

# 博士論文審査報告書

## 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

2020年2月

## (1) 審査経緯

当該博士論文審査は、以下の通り実施された。

- 2019年10月4日 予備審査開催通知申請書提出
- 2019年10月30日 予備審査会
- 2019年11月7日 教室受理決定
- 2019年11月21日 創造理工学研究科運営委員会受理決定
- 2019年12月11日 博士論文審査第一回目
- 2019年12月27日 博士論文審査第二回目
- 2020年1月7日 リーディング大学院 QE3
- 2020年1月30日 公聴会
- 2020年2月6日 審査分科会
- 2020年2月25日 創造理工学研究科運営委員会合否判定

## (2) 論文の背景，内容および評価

2015年に国連で採択された持続可能な開発目標(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含まれており、世界トップの会議体では持続可能性が主要な論点となっている。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。エネルギー資源のほとんどを国外からの輸入に依存している日本において、島嶼地域は地理的要因から特に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緩和策の一つである。本論文で取り扱う種子島は、サトウキビ栽培と原料糖生産(製糖)が主要産業であり、副生するバガスは全島からの収集システムが確立した良質なバイオマスエネルギーである。島内の中央に位置する1か所の製糖工場には12月～4月の製糖期間中にサトウキビが集積され、原料糖を生産して島外の精製糖工場に輸送している。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。バガスは少量の敷料としての利用もあるが、湿潤な状態では保存が容易ではないため、所内の需要に対する余剰もバガスボイラで焼却処分され、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、島内には中小規模の熱需要が点在しており、島外から購入した高価な重油やLPGを燃料とした汎用ボイラで120℃程度の飽和蒸気を、年間を通じて消費している。このように、未利用熱の発生源と熱需要には距離的・時間的なミスマッチがあり、その解決手段として蓄熱輸送システムの適用を検討している。既に実用化されている蓄熱技術は主に給湯用であり、質の高い蒸気など産業用に資する実例は全くない。また、欧米を中心に熱需要の多い地域では蓄熱技術も大規模に展開されているが、日本国内の給湯用では経済的な理由もあって普及実績

は数例しかない。蓄熱研究の最先端では蓄熱密度や出熱速度の向上を目的とした蓄熱材料に関するものが多く、実用化研究に乏しい。本論文では上記の課題を網羅的な文献レビューから抽出した上で、蓄熱材料として低コストで技術的成熟度の比較的高いゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルによる化学蓄熱を採用し、既存ボイラとの協調運転を前提とする出熱装置「ゼオライトボイラ」を新たに開発した。ゼオライトボイラのコンセプトとして、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し、製造コストを抑える斬新な構造を考案している。ゼオライトボイラ内の温度や吸着量分布を支配する混相流の質量・運動量・エネルギー・吸着質の保存式群を連成させた数値計算コードに、ゼオライトの吸脱着特性を等温下の希釈充填層試験にて得られた平衡吸着量の近似式と、二次元円筒型の断熱試験器による非定常な発熱量の実測値を考慮し、蒸気発生量 1.5 kg/h 相当の試験装置を設計製作した。本試験装置は、シミュレーションの予測通りの挙動で安定した加圧蒸気の連続生成に世界で初めて成功し、ゼオライトボイラの工学的な設計方法の確立と実証が本論文の最も重要な成果である。この成果を中心に蓄熱輸送システム全体の設計にも発展させている。バガス乾燥などの新たな蓄熱ポテンシャル増加策を考慮した製糖工場のバガスボイラ周りのプロセスシミュレータによる熱物質収支から、蓄熱装置をゼオライトボイラと同様の方法論で設計し、ゼオライト流量 4.7 kg/h の試験装置で技術的に検証している。さらに種子島での蓄熱輸送事業に適用するスケールのシステムと機器類を上述の方法にて設計し、具体的に設定した事例において設備投資とゼオライト輸送費を含む運用コストを詳細に計上するとともに、機器の可変パラメータの技術経済的分析を通して、熱供給事業における収益最大化のための最適な条件を検討している。ゼオライトボイラでは輸送蓄熱量に対する熱回収率向上による既存ボイラの焚き減らしが収益に大きく影響するため、排出ゼオライトの顕熱回収のための二次熱交換器の導入が効果的である。蓄熱装置では 2% 程度のバガス乾燥プロセス導入と所内電力自給条件下での蓄熱量最大化の構成で、蓄熱用乾燥高温空気のブロワ動力最小化が収益改善に重要であることなどの検討結果を得ている。全体として設備投資の約 70~80% の補助率で、蓄熱量増加プロセス等を適用すれば、蓄熱輸送システムは自立して運用可能で、温室効果ガス排出も年 70 t 程度削減できると結論付けている。

以上要するに、本論文は再生可能エネルギー由来の未利用熱を、産業用の加圧蒸気の連続生成を可能とするゼオライトボイラを中心とした蓄熱輸送システムで有効利用する方法を提案し、地域循環共生圏の具現化による島嶼地域の持続可能性の向上ならびに温室効果ガス排出削減に貢献するものである。よって本論文は博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2020年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 中垣 隆雄

---

早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学） 勝田 正文

---

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 草鹿 仁

---

東京大学准教授 博士（工学）東京大学 菊池 康紀

---