

研究科	環境・エネルギー	氏名	樋口 明寛	指導員	中垣 隆雄 印
研究指導	エクセルギー工学				
研究題目	製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システムの研究 ～非定常解析に基づくゼオライトボイラの詳細設計～				

1. 研究背景・目的

現在、離島地域の一つである種子島では、サトウキビの栽培と原料糖の生産が主要産業となっている。栽培されたサトウキビは島内の製糖工場へと輸送され、圧搾過程で搾汁と繊維状の残渣であるバガスに分離される。バガスはバイオマス燃料としてバガスボイラへ投入され、燃焼熱から生成される蒸気は製糖工場内の熱電需要を賅っている。しかし、バガスは長期保存が困難であることに加え、休糖期には製糖工場が休止し背圧タービンを稼働できないため、すべてのバガスを製糖期間中に処理する必要があり、バガスボイラへ過剰に投入されている。そのため、煙道ガス温度が上昇し、200 °C 程度の未利用熱が発生している。一方で島内の熱需要地では、年間を通して100~120 °C 程度の熱需要が点在し、現在は島外から購入する化石燃料を焚くことで供給している。この熱の時空間ギャップを解消するために、ゼオライトの水蒸気吸脱着サイクルによる未利用熱蓄熱輸送システムを考案した。本システムは製糖工場でのゼオライトの蓄熱、熱需要地への輸送、熱需要地でのゼオライトボイラ^[1]による出熱の3過程に分けられる。本研究では出熱側に着目し、熱需要地としての産業部門ではクリーニング工場、民生・業務部門では宿泊施設を想定した。実装型ゼオライトボイラとしてプレートフィンチューブ熱交換器を内装した矩形ゼオライトボイラを考案し、これまで検討されていない非定常挙動を解析することで、各熱需要地の稼働状況を考慮したゼオライトボイラの詳細設計を実施した。

2. ゼオライトボイラの二次元数値解析

プレートフィンチューブ熱交換器は、フィン間のゼオライト層内に水平方向の温度勾配が生じることが想定されるため、熱交換器表面からフィン間の中心線の領域を解析範囲とした定常二次元解析モデルを構築し、実装型ゼオライトボイラの性能を予測した。フィン間を流通するゼオライト、ガスに関しては水平方向・軸方向の二次元でマスバランス、エネルギーバランスを考慮し、給水に関してはフィンへの伝熱を給水管への伝熱と等価であると仮定し、これまでの定常解析と同様に軸方向のエネルギーバランスのみを考慮した。ゼオライトの沈降速度が①均一であると仮定した場合、②フィン壁面摩擦により分布が生じると仮定した場合の2通りで解析し、疑似的に水平方向への熱伝導を考慮した熱伝達モデルを組み込んだ一次元モデルによる解析結果と比較したところ、両ケースにおいて生成蒸気エンタルピはほぼ等しくなり一次元解析結果とも一致した。以上より、プレートフィンチューブ熱交換器を内装した矩形ゼオライトボイラにおいても、ゼオライト沈降速度分布の発達に関わらず、これまでの一次元解析モデルが適用可能であることが確認された。よって以降の解析はすべて一次元モデルを用いて実施した。

3. ゼオライトボイラの非定常解析

3.1 非定常解析モデルの妥当性確認

昨年度までに開発したゼオライトボイラの定常一次元解析モデルに非定常項を追加し、1/120 スケールゼオライトボイラ起動時における層内温度分布の推移を予測した。実験および予測結果を図1に示す。図1より、予測結果は試験結果を概ね模擬できており、拡張した非定常解析モデルの妥当性を確認した。

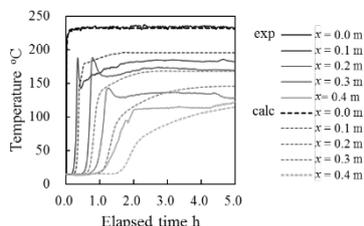


図1 数値解析と試験結果の比較

3.2 ゼオライトボイラの非定常特性

3.1で妥当性を確認した非定常解析モデルを用い、クリーニング工場への導入を想定した実装型ゼオライトボイラの起動時の性能予測を実施した。図2にゼオライトボイラ起動時(コールドスタート)のゼオライト層内温度分布および給水温度分布の推移を示す。図2に示すように、ゼオライトボイラ起動後、吸着および伝熱の進行に伴い温度が上部から順に上昇していく過程が予測された。また、運転休止時のボイラ壁面放熱、層内伝熱による温度分布の推移を解析することでホットスタートを想定した起動時の性能予測を実施し、コールドスタートと比較したところ、定常到達までの所要時間および燃料削減効果はほぼ一致し、運転開始時の層内温度分布はゼオライトボイラの性能に影響しないことが予測された。

また、同解析モデルを用いて、ゼオライトボイラ定常運転中に負荷(ゼオライト流量、噴射蒸気流量、給水流量)を変動させた場合の時間変化を同様に予測し、負荷変動時の応答性を確認した。

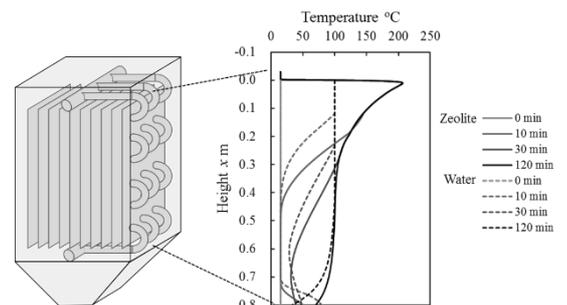


図2 ゼオライトボイラ起動時の温度分布推移

4. 実装型ゼオライトボイラの詳細設計

4.1 クリーニング工場

種子島のクリーニング工場への導入を想定した実装型ゼオライトボイラの詳細設計を実施した。クリーニング工場は現在、土日祝日を除き連日8時間稼働しており、稼働時は0.1 MPa、280 kg/hの蒸気を定格蒸気量350 kg/hの小型ガス焼きボイラにより供給している。ゼオライトボイラは本ボイラとの協調運転を想定する。フットプリントを既設ボイラと同等とし、ゼオライト流量、噴射蒸気流量、熱交換器高さを設計パラメータ、燃料削減量最大を目的関数として、非定常性を考慮した性能予測により設計条件を決定した。

4.2 宿泊施設

宿泊施設に空調設備として設置されている吸収式冷凍機への導入を想定した実装型ゼオライトボイラを設計した。吸収式冷凍機は24時間稼働しており、時間帯ごとに熱需要は大きく変動する。本研究では、同施設の最大熱需要を0.2 MPa、600 kg/hと仮定してゼオライトボイラの定格運転条件と設定し、4.1と同様の方法で燃料削減量が最大となる設計条件を決定した。また、決定した条件で宿泊施設の熱需要変動への追従運転を想定した非定常解析を実施し、燃料削減効果を評価した。

参考文献

[1] 樋口ら, "製糖工場の未利用熱蓄熱輸送システムにおけるゼオライトボイラによる加圧過熱蒸気の連続生成", 第24回動力・エネルギー技術シンポジウム, 一般社団法人 日本機械学会, 2019