

修士論文概要書

Summary of Master's Thesis

Date of submission: 01/16/2024

専攻名（専門分野） Department	総合機械工学専攻	氏 名 Name	齋藤 壮呉	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 5222B055-4		
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 ～システムレベルでの技術評価に基づく出熱プロセス高性能化の検討～				

1. 研究背景・目的

2050 年までの地域のカーボンニュートラル達成と、さらにその後の持続的なエネルギーの安定供給のためには、電力のみならず熱の脱炭素化も重要であり、特に将来にわたり発生し続ける廃棄物処理施設由来の未利用熱は、地域内で有効利用すべき資源である。しかしこれらの熱発生地と熱需要は面的に偏在しており、さらに時間的なギャップも解消しない限り有効利用できない。そこで、輸送距離と保存期間に制約がない蓄熱輸送技術の実装を検討している。これまでの研究において、種子島の製糖工場におけるバイオマス残渣燃焼由来の 200℃ 程度の未利用熱を対象として、蓄熱を介して産業で広く用いられている 120℃/0.2 MPa の飽和蒸気の供給する、ゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルを用いたシステムが考案された^[1]。システムは蓄熱・輸送・出熱のプロセスに大別される。出熱装置であるゼオライトボイラは、ゼオライト層に既設ボイラ由来の蒸気を噴射し、発生した吸着熱を間接的に給水に伝熱させ、噴射蒸気以上の蒸気量生成で既設ボイラの燃料消費量を削減する。本研究ではシステム実現の可否を握る出熱プロセスの高性能化に着目し、正味送出蒸気流量の増大と生成蒸気圧力引き上げによる生成蒸気エンタルピーの増加を目指している。正味送出蒸気流量の増大における課題として、化石燃料焚きボイラとの協調運転ベースでは蓄熱容量に対する正味の出熱量が低く、既設ボイラの燃料削減にのみ CO₂ 削減量が依存することなどが挙げられる。また生成蒸気圧力引き上げにおける課題として、生成蒸気温度の上昇に伴う排出ゼオライト温度の上昇および熱回収率の低下があげられる。本研究ではそれらの課題に対応するプロセスを提案し、システムレベルでのコスト・CO₂ 削減量の観点から評価することで実現可能性を検討した。

2. ゼオライトボイラシステムの改善検討

上述したゼオライトボイラの課題に対して、バブリングにより生成された加湿空気を吸着水として供給する加湿空気導入手型ゼオライトボイラを考案した(図 1)。同型のボイラでは吸着水の熱量が温水の顕熱として供給されることから、蒸気導入手型ゼオライトボイラに対して多様な熱源を適用できる。熱源としてヒートポンプを用いる場合には、環境熱の利用により実投入エネルギーの削減が可能である。また、二段階の熱交換器によってゼオライト顕熱を回収し、吸着水の熱量として利用することで、生成蒸気の高圧化の可能性がある。一方で、装置の複雑化によるコストの上昇や、噴射蒸気分圧の低下に伴う水分吸着量の低下により生成熱量が減少し、生成蒸気量が減少すると考えられることから、数値解析モデルによって性能を予測し、2019 年度に実施されたシステム評価^[2]を基に技術評価を実施した。

昨年度までに開発済みのフィンチューブ式熱交換器を用いた実装型ゼオライトボイラの非定常一次元数値解析モデルを加湿空気導入に一部修正し、検証のため約 1/100 スケールのゼオライトボイラ試験装置による出熱試験結果と比較した。図 2 に定常時の温度分布、図 3 に起動時の温度履歴の解析と実験の結果をそれぞれ示す。蒸気導入・加湿空気導入のいずれの試験においても試験結果をよく模擬できており、数値解析モデルの妥当性を確認した。

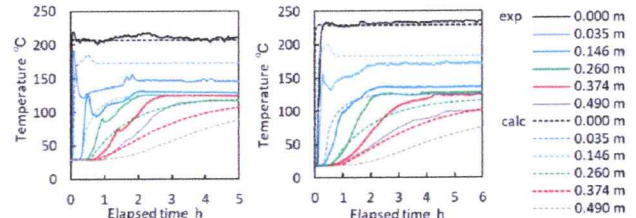


図 3 非定常解析結果の実験との比較 (左: 加湿空気, 右: 蒸気)

3.2 ゼオライトボイラの性能予測

前項で妥当性を確認した数値解析モデルを用い、蒸気導入手型ゼオライトボイラと加湿空気導入手型ゼオライトボイラの商用スケールの性能を予測した。生成蒸気量は、生成蒸気圧 0.2 MPa の条件において加湿空気導入手型では蒸気導入手型に比べ 15% 程度減少するが、投入エネルギーの減少により、生成蒸気熱量と実投入熱量の差分で示すエネルギー削減量は、約 3 倍となった。また、起動性能は蒸気導入手型と加湿空気導入手型で大きな差はなく、いずれのケースでも生成蒸気乾き度が定常に到達するまで 4~5 時間を要する結果となった。フィンチューブ式熱交換器の採用により熱交換器サイズは小さくなる一方で、給水への伝熱が律速となり起動性は悪化した。これらの予測結果を次項のシステム評価に反映した。

4. システムレベルでのコスト・CO₂ 削減量の評価

出熱サイトには運転プロファイルの異なる二種類の熱需要を想定した。一方は日中 9 時間の運転を毎日繰り返す熱需要(週 63 時間稼働)、他方は平日 5 日間連続稼働し、土日は操業を停止する熱需要(週 120 時間稼働)として、起動回数と運転時間の違いがシステム全体に及ぼす影響を評価した。蓄熱サイトでは 200℃ の排熱が十分量存在するとした。図 4 と図 5 に、均等化熱単価(LCOH)と CO₂ 削減量の算出結果をそれぞれ示す。LCOH は加湿空気導入手型ゼオライトボイラが蒸気導入手型ゼオライトボイラに比べ低く、CO₂ 削減量は大幅に向上した。また、週 63 時間稼働の運転プロファイルでは特に起動回数による影響が大きく、起動時の非定常性の考慮によって CO₂ 削減量がマイナスに転じたことから、起動性の改善の必要がある。生成蒸気を高圧化した場合、週 120 時間稼働の熱需要を想定した場合、蒸気導入手型では 0.4 MPa で CO₂ 削減量がマイナスとなるが、加湿空気導入手型では CO₂ 削減が可能であり、生成蒸気高圧化の可能性があることが分かった。

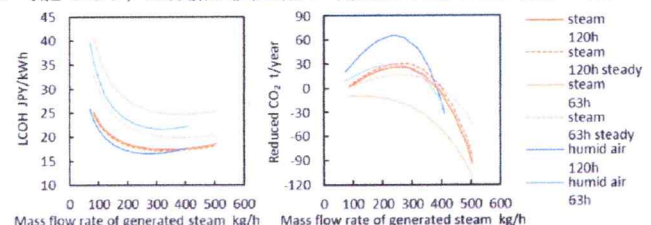


図 4 LCOH の比較

図 5 CO₂ 削減量の比較

参考文献 [1] S. Fujii, et al., Applied Energy, 2019

[2] 藤井洋平, 博士論文, 2020

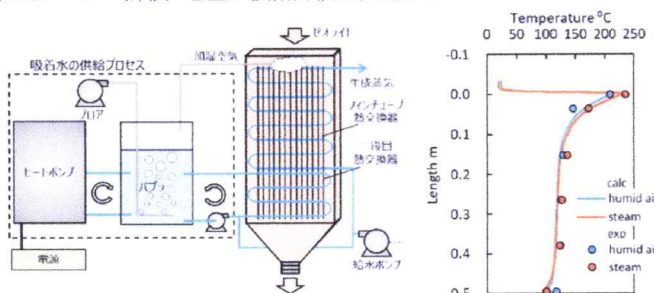


図 1 加湿空気導入手型ゼオライトボイラ概略

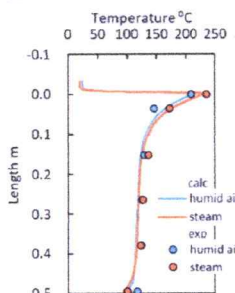


図 2 定常時温度分布の実験との比較

3. 加湿空気導入手型ゼオライトボイラ的设计

3.1 数値解析モデルの妥当性確認