

天然メソポーラス材料を用いた吸着式淡水化に関する研究

(その1) 小型実験装置を用いた淡水化試験

Study on Adsorption Desalination using Natural Mesoporous Material

1st Report: Experiments of Desalination using Small Experimental Apparatus

○井澤 美つ輝 (北海道大学)

賀 方 (北海道大学)

正 会 員 長 野 克 則 (北海道大学)

正 会 員 外 川 純 也 (日本熱源システム)

Mitsuki IZAWA*¹ Fang HE*¹ Katsunori NAGANO*¹ Junya TOGAWA*²*¹ Hokkaido University *² Nihon Netsugen System Co. Ltd.

This paper describes the performance of a laboratory scale adsorption desalination (AD) whose thermal capacity is 100W using natural mesoporous material called Wakkanai siliceous shale (WSS) impregnated with chloride substances as the adsorbent. This has been developed for the low-cost adsorption heat pump in our laboratory. The performance ratio (PR) and the specific daily water production (SDWP) were 0.41 and 25.0 m³/(tonne-day), respectively, at the adsorption/desorption cycle time of 5 minutes. As the cooling capacity recovery process was introduced, the PR and SDWP were improved to 0.49 and 37.0 m³/(tonne-day), respectively, at the same adsorption/desorption cycle time.

はじめに

人口増加, 一人当たりの水使用量の増加, 気候変動などにより, 水資源の少ない乾燥地域では生活用水の不足が深刻化している¹⁾。それらの地域のうち高所得国や先進国では不足分の生活用水を補充するため淡水化が一般的に行われている²⁾。しかし, 淡水化には化石エネルギーを多消費するという課題があり, 近年再生可能エネルギー熱や廃熱を利用した低炭素型淡水化技術が多く研究されている。その中の一つに吸着式淡水化技術 (AD) がある³⁾。本研究室では塩化物担持稚内珪質頁岩 (WSS) を吸着材に応用した吸着式ヒートポンプの研究を進めてきたが⁴⁾⁵⁾、本研究では WSS 吸着材を用いた小型吸着式淡水化試験装置における淡水化性能の評価を行った。特に, 冷熱利用を伴う・伴わない場合を想定した冷熱回収方法の違いによる水生成量の変化と最適な運用条件の検討を行った。

1. 吸着式淡水化 (AD) の概要

AD サイクルの概要図を図-1 に示す。AD は固体吸着材を充填した熱交換器を入れた吸着器と, 海水等の塩水から水蒸気を蒸発させる蒸発器及び淡水を生成する凝縮器から構成される。各容器はバルブを介して連結されており, 内部は高真空に保たれている。吸着式淡水化の動作は吸着工程と再生 (脱着) 工程に分けられる。吸着工程では蒸発器内に流入してくる海水等の塩水が冷水等の熱交換媒体から熱を奪うことで蒸発し, 蒸気は圧力差により吸着器へ移動して固体吸着材に吸着する。温度が下がった熱交換媒体は冷房などに用いることができる。一方, 再生

工程では太陽熱や廃熱等の熱源を用いて吸着材充填熱交換器内の固体吸着材を加熱させ水蒸気を脱着させる。脱着した水蒸気は圧力差を駆動力として凝縮器へ移動し凝縮することで水が生成される。また, 蒸発器の海水は蒸発するにつれ減少し, 塩分濃度が上昇するため, 一定のサイクルで海水の補充と濃縮された塩水の排出を行う。

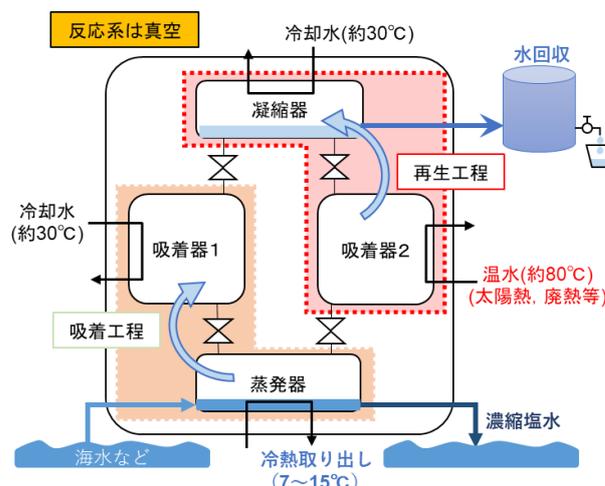


図-1 AD サイクルの概要図

2. 実験装置と評価方法

2.1 実験装置

本研究で用いた小型実験装置の模式図を図-2 に示す。装置は2つの吸着器と蒸発器, 凝縮器から構成されており, 図-2 では省略しているが各容器は真空ポンプに繋がっている。2つの吸着器の中にはWSSに質量分率で30%

の塩化カルシウムを担持させた物 (WSS+30wt%CaCl₂) を吸着材として充填した熱交換器 (140×110×12mm) がそれぞれ 1 枚ずつ装填されている。蒸発器にはアルミニウム製コルゲートフィン熱交換器が、凝縮器にはチューブ型の熱交換器がそれぞれ設置されている (図-3)。WSS 吸着材充填熱交換器には流路を切り替える電磁弁とその先に循環恒温槽がつながっており、吸着用冷却水と再生用温水の切り替えが瞬時に行えるようになっている。蒸発器及び凝縮器の熱交換機はそれぞれ循環恒温槽につながっている。また、吸着サイクル毎に蒸発器から減少する分の水を供給し、常に熱交換器が半分浸る状態にする。各試験容器の圧力値は圧力計で、各熱交換器の入口出口温度を測温抵抗体で、流量を電磁流量計で測定し、それぞれの値をロガーで 1 秒ごとに記録した。

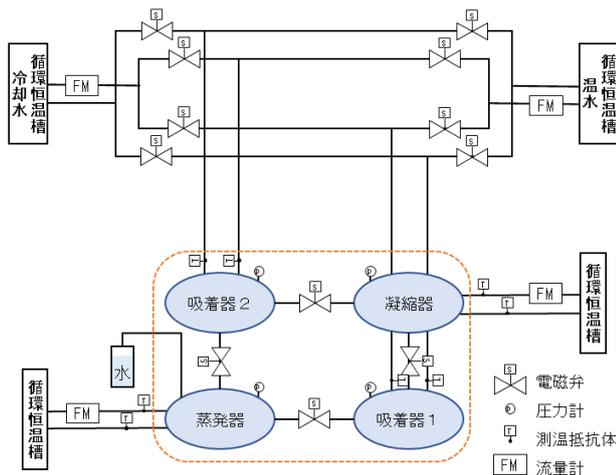


図-2 小型実験装置の模式図



図-3 熱交換器 (左: 吸着器, 中央: 蒸発器, 右: 凝縮器)

以下に、試験方法の一連の流れを示す。

・試験準備

- 1) 真空ポンプで各容器を、1 kPa 以下まで減圧する。
- 2) 試験開始前に 80 °C の温水を両吸着材充填熱交換器に送水し、十分に再生 (脱着) させる。

・吸脱着試験開始

- 3) 予冷・予熱工程 吸着器と蒸発器及び凝縮器を繋ぐバルブを閉じた状態で、吸着器 1 の吸着材充填熱交換器へ 30 °C の冷却水を、吸着器 2 へ 80 °C の温水を供給する。
- 4) 吸着・再生 (脱着) 工程 吸着器 1 と蒸発器及び吸着器 2 と凝縮器を繋ぐバルブを開放する。蒸発器内の水が

蒸発し吸着器 1 へ移動し吸着される。吸着器 2 で脱着された水蒸気が凝縮器で凝縮され水が生成される。

5) 予熱・予冷工程 再び吸着器と蒸発器及び凝縮器を繋ぐバルブを閉じた状態で、今度は吸着器 1 へ 80 °C の温水を、吸着器 2 へ 30 °C の冷却水を供給する。

6) 再生 (脱着)・吸着工程 吸着器 1 と凝縮器及び吸着器 2 と蒸発器を繋ぐバルブを開放する。蒸発器内の水が蒸発し吸着器 2 へ移動し吸着される。吸着器 1 で脱着された水蒸気が凝縮器で凝縮され水が生成される。

上記の 3) ~6) にあたる吸脱着工程を合わせた一連の流れを 1 サイクルとする。また、便宜上予冷・予熱工程を除いた吸着・脱着工程それぞれを半サイクルとする。

2.2 評価指標

評価指標には再生熱量に対する凝縮熱量の割合 (PR : performance ratio), 1 日の吸着材 1 トン当たりの水生成量 (SDWP : specific daily water production) を用いた。

$$PR = \int_0^{t_{\text{cycle}}} \frac{\dot{m}_{\text{cw}} h_{\text{fg}}(T_{\text{cond}})}{Q_{\text{des}}} dt \quad (1)$$

$$SDWP = N \int_0^{t_{\text{cycle}}} \frac{Q_{\text{cond}}}{h_{\text{fg}}(T_{\text{cond}}) M_{\text{ads}}} dt \quad (2)$$

$$Q_{\text{des}} = \dot{V}_{\text{hot}} \rho_w c_p (T_{\text{hot,in}} - T_{\text{hot,out}}) \quad (3)$$

$$Q_{\text{cond}} = \dot{V}_{\text{cond}} \rho_w c_p (T_{\text{cond,out}} - T_{\text{cond,in}}) \quad (4)$$

(1)式では、 $\dot{m}_{\text{cw}} h_{\text{fg}}(T_{\text{cond}}) = Q_{\text{cond}}$ から PR を求めた。

3. 基本性能試験

3.1 試験条件

冷熱を外部に取出し冷房等への利用を伴う場合を基本性能とする。小型実験装置における WSS 吸着材を用いた吸着式淡水化の基本性能を確認するため、表-1 に示す条件下で試験を行った。供給する水は蒸留水とした。

表-1 基本性能試験の条件

$t_{\text{half cycle}}$ [min]	3~7	t_{pre} [sec]	15
$T_{\text{evap,in}}$ [°C]	20	\dot{V}_{evap} [L/min]	0.28
$T_{\text{cond,in}}$ [°C]	30	\dot{V}_{cond} [L/min]	0.28
$T_{\text{cooling,in}}$ [°C]	30	\dot{V}_{cooling} [L/min]	1.0
$T_{\text{hot,in}}$ [°C]	80	\dot{V}_{hot} [L/min]	1.0

3.2 試験結果

半サイクル時間毎の PR 及び SDWP を図-4 に示す。半サイクル時間が長くなるほど PR は上昇し、SDWP は低減した。これはサイクル時間が長くなるほど再生熱に対する凝縮が十分に行われる一方、時間が進むにつれ凝縮は起こりにくくなり、結果的に平均時間当たりの凝縮熱が低減するためである。

また、吸着剤として多用されるシリカゲルを用いた吸着式淡水化の結果⁶⁾(PR:0.5~0.7, SDWP:6~9 m³/(tonne·day))と比較すると、PRは若干低いもののSDWPは3倍前後と非常に高い値となった。故にWSS吸着材はSDWPの点で優位性を持つことが示された。この特徴はPR, SDWPのバランスが取れる適当なサイクル時間がシリカゲルに比べ半分程度であることに起因すると考えられる。

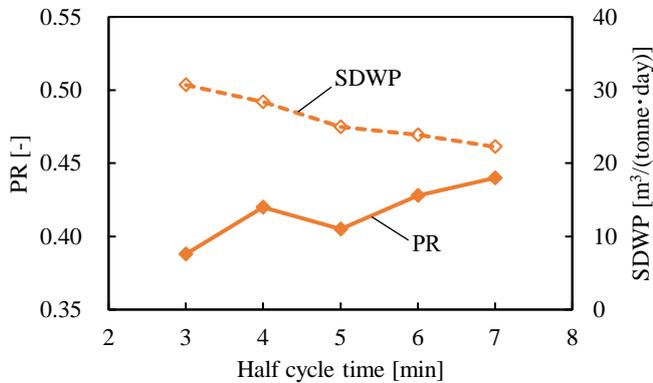


図-4 基本性能試験の半サイクル時間毎のPR・SDWP

4. 冷熱回収の検討

4.1 試験方法

基本性能試験では、蒸発器で得られる冷熱を外部に取り出し冷房等へ利用することを想定していた。本章では冷熱を内部回収すること(冷熱回収)により、水生成量の増加及び冷却塔の削減による装置のコンパクト化が可能であるとの予測から、冷熱回収方法の検討を行った。

冷熱回収を伴う方法として、蒸発器から得られる冷水を凝縮器へ流す方法(冷熱回収①, case 1-1)と、凝縮器と吸着器へ流す方法(冷熱回収②, case 1-2)の2通りを行った。図-5、図-6に各冷熱回収を伴う実験装置の模式図を、それに伴う試験条件を表-2、表-3に示す。ただし、現在使用している装置の構造上、冷熱回収②を正確に再現する事が難しいため、装置の構造は図-5で示した状態のまま冷却水入口温度を凝縮器出口温度の平均である20℃に設定し試験を行った。

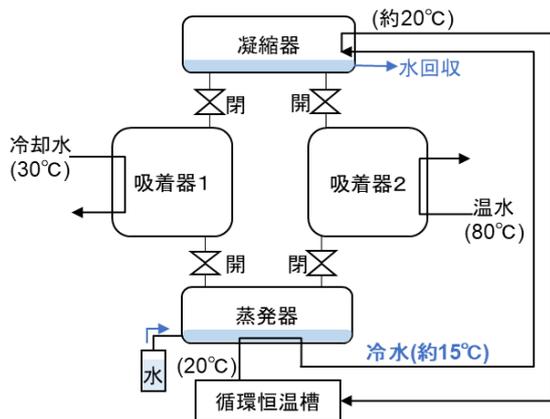


図-5 冷熱回収①を伴う実験装置の模式図

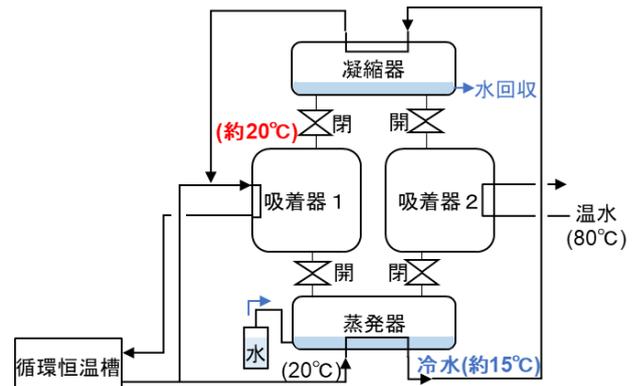


図-6 冷熱回収②を伴う実験装置の模式図

表-2 冷熱回収①を伴う場合の試験条件

$t_{\text{half cycle}}$ [min]	3~7	t_{pre} [sec]	15
$T_{\text{evap,in}}$ [°C]	20	\dot{V}_{evap} [L/min]	0.28
$T_{\text{cond,in}}$ [°C]	$T_{\text{evap,out}}$	\dot{V}_{cond} [L/min]	\dot{V}_{evap}
$T_{\text{cooling,in}}$ [°C]	30	\dot{V}_{cooling} [L/min]	1.0
$T_{\text{hot,in}}$ [°C]	80	\dot{V}_{hot} [L/min]	1.0

表-3 冷熱回収②を伴う場合の試験条件

$t_{\text{half cycle}}$ [min]	3~7	t_{pre} [sec]	15
$T_{\text{evap,in}}$ [°C]	20	\dot{V}_{evap} [L/min]	0.28
$T_{\text{cond,in}}$ [°C]	$T_{\text{evap,out}}$	\dot{V}_{cond} [L/min]	\dot{V}_{evap}
$T_{\text{cooling,in}}$ [°C]	20	\dot{V}_{cooling} [L/min]	1.0
$T_{\text{hot,in}}$ [°C]	80	\dot{V}_{hot} [L/min]	1.0

4.2 試験結果

基本性能(冷熱回収なし, case 0)も含め、冷熱回収方法による半サイクル毎のPR及びSDWPを比較したものを図-7に示す。全ての時間帯において冷熱回収を伴うことでPR, SDWPが向上した。特に、冷熱回収②の性能が最も高くなった。これは冷熱回収を伴うことで凝縮温度が約15℃, 吸着温度が約20℃まで低下し、吸脱着工程を通して得られる水分量(有効吸着量)が増加したためである。故に、水生成量を増加させる手段として冷熱回収は有効であることがわかった。

また、冷熱回収を伴う場合、冷熱回収①, ②ともにPRの上昇が5分以降小さいことから、両指標から判断すると適当な半サイクル時間は5分程度であるといえる。この結果を踏まえ、半サイクル時間5分における性能比較を基本性能(冷熱回収なし)も含め行った。各冷熱回収方法による凝縮熱の時間変化を比較したものを図-8に示す。図より、冷熱回収を伴うことで一気に凝縮が進むとともに、サイクル後半には凝縮熱がほぼ0Wに達していることから、十分な凝縮が行われていることがわかる。また、半サイクル時間5分の時、基本性能として得られたPRとSDWPはそれぞれ0.41, 25.0 m³/(tonne·day)であるが、冷熱回収①を伴う場合ではPR 0.46, SDWP 28.8 m³/(tonne·

day), 冷熱回収②を伴う場合では PR 0.49, SDWP 37.0 m³/(tonne·day)であった。冷熱回収②を伴うことで、基本性能から PR は約 1.2 倍, SDWP は約 1.5 倍上昇した。このことから、冷熱回収は特に時間・吸着材当たりの水生成量に大きな影響を与えると考えられる。

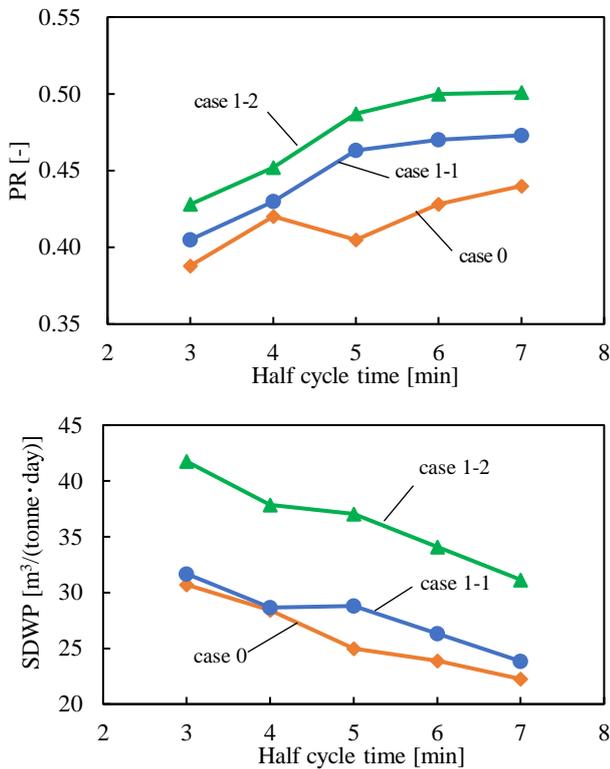


図7 冷熱回収方法による半サイクル時間毎の PR・SDWP の比較

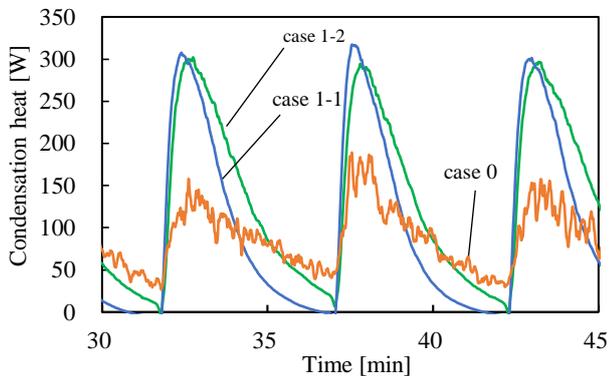


図8 冷熱回収方法による凝縮熱時間変化の比較

まとめ

WSS 吸着材を用いた吸着式淡水化の基本性能として、半サイクル時間 5 分の時, PR 0.41, SDWP 25.0 m³/(tonne·day)が得られた。既往の研究に対して PR は若干低かったものの, SDWP では優位性を持つことが示された。

また、冷熱回収を行うことで水生成量の上昇が確認できた。特に蒸発器で得られる冷熱を凝縮器と吸着器の冷

却水として内部回収することで、同じ半サイクル時間 5 分では PR 0.49, SDWP 37.0 m³/(tonne·day)が得られた。これは基本性能の PR, SDWP と比べてそれぞれ約 1.2 倍, 約 1.5 倍の値であった。

今後は、装置のスケールアップによる熱損失の削減や熱回収を取り入れ、熱効率を高めて PR の上昇を目指し研究を進めていく予定である。

記号一覧

c_p	定圧比熱 [J/(kg·K)]	T	温度 [K]
M	質量 [kg]	t	時間 [s]
\dot{m}	質量流量 [kg/s]	ρ	密度 [kg/m ³]
Q	熱出力 [W]	\dot{V}	体積流量 [m ³ /s]
$h_{fg}(T)$	温度 T における相変化熱 [J/kg]		
N	一日当たりの全サイクル数 [-]		

添え字

ads	吸着材	half	半分
cond	凝縮器	hot	温水
cooling	冷却水	in	入口
cw	凝縮した水	out	出口
cycle	サイクル	pre	予冷・予熱工程
des	再生工程	w	水
evap	蒸発器		

参考文献

- 1) 国土交通省：水資源,
http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000019.html
- 2) Edward Jones, Manzoor Qadir, Michelle T.H. van Vliet, Vladimir Smakhtin, Seong-mu Kang: The state of desalination and brine production: A global outlook, Science of the Total Environment, 657, pp.1343-1356 (2019)
- 3) Kim Choon Ng, Kyaw Thu, Youngdeuk Kim, Anutosh Chakraborty, Gary Amy: Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method, Desalination, 308, pp.161-179 (2013)
- 4) 外川純也, 黒川麻美, 小牧あゆみ, 井上真由, 中村真人, 長野克則, 黒石広明, 原田克彦, 空衛学会・北海道支部第51回学術講演要旨集(2017)
- 5) 外川純也, 森田敦, 中村真人, 長野克則, 松本拓也, 大前青也, 黒石広明, 原田克彦, 空衛学会・北海道支部第52回学術講演要旨集(2018)
- 6) Kyaw Thu, Kim Choon Ng, Bidyut B. Saha, Anutosh Chakraborty, Shigeru Koyama: Operational strategy of adsorption desalination systems—International Journal of Heat and Mass Transfer 52, pp.1811-1816 (2009)