

【受賞記念】

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

谷野正幸・鎌田美志・川上理亮・大山孝政

Open-type Adsorption Thermal Storage Heat Pump System Applying HAS-Clay

Masayuki Tanino・Haruyuki Kamata
Yoshiaki Kawakami・Takamasa Oyama

当社の吸着材蓄熱システム「メガストック®」が、(公社)空気調和・衛生工学会の第62回学会賞の論文賞／学術論文部門を受賞した。この受賞の対象は同学会／論文集に掲載された「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」の6連報である。そこで、ここでは論文掲載された技術内容の概要を紹介する。この「メガストック®」を市場展開して排熱利用を拡大し、我が国のカーボンニュートラルの実現に貢献したい。

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの利用とともに、さらなる省エネルギーが求められている。我が国における省エネルギー技術は、温室効果ガスの削減が社会問題となった1990年以降、革新的な技術発展を遂げており、排熱の利用はかなり進んでいる。しかしながら、100℃未満の低温排熱は発生場所における用途が限定されるために、その多くが捨てられているのが現状である¹⁻³⁾。

排熱の発生場所と熱の利用場所の時間的・空間的なミスマッチを解消するため、蓄熱やオフライン熱輸送の研究開発が行われてきた⁴⁻⁷⁾。また、省エネルギーやエネルギー有効利用の社会的要請を受けて、電力貯蔵や水素貯蔵の研究開発に加えて、熱エネルギー源の質である温度差やエクセルギーの観点からは高温潜熱蓄熱や化学蓄熱の高温熱利用の研究開発⁸⁻¹⁰⁾がなされてきた。

とくに、我が国のエネルギー需要の大きな割合を占める民生部門での大幅な省エネルギーなどを目的に、地域冷暖房やエネルギーネットワークに関する研究も意欲的になされてきた¹¹⁻¹⁴⁾。さらに、地域社会の全体でのカスケード的なエネルギー利用と未利用エネルギー利用¹⁵⁾を推進し、ドイツのシュタットベルケ¹⁶⁾のような自治体主導の広域熱利用システムを具現化することが必要である。また、太陽熱を利用したデシカント空調¹⁷⁻¹⁹⁾などの研究開発・市場導入の検討もなされてきた。

以上のような様々な研究課題を解決するためには、高密度蓄熱材と大容量蓄熱システムの導入が有効な選択肢の一つである。

そこで我々は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいて、高性能吸着材ハスクレイをベースにした高密度蓄熱材を用いた、高効率な吸着材蓄熱システムの開発してきた²⁰⁻⁵²⁾。本報では蓄熱材・蓄熱システムの製品化開発とともに、従来の潜熱蓄熱に対して2倍以上の蓄熱密度があり、温風・温水・除湿・冷風など多様な用途に利用できる、吸着材蓄熱システムの実フィールドでの実証の概要を説明する。さらに、ハスクレイだけでなくゼオライトも用いた、吸着材蓄熱システム「メガストック®」の市場展開の現状を紹介する。

2. 吸着材蓄熱システムの概要

本吸着材蓄熱システムは吸着式ヒートポンプの原理を応用した技術であり、**図 1** に吸着材蓄熱システムの蓄熱運転と放熱運転を模式的に示す。蓄熱運転時は熱（排熱）によって製造された高温空気を、粒状の吸着材が充填された蓄熱槽に供給し、吸着材を乾燥させる。放熱運転時は湿潤空気を蓄熱槽に供給し、吸着材に水分を吸着させて発熱させ、高温低湿空気を製造する。このように蓄熱運転時は水分の脱着であり、放熱運転時は水分の吸着であるため、蓄熱利用というよりは水分の移動に伴う発熱を利用したシステムである。

本システムの特徴は、①時間ギャップが解消できること、②空間ギャップが解消できること、③加温＋除湿利用ができること、④放熱空気が安定化できること、⑤省エネ・省 CO₂ が実現できること、⑥保管時の温度保持が不要であることが挙げられる。⑤については必要な補助動力は送風動力のみで、回収した排熱量分だけ利用側のエネルギーと CO₂ を削減可能である。また、⑥については水分の吸脱着反応を利用しているため、密閉状態を維持すれば、いつまでも熱の保管が可能であることが特徴である。

当社の「メガストック®」の市場展開において、吸着材蓄熱システムでの蓄熱材として使用する、吸着材造粒体の種類を**図 2** に示す。ハスクレイは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）からなる複合体であり、2008 年に産総研が開発した無機系吸放湿材である。また、ゼオライトは結晶性アルミのケイ酸塩の総称であり、合成ゼオライトは化学・製薬産業等の脱水材・触媒用として利用され、人工ゼオライトは水処理・脱臭剤として幅広く利用されている。なお、本報の 7 章の実証施設までは、ハスクレイを蓄熱材として使用した NEDO 事業の内容の報告である。

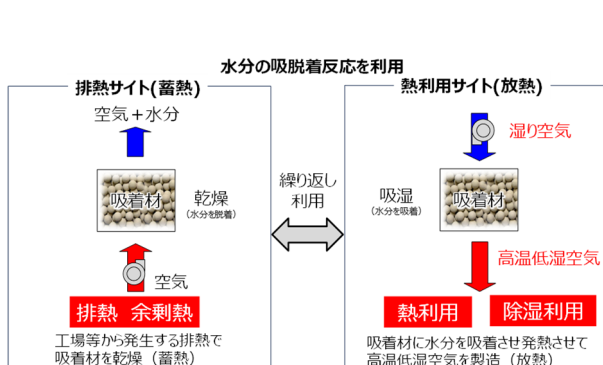


図 1 吸着材蓄熱システムの蓄放熱運転

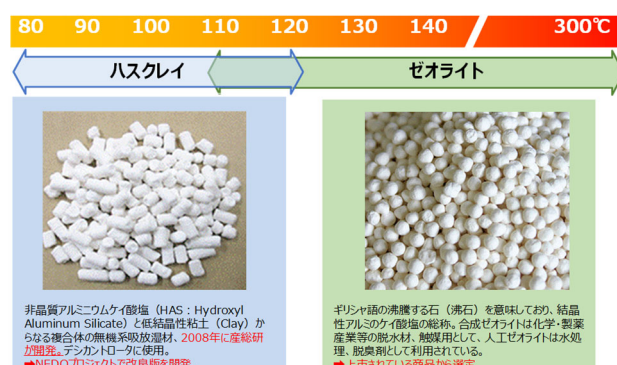


図 2 吸着材蓄熱システムで採用している吸着材の種類

3. 吸着材蓄熱槽の計算モデルと吸着材の水蒸気吸着時の発熱量

ここでの計算モデルは、吸着材蓄熱槽や吸着材蓄熱システムの設計ツールの開発を第一の目的とした。そこで、物理的に妥当な範囲内で数値解析モデルの簡略・定式化を行い、計算結果と試験結果との比較を通じて、本数値解析モデルの工学的な妥当性と設計ツールとしての可能性を検討した。

解析対象は蓄熱槽の内の吸着材充填部とした。また、ここでは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、充填部の円筒座標系での半径方向の熱・物質移動を考慮せず、**図 3** のような軸方向（z 方向）に対する 1 次元として、まずは下記を仮定した。

- 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。

蓄熱槽の圧力損失 ΔP [Pa]は(1)式の Ergun の式⁵³⁾に示すように、充填部の空隙率 ε [-]、吸着材の粒径 d_s [m]と形状係数 Ψ [-]、通風の粘度 μ [Pa s]と流速 u [m/s]から計算される。

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

実際の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、上記の仮定 3)のように、空気の熱物性値に圧力依存性を考えない。

ここで図 3 のように気相(湿り空気)での支配方程式として、水分質量保存とエネルギー保存を考える。湿り空気の空塔速度 u は 1 m/s 以下の低速であり、 L が 300 mm で ε が 0.5 程度の吸着材充填部の通過時間は極小であるため、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(熱伝導項と物質拡散項)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、ここでは拡散項を省略した。ここで、 M は固相と気相の間での体積あたりの水分移動量(水分移動速度)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。

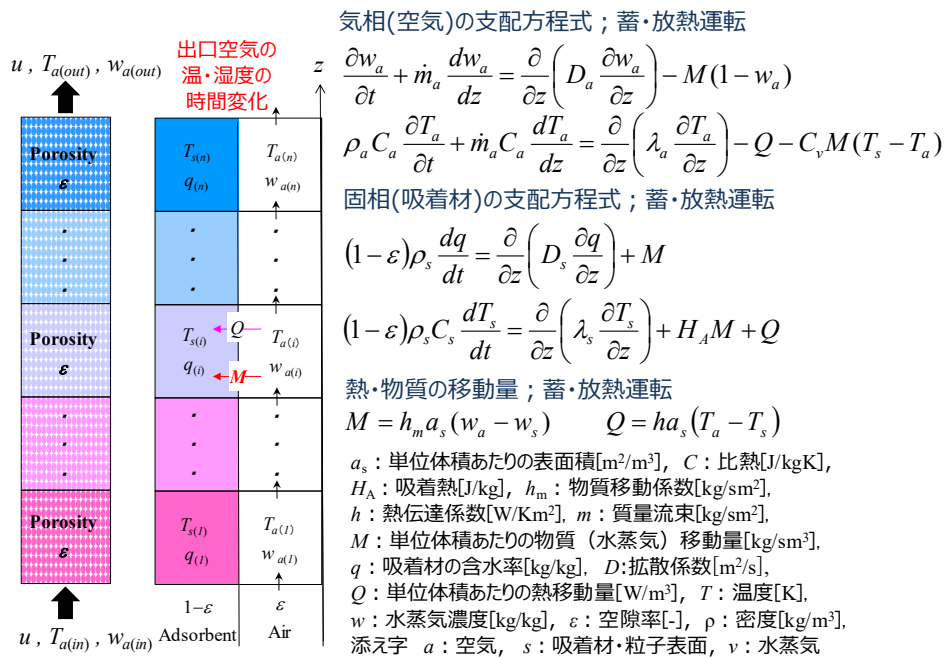


図 3 吸着材蓄熱システムの数値計算モデル

固相(吸着材)での支配方程式についても同様に、図 3 のように水分質量保存とエネルギー保存を考える。気相と同様に拡散項を省略し、設計ツールの開発を目的に進めることにした。

つぎに、図 3 の熱・物質の移動量としては、固相と気相の間での移動速度(M 、 Q)を、熱・物質移動の構成方程式として表す。ここで吸着材表面の水蒸気濃度は平衡状態として、吸着材の含水率と吸着等温線から、式中での表面の水蒸気濃度 w_s を算出することにした。これらの物質移動係数 h_m や熱伝達率 h には宮内の式⁵⁴⁾を採用し、 Nu 数より h を定め、レイス数を 1 として h_m を定めた。

なお、吸着材のハスクレイの物性値である、比熱、比重、吸着等温線、吸着熱は、図 4 の断熱型水和熱測定装置などを用いて測定した。

これらの保存則と構成方程式から、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した。流入空気の温湿度と流量の条件は、実測値を与えた。また、計算での吸着熱は含水率によらず一定とした。計算結果と図5のような100φ×500mmHの蓄熱材充填槽の実験装置での出口空気の温湿度や充填槽内の温度の実測結果と比較して、計算モデルの妥当性を確認した。

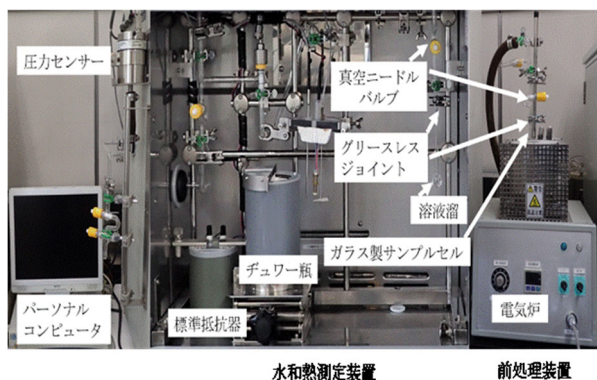


図4 断熱型水和熱測定装置

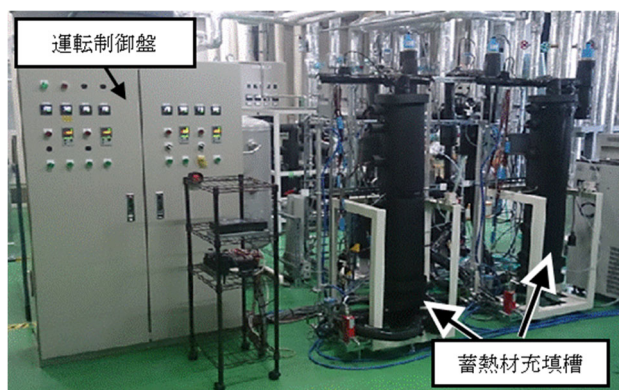


図5 100φ×500mmHの蓄熱材充填槽の実験装置

4. 実際の工場での性能評価

日野自動車の工場における各種生産ラインを対象に検証試験を実施した。図6に蓄熱／放熱特性の検証試験の概要フローを示す。蓄熱サイトは、日野自動車羽村工場（東京都羽村市）内にある塗装工程からの揮発性有機化合物（VOC）を燃焼処理する排気脱臭装置（RTO）からの高温排気を対象とし、間接熱交換器を介して高温空気を供給することで蓄熱検証試験を実施した。蓄熱完了後、図のように蓄熱槽を熱需要先へ搬送トラックで運搬し、放熱検証試験を実施した。放熱サイトは2箇所あり、それぞれ高温低湿空気と温水の供給方式について実施した。高温低湿空気の需要先は日野工場内にある樹脂ペレットの乾燥工程とした。ここでは乾燥空気製造用の加熱用電力の削減効果を確認した。温水の需要先は新田工場（群馬県太田市）にある铸造部材の温水洗浄工程を熱需要先とし、温水製造用の加熱用電力の削減効果を確認した。

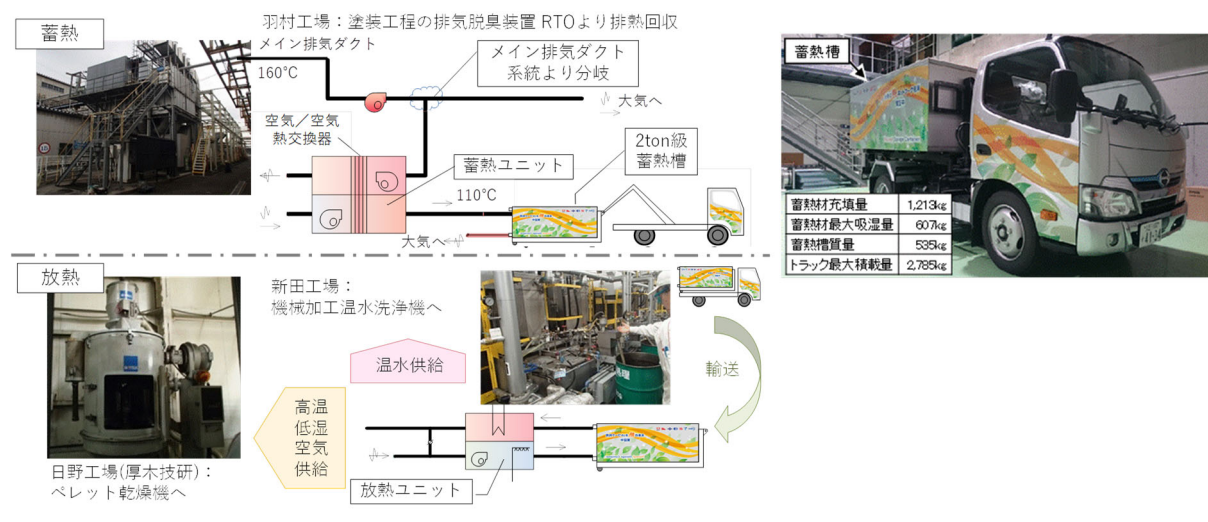


図6 実際の工場での性能評価の概要図

4.1 樹脂ペレット乾燥工程での放熱試験の概要

図7にペレット乾燥工程での放熱検証試験の系統図を示す。本工程は自動車の樹脂部材を成型する前に、原材料の樹脂ペレットを乾燥機で加熱乾燥処理している。蓄熱槽の出口空気ダクトを乾燥機の外気取入口に接続し、図のように蓄熱槽からの高温低湿空気を供給することで、乾燥機内で空気を加熱するために必要な電気ヒーターの消費電力の削減効果を確認した。通常、生産状況に応じて複数種のペレットを複数台の乾燥機で適宜分担して乾燥処理するため、工程には乾燥機が複数台設置されている場合が多いが、今回は1台のみを試験対象とし蓄熱槽からの高温低湿空気の余剰分は排気した。この乾燥機1台の定格風量は $130\text{ m}^3/\text{h}$ であり、本試験での蓄熱槽からの供給空気風量は工場の運転時間の制約から $4,100\text{ m}^3/\text{h}$ と設定したため、乾燥機約32台分に相当する。また、乾燥機はバッチ式であるため、ペレットの乾燥完了時間（通常条件と同一で2hで完了）毎にペレットの入替作業（約0.5h）を行った。なお、蓄熱槽への供給空気は、工場内のプロセス排気や外気条件を模擬するため、図中の外調機で事前に所定条件（ $25^\circ\text{C}/95\%\text{RH}$ ）に調整して供給した。また、蓄熱槽下部に質量計（ロードセル：精度 $\pm 0.4\%\text{RS}$ ）を設置し、試験中の吸着水分量の変化を計測した。これらの計測データによって電気ヒーター消費電力の削減効果を確認し、蓄熱槽の出口空気温度の経過時間変化によって数値解析モデルの妥当性を確認した。

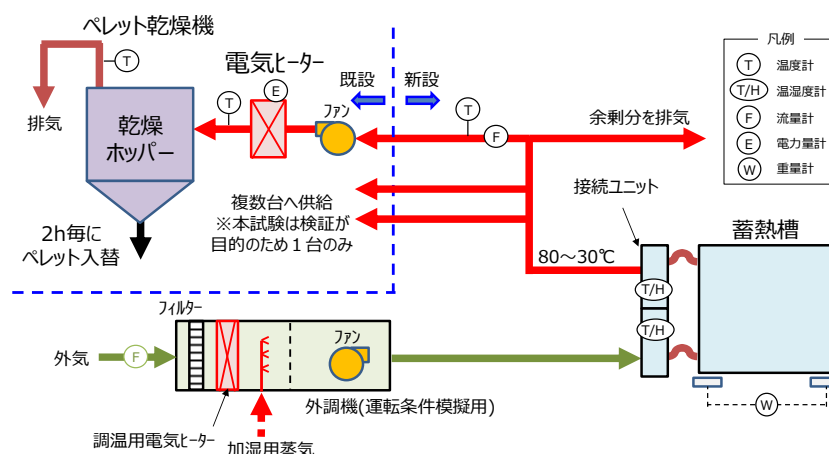


図7 樹脂ペレット乾燥工程の放熱検証試験システム図

4.2 温水洗浄工程での放熱試験の概要

図8に温水洗浄工程での放熱検証試験の系統図を示す。本工程は自動車の鋳造部材の製造過程の一部であり、部材に付着した油分を除去するために約 50°C の温水で洗浄している。図のように温水槽上部にある排気フードから温水槽の湯気を含む約 $35^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$ の高温空気を回収して蓄熱槽へ送り、高温低湿空気を供給した。この高温低湿空気で温水槽の温水を間接加熱することで、温水加熱に必要な電力（槽内の電気ヒーターで 50°C 一定に加熱制御）の削減効果を確認した。なお、温水との間接加熱後に排出される低湿空気を温水洗浄の後工程にある部材の乾燥工程に供給利用すれば、さらなる付加価値が想定されるが、今回は温水供給までを対象とした。本試験での蓄熱槽からの供給空気の風量は、工程内の風量バランスの制約から $1,800\text{ m}^3/\text{h}$ 以下に設定した。熱交換のために温水槽から温水を取り出す循環ポンプの流量は、槽内の水位管理の制約によって一定制御とした。ここでの計測データによって電気ヒーター消費電力の削減効果を確認し、蓄熱槽の出口空気温度の経過時間変化によって数値解析モデルの妥当性を確認した。

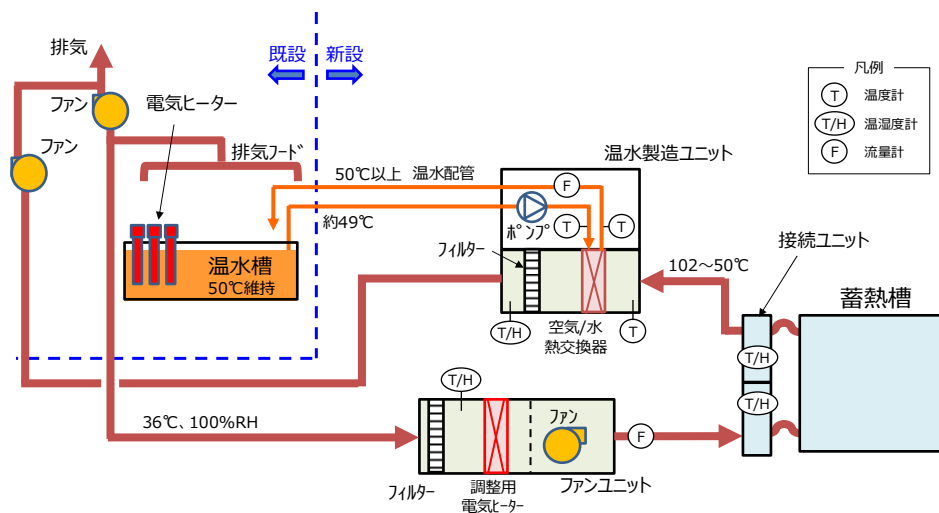


図 8 温水洗浄の放熱検証試験システム図

4.3 蓄放熱槽の熱収支の評価

ここでは、前述のような電気ヒーター消費電力の削減効果、蓄熱槽の出口空気温度の経過時間変化による数値解析モデルの妥当性ととともに、温湿度の実測値に基づき蓄放熱量を算出して吸着材蓄熱槽の熱収支を評価した。実用化に向けて蓄熱量を再確認するとともに蓄熱量の計量方法を検討するため、ここでは表 1 のように、工場内のトラックスケール（台貫）による搬送時毎のトラック質量の測定結果により、蓄放熱量を評価することにした。表のように蓄熱運転と放熱運転での開始前と終了後の質量差（除湿量・加湿量）に、吸着水蒸気量当たりのハスクレイ吸着熱（3,000 kJ/kg）を乗じて、吸熱量と発熱量を算出した。蓄熱量と放熱量は実測値の温度差に基づく熱量であり、蓄熱運転での熱収支の吸熱量/蓄熱量は平均 0.88 であり、放熱運転での熱収支の吸熱量/蓄熱量は平均 0.99 であった。また、蓄放熱運転の熱効率の放熱量/蓄熱量は、平均 0.93 であった。これらの値に加え、脱着操作が容易なアームロール方式での蓄熱槽の輸送に、特段の問題は発生しなかったことから、本吸着材蓄熱システムのオフライン熱輸送としての可能性を確認できた。

表 1 蓄熱放熱運転の熱収支と効率

蓄熱							放熱							熱効率		
日付	重量(台貫)		除湿量 [kg]	蓄熱量 温度差より [MJ]	ファン 消費電力 [kWh]	除湿度・q 蓄熱量 [－]	日付	重量(台貫)		加湿量 [kg]	放熱量 温度差より [MJ]	ファン 消費電力 [kWh]	加湿量・q 放熱量 [－]	放熱量 消費電力 [－]	放熱量 蓄熱量 [－]	
	開始前 [kg]	終了時 [kg]						開始前 [kg]	終了時 [kg]							
2/13	2,460	2,060	400	1,361	15.8	0.88	2/14	2,060	2,500	440	1,263	76.9	1.05	3.78	0.93	
2/15	2,500	2,060	440	1,444	15.4	0.91	2/16	2,060	2,490	430	1,267	85.4	1.02	3.49	0.88	
2/20	2,490	2,050	440	1,404	15.0	0.94	2/21	2,050	2,490	440	1,210	45.4	1.09	5.56	0.86	
2/22	2,490	2,060	430	1,399	19.1	0.92	2/23	2,060	2,430	370	1,144	31.2	0.97	6.32	0.82	
3/13	－	2,080	－	636	8.0	－	3/14	2,080	2,270	190	682	14.3	0.84	8.50	1.07	
3/15	2,270	2,070	200	806	9.2	0.74	3/16	2,070	2,370	300	913	55.7	0.99	3.91	1.13	
3/20	2,370	2,070	300	1,021	11.5	0.88	3/21	2,070	2,350	280	868	27.8	0.97	6.13	0.85	
3/22	2,350	2,060	290	1,033	12.3	0.84	3/23	2,060	2,280	220	640	5.7	1.03	9.87	－	
計：ハスクレイ吸着熱 $q = 3000\text{kJ/kg}$							平均	平均						平均	平均	平均
							0.88							0.99		0.93

註：ハスクレイ吸着熱 $q = 3000 \text{ kJ/kg}$

5. 定置型蓄熱システムの実証試験

石原産業の四日市工場の酸化チタン生産施設において、乾燥ラインからの 100℃以下の排気から排熱を回収・蓄熱し、乾燥ラインに必要な熱源の負荷低減のために、定置型の蓄放熱実証試験設備を設置してラインへの給気に蓄熱槽からの放熱空気を供給した。試験設備には 2 つの蓄熱槽を設置し、乾燥ラインの運

転と排熱の放出状態に合わせて、それぞれ蓄熱／放熱を切り替えるバッチ式の運転を行った。

図9に定置型の蓄放熱実証試験設備の系統図を示す。この図では、蓄熱槽1が蓄熱運転の状態、蓄熱槽2が放熱運転の状態を模式的に示している。図中の左側の排熱回収・熱供給先である酸化チタンの乾燥ラインでは湿潤状態で投入された酸化チタンが、ベルトコンベアによる搬送中に高温空気によって乾燥されて装置外に送出される。高温空気の加熱源は工場内のセントラル方式の蒸気であり、蒸気ヒーターにおいて室内空気を吸引・昇温している。また、酸化チタンを乾燥させた後の高温空気は、100℃以下の低温湿潤状態で室外に排気されている。

今回の実証試験のために設置した設備は、熱交換器、ファン、2つの蓄熱槽、切替ダンパー、およびそれらを接続するダクト系から構成されている。乾燥ラインからの排気を分岐し、室内空気と熱交換させることで排熱を回収して、これを蓄熱用空気として蓄熱槽（図9では蓄熱槽1）に供給された。放熱用空気には外気を使用し、乾燥ラインから排熱回収した後の排気を一部混合して調整された湿潤放熱用空気が、蓄熱槽（図9では蓄熱槽2）に供給された。これは排気に含有する水分も回収利用することで、放熱用空気の相対湿度を上げて、蓄熱材の吸着熱の向上を図ることが目的である。それぞれの蓄熱槽の蓄熱・放熱運転を一定時間毎に切り替えることで、連続的に高温低湿空気を蒸気ヒーターに供給して、既設の加熱源である蒸気の使用量を削減可能にした。

写真1には蓄熱槽の外観を示す。2つの蓄熱槽は、1.94 m×5.08 m×1.60 mHの直方体であり、各々内部に蓄熱材である吸着材ハスクレイの造粒体が乾燥質量で2,190 kg 充填されている。

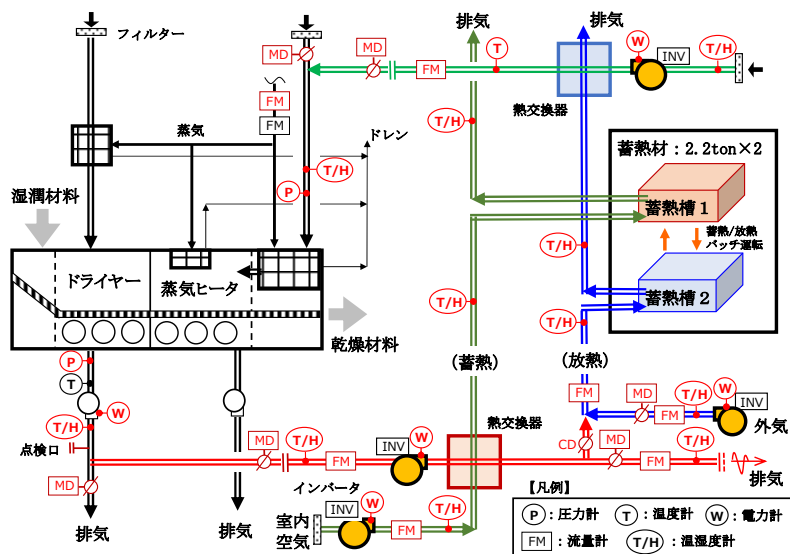


図9 定置型システムの系統図



写真1 蓄熱槽

図10に運転切替えを4時間で行った時の、蓄熱槽廻りの運転に関わる各箇所における温度および相対湿度の経時変化の一例を示す。図の(1)が蓄熱槽1の出入口の値を示し、図の(2)が蓄熱槽2の出入口の値を示す。蓄熱槽1の場合は0～4時間が放熱運転で、4～8時間が蓄熱運転であり、以降も同様に繰り返された。また、蓄熱槽2の場合は0～4時間が蓄熱運転で、4～8時間が放熱運転であり、以降も同様に繰り返された。

蓄熱槽入口の温湿度は、蓄熱運転では排熱から回収した蓄熱用の高温空気の値であり、放熱運転では放熱用の湿潤空気の値である。放熱用の湿潤空気の温湿度は、外気と乾燥ラインからの排気とを混合して、所定の温湿度になるように制御されている。蓄熱槽出口の温湿度は、蓄熱運転では蓄熱後の排気であり、放熱運転では放熱空気（乾燥ラインへの供給空気）の値である。各々の図中には、乾燥ラインからの排気の湿度と、室内空気の温湿度も示している。

この運転条件の場合、30～35℃の室内空気が85～95℃程度の排ガスと熱交換され、約65～70℃の蓄熱用空気として蓄熱槽に供給されている。放熱運転では温度が50℃で相対湿度が90 %RHの空気を蓄熱槽に供給することで、75～85℃で17 %RHの高温低湿空気が得られている。このように吸着材蓄熱システムは、本実証試験のような運転条件の場合、蓄熱温度以上の放熱温度を得ることが可能であり、ヒートポンプのような昇温機能を持つことが確認できた。

なお、放熱運転において、蓄熱槽出口の空気温度が運転時間とともに低下するのは、蓄熱材ハスクレイの吸着等温線の特性に起因し、水分吸着量が飽和に近づいたことによるものである。また、蓄熱運転後半において、蓄熱槽出口の空気温度が上昇するのは、蓄熱材の乾燥が完了に近づいていることを示している。

このように定置型実証試験設備では、2つの蓄熱槽での蓄熱運転と放熱運転が交互に繰り返されるような、蓄放熱運転が行われた。

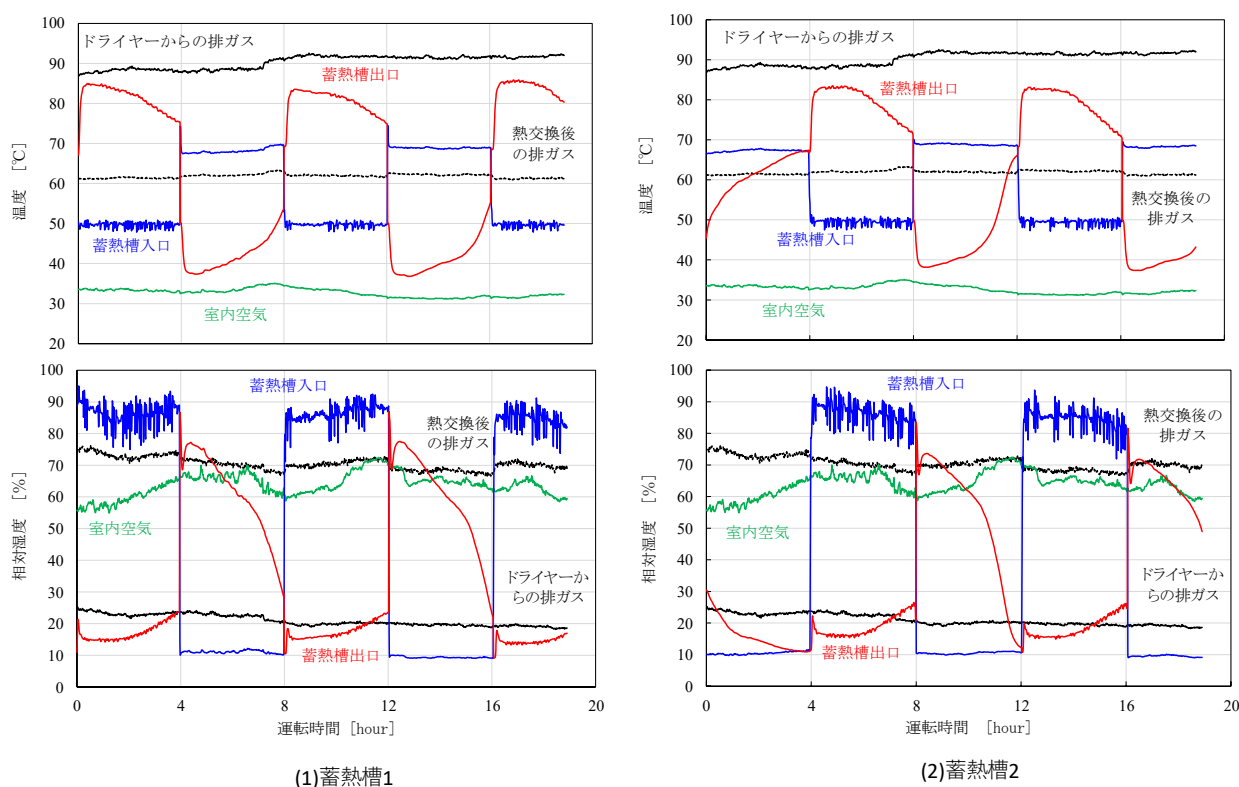


図 10 定置型実証試験の温湿度の経時変化

6. オフライン熱輸送型システムの実証試験

オフライン蓄放熱実証試験は図 11 に示すように、日野自動車羽村工場周辺で実施された。蓄熱は羽村工場のコージェネレーションシステム (CGS) の排熱を利用し、放熱サイト (1) の羽村市スイミングセンターと、放熱サイト (2) の羽村工場の産業空調設備 (塗装工程のリサイクル空調) に高温低湿空気を供給した。図のように、放熱サイト (1) では蓄熱槽が搬送トレーラーで運搬され、その実証試験は羽村市の支援を受けて実施した。また、放熱サイト (2) では羽村工場内で資材や完成部品の運搬用に使用されている小型牽引車を利用して蓄熱槽が搬送された。

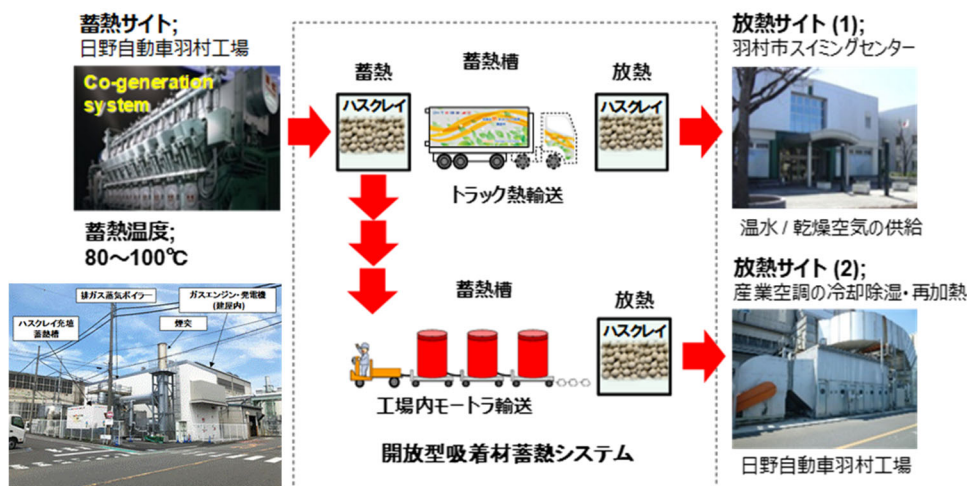


図 11 オフライン熱輸送型システムの概要

写真 2 に蓄熱槽と搬送トレーラーの外観を示す。蓄熱槽には、蓄熱材としてハスクレイ造粒体が乾燥重量で 5.5 ton 充填されている。この蓄熱槽を 20 フィート海上コンテナ用トレーラー台車に積載し、CGS 設備から約 2 km 離れた羽村市スイミングセンターへ大型トレーラーにより輸送した。トレーラーヘッドと台車は着脱可能であり、蓄放熱の運転中に車両が離脱できるため 1 台の車両で複数台の蓄熱槽も運搬可能である。ここでの蓄熱槽の内部には粒子対流の抑制法³⁴⁾などの開発技術が採用された。

写真 3 に蓄熱槽と搬送用の小型牽引車の外観を示す。この蓄熱槽には、蓄熱材としてハスクレイ造粒体が乾燥重量で 2.2ton 充填されている。排熱源の CGS から数百 m 離れた塗装工程の空調設備までは、小型牽引車（トラクター）で運搬した。

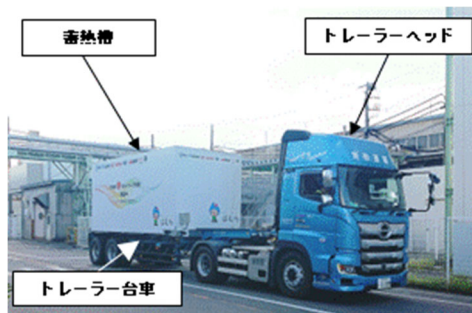


写真 2 蓄熱槽と搬送トレーラー

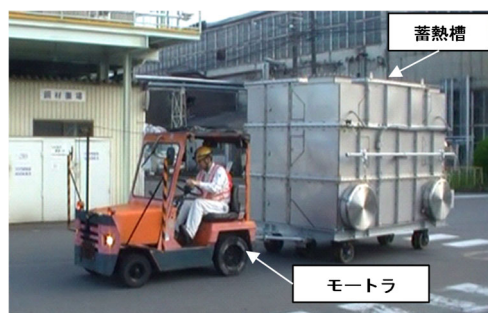


写真 3 蓄熱槽と小型牽引車(モートル)

6.1 蓄熱実証試験

図 12 に蓄熱サイトの実証設備の系統図を示す。図の左側の系統が今回設置した熱回収・蓄熱設備であり、右側の系統が CGS の既存設備である。CGS の既存設備はガスエンジン、排ガス蒸気ボイラ、ポンプ、配管・ダクトなどから構成されていた。また、熱回収・蓄熱設備は、空気／水と空気／空気の熱交換器、ポンプ、配管・ダクトなどから成る蓄熱システム、接続ユニット、および蓄熱槽から構成された。

蓄熱運転では図 12 の左上のファンによって外気が蓄熱システムに送られ、空気／水熱交換器で昇温され、さらに空気／空気熱交換器で昇温され、100°C 程度の空気が蓄熱槽に供給された。空気／水熱交換器の温水は工場で熱利用後に、CGS 設備への戻り温水から分岐している。このように、通常の運転では使い切れない 88°C のジャケット温水と 100°C 以上の排ガスから熱回収し蓄熱した。ここで、蓄熱槽への供給空気の温度などの蓄熱運転制御は、CGS の既存設備の蒸気や温水の需要を優先し、追従して各種の運転制御が行われていた。なお、蓄熱槽と蓄熱／放熱設備との着脱を簡便且つ速やかに完了できる接続ユニットを開発し、着脱作業から運転開始までの作業を 1 人で、15 分以内で行えることを確認した。

図中の破線は前述の数値解析モデルによる蓄熱槽出口の空気温度の計算結果である。実測結果と比較して、蓄熱完了となる時間が短くなっている。これは、実際の蓄熱槽内では通気分布が発生しているためと考えられる。そこで、蓄熱材充填部で $\pm 5\%$ の通風量の偏り⁴⁸⁾が発生していると仮定して、3種類の風速(平均風速、平均風速 $+5\%$ 、平均風速 -5%)での蓄熱槽出口の計算結果を合成するような再計算を行った結果、図のように実測値とほぼ一致した。なお、通風量の偏りを考慮しない場合でも、安定に推移する蓄熱槽出口の温度レベルや蓄熱完了時間は推算できるので、本数値解析モデルは設計ツールとして活用できる。

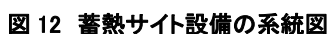


図 14 に羽村市スイミングセンター実証設備の系統図を示す。放熱設備は、蓄熱槽、空気／水熱交換器、ポンプ、配管、ダクトなどから構成された。図中では羽村市スイミングセンターの負荷側施設を、25m プール、プール天井内、プール室内、およびシャワー他に分けて模式的に示している。25m プールにはボイラにより、熱交換器を介して循環温水が供給される。浴槽などにはボイラや貯湯槽により温水が供給される。また、暖房時のプール天井内とプール室内には、ボイラや空調機・熱交換器により温風が供給される。放熱設備では図のように、蓄熱槽にプール室内の湿潤空気が供給されて、蓄熱槽内での吸湿・発熱反応で昇温した空気は、熱交換器を介してボイラ循環水やボイラ給水を昇温した。このように顕熱回収された空気は常温低湿状態になるため、プール天井内の換気やプール室内の暖房のために利用された。プール室内

図 15 に放熱運転時の空気温度の経時変化の一例を示す。プール室内の排気が蓄熱槽に供給されるので、図のように、蓄熱槽入口の空気は常温高湿である。運転開始直後の蓄熱槽出口の空気温度は、80℃以上と高温になった。ここで、25～30℃の蓄熱槽入口の空気温度からの大幅な昇温は、蓄熱槽内の吸着材の水分の吸着熱によるものであり、蓄熱槽出口空気の相対湿度は、図のように約 0%RH で推移した。また、蓄熱槽入口と出口の絶対湿度の差は、約 10g/kg(DA)程度であった。運転開始 1 時間後以降は、蓄熱槽出口の空気温度は 55℃以上で推移した。図中の熱交換器中間の空気温度は、ボイラ循環水との熱交換後の放熱空気温度である。また、熱交換器出口の空気温度は給水との熱交換後の放熱空気温度であり、給水ポンプの起動停止により、熱交換器出口の空気温度は変動した。当日は外気よりも熱交換器出口の空気が高温であったため、プール室内の暖房用空気として供給された。

The figure consists of three vertically stacked line graphs sharing a common x-axis representing time in hours from 0 to 10.

- Top Graph:** The y-axis is Air Temperature [°C] ranging from 10 to 100. It shows four data series:
 - 蓄熱槽出口 (実測)** (Red solid line): Actual outlet temperature, peaking at ~85°C at 0.5h and then gradually decreasing.
 - 蓄熱槽出口 (計算)** (Magenta dashed line): Calculated outlet temperature, peaking at ~95°C at 0.5h and following a similar downward trend.
 - 熱交換器中間** (Green solid line): Intermediate heat exchanger temperature, rising to ~55°C and showing frequent sharp drops.
 - 熱交換器出口** (Black solid line): Heat exchanger outlet temperature, showing very sharp, frequent drops between 20°C and 55°C.
 - 蓄熱槽入口** (Blue solid line): Inlet temperature, remaining relatively stable around 20-30°C.
- Middle Graph:** The y-axis is Air Absolute Humidity [g(DA)] ranging from 0 to 20. It shows three data series:
 - 蓄熱槽入口** (Blue solid line): Inlet absolute humidity, starting at ~14 g(DA) and decreasing to ~10 g(DA) with periodic spikes.
 - 蓄熱槽出口 (計算)** (Magenta dashed line): Calculated outlet absolute humidity, starting at ~5 g(DA) and decreasing to near 0 g(DA).
 - 蓄熱槽出口 (実測)** (Red solid line): Actual outlet absolute humidity, starting at ~2 g(DA) and increasing to ~7 g(DA) after 4 hours.
- Bottom Graph:** The y-axis is Air Relative Humidity [%RH] ranging from 0 to 80. It shows three data series:
 - 蓄熱槽入口** (Blue solid line): Inlet relative humidity, starting at ~75%RH, dropping to ~25%RH, and showing periodic spikes up to ~50%RH.
 - 蓄熱槽出口 (計算)** (Magenta dashed line): Calculated outlet relative humidity, remaining near 0%RH until 4 hours, then rising to ~15%RH.
 - 蓄熱槽出口 (実測)** (Red solid line): Actual outlet relative humidity, remaining near 0%RH until 4 hours, then rising to ~10%RH.

[illegible]

6.3 オフライン熱輸送の季節間評価

今回の実証試験では蓄熱側および放熱側の都合上、蓄熱運転終了から放熱運転開始まで 6 時間以上経過しているが、90%以上の再生効率が確認できた。また、冬期に再生効率が低下しないことも確認できた。

高砂熱学イノベーションセンター報 No.38 2024.

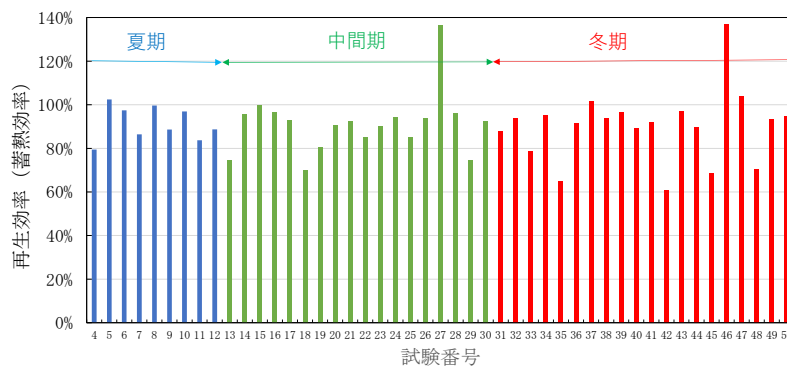


図 16 オフライン熱輸送の季節間評価

6.4 塗装工程での除湿利用の実証試験

前述の図 11 に示すように羽村工場のコージェネレーションシステム（CGS）の排熱を利用し、羽村工場の産業空調設備（塗装工程のリサイクル空調）に高温低湿空気を供給した。

6.4.1 塗装工程での放熱利用

図 17 に塗装工程の空調設備および実証設備の系統図を示す。空調対象はフレッシュブースとリサイクルブースに分けられ、図では模式的に示している。外気を既設の空調機（外調機）で温湿度を調節し、フレッシュブースに給気する。このフレッシュブースの排気は、塗装ミスト等を除去するためにブース下部で散水され、相対湿度が 80～90%RH の高湿になっている。そのため、フレッシュブースの排気をリサイクル空調機で冷却除湿・加熱し、リサイクルブースに給気する。図のように今回設置した放熱設備では、高温高湿空気であるフレッシュブースの排気の一部を蓄熱槽に供給し、槽内で吸湿・発熱反応により昇温した高温低湿度の空気がリサイクル空調機に戻される。空調機での冷却除湿と加熱のための冷水と温水のエネルギー消費量は非常に大きく、ここではそのエネルギーの大幅な低減が見込まれた。

写真 4 に羽村工場内の塗装工程のリサイクルブース用空調設備の外観を示す。写真左側は CGS から輸送されていた、ハスクレイ充填の蓄熱槽である。写真右側の既設の空調機ユニットの内部には、各種フィルター、冷水コイル、温水コイルが設置されている。フィルター下流の高湿空気の一部を蓄熱槽に供給し、蓄熱槽からの空気を空調機に戻すための矩形ダクトが、写真のように増設された。

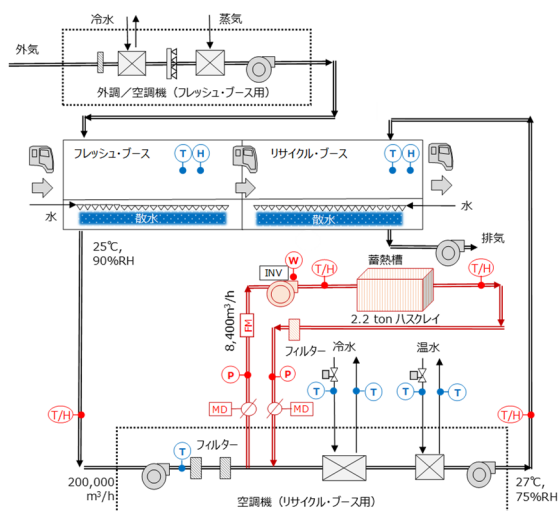


図 17 塗装工程の放熱サイト設備の系統図

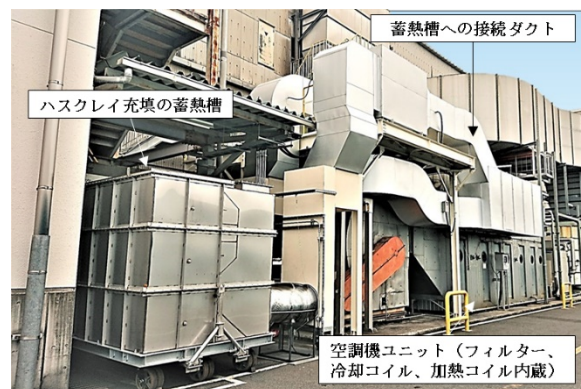


写真 4 リサイクルブース用空調設備

6.4.2 塗装工程での放熱実証試験

図 18 にリサイクルブース用空調機の冷温水熱量、蓄熱槽への給気ファンの回転数、リサイクルブースの温湿度、放熱運転時の蓄熱槽出口空氣の温湿度の経時変化の一例を示す。図のように 17:32~21:00 の 3 時間半の放熱運転が行われた。リサイクルブース用空調機には常にフレッシュブース下で加湿冷却された空氣が供給されるので、リサイクルブース用空調機の入口空氣の温湿度に大きな変動はない。本蓄熱システムの放熱運転の開始時と運転停止時には、蓄熱槽に分岐する風量を徐々に立上げる制御と立下げる運転制御が必要である。このために蓄熱槽への分岐前と蓄熱槽出口の空氣の温湿度を計測し、メインダクトへの合流後の空氣の温湿度を演算して蓄熱槽に分岐する風量を自動制御するシステムを構築した。とくにハスクレイの特性として、図 18 の下図のように、放熱運転の開始直後は急激に温度が上昇するため、少ない風量でも混合後の空氣の温度上昇が起こり、温水負荷が下がって温水の消費熱量が先に減少し始めた。その後、図 18 の上図のファン回転数が示すように蓄熱槽からの高温低湿空氣の風量の増加に伴い、混合後の空氣の湿度が下がり、冷水の消費熱量も減少し始めた。放熱運転開始後 30 分程の 18:00 頃に定常運転となり、温水流量はゼロとなって使用された温水熱量もゼロとなった。また、冷水流量と冷水熱量は、極小で推移した。その約 2 時間後の 20:00 頃に、蓄熱槽出口空氣の湿度が所定の値（20%RH）になったところで、本システムが停止動作に入り、図 18 の上図のファン回転数が示すように、蓄熱槽に分岐する風量が減らされて行き、約 1 時間かけて 21:00 過ぎに本システムが停止した。このような放熱運転の後の通常運転時では、図のように冷水熱量は約 180 kW でほぼ一定であり、冷温水熱量の合計は約 400 kW でほぼ一定であった。本システムの放熱運転では定常時には、通常運転時の約 90%の省エネルギーが実現でき、システム立上げと立下げ期間を含めても通常運転時の約 70%の省エネルギーが実現できた。

図 19 に放熱運転における蓄熱槽廻りの空氣温湿度の経時変化の一例を示す。空氣流量は 65~210 m³/min で平均 170 m³/min（20℃換算）であり、前述の図 18 の上図のファン回転数が示すように制御されている。フレッシュブース下の散水によって蓄熱槽入口の空氣は、図のように約 22℃で約 80%RH の常温高温の状態である。運転開始直後の蓄熱槽出口の空氣温度は、80℃以上と高温になった。ここで、約 22℃の蓄熱槽入口の空氣温度からの大幅な昇温は、蓄熱槽内のハスクレイ吸着材の水分の吸着熱によるものであり、蓄熱槽出口空氣の相対湿度は図のように約 0%RH で推移した。また、蓄熱槽入口と出口の絶対湿度の差は約 12g/kg(DA)であった。運転開始 0.5 時間後以降は、蓄熱槽出口の空氣温度は約 60℃から約 40℃に徐々に低下し、湿度は徐々に増加して放熱過程が推移した。約 3.3 時間後に蓄熱槽出口と蓄熱槽入口との温度差が所定の値（ここでは 15℃以下）に達して、放熱運転が終了した。図中の破線は前述の数値解析モデルによる蓄熱槽出口空氣の温湿度の計算結果である。放熱運転の開始直後の蓄熱槽出口の最高温度などには実測値と計算値の相違が見られるものの、蓄熱槽出口の温度レベルや放熱完了時間は推算できるので、本数値解析モデルは設計ツールとして活用できることを確認した。

なお、図のように蓄熱槽の出口空氣は極低湿であるため、メインダクトに比べて分岐ダクトが小口径でよく、既設設備を施工する上で、有利な点であると考ええる。

6.4.3 CO₂とコスト削減効果

図 20 に本システムが 1 回稼働した場合の CO₂削減効果を示す。既設設備のみで稼働した場合のエネルギー消費を図 18 の平均値とし、本システム稼働時間に相当する CO₂排出量を 100%とした。本システム稼働における冷水および温水のエネルギー消費量に相当する CO₂排出量は 28%までに抑制された。ただし、本システム稼働によるファンなどの消費電力や小型牽引車の燃料消費による CO₂排出量は 15%に相当する。そのため、本システム稼働による正味の CO₂削減効果は、既設設備のみが稼働している状態と比較して 57%となった。

また、エネルギー費用についても、同様に削減効果を試算した結果、本システムを場内運搬で除湿利用として導入した際の投資回収年数は 8 年以下になる見通しを得た。ただし、輸送に係る人件費は含まれていない。

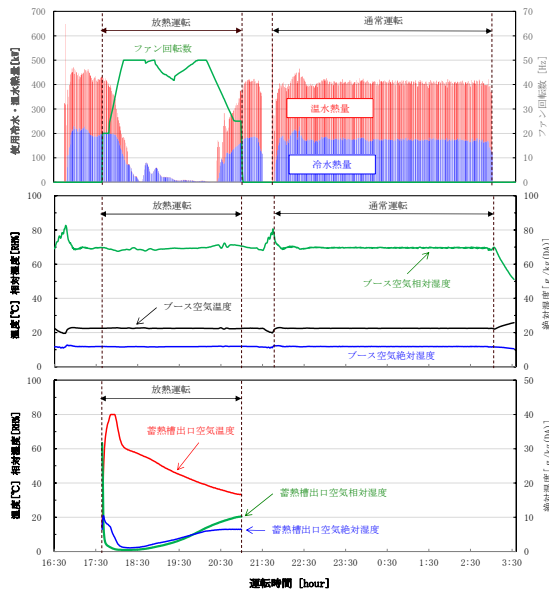


図 18 リサイクルブース空調機の消費エネルギーの経時変化

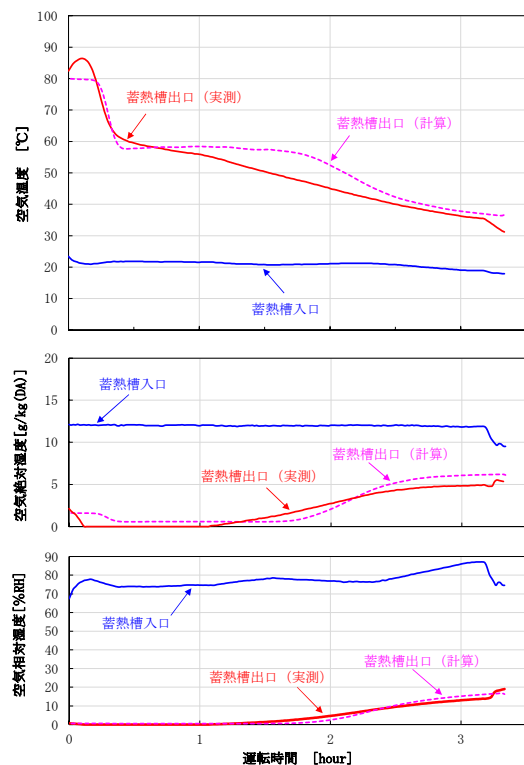


図 19 放熱運転の経時変化

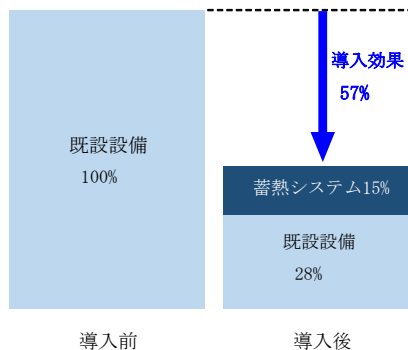


図 20 除湿エネルギーの省 CO₂ 評価

7. おわりに

以上では、NEDO の戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいて開発・実証してきたハスクレイ吸着材蓄熱を対象に、(公社) 空気調和・衛生工学会の論文集に掲載された内容を中心にして紹介した。なお、この論文 (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の 6 連報²⁰⁻²⁵⁾) は、空気調和・衛生工学会の第 62 回学会賞の論文賞 (学術論文部門) を受賞した⁵⁵⁾。

NEDO プロジェクトの後に我々は、ハスクレイだけでなくゼオライトも用いた、吸着材蓄熱システム「メガストック®」として市場に展開してきた。その結果、電子機器で使用される積層セラミックチップコンデンサの主要製造拠点である TDK (株) 本荘工場西サイト (秋田県由利本荘市) での実システムの導入に至った⁵⁶⁻⁵⁸⁾。

2050年のカーボンニュートラルに向けて、電化・水素化とともに省エネルギーが重要であり、吸着材蓄熱システム「メガストック®」による排熱利用の拡大はCO₂排出量の削減に直接的に寄与できる。今後、各種の未利用熱や排熱が有効活用されるよう、吸着材蓄熱システム「メガストック®」の市場展開を進めたい。

謝辞

本報の成果の一部は、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」の助成事業(JPNP12004)の内、「80℃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」、フェーズ:インキュベーション研究開発及び実用化開発、期間:2014年12月17日~2018年3月31日と、「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」、フェーズ:実証開発、期間:2018年7月18日~2020年2月28日の結果、得られたものである。NEDOをはじめ、関係の皆様には感謝申し上げます。

文 献

- 1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター, 産業分野の排熱実態調査報告書, (accessed Apr. 30th 2020), <https://thermatdb.secsite.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf>
- 2) 平野聡: 工場における未利用熱の排出・活用状況, クリーンエネルギー, 日本工業出版, 2020.8.
- 3) 小原春彦: 未利用熱エネルギーの革新的活用技術開発プロジェクトについて, 冷凍, 日本冷凍空調学会, 96(1121), 201(2021).
- 4) 定塚徹治ほか: 潜熱蓄熱材を用いたオフライン熱供給システムの開発, 日本機械学会関東支部第14期総会講演会, 59(2008).
- 5) 岩井良博ほか: 潜熱蓄熱システムを活用した排熱利用技術, 冷凍誌, 88(1025), 191(2013).
- 6) 高橋和雄ほか: 直接接触潜熱蓄熱技術を用いた熱輸送システムの開発, 神戸製鋼技報, Vol. 56 No. 2, pp.10-14 (2006.8)
- 7) 堀井雄介ほか: 化学蓄熱材を用いたオフライン熱輸送システムの開発, クリーンエネルギー, 33(1), 38(2020).
- 8) 畑田直行ほか: 化学蓄熱・ヒートポンプシステムの実用化に向けて, 冷凍, 93 (1094), 834 (2018.12).
- 9) 加藤之貴: 化学反応を用いた熱エネルギー貯蔵の基礎と応用, 冷凍, 92 (1077), 519 (2017.7).
- 10) 潜熱蓄熱・化学蓄熱・潜熱輸送の最前線, 鈴木洋, シーエムシー出版, 2016.11.18.
- 11) 稲田雄大, 射場本忠彦, 百田真史, 宮良拓百, 釘持尚紀: 地域冷暖房に用いる氷水搬送技術の実用化に関する研究ー配管設計用データの拡充および計測・制御技術の提案ー, 空衛論, 227, 19(2016).
- 12) 今成岳人, 亀谷茂樹, 加藤徹: 街区における次世代エネルギーネットワーク評価ツールに関する研究, 空衛論, 228, 1(2016).
- 13) 高貫悠右, 新井研人, 長井達夫, 三原邦彰, 小野永吉, 荒井良延: 地域熱供給システムにおける負荷特性と未利用エネルギーのマッチング評価指標の提案, 空衛論, 238, 9(2017).
- 14) 池田伸太郎, 大岡龍三: 地域エネルギーシステムの最適化における学習的探索手法と機械学習の複合アルゴリズムの開発, 第1報ー蓄熱槽を含む地域冷暖房システムにおける最適運用計画決定手法ー, 空衛論, 241, 11(2017).
- 15) ハンドブック次世代技術と熱, 矢部彰ほか, 日本機械学会, 技報堂出版(株), 1993.
- 16) コージェネ革命, 柏木孝夫, 日経 BP コンサルティング, 日経 BP マーケティング, 2015.
- 17) 児玉昭雄, 大蔵将史: 太陽熱利用デシカント空調システムにおける温水器集熱面積および循環水量の影響, 空気調和・衛生工学会論文集, 31, 116, 43 (2007).
- 18) 児玉昭雄, 大蔵将史: 太陽熱利用デシカント空調システムに対する室内空調負荷および喚起回数の影響, 空気調和・衛生工学会論文集, 32, 127, 11 (2007).
- 19) 鵜飼真貴子, 篠田拓也, 加藤和幸, 田中英紀, 吉永美香, 奥宮正哉: 事務所ビルにおける太陽熱冷暖房システム

の実証試験：冷暖房運転の解析と年間性能評価，空気調和・衛生工学会論文集 37，187，1（2012）。

- 20) 鎌田美志，川上理亮，大山孝政，松田聡，丸毛謙次，山内一正，宮原英隆，鈴木正哉，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，45 巻，281 号，9-17，2020。
- 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，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時の発熱量について，空気調和・衛生工学会論文集，45 巻，285 号，1-8，2020。
- 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，46 巻，290 号，39-46，2021。
- 23) 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—一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，46 巻，297 号，31-38，2021。
- 24) 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—オフライン熱輸送型システムの実証試験，空気調和・衛生工学会論文集，47 巻，301 号，9-16，2022。
- 25) 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 6 報—塗装工程での除湿利用の実証試験，空気調和・衛生工学会論文集，47 巻，308 号，11-18，2022。
- 26) 電気新聞「低温排熱で高効率蓄熱」，2016 年 8 月 17 日。
- 27) 山内一正，馬込英明，井守正隆，川上理亮，谷野正幸：100℃以下の廃熱利用が可能な吸着材蓄熱システムの開発，自動車技術，（公社）自動車技術会，2017.7。
- 28) 川上理亮，鎌田美志，大山孝政，鈴木美穂，谷野正幸，宮原英隆，平井恭正，川村正行，小室匠，名和博之，丸毛謙次，山内一正，馬込英明，井守正隆，鈴木正哉，森本和也，松田聡，鈴木善三，永井恒輝：100℃以下の廃熱を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システムの開発，クリーンエネルギー，日本工業出版，2017.8。
- 29) 川上理亮，鎌田美志，鈴木美穂，谷野正幸，大山孝政，宮原英隆，平井恭正，川村正行，小室匠，名和博之，丸毛謙次，山内一正，馬込英明，井守正隆，鈴木正哉，森本和也，松田聡，鈴木善三：100℃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，建築設備と配管工事，日本工業出版，2017.8。
- 30) 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）。
- 31) 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）。
- 32) 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）。
- 33) 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）。
- 34) 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）。
- 35) 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）。
- 36) 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）。

- 37) 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ー第3報ー実際の工場・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).
- 38) 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℃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8回潜熱工学シンポジウム, 潜熱工学研究会, 2018.12.3-4.
- 39) 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ー吸脱着の過渡特性, 化学工学会第84年会, F302, (2019).
- 40) 川上理亮・鎌田美志・鈴木美穂・中田拓司・谷野正幸: 100℃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, 「ヒートポンプとその応用」, ヒートポンプ研究会, 11(2019).
- 41) 鎌田美志, 川上理亮, 鈴木美穂, 中田拓司, 谷野正幸, 宮原英隆, 平井恭正, 松永克也, 久保滋, 原田浩司, 柿内秀介, 名和博之, 山内一正, 井守正隆, 岩下真輝, 鈴木正哉, 松田聡, 森本和也, 鈴木善三: 100℃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, クリーンエネルギー, 29(1), 38(2020).
- 42) 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)).
- 43) 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)).
- 44) 鎌田美志, 鈴木美穂, 川上理亮, 谷野正幸, 宮原英隆, 松永克也, 久保滋, 名和博之, 丸毛謙次, 山内一正, 井守正隆, 鈴木正哉, 松田聡, 低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システムの実証試験<定置型蓄熱システムおよびトレーラー型蓄熱によるオフライン熱輸送の実証試験>, 建築設備と配管工事, 日本工業出版, 2020.9.
- 45) 谷野正幸, 川上理亮, 鎌田美志, 宮原英隆, 松永克也, 山内一正, 井守正隆, 名和博之, 鈴木正哉, 松田聡, ハスクレイを用いた吸着材蓄熱システムの開発, 動力エネルギーシステム部門ニュースレター, 日本機械学会, 2020.9.15.
- 46) 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 山内一正, 井守正隆, 丸毛謙次, 宮原英隆, 松永克也, 鈴木正哉, 松田聡, 100℃以下の低温廃熱を利用可能なハスクレイ吸着材蓄熱・オフライン熱輸送システムの実証開発, クリーンエネルギー, 日本工業出版, 2020.9.
- 47) 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ー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)).
- 48) 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ー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)).
- 49) 川上理亮, 鎌田美志, 谷野正幸, 宮原英隆, 佐藤敦史, 名和博之, 山内一正, 井守正隆, 鈴木正哉, 松田聡: 100℃程度の低温廃熱を利用可能な吸着材蓄熱システム, BE 建築設備 2021年3月号, 建築設備総合協会, (2021.3).
- 50) 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, 鈴木正哉: 100℃程度の低温廃熱を利用する吸着材蓄熱システムの開発ーコンテナ型蓄熱槽によるオフライン熱輸送の実証試験ー, 第31回環境工学総合シンポジウム 2021, 日本機械学会, 423, (2021.7.8-9).
- 51) 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)).
- 52) 川上理亮: 活用困難な低温排熱を再利用する吸着材蓄熱システム「メガストック」月刊省エネルギー Vol. 73 省エネルギーセンター, (2021.12).
- 53) 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.
- 54) 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

- 55) 谷野正幸：第 62 回 学会賞・論文賞受賞講演「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」，令和 6 年空気調和・衛生工学会大会，(2024.9).
- 56) 大山孝政，谷野正幸，川上理亮，鎌田美志，中田拓司，福島史幸，千場悠之介：低温排熱を利用した吸着材蓄熱システム，空気調和・衛生工学会誌令和 6 年 11 月号，98(11)，19(2024).
- 57) 高砂熱学ニュースリリース：https://www.tte-net.com/article_source/data/news/detail/2024/678.html
- 58) TDK ニュースリリース：https://www.tdk.com/ja/news_center/press/20240318_01.html

ABSTRACT

Our Mega Stock, an adsorbent thermal storage system, received the Best Paper Award (Academic Paper Division) at the 62nd Annual Conference of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE) Awards. The award was given to a series of six papers “Development of Open-type Adsorption Thermal Storage Heat Pump System Applying HAS-Clay” published in the Transactions of the SHASE. Here is an overview of the technical content of the papers. We would like to expand the use of waste heat by developing this Mega Stock in the market, thereby reducing CO₂ emissions, and contributing to the carbon neutrality of Japan.
