

修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01 / 15 / 2025

専攻名（専門分野） Department	総合機械工学	氏 名 Name	松井 一騎	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 研究	学籍番号 Student ID number	CD 5223B088-6		
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 ～蓄熱条件変化によるシステムへの影響評価～				

1. 研究背景・目的

現在、日本における最終エネルギー消費量の大半は熱利用を主とした非電力部門が占めているため、熱生成プロセスの高効率化や未利用熱の循環利用等による熱利用の高度化が重要である。地域における未利用熱利用の促進のためには未利用熱発生と需要間のギャップを埋める熱融通技術が必要となり、省エネルギーにおける重要技術の一つとしても挙げられている^[1]。そこで本研究では、ゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルを用いた蓄熱輸送システムにより未利用熱を回収し、遠方の熱需要地にて産業用プロセス蒸気として回生することで熱需給の時間空間的なギャップを解消することを目的としている。これまでの検討では、産業部門にて多く存在する 200℃ 程度の排ガスを蓄熱源として想定し、連続的な蓄熱と粒子-蓄熱用熱媒間での効率的な熱交換が可能となる蓄熱装置として、移動床直接熱交換式のヒートチャージャー(以下 HC)を採用していた。しかし、排ガスからの採熱は、煙突の大規模改修や熱交換器費用の増大等が懸念される。さらに大量の蓄熱用ガスを充填層内に送気する直接熱交換式では送風動力損が大きく、操業費用の支配要因の一つとなっていた。そこでこれらの課題に対応するために、①間接的なゼオライトへの熱供給で送風動力損を大幅に低減可能な熱媒油循環による間接熱交換式 HC の採用、②100℃ 程度の排温水を蓄熱源とすることで、採熱に必要な伝熱面積の減少やシステム適用範囲拡大を図る低温熱源対応型 HC の採用の 2 つの施策を考案した。本年度はこれらを実験・解析により設計し、コスト・GHG 排出の観点でシステムを評価することで、実現可能性を検討した。

2. 蓄熱動力低減による未利用熱蓄熱輸送システムへの影響評価

2.1 間接熱交換式ヒートチャージャーの概念設計

間接熱交換式 HC(図 1)では未利用熱によって加熱された熱媒油を熱交換器内に導入し、ゼオライトへ間接的に伝熱することで吸着した水を脱離させる。脱離水の除去のため、キャリアガスは循環する熱媒油との熱交換により予熱し、装置下部よりゼオライト層に送気する。キャリアガスは直接熱交換式での蓄熱用ガスと比較して、1/7 程度の流量で済むため、ブロワ動力の大幅低減が可能となる。定常次元の数値解析により、間接熱交換式 HC の設計として、蓄熱量を蓄熱時に必要なポンプとブロワの所要動力で除した COP(Coefficient of Performance)の最大化を目的関数として各設計パラメータを最適化した。また上記設計手法の妥当性を検証するため、蓄熱量ベースで商用機の 1/100 スケールでの蓄熱試験を実施した。HC の概念設計においては、温度分布が性能を決定づける主要因であり、解析による温度分布予測と試験での測定値が精度よく一致したことから、本数値解析モデルを使用した設計手法は妥当であると判断した。

2.2 蓄熱動力低減によるシステムへの影響評価

出熱過程ではゼオライトを用いた蒸気発生機であるゼオライトエコボイラ(以下 ZeB)^[2]で、120℃/0.2 MPa の蒸気需要を賄うことで既設ボイラでの燃料使用量を削減することを想定し、蓄熱過程では熱需要地と 5km 離れた未利用熱発生地にて 190℃の排ガスを蓄熱源として、ゼオライトを再生することとした。上述の概念設計および過去の検討^[2]を基に、設置スペース 1.5×1.5 m の制約条件で各装置を設計し、蓄熱装置として直接・間接熱交換式のそれぞれを導入した場合において、出熱過程での生成蒸気流量を変数とした LCOH(均等化熱価格、エネルギー削減量/年間費用)を算出した(図 2)。間接熱交換式では、必要熱交換器数の増大等により設備費用が増大するものの、年間費用の支配要因であるブロワ動力が大幅に低減されることから、全ての生成蒸気流量において間接熱交換式の LCOH が下回る結果となった。

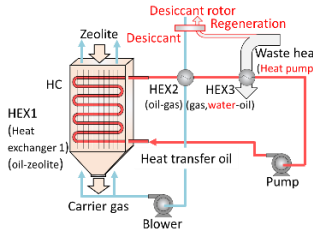


図 1 間接熱交換式 HC 概略図
(赤字: 低温熱源対応型 HC)

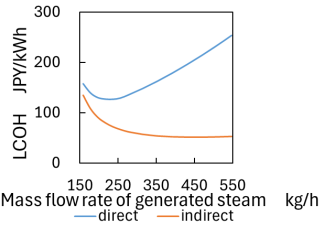


図 2 各蓄熱方式における生成蒸気流量に対する LCOH の変化

3. 低温未利用熱を蓄熱源とした蒸気利用可能性の検討

3.1 温度低下による蓄熱性能への影響

低温環境下での蓄熱過程において、出熱過程で蒸気生成が可能となるレベルまで、ゼオライトの吸着水を脱離させるには、ゼオライト層内に送気するキャリアガスの相対圧の低減、すなわち脱湿工程が必要となる。そこで等温条件下での脱着速度を取得可能な希釈充填層試験により、温度・水蒸気分圧をパラメータとした脱着速度を取得することで、温度低下による蓄熱性能への影響を評価した(図 3)。等温条件下では水蒸気分圧に対し脱着速度はほとんど変化しないが、低温条件(100℃)では、高温条件(150℃)と比較して、脱着速度が 1/3~1/4 程度に減少することがわかった。また本試験条件で数値解析モデルにより結果を予測したところ、試験結果と精度よく一致したことから、2 節と同様の数値解析モデルを用い、低温熱源対応型 HC(図 1 赤字)を設計した。

3.2 低温未利用熱を蓄熱源とした蒸気利用可能性

熱需要地にて 120℃/0.2 MPa、300 kg/h の蒸気需要が常に存在し、蓄熱過程での処理量に合わせて ZeB を稼働させるという仮定の下、175、125、100、70℃ の蓄熱温度条件におけるシステム導入時の GHG 排出変化量を算出した(図 4)。なお、蓄熱温度 125℃ 以下の条件ではデシカントプロセスを導入するとともに、70℃ の条件では排温水熱源ヒートポンプ(以下 HP)を用い、蓄熱温度を 125、175℃ まで昇温させるケースを想定した。蓄熱温度の低下に伴い、脱着速度が低下するため、蓄熱過程でのゼオライト処理量および蓄熱密度が減少し、出熱過程での GHG 排出削減量は低下する。蓄熱温度 100℃ の条件では ZeB での燃料削減は可能であるものの、蓄熱・輸送過程由来の GHG 排出により、システム全体での排出量が蓄熱輸送技術導入前と比較してプラスに転じた。また HP を導入した場合には、蓄熱温度上昇により出熱過程での排出削減量が増大するものの、HP による電力消費に起因し、GHG 排出量が大幅に増大した。これらの結果より、本試算条件では、未利用熱蓄熱輸送システムの導入によって GHG 排出量の実質削減を確保するには、最低でも 125℃ 程度の蓄熱温度が必要であると言える。

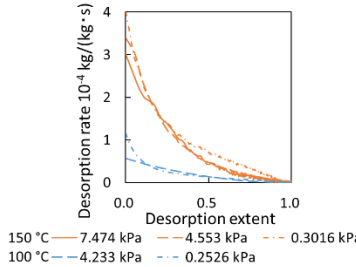


図 3 温度・水蒸気分圧パラメータでの脱着率に対する脱着速度変化

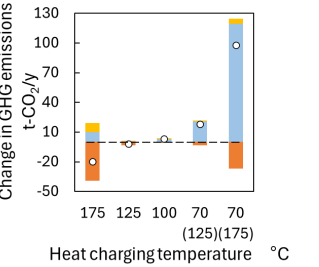


図 4 各蓄熱条件におけるシステム導入時の GHG 排出変化

参考文献 [1] 資源エネルギー庁, “省エネルギー・非化石エネルギー転換技術戦略”, 2024
[2] S. Fujii, et al., Journal of Cleaner Production, 2022