

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Thermochemical energy storage and transport system of unused heat from sugar mill utilizing zeolite ad/desorption cycle

ゼオライトの吸脱着サイクルを用いた製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システム

申請者

Shoma	FUJII
藤井	祥万

総合機械工学専攻 エクセルギー工学研究

2019年11月

産業革命以降，近年特に気候変動が顕著となり，気候変動に関する政府間パネルは地球が不可逆な変化の臨界点に直面していると警告している．2015年に国際連合で採択された持続可能開発目標（SDGs）の17のゴールには，地球の限界やプラネタリーバウンダリの概念も反映されており，世界トップの会議体では持続可能性が常に論点の一つとなっている．このような国際的な動きの下，日本では環境省が2018年にまとめた第5次環境基本計画の中で，地域の特色を生かし，エネルギーを含めた自立分散型システムの構築を目指す「地域循環共生圏」の概念を示した．エネルギー源の多くを国外に依存している日本のなかでも特に島嶼地域は，地理的要因から経済的に不利な状況にあり，島内の未利用エネルギー資源を可能な限り循環利用していくことが求められている．

本論文で着目した種子島は，サトウキビの栽培とそれを利用した原料糖生産（製糖）が主要産業である．島内のほぼ中央に位置する1か所の製糖工場には12月～4月の製糖期間中に全島からのサトウキビが集積され，原料糖を生成して島外の精製糖工場に輸出している．製糖工場はサトウキビの圧搾残渣であるバガスを燃料としてバガスボイラで燃焼させ，工程に必要な動力と熱を得ている．バガスは良質なバイオマス燃料ではあるものの，所内の需要に対して過剰に発生し，保存も容易ではない．このため，少量の敷料としての利用以外はバガスボイラで燃焼され，その結果200℃程度の未利用熱が煙道ガスとして排出されている．一方，島内では食品加工工場やクリーニング工場などの熱需要地が点在しており，島外から購入した高価な重油やLPGをボイラで焚き，120℃/0.2 MPa程度の蒸気を特定の期間あるいは年間を通じて消費している．このように，島内資源であるサトウキビ由来の未利用熱の発生源である製糖工場と熱需要地の間には距離的・時間的な mismatches があり，これを解消する手段として蓄熱輸送システムの適用が有効である．しかしながら，既に実用化されている蓄熱技術では蒸気生成が困難であり，日本国内ではこれまで経済的な要因もあって大規模な普及には至っていない．本論文は蓄熱技術としてゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルを用いた化学蓄熱に着目し，世界に類を見ない加圧蒸気の連続生成を実現する移動床間接熱交換型の機器の工学的な設計方法の確立とその実証，および蓄熱輸送システム全体の技術経済分析を通して，製糖工場が自立的に運用可能な未利用熱の高度利用法について詳細にまとめたものである．

本論文は全7章で構成される．第1章では，島嶼地域のエネルギーの現状認識や，産業界の未利用熱の発生量および熱需要の温度レベルなどの整理，再生可能エネルギーの熱利用の現状分析を通して，本研究の位置付けを明確化した．

第2章では，蓄熱技術の既往研究を材料，機器およびシステムの観点から網羅的にレビューした．蓄熱技術は顕熱，潜熱，化学蓄熱の3種類に分類されるが，蓄熱密度が大きく，時空を超えた熱輸送が可能な技術は可逆反応を伴う化学蓄熱

のみである。化学蓄熱のなかでも水を吸着質とする吸着材は、安全で材料の劣化もないため、安価なゼオライトを蓄熱材として決定した。ゼオライトの機械的破損の回避と既設ボイラとの協調運転による信頼性確保のため、吸着質を水蒸気とした。また、ゼオライトを用いた出熱・蓄熱の反応器としては固定床型が主流であるが、本論文が目的とする加圧蒸気の連続生成を実現する蓄熱輸送システムには移動床間接熱交換型が適しており、これらの特徴が全て既往研究に対して独創的であることを明らかにした。

第3章では、製糖工場の熱物質フロー解析により、蓄熱ポテンシャルおよび蓄熱用空気温度を決定した。まず、バガスの発熱量を含水率測定試験と元素分析から特定し、操業データを用いて製糖工場のプロセスフローダイアグラムをプロセスシミュレータ上に構築した上で、煙道の排気と熱交換して得られる蓄熱用空気のエンタルピーを蓄熱ポテンシャルとして定量化した。また、蓄熱ポテンシャル増大のため、ブロー蒸気低減とバガス乾燥の適用を検討した。特にバガス乾燥プロセスは限られた熱源と滞留時間内で発熱量の増大を見込む必要があり、バガス乾燥速度が重要となる。そこでバガス充填層を用いた通風試験による乾燥速度の実測データに基づき、製糖プロセスの結晶・効用化プロセスの排温水の熱源と製糖工場でのベルトコンベアを用いたバガス乾燥プロセスを設計し、その性能を予測した。ブロー蒸気低減とバガス乾燥の適用によるシステムのゲインを蓄熱ポテンシャル増大と発電出力増大の熱電比可変システムとして整理し、それぞれ最大で+52%（蓄熱用空気 13℃上昇相当）および 70 kW の出力増が見込めることを示した。

第4章では、出熱装置である「ゼオライトボイラ」を考案し、確立した設計法について詳述した。ゼオライトボイラは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、安価な常圧容器を用いながらも加圧蒸気の連続生成を実現した。実験的に等温下で取得した吸着平衡データを Freundlich-Dubinin-Astakhov モデルで近似可能なことを示し、それを生成項として組み込んだ物質・エネルギー保存を連成した 1次元数値解析によるゼオライトボイラの内部現象の予測結果を基に、島内需要家として 0.2 MPa・約 0.4 t/h の蒸気出力を想定し、その約 1/200 の規模の試験装置を設計・製作した。当該装置を用いてゼオライト流量 10 kg/h で蒸気生成試験を実施し、0.2 MPa の過熱蒸気の連続生成に成功した。本試験より、ゼオライトボイラの性能評価指標として考えられる二つの運転モードの特性が一致しないことも新たな知見として得た。すなわち、発熱ポテンシャルに対する熱回収率は、排出時吸着量が増大すれば向上するが、ゼオライトボイラ内部の伝熱現象におけるゼオライト層－水管の律速により、出口付近の発熱のスリップ増を来すため、燃料削減率は悪化する。上記の不一致は導入事業者にとって運転が複雑になるため、その課題解決に既設ボイラへの給

水を予熱するなど，ゼオライトの残存顕熱を二次的に回収することで，両者が一致することも示した．

第 5 章では蓄熱装置として，連続的に蓄熱可能な「ヒートチャージャー」を考案し，出熱装置と同様に移動床反応器をベースとした数値解析により，設計法を確立した．設計法に基づき，向流接触型ヒートチャージャーとして製糖工場の最大ポテンシャルの約 1/400 のスケールの装置を製作し，ゼオライト流量約 5 kg/h で連続的な蓄熱を実証した．スケールアップに伴い，蓄熱用空気ブロワの動力が次章で示すように運転コスト増の主要因であることから，層高さおよび蓄熱用空気流量についてブロワ動力最小化を目的関数として決定した．

第 6 章では第 3～5 章の内容を統合し，蓄熱システム全体の技術経済分析を実施し，製糖工場が自立して運用可能な条件を明らかにした．コスト構造の分析によって，蓄熱用空気のブロワ動力に付随する電力コストとゼオライトの輸送コストが経済的な自立のための支配要因であることを明らかにした．製糖工場の通常操業，向流接触型のヒートチャージャー，給水予熱プロセスなしのゼオライトボイラの構成による基本ケースでは，全ての条件において収支は赤字となるが，ゼオライトボイラに給水予熱プロセスを導入するだけでも売熱量が増大し，利益創出が可能であることを示した．さらに製糖工場の操業においては，第 3 章で述べた通り，ブロー蒸気低減による発電量増加がブロワの電力コストを相殺し，利益も大幅に増加することを示した．一方，バガス乾燥プロセスを適用した場合でも発電量増が望めるが，当該プロセス導入に伴って新たに必要となる機器のメンテナンスコストや追加の電力コストによって，ブロー蒸気低減プロセスより収益性は若干劣る．最後に本章のまとめとして，設備投資の約 70～80% を補助し，製糖工場においてブロー蒸気低減やバガス乾燥を適用すれば蓄熱輸送システムは自立して運用可能であることを示した．

第 7 章では本論文のまとめと，今後の展望を述べた．

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 藤井 祥万

印

(2019年 11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○ Journal paper	1. Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill, Applied Energy Vol. 238, pp. 561-571, March 2019, Shoma Fujii , Naoyuki Horie, Ko Nakaibayashi, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki
Journal paper	2. ゼオライトを用いたバイオマス由来排熱の蓄熱利用における熱回収率向上の研究, ボイラ研究 Vol. 412, pp. 4-10, 12月 2018, 中垣隆雄, 藤井祥万
○ Journal paper	3. Techno economic analysis of thermochemical energy storage and transport system utilizing “Zeolite Boiler”: case study in Sweden, Energy Procedia Vol. 149, pp. 102-111, September 2018, Shoma Fujii , Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, Takao Nakagaki, Justin NW Chiu, and Viktoria Martin
○ Journal paper	4. Material and heat flow analysis in thermal energy storage and transport system utilizing unused heat from bagasse boiler, Mechanical Engineering Journal Vol. 3 No. 5 pp.16-00334, October 2016, Shoma Fujii , Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki
International conference	1. Effect of ad/desorption characteristics on techno-economic aspects of thermochemical energy storage and transport system, The 5 th International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems IMPRES2019, Kanazawa Japan, October 2019, Shoma Fujii , Naoyuki Horie, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki
International conference	2. Humidified air injection for zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill, International Sustainable Energy Conference 2018 ISEC, Graz Austria, October 2018, Shoma Fujii , Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki
International conference	3. Techno economic analysis of thermochemical energy storage and transport system utilizing “Zeolite Boiler”: case study in Sweden, 16 th International Symposium on District Heating and Cooling DHC 2018, Hamburg Germany, September 2018, Shoma Fujii , Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, Takao Nakagaki, Justin NW Chiu, and Viktoria Martin
○ International conference	4. Development of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill, 14 th International Conference on Energy Storage EnerSTOCK 2018, Adana Turkey, April 2018, Shoma Fujii , Ko Nakaibayashi, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki
International conference	5. Effect of multi injection process on “Zeolite Boiler” in thermochemical energy storage and transport system of unused heat from bagasse boiler, ASME 2017 Power and Energy Conference PowerEnergy & ICOPE 2017, Charlotte USA, June 2017, Shoma Fujii , Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki
International conference	6. Transport system of unused heat from bagasse-boiler by using chemical heat storage in sugar milling and refinery process, International Conference on Power Engineering ICOPE-15, Yokohama Japan, November 2015, Shoma Fujii , Ryuichi Satoh, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
Domestic conference	1. 製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システムにおける蓄熱装置の性能予測と実験による検証, 第24回動力・エネルギー技術シンポジウム, 東京, 2019年6月, 有本直昭, 阿部弥生, 藤井祥万 , 菊池康紀, 兼松祐一郎, 中垣隆雄
Domestic conference	2. 製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システムにおけるゼオライトボイラによる加圧過熱蒸気の連続生成, 第24回動力・エネルギー技術シンポジウム, 東京, 2019年6月, 樋口明寛, 藤井祥万 , 菊池康紀, 兼松祐一郎, 中垣隆雄
Domestic conference	3. ゼオライトの水蒸気吸脱着特性による未利用熱蓄熱輸送システムの技術経済分析, 第56回日本伝熱シンポジウム, 徳島, 2019年5月, 藤井祥万 , 堀江直之, 兼松祐一郎, 菊池康紀, 中垣隆雄
Domestic conference	4. 製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システムにおける蓄熱装置の技術経済分析に基づく概念設計, 日本機械学会2018年度年次大会, 大阪, 2018年9月, 阿部弥生, 古谷和真, 藤井祥万 , 菊池康紀, 兼松祐一郎, 木村誠一郎, 中垣隆雄
Domestic conference	5. ゼオライト粒子とボイラ管壁間の熱伝達における吸着熱の影響, 第55回日本伝熱シンポジウム, 札幌, 2018年5月, 堀江直之, 藤井祥万 , 中垣隆雄
Domestic conference	6. 製糖工場内未利用熱の蓄熱輸送システムにおけるゼオライトボイラの蒸気発生試験, 第22回動力・エネルギー技術シンポジウム, 豊橋, 2017年6月, 中居林昂, 藤井祥万 , 兼松祐一郎, 菊池康紀, 中垣隆雄
Domestic conference	7. 農工横断型プロセスモデリングによる持続可能な植物資源利活用のためのシナリオ計画, 化学工学会第82年会, 東京, 2017年3月, 大内田弘太郎, 藤井祥万 , 兼松祐一郎, 尾下優子, 中村遼太郎, 陳怡静, 福島康裕, 中垣隆雄, 大久保達也, 菊池康紀
Domestic conference	8. 製糖工場の未利用熱輸送システムにおけるゼオライトボイラの熱回収向上策の検討, 化学工学会福島大会2016, 福島, 2016年11月, 藤井祥万 , 兼松祐一郎, 菊池康紀, 中垣隆雄
Domestic conference	9. 製糖工場内未利用熱の蓄熱輸送システムにおけるゼオライトボイラの基礎検討, 日本機械学会2016年度年次大会, 福岡, 2016年9月, 古谷和真, 藤井祥万 , 中垣隆雄, 菊池康紀, 兼松祐一郎, 濱田洋輔
Domestic conference	10. ゼオライトによるバガスボイラーの未利用熱輸送システム, 第20回動力・エネルギー技術シンポジウム, 仙台, 2015年6月, 藤井祥万 , 佐藤龍一, 兼松祐一郎, 菊池康紀, 中垣隆雄

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
Poster presentation	1. Exploratory study of "Zeolite Boiler" in thermal energy storage and transport system of unused heat from bagasse boiler, The 4 th International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems IMPRES 2016, Sicily Italy, October 2016, Shoma Fujii , Kazuma Furutani, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, and Takao Nakagaki
Award	1. Best Paper Award, The 14 th International Conference on Energy Storage, Adana Turkey, April 2018
Award	2. Outstanding presentation award, JSME Power and Energy System division, The Japan Society of Mechanical Engineers (日本機械学会動力エネルギーシステム部門 優秀講演賞), ICOPE-17, Charlotte USA, June 2017
Award	3. 2016 年度小野梓記念賞 (学術賞), 2017 年 3 月
Award	4. 2016 年度日本機械学会三浦賞, 2017 年 3 月
Award	5. 化学工学会学生賞 (関東支部長賞) 特別賞, 2016 年 11 月
Funding	1. 日本学術振興会特別研究員 DC2 採択, 2018 年 4 月
Funding	2. JXTG エネルギー若手研究者奨励研究 採択 2017 年 7 月
Funding	3. 文部科学省博士課程教育リーディングプログラム・実体情報学博士プログラム 選抜 2015 年 4 月