオライトボイラの蓄熱効率、出熱効率を掛け合わせた

蓄熱輸送システムの効率を乗ずることで、基礎自治体内での排熱の蒸気としての回生ポテンシャルを算出した。

以上により、①～③の技術開発と④～⑦のシステム評価であるLCA、コスト構造解析、産業連関分析、加えて全国での水平展開ポテンシャル評価とが実験により妥当性を確認した数値解析による商用機の概念設計により接続され、技術情報の反映、システム評価による要求される技術開発改善の項目の特定、技術改善のサイクルを実施することが可能となった。

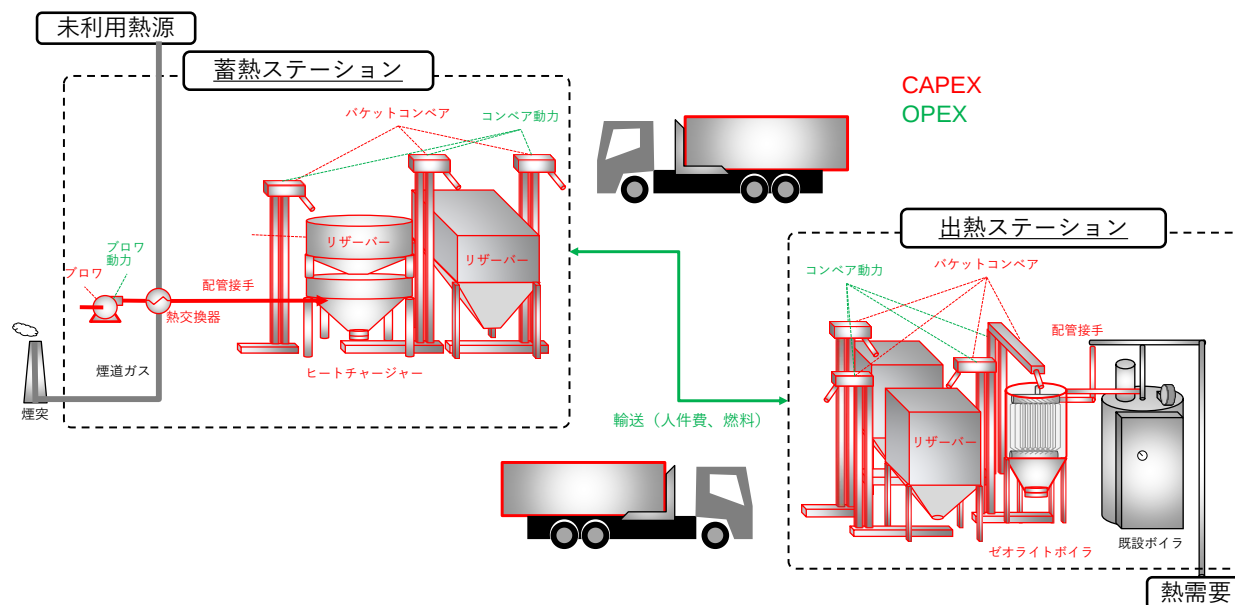


図6 蓄熱輸送システムのコスト項目

5. 結果及び考察

<【サブテーマ1】廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で回生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証結果及び考察>

【技術実証】目標①～③に対応

使用するゼオライトは4Aとし、粒径1.6 mmのビーズ粒子を用いた。また事前に希釈充填層試験を用いて吸着等温線を取得し、最大吸着量は0.23 kg/kg、有効蓄熱密度は572 kJ/kgであることを確認した。また水熱劣化試験を実施し、水熱劣化は観測されないことを確認した（成果9）。またシステム評価に用いる耐久サイクルは5000サイクルとした。

図7に完成したゼオライトボイラ試験設備を示す。また、図7右側はボイラ室内部の分岐配管、図7左側は実証コンテナ内の接続配管をそれぞれ示している。また、図8にゼオライトボイラ筐体内に格納するプレートフィンチューブ式熱交換器を示す。ゼオライト流量14.9 kg/h、投入時吸着量0.04 kg/kg、既設ボイラからの噴射蒸気流量1.92 kg/h、熱交換器への給水流量2.16 kg/hの条件で蒸気生成試験を実施した（成果7）。

図9に実証試験におけるマスバランスを示す。試験時間の6時間の間、排出される絶乾状態でのゼオライト重量は概ね一定に排出されており、定量排出が実現されていることがわかる。また試験開始直後には投入時吸着量である0.04 kg/kg分が吸着水としてゼオライトに吸着された状態で排出されているが、時間経過とともに排出されるゼオライトが噴射蒸気を吸着し、吸着水の重量が増大していることがわかる。概ね試験開始時に最上部に充填されていたゼオライトが最下部から排出される4~5時間後に吸着量が

0.169 kg/kgに達しており、下記式より噴射蒸気をすべて吸着していることがわかる。

$$q_{\text{out}} = q_{\text{in}} + \frac{m_{\text{inj}}}{m_{\text{zeo_dry}}} = 0.04[\text{kg/kg}] + \frac{1.92[\text{kg/h}]}{14.9[\text{kg/h}]} = 0.169[\text{kg/kg}] \quad (3)$$

<記号>

m : 質量流量 [kg/h]、 q : 吸着量 [kg/kg]

<添字>

dry : 絶乾時、in : 投入時、inj : 噴射、out : 排出時、zeo : ゼオライト

以上より、本試験においてマスバランスがとれていることを確認した。

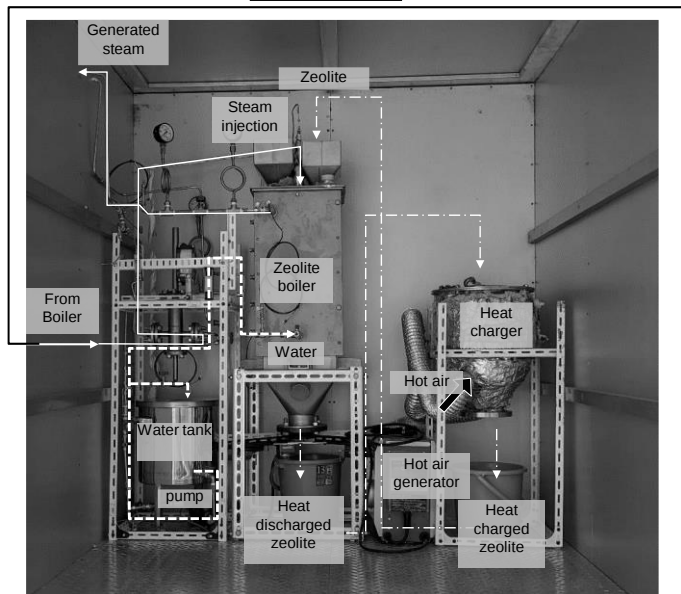
次に図10に試験開始後からの各測定点（上部より0, 35, 151, 265, 379, 495 mm）の温度履歴を示す。試験開始直後に最上部のゼオライト層の温度が噴射された蒸気の吸着により200℃以上に上昇し、その後試験期間中維持していることがわかる。最上部より下方の測定点におけるゼオライト層温度は試験時間の経過に伴い徐々に温度が上昇し、試験開始後4時間程度で定常状態に達していることがわかる。

定常状態に達した試験開始後5.5時間における内部の温度分布を図11に示す。最上部でゼオライト層温度が220℃に達しており、その後熱交換器内の給水との熱交換により温度が低下し、110℃程度で排出されていることがわかる。なお、エラーバーは試験開始後5時間～6時間後の各測定点の最大値と最小値を示している。上部から35 mmの測定点は1時間での最低温度が189℃、最高温度が227℃と最も変動が大きかった。これは最上部付近では吸着速度が速いため、温度はほぼゼオライトの吸着熱のみにより決定されることに対し、35 mmの地点はゼオライトの吸着と給水との熱交換とのバランスで温度が決定され、熱交換器内部の給水が、比熱の小さい過熱蒸気となっていて温度変化が大きいためである。35 mm地点以外の測定点に関しては最大値と最小値が10℃未満に収まっている。以上の実証試験により、増熱15%、熱回収率56%を達成し、目標①、②を達成した。

また、図11にフィン効率を未考慮の数値解析の結果と考慮した数値解析の結果を併せて示す。フィン効率を考慮しない解析だとゼオライトから給水への伝熱を過大評価しており、中盤で急激に温度が低下していることがわかる。一方、フィン効率を考慮した数値解析の結果はゼオライトの温度分布が概ね一致しており、フィン効率を考慮した数値解析モデルの妥当性を確認するとともに事業化規模の性能予測に用いることとした。

さらに小規模な蓄熱輸送の実証として、表2で示すように蓄熱輸送を実施した^(成果7)。まず2023年12月17日～20日にかけて製糖工場にてゼオライト200kg以上を蓄熱し、ドラム缶に保存した。次に工場内にサトウキビ運搬車が通らなくなる日時に蓄熱したゼオライトを運び出し、出熱地である7km離れたクリーニング工場に輸送した。2024年1月17日、19日にそれぞれクリーニング工場の既設ボイラからの蒸気を吸着させ、加圧蒸気の連続生成に成功した。これにより1か月前に蓄熱したサトウキビ残渣由来の未利用熱を時間と空間をシフトして出熱、加圧蒸気として取り出すことに成功した。同様のサイクルを2月～3月にかけてもう1サイクル実施した。

実証コンテナ



ボイラ室

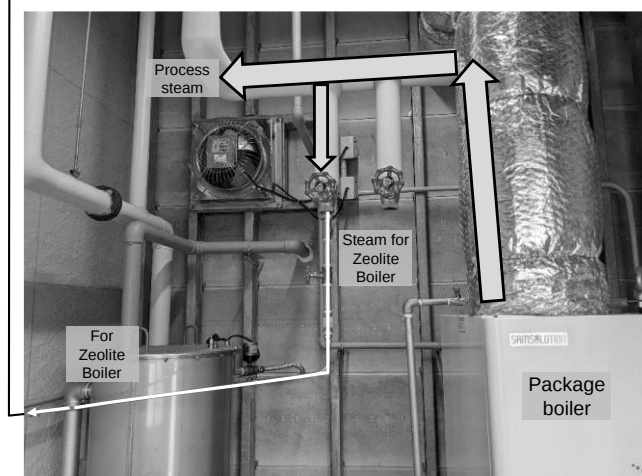


図7 ゼオライトボイラ試験装置



図8 ゼオライトボイラ内部に格納されているプレートフィンチューブ式熱交換器

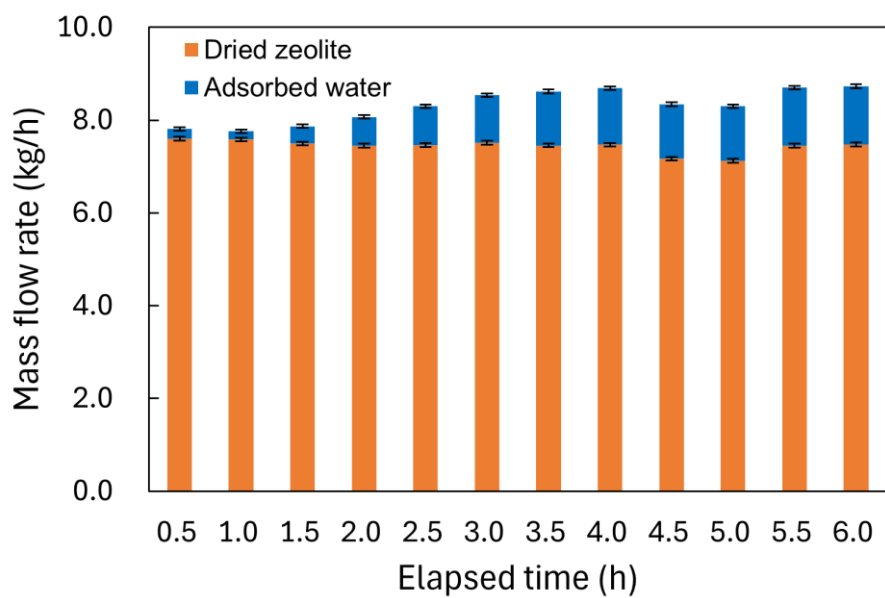


図9 蒸気生成試験中の絶乾ゼオライト流量と吸着水流量の推移

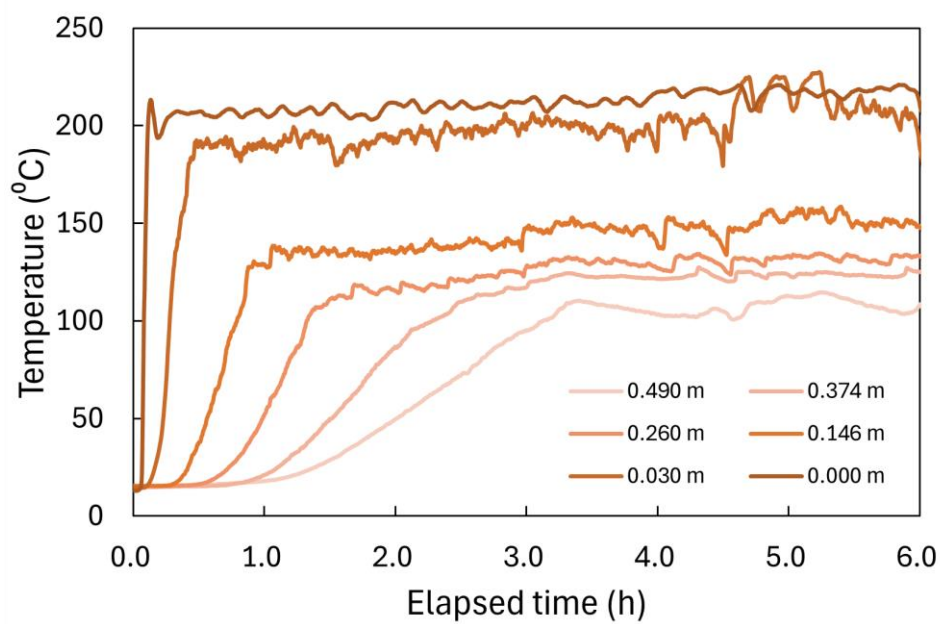


図10 蒸気生成試験中のゼオライト層軸方向各測定点における温度履歴

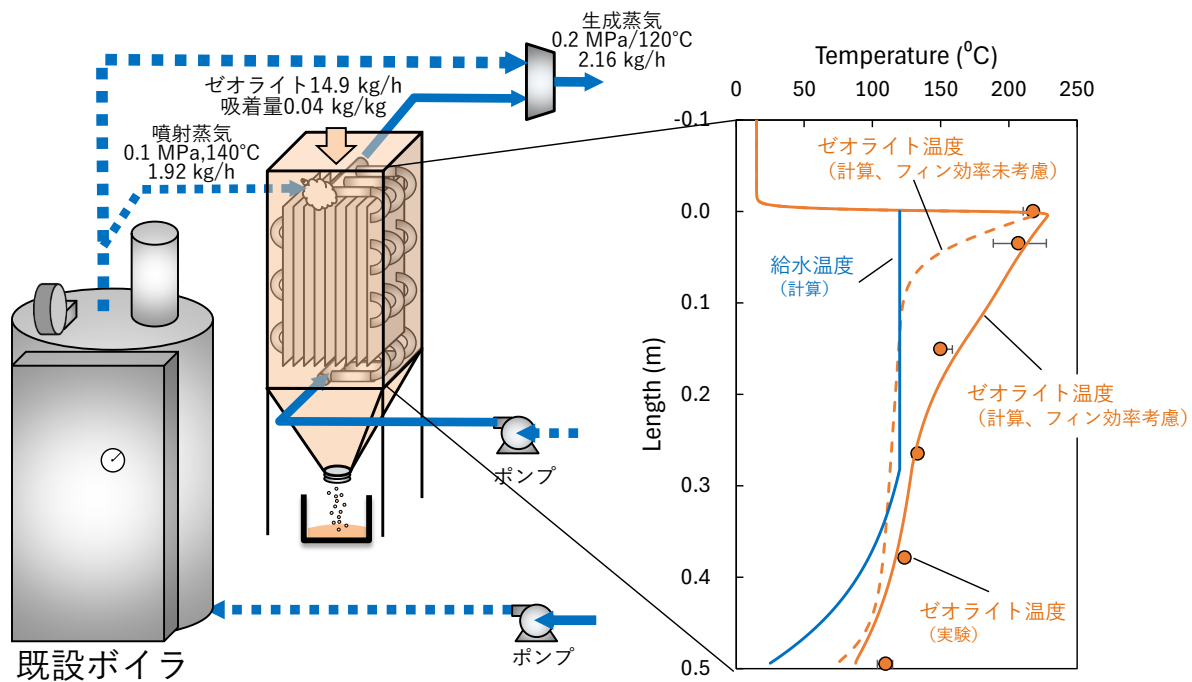
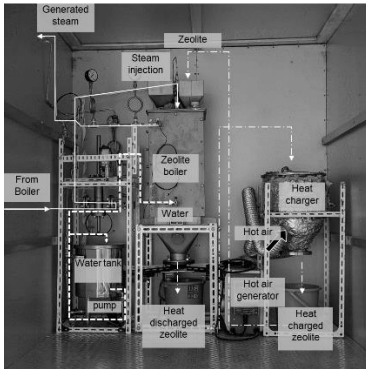


図11 定常時のゼオライトボイラ内温度分布の実験と数値解析（フィン効率考慮/未考慮）の結果

表2 小規模蓄熱輸送実証

蓄熱	輸送	出熱
		
2023年12月17～20日		
	2023年12月29日、30日 (蓄熱地=>出熱地)	
	2024年2月24日、25日 (出熱地=>蓄熱地)	2024年1月17日、19日
2024年2月25～27日	2024年2月28日 (蓄熱地=>出熱地)	
		2024年3月1日、4日

妥当性を確認した数値解析を用いて、事業化規模のゼオライトボイラの性能を予測した。数値解析において、運転パラメータの中で特に重要な噴射蒸気流量の燃料削減率に関する感度解析を実施し、排出時吸着量が 0.214 kg/kg となるような蒸気流量を噴射するケースが最も燃料削減効果が高いことがわかった。代表的な結果として図12(a)にゼオライト流量 1.1 t/h 、給水流量 260 kg/h 、噴射蒸気流量 191 kg/h の場合の結果を示す。実証試験とほぼ同じ温度履歴が得られている。なお、筐体断面積の大きさは既設ボイラとほぼ同じフットプリントとするため一辺 1 m として、熱交換器高さは各ゼオライト流量条件における最大の燃料削減効果の99%となるように設定した。このとき、熱回収率は87%であり、目標③を達成した。

また蓄熱装置についても同様に数値解析を実施した。蓄熱温度は 180°C 、胴径は 2.5 m とした。代表的な結果としてゼオライト流量 1.1 t/h のときの結果を図12(b)に示す。これらも同様に小規模蓄熱試験により妥当性を確認している（成果6）。ブロー動力を最小化することを目的関数として、設計変数である層高さと導入風量を決定した（成果5）。

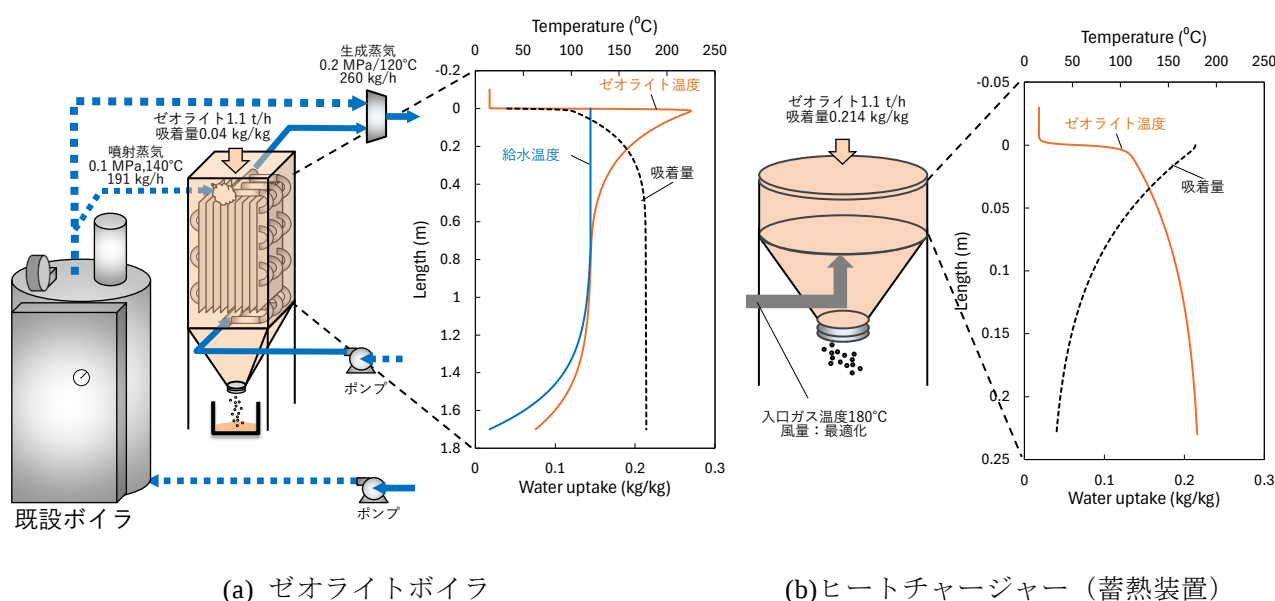


図12 事業化規模の数値解析結果

【システム】目標④～⑦に対応

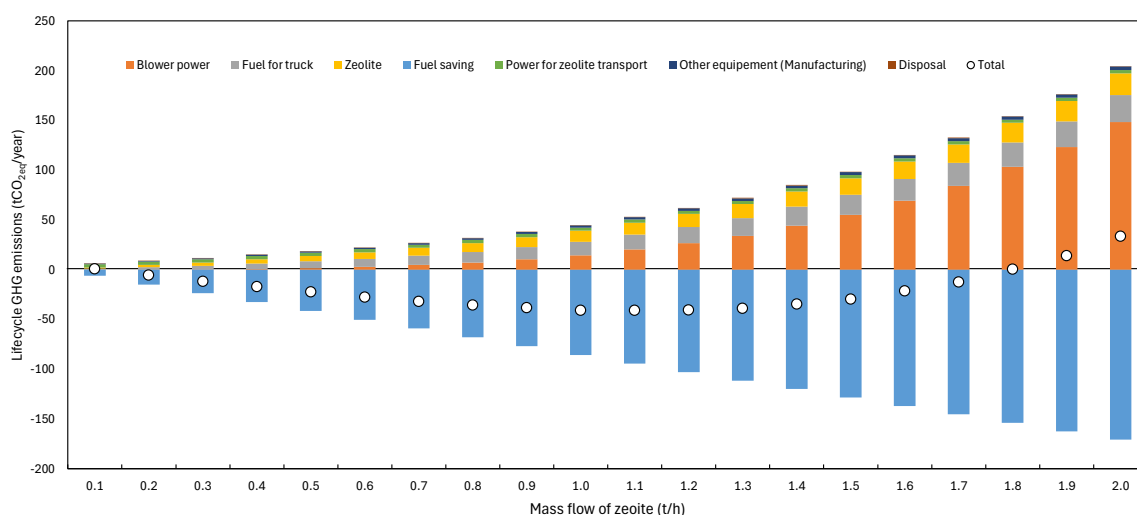
以上の数値解析を経て、 $0.1 \sim 2.0 \text{ t/h}$ の各ゼオライト流量において、燃料削減量や必要補助動力、各装置のサイズが定量化され、蓄熱輸送システムにおける温室効果ガス（GHG）排出量の原単位を取得、目標④を達成した。この結果を用いてLCAを実施した（成果2）。図13にリファレンスケースにおけるLCAの(a)GHG排出量(b)資源消費量の結果を示す。図13(a)に示すように、ゼオライト流量増大により燃料削減が増大するため、トータルでのGHGは削減する結果となった。しかしゼオライト流量が増大すると、蓄熱側でのブロー動力由来のGHG排出量が増大するため、ゼオライト流量 1.1 t/h においてGHG排出量は最小となり、それよりもゼオライト流量が増大するとトータルでのGHG排出量は増大に転じ、 1.8 t/h 以上ではシステムの導入以前と比較してGHG排出量は増大する結果となった。また、図13(b)に示すように、資源消費インパクトはゼオライト製造起因のインパクトが支配的であり、ゼオライト流量の増大に伴い増大する結果となった。ただし、最もGHG排出量が少ないゼオライト流量 1.1 t/h における資源消費インパクトは、 $1.8 \times 10^{-6} \text{ kg-Sb}_{\text{eq}}/\text{kWh}$ であり、同じエネルギー貯蔵媒体であるリチウムイオンバッテリー（ $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ kg-Sb}_{\text{eq}}/\text{kWh}$ ）（Cusenza, M., et al., 2019, Peters, J.F., 2016）と比較して低い値となった。リチウムイオンバッテリーは電力貯蔵用であるため、エクセルギーあたりでの資源消費インパクトに換算すると、蓄熱輸送システムの資源消費インパクトは $1.2 \times 10^{-5} \text{ kg-Sb}_{\text{eq}}/\text{kWh}_{\text{ex}}$ であり、エクセルギーで比較しても低いインパクトであることがわかった。以上より、一般的にGHG排出量、資源消費ともに蓄熱時のブロー動

力が支配的であり、蓄熱装置における圧力損失低減および出熱装置における燃料削減増大がシステムの環境負荷低減に貢献すること、ゼオライトによる蓄熱は低資源消費インパクトでエネルギーを貯蔵できる技術であることがわかった。

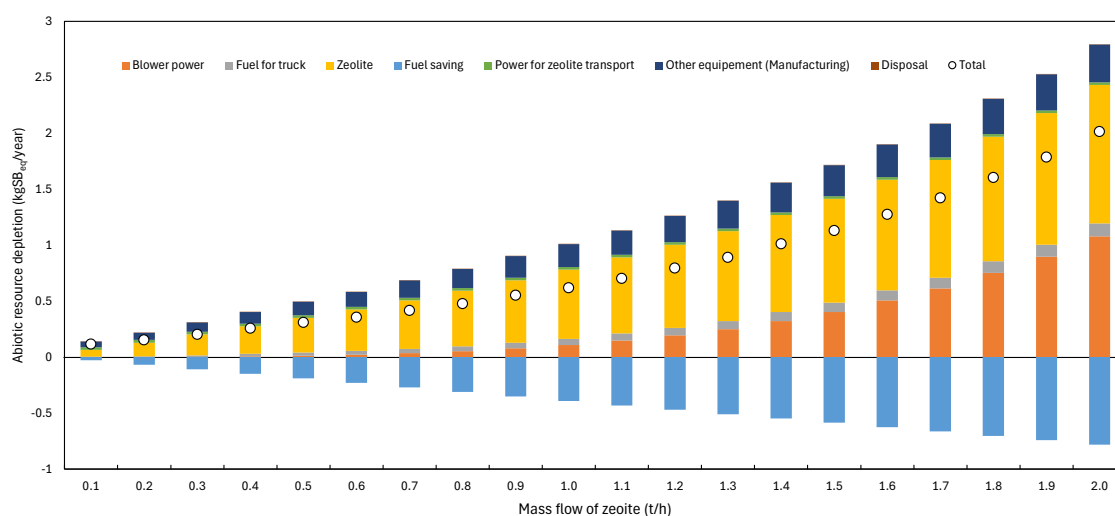
また、図14に種子島ケースにおけるLCAの(a)GHG排出量(b)資源消費量の結果を示す。種子島ケースにおいてはリファレンスケースにおいて支配的であったブロウ動力がサトウキビ残渣由来となり、単純化のために今回は算定から除外している（実際には農業プロセス由来の環境負荷が発生する）。この場合、GHG排出量はゼオライト流量の増大とともに線形で削減できることがわかった。よって、種子島のサトウキビ残渣由来の未利用熱を蓄熱源とする場合、出熱側のゼオライトボイラの燃料削減増大が環境負荷低減に貢献することがわかった。

なお、中間報告時にはベースモデルとしてゼオライト13Xを用いた場合のLCAの結果を報告した。実証試験ではゼオライト4Aを使用した。ゼオライト4Aは水熱劣化はないものの蓄熱密度ではゼオライト13Xに劣るため（ゼオライト13Xの有効蓄熱密度584 kg/kg、吸着用蒸気の潜熱を差し引くと217 kJ/kg、4Aの有効蓄熱密度572 kJ/kg、吸着用蒸気の潜熱を差し引くと179 kJ/kg）、ゼオライト4Aを用いた場合のGHG削減効果はリファレンスケースでのゼオライト流量1.1 t/hにおいてゼオライト13Xを使用した場合と比較して25%減少することがわかった。

以上のLCAにより、蓄熱輸送技術の導入による脱炭素効果を確認し、目標⑤を達成した。

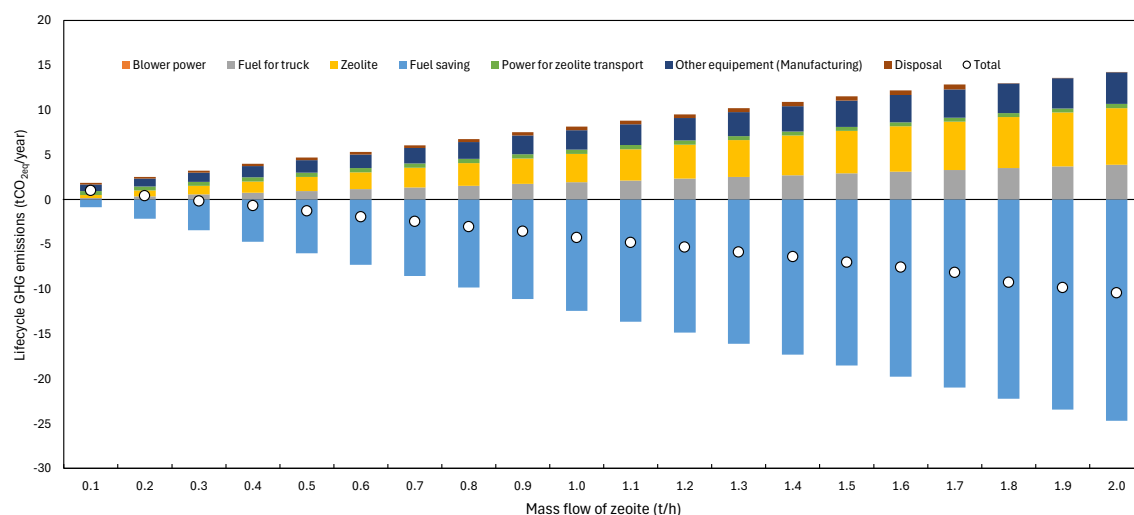


(a) GHG 排出量

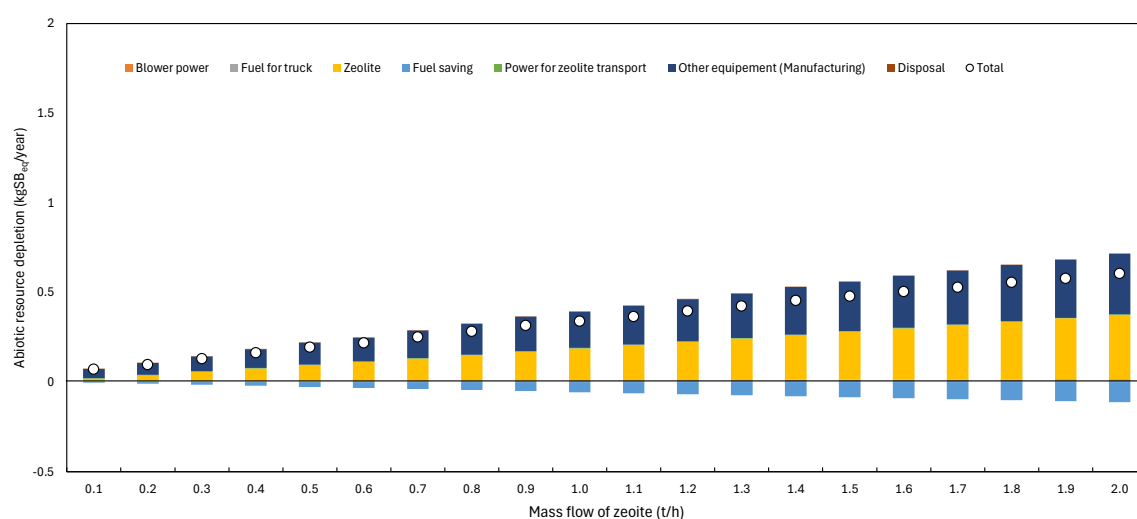


(b) 資源消費

図 13 LCA の結果（リファレンスケース）



(a) GHG排出量



(b) 資源消費

図14 LCAの結果（種子島ケース）

図15にリファレンスケースにてゼオライト流量1.1 t/hの場合のコスト構造を示す。CAPEXは耐用年数15年、金利5%としたときのAnnual CAPEXである。全体的にOPEXの方が大きな割合を占めており、その中でも特に輸送の人件費、燃料、蓄熱側でのブロワ動力が大きな割合を占めている。また、設備ではゼオライトボイラの熱交換器、蓄熱サイトでの熱交換器（GGH）が大きな割合を占めていることがわかった。また、図16に種子島ケースにて、GHG排出量が最も低いゼオライト流量1.1 t/hの場合のコスト構造を示す。年間での運転時間が短いこと、ブロワ動力のコストを考慮しないことによりCAPEXが支配的であることがわかった。図17にリファレンスケースおよび種子島ケースにおいて、各ケースの最大利益を1とした相対的な収支を示す。種子島ケースにおいてはコストの支配要因の1つであるブロワ動力のコストが発生しないため、GHG同様、線形で利益が増大し、ゼオライト流量1.2 t/hから黒字に転じることが推測された。また、リファレンスケースではブロワ動力に対するコストが発生するため、GHG同様、ピークが発生し、ゼオライト流量0.4 ～1.7 t/hのときに黒字になり、1.1 t/hのときに最大の利益となることがわかった。この流量はGHG排出量が最小となる条件と一致している。さらに図17にリファレンスケースにおけるLevelized Cost of Energyも併せて示す。リファレンスケースにおいて黒字となる0.4～1.7 t/hにおいて、Levelized Cost of Energyは26～40 円/kWhであり現在の化石燃料のコストと同等になるには設備コストの1/3程度の補助が必須であることがわかった。

以上より事業化規模のオペレーションベースで運用が可能であることがわかり、目標⑥を達成した。

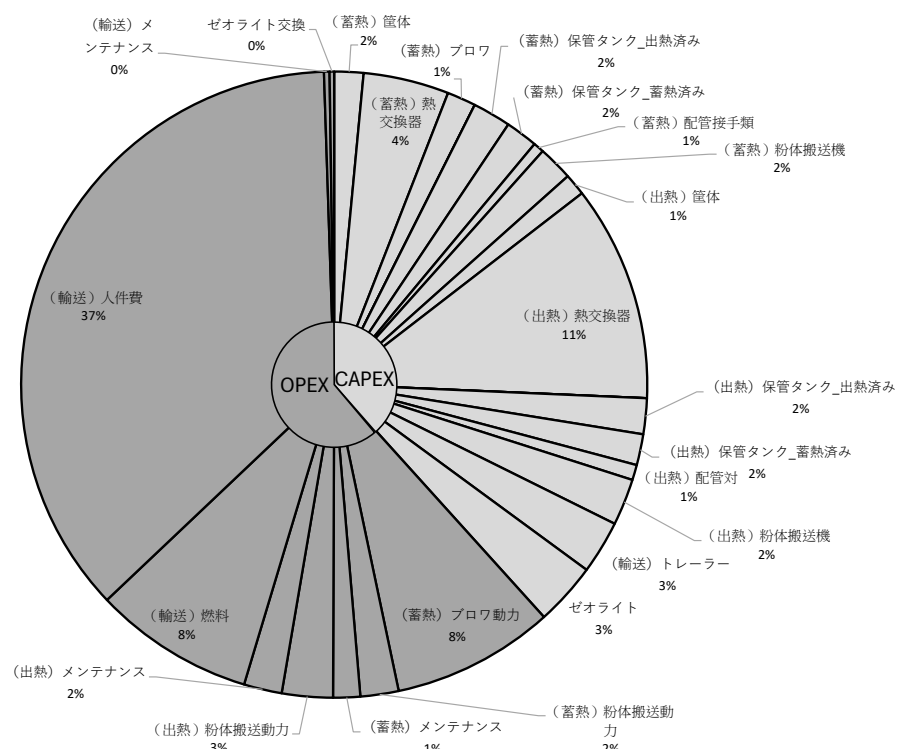


図 15 コスト構造（リファレンスケース）

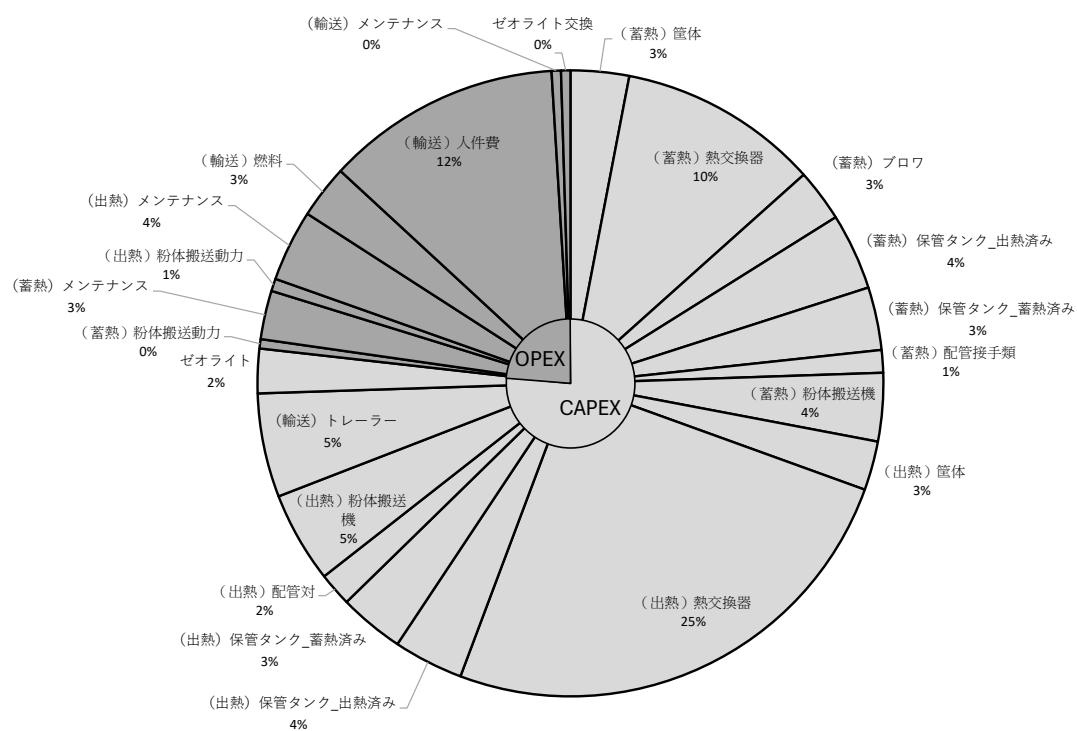


図16 コスト構造（種子島ケース）

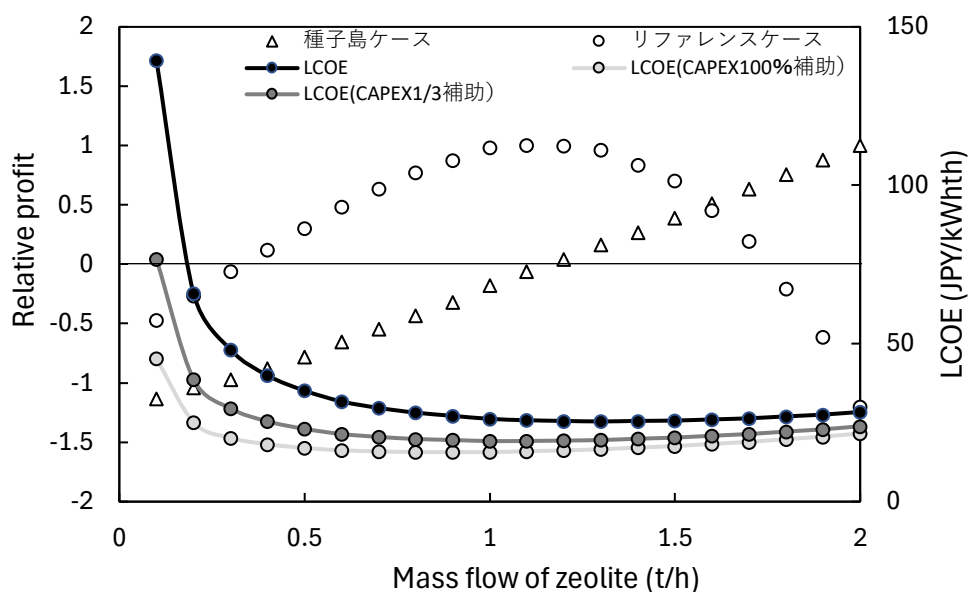


図17 蓄熱輸送システムの相対的利益とLCOE

また、これらのコスト項目を基に、既存の熱供給業の投入係数表と合わせ、産業連関表への新たな項目「蓄熱輸送」を作成した。数値解析の結果と連動させることで規模に応じて投入係数表が変化するように設定が完了した。これまでに開発した種子島産業連関表（尾下ら、2019）を用いて、リファレンスケース時に蓄熱輸送技術を導入した場合における種子島域内および域外への経済波及効果を解析した。図18にリファレンスケースにおいて、蓄熱輸送技術を導入した場合の域内、域外波及の内訳を示す。全体としては域内に71%、域外に29%の波及が生じることがわかった。域内波及の内訳は付加価値が39%、中間投入が61%となった。また、化石燃料を島外から購入していた金額を100%とすると域内、域外にそれぞれ107%、43%の波及が見込まれることがわかった。よって域外波及が57%減少し、域内に107%の波及効果が発生することから、域内での正味の経済波及効果は164%となることがわかった。なお、域外波及には、島外から移入する域外品の生産波及（島外）も含まれているため、域外品を島内で代替生産することが可能となれば、さらに島内での波及増大が見込める。蓄熱輸送はゼオライトを輸送する必要があるため、域内波及の中で多くを占めるのが道路貨物輸送であり、付随して石油製品、自動車修理、機械修理、建設補修への波及が多いことがわかった。また、蓄熱に必要なブロウ動力に起因して電力部門への波及も大きくなっていることがわかった。なお、発電や輸送には石油製品や軽油の投入が必要であり、間接的に域外波及していることになる。これらについては、島内で実証が進められているバイオエタノール（尾下ら、2019）や電気自動車（出光興産、2023）、バイオマス発電（尾下ら、2019）などの代替手段の導入により、さらに域内波及を増大させることが可能である。以上により蓄熱輸送導入による域内外での経済波及効果を評価し、目標⑦を達成した。

以上のシステム評価を受けて、環境負荷の支配要因であるブロウ動力の低減、燃料削減効果の増大が必要であることがわかった。特に燃料削減効果の増大については、図12(a)に示すようにゼオライトボイラからの排出時、ゼオライトは60℃以上で排出されており、この顕熱をボイラの給水予熱で回収することで実現可能である。給水予熱プロセスを考慮したLCAを実施するとGHG排出量は2段目の熱交換器の製造負荷を考慮しても最大60%削減効果の増大が見込めることがわかった。

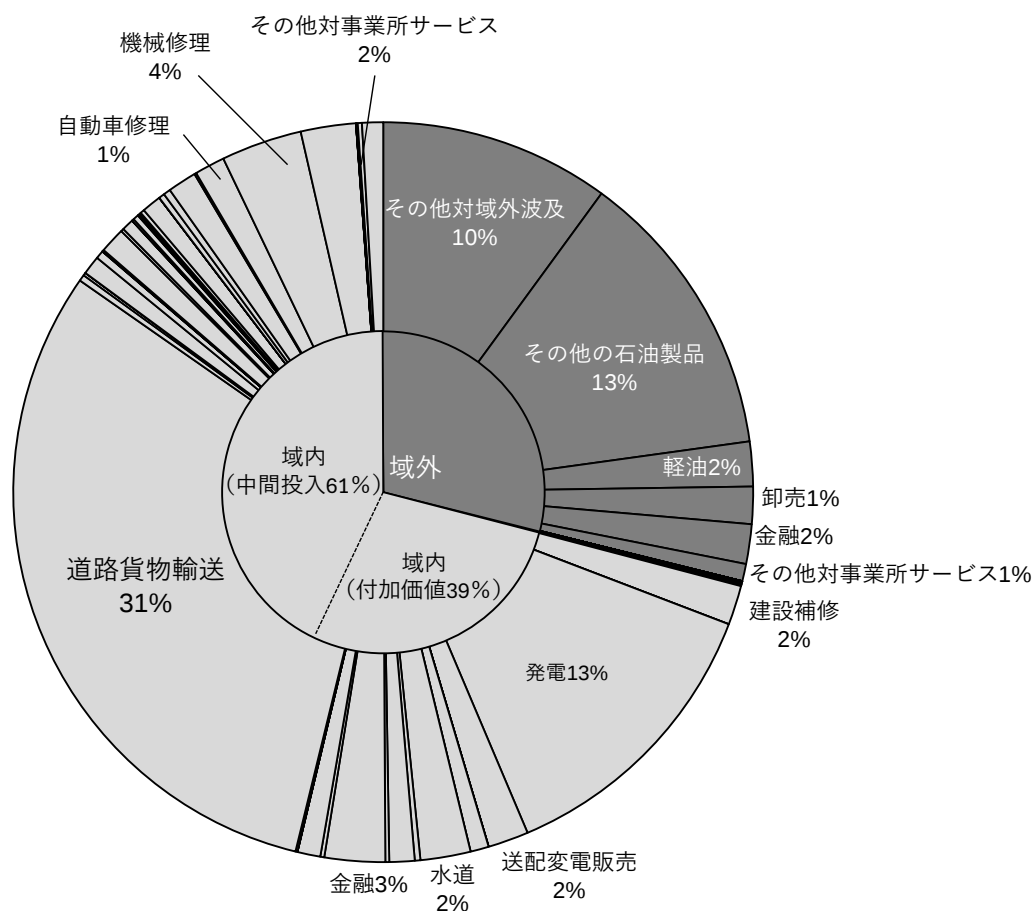


図18 蓄熱輸送システムの産業連関分析結果

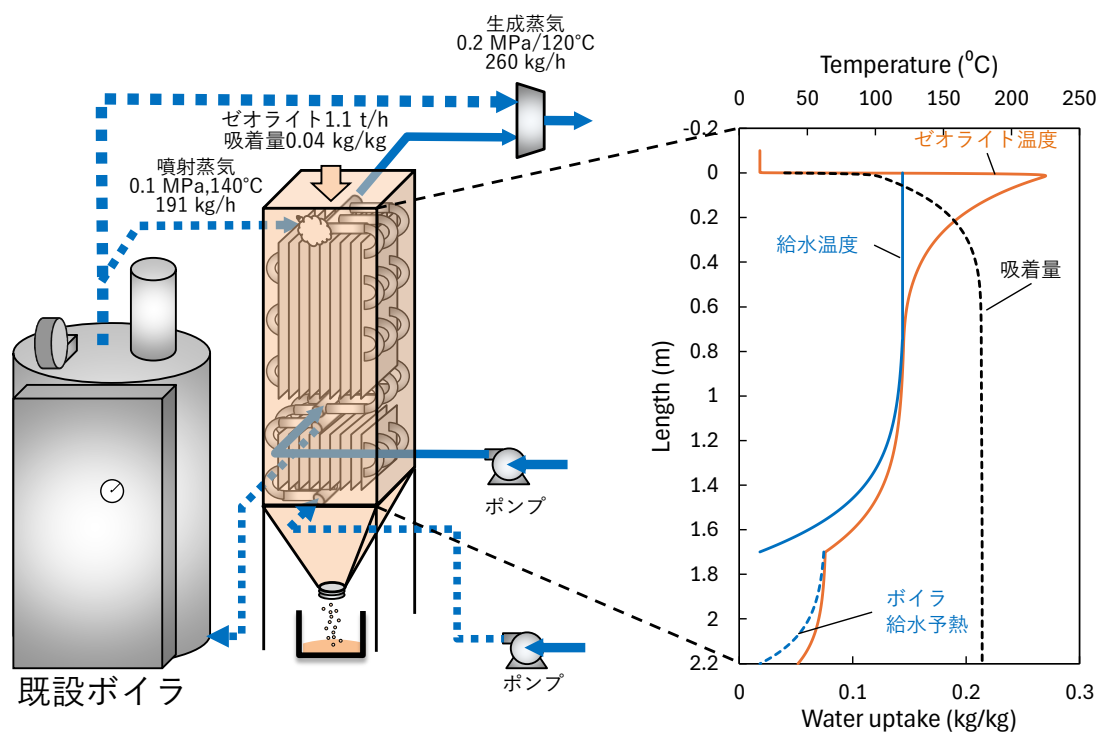


図19 給水予熱プロセスを導入したゼオライトボイラの性能予測

図20に基礎自治体レベルで作成したエネルギーフローにおいて、本研究の実証の対象としている鹿児島県種子島（西之表市、中種子町、南種子町）の結果を示す（成果13）。種子島は離島であり、電力グリッドが本土と接続されていないため、発電の大部分はディーゼル発電由来となっている。また、1次エネルギー投入のバイオマスのほとんどがサトウキビの製糖工場内で利用されるバガスである。作成したエネルギーフローを用いて、排熱として150℃まで回収し、数値解析で得られた蓄熱効率、出熱効率を乗じて地域の100～150℃程度の蒸気需要と比較し、自治体内での充当可能率を算出することで全国での廃棄物処理施設およびバイオマス由来の排熱の蒸気回生ポテンシャルを求めた。図21（左）廃棄物由来の排熱を、（右）にバイオマス由来の排熱を、ゼオライトを用いた蓄熱輸送システムで当該自治体内の低温蒸気で回生した場合の、自治体内の低温蒸気需要に対する充当率を0～1で示したマップを示す。これらの解析より、特に廃棄物処理施設の未利用熱を蓄熱輸送で回生することで全国の100～150℃の蒸気の約1%を回生できる可能性があることがわかった。また、地域によっては地域内における100～150℃の蒸気需要すべてを廃棄物処理施設由来の未利用熱回生で充当できる可能性がある自治体もあり、導入の有力な候補先である。

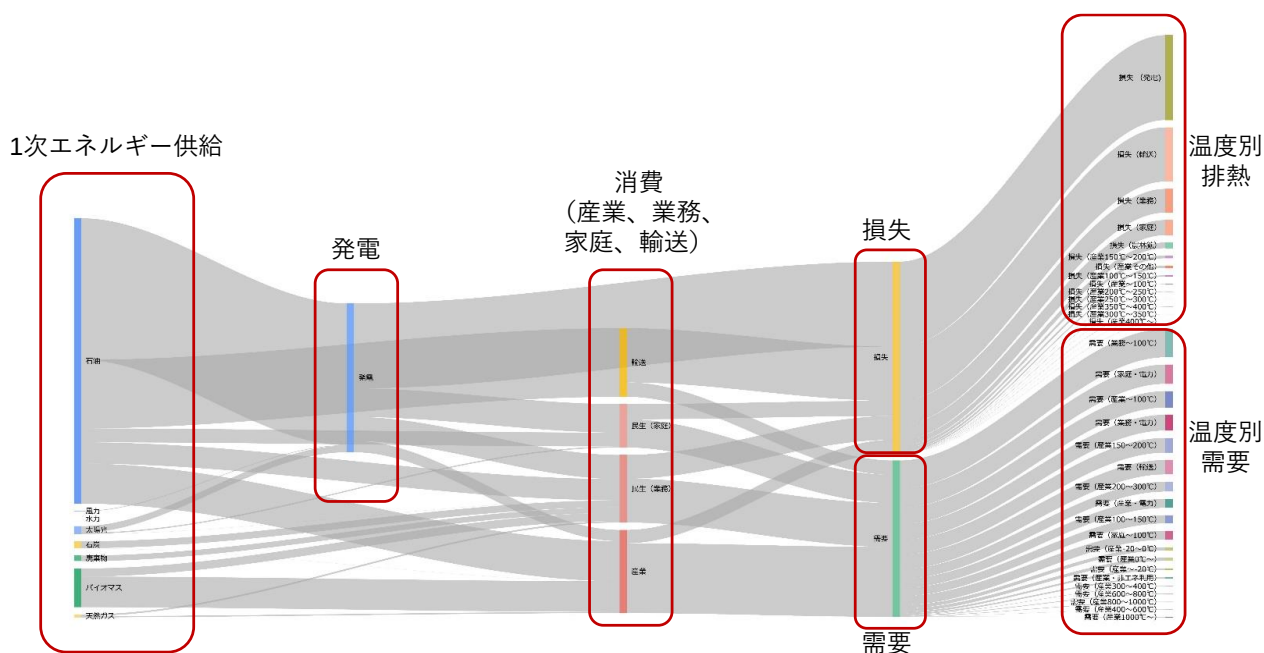


図 20 種子島のエネルギーフロー

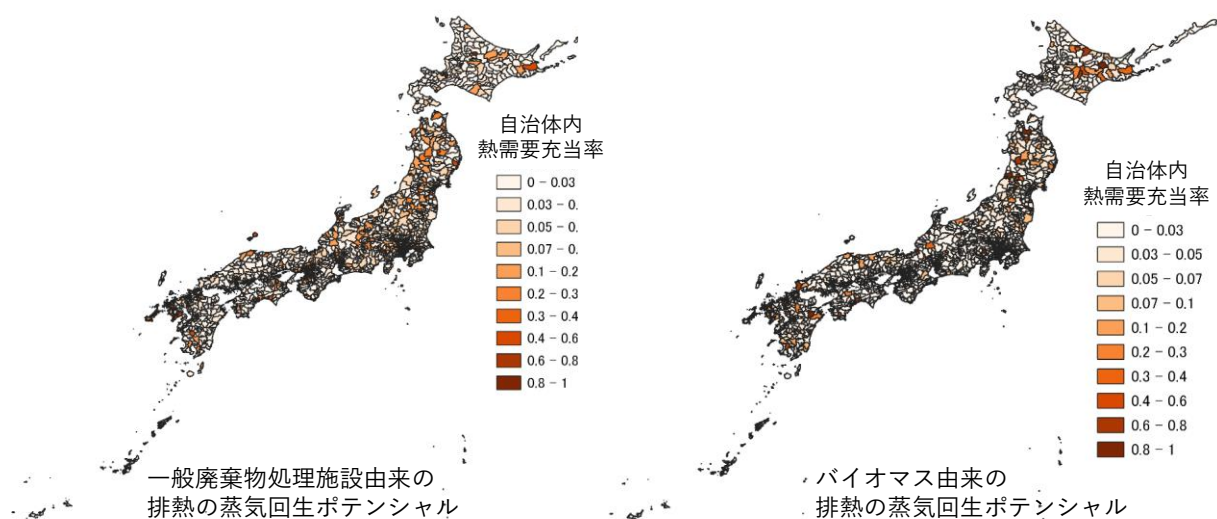


図 21 (左) 廃棄物由来排熱の回生ポテンシャル (右) バイオマス由来排熱の回生ポテンシャル

さらに本研究は実装予定地での実証研究であるため、図22に示すように自治体、中高生、島外からの見学者などを対象とした見学会を随時開催した。装置見学と併せて蓄熱したゼオライトに水をかけて吸着熱が発生し、蒸気が発生するという簡易的な実験を実施することにより、技術の認知度向上を実施することができた。さらに島内での他の適用可能先候補に関するフィードバックを得ることもできた。

本研究で実証した蓄熱輸送技術は廃プラスチック循環におけるエネルギーリカバリに相当する技術である。現在廃プラスチック循環では選別、マテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、エネルギーリカバリなど様々な施策の組み合わせが検討されている。このような技術の組み合わせの検討では用いるデータのスケールを事業化規模で揃える必要があり、開発段階の技術の事業化規模におけるインベントリデータが必要である。本研究においてはエネルギーリカバリ技術の1つである未利用熱回収のインベントリデータを生成^(成果1, 8)、提供することが可能である。



図22 中高生や自治体向けの説明会、体験会

6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

(1) 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で再生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証」

全体目標	全体の達成状況
地域の廃棄物処理施設由来の未利用熱を地域内で融通する可搬式の蓄熱輸送技術を対象にする。技術の実現可能性を高める、連続的な加圧蒸気の生成が可能な独創的な出熱装置を実証すること、その実証データをもとに、蓄熱輸送技術を適用したときの脱炭素効果、経済性効果を評価することが本研究の主目標である。 主目標を達成するための具体的な7つの目標を以下に示す。 ① 実証試験では、移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置を用いることで、最大0.2MPa/120℃の飽和蒸気（熱需要の蒸気条件に合わせる）の連続的な送出に成功する。 ② 既設ボイラから導入する0.6 MPa/160℃を減圧した0.1 MPa・140℃の過熱蒸気の導入熱量に対して、出熱装置が送出する0.2MPa/120℃の飽和蒸気の熱量が増大していること（燃料削減できていること）を実証する。 ③ 事業化規模においてゼオライトの発熱ポテンシャルに対する熱回収率約70%で、オペレーションベースにおいて経済循環を考慮しない場合の運用コストが重油価格と同等以下になることを見込んでおり、熱回収率70%達成が技術的な目標地点となる。 ④ 実証試験中に電力計などを用いて蓄熱・出熱装置の運転に必要な補助動力を算出し、実証データに基づくGHG排出原単位を求める。 ⑤ 事業化規模レベルにおける装置の建設時に発生するGHGや蓄熱材輸送時のトラックが消費する軽油由来のGHG、熱需要地において削減可能な化石資源由来のGHGなどを考慮したライフサイクルGHG排出量を評価し、蓄熱輸送システム導入における脱炭素効果を示す。 ⑥ システムの評価として、実証試験結果に基づき事業化規模での各装置の性能を予測し、各	（全体の達成状況と具体的な理由・根拠） ① 図7, 8に示すように移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置ゼオライトボイラ試験装置を種子島のクリーニング工場に設置し、0.2MPa/120℃の飽和蒸気2.16 kg/hの連続的な送出に成功し、目標を達成した。 ② 図9-11に示すように既設ボイラが生成した0.6 MPa/160℃の蒸気を0.1 MPaに減圧した過熱蒸気1.92 kg/hをゼオライトボイラ内に噴射し、0.2 MPa/120℃の飽和蒸気2.16 kg/h生成することに成功し、ゼオライト流量15 kg/hクラスの実験において増熱15%を確認し、目標を達成した。 ③ 実証試験により妥当性を確認した数値解析モデルを用いて図12に示すように事業化規模（実証地であるクリーニング工場での蒸気需要260 kg/hを生成可能なゼオライト流量1100 kg/h）の性能を予測し、熱回収率は87%であることを確認し、目標を達成した。 ④ 実証試験において熱伝達モデルを修正した数値解析モデルの妥当性を確認し、事業化規模の性能予測に成功した。また、数値解析の設計・運転変数の感度解析により事業化規模において燃料削減効果を最大化する最適化を実施、事業化規模における熱交換器や筐体の大きさ、運転にかかる追加的な負荷を計算することで実証試験を基にしたGHG排出原単位を求めることに成功し、目標を達成した。 ⑤ 図13, 14に示すように熱のCradle to gateのバウンダリにおけるライフサイクルGHG排出量を、システムを単純化したリファレンスケースと種子島におけるケースを求め、脱炭素効果が最大となる条件を求めることに成功し、目標を達成した。 ⑥ 図15, 16に示すように④、⑤同様に数値解析モデルを基にして生成した事業化規模の設計データを用いて、事業化規模におけるCAPEX, OPEXを定量化、コスト構造を明確にし、運用時において赤字にならず運転可能な条件を求めることに成功し、目標を達成した。 ⑦ ⑥のコスト構造解析に基づき、産業連関分析に必要な財・サービスの投入量・投入元を特定し、既存の熱供給業の投入係数表と併せて蓄熱輸送部門を新規部門として設置することに成功した。解析の結果、図18に示すように

種運用コストを見積もり、オペレーションベースで運用可能であることを示す。 ⑦ 地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を分析するために、種子島地域の経済構造を対象に調整された種子島産業連関表を用い、蓄熱輸送システムの複数の事業化パターンでの社会経済効果を分析する。具体的には、 1. 実証試験結果を基に、蓄熱輸送システムに必要な財・サービス（以後、製品）の投入量と投入元、熱の供給量と供給先などを整理し、蓄熱輸送部門を新規部門として設置するための部門情報を作成する。 2. さらに想定される副次的な材料製品の供給元や現在の材料供給構造などから、蓄熱輸送システムの導入によって新たに発生した需給をバランスングし、システム導入後の種子島の経済構造を表す産業連関表を作成する。 3. このシステム導入後の経済構造と、蓄熱輸送技術を適用しなかった場合（すなわち現状のまま島外から購入する化石資源を消費し続けた場合）の経済構造や地域外との取引収支を比較し、システム導入による地域経済への影響を定量化する。 以上の実証データとそれに基づくLCA、産業連関分析の結果を自治体、蓄熱輸送実施事業者に提示し、実装の規模やビジネスモデル等をまとめる。	蓄熱輸送導入時の域内外での経済波及効果を分析し、島外化石燃料購入価格を100%とすると164%の正味の域内経済波及が発生することがわかり、目標を達成した。 以上の結果を自治体等との協議に用い、導入候補先などの具体的な議論を実施した。また、蓄熱輸送技術の実証・運用の実績がある企業2社からアドバイザーに就任していただき、複数回（研究期間中合計20回、実証試験現場見学2回）、密に議論することで効率的に研究を推進した。 以上のように当初の研究目標すべてを達成した。また、以下の点において当初の目標にはない成果をあげることができたため、「目標を大きく上回る成果をあげた」と判断した。 ・技術実証（目標①～③に該当）において、表2に示すように当初予定していなかった種子島の製糖工場における蓄熱試験を実施することで、サトウキビ残渣由来のエネルギーの蓄熱、輸送、クリーニング工場における蒸気生成という、ごく小規模ながら種子島においてはじめて蓄熱輸送に成功することができた。これらの成果を自治体に報告し、島民シンポジウムにおいてこれら成果を発表した。 ・図21に示すように、研究成果の環境政策への貢献を考慮し、当初予定していなかった全国での蓄熱輸送技術のポテンシャルを評価する基礎自治体レベルのエネルギーフローを開発し、廃棄物処理施設由来およびバイオマス由来の地域内での未利用熱循環のポテンシャルを示すことができた。
--	---

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「廃棄物処理における未利用熱を近隣産業で再生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
地域の廃棄物処理施設由来の未利用熱を地域内で融通する可搬式の蓄熱輸送技術を対象にする。技術の実現可能性を高める、連続的な加圧蒸気の生成が可能な独創的な出熱装置を実証すること、その実証データをもとに、蓄熱輸送技術を適用したときの脱炭素効果、経済性効果を評価することが本研究の主目標である。 主目標を達成するための具体的な7つの目標を以	① 図7, 8に示すように移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置ゼオライトボイラ試験装置を種子島のクリーニング工場に設置し、0.2MPa/120℃の飽和蒸気2.16 kg/hの連続的な送出に成功し、目標を達成した。 ② 図9-11に示すように既設ボイラが生成した0.6 MPa/160℃の蒸気を0.1 MPaに減圧した過熱蒸気1.92 kg/hをゼオライトボイラ内に噴射し、0.2 MPa/120℃の飽和蒸気2.16 kg/h生成することに成功し、ゼオライト流量15 kg/hクラスの実験において増熱15%を確認し、目標を達成

下に示す。

- ⑧ 実証試験では、移動床・間接熱交換型を採用した出熱装置を用いることで、最大0.2MPa/120℃の飽和蒸気(熱需要の蒸気条件に合わせる)の連続的な送出に成功する。
 - ⑨ 既設ボイラから導入する0.6MPa/160℃を減圧した0.1MPa・140℃の過熱蒸気の導入熱量に対して、出熱装置が送出する0.2MPa/120℃の飽和蒸気の熱量が増大していること(燃料削減できていること)を実証する。
 - ⑩ 事業化規模においてゼオライトの発熱ポテンシャルに対する熱回収率約70%で、オペレーションベースにおいて経済循環を考慮しない場合の運用コストが重油価格と同等以下になることを見込んでおり、熱回収率70%達成が技術的な目標地点となる。
 - ⑪ 実証試験中に電力計などを用いて蓄熱・出熱装置の運転に必要な補助動力を算出し、実証データに基づくGHG排出原単位を求める。
 - ⑫ 事業化規模レベルにおける装置の建設時に発生するGHGや蓄熱材輸送時のトラックが消費する軽油由来のGHG、熱需要地において削減可能な化石資源由来のGHGなどを考慮したライフサイクルGHG排出量を評価し、蓄熱輸送システム導入における脱炭素効果を示す。
 - ⑬ システムの評価として、実証試験結果に基づき事業化規模での各装置の性能を予測し、各種運用コストを見積もり、オペレーションベースで運用可能であることを示す。
 - ⑭ 地域エネルギーシステムの導入による社会経済的影響を分析するために、種子島地域の経済構造を対象に調整された種子島産業連関表を用い、蓄熱輸送システムの複数の事業化パターンでの社会経済効果を分析する。具体的には、
 1. 実証試験結果を基に、蓄熱輸送システムに必要な財・サービス(以後、製品)の投入量と投入元、熱の供給量と供給先などを整理し、蓄熱輸送部門を新規部門として設置するための部門情報を作成する。
- ③ 実証試験により妥当性を確認した数値解析モデルを用いて図12に示すように事業化規模(実証地であるクリーニング工場での蒸気需要260kg/hを生成可能なゼオライト流量1100kg/h)の性能を予測し、熱回収率は87%であることを確認し、目標を達成した。
 - ④ 実証試験において熱伝達モデルを修正した数値解析モデルの妥当性を確認し、事業化規模の性能予測に成功した。また、数値解析の設計・運転変数の感度解析により事業化規模において燃料削減効果を最大化する最適化を実施、事業化規模における熱交換器や筐体の大きさ、運転にかかる追加的な負荷を計算することで実証試験を基にしたGHG排出原単位を求めることに成功し、目標を達成した。
 - ⑤ 図13、14に示すように熱のCradle to gateのバウンダリにおけるライフサイクルGHG排出量を、システムを単純化したリファレンスケースと種子島におけるケースを求め、脱炭素効果が最大となる条件を求めることに成功し、目標を達成した。
 - ⑥ 図15、16に示すように④、⑤同様に数値解析モデルを基にして生成した事業化規模の設計データを用いて、事業化規模におけるCAPEX、OPEXを定量化、コスト構造を明確にし、運用時において赤字にならず運転可能な条件を求めることに成功し、目標を達成した。
 - ⑦ ⑥のコスト構造解析に基づき、産業連関分析に必要な財・サービスの投入量・投入元を特定し、既存の熱供給業の投入係数表と併せて蓄熱輸送部門を新規部門として設置することに成功した。解析の結果、図18に示すように蓄熱輸送導入時の域内外での経済波及効果を分析し、島外化石燃料購入価格を100%とすると164%の正味の域内経済波及が発生することがわかり、目標を達成した。
- 以上の結果を自治体等との協議に用い、導入候補先などの具体的な議論を実施した。また、蓄熱輸送技術の実証・運用の実績がある企業2社からアドバイザーに就任していただき、複数回(研究期間中合計20回、実証試験現場見学2回)、密に議論することで効率的に研究を推進した。
- 以上のように当初の研究目標すべてを達成した。また、以下の点において当初の目標にはない成果をあげることができたため、「目標を大きく上回る成果をあげた」と判断した。
- ・技術実証(目標①～③に該当)において、表2に示すように当初予定していなかった種子島の製糖工場における蓄熱試験を実施することで、サトウキビ残渣由来のエネルギーの蓄熱、輸送、クリーニング工場における蒸気生成という、ごく小規模ながら種子島においてはじめて蓄熱輸送に成功することができた。

2. さらに想定される副次的な材料製品の供給元や現在の材料供給構造などから、蓄熱輸送システムの導入によって新たに発生した需給をバランスシグし、システム導入後の種子島の経済構造を表す産業連関表を作成する。 3. このシステム導入後の経済構造と、蓄熱輸送技術を適用しなかった場合（すなわち現状のまま島外から購入する化石資源を消費し続けた場合）の経済構造や地域外との取引収支を比較し、システム導入による地域経済への影響を定量化する。 以上の実証データとそれに基づくLCA、産業連関分析の結果を自治体、蓄熱輸送実施事業者に提示し、実装の規模やビジネスモデル等をまとめる。	これらの成果を自治体に報告し、島民シンポジウムにおいてこれら成果を発表した。 図21に示すように、研究成果の環境政策への貢献を考慮し、当初予定していなかった全国での蓄熱輸送技術のポテンシャルを評価する基礎自治体レベルのエネルギーフローを開発し、廃棄物処理施設由来およびバイオマス由来の地域内での未利用熱循環のポテンシャルを示すことができた。
--	--

（２） 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

＜得られた研究成果の学術的意義＞

これまで欧州を中心に蓄熱技術は検討されているが、出熱の用途先は暖房などの給湯利用がほとんどであった。これは、蓄熱技術は化学材料を専門とする研究者が多く取り組んでいるために機械工学的な設計が施されておらず、産業での使用に耐えうる装置が設計されていないことが原因の1つである。本研究は、化学材料として古くから使用されており、成熟した材料であるゼオライトを用い、a)機械工学的設計により常圧容器内を移動床で重力沈降するゼオライトが加圧水管の外壁を通して間接的に熱交換することで、製造コストを抑えながらも加圧蒸気の連続生成を可能にする斬新な構造をもつ出熱装置を用いる点、b)産業用途での蓄熱融通が可能であることを実証する点、c)実装予定箇所での社会実証であることから技術の実用性の認知を広め、研究室での技術実証に比べて社会実装への加速が期待できる点で新規性がある。a), b)に関して、蒸気生成側における小規模実証試験を既設ボイラと協調で運転することにより実施し、開発したゼオライトボイラを用いて、ゼオライト流量約15 kg/hにおいて既設ボイラより噴射した蒸気を吸着し、15%増熱した、産業用途に耐えうる加圧蒸気を連続生成できることを確認した。また、c)に関して、図22に示すように市民に対する見学会、体験会を随時開催したことにより、技術実証と並行して実用性の認知を高めることができた。

また、地域資源由来の未利用熱の地域内での融通は、単なる省エネルギー、化石資源の削減の効用に止まらず、地域外資源の購入に投じていた資金を地域資源の購入に置換えることにより、地域経済の好循環化を促し、地域経済の自立を援助する技術でもある。国際エネルギー機関IEA ECESの分科会や国際会議などで、廃棄物処理施設の廃熱を蓄熱する技術についての研究報告や議論は行われているが、単なる蓄熱の技術評価やコスト評価にとどまっており、地域の社会経済への影響は、産業界や自治体はもちろんのこと、研究者ネットワークの中でも評価されていない。本研究は、機械工学による設計・実証、ライフサイクルアセスメントによる脱炭素効果の評価（図13,14）、地域に特化した産業連関分析による域内経済波及効果の評価（図18）、さらに日本全国での水平展開ポテンシャル評価（図21）という、技術実証とシステム評価を組み合わせることにより、蓄熱輸送の社会実装のインパクトを初めて評価した実証研究であり、独創的である。

＜環境政策等への貢献に関する成果＞

- ・ 基礎自治体レベルのエネルギーフローに基づいた、廃棄物・バイオマス由来の未利用熱ポテンシャル、蓄熱輸送システムによる蒸気回生ポテンシャルは、廃棄物処理施設の未利用エネルギー有効利用方法の現実的なポテンシャルの値として、環境政策へ反映することが可能と考えられる。蒸気回生ポテンシャルの算出には、廃棄物処理施設由来の未利用熱から本研究で提案しているゼオライトを用いた蓄熱輸送システムの蓄熱効率、出熱効率を考慮しており、本研究の実証結果を基にした今後のスケールアップ実証等で適宜修正する数値解析に基づく効率を代入することで、蒸気回生ポテンシャルの精度の向上および本研究の初期の適用先の候補を明らかにすることが可能である。
- ・ 蓄熱輸送システムにおいて、事業化規模モデルの数値解析とライフサイクルアセスメントの接続により、既存ボイラへの蓄熱輸送システムの適用により、同じエネルギー貯蔵媒体であるバッテリーと比較して資源消費量を抑えながら、GHG 排出量を削減できることがわかった。本研究で提案している移動床を用いた蓄熱輸送システムは、熱交換器を輸送する必要がなく、防水フレコンバッグなどの簡易的な風袋および特別設計が不要なトラックで輸送可能であり、廃棄物処理施設とその近隣産業へのレトロフィット設計での適用が可能である。

参考文献

Tatsidjodoung, P., Le Pierr'es, N., Heintz, J., Lagre, D., Luo, L., Durier, F. 2016. Experimental and numerical investigations of a zeolite 13X/water reactor for solar heat storage in buildings. *Energy Convers. Manag.* 108, 488–500.

AIST National Institute of Advanced Industrial Science, Technology. 2019. LCI database IDEA version 2.3.

Itsubo, N., Inaba, A. 2012. LIME2 Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling. Life Cycle Assessment Society of Japan, Tokyo.

Saito Y. 2000. Cost estimation handbook for chemical engineers (in Japanese). Kogyo chosakai.

三菱UFJリサーチ&コンサルティング. 2016. 熱需給の実態等に関する包括調査報告書.

Cusenza, M.A., Bobba, S., Ardente, F., Cellura, M., Di Persio, F. 2019, Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. *J. Clean. Prod.* 215, 634–649.

Peters, J.F., Weil, M. 2016. A Critical Assessment of the Resource Depletion Potential of Current and Future Lithium-Ion Batteries. *Resour.*, 5, 46.

尾下優子, 兵法彩, 大内田弘太朗, 兼松祐一郎, 福島康裕, 菊池康紀. 2019. 技術導入による社会経済的影響の評価：種子島地域エネルギーシステムにおける産業連関分析の例. *日本LCA学会誌*, 15, 360-376.

出光興産, 種子島におけるEVレンタカーの充電実証を開始します ～島内の既存充電器を活用しカーボンニュートラル実現に貢献～, <https://www.idemitsu.com/jp/news/2023/230428.html> (2023年4月28日参照)

7. 研究成果の発表状況

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	6
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	3
口頭発表（学会等・査読なし）：	4
知的財産権：	1
「国民との科学・技術対話」の実施：	5
マスコミ等への公表・報道等：	1
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	0

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	<u>S. Fujii</u> , Y. Kanematsu and Y. Kikuchi, Inventory data generation for prospective lifecycle design through process modeling of energy recovery from waste plastics, Computer Aided Chemical Engineering, 52(2023), 3037-3042
2	<u>S. Fujii</u> , T. Nakagaki, Y. Kanematsu and Y. Kikuchi, Prospective life cycle assessment for designing mobile thermal energy storage system utilizing zeolite, Journal of Cleaner Production, 365 (2022), 132592, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132592
3	<u>S. Fujii</u> , Y. Kanematsu and Y. Kikuchi, Integration of experimental study and computer-aided design: A case study in thermal energy storage, Computer Aided Chemical Engineering, 49, (2022), 2095-2100, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-

	<u>85159-6.50349-3</u>
4	<u>S. Fujii</u> , Y. Kanematsu and Y. Kikuchi, Polygeneration from sugarcane industries enhanced by functionalizing novel cultivars and excess thermal energy, Computer Aided Chemical Engineering, 51 (2022), 469-474, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50079-5
5	<u>S. Fujii</u> , Y. Kanematsu, Y. Kikuchi and T. Nakagaki, Effect of bagasse drying on thermal energy storage utilizing zeolite water vapor ad/desorption at a sugar mill, Journal of Energy Storage, 51 (2022), 104495, https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104495
6	<u>藤井祥万</u> , 宮川大河, 中垣隆雄, 兼松祐一郎, 菊池康紀, 濱田洋輔, 製糖工場の未利用エネルギーを蓄熱する向流接触式ヒートチャージャーのベンチスケール実証試験と設計, 化学工学論文集, 47 (2021), 191-199, https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.47.191

< 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） >

成果 番号	【サブテーマ 1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

< その他誌上発表（査読なし） >

成果 番号	【サブテーマ 1】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

（3） 口頭発表

< 口頭発表（国際学会等・査読付き） >

成果 番号	【サブテーマ 1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
7	【予定】 <u>S. Fujii</u> , Y. Kanematsu, Y. Kikuchi, Small-scale field demonstration of zeolite based mobile thermochemical energy storage, the 16 th International Conference on Energy Storage, Lyon, France, Jun. 2024
8	【予定】 <u>S. Fujii</u> , Y. Kanematsu, Y. Kikuchi, Prospective lifecycle design through process modeling of energy recovery from waste plastics, the 34 th European Symposium on Computer Aided Process Engineering/15 th International Symposium on Process System

	Engineering, Florence, Italy, Jun.2024
9	S. Saito, <u>S. Fujii</u> , T. Nakagaki, Material selection considering degradation from system-level perspective of thermochemical energy storage and transport system, International Conference on Power Engineering ICOPE-2023, Kyoto, May, 2023

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
10	○藤井祥万, 菊池康紀, ライフサイクル思考からみたゼオライト系蓄熱システムの材料選択の検討, 第39回ゼオライト研究発表会, A24, 東京, 2023年12月
11	○藤井祥万, 山野秀将, 早船浩樹, 大野修司, 蓄熱を導入した発電システムの年間シミュレーションによる検討, 第27回動力エネルギー技術シンポジウム, D113, 東京, 2023年9月
12	○藤井祥万, 兼松祐一郎, 菊池康紀, 実験と数値解析に基づく蓄熱輸送システムの先制的ライフサイクル設計・評価, 第18回日本LCA学会研究発表会, 3-B1-01、オンライン、2023年2月
13	○藤井祥万, 中垣隆雄, 兼松祐一郎, 尾下優子, 菊池康紀, 基礎自治体レベルのエネルギーフローを用いた脱炭素に向けた熱融通の役割の検討, 第26回動力エネルギー技術シンポジウム, E241, 佐賀, 2022年6月

(4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
14	藤井祥万	東京大学	「蒸気発生装置および蒸気発生システム」	特願2022-168643	2022年10月4日

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
15	2023	スマートエコアイランド種子島シンポジウム(鹿児島県西之表市、中種子町主催)、「サトウキビ未利用エネルギーの蓄熱輸送小規模実証」(聴講者数134名)にて基調講演、鹿児島県、2024年3月
16	2022	東海国立大学機構岐阜大学, Gifu Joint Degree Symposium 2022にて、「Prospective lifecycle assessment for design, Case study of mobile thermal energy storage system」の題で基調講演(聴講者数 不明), 2022年11月
17	2021	鹿児島県立国分高等学校・舞鶴最先端サイエンス研修「エネルギー変換と熱」(2022年1月31日、聴講者約15名)にて研究事例の紹介
18	2021	東京都私立淑徳巣鴨高等学校・スポンサー講座「持続可能な社会の創造に求められる人材とは」(2021年8月31日、参加者約81名)にて研究事例の紹介
19	2021	エコプロonline2021(主催:日本経済新聞社、(一社)サステナブル経営推進機構、2021年11月25日～12月17日 来場者数54885名)「熱を時空間的に輸送する蓄熱輸送技術」にて研究内容を展示

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ１】のメディア報道等
20	WASEDA ONLINE、2022年6月20日、蓄熱輸送による地域資源の有効活用でカーボンニュートラルに貢献

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ１】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ１】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

8. 国際共研究等の状況
特に記載すべき事項はない。

9. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
藤井 祥万	早稲田大学創造理工学研究科総合機械工学専攻修了 博士（工学） 東京大学総括プロジェクト機構「プラチナ社会」総括寄付講座・特任研究員、東京大学未来ビジョン研究センター・特任助教を経て、 現在、東京大学未来ビジョン研究センター・特任講師 専門は機械工学、伝熱工学、ライフサイクル工学、研究テーマは蓄熱技術の多角的解析

Abstract

[Research Title]

Demonstration of Heat Discharging Process of Thermal Energy Storage and Transport System for Recovering Unused Heat from Waste Incineration Plant in Vicinal Industries

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Fujii Shoma
(PI ORCID) :	ORCID0000-0001-6440-3819
Principal Institution :	Institute for Future Initiatives, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, JAPAN Tel: +81-3-5841-7937 E-mail: shoma.fujii@ifi.u-tokyo.ac.jp
Cooperated by :	
Keywords :	Renewable energy, Regional energy system, Unused heat, Waste incineration, Regional Circular and ecological economy

[Abstract]

Unutilized local resources from biomass residues and waste incineration should be efficiently utilized within the region. Currently, power generation using waste is being actively conducted, but due to the variety of heating value of fuels, the efficiency of power generation is low and a large amount of unused heat is generated. On the other hand, other industries in the vicinal area often use heat from burning fossil resources. In order to efficiently circulate local resources, it is necessary to develop and apply technologies for recovering and distributing unused heat. The gap in time and space between the generation of unused heat and the demand for fossil fuels needs to be resolved, and it is necessary to establish a thermal energy storage and transport system. The objective of this project is to propose a system for transporting unused heat to neighboring industries using zeolite, a heat charging material, to make waste treatment facilities a stable energy generation base for the region, and to conduct small-scale demonstration tests and system evaluation of an original heat discharging system that can continuously generate pressurized steam for industrial use. A small-scale demonstration test rig of a "zeolite boiler" employing a moving bed indirect heat exchange system capable of continuously generating pressurized steam using zeolite was constructed and installed in a cleaning factory on Tanegashima where a fossil fuel boiler was installed. The demonstration test was conducted on a scale of 15 kg/h zeolite flow rate, and it was demonstrated that the use of the heat charging material has the effect of increasing the heat of steam. In addition, a numerical analysis model coupled with heat/mass conservation equations was constructed to simulate the demonstration test, and its validity was confirmed. Using the numerical model that was validated through demonstration tests, a conceptual design of a commercial-scale equipment was conducted, and system evaluations such as life cycle assessment, cost analysis, and input-output analysis were conducted on a commercial scale (zeolite flow rate: 0.1-2.0 t/h), and the dominant factors of the thermal energy storage and transport system that circulates local resources were identified, and to confirm the possibility of providing feedback for further technological development.

[References]

Fujii, S., Nakagaki, T., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y., (2022) 'Prospective life cycle assessment for designing mobile thermal energy storage system utilizing zeolite', Journal of Cleaner Production, 365, 132592, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132592>

Fujii, S., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y., (2022) 'Integration of experimental study and computer-aided design: A case study in thermal energy storage', Computer Aided Chemical Engineering, 49, 2095-2100, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85159-6.50349-3>

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

氏系リ另

(参考資料) 公募審査・中間評価等への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
採択時コメント：熱源の変動に対する方策	本研究は出熱側に焦点を絞って実証試験を実施し、蓄熱試験は予備的に実施したため、本コメントに対して十分に検討がなされなかった。しかしシステム評価にて蓄熱時のブロウ動力も支配要因の1つとなっていることから、間接熱交換方式を採用した蓄熱措置の検討を開始している。これは熱媒を空気ではなく熱媒油とすることで蓄熱源の熱量のほとんどを、熱交換器を介してゼオライトに伝えるものである。熱媒油は顕熱蓄熱材として用いることも可能であることから、蓄熱において間接熱交換方式を採用することで熱源の変動に対して対処が可能であると考えている。
採択時コメント：熱事情などが異なる他の離島や地域への展開における留意点とその課題解決について、定量的な数値を含めて整理するとよい。	基礎自治体レベルのエネルギーフロー解析を実施し、全国の廃棄物処理施設由来の未利用熱の回生ポテンシャルを示すことができた。
採択時コメント：。設計で機械工学の知見をアピールしているが、産連表やLCA で設計に戻すことは今まで何度も提言されてきたが、実践を伴った例は少ないので、形式的なものにならないように注意すること。	実証試験により妥当性を確認した数値解析モデルを用いて事業化規模の装置の概念設計を実施し、その結果を用いてシステム評価を実施したため、各設計変数、運転変数とシステム評価がシームレスに接続されている状態を実現した。これによりホットスポットを解消するために装置設計でどう改善すべきかを特定することができた。
中間評価コメント：装置実証に対する成果を着実に挙げていくと同時に、熱需要先やそのスケールなどを含めたフィージビリティ検討を含めた解析を期待する。	システム評価として年間稼働を想定したリファレンスケースと製糖期間中のみの稼働する種子島ケースを試算し、それぞれの条件の違いがライフサイクルでの環境負荷、コストに及ぼす影響を評価することができた。
中間評価コメント：ゼオライトの種類で効率など知りたいところである。	今回はゼオライト4Aを用いた実証試験を実施した。中間評価時には実証試験設備を構築中で実験結果が得られていなかったため、システム評価は汎用的なゼオライト13Xを用いてベースモデル構築を実施していた。リファレンスケースにおいて、4Aと13XでGHG排出量削減は蓄熱密度が低下する分、25%低下することがわかった。
中間評価コメント：使用するゼオライトの諸性質や寿命など、基礎的な情報が必要である。	使用したゼオライトの種類（4A）、粒径、蓄熱密度および想定している耐久サイクル数を報告書に明記した。

中間評価コメント：具体的なデータとして蓄熱量/コスト(設備＋運用)を規模に合わせて表に出してほしい。	コスト構造解析の結果として、スケールごとのLevelized Cost of Energy (蓄熱量/ (設備＋運用))を明記した。
中間評価コメント：CO ₂ 削減効果やコスト分析地域社会経済影響も同時に扱う点が評価できる。しかしこのような評価の前提となるシステム構成の中で粒子輸送の部分や需要地での出熱装置の設計などの概要を設定しないと評価はできないのではないかな。	出熱装置、蓄熱装置ともに小規模実証試験を実施し、熱・物質移動を連成した数値解析モデルを構築することで事業化規模の性能および設備サイズ、追加的にかかる負荷や輸送負荷などを考慮し、システム評価を実施した。
中間評価コメント：120℃前後の需要先規模がどの程度あるのか、求められる温度域についても明示していただきたい。	基礎自治体レベルのエネルギーフロー解析を実施することで廃棄物処理施設の未利用熱を同自治体内で回生可能な120℃程度の熱需要を示すことができた。これにより需要があっても未利用熱がない自治体は実装の最初の候補地からは除外することができる。