

報告番号	甲 第 12278 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目     マイクロ波・温風加熱を用いた水蒸気脱着  
                  の高度化に関する研究  
(Study on enhancement of water-vapor  
desorption by using microwave and hot  
air heating)

氏 名     伊藤 聖也

## 論 文 内 容 の 要 旨

近年、化石燃料の大量消費およびこれに起因する環境汚染問題について世界的に議論されており、環境保全および経済発展の両立が可能な技術開発の必要性が人類において解決すべき最重要課題の一つに挙げられている。この課題解決の一つとして、熱エネルギー有効利用技術の開発は有効な手段となりうる。中でも、大半が未利用のまま大気に排出されている 100°C 以下の低温熱エネルギー利用技術の確立が果たす役割は大きく、この観点から、この熱エネルギー利用を可能とするデシカント空調機システムが注目されている。デシカント空調機は吸着材が有する水蒸気の吸着・脱着能力を利用して調湿操作、調温操作を独立に制御できる熱駆動型空調機であり、この稼働により空調負荷の低減が可能となる。しかし、デシカント空調機は利用温度レベルの低さに起因する脱着速度の低下が調湿能力向上を阻む要因となり、所要空気処理量を確保するためには装置の大型化を余儀なくされる。この課題を解決するために、吸着材再生(脱着)過程での脱着の高速化、吸着材単位体積当たりの脱着量増大および脱着効率の向上を可能とする水蒸気脱着の高度化技術開発が必要である。

そこで本研究では、デシカント空調機の高度化のためにマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機を提案した。従来のデシカント空調機では、一般的に吸着水の脱着には加熱空気(温風)が用いられている。温風加熱は間接加熱であり、被加熱物質以外への熱損失が大きい。これに対してマイクロ波加熱は、1)被加熱物質に対する直接加熱効果および 2) 水に対する選択加熱性を有するため周囲の空気および装置の顕熱損失が抑制され、加熱空

気による脱着(温風加熱脱着)に比べて脱着の高度化(高速脱着, 脱着量増大, 脱着効率向上)が期待できる。

提案のマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機開発のための検討課題は大別して, A)マイクロ波加熱の有効性の評価, B)マイクロ波照射による吸着材の均一加熱方法の確立の2項目が挙げられる。さらにその詳細項目として, 課題 A)では, i)脱着過程に及ぼすマイクロ波加熱効果の把握, ii)マイクロ波加熱効果の定量化方法の確立, iii)マイクロ波照射の最適化の検討が, 課題 B)では, iv)マイクロ波照射場における定在波の発生, 被加熱物加熱容器固有の電界強度分布の形成, マイクロ波の被加熱物内部への吸収による減衰等の不均一加熱となりうる原因を考慮した吸着器の設計・実稼働による性能評価が挙げられる。

本研究ではマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機について, 供給空気露点温度, 除湿空気量等の様々な要求に対して必要能力を満たしつつ低装置体積とする設計(合理的設計)基準を確立することを最終目的として課題 A)に着目し, 項目 i), ii)および iii)の一部について検討を行った。

以下に本論文内容の要旨を示す。

序章では, エネルギー消費動向, エネルギー消費に起因する環境問題, エネルギー有効利用法, デシカント空調機の開発動向等をまとめるとともに研究目的および研究概要を述べた。

第 1 章では, 脱着過程に及ぼすマイクロ波照射効果の把握およびマイクロ波照射効果の定量化方法の確立を目的とする実験的検討を行った。具体的には, 流通式ゼオライト充填層において, 吸・脱着過程同一空気湿度条件下の温風加熱およびマイクロ波・温風加熱による水蒸気脱着実験を温風温度およびマイクロ波照射強度を変化させて行い, ゼオライト充填層の熱収支計算結果に基づく熱移動挙動の定量的把握ならびに脱着促進効果について実験的に検討した。その結果, マイクロ波・温風加熱時のゼオライト充填層の温度上昇と脱着速度は温風加熱時のそれに比べて速いこと, ならびに同一脱着時間におけるマイクロ波・温風加熱の脱着率は温風加熱のそれに比べて上昇することを認め, マイクロ波の直接加熱効果による高度脱着が達成されることを明らかにした。次に, 温風加熱およびマイクロ波・温風加熱における本実験系の熱移動挙動の実験値を基準とするゼオライト充填層の各消費熱量基準の熱効率  $\eta (= Q_{des} / (Q_{in} - Q_{out}))$  ( $Q_{des}$ [W]: 単位時間当たりの脱着消費熱量,  $Q_{in}$ [W]: 単位時間当たりの投入熱量,  $Q_{out}$ [W]: 単位時間当たりの排出熱量)を定義し,  $\eta$  を指標とするマイクロ波導入の有効性について評価を行った。その結果,  $\eta$  値は条件によらず実験開始後最大値( $\eta_{MAX}$ )に到達し, その後減少すること,  $\eta_{MAX}$  値および  $\eta_{MAX}$  値に到達する時間( $\theta_{\eta MAX}$ )は条件により異なることを認めた。ここで  $\eta_{MAX}$  値は脱着過程の熱損失抑制効果を示し, この値が大きいほど供給熱エネルギーが脱着熱として消費されたことを表す。また,  $\theta_{\eta MAX}$  値は脱着の高速化の指標となりこの値が小さいほど高速脱着が行われたことを表す。

マイクロ波・温風加熱脱着の  $\eta_{MAX}$  値は温風加熱脱着の 1.1-1.5 倍になること、マイクロ波・温風加熱脱着の  $\theta_{MAX}$  値は条件によらず温風加熱のそれよりも小さくなることを認めた。このことは、直接加熱方式のマイクロ波の導入が充填層全体の加熱に寄与し、マイクロ波・温風加熱脱着は温風加熱脱着に比べて熱損失が抑制されたことにより高度脱着を可能にしたと考えられ、熱効率の観点からもマイクロ波・温風加熱が高度脱着手法となることが裏付けられた。

第 2 章では、第 1 章の検討をさらに一歩進め、吸着過程より低湿度の空気を用いた条件下でのマイクロ波照射効果を実験的に検討した。具体的には、流通式ゼオライト充填層における吸着過程で供給する空気湿度以下の空気供給による脱着実験を初期吸着量、温風温度、マイクロ波強度を変化させて行い、脱着率と熱効率、脱着速度を指標とするマイクロ波照射効果を検討した。この検討では吸着過程と同一の湿度条件下との相異を明らかにするため、前章の吸着過程と同一湿度条件下の脱着実験結果と本実験条件下の結果の比較を行った。その結果、低湿度空気脱着条件下(Case-2)でも同湿度空気脱着条件下(Case-1)と同様にマイクロ波加熱による脱着率、脱着速度の向上が認められ、本条件においてもマイクロ波加熱による脱着の高度化が示された。また、Case-2 の熱収支評価法は Case-1 の手法が適用できることを示した。さらに、Case-2 の温風加熱脱着の脱着率を基準とするマイクロ波・温風加熱の脱着時間、熱効率は温風加熱脱着のそれぞれ最小 0.3 倍および最大 1.3 倍となることを認めた。このことは温風加熱脱着に比べてマイクロ波・温風加熱脱着では脱着が効率的に高速進行することを示している。この効果は特に脱着初期において大きいことを認めた。これらより、従来の温風加熱デシカント空調機へのマイクロ波の導入により、処理空気量の増大、もしくは装置容積の低減が可能になることを示唆した。

第 3 章では、マイクロ波・温風加熱脱着におけるマイクロ波照射の最適化への第一段階として、本脱着の熱・物質移動のモデル化と動的解析を行い、マイクロ波照射効果について理論的に検討した。具体的には、第 1 章で検討したゼオライト充填層型吸着器に着目し、吸・脱着過程同一空気湿度条件下の脱着過程における熱・物質移動のシミュレーションモデルを構築した。また、モデルの妥当性に基づいて脱着性能に及ぼすマイクロ波強度、温風温度、空気湿度の影響を検討した。脱着量、ゼオライト充填層内温度について解析結果と実験結果の比較を行った結果、温風加熱脱着、マイクロ波・温風加熱脱着とも解析結果と実験結果は傾向的一致を示し、本解析の妥当性が示された。したがって、第 1 章の温度変化および吸着量変化に関する実験的考察が理論的にも裏付けられた。さらに、等脱着量基準の平均熱効率  $\eta_0$ (脱着時間  $\theta$  間の全熱消費エネルギーに対する脱着消費熱エネルギーの割合)を指標としたマイクロ波・温風加熱脱着の有効性評価を行った結果、マイクロ波出力  $M_w > 0$ (マイクロ波・温風加熱脱着)の  $\eta_0$  値は  $M_w = 0$ (温風加熱脱着)のそれより大きくなること、 $\eta_0$  値が最大となる  $M_w$  は相対湿度  $\phi$  の減少に伴い増大する傾向にあることを認めた。そ

ここで  $\eta_{\theta}$  の最大値 ( $\eta_{\theta\text{MAX}}$ ) に着目し、この値を  $M_w = 0$  の  $\eta_{\theta}$  値 ( $\eta_{\theta,\text{Hotair}}$ ) で除した  $\eta_{\theta\text{MAX}} / \eta_{\theta,\text{Hotair}}$  値を用いて評価した。その結果、 $\eta_{\theta\text{MAX}} / \eta_{\theta,\text{Hotair}}$  値はいずれも 1 以上になり、温風温度および  $\varphi$  の減少に伴って増大する。これらより、マイクロ波・温風加熱は温風加熱に比べて低温熱利用条件および低吸着量条件下でより効果的であることが示された。

終章では、一連の研究を行った結果得られた成果をまとめた。また、本研究の最終目的であるマイクロ波・温風ハイブリッドデシカント空調機の合理的設計基準を確立し、本デシカント空調機を広く普及させるために検討すべき課題を挙げ、今後の展望を述べた。