

ポンプ動力を付加した吸着ヒートポンプの熱出力特性

Characteristics of a Heat Output of an Adsorption Heat Pump with Pumping

架谷昌信*、渡辺藤雄**、窪田光宏***、小林敬幸****

Masanobu Hasatani, Fujio Watanabe, Mitsuhiro Kubota, Noriyuki Kobayashi

Abstract An adsorption heat pump(AHP) with pumping is proposed to expand the available heat sources and to increase cooling power. The main objective of this research is to carry out the conceptual study of operation range in points of adsorption equilibria and experimental study of desorption and adsorption processes by silica-water AHP which is composed of a mechanical booster pump(MBP) and an adsorber of packed bed. This effect is confirmed experimentally. In these experimental ranges, the amount of pump power is effective to increase cooling power. Therefore, it is confirmed that the range of temperature, which is able to use as a heat source, is expanded and cooling power is increased directly by pump power.

1. はじめに

近年、莫大なエネルギー消費をもたらすエネルギー資源・環境の問題が緊急の課題とされている。このような状況の中で、先進国においてさえ、一次エネルギーの 60% 以上が未利用のまま廃熱として環境に廃棄されている。とくに、その廃熱の約 80% は温度 373K 以下の熱エネルギーであり、この低温排熱の有効利用技術の確立が急務とされている。

吸着ヒートポンプ (AHP) は、373K 程度以下の熱エネルギーを回収しこれを環境温度以下の低温熱エネルギーに変換でき、かつ水蒸気を作動媒体とする AHP は環境調和型熱エネルギー機器として機能するため、上記の課題解決の最有力候補技術に位置づけられる。しかし、シリカゲル・水蒸気系 AHP では通常の吸収式ヒートポンプに比べて容積基準で 4 倍以上の大型化が余儀ない。さらに、運転の成績係数 (COP) が 1 以下であることなどの課題が存在する。例えば、再生のための熱源温度が 358K では COP が 0.65 となる¹⁾。吸着材単位質量あたりの冷熱出力が 0.3~1.0kW/kg-吸着材を有する AHP の高性能

化開発研究においても COP を 1 以上にすることは困難である²⁻⁶⁾。一方、COP は吸着および脱着の平衡関係、操作相対圧関係および装置の顕熱によって決まり、その値は冷熱出力の増大に伴って小さくなる⁷⁾。装置顕熱損失を最小化するすることによって COP を向上させる試みが検討されたが、結果として AHP の排出温度の上昇が避けられない⁸⁾。

そこで本研究では上記の問題を解決するために、熱源供給に加えて最小限のポンプ動力を付加するハイブリッド AHP を提案⁹⁾、シリカゲル・水蒸気系のハイブリッド AHP 試験機を実際に試作し、ポンプ動力導入の効果を平衡論的に評価した。なお、ポンプは AHP の吸着過程、脱着過程での稼動でそれぞれ吸着質蒸気を吸着材に加圧吸着および吸着材から減圧脱着させる。このことは AHP の操作相対圧範囲の拡大につながり、結果として、AHP の操作吸着量差を大きくし、吸着材が有効利用され COP の増大が期待できる。

2. ハイブリッド AHP の操作範囲

吸着過程、脱着過程にポンプを導入したハイブリッド AHP の概念図を **Figure. 1** に示す。ポンプは吸着過程、脱着過程でそれぞれ蒸発器内の吸着質蒸気を吸着材に加圧供給および吸着材から強制的に脱着させ凝縮器に輸送する機能を有する。そのため、ポンプを使用しない通常の吸着式ヒートポンプ以上の吸・脱着が期待できる。

* 愛知工業大学大学院 機械工学専攻(豊田市)
** 愛知工業大学 総合技術研究所(豊田市)
*** 名古屋大学大学院 エネルギー理工学専攻(名古屋市)
**** 名古屋大学 エコトピア科学研究所(名古屋市)

つまり、通常の吸着式ヒートポンプの相対圧 ϕ_1 及び ϕ_2 からハイブリッド吸着式ヒートポンプの相対圧 ϕ_1' 及び ϕ_2' まで拡張する。ここで、吸着式ヒートポンプにおける相対圧 ϕ_1 及び ϕ_2 は以下の式で表される。

$$\phi_1 = P_M / P_H \quad (1)$$

$$\phi_2 = P_L / P_M \quad (2)$$

また、ハイブリッド吸着式ヒートポンプでは $PL' < PL$ 及び $P_M' < P_M$ となるため、相対圧 ϕ_1' 及び ϕ_2' は以下の式で表される。

$$\phi_1' = P_M' / P_H \quad (3)$$

$$\phi_2' = P_L' / P_M \quad (4)$$

通常の吸着式ヒートポンプでは、 ϕ_1 は高温熱源温度 T_H の上昇もしくは、環境温度 T_M の低下により減少する。 ϕ_2 は環境温度 T_M の低下もしくは冷熱温度 T_L の上昇により増加する。通常の吸着式ヒートポンプは $\phi_1 < \phi_2$ の条件で運転可能である。一方、ポンプを導入したハイブリッド吸着式ヒートポンプでは $\phi_1 < \phi_1'$ 及び $\phi_2' > \phi_2$ となることから生成冷熱 Q_T 、 Q_{ads} 、 Q_{des} 及び $Q_{ads+des}$ は次の式で表される。

通常の吸着式ヒートポンプ；

$$Q_T = \Delta HW \Delta q_T \quad (5)$$

ハイブリッド吸着式ヒートポンプ（吸着過程）；

$$Q_{ads} = \Delta HW (\Delta q_T + \Delta q_{ads}) \quad (6)$$

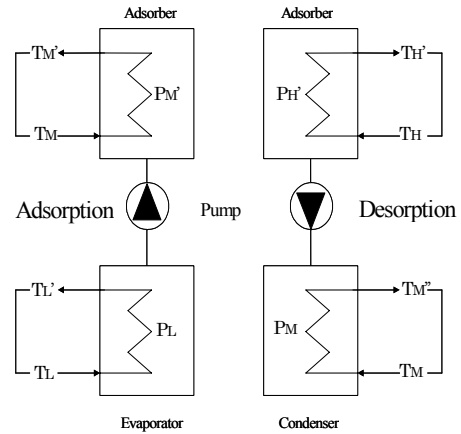
ハイブリッド吸着式ヒートポンプ（脱着過程）；

$$Q_{des} = \Delta HW (\Delta q_T + \Delta q_{des}) \quad (7)$$

ハイブリッド吸着式ヒートポンプ（吸脱着過程）；

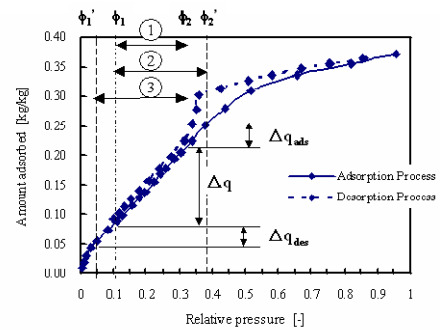
$$Q_{ads+des} = \Delta HW (\Delta q_T + \Delta q_{ads} + \Delta q_{des}) \quad (8)$$

Figure 2 にシリカゲル/水蒸気の吸着等温線と吸着式ヒートポンプとハイブリッド吸着式ヒートポンプの操作範囲を示す。吸着等温線から、平衡論的には $Q_{ads+des} > Q_{ads} > Q_T$ 、 $Q_{des} > Q_T$ となることが期待される。本研究では、吸着式ヒートポンプへの MBP 導入による吸着材利用率の改善、それによる COP の向上を目的として、水/シリカゲル系ハイブリッド吸着式ヒートポンプを製作し、吸/脱着過程において MBP を用いた蒸気搬送量の制御、加圧、減圧を行うことによる吸着材利用率向上の可能性につい



て検討した。

Fig. 1 Conceptual drawing of the adsorption heat pump with pump in adsorption and desorption process



1. Operation Range of the AHP : $\phi_1 - \phi_2$
2. Operation Range of the hybrid AHP (Adsorption aided with pumping) : $\phi_1' - \phi_2'$
3. Operation Range of the hybrid AHP (Desorption aided with pumping) : $\phi_1' - \phi_2$
4. Operation Range of the hybrid AHP (De/adsorption aided with pumping) : $\phi_1' - \phi_2'$

Fig. 2 Adsorption equilibria of water vapor on silica gel at 303K

3. 実験

3.1 実験装置および方法

Figure 3 に、充填槽形式のシリカゲル/水蒸気系ハイブリッド吸着式ヒートポンプ実験装置の概略図を示す。装置は蒸発/凝縮器、充填層型吸着器及びメカニカルブスターポンプ（以下 MBP）、配管及びバルブで構成されている。

Figure 4 に蒸発/凝縮器及び吸着器の詳細図を示す。吸着器はステンレスの 2 重管構造で、内管 (50 mm ϕ , 150 mm) に 450 \cdot m の RD シリカゲルが 100 mm の高さまで充填されており、外管により熱交換が可能な構造となっている。圧力センサーは上部（空洞部）、中部（充填層中心）、下部（充填層底部から 5 mm の位置）に取り付けられている。また、K 熱電対が Figure 4(b) に示されるよ

うに6本取り付けられている。蒸発/凝縮器は、水位ゲージ、K熱電対及び圧力センサーが Figure 4(a) のように取り付けられており、吸着器と同様に外管により熱交換が可能な構造となっている。また、MBP (ULVAC, MBS-010 type, maximum output 182 W, a rate of exhaust volume 12 m³/h) をポンプとして採用した。

3・1・1 吸着過程

前処理として、吸着器を 333 K の条件で真空脱気した後、吸着器温度を 303 K、蒸発/凝縮器温度を 287 K に設定した。バルブ V₄、V₅ を開けて吸着平衡到達まで水蒸気を供給した。吸着が平衡に到達した点をポンプなしの吸着過程終了とみなし、バルブ V₄ を閉じてバルブ V₁、V₂ を開けてポンプによる強制吸着をポンプ動力 182 W にて行った。

3・1・2 脱着過程

ポンプなしの吸着過程終了後、吸着器を 333 K、蒸発/凝縮器を 303 K に設定し、バルブ V₄、V₅ を開けて脱着平衡到達まで、脱着を行った。その後、バルブ V₅ を閉じ、バルブ V₂、V₃ を開けてポンプによる強制脱着を行った。このとき、ポンプ動力を 103 W、143 W、182 W について行った。

4. 結果及び考察

4・1 吸着過程

Figure 5 に吸着器における温度($T_1 \sim T_6$)と圧力($P_1 \sim P_3$)の経時変化を示す。実験開始後、全ての測定点において急激に温度が上昇した後、緩やかに初期温度(303 K)まで低下する。また、圧力もすべての点において吸着により低下した後、実験開始後約4時間で定常となる。13時間後、すべての温度と圧力は初期温度、初期圧力と等しくなり、この時点で吸着平衡に到達したとみなした。この時点での吸着量は 0.203 kg/kg で、吸着平衡量 (0.219 kg/kg) から計算される吸着量の 92.7% となった。ポンプによる強制吸着がスタートする

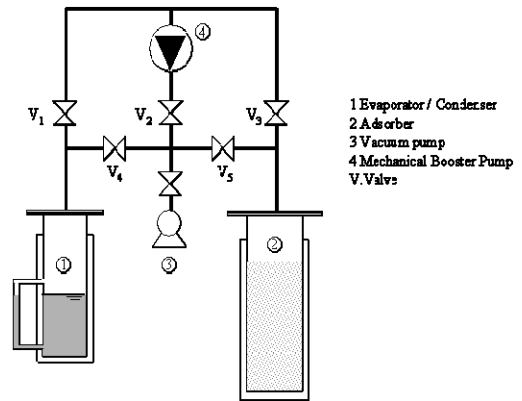


Fig. 3 Schematic drawing of the experimental apparatus

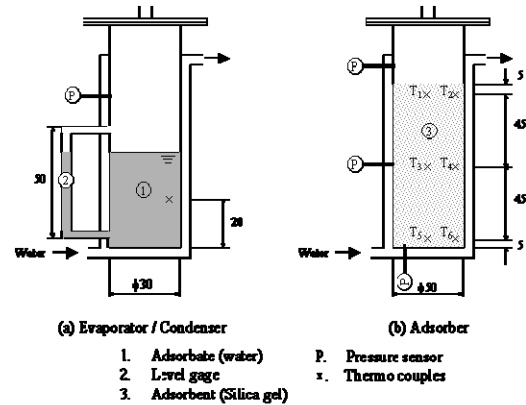


Fig. 4 Schematic drawing of the adsorber and the evaporator/condenser

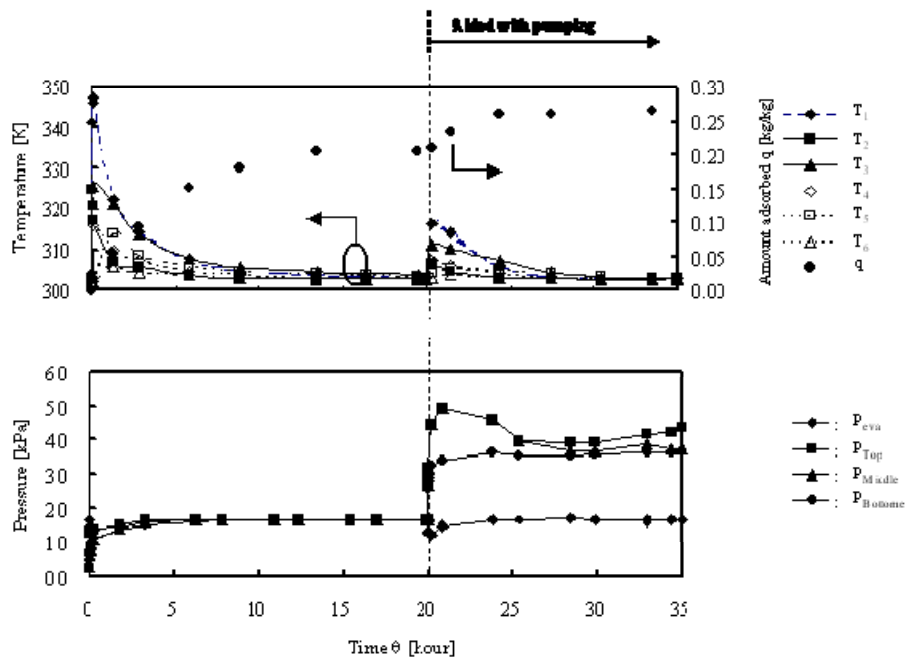


Fig. 5 Desorption amount, temperature and pressure profiles during the desorption process

と、すべての点において温度が急激に上昇し、吸着量は再び上昇した。また、7時間後には圧力は 3.59 kPa に到達しその後は安定した圧力を保った。10時間後、吸着量

は 0.280 kg/kg に到達し、到達圧力から計算される吸着平衡量(0.300 kg/kg)の 93.3 %に到達した。また、ポンプによる強制吸着の効果により、ポンプなしの場合と比べて吸着量が 140 %に増加し、ポンプ導入の効果が確認された。

4.2 脱着過程

Figure 6 に吸着器における温度($T_1 \sim T_6$)と圧力($P_1 \sim P_3$)の経時変化を示す。実験開始後、全ての測定点において急激に温度が減少した後、緩やかに初期温度(333 K)に低下する。また、圧力もすべての点において吸着により低下した後、実験開始後 5 時間で定常となる。実験開始から 13 時間後すべての温度と圧力は初期温度、初期圧力と等しくなり、この時点で脱着疑平衡に到達したとみなした。この時点での吸着量は

0.160 kg/kg で、脱着平衡量(0.130 kg/kg)から計算される吸着量の 123 %となった。脱着疑平衡量が、平衡脱着量と比較して大きいのは実験で用いたシリカゲル充填層が大きく伝熱性、及び水蒸気の拡散性が低いためであり、13 時間を経過してもほとんど検出されない速度で脱着が進行しているものと考えられる。ポンプによる強制吸着がスタートすると、

すべての点において温度が急激に減少し、吸着量は再び減少した。また、10 時間後には圧力は 1.33 kPa に到達し、その後は安定した圧力を保った。10 時間後、吸着量は 0.117 kg/kg に到達し、到達圧力から計算される吸着平衡量(0.063 kg/kg)の 185.7 %に到達した。これにより、ポンプによる強制吸着の効果が確認された。

Figure 7 にポンプ投入電力を変えたときの脱着量の変化を示す。この実験ではどの条件においても温度と圧力の変化はほぼ同等の傾向を示し

た。実験開始 5 時間後、ポンプ投入電力が大きいくほど脱着量が大きくなったことから、ポンプ投入電力と脱着速度について投入電力の最適化が必要であることがわかった。

4.3 投入電力の効果

Table 1 に、今回の実験における実験条件と吸・脱着量の結果をまとめた。ここで、 θ は吸着器が初期温度までに回復する時間、 q は吸/脱着量を示している。また、 Q_{cal} 及び Q_{exp} は式(5) ~ (8)を用いて計算した値である。ポンプを用いた場合の Q_{exp} は、ポンプなしの Q_{exp} と比べて 2.9 ~ 4.5 倍増加した。ポンプの追加により、吸

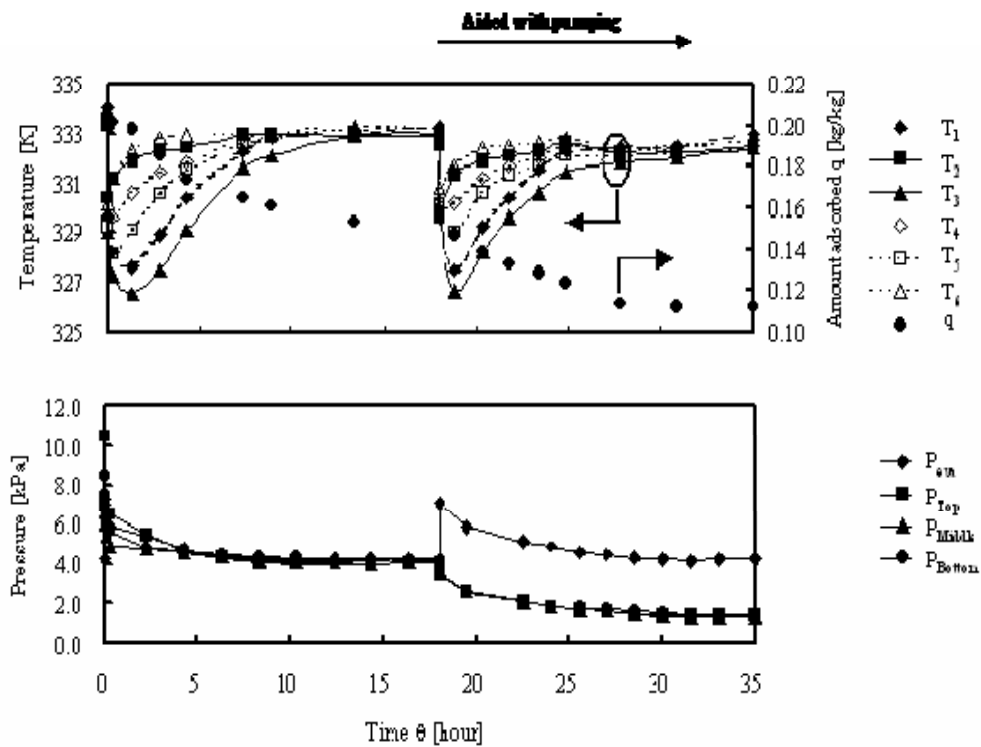


Fig. 6 Desorption amount, temperature and pressure profiles during the desorption process

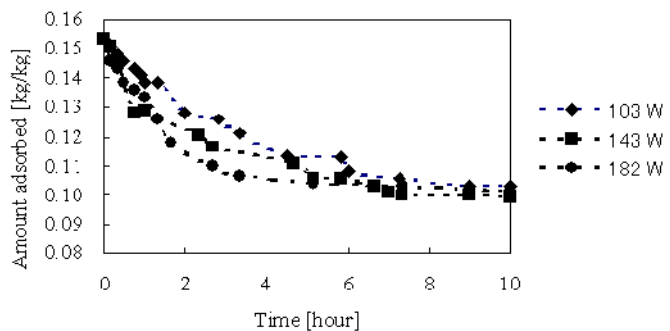


Fig. 7 Adsorbed amount profiles during the desorption process

Table 1 Experimental results for desorption/adsorption process

	T _L [K]	T _M [K]	T _H [K]	Pump power [W]	θ [h]	q [kg/kg]	Q _{cal} [kJ]	Q _{exp} [kJ]
Thermal	288	303	333	—	—	—	41	12
Adsorption	288	303	333	182	11	0.275	59	37
desorption	288	303	333	103	8.1	0.119	52	35
desorption	288	303	333	143	7.8	0.115	52	36
desorption	288	303	333	182	8.0	0.117	51	3
Adsorption and desorption	288	303	333	182	—	—	69	60

着材の利用率が大きく向上し、ハイブリッド吸着式ヒートポンプの熱的な COP も大きく向上した。本実験において、ポンプの投入による吸・脱着量の向上の効果について確認できたが、吸着過程、脱着過程ともに吸着器内部での蒸気拡散や熱の供給除去速度の問題から吸着速度、脱着速度が遅いため、実機適用に関しては速やかな吸・脱着が行える吸着器を用いた検討が必要であることがわかった。

5. 結 言

吸着式ヒートポンプの変換効率 COP の改善案としてポンプによる吸着質の強制加圧及び減圧を行うハイブリッド吸着式ヒートポンプを提案し、その平衡論的特性を実験的に検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) ポンプによる吸着質の強制加圧及び減圧により吸着器圧力を変化させることによって、吸脱着量が大きく変化し、吸着式ヒートポンプの操作範囲を拡大することが可能となる。
- 2) その効果により、高温熱源温度の低下による冷熱出力の改善及び、吸着材の吸着効率の改善が可能となった。

6. 使用記号

- ada = adsorption
- cal = calculation
- con = condenser
- des = desorption
- eva = evaporator
- exp = experiment

- H = high
- L = low
- M = middle
- T = thermal

7. 参考文献

- 1) Watanabe, F., J. Kozuka, M. Kumita and M. Hasatani; “Adsorption Equilibrium of Silica Gel, Active Carbon/Water Vapor, Ethanol and Applicability of Combination of Those Adsorbent/Adsorbate to Adsorption Heat Pump”, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 19,1165-1170(1993)
- 2) Cerkvenik, B. and F. Ziegler; “The Influence of Periodic Operation on the Characteristics Adsorption Devices”, *Energy Convers. Mgmt.*, 47, 2020-2033(2006)
- 3) Chahbani, M. J. Labidi and J. Paris; “Modeling od Adsorption Heat Pump with Heat Regeneration”, *Appl. Therm. Eng.*, 24, 431-447(2004)
- 4) Dechang, W., W. Jingyi, S.Honggang and W. Ruzhu; “Experimental Study on Dynamic Characteristics of Adsorption Heat Pump Driven by Intermittent Heat Sorce at Heating Mode”, *Appl. Therm. Eng.*, 25, 927-940(2005)
- 5) Gui, Y., R. Wang, J. We and Y. Xe; “Performance Modeling and Testing on a Heat-regerative Adsorption Reversible Heat Pump”, *Appl. Therm. Eng.*, 22, 309-320(2002)
- 6) Saha, B., A. Akisawa and T. Kashiwagi; “Solar/Water Heat Driven Two-stage Adsorption Chiller: The Prototype”, *Renew. Energy*, 23, 93-101(2001)

- 7) Hirota, Y., K. Ito, N. Kobayashi, M.Hasatani, T. Takewaki, K. Oshima and H. Kakiuchi”, Dynamic Analysis of the ate of Adsorption and Desorption on the New Adsorption Materials for Adsorption Heat Pump”, *Chem. Eng., Sci.*, submitted(2006)
- 8) Tatler, M. and Erdem-Senatakar; “Effects of Metal Mass on the Performance of Adsorption Heat Pumps Utilizing Zeolite 4A Coatings Synthesized on Heat Exchanger Tubes”, *Int. J. Regfig.*, 23, 260-268(2000)
- 9) Hirota, Y., A. Matsumoto, M. Kubota, F. Watanabe, N. Kobayashi, M. Hasatani and M.Kanamori; “Characteristics of Heat Output of an Adsorption Heat Pump Aided with Pumping”, *J. Chem, Eng, Japan*, 40, 259-265(2007)

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)