

報告番号	甲 第 11545 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 水蒸気吸着・水和反応を用いる冷凍サイクルの高度化に関する研究

氏 名 江崎 丈裕

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、地球温暖化をはじめとする環境保全問題に加え、化石燃料の大量消費が続くエネルギー問題が大きく議論されており、その対応が求められている。環境保全問題では、二酸化炭素の排出を低減する技術やシステム設計の研究が進められており、エネルギー問題においては、高効率なエネルギーマネジメント機器の開発が進められている。本論文では、エネルギーのカスケード利用において下流側で排出される 100℃以下の低温未利用排熱を回収・変換し、冷熱を生成することが可能である熱駆動型吸着式冷凍機およびケミカルヒートポンプに着目した。自然冷媒である水蒸気を利用することで環境負荷が小さく、冷房に必要とされる電力消費量を低減できるため、二酸化炭素の排出およびエネルギー消費量の削減が可能になる。本研究では、水蒸気吸着・水和反応を用いる冷凍サイクルの高度化に関する検討し、現在、我々が直面しているエネルギー問題、及び地球環境問題の解決を目指した。

序章では、本研究の背景を述べるとともに、研究目的を記した。

第 1 章では、水蒸気を冷媒として用いた吸着式冷凍機の二重効用サイクルに着目し、駆動の可能性及び成績係数(COP)の向上が可能なシステムを提案し、実験的、数値解析により評価した。吸着式冷凍機は低温排熱で駆動することが可能であるが、投入熱量に対して冷熱に変換する効率である COP が小さい。そのため COP を高く駆動可能な二重効用サイクルが提案されている。二重効用サイクルでは、従来のサイクルを高温、低温サイクルと分け、高温サイクルの凝縮熱を用いて低温サイクルを駆動することで COP を向上させる。しかし、実験的に運転する際の吸脱着量、高温、低温サイクルの各吸脱着速度は明らかにさ

れていない。本研究では、使用する吸着材としてゼオライト吸着材(FAM-Z01)を選定し、定容法を用いた実験装置を作製した。高温、低温サイクルを模擬した温度条件での吸脱着量、吸脱着速度を測定し、二重効用サイクルの可能性を検討した。その結果、高温サイクルでは、熱源温度 100℃で脱着量が大きく得られ、吸脱着速度も十分に大きいことがわかり、高い吸脱着量が得られることがわかった。また、低温サイクルにおける吸脱着速度では、高温サイクルからの 60℃相当の凝縮熱が供給されると脱着速度は、高温サイクルと比較すると小さいが、十分な脱着量が得られた。この結果より、二重効用サイクルの駆動が可能であることがわかり、低温サイクルの脱着速度が二重効用サイクルの性能を決める因子であることがわかった。

次に COP をさらに向上させるため、断熱圧縮機を付加した二重効用サイクルを新しく提案した。機械的な動力により吸着器を吸引・昇圧することで吸着器の吸脱着量が大きく得られる。また、吸引・昇圧の効果により低温熱源での駆動、圧縮動力により発生する熱も利用可能であるため COP の大幅な向上が期待できる。ゼオライト吸着材(FAM-Z01)を用いた平衡解析により、提案した圧縮機付加型サイクルのサイクル特性を評価した。その結果、圧縮機の効果により、高温、低温サイクルともに吸脱着量が増大し、COP も従来の二重効用サイクルと比較して理論的に 25～30%以上高く駆動可能であることがわかった。

第 2 章では、60℃以下の低い排熱温度でも駆動可能である吸着式冷凍機の異種吸着材直列二段型システムを提案し、そのシステムの実用化に関して検討した。従来の吸着式冷凍機は、60℃程度の排熱温度で駆動することで冷熱を供給する。排熱温度が低下することで吸着材の吸脱着量が減少し、十分な冷熱が供給できない。しかし、排熱は低温度になるにつれて排出量が増大する。そのため、吸着式冷凍機がより低温度での駆動が可能となれば、省エネルギー性の効果が増大する。本研究では、45-55℃と低い温度条件でも駆動可能なシステムとして二段型システムを採用し、吸着材の組合せとして、ゼオライト吸着材(FAM-Z01,FAM-Z05)と活性炭を選定した。ゼオライト吸着材により冷熱を生成し、ゼオライト吸着材から脱着した蒸気は活性炭に吸着される。活性炭は低温でも十分に脱着可能であるため、高い冷熱生成量と低温駆動可能なシステムであることが期待できる。本研究では、吸着材と熱交換器を用いた実験検討により、得られる冷熱出力特性を評価した。その結果、低温排熱での温度条件において、冷熱出力は、ゼオライト吸着材の単段型システムに対して、ゼオライト吸着材と活性炭の二段型システムの方が大きく、3～10 倍得られることがわかった。しかし、投入する排熱量はゼオライト吸着材、活性炭と 2 倍であるため COP は単段型システムより低い結果となった。次に IT 分野におけるデータセンタのサーバーから多量に排出されている 50℃程度の低温排熱の利用を想定し、空調負荷の低減を目的とした二段型吸着式冷凍機を試作し、その駆動特性を評価した。ゼオライト系吸着材 FAM-Z05 と活性炭吸着材を用いた二段型システムを選定した。小型試作機に搭載する蒸発器、凝縮器、蒸気移動バルブを実験検討より評価し、最適な機器を選定した。選定した蒸発器、凝

縮器、蒸気移動バルブ、反応器を用いて設計した小型試作機は、サーバーラック内に設置可能な体積となった。同小型試作機を用いて、冷熱出力の駆動確認及び安定性の評価を行った。その結果、小型吸着式冷凍機は想定される排熱温度 50℃においても設計通りの冷熱出力が得られ、安定的に駆動することがわかった。

第 3 章では、冷熱出力の高い熱駆動冷凍機の開発を目的とし、水和脱水反応を用いる冷熱生成型ケミカルヒートポンプを検討した。水和物の中でも無機ハロゲン化合物に着目し、塩化物、臭化物の材料の中からスクリーニングを行った。その結果、100℃以下の排熱温度において高い水蒸気吸収量を持つ SrBr<sub>2</sub> 6 水和物を選定した。ケミカルヒートポンプの課題は高出力密度を持つ反応器設計と繰り返し安定性である。反応器設計では、水和脱水反応及び反応熱・物質移動が同時に進行し、各影響因子により出力が決定される。そのため、出力構成因子の律速過程の把握が必要である。また、水和物では、水和・脱水反応により材料自体の膨潤・収縮が生じる。この物理変化により出力特性が低下することが先行研究で把握されている。本研究では、ケミカルヒートポンプの出力決定因子である SrBr<sub>2</sub> 水和反応速度を実験により測定した。測定した水和反応速度を未反応核モデルにてモデル化し、その反応特性を検討した。さらに、同実験装置を用いて水和脱水反応を繰り返す連続試験を行い、SrBr<sub>2</sub> 水和反応の繰り返し安定性を評価した。また、SrBr<sub>2</sub> 水和物とコルゲート型熱交換器を用いた反応器モジュールを作製し、熱出力特性を実験により評価した。その結果、実機を想定した温度条件では水和速度は十分に早く、20 秒以内で反応が完了することがわかった。また、水和反応速度を未反応核モデルにて整理することで、SrBr<sub>2</sub> 水和反応の頻度因子および活性化エネルギーを明らかとした。これより、SrBr<sub>2</sub> は他の水和反応と比較してもケミカルヒートポンプの材料として十分な反応特性を有していることが示唆された。次に、SrBr<sub>2</sub> 水和脱水反応の繰り返し特性を評価した。その結果、900 回繰り返したところ、化学的な反応材の劣化の要因である副反応は生じず安定的な材料であることがわかり、十分繰り返し利用できる材料であることが示唆された。しかし、10 回程度では、反応速度はほぼ変わらないが、その後徐々に反応速度が低下することがわかった。これは、試料粒子自体の膨潤・収縮による二次粒子の形成による影響が示唆される。そのため、反応速度を低下させず繰り返し特性を維持するためには、試料の膨潤・収縮を抑制する技術が必要である。また、SrBr<sub>2</sub> 水和物と熱交換器を用いた熱出力を実験により評価した。その結果、実機相当の温度条件にて高い出力が得られた。そのため、SrBr<sub>2</sub> 水和反応は冷熱生成可能な反応系であることが確認され、ケミカルヒートポンプとして有効であることを明らかとした。

終章では、本研究で得られた研究成果をまとめると共に今後の展望について記した。本研究では、環境親和性の高い自然冷媒である水蒸気を冷媒とした吸着現象および水和反応を用いて高効率な冷凍サイクルを構築する可能性を見出した。吸着式冷凍機では、二重効

用サイクルや直列異種吸着材二段型システムに着目し、高い COP や低温駆動性を持つ高度なシステムを開発することで、エネルギーの高効率利用が可能であることを示すとともに、その技術的な実現性を示した。また、ケミカルヒートポンプでは、高性能な冷熱生成技術として、 $\text{SrBr}_2$ 水和脱水反応に着目し、その反応特性および熱出力を評価し、その可能性を示した。本研究の成果により、工業排熱からエネルギーを回収し、より高効率なエネルギー利用システムの運用と低炭素社会の構築を担う技術となる可能性を見出した。