平板状スーパー活性炭/伝熱板一体型吸着器で構成される エタノール系吸着ヒートポンプの冷熱生成特性[†]

金森道人^{1*}・葛山弘一^{1**}・渡辺藤雄¹・松田仁樹¹
架谷昌信¹・辻本聡一郎²・栢原義孝²

¹名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻, 464-01 名古屋市千種区不老町

²大阪ガス(株)研究開発部, 554 大阪市此花区西島6丁目19番9号

スーパー活性炭/エタノール系吸着ヒートポンプの高出力化を目的として、スーパー活性炭高混合吸着材モジュール(PSACモジュール)の高密度充填吸着器で構成される吸着ヒートポンプ(AHP)を提案、試作し、その実稼働実験における冷熱出力を指標とする本AHPの性能評価を行った。その結果、新たに提案したPSACモジュールを有するAHPは、従来と比較して大きな冷熱出力が得られることが明らかになった。

序

著者らは、これまでにスーパー活性炭(SAC)/エタノール系吸着ヒートポンプ(AHP)による氷点以下の冷熱生成を目的として、その吸着平衡に基づく稼働条件、冷熱生成量の検討(Watanabe *et al.*, 1993)、本系を組み込んだ充填層型AHPの吸着・再生サイクル試験による熱・物質移動評価(Watanabe *et al.*, 1996)、および高出力化を目的としたSACの平板型モジュール化吸着材の吸着器充填の検討(Kanamori *et al.*, 1997)を行ってきた。本報告では本AHPの一層の高出力化を達成させるために、前報の研究を一步進めて、スーパー活性炭高混合吸着材モジュール使用の高密度充填吸着器からなるAHPを新たに提案、試作し、その実稼働における冷熱出力を指標とする性能評価を行った。

1 実験

1.1 吸着材モジュール

本研究で使用した平板状スーパー活性炭を既報(Kanamori *et al.*, 1997)と区別するため、それぞれPSAC-1(既報)とPSAC-2(本報)と称する。吸着材(PSAC)のモジュール化による熱・物質移動促進の効果と高出力化の達成については既報で述べた通りであるが、PSAC-1モジュールは蒸気拡散スペース確保のため、平板と熱交換器伝熱面とが1枚毎に接着剤により接着されていた。本報では、吸着器成形の困難性の回避、耐久性に課題がある接着剤の不使用および吸着材-伝熱面間の伝熱抵抗の低減を目的として、以下に示す新しい吸着器(PSAC-2モジュール)を提案した。Fig. 1にPSAC-2モジュールの概略図を示す。PSAC-2①は40×100×1.4 mmの平板であり、片面に72個の突起②がある。この面側を重ね合わせることで蒸気拡散用スペースを確保することができる。また、既報の段階で困難であった粒状スーパー活性炭の高混合比成形が可能となり、PSAC-2は平均粒径 $R_A=20\text{ }\mu\text{m}$ の粒状スーパー活性炭(SAC)と繊維状活性炭(FAC)(い

ずれも大阪ガス(株)製)が4:1の割合で混合して成形されている。モジュールは2つのPSAC-2およびこれらを挟み込む銅製(厚さ0.2 mm)の伝熱促進板③で構成される。PSAC-1および2の吸着平衡の測定結果、および細孔構造特性値はFig. 2, Table 1に示す通りである。今回使用したPSAC-2はPSAC-1(SAC:FAC=2:3)と比較して比表面積が37%増加している。

1.2 実験装置

本実験で使用した試作AHP装置の構成は既報(Kanamori *et al.*, 1997)と同様である。吸着器内には、モジュール(Fig. 1)が銅製熱交換パイプに圧着させる形で70段(2列)装填されており、充填された吸着材は乾燥状態で0.859 kgである。吸着材部分の占める容積は $3.0\times 10^{-3}\text{ m}^3$ である。モジュールの2, 35, 69各段の長手方向に2箇所、計6点の熱電対が設置されており、吸着材の温度が測定される。

1.3 実験手法

AHPの運転は、金森ら(Kanamori *et al.*, 1997)と同様に行った。吸着・脱着器、蒸発・凝縮器の初期温度はそれぞれ温度 $T_{\text{ads},i}$, $T_{\text{eva},i}$ (吸着時)あるいは $T_{\text{des},i}$, $T_{\text{con},i}$ (再生時)に設定される。設定は両器の熱交換パイプを使用し、吸着・脱着器側に流量 $u_{\text{ads}}=7.6\times 10^{-7}\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ の水を、蒸発・凝縮器側に流量 $u_{\text{eva}}=8.8\times 10^{-7}\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ のエタノールをそれぞれ循環させて行った。諸温度条件における吸着および再生は、温度350 Kにて6時間以上の真空乾燥を施したPSAC-2を出発試料とした。

Table 2に吸着および再生実験の吸着器および蒸発・凝縮器の初期設定温度の条件を示す。表中 $\triangle q_e$ は、吸着、再生時の各温度条件、および吸着平衡値(Fig. 2)から算出されるエタノール蒸気の移動量を示す。E-1-A, Rの場合、吸着平衡値はそれぞれ吸着時 $q_{e,a}=0.64$ 、再生時 $q_{e,d}=0.22$ であり、吸着、再生のサイクルにおいて $0.42\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ のエタノールが移動する。温度条件は再生熱源を350 K、環境温度域の283~303 Kを中間温度熱源として想定し、吸着時の蒸発器温度を $T_{\text{eva},i}=273\sim 288\text{ K}$ とした。

3 結果および考察

3.1 吸着・再生サイクル

Fig. 3に吸着および再生の繰り返し過程における、吸着材の温度および吸着量 q の変化を示す。なお、35段の外側の測定点($z/Z=0.5$)を代表温度として表記した。実験条件はTable 2中E-3

[†] 1997年5月22日受理

化学工学会第29回秋季大会(京田辺, 1996年9月)にて発表

* 中部電力(株)電気利用技術研究所

** 東邦ガス(株)総合技術研究所

Fig. 1 Sketch of the PSAC module

Fig. 2 Adsorption equilibria of ethanol vapor on active carbons at 303 K

Fig. 3 Change of the representational temperature of the adsorbent (center of the adsorbent) and amount adsorbed in adsorption/regeneration cycle steps

-A および E-3-R である。Fig. 3 左図において、真空乾燥処理を行った後の1回目の吸着は $q=0$ から始まり、吸着開始後40分ではほぼ吸着平衡 $q_{e,a}$ に達しているとともに、吸着材は初期温度に戻っていることがわかる。この時の吸着量は $q_{exp,a}=0.612 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ であり平衡値 $q_{e,a}$ に対して98%以上となっている。Fig. 3 中央図の再生過程において、再生開始30分後に PSAC は初期温度の 350 K に戻り、脱着はほぼ完了している。この時の残存吸着量は脱着平衡値 $q_{e,d}$ に対して、およそ7%多い $q_{exp,d}=0.171 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ となっている。Fig. 3 右図の2回目の吸着では、1回目と比較して吸着材の温度上昇幅がわずかに低い様子が認められる。一方、吸着量は吸着開始後40分で1回目とほぼ同じ値の $q_{exp,a}=0.605 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ に達している。本条件において吸着・再生サイクル時の平衡移動量 Δq_e に対する実験値 $\Delta q_{exp}/\Delta q_e$ は、およそ0.9となり、40分以内のサイクルで平衡値の9割以上のエタノールを操作できることがわかった。各条件における $q_{exp,a}$, $q_{exp,d}$, $\Delta q_{exp}/\Delta q_e$ の

Fig. 4 Cold heat output during the adsorption step

Table 1 Physical properties of adsorbents

Adsorbent	$S_A \times 10^3 [\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}]$	$V_P \times 10^{-3} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
PSAC-1	1,700	0.91
PSAC-2	2,335	1.13

Table 2 Experimental condition sets and theoretical adsorption values

E: Experiment A: Adsorption R: Regeneration

Code	Adsorption $T_{ads,i}/T_{evap,i} [\text{K}]$	Code	Regeneration $T_{des,i}/T_{con,i} [\text{K}]$	Δq_e [kg/kg]
E-1-A	298/288	E-1-R	350/298	0.42
E-2-A	304/283	E-2-R	350/304	0.34
E-3-A	293/273	E-3-R	350/293	0.48

Table 3 Experimental results of the adsorption/regeneration cycle step

PSAC-2 Code	$q_{exp,a}$ [kg/kg]	$q_{exp,d}$ [kg/kg]	Δq_{exp} [kg/kg]	$\Delta q_{exp}/\Delta q_e$ [—]	q_{ads} [min]	q_{reg} [min]
E-1-A&R	0.639	0.260	0.379	0.902	23	20
E-2-A&R	0.634	0.311	0.323	0.950	32	25
E-3-A&R	0.605	0.171	0.434	0.904	29	22
PSAC-1	0.459	0.223	0.226	0.837	39	40

値、吸着量が平衡値 $q_{e,a}$ の90%以上 ($q/q_{e,a} \geq 0.9$) となるまでに要する時間 θ_{ads} 、および再生時の吸着量と脱着平衡値の差が $q_{e,d}$ の10%以下 ($q/q_{e,d} \leq 1.1$) となるまでに要する時間 θ_{reg} を、既報 (Kanamori *et al.*, 1997) の結果と併せて一括して Table 3 に示す。既報の結果は E-2-A&R と同じ温度条件で得られたものである。本表から、既報の PSAC-1 と比較し吸着能の向上による吸着量 $q_{exp,a}$ 、および Δq_{exp} の増大が認められる。また、 $\Delta q_{exp}/\Delta q_e$ は既報の約84%に対し、今回の実験ではいずれも90%以上の値を達成している。 Δq_{exp} の増大に関わらず θ_{ads} , θ_{reg} の値は減少している。このことは本報で提案した PSAC-2 モジュールの物質移動促進、ならびに伝熱促進の相乗効果によるものと思われる。

3.2 冷熱出力特性

蒸発温度 $T_{evap,i}=273 \text{ K}$ の場合の蒸発速度 $dq/d\theta [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$ にエタノールの蒸発潜熱 ($841 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) を乗じた冷熱出力 Q を Fig. 4 に示す。図中○は PSAC-1 (Kanamori *et al.*, 1997) の、□は PSAC-2 の、△は充填層型 (Watanabe *et al.*, 1996) の結果である。本報で提案する PSAC-2 モジュールを有する吸着器は、0.5~1.0 $\text{kW} \cdot \text{kg}^{-1}$ 程度の出力を発生している。本 AHP の運転時に重要となる吸着開始10分間の冷熱出力は PSAC-1 および充填層型 AHP と比較して、蒸発温度が低いにも関わらず、大きく上がっていることが確認でき、氷点以下の冷熱生成機器として適用可

能であることが示唆される。

結 言

スーパー活性炭/エタノール系 AHP のさらなる高出力化を目的として、平板状スーパー活性炭/伝熱板一体型コンパクトモジュールを組み込んだ吸着器による冷熱出熱実験を行い、既往の報告と比較検討し結果、吸着材単位重量あたり操作可能なアルコール量が増大すること、および吸着・再生サイクルの時間短縮が達成され、冷熱出力が増大することが示唆された。

Literature cited

Kanamori, M., M. Hiramatsu, F. Watanabe, H. Matsuda and M.

Hasatani ; "Production of Cold Heat Energy by Alcohol/Activated Carbon Adsorption Heat Pump with a Disk-Module-Type Adsorber," *J. of Chem. Eng. of Japan*, **30**, 434-439 (1997)

Watanabe, F., J. Kozuka, M. Kumita and M. Hasatani ; "Adsorption Equilibrium of Silica Gel, Active Carbon/Water Vapour, Ethanol and Applicability of Combination of Those Adsorbent/Adsorbate to Adsorption Heat Pump," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **19**, 1165-1170 (1993)

Watanabe, F., J. Kozuka, M. Ito and M. Hasatani ; "Heat and Mass Transfer in Super Active Carbon/Ethanol Adsorption Heat Pump with Packed Bed Type Adsorber," *ibid.*, **22**, 722-727 (1996)

Cold Heat Generation Characteristics of Ethanol Adsorption Heat Pump Composed of Plate Super Activated Carbon and Heat Transfer Sheet

MICHITO KANAMORI^{1*}, KOICHI KATSURAYAMA^{1**}, FUJIO WATANABE¹, HITOKI MATSUDA¹,
MASANOBU HASATANI¹, SOUICHIRO TSUJIMOTO² and YOSHITAKA KAYAHARA²

¹Department of Energy Engineering & Science, Nagoya University, Nagoya 464-01

²Osaka, Gas Co., Ltd., Osaka 554

Key words: adsorption, heat pump, heat transfer, mass transfer, module, refrigerator.

For promoting the cold heat generating power of a super activated carbon/ethanol adsorption heat pump, a trial adsorption heat pump (AHP) composed of densely adsorber with higher ratio of super activated carbon is proposed, and the performance of this AHP with regards to cold heat generating is evaluated power is evaluated. AHP with a newly proposed PSAC module has higher cold heat generating power than that of previous ones.

* Chube Electric Power Co. Inc.

** Toho Gas Co. LTD.