

吸着材蓄熱の蓄放熱運転の計算モデル

鎌田美志・川上理亮・谷野正幸

Calculation Model for Charging and Discharging Operation of an Adsorption Thermal Storage System

Haruyuki Kamata・Yoshiaki Kawakami・Masayuki Tanino

我々は、低温排熱が利用できるオープンサイクル形式の吸着材蓄熱システムを開発してきた。実験的に、蓄熱槽の吸着材充填層の蓄放熱特性を検討した。また、定置型蓄熱システムとオフライン熱輸送システムの実証試験を実施した。さらに、小型試験装置での蓄放熱の試験結果を基に吸着材蓄熱槽の数値解析モデルを開発し、実証設備での蓄放熱運転データによって検証しながら、設計ツールを完成させた。本報では、数値解析モデル、各種の吸着材の吸着等温線と吸着熱、数値解析モデルの計算例、および設計ツールについて説明する。このような吸着材蓄熱の設計ツールを活用した熱マネジメントによって、排熱利用や未利用熱利用を促進させ、喫緊の課題である二酸化炭素の排出量の削減に貢献したい。

1. はじめに

我々は、石原産業(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、森松工業(株)、日野自動車(株)、(国研)産業技術総合研究所、大塚セラミックス(株)とともに、産業技術総合研究所が2008年に開発した吸着材「ハスクレイ」^[注 1]をベースに、2015年度から(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業において、100°C程度の低温廃熱が利用可能な吸着材蓄熱システムを提案し、実用化開発^[注 2]と実証開発^[注 3]を行ってきた¹⁻²⁶⁾。実用化開発において、小型試験装置での蓄放熱運転の実験結果を基に数値解析モデル^{2,9,15)}を開発し、熱利用性能の現地評価試験^{10,12,22)}によって評価した。さらには、実証開発^{14,16-20,23-26)}において、設計ツールとして開発して検証してきた。

本報では、数値解析モデルの概要、各種の吸着材の吸着等温線と吸着熱の概要、数値解析モデルの計算例、および設計・提案ツールとその適用について説明する。

2. 数値解析モデル

本数値解析モデルは、吸着材蓄熱システムの蓄熱槽の簡便な設計ツールや提案ツールを開発することを目的とし、**図 1**の左側図のような蓄熱槽内の吸着材充填部を解析対象にした。蓄熱運転では約100°Cの高温空気が吸着材充填部に供給され、蓄熱材の含水率が低下し、約40°C以下の低温の高湿空気が排出される。放熱運転では湿潤空気が吸着材充填部に供給され、蓄熱材に水分が吸着し、吸着熱によって高温の低湿空気が排出される。

本数値解析モデルは**図 1**の左側図の吸着材充填部を、右側図のように吸着材の固相と空気の気相の二相に分離した、いわゆる集中定数モデル(lumped parameter model)である。ここでは、円筒座標系での半径方向の熱・物質移動を考慮せずに、**図 1**の右側図での軸方向(z 方向)の通風方向に対する一次元モデルとした。図では z 方向で、 n 個に分割している。

まず、以下を仮定した。

- 1) 空気中の吸着質は水蒸気のみを対象とする。
- 2) 吸着材内部での温度と水分の分布は考慮せず、各々は吸着材内部で一様とする。
- 3) 蓄熱槽での通風の圧力損失は極めて小さく、空気の熱物性値には圧力依存性を考慮せず、温度依存性のみを考える。

吸着材蓄熱システムの基本設計において、蓄熱槽での通風の圧力損失^[注4]は極めて小さいため、上記3)のように空気の熱物性値に圧力依存性を考えない。

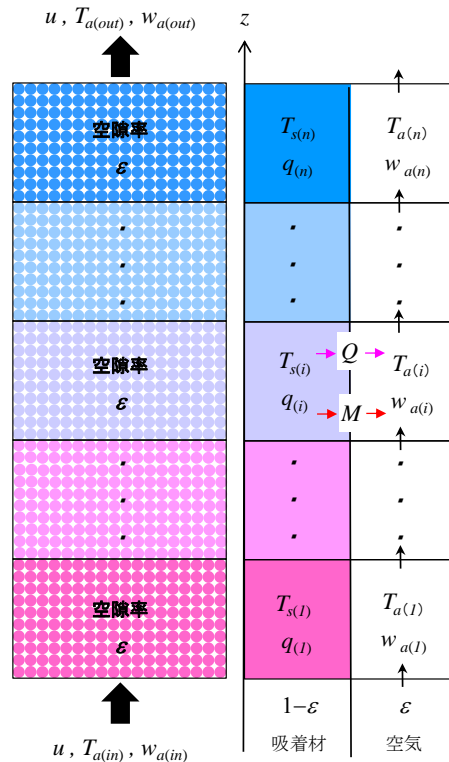


図1 数値解析モデルの概要(左側の吸着材充填部を右側の2相に分離)^{2,9,15)}

まず、図1の右側図の気相(空気)の物質収支式(空気中の水分の質量保存式)²⁷⁾は下記の式(1)である。

$$\frac{\partial w_a}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w_a}{\partial z^2} - \dot{m}_a \frac{\partial w_a}{\partial z} - M(1 - w_a) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、基本設計の空塔速度 u は 0.5 m/s 程度であり、充填高さ L が 300 mm で空隙率 ϵ が 0.5 程度の吸着材充填部の通過時間は約 0.3 s と極小であるため、式(1)の左辺の非定常項(時間項)は考えない。また、一般に対流項に比べて拡散項は小さく、本解析モデルの目的が設計ツールの開発であるため、ここで式(1)の右辺の第一項の拡散項は省略する。その結果、気相での物質収支式としては、式(1)の右辺の第二項を左辺に移動して、下記の式(2)を得る。

$$\dot{m}_a \frac{dw_a}{dz} = -M(1 - w_a) \quad \dots\dots\dots(2)$$

また、**図 1** の右側図の気相（空気）の熱収支式^{27,28)}は下記の式(3)である。

$$\rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = \lambda_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} - \dot{m}_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial z} - Q - C_v M (T_s - T_a) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、上記の物質収支と同様に 式(3)の左辺の非定常項（時間項）は考えない。また、一般に対流項や発生項に比べて伝導項は小さいので、ここで式(3)の右辺の第一項の伝導項は省略する。その結果、気相での熱収支式としては、式(3)の右辺の第二項を左辺に移動して、下記の式(4)を得る。

$$\dot{m}_a C_a \frac{dT_a}{dz} = -Q - C_v M (T_s - T_a) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 M は固相と気相の間での体積あたりの水蒸気移動量（水蒸気移動速度）であり、 Q は固相と気相の間での体積あたりの熱移動量（熱移動速度）である。

つぎに、**図 1** の右側図の固相（吸着材）での物質収支式（吸着材中の水蒸気の質量保存式）^{27,28)}は下記の式(5)である。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + M \quad \dots\dots\dots(5)$$

同様に、式(5)の右辺の第一項の拡散項を省略し、固相（吸着材）での物質収支式としては、下記の式(6)を得る。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{dq}{dt} = M \quad \dots\dots\dots(6)$$

また、固相（吸着材）での熱収支式^{27,28)}は下記の式(7)である。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + H_A M + Q \quad \dots\dots\dots(7)$$

同様に、式(7)の右辺第1項の拡散項を省略し、固相での熱収支式として下記の式(8)を得る。

$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{dT_s}{dt} = H_A M + Q \quad \dots\dots\dots(8)$$

本数値解析モデルにおいて、固相と気相の間での物質の移動速度 M と固相と気相の間での熱の移動速度 Q を見積もることが重要である。

この物質移動速度 M は、下記の式(9)の構成方程式で示される。ここで、吸着材表面の水蒸気濃度は平衡状態とし、吸着材の含水率と吸着等温線^{7,21)}から、下記の式(9)での表面の水蒸気質量分率 w_s を算出することにした。ここでの M の駆動力は水蒸気質量分率の差分である。

$$M = h_m a_s (w_a - w_s) \quad \dots\dots\dots(9)$$

また、熱移動速度 Q は下記の式 (10) で示される。ここでの Q の駆動力は温度差である。

$$Q = ha_s(T_a - T_s) \quad \dots\dots\dots(10)$$

この式 (10) の熱伝達率 h には、下記の式(11)と式(12)の宮内の式²⁹⁾を採用した。

$$Nu = 1.3 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{C_a \mu}{\lambda_a}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{at } \frac{Re}{\varepsilon} \leq 7.5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$Nu = 0.92 \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{C_a \mu}{\lambda_a}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{at } \frac{Re}{\varepsilon} > 7.5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \quad \dots\dots\dots(12)$$

これらの式(11)と式(12)で計算される Nu 数より h を定めた。また、ルイス数を 1 として、物質移動係数 h_m も同様に定めた。

参考文献³⁰⁾によると、充填層の粒子・流体間の境膜物質移動係数や熱移動係数は、設計上の大切な基礎数値とされ、多くの研究がなされて相関式が提案されているが、相関式が研究者によって異なっており、相関の適用範囲に不明確さの残る傾向が散見される。宮内は多くの流動層に関する実測値の相関と物質移動機構の考察から、充填層の粒子・流体間の境膜物質移動や熱移動の相関図と相関式を整理した²⁷⁾。

以上のような式(2)と式(4)の気相の収支式(保存則)と、式(6)と式(8)の固相の収支式(保存則)に基づき、式(9)と式(10)の構成方程式から、吸着材の含水率と温度の軸方向の分布の時間変化を計算し、吸着材を通過した空気中の水蒸気濃度(湿度)と温度の軸方向の分布を計算することができる。

なお、**図 1** と式(1)～式(12)の数式の主な記号の定義を、**表 1** に纏めて示す。吸着材の比熱や密度の熱物性値は後述する。初期条件とともに、流入空気の温湿度と流量は与条件である。

表 1 主な記号の定義^{2,9,15)}

a_s	単位体積あたりの吸着材の表面積 [m ² m ⁻³]	q	含水率 [kg kg ⁻¹]
C	比熱 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Re :	レイノルズ数 (= dup/μ) [-]
D	拡散係数 [m ² s ⁻¹]	T	温度 [K]
H_A	吸着熱 [J kg ⁻¹]	t	時間 [s]
h	熱伝達係数 [W m ⁻² K ⁻¹]	u	空塔速度 [m s ⁻¹]
h_m	物質移動係数 [kg m ⁻² s ⁻¹]	w	水蒸気質量分率 [-]
L	充填高さ [m]	λ	熱伝導率 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
M	単位体積あたりの物質移動量 [kg m ⁻³ s ⁻¹]	μ	粘度 [μPa S]
\dot{m}	質量流束 [kg m ⁻² s ⁻¹]	ε	空隙率 [-]
Nu	ヌッセルト数 (= hd/λ) [-]	ρ	密度 [kg m ⁻³]
Q	単位体積あたりの熱移動量 [W m ⁻³]		

添え字 a : 空気, s : 吸着材-粒子表面, v : 水蒸気

3. 吸着等温線と吸着熱

前述のように本数値解析モデルにおいて、重要な物質移動速度 M を定める式(9)での表面の水蒸気質量分率 w_s を算出するには、吸着材の水分の吸着等温線が必要である。一定温度における、吸着質の濃度および圧力と吸着量の関係を吸着等温線と呼び、吸着材の吸脱着性能を把握する上で重要である。吸着等温線は典型的には**図 2**のように、I型、II型、III型、IV型、V型、およびVI型の、六種類に分類される^{31,32)}。

図 3 に種々の吸着材の吸着等温線を示す^{8,21)}。一般に吸着等温線の温度依存性は小さく、ここでは室温・大気圧の条件下で、ハスクレイ、シリカゲル、高分子収着剤、およびゼオライトについて、相対湿度と吸着

量の関係が示されている。図2と図3のように、ゼオライトは典型的なI型の吸着等温線であり、シリカゲルはIV型の吸着等温線である。また、近年、低温再生型デシカントロータのために研究開発されてきた、高分子収着剤とハスクレイは、図3のように相対湿度の増加とともに吸着量は単調に増加するため、広範な湿度領域で吸脱着が行われる特性を有する吸着材であることがわかる。

表2にゼオライトとハスクレイの吸着熱や、密度、比熱などの熱物性値を示す²¹⁾。本数値解析モデルの吸着熱は、含水率に依らず一定とした。

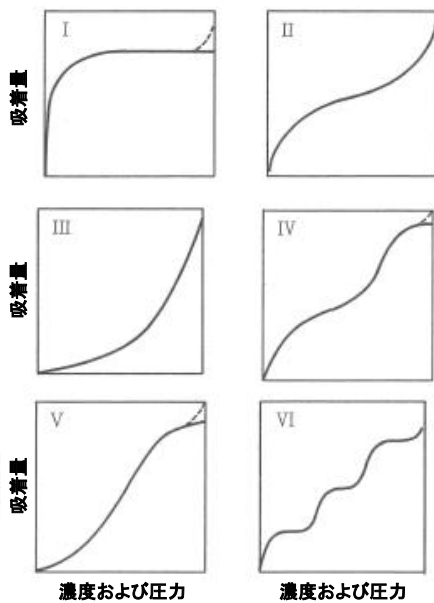


図2 吸着等温線の分類^{31,32)}

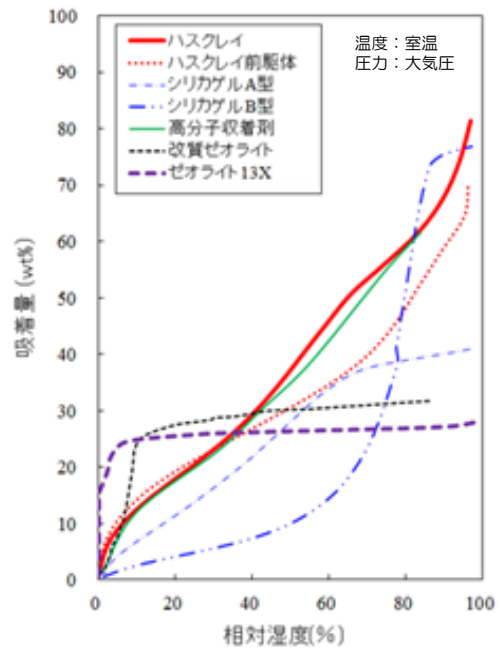


図3 種々の吸着材の吸着等温線^{8,21)}

表2 吸着熱

	ゼオライト	ハスクレイ
吸着熱 H_A	3,340 kJ/kg	3,000 kJ/kg
密度 ρ_s	1,043 kg/m ³	833 kg/m ³
比熱 C_s	1.05 kJ/kg K	1.05 kJ/kg K

4. 数値解析モデルの計算例

ここでは、本数値解析モデルの妥当性を確認するために、ハスクレイとゼオライトの二種類の吸着材の場合について、蓄熱と放熱の各々の運転での計算結果を実験結果と比較する。実験は10kgの吸着材が充填できる蓄熱槽などで構成される、小型の試験装置(10kg級)^[注5]で行ったが、詳細は引用文献を参照されたい^{2,9,15)}。

4.1 ハスクレイの計算例^{2,9,15)}

図4にはハスクレイ造粒体を用いた場合の、蓄放熱運転の計算結果を実験結果と比較して示す。蓄熱槽の充填高さは300mmであり、供給空気流量は250 NL/min(空塔速度は約0.48 m/s)である。

図4の(a)の蓄熱運転では、上図のように供給空気の入口温度 T_{in} は約110°C一定に加熱され、供給空気の顕熱量が吸着材の水分の脱着の反応熱として奪われたため、運転開始直後から約0.7時間の間、空気の出口温度 T_{out} の実験値と計算値は44°C一定であった。また、下図のように、空気の出口湿度 H_{out} の実験値と

計算値は約 60%RH 以上の高い値で維持されていた。この運転開始直後から約 0.7 時間の間に、供給空気によって吸着材の水分の脱着が進捗し、充填層内の入口側から順に乾燥が終了して、上図のように充填層内温度（計算値）は空気の入口側から順に急上昇し、下図のように充填層内湿度（計算値）は空気の入口側から順に急低下した。約 1 時間後には、全ての吸着材の水分脱着が終了して、上図のように T_{out} の実験値と計算値が上昇し T_{in} に漸近した。また、同時に H_{out} の実験値と計算値が急激に低下し、供給空気の入口湿度 H_{in} に漸近した。

図 4 の (b) の放熱運転では、上図のように T_{in} が約 30°C で一定 (H_{in} が約 73%RH で一定) の空気が供給され、運転開始直後から吸着材の水分吸着の反応熱が発生（発熱）して充填層内の温度が上昇し、約 0.14 時間後には T_{out} の実験値と計算値は最高値の約 68°C に達した。また、下図のように、 H_{out} の実験値と計算値は運転開始直後に極小の値を示した。その後、入口側から水分吸着が徐々に進行して、上図のように充填層内温度（計算値）が入口側から順に低下して、 T_{out} の実験値と計算値も徐々に低下した。また、下図のように、運転開始直後に極小の値を示した H_{out} の実験値と計算値は徐々に増加した。この下図のように徐々に増加するような充填層内湿度と H_{out} の経時変化から、蓄熱槽全体の水分の吸着量は運転開始直後に最大となり、それ以降は徐々に減少していくことが確認できる。発熱量は水分の吸着量に比例するため、吸着量の減少に応じて上図のように T_{out} の実験値と計算値も低下して、4.0 時間後には約 32°C になった。なお、上図のような充填層内温度（計算値）の経時変化の形状から、放熱運転時の水分の吸着は蓄熱時の脱着に比べて、充填層高さ方向の広範囲で進捗することが確認できる。

以上のように、ハスクレイ造粒体を用いた場合の蓄放熱特性の実験結果は、本数値解析モデルによってトレースすることができた。

4.2 ゼオライトの計算例

図 5 には、ゼオライト造粒体を用いた場合の、蓄放熱運転の計算結果を実験結果と比較して示す。蓄熱槽の充填高さは 300mm であり、供給空気流量は 250 NL/min（空塔速度は約 0.48 m/s）である。

図 5 の (a) の蓄熱運転では、上図のように供給空気の入口温度 T_{in} は約 130°C 一定に加熱され、供給空気の顕熱が吸着材の水分の脱着の反応熱として奪われたため、運転開始直後から約 0.4 時間の間、空気の出口温度 T_{out} の実験値と計算値は 40°C 一定であった。また、下図のように、空気の出口湿度 H_{out} の実験値と計算値は約 60%RH 以上の高い値で維持されていた。この運転開始直後から約 0.4 時間の間に、供給空気によって吸着材の水分の脱着が進捗し、充填層内の入口側から順に乾燥が終了して、上図のように充填層内温度（計算値）は空気の入口側から順に急上昇し、下図のように充填層内湿度（計算値）は空気の入口側から順に急低下した。約 0.5 時間までには、全ての吸着材の水分脱着が終了して、上図のように T_{out} の実験値と計算値が上昇し T_{in} に漸近した。また、同時に H_{out} の実験値と計算値が急激に低下し、供給空気の入口湿度 H_{in} に漸近した。

図 5 の放熱運転では、上図のように T_{in} が約 30°C で一定 (H_{in} が約 65%RH で一定) の空気が供給され、運転開始直後から吸着材の水分吸着の反応熱が発生（発熱）して充填層内の温度が上昇し、約 0.7 時間後までの T_{out} の実験値と計算値は約 80°C を示した。また、下図のように、 H_{out} の実験値と計算値は運転開始直後に極小の値を示した。その後、入口側から水分吸着が徐々に進行して、上図のように充填層内温度（計算値）が入口側から低下して、 T_{out} の実験値と計算値も低下した。また、下図のように、運転開始直後に極小の値を示した H_{out} の実験値と計算値は増加した。この下図のような充填層内湿度と H_{out} の経時変化は、前述の図 5 の (b) のハスクレイの放熱運転の H_{out} の経時変化に比べて急激に増加することから、比較的、急速な吸着量の減少に応じて、上図のように 4.0 時間後には T_{out} の実験値と計算値も低下して T_{in} と同等の約 30°C になった。

以上のように、典型的な I 型の吸着等温線を有する、汎用のゼオライト造粒体を用いた場合の蓄放熱特性の実験結果は、本数値解析モデルによってトレースすることができた。

なお、本試験装置と温湿度計の測定精度^[注5]から、放熱運転の終盤での低温で高湿度の H_{out} の実験値には比較的、大きな誤差が含まれていることから、 H_{out} の実験値と計算値の相違には留意されたい。

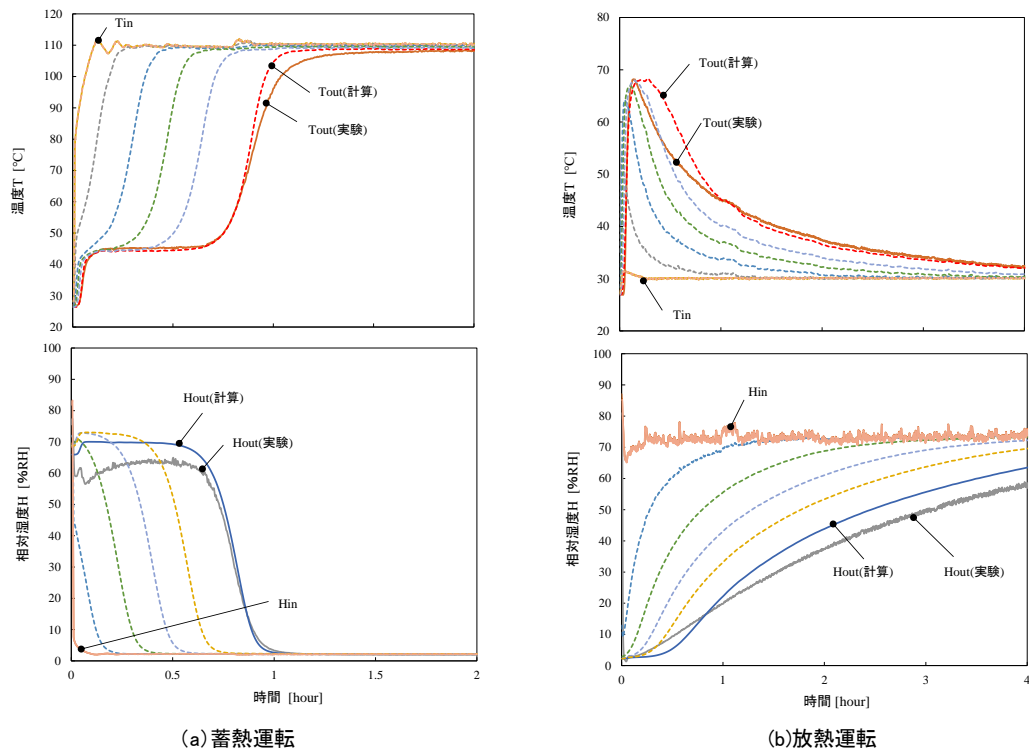


図4 ハスクレイでの蓄放熱運転の温湿度の経時変化(実験と計算結果)^{2,9,15}

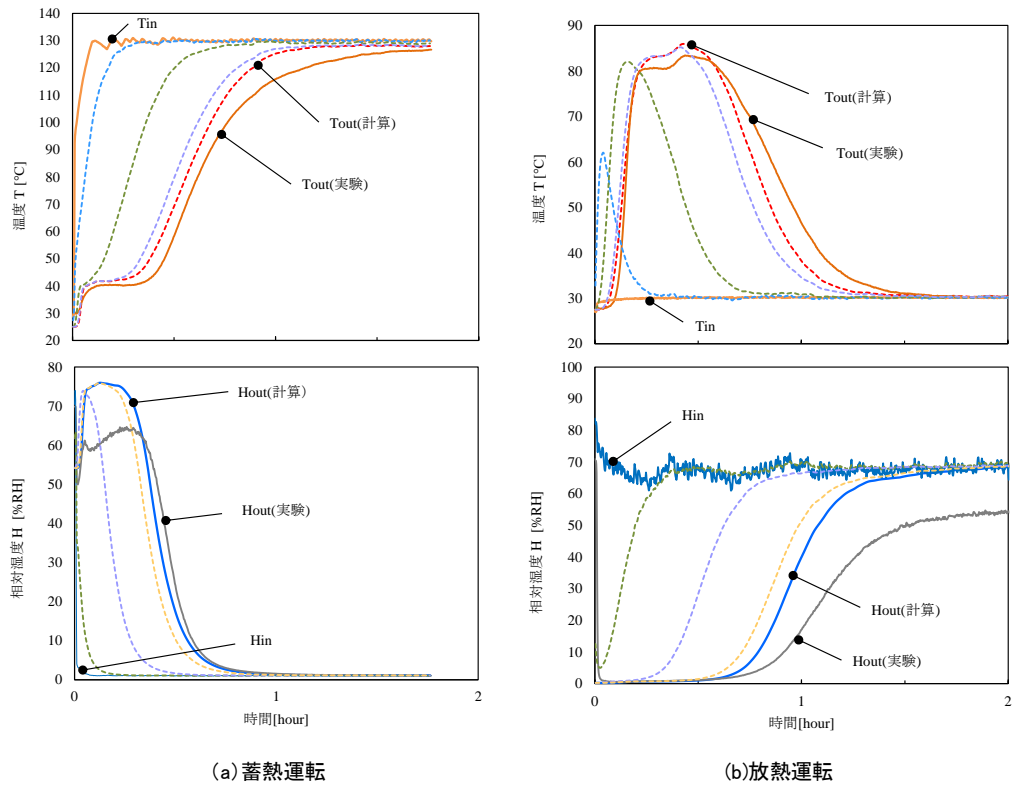


図5 ゼオライトでの放熱運転の温湿度の経時変化(実験と計算結果)

5. 設計・提案ツールと適用

簡便な設計・提案ツールを開発することを目的とし、前述の本数値解析モデルをエクセルベースで設計ツール化したので、その概要を説明する。

5.1 設計・提案ツール

エクセルベースの設計・提案ツールは、**図 6** のように主に入力画面と出力画面のシートで構成され、差分計算はエクセルの VBA (Visual Basic for Applications) でコード化した。入力画面において、蓄熱槽の形状や寸法、蓄熱材の種類、運転時間、初期条件を入力し、蓄熱槽の入口空気温湿度と流量 (の時間変化) を与えることで、出口空気温湿度の時間変化などが計算できる。出力画面は、出口空気温湿度のプロットされた空気線図や、蓄熱槽の充填層内温湿度や出口空気温湿度の経時変化グラフなどが表示される。

この設計ツールでは**図 7** のように蓄熱温度域によってハスクレイとゼオライトの使い分けが可能であり、双方の吸着材でも計算できるように、それぞれの吸着等温線の多項式近似式が格納されている。

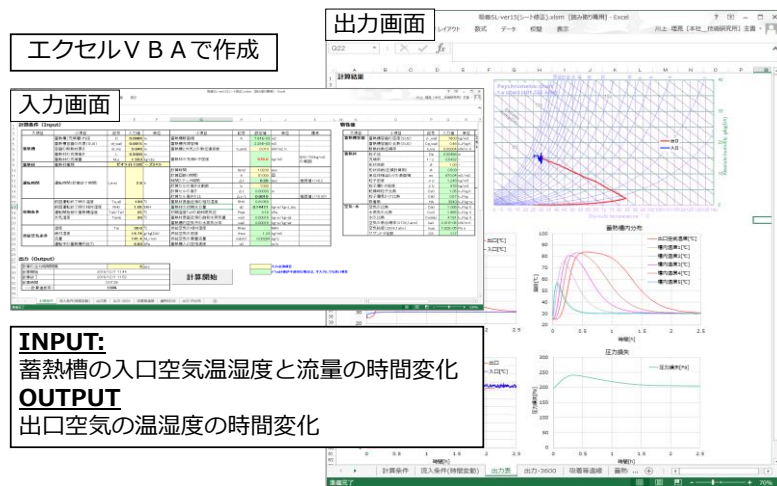


図 6 エクセル設計・提案ツール



図 7 ハスクレイとゼオライトの適用範囲

オープンサイクル形式の吸着材蓄熱システムは、ハスクレイなどの吸着材造粒体が充填された蓄熱槽、蓄熱・放熱設備、ダクトなどで構成され、その蓄熱・放熱設備はエアハンドリングユニットと同様にファンや熱交換器などにより構成される。蓄熱・放熱設備の仕様としては過大なファン動力にならないよう、蓄熱槽での通風の圧力損失 1 kPa 以下を目標にして、吸着材造粒体の粒径、流速、充填高さを決定される。また、蓄熱槽内での吸着材造粒体の固定方法とともに、吸着材造粒体自体の吸脱着性能を発揮させるための均一通風の風路設計により、小型および大型蓄熱槽を作製して、蓄熱密度 500 kJ/L 以上を放熱試験で確認されている。とくに、蓄熱密度 500 kJ/L 以上は経済的な蓄熱システムとしての実用化するために必要な目標値である。

昨今のコンピュータの性能向上により、通風方向に対する一次元モデルを採用している本設計ツールを、三次元モデルに拡張することも考えられる。しかし、上述のように、吸着材造粒体の粒径、流速、充填高さを決定するような蓄熱槽の基本設計が、物理的に通風方向の一次元性を担保するため、現在は三次元モデルへの拡張は考えていない。同様に、大規模な建築設備分野の温度成層型水蓄熱槽を対象にして、三次元モデルの CFD(Computational Fluid Dynamics)を活用した研究が関連学協会で発表されてきたが、水蓄熱槽内のディストリビュータの圧力損失による水の均一分配の基本設計が、水深方向に一次元性が保たれた温度分布と蓄熱槽効率を保証するのであり、設計ツールとして三次元 CFD の活用は必須ではないと考える。

5.2 オフライン熱輸送

本蓄熱システムは蓄熱と放熱の時間的なギャップ³³⁾を埋める定置型とともに、**図 8**に示すような排熱発生と熱需要の空間的なギャップ³³⁾も埋めるオフライン熱輸送も対象である。A 工場は排熱発生サイトであり、**図 8**の①のように工場の排熱で蓄熱材を乾燥（蓄熱）させる。A 工場での蓄熱完了後、アームロール搭載の運搬トラックによって、**図 8**の②のように乾燥した蓄熱材を熱の利用先まで運搬する。B 工場は熱需要サイトであり、**図 8**の③のように蓄熱材に水蒸気を吸着させて吸着熱を発生（熱利用）させる。B 工場での熱利用（放熱）完了後、同運搬トラックによって、**図 8**の④のように水蒸気を吸着した蓄熱材を排熱サイトまで運搬する。これらの①～④の工程を繰り返すことで、オフラインの熱輸送を実現できる。

前述の設計・提案ツールによって 1 回の蓄熱時間と放熱時間を定めることができ、各サイトでの蓄熱槽の接続時間、輸送距離、および輸送速度から、1 日の蓄放熱回数などの熱輸送システムを計画することができる。

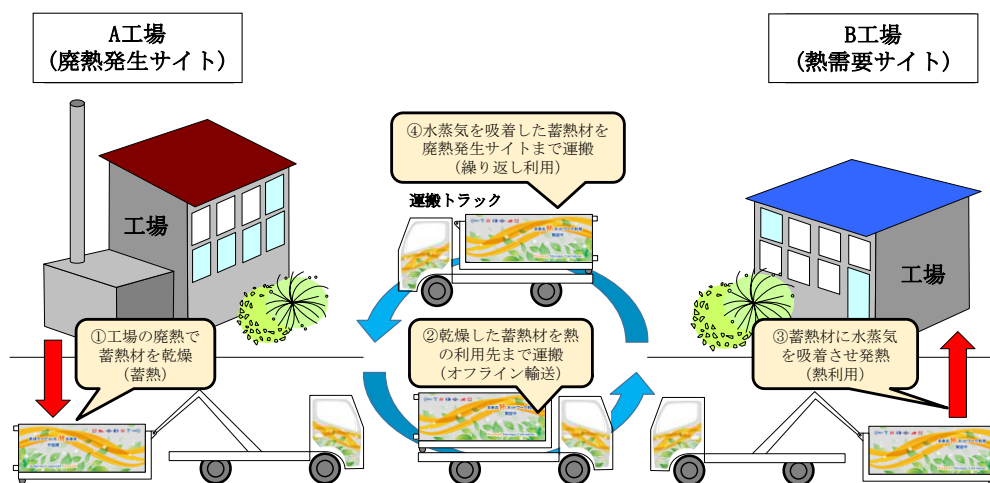


図 8 オフライン熱輸送システムにおける熱利用イメージ(工場間)

6. おわりに

ここでは、吸着材蓄熱システムの簡便な設計・提案ツールを開発することを目的とし、その蓄熱槽内の吸着材充填層の数値解析モデルの概要を説明した。本設計・提案ツールは吸着材蓄熱システムの放熱特性の工場現地での性能確認試験の結果と比較検証して²²⁾、石原産業の四日市工場での定置型の吸着材蓄熱システムや日野自動車の羽村工場や羽村市スイミングプールでのオフライン熱輸送型の吸着材蓄熱システム蓄放熱運転の実証データによっても検証してきた^{25,26)}。

吸着材蓄熱システムは工場やコージェネレーションなどで発生する未利用低温廃熱を、各種の乾燥工程や除湿・暖房の温水製造などの用途へ再生させることが可能である。排熱と熱需要の時間的なギャップを埋める定置型として展開が期待できるとともに、オフライン熱輸送システムとして地方自治体の汚泥・ごみ焼却場廃熱や工場廃熱などの広域熱利用システムの中核装置としての市場展開が期待できる。今後も本設計・提案ツールを活用して、本吸着材蓄熱システムの実導入に向けた、各種の熱マネジメント検討を実施していく予定である。

謝辞

本成果の一部は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業「80°C以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材及びシステムの開発」と「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」の結果得られたものである。関係各位に御礼申し上げます。

[注1] ハスクレイ (HAS-Clay) ;

安価な工業用原料から合成される、非晶質アルミニウムケイ酸塩 (HAS : Hydroxyl Aluminum Silicate) と低結晶性粘土 (Clay) からなる複合体の無機系吸放湿材である^{34,35)}。繰り返しの耐久性が高く、また相対湿度 40%RH 以上に於いて他の吸着材より吸着量が多いことが特長である。

[注2] 実用化開発 ;

2015年7月~2016年3月に、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム/インキュベーション研究開発フェーズ「革新的蓄熱材を用いた大規模地域熱ネットワーク (メガストック) の開発」の助成事業を行った。NEDO からの助成先は高砂熱学工業(株)と大塚セラミックス(株)、共同研究先は(国研)産業技術総合研究所であった。引き続き、2016年4月~2018年3月に、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム/実用化開発フェーズ「80°C以上の低温廃熱を用いる革新的蓄熱材及びシステムの開発」の助成事業を行った。NEDO からの助成先は高砂熱学工業(株)、森松工業(株)、石原産業(株)、大塚セラミックス(株)、共同研究先は日野自動車(株)と(国研)産業技術総合研究所であった。

[注3] 実証開発 ;

2018年7月~2020年2月に、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム/実証開発フェーズ「低温廃熱利用を目的としたハスクレイ蓄熱材及び高密度蓄熱システムの開発」の助成事業を行った。NEDO からの助成先は高砂熱学工業(株)、石原産業(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、共同研究先は日野自動車(株)、森松工業(株)、(国研)産業技術総合研究所であった。石原産業四日市工場で定置型蓄熱槽での産業プロセスに対する実証試験と日野自動車の羽村工場周辺でオフライン熱輸送型での実証試験を行った。

[注4] ハスクレイなどの造粒体充填層の圧力損失 ;

蓄熱槽の圧力損失 ΔP [kPa]は下記の(13)式の Ergun の式³⁶⁾に示すように、充填部の空隙率 ε 、吸着材の粒径 d_s と形状係数 ψ 、通風の粘度 μ と流速 u から計算される。

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu u}{\varepsilon^3 \psi^2 d_s^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon) \rho u^2}{\varepsilon^3 \psi d_s} \quad \dots\dots(13)$$

実際のハスクレイ吸着材は円筒形であるが、ここでは球形として体積相当粒径 d_s と Ψ を与えた。高さ L が約 300 mm の蓄熱材を充填した蓄熱槽での通風の圧力損失は極めて小さいため、前述の仮定 3) のように、空気の熱物性値に圧力依存性を考えない。

[注 5] 小型の試験装置^{2,9,15)}；

小型の性能試験装置の構成を図 9 に、装置の外観を図 10 に示す。本装置は給気部、調温/湿部、および蓄熱槽部で構成されている。蓄熱槽は直径 100 mm、高さ 500 mm、容積 4 l の円筒形である。図に示すように、この内部に吸着材の造粒物（相当径：約 5 mmφ）を充填高さ L が 300 mm で充填した。なお、主な構成機器の仕様を表 3 に、温湿度、温度、流量の各センサーの測定精度を表 4 まとめて示す。

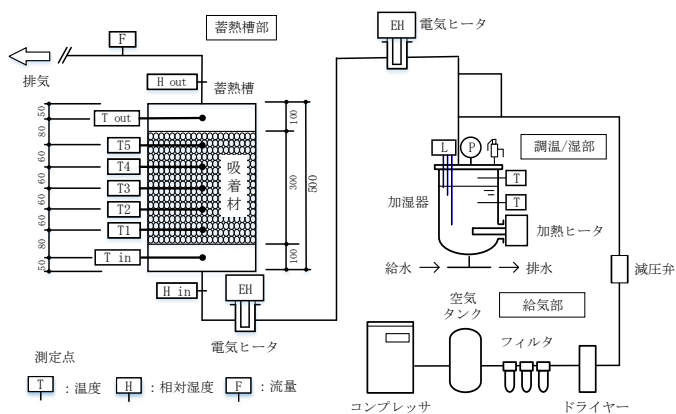


図 9 試験装置の構成¹⁵⁾



図 10 試験装置の外観^{2,9,15)}

表 3 主な構成機器^{2,9,15)}

機器名称	台数	仕様	備考
コンプレッサ	1	670 L/min, 0.8 MPa	空気は過供給
空気タンク	1	120 L, Max 1.4 MPa	
フィルタ	3	エアフィルタ×2, 活性炭	
電気ヒータ	6	1 kW, 0.2 kW	ねじ込み式
加湿器	2	外形：200A×414 mmH	1台のみ図示
蓄熱槽	2	100φ×500 mmH	1台のみ図示

表 4 温湿度計, 温度計, 流量計の測定精度^{2,9,15)}

センサー	測定精度	温度範囲	
温湿度計	温度	±0.1K	30°C~
		0.1+0.1/50×(温度-30°C)	30°C~
	湿度	±1.3 %RH	30°C~50°C
		±1.8 %RH	50°C~70°C
	±2.8 %RH	70°C~	
温度計	±0.5K	-40°C~125°C	
流量計	±3 %RD	-	

文 献

- 鈴木美穂, 大山孝政, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木正哉, 名和博之, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行: 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実験による評価-第 1 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA101, (2017. 9. 20).
- 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 宮原英隆: 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの数値解析による評価-第 2 報, 化学工学会第 49 回秋季大会, DA102, (2017. 9. 20).
- 鈴木正哉, 森本和也, 前田雅喜, 犬飼恵一, 宮原英隆, 平井恭正, 川村正行, 谷野正幸: 蓄熱材ハスクレイの性能評価, 化学工学会第 49 回秋季大会, EB114, (2017. 9. 20).
- 松田聡, 鈴木善三, 名和博之, 井守正隆, 谷野正幸: 蓄熱材粒子充填層の振動試験, 化学工学会第 49 回秋季大会,

EB115, (2017.9.20).

- 5) 名和博之, 松田聡, 鈴木善三, 井守正隆, 川上理亮: 搬送時における蓄熱材粒子充填層内の対流現象, 第 23 回流動化・粒子プロセッシングポジウム/化学工学会, (2017.12.7-8).
- 6) 谷野正幸, 川上理亮, 鎌田美志, 大山孝政, 鈴木美穂・宮原英隆, 川村正行, 名和博之, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 永井恒輝: 100°C以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システム, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 25-30(2017).
- 7) 大山孝政, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 松田聡, 鈴木善三, 鈴木正哉, 名和博之, 馬込英明, 山内一正, 宮原英隆, 川村正行: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの研究-吸着材蓄熱槽の数値解析モデル-, 高砂熱学工業技術研究所報, 31, 31-38(2017).
- 8) 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 丸毛謙次, 山内一正, 鈴木正哉, 陶昇, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-第 1 報-システムの開発コンセプトと蓄熱材の検討, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018.9.12-14).
- 9) 鎌田美志, 川上理亮, 森本和也, 松田聡, 鈴木善三, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-第 2 報-吸着材蓄熱槽の蓄放熱特性と数値解析モデル, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018.9.12-14).
- 10) 鈴木美穂, 大山孝政, 名和博之, 井守正隆, 馬込英明, 川上理亮, 井上正憲, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-第 3 報-実際の工場・設備で蓄放熱特性の検証試験, 平成 30 年度空気調和衛生工学会大会, (2018.9.12-14).
- 11) 名和博之, 川上理亮, 宮原英隆, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡, 100°C以下の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの開発, 第回潜熱工学シンポジウム, 潜熱工学研究会, (2018.12.3-4).
- 12) 鈴木美穂, 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 名和博之, 川村正行, 山内一正, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発~工場の実設備における蓄放熱特性の検証試験~, 高砂熱学工業総合研究所報, 32, 15-24(2018).
- 13) 松田聡, 鈴木善三, 鈴木美穂, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 名和博之: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発~吸脱着の過渡特性, 化学工学会 第 84 年会, F302, (2019).
- 14) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 中田拓司, 谷野正幸, 大山孝政, 宮原英隆, 山内一正, 名和博之, 松永克也, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-一定置型とオフライン熱輸送型の実証試験での設備概要-, 高砂熱学工業総合研究所報, 33, 41-50(2019).
- 15) 鎌田美志, 川上理亮, 大山孝政, 松田聡, 鈴木正哉, 丸毛謙次, 山内一正, 宮原英隆, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発-第 1 報小型装置の実験結果と吸着材蓄熱槽の計算モデル-, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 281(2020.8).
- 16) 川上理亮, 鈴木美穂, 宮原英隆, 鈴木正哉, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第 4 報) 産業プロセスに対する定置型蓄熱槽の蓄放熱特性の実証試験, 2020 年度空気調和衛生工学会大会, (2020.9.9-30(オンライン)).
- 17) 鎌田美志, 中田拓司, 松永克也, 名和博之, 山内一正, 松田聡, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第 5 報) トレーラー型蓄熱槽によるオフライン蓄放熱特性の実証試験, 2020 年度空気調和衛生工学会大会, (2020.9.9-30(オンライン)).
- 18) 鎌田美志, 中田拓司, 川上理亮, 谷野正幸, 丸毛謙次, 名和博之, 宮原英隆, 松永克也, 山内一正, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-コンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験, 化学工学会第 51 回秋季大会, J116, (2020.9.24(オンライン)).
- 19) 丸毛謙次, 名和博之, 谷野正幸, 鎌田美志, 宮原英隆, 松永克也, 井守正隆, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-コンテナ型蓄熱槽の槽内熱挙動の検証, 化学工学会第 51 回秋季大会, J117, (2020.9.24(オンライン)).
- 20) 川上理亮, 鎌田美志, 鈴木美穂, 中田拓司, 大山孝政, 谷野正幸, 宮原英隆, 山内一正, 名和博之, 佐藤敦史, 鈴木正哉, 松田聡: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発-一定置型とオフライン熱輸送型の実証試験-, 高砂熱学イノベーションセンター報, 34, 95-105(2020).

- 21) 宮原英隆, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 万福和子, 川上理亮, 名和博之, 山内一正, 松永克也, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発—第 2 報低温再生型蓄熱材における水蒸気吸着自の発熱量について—, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 285 (2020. 12).
- 22) 川上理亮, 鈴木美穂, 鎌田美志, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発—第 3 報吸着材蓄熱槽の実際の工場での性能評価—, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 290 (2021. 5).
- 23) 中田拓司, 鎌田美志, 川上理亮, 谷野正幸, 宮原英隆, 佐藤敦史, 名和博之, 井守正隆, 山内一正, 松田聡, 鈴木雅哉: 100°C程度の低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発, コンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験, 第 31 回環境工学総合シンポジウム 2021, 日本機械学会, 423 (2021. 7. 8-7. 9).
- 24) 鎌田美志, 川上理亮, 佐藤雄, 山内一正, 名和博之, 松田聡, 佐藤陽一, 谷野正幸: 低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発 (第 6 報) 塗装工程の空調機での除湿利用, 2021 年度空気調和衛生工学会大会, (2021. 9. 15-17 (オンライン)).
- 25) 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 平井恭正, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 山内一正, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発—第 4 報定置型蓄熱システムの実証試験—, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 297 (2021. 12).
- 26) 鎌田美志, 川上理亮, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 松田聡, 鈴木正哉, 宮原英隆, 佐藤敦史, 谷野正幸: ハスクレイを用いた開放系の吸着材蓄熱ヒートポンプシステムの開発—第 5 報オフライン熱輸送システムの実証試験—, 空気調和・衛生工学会論文集, 投稿中.
- 27) 小竹進, 土方邦夫: 「パソコンで解く熱と流れ」, pp. 1-20, 丸善, (1988. 9. 5) .
- 28) 森康夫, 土方邦夫: 「流れと熱の工学 I, II」, 共立出版, (1976. 6. 1) .
- 29) 改訂六版化学工学便覧, 化学工学会, 丸善, pp. 376, 平成 11 年 2 月 25 日.
- 30) 宮内照勝: 希釈充填層における粒子・流体間境界物質移動係数, 化学工学, 36, 633 (1961).
- 31) 近藤精一, 石川達雄, 安部郁夫: 第 2 版「吸着の科学」, 丸善出版, (2001. 2. 25) .
- 32) 小野嘉夫, 鈴木勲: 「吸着の科学と応用」, pp. 19-38, 講談社, (2003. 11. 1) .
- 33) 鈴木洋: 「潜熱蓄熱・化学蓄熱・潜熱輸送の最前線, —未利用熱利用に向けたサーマルギャップソリューション—」, シーエムシー出版, (2016).
- 34) 産総研 HP, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr_2008/pr20081008_2/pr20081008_2.html.
- 35) 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一: 高性能吸着剤ハスクレイ®の開発, 学術誌「Synthesiology」, 産総研, Vol. 9 No. 3, pp. 154-164 (2016. 8) .
- 36) 改訂五版化学工学便覧, 化学工学協会, 丸善, pp. 242, 昭和 63 年 3 月 18 日.

ABSTRACT

We developed an open-cycle type adsorbent thermal storage system that can utilize low-temperature waste heat. We investigated experimentally the charging and discharging characteristics of the packed bed of adsorbent in a thermal storage tank. We also conducted demonstration tests of a stationary heat storage system and an off-line heat transport system. Furthermore, the results of the charging and discharging operation in the small-sized test equipment were used to develop a calculation model for an adsorption thermal storage tank, and the design tool was completed based on verification of data from the charging and discharging operation at the demonstration facilities. In this paper, the numerical analysis model, adsorption isotherms and heat of adsorption for various adsorbents, calculation examples of the numerical analysis model, and design tools are described. We hope to contribute to the reduction of carbon dioxide emissions, which is an urgent issue, by promoting the use of waste and unused heat through thermal management using these design tools for adsorption thermal storage systems.
