

# 修士論文概要書

Summary of Master's Thesis

Date of submission: 01 / 15 / 2019

専攻名 (専門分野) Department	総合機械工学専攻	氏名 Name	堀江 直之	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	5217B105-3		
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 ～蓄熱材料の吸・脱着特性に対する技術経済分析～				

## 1. 研究背景・目的

種子島ではサトウキビの栽培と製糖が主要産業であり、サトウキビの圧搾工程で発生するバガスは、バイオマスエネルギーとしてバガスボイラにて焚かれ、その燃焼熱は製糖工場内で再利用されている。しかしバガスは長期保存ができず、冬場の製糖期間に必要量以上バガスボイラに投入されており、200 °C 程度の未利用熱が大量に発生している。一方、島内では通年で稼働している焼酎工場や澱粉工場などにおいて120 °C 程度の熱需要があり、現在は島外から輸入した重油をボイラで焚くことにより賄っている。この熱の時空間的ミスマッチを解消すべく、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導入を検討している(図1)。

これまで、蓄熱側では蓄熱装置ヒートチャージャー(図1左、以下H.C.)が、出熱側では蒸気発生装置ゼオライトボイラ(図1右、以下Z.B.)がそれぞれ考案され<sup>[1]</sup>、各装置の性能予測や実験的検討、およびシステムの技術経済分析がなされてきた。しかし蓄熱材料に関しては、価格、機械的強度、吸着質へのアクセシビリティなどを考慮した簡易的な選定にとどまっており、材料を変更することで収益改善の可能性がある。現在使用中のゼオライト13Xよりも高い蓄熱密度を有する材料については多数報告されているが<sup>[2]</sup>、蓄熱密度は材料単一の吸着特性のみではなく、システムの運用条件等による実効的に利用可能な吸・脱着容量によっても左右されるため、蓄熱・輸送・出熱を含めたシステム全体での材料評価が必要である。そこで本研究では、吸着特性の異なる蓄熱材料を適用してシステムを設計し、技術経済分析をそれぞれ実施・比較することにより、吸着特性がシステムのコスト構造に及ぼす影響について検討した。

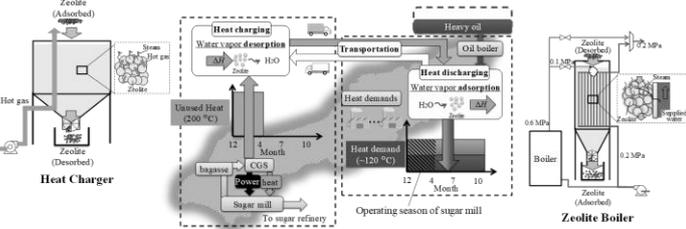


Fig.1 Unused heat storage and transport system in Tanegashima

## 2. 蓄熱材料の選定と吸着特性の取得

蓄熱材料として用いるゼオライトは13X型の他に、既に工業的に利用され、13X型と同じ結晶構造のLSX型(吸・脱着熱が大きく、吸着容量が大きい)、およびY型(吸・脱着熱が小さく、吸着容量が大きい)の2種を選定した。図2に示すような充填層反応器を設計・製作し、平衡吸着量を取得した。試験方法として、300 °C以上で絶乾としたゼオライトに、既知の湿分を含む空気を反応器に導入し、等温下でゼオライトが平衡まで蒸気を吸着して出口湿度が回復するまでの積分値によって平衡吸着量を定量化した。同操作を温度、すなわち蒸気の相対圧を段階的に変化させながら繰り返すことで図3を得た。図3中の低相対圧下における平衡吸着量はLSX型>13X型>Y型の順となっており、実験により吸着力の強弱を確認した。吸・脱着熱は文献値<sup>[3-5]</sup>を用いて推定し、単粒子の吸・脱着速度は、結晶構造が類似のゼオライトである

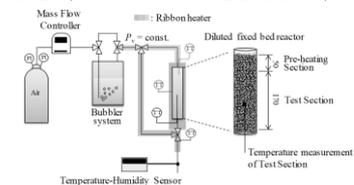


Fig.2 Experimental apparatus of diluted fixed bed test

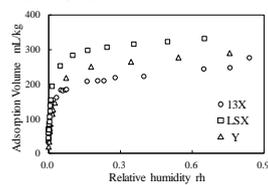


Fig.3 Adsorption isotherm of three types of zeolites

ことから細孔内の物質輸送の機構は同一で、マクロ孔における輸送が支配的であるとみなして定式化した。

## 3. システム設計および技術経済分析

### 3.1 システム設計方法

製糖期間のみの熱輸送(図1中の斜線部)を想定し、熱需要地は製糖工場から11 km離れた澱粉工場(120°C/0.2MPa, 2 ton/h)とした。輸送期間は24時間×57日の計1365時間である。まず、ベースモデルとして13X型を適用した場合のシステムを設計した。H.C.およびZ.B.は、質量、エネルギー、化学種保存式を連成した擬似二次元数値計算コードにより性能を予測した。両装置共通条件として塔径と再生ガス温度、風量を一定とした。H.C.は①ゼオライト流量、②層高さを設計パラメータとし、再生ガス温度で決定される平衡吸着量に到達させることを最低条件とした上で、売熱量確保のためゼオライト流量を増大させつつ、ブロウ動力の低減のため層高さを抑えるよう、設計パラメータを決定した。Z.B.は①初期吸着量、②ゼオライト流量、③給水量、④噴射蒸気量、⑤伝熱面積を設計パラメータとした。初期吸着量にH.C.の排出時の吸着量を与え、H.C.と同じゼオライト流量に設定した(季節間輸送のストックなし)。他のパラメータは燃料削減率を最大化するように決定した。ゼオライトは10 tonトラック1台とコンテナ5台を用いて輸送し、各装置が連続運転可能なように輸送パターンを決定した。

### 3.2 技術経済分析の結果

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た。13X型のCAPEX(Capital Expenditure)の合計額は約3千万円となり、各項目の割合は図4に示すとおりとなった。本研究では、CAPEXを売熱による利益によって10年程でペイバックすることは困難であると判断し、全て公的資金を投入するものとした。OPEX(Operation Expense)の合計額は約125万円/年で、輸送費(トラック燃料費、人件費)が52%で最も高く、次いで蓄熱ガス導入用のブロウ動力が23%であった。一方、歳入である売熱価格は、燃料削減率と操業データから抽出した燃料価格を用いて計算し、約110万円/年となった。仮にCAPEXを公的資金で賄ったとしても、OPEXが歳入を上回っているため、13X型ではシステムの自立的な運営は困難である可能性が高いことがわかった。

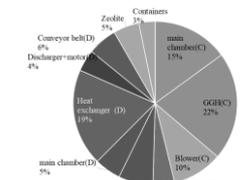


Fig.4 Breakdown of CAPEX (13X)

## 4. 吸・脱着特性に対する技術経済分析

適用する吸着特性のみを変化させ、13X型と同様の方法でシステムを設計することで、他の蓄熱材料についても技術経済分析を実施した。装置規模に大きな変動がないことから、CAPEXはほぼ同じであった。OPEX、歳入および収益の比較を図5に示す。LSX型では、脱着熱が大きいために蓄熱側におけるゼオライト処理可能量は減少したが、輸送費が低減したことに加え、吸着熱・容量の増大により売熱量が大幅に増大したため、全体の収益は改善した。一方のY型は、脱着熱の減少によるゼオライトの処理可能量の増加とともに、総輸送熱量が増大したため、売熱量は増加した。しかし、輸送回数の増加に伴ってOPEXも嵩み、システム全体としては収益が悪化した。本システムにおいては蓄熱材料の吸・脱着熱および容量の増大を図ることで、全体収支の大幅な改善の可能性があると示唆された。

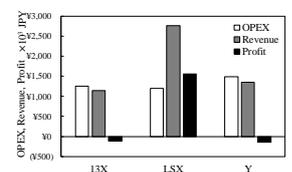


Fig.5 Comparison of OPEX, Revenue, and Profit among different materials

### 参考文献

- [1] S. Fujii, et al., Energy Procedia 149(2018), 102-111.
- [2] D. Lefebvre, et al., Renewable and Sustainable Energy Reviews 67(2017), 116-125.
- [3] B. Chris, et al., Report of IEA Solar Heating and cooling programme. Task32 (2005).
- [4] T. H. Herzog, et al., Energy Procedia, 91(2016), 155-160.
- [5] H. Kakiuchi, et al., Kagaku Kagaku Ronbunshu (in Japanese), 31-4(2005), 273-277.