

1-5 マイクロ波照射型吸着ヒートポンプの開発研究

藤沢 亮、フーマン ニクザット ((財)科学技術交流財団)

小林敬幸、架谷昌信、出口清一、渡辺藤雄、小林 潤、窪田光宏 (名古屋大学)

中垣友樹、近藤元博 (トヨタ自動車株)

1. 研究の目的と概要

地球規模の資源・エネルギー問題の解決のために、その大半が環境に廃棄されている80℃程度以下の低温熱エネルギーの有効利用技術を確認することが急務とされている。吸着ヒートポンプはこの熱エネルギーを回収・高レベル変換する機能を有する唯一の熱機器に位置づけられ、その実用化開発が待たれている。本研究では、この吸着ヒートポンプの高性能化の最大課題のひとつである脱着促進に関して、これを可能とするマイクロ波照射を導入した新形式の熱・マイクロ波照射併用型吸着ヒートポンプを提案し、実用化を目指した開発研究を行った。

マイクロ波加熱は、AHPに適用する上で有効な以下の特徴を有する。

- ① 損失係数の値の違いを利用した水の選択加熱が可能である。
- ② 被加熱物に直接作用するため加熱効率が低い。
- ③ 加熱速度が速い。

①について、周波数 f [Hz]、電界強度 E [V/m]のマイクロ波を誘電体に照射したとき、内部で熱に変わる単位体積あたりの電力 P [W/m³]は、次式で表される。

$$P=(5/9) \cdot (\epsilon_r \tan \delta) \cdot f \cdot E^2 \times 10^{-10} [\text{W/m}^3] \quad (1)$$

上式より、誘電体に対するマイクロ波の吸収電力は、比誘電率 ϵ_r [-]と誘電正接 $\tan \delta$ [-]の積に比例することがわかる。この比誘電率と誘電正接の積を、損失係数(誘電損失)という。損失係数は、その物質のマイクロ波の吸収しやすさの目安となる。Table 1^{1), 2)}に主な吸着材であるゼオライトとシリカゲル、吸着質である水の、温度 298K、周波数 2.45GHzにおける損失係数の値を示した。水の損失係数はゼオライト、シリカゲルのそれぞれ 49 倍、246 倍であることが分かる。このことより、マイクロ波の吸着材に吸着した水に対する選択加熱により、吸着材の温度上昇を抑えた脱着促進が可能であると予測される。

Table 1 水および吸着材の損失係数

	水	ゼオライト	シリカゲル
損失係数	12.3	0.25	0.05

②について、マイクロ波加熱は熱伝導によらない内部加熱であるため、装置壁部等、余分な部分の加熱が少なく加熱効率が約 70~80%³⁾と高い。省エネルギー技術であるAHPへの付加動力として優位な特性を有しているといえる。

③について、マイクロ波加熱は高周波による 1 秒に約 2 億回もの誘電体内部極の振動を利用するため、加熱速度が速い。この高速加熱は、吸・脱着サイクルの短縮につながるため、AHP 装置の大型化の問題に寄与しうる。

本研究では上記のマイクロ波の特徴に着目し、1)吸着材単粒子におけるマイクロ波照射場の脱着促進効果の把握、2)吸着材充填吸着器におけるマイクロ波照射の脱着促進効果の把握及び問題点の抽出、3)

熱・マイクロ波照射併用型吸着装填吸着材モジュール構造の検討を行い、これらの結果に基づいて4)本形式の吸着ヒートポンプの実用性の評価を行った。

2. フェーズ I の成果

2-1. 目的及び目標

マイクロ波照射の脱着促進効果を確認することを目的として、マイクロ均一波照射場での吸着材単粒子における種々の温度条件ごとの脱着過程の熱・物質移動機構を実験的に明らかにする。具体的には、マイクロ波照射型石英バランス式吸着量測定装置を試作し、単粒子充填が想定できる吸着材量条件下の温度脱着、温度及びマイクロ波照射脱着の2条件下の脱着速度を測定し、両結果の比較による本法の有効性の評価を行った。

2-2. 方法及び結果

2-2-1. 実験方法

脱着速度測定に用いた試作マイクロ波照射型石英バランス式吸着量測定装置の概略を Fig. 1 に示す。本装置は、重量方式による装置であり、マイクロ波導入口、吸着器、蒸発（凝縮）器及び両器を接続するバルブで構成されており、両器はいずれも二重管構造で環状部に所定温度の水を流通させることで、器内温度を一定に制御できる。吸着器上部にはマイクロ波発生装置を連結し、下部にはマイクロ波吸収器として水を流した。吸着器内の試料皿には、予め真空脱気した RD シリカゲル（富士シリシア化学(株)製）約 0.05g を装填した。使用したマイクロ波の周波数は 2.45Hz である。

本研究は吸着過程（吸着器 30℃、蒸発器 15℃）を経て、温度脱着（吸着器 60℃、凝縮器 30℃）平衡後に、マイクロ波照射（連続及び間欠照射）を行い、吸着量・シリカゲル温度変化を測定した。また重量法の装置特性上、以下に示すように、吸着量測定と温度測定を別々に行った。

(1) 吸着量測定

吸着器内には試料皿を吊るした石英スプリングバランスを設置し、吸・脱着前後の伸縮を、装置外部の読取り顕微鏡で測定し、吸・脱着量とした。

(2) シリカゲル温度測定

石英スプリングバランスを撤去し、試料皿の底部に光ファイバー温度計を挿入し、マイクロ波照射に伴うシリカゲル温度変化を測定した。

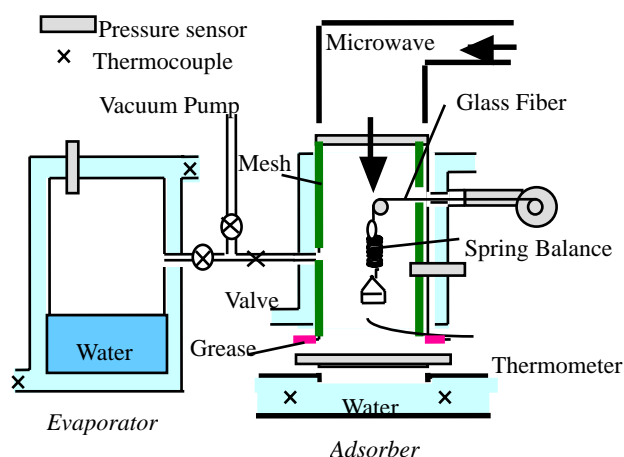


Fig.1 マイクロ波照射型石英バランス式吸着量測定装置

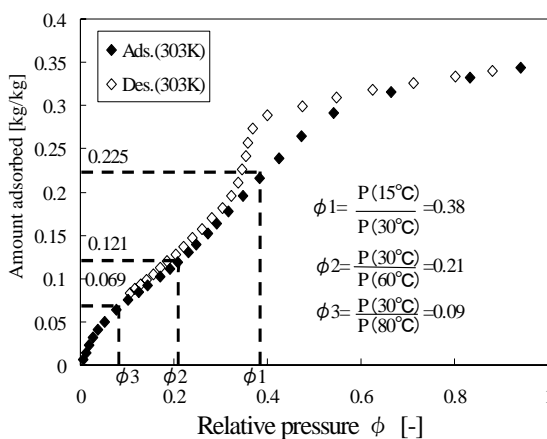


Fig.2 容量法によるシリカゲルの水蒸気吸着等温線

2-2-2. 結果および考察

(1) 試作マイクロ波照射型石英バランス式吸着量測定装置の妥当性

AHP の吸着操作（吸着器 30℃、蒸発器 15℃、相対圧 $\phi=0.38$ ）において重量法（本装置）と容量法（Bell sorp:日本ベル（株））による平衡吸着量を比較して本装置の妥当性を検討した。

Fig. 2 に容量法による測定結果を示す。相対圧 $\phi=0.38$ における平衡吸着量は 0.225kg/kg であった。Fig. 3 に重量法による測定結果を示す。吸着開始約 100 分で平衡吸着量は 0.229kg/kg であり、この値は重量法の結果とほぼ一致したことから、本装置による吸着量測定の妥当性が確認された。

(2) 連続照射による脱着実験結果

吸着器 60℃、凝縮器 30℃の脱着平衡後へのマイクロ波連続照射（出力：0.1kW、0.5kW 及び 1.0kW）による吸着量変化、シリカゲル温度変化の測定結果を Fig. 4、Table 2 にまとめて示す。1.0kW 連続照射では、照射開始約 20 分で脱着率 96.1%、またシリカゲル温度は約 5 分で最高温度 107.5℃を得、その温度のまま推移することがわかる。またシリカゲル温度に対する平衡吸着量から算出した脱着率を温度基準脱着率と定義すると 107.5℃に対するその値は 71.7%であることから、1.0kW 連続照射では過剰脱着が起こっていると考えられる。また 0.5kW 及び 0.1kW 連続照射では、脱着率 59.2%及び 37.0%、シリカゲル温度は、94.5℃及び 73.6℃であった。温度基準脱着率は 59.9%及び 32.3%となり脱着率とほぼ等しい結果を得たことから 0.5kW 以下の比較的低出力において、過剰脱着は見られなかった。以上より、0.5kW から 1.0kW の間で、過剰脱着が起こりうる出力があると考えられる。

(3) パルス照射による脱着実験結果

上記の連続照射実験と同様の条件から、1.0kW のマイクロ波照射 on:off=10s:10s（トータルで 0.5kW）

及び 2s:18s（トータルで 0.1kW）のパルス照射による吸着量変化及びシリカゲル温度変化を測定した。その結果を Fig. 5、Table 3 に示す。10s:10s 照射及び 2s:18s 照射はそれぞれ、脱着率 53.4%及び 23.7%でほぼ一定値をとり、シリカゲル温度

は 89.0℃及び 67.0℃まで上昇し、その後一定となった。各出力の連続照射データと比較すると、シリカゲル温度上昇は抑制できるが脱着率は低下することがわかった。また 89.0℃、67.0℃に対する温度基準脱着率はそれぞれ 53.7%、22.4%であることから、いずれのパルス照射においても温度基準脱着率と脱着率はほぼ等しく、脱着率はシリカゲル温度に依存していると考えられる。

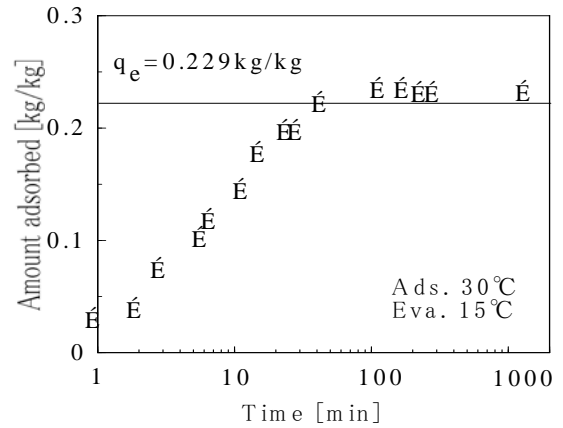


Fig.3 マイクロ波照射型吸着装置による水蒸気吸着量

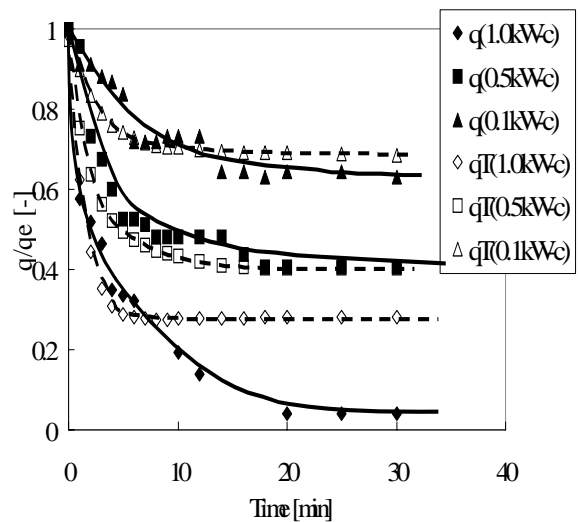


Fig.4 マイクロ波連続照射における脱着の吸着量変化

Table 2 脱着速度および吸着材最大温度上昇

	des rate [%](t-des rate[%])	Tsil [°C]
1.0kW	96.1 (71.7)	107.5
0.5kW	59.2 (59.9)	94.5
0.1kW	37.0(32.3)	73.6

2-3. フェーズ I のまとめ

上記の結果より、以下の結論を得た。

- (1) 1.0kW 連続照射において、96.1%という大きな脱着率が得られ、シリカゲル温度に対する脱着率より大幅に脱着した。
- (2) パルス照射や 0.5kW 以下の低出力照射において、脱着率はシリカゲル温度に依存している。

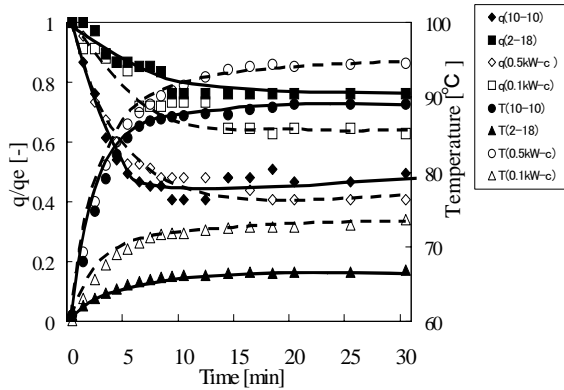


Fig.5 マイクロ波パルス照射の脱着量変化

Table 3 パルス照射の結果

	des rate [%] (t-des rate [%])	Tsil [°C]
10s:10s	53.4 (53.7)	89.0
0.5kW-c	59.2 (59.9)	94.5
2s:18s	23.7 (22.4)	67.0
0.1kW-c	37.0 (32.3)	73.6

-C ; 連続照射 Tsil; シリカゲル温度

3. フェーズ II の成果

3-1. 目的及び目標

AHP におけるマイクロ波導入吸着器を設計するために、吸着材の種類ごとに吸着材充填吸着器におけるマイクロ波照射の脱着促進効果を実験的に明らかにし、マイクロ波照射条件下で使用可能な吸着材の種類、吸着材の幾何学的形状を明らかにする。さらに、マイクロ波照射型吸着器装填最適吸着材モジュール構造を明らかにし、本形式の吸着ヒートポンプの実用性の検討を行う。

3-2. 実験方法

Fig. 1 に本実験装置の概略図を示した。本装置は各種マイクロ波コンポーネント、吸着器、水冷式ダミーロード、蒸発器/凝縮器で構成されている。マイクロ波は 2.45GHz (円形導波管管内波長: 181mm) で発振し、吸着器の下方から照射される。吸着器は直径 100mm の二重円筒形充填層であり、側面から水平に光ファイバー温度計が底面から 5mm を最下測定点として 20mm 間隔で軸方向に計 8 本挿入されている。吸着材層に吸収されずに透過

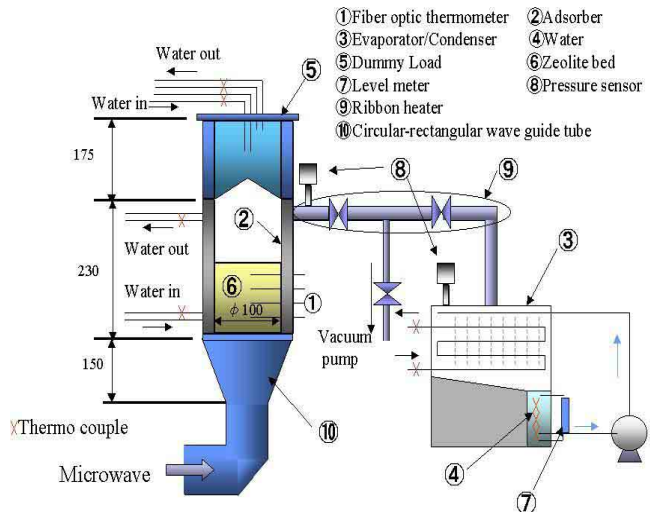


Fig. 6 マイクロ波照射型 AHP の実験装置

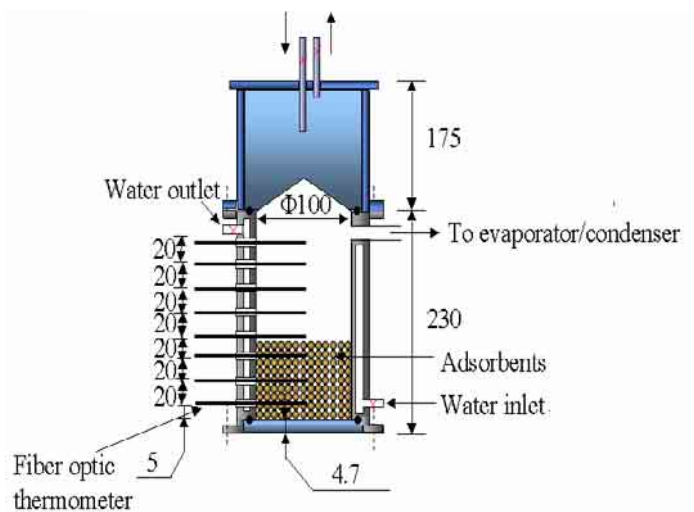


Fig.7 吸着器の詳細

したマイクロ波は吸着器上部のダミーロードに吸収される。蒸発器/凝縮器には流下液膜式熱交換器を用い、水位変化を読み取ることで水蒸気の移動量を測定できる。吸着材には東ソー(株)製ゼオラム F9(細孔径:9 Å)を用いた。Fig. 8 に BELSORP18(日本ベル(株))により測定した本吸着材の 303K における水蒸気吸着等温線を示した。

実験は、吸着材の前処理の後、蒸発器 288K、吸着器 303K の条件下で吸着させ、水蒸気吸着平衡到達後、凝縮器 303K、吸着器 353K における温度脱着平衡到達後にマイクロ波を照射した。マイクロ波出力、充填層高、吸着材粒径をそれぞれ 200W、50mm、1200 μm とした場合を基本条件とし、マイクロ波出力を 100W、400W、充填層高を 10mm、30mm、70mm、90mm、吸着材粒径を 200 μm、600 μm に変化させ実験を行い、各パラメータがマイクロ波による水蒸気脱着に及ぼす影響を検討した。また、マイクロ波照射による脱着量を、同照射時間での層内平均温度における平衡吸着量と比較することで、マイクロ波の脱着促進効果を評価した。尚、温度吸着平衡量および温度脱着平衡量は Fig. 8 に示した水蒸気吸着等温線上の吸着量(q_e)にほぼ一致した。

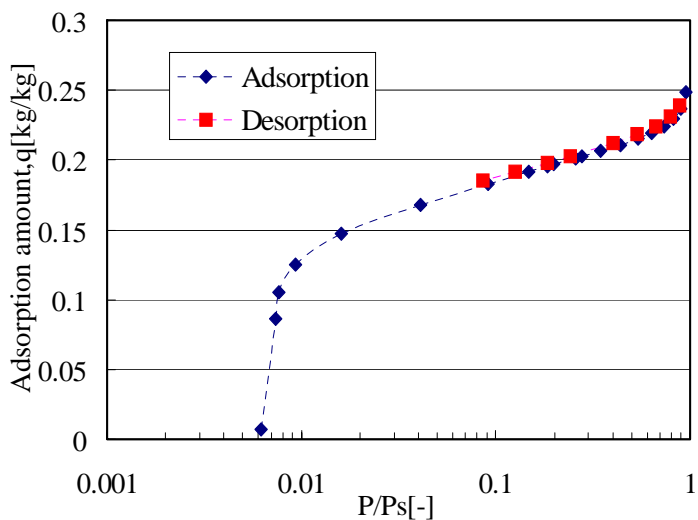


Fig.8 ゼオライトの水蒸気吸着等温線

3-3. 実験結果および考察

(1) 温度吸着、温度脱着、マイクロ波脱着過程の熱・物質移動

Fig.9 に一例として層高 50mm、粒径 1200 μm、高温熱源温度 353K の場合の温度吸着(T-ads)/温度脱着(T-des)/マイクロ波脱着(MW-des)過程における $z=25\text{mm}$ の位置の温度(T)および充填層の全吸着量(q)の経時変化を示した。

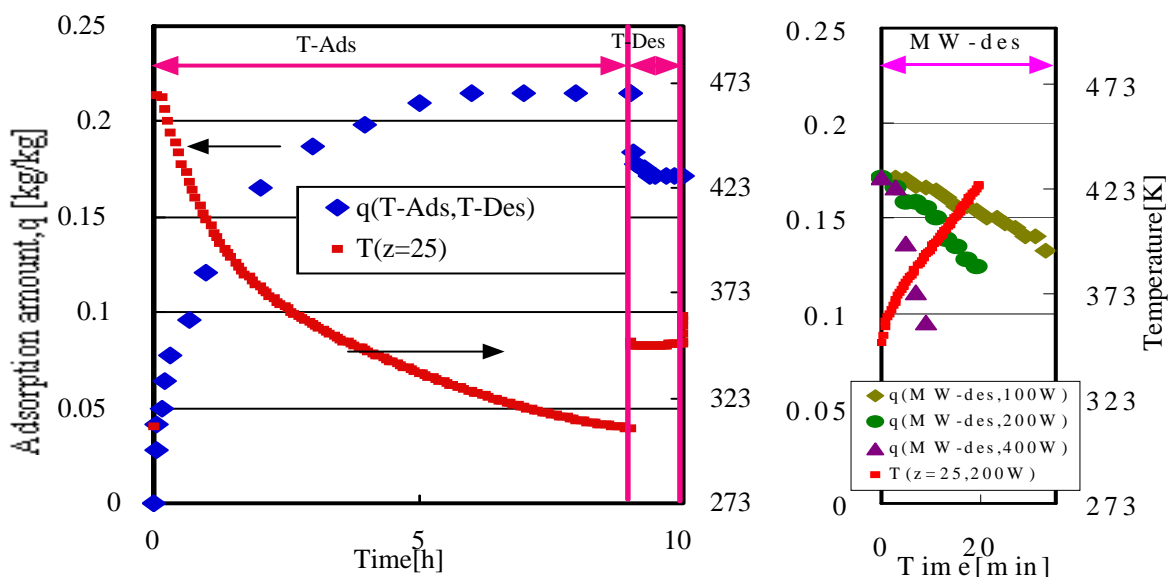


Fig. 9 温度吸着、温度脱着、マイクロ波脱着過程の熱・物質移動温度

温度吸着開始後約 6 時間で吸着量が吸着平衡に達し、一方吸着材温度は初期に上昇し、約 9 時間

を経て初期温度 303Kに回復することが分かる。温度脱着過程においては温度脱着開始後約 30 分で温度脱着平衡に達していることが分かる。また、温度脱着平衡到達後の各出力のマイクロ波照射により脱着が更に進行し、マイクロ波出力の増大に伴い、脱着速度が向上することが分かる。100W、200W、400Wのマイクロ波照射により、温度脱着のみに比較しそれぞれ 1.9 倍、2.0 倍、2.8 倍の脱着量が得られ、排熱・マイクロ波併用型AHPの有効性が平衡論的に示された。温度吸着平衡量および温度脱着平衡量はそれぞれ 0.215kg/kg および 0.172kg/kgとなり、この値はFig.8 に示した水蒸気吸着等温線上の吸着量(q_E)にほぼ一致している。このことから、本実験の妥当性が平衡論的に示される。温度脱着時間が温度吸着時間に比べ短いのは、吸着過程から脱着過程への切り替えのための温度調整時間(約 6 時間)にある程度脱着が進行するためである。

(2) マイクロ波照射過程の圧力、温度変化

Fig.10 に一例として層高 50mm、粒径 1200 μ m、高温熱源温度 353K の場合のマイクロ波照射時における層内温度経時変化、圧力経時変化を、Figs.11、12 にマイクロ波照射開始 5min、10min、15min における軸方向温度分布とマイクロ波照射開始 10min における $z=15$ mm、 $z=35$ mm の位置の半径方向温度分布を示した。

Fig.10 より、圧力はマイクロ波照射初期に上昇した後、降下するが、初期圧力である 303K における水の飽和水蒸気圧(=31.82Torr)以上の値で一定となることが分かる。Fig.11 より、軸方向に $z=25$ mm を頂点とした山形の温度分布が生じ、時間の経過とともにその形状を保ちつつ全体として温度が上昇することが分かる。層高によって軸方向温度分布形状が変化した。また、Fig.12 より「半径方向には中心部が最も温度上昇が大きく、壁面に近づくほど比例的に温度上昇が小さくなる温度分布が形成されることが分かる。これはマイク

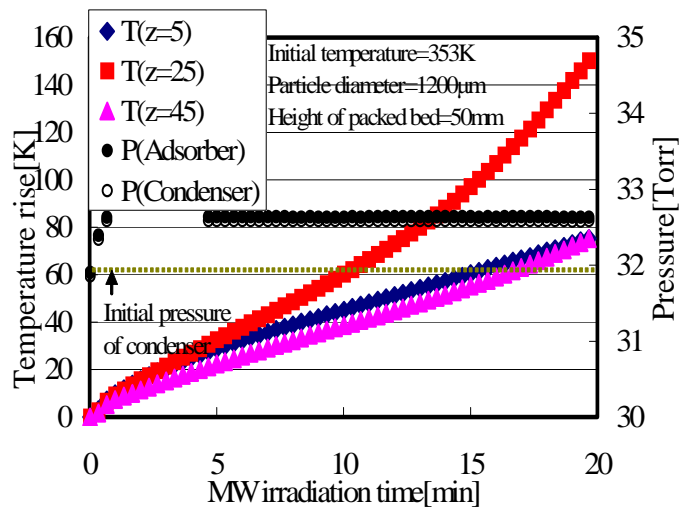


Fig.10 マイクロ波照射における脱着過程の吸着器内温度と圧力

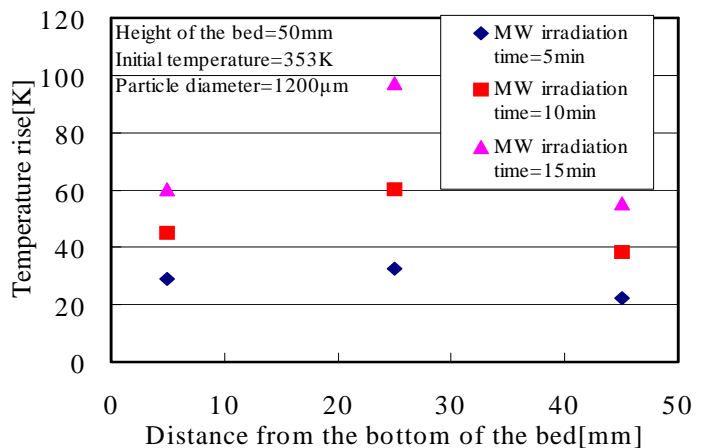


Fig. 11 充填層内軸方向温度

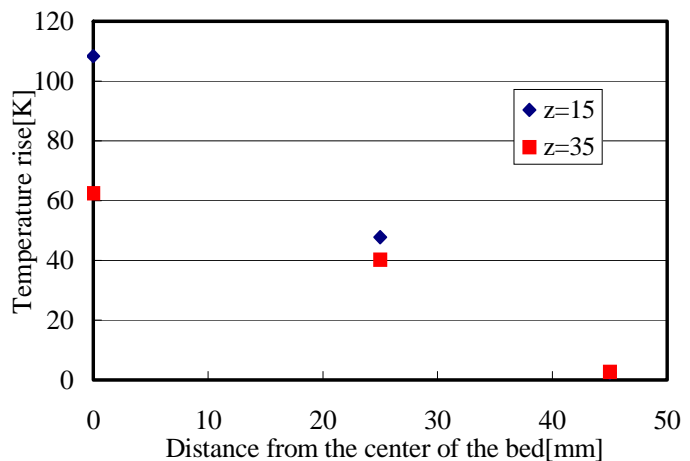


Fig. 12 充填層内半径方向温度

口波の固有モード、TE₁₁モードによる電界強度分布に起因している。このように軸方向、半径方向ともに温度分布が存在するが、これらの温度分布存在下でも全体として脱着が進行し、凝縮器側での有意な凝縮が確認されるので、以後はこの温度分布の存在を許容した検討を行った。

(3) 脱着速度に及ぼすマイクロ波強度の影響

Fig.13 に粒径 1200 μm、層高 50mm の条件で各出力のマイクロ波を照射したときの温度脱着平衡からの脱着率 $((q_E - \Delta q_{MW})/q_E)$ の経時変化を、Table 4 に各マイクロ波出力における透過率 X[%]を示した。

Fig. 13 より、いずれの出力においても、照射開始一定時間後から凝縮が確認され、その後直線的に脱着が進行することが分かる。この凝縮が確認される時間を凝縮開始時間と定義する。凝縮開始時間はマイクロ波出力 100W では 4~5min、200W、400W では 2~3min であることから、マイクロ波出力の増大に伴い、凝縮開始時間が早まることが分かる。また、マイクロ波出力の増大に伴い脱着率変化の勾配が急になり脱着速度が向上することが分かる。マイクロ波照射開始初期に一定時間凝縮が確認されない理由としては、先に示した軸方向、半径方向の温度分布の存在により、高温部で脱着した水蒸気が低温部で再吸着するためであると考えられる。Table 4 より、マイクロ波の透過率 X はマイクロ波出力によらずほぼ一定であることが分かる。

(4) マイクロ波脱着速度に及ぼす層高の影響

Fig.2-16 に各層高における温度脱着平衡からのマイクロ波照射時の脱着率経時変化を、Figs.2-17~20 にそれぞれ層高 10mm、30mm、70mm、90mm における吸着材温度経時変化、軸方向温度分布を、Table2-3 に各充填層高における透過率 X[%]を示した。

Fig.2-16 より、いずれの層高においても、

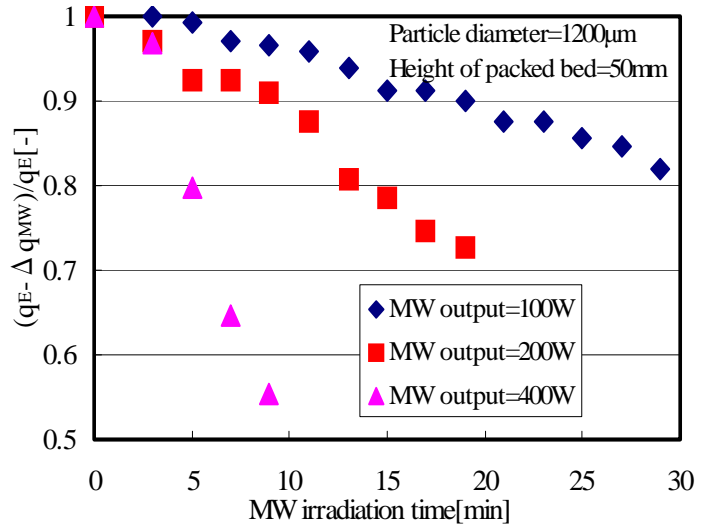


Fig.13 マイクロ波強度の影響

Table 4 マイクロ波の透過率

MW output [W]	Transmissivity, X [%]
100	23
200	23
400	27

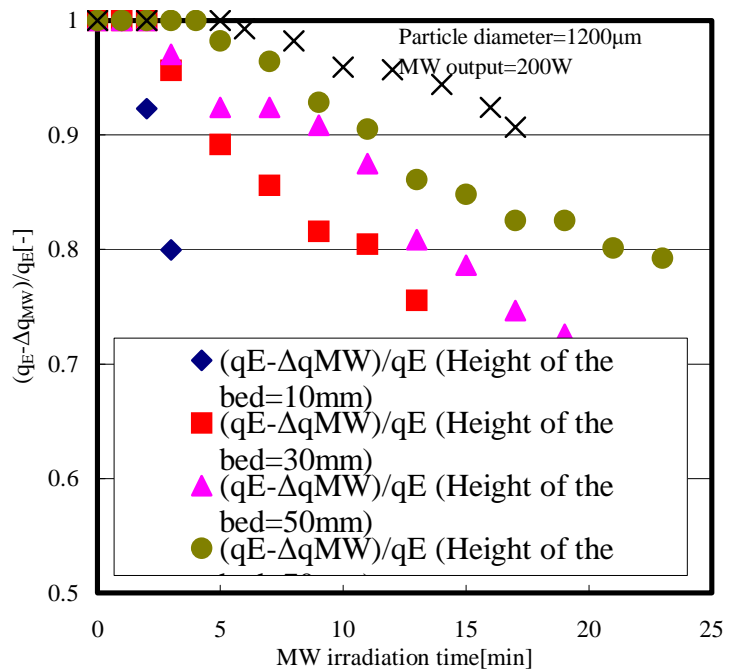


Fig.14 マイクロ波脱着に及ぼす層高の影響

照射開始後一定時間は凝縮が確認されず、凝縮開始後は直線的に脱着が進行することが分かる。凝縮開始時間は層高 10mm では 1~2 min、30mm、50mm では 2~3min、70mm では 4~5min、90mm では 5~6min であり、層高の増大に伴って凝縮開始時間が遅くなることが分かる。また、脱着率変化の勾配から、層高の増大に伴い吸着材単位重量あたりの脱着速度が減少することが分かる。この脱着速度の減少は、マイクロ波の出力が一定であるのに対し、層高の増大により処理量が増加するためであると考えられる。なお、充填層高の増加に伴いマイクロ波の透過率 X[%]が減少することを確認した。

(5) マイクロ波脱着に及ぼす吸着材粒子径の影響

Fig.15 に各吸着材粒子径ごとのマイクロ波照射時における水蒸気脱着率の経時変化を示した。本実験範囲内では凝縮開始時間や脱着速度に及ぼす粒子径の影響は少ないことが分かる。また、マイクロ波の透過率は吸着材粒子径によらずほぼ一定であることを確認した。

(6) 高温熱源温度の影響

Fig.16 に各高温熱源温度で脱着平衡に到達した後のマイクロ波照射過程における脱着量経時変化を示した。なお、高温熱源温度により脱着平衡時の平衡吸着量は異なるため、縦軸の分母に平衡吸着量をとらず、縦軸は脱着平衡からの脱着量変化($\Delta q_{MW}[kg/kg]=q-q_E$)をとった。凝縮開始時間は高温熱源温度が 313K、323K では 4~5min、333K では 3~4min、353K では 2~3min であり、高温熱源温度の高温化に伴い、凝縮開始時間が短縮されることが分かる。また、脱着量変化の勾配より、高温熱源温度の高温化に伴い、脱着速度が向上することが分かる。マイクロ波の透過率は高温熱源温度によらずほぼ一定であることを確認した。

(7) マイクロ波照射の過剰脱着効果

Fig.17 に、層高 50mm の場合に各出力のマイクロ波を照射したときの凝縮量 (Δq_{MW}) から求めた脱着率($(q_E - \Delta q_{MW})/q_E$)変化と同照射時間での層内平均温度における平衡吸着量 (Δq_T) から求めた脱着率($(q_E - \Delta q_T)/q_E$)変化を、Fig.2-24 に各層高の吸着材層に出力 200W のマイクロ波を照射した場合の結果を示した。いずれの出力においても Δq_T はマイクロ波照射開始から変化し、更に時間の経過とともに増大することが分かる。200W の場合、マイクロ波照射開始から 10min までは Δq_{MW} は Δq_T 以下または同程度となり、マイクロ波による温度上昇以上の脱着量は得られないが、10min 以降は Δq_T より Δq_{MW} の方が大きくなり温度上昇以上の脱着、つまり過剰脱着が行われることが分かる。更に、

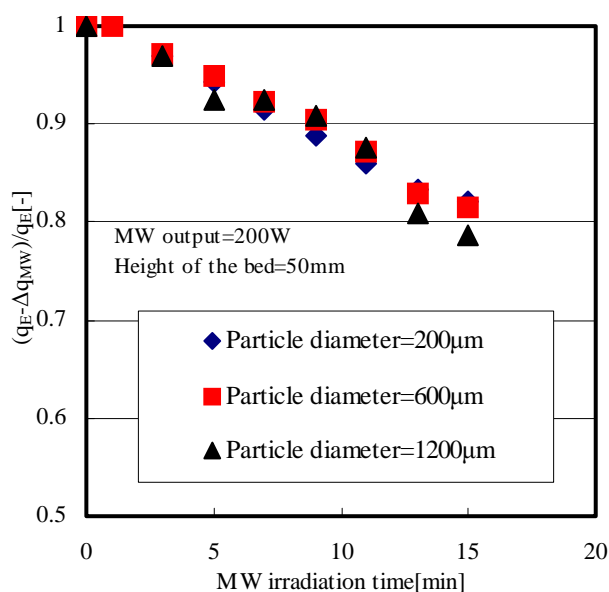


Fig.15 マイクロ波脱着に及ぼす粒子径の影響

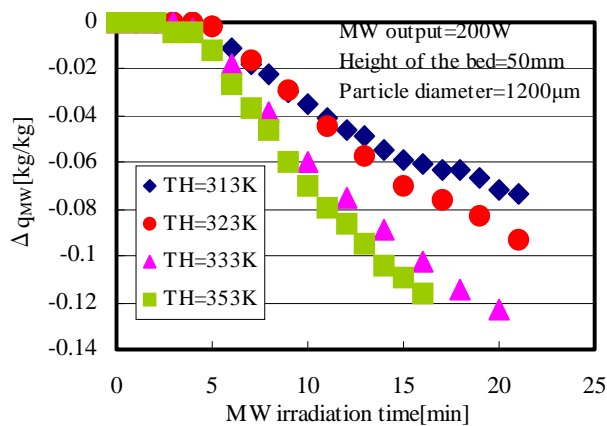


Fig.16 マイクロ波照射場での脱着速度に及ぼす熱源温度の影響

時間の経過とともに過剰脱着の割合が大きくなる。他のいずれの出力においても照射時間が経過するにつれ温度上昇による脱着量以上の脱着が行われることが分かる。なお、マイクロ波照射開始初期において Δq_{MW} が Δq_T 以下または同程度の脱着量となり過剰脱着が行われないのは、凝縮開始時間が存在するためである。Fig.18 より層高 10mm、30mm の場合は Fig.17 と同様の傾向が見られるが、層高 70mm の場合マイクロ波照射終了まで Δq_{MW} は Δq_T と同程度となり過剰脱着が行われず、層高 90mm ではマイクロ波照射開始から終了まで Δq_{MW} は Δq_T 以下となり過剰脱着が行われないことが分かる。

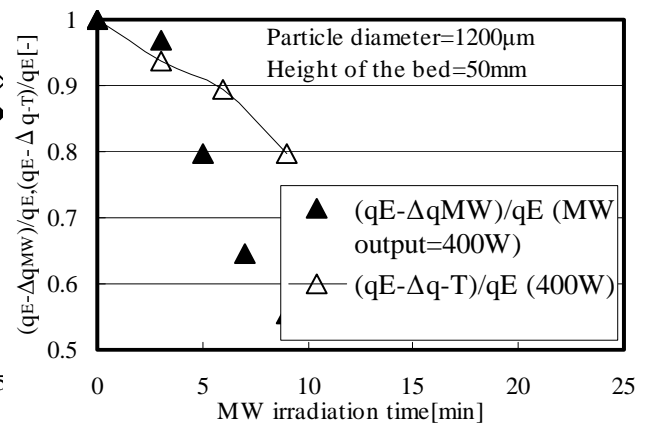
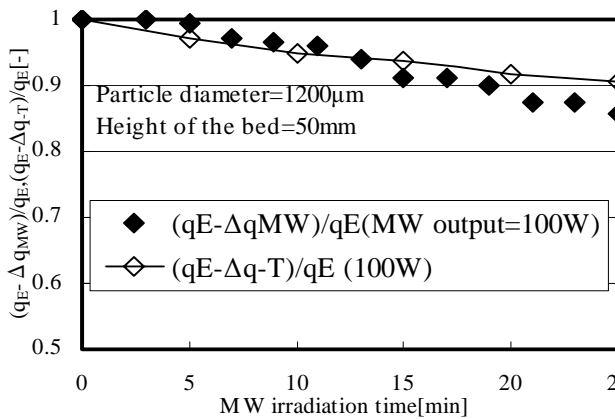
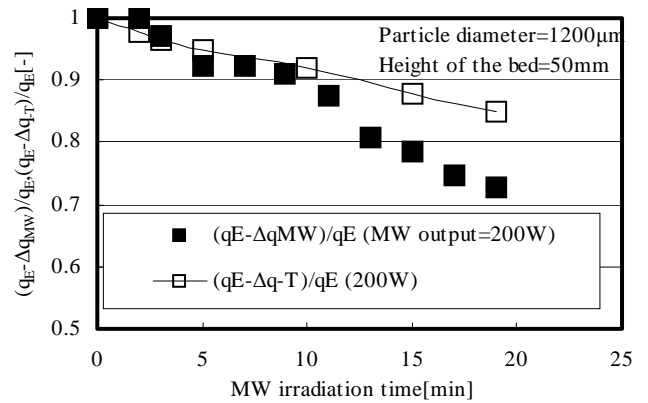


Fig.17 マイクロ波による過剰脱着に及ぼすマイクロ波強度の影響

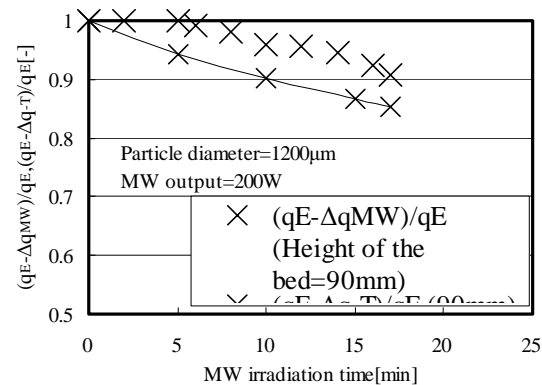
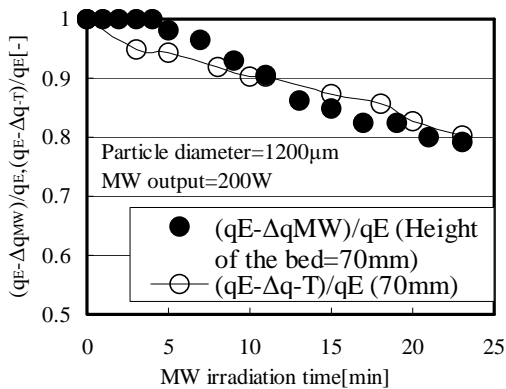
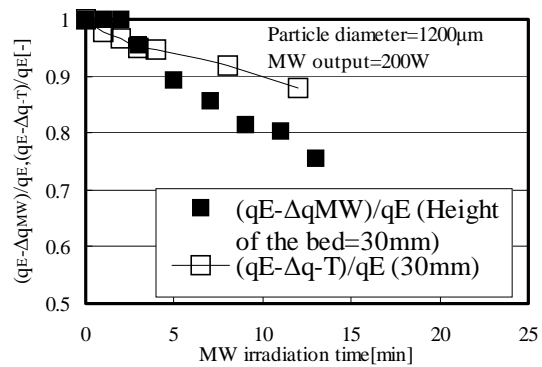
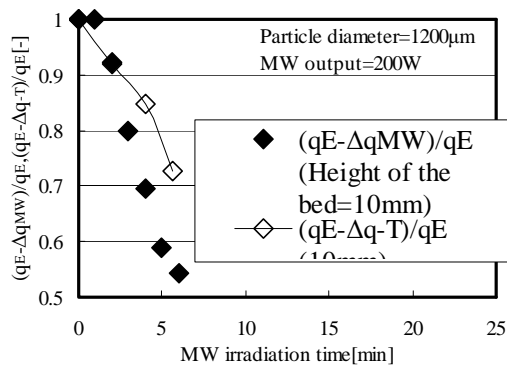


Fig.18 マイクロ波による過剰脱着に及ぼす充填層高の影響

Table 5、6 に各マイクロ波出力、層高条件におけるマイクロ波照射時間 5 分を基準とした実測脱着率 $(1-(q_E-\Delta q_{MW})/q_E)$ と層内平均温度から算出される脱着率 $(1-(q_E-\Delta q_T)/q_E)$ の比を示した。Table 5 より、 $(1-(q_E-\Delta q_{MW})/q_E)/(1-(q_E-\Delta q_T)/q_E)$ は 100Wでは 0.22 なのに対し 400Wでは 2.2 まで増加し、マイクロ波出力の増大に伴い過剰脱着効果が大きくなる事が分かる。Table 6 より、層高 10mmでは 2 なのに対し層高 70mmでは 0.31 まで減少し、充填層高の増大に伴いマイクロ波による過剰脱着効果が小さくなる事が分かる。なお、層高 90mmの場合マイクロ波照射開始 5minの時点では凝縮が開始していないため、 $(1-(q_E-\Delta q_{MW})/q_E)/(1-(q_E-\Delta q_T)/q_E)$ の値は表記していない。ここで、 Δq_{MW} 、 Δq_T はそれぞれマイクロ波照射脱着基準および温度脱着基準の脱着量である。

Table 5 マイクロ波 5min 照射における過剰脱着効果

Microwave output [W]	100	200	400
$(1-(q_E-\Delta q_{MW})/q_E)/(1-(q_E-\Delta q_T)/q_E)[-]$	0.22	1.4	2.2

Table 6 マイクロ波 5min 照射における過剰脱着効果の充填層高の影響

Height of the bed [mm]	10	30	50	70	90
$(1-(q_E-\Delta q_{MW})/q_E)/(1-(q_E-\Delta q_T)/q_E)[-]$	2	1.8	1.4	0.31	-

3-4. フェーズⅡのまとめ

上記の結果及び考察より以下の結論を得た。

- 1) ゼオライト/水系吸着ヒートポンプにマイクロ波を導入することにより、吸着ヒートポンプを高性能化できることが示唆された。
- 2) マイクロ波脱着速度は吸着材粒子径によって変化しない。
- 3) マイクロ波による過剰脱着が確認され、それは吸着材充填層高の減少に伴って顕著になる。などの結果が得られ、本形式の吸着器装填吸着材モジュール設計指針を得ることができた。

4. 成果の達成度

高性能吸着ヒートポンプの開発を目的として、新たにマイクロ波照射型吸着ヒートポンプを提案し、本形式用の吸着器の設計指針を得ることを最終目標とする検討を行い、目標に対して 100%の研究成果を得た。

5. 今後の課題

マイクロ波型吸着ヒートポンプの実用化を達成するためには、研究成果で得られた吸着器の設計に基づく吸着器の試作を行い、この吸着器で構成されるマイクロ波照射型吸着ヒートポンプにおける実排熱を想定した温度条件下の稼働実験および性能評価を行うことが不可欠である。また、マイクロ波

照射がいわゆる外部動力として供給されるので、この動力供給を最小とする運転制御の最適化の課題が残されている。フェーズⅢではこれらの課題を解決し、本吸着ヒートポンプの実用化に結びつける。