修 士 論 文 概 要 書

Summary of Master's Thesis

Date of submission: 01/15/2020

専攻名（専門分野） Department	総合機械工学専攻	氏 名 Name	阿部　弥生	指 導 教 員 Advisor	中垣　隆雄　　印 Seal
研究指導名 Research guidance	エクセルギー工学	学籍番号 Student ID number	CD 5218B001-1		
研究題目 Title	製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システムの研究 ～技術経済分析に基づくシステム設計と蓄熱コストの低減～				

1.　研究背景・目的

種子島ではサトウキビの栽培・圧搾・製糖が主要産業であり，製糖工場は圧搾過程で発生する残渣（バガス）を燃料としてボイラに投入し，所内電力・熱需要を賄っている．長期保存が困難なバガスは冬から春の製糖期に全て焼却する必要があるために必要以上に投入され，200 ℃ 程度の未利用熱が発生している．一方，島内の熱需要地では年間を通して 120 ℃程度の蒸気需要を賄うため，島外由来の高価な重油を燃料とした汎用ボイラを稼働している．この熱の時空間的ミスマッチを解消するため，ゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルを用いた未利用熱蓄熱輸送システムの実現を目指している．システムは出熱，蓄熱，ゼオライト輸送と 3 過程に大別される中，システムの経済性の向上には，製糖工場での蓄熱コストの低減が求められるため，本研究では製糖工場における蓄熱過程に着目した．蓄熱装置ヒートチャージャー(以下 HC)をはじめとする製糖工場内導入設備を蓄熱ステーションとし，技術経済分析に基づき低蓄熱コストに向けた設計を検討した．

2.　システム設計方針

本研究では，蓄熱ステーションにおける①プロセス設計，②蓄熱装置設計の結果を用いて③経済性を評価する．①では煙道ガスと蓄熱ガスのピンチ温度を変数とし，プロセスシミュレータ AspenHYSYS®によって蓄熱ガス温度および蓄熱ガス流量の最大値を得る．②では①で得た結果を境界条件とし，目標吸着量およびゼオライト流量を変数として COMSOL Multiphysics5.3a®を用いた数値解析にて HC のデザインごとの設計値を得る．①，②の結果をもとに，③にて単位蓄熱量にかかる年間コストとして蓄熱コスト[JPY/kWh]を算出した．

3.　ベースラインモデル決定

3.1 HC デザインの決定

HC のデザイン候補は向流型，十字流型があり，質量，エネルギー，化学種保存式を連成した数値解析モデルによる性能予測から経済性評価を実施するデザインを選定した．向流型は定常一次元モデルを構築し，図 1 に示すように縮小版装置による蓄熱試験結果と比較することでその妥当性を確認した．十字流型は向流型と同様の吸脱着，伝熱モデルを用いた定常二次元モデルを作成し，性能を予測した．これまでの研究で，ブロワ動力がコストの支配要因であると判明しており [1]，両デザインにおける必要ブロワ動力を比較した（図 2, 3）．十字流型は蓄熱ガス主流方向の層厚さを低減することで圧力損失は低減できるものの，排出するゼオライトを均等に脱着させるためには必要風量がかさみ，ブロワ動力は向流型に比べ増大する結果となった．よって向流型を HC のデザインとして採用した．

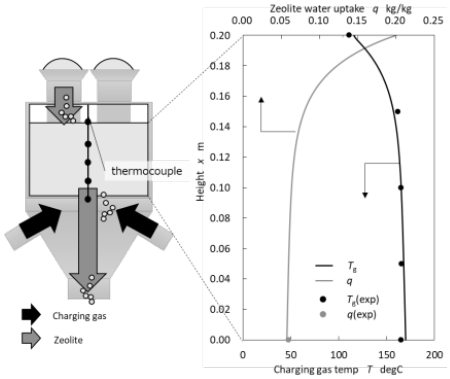

図 1　蓄熱試験結果及び数値解析結果との比較

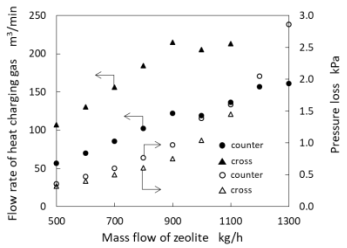

図 2　圧力損失および必要風量比較

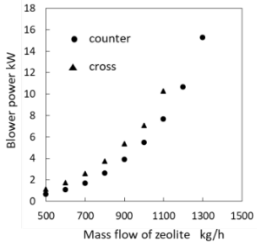

図 3　必要ブロワ動力

3.2　経済性評価

得られた設計値を基にシステムの技術経済分析を実施し，ピンチ温度および目標吸着量のベースラインモデルにおける条件を決定した．目標吸着量を 0.06 kg/kg とし，ピンチ温度を 5，10，15 ℃と変化させた場合の蓄熱コストを比較したところ，ピンチ温度 5 ℃が最も低くなった．ピンチ温度を低くとることで熱交換器の伝熱面積およびコストが増大するが，蓄熱ガス温度の昇温による蓄熱量の増大により，蓄熱コストが低減したと考えられる．

次に，ピンチ温度 5 ℃ において目標吸着量を平衡(0.05)，0.06，0.07 kg/kg に設定し蓄熱コストを比較した結果，0.05 kg/kg で最大，0.06 kg/kg で最小となった．ゼオライトの水蒸気脱着は平衡吸着量との差を駆動力として進むため，平衡吸着量まで脱離させる場合，蓄熱量は増大するものの，脱着の駆動力（平衡吸着量と局所吸着量の差）の減少に起因してより多くの風量，ブロワ動力が必要となり蓄熱コストは増大する結果となった．

以上からベースラインにおける条件をピンチ温度 5 ℃，目標吸着量 0.06 kg/kg と決定した．

4.　追加プロセス検討

さらなる蓄熱コスト低減に向け，プロセス設計において，蓄熱ガス昇温および追加の発電が可能であるバガス乾燥プロセスの追加導入を検討した．発電出力増は設備コスト増大の影響を考慮し，売電はせず，所内で消費する分のみとした．

充填したバガスに高温乾燥空気を当て，乾燥試験を実施し，試験結果をもとに乾燥速度算出に必要なパラメータを決定することで，バガス乾燥を模擬する一次元モデルを構築した．作成したモデルを用い，工場内でバガスの含水率は 44.4%から 42.4%まで低減可能と予測された．このとき蓄熱ガス温度は最大 183.4 ℃，発電出力増は最大 31 kW まで見込める．

前述の制約条件より，必要ブロワ動力に応じて発電出力が変動する．また，発電出力に連動して変化する蓄熱ガス温度により必要ブロワ動力も同時に変動することから，これらの収束計算によってプロセス導入時の最適な熱電比を決定した．

ゼオライト流量条件ごとに発電と蓄熱それぞれを優先した場合を比較したところ，いずれの条件においても，発電出力増による動力コスト削減を優先した場合に最も蓄熱コストが低減した．また，ベースラインと比較したところ，ゼオライト流量 2000 kg/h 以上にて蓄熱コスト低減を確認した．プロセス導入によって乾燥用の機材コストが新たに発生，蓄熱ガス昇温に伴う蓄熱用熱交換器コストの増加により CAPEX が増大するが，動力コストが高額な高ゼオライト流量条件下ではその削減効果が得られ，蓄熱コストが低減された．

参考文献

[1]　阿部弥生, et al. "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." 年次大会 2018. 一般社団法人 日本機械学会, 2018.