

【導入事例】

低温排熱を利用した吸着材蓄熱システムの導入事例※

大山孝政・谷野正幸・川上理亮
鎌田美志・中田拓司
福島史幸^{*1}・千場悠之介^{*1}

Introduction Example of Adsorption Thermal Storage System Using Low-temperature Exhaust Heat

Takamasa Oyama・Masayuki Tanino・Yoshiaki Kawakami
Haruyuki Kamata・Takuji Nakata
Fumiyuki Fukushima・Yuunosuke Senba

我々は低温排熱が利用できる吸着材蓄熱システムを開発してきた。このシステムでは吸着反応熱を利用するため、原理的に放熱ロスはなく、高密度な蓄熱が可能である。2014年から実験的に吸着材蓄熱槽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てきた。2023年12月にはオフライン熱輸送システムを稼働中の工場に実導入した。本報では、吸着材蓄熱システムの概要、吸着材蓄熱システムの開発、及び導入事例について紹介する。

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルに向けて、水素・電化に加えて、排熱利用が重要になってきている。しかしながら、我が国の既存の工場から放出されている200℃未満の排熱は図1の調査結果¹⁾の通り、大部分が未利用のまま捨てられているのが現状である。高温排熱は発電・蒸気利用が推進されているが、200℃未満の排熱は発生場所における用途が限定されることから、使い道が限られてきた。そこで、当社は図2に示す低温排熱を空間的に異なる利用先までトラック等で運搬するオフライン熱輸送システムに着目した。さらに、当社は、従来型のオフライン熱輸送システムの課題解決のため、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をベースに、2014年から(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℃程度の低温排熱が利用可能な吸着材蓄熱システムの研究開発を共同実施してきた²⁻⁷⁾。本報では、吸着材蓄熱システムの概要、吸着材蓄熱システムの開発及び導入事例について紹介する。

※ 本論文は、文献2)～7)を加筆修正したものである。

^{*1} エンジニアリング事業部 産業設備1部

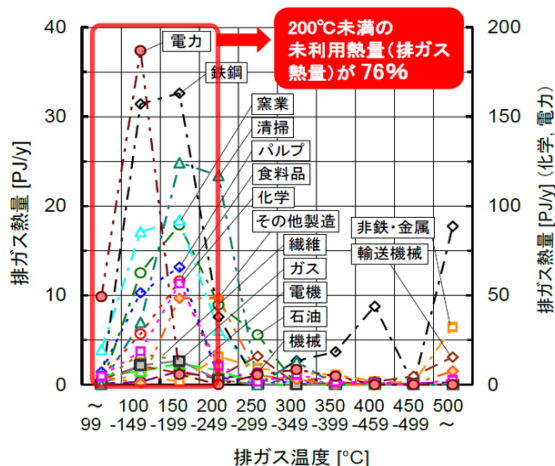


図1 工場での廃熱量¹⁾

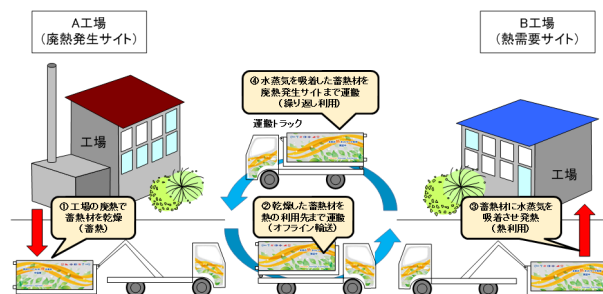


図2 オフライン熱輸送システムのイメージ図

2. 吸着材蓄熱システムの概要

従来型のオフライン熱輸送システムでは、糖類等の融解熱を利用する固液相変化材（以下、PCM）を蓄熱材として用いているが、蓄熱密度が低いため重量や容積が大きくなること、PCMの固液相変化時の潜熱を利用するため蓄放熱温度がPCMの相変化温度（融点）に限定されること、輸送時には蓄熱槽からの放熱でPCMが一部相変化し潜熱ロスが発生すること等が課題となっていた。そこで、これらの課題を解決するため、我々は吸着材蓄熱システム（以下、当システム）の開発に取り組んできた。図3に当システムの蓄放熱運転を模式的に示す。蓄熱時は熱（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。このように蓄熱時は水分脱着、放熱時は水分吸着で、蓄熱利用というよりは水分移動に伴う発熱である。よって、原理的に外気との温度差に係る熱ロスは発生しない。また、蓄熱槽内へ水分の流入がないように密閉できれば長期間の保存も可能である。相変化で蓄熱・放熱する方式ではないので、熱利用温度域が限定されないといった特長も有している。なお、放熱運転にて水分を吸着しきった吸着材は、再度蓄熱運転を行い乾燥させることで繰り返し利用が可能である。図4に当システムで使用している吸着材の外観と使用温度帯を示す。当システムで使用している吸着材はハスクレイとゼオライトの2種類で、排熱の温度帯によって使い分けている。

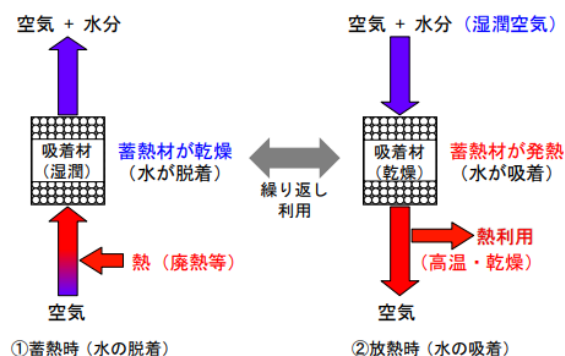


図3 吸着材蓄熱システムの蓄放熱運転



図4 吸着材の種類と使用温度帯

3. 吸着材蓄熱システムの開発

3.1 小型装置を用いた基礎的な特性の確認

2014 年～2015 年の NEDO 助成事業(インキュベーション研究開発フェーズ)では、**図 5** に示す 10kg 級のハスクレイ造粒体での蓄熱材充填槽を用いて、水蒸気の吸脱着の基礎的な特性等を検討した。その結果から、従来型のオフライン熱輸送システムの 2 倍以上となる蓄熱密度 500 kJ/L 以上の実現性を確認した^{2,3)}。また、ここで取得したデータを基に、**図 6** に示す設計ツールを開発した。この設計ツールは、数値解析モデル²⁾を表計算ソフトベースでツール化したものである。



図 5 試験装置の外観

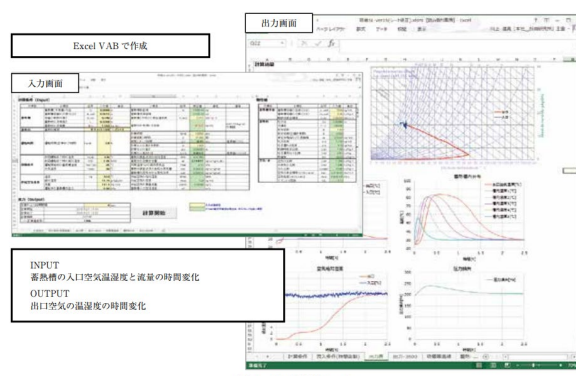


図 6 吸着材蓄熱システムの設計ツール

3.2 蓄熱槽の実際の工場での性能評価

2015 年～2017 年の NEDO 助成事業(実用化開発フェーズ)では、蓄熱槽内の風量分配、圧力損失 1kPa 以下と蓄熱密度 500 kJ/L 以上を同時に達成できる、2ton 級蓄熱槽(**図 7**)の内部構造等の仕様を確立した。また、**図 7** に示すトラックを用いて、日野自動車羽村工場(東京都羽村市)内にある塗装工程での排気脱臭装置からの排熱を蓄熱した後、日野自動車新田工場(群馬県太田市)の生産プロセスで放熱する実証試験を実施した⁴⁾。この実証試験から、蓄熱槽およびシステムの蓄放熱特性を評価し、実際の工場における動力設備の削減効果を確認した。



図 7 トラック搭載時の 2ton 級蓄熱槽の外観

3.3 定置型及びオフライン熱輸送型の実証試験

2018 年～2020 年の NEDO 助成事業(実証開発フェーズ)では、石原産業四日市工場(以下、四日市工場)において定置型蓄熱槽での産業プロセスに対する実証試験と、日野自動車羽村工場(以下、羽村工場)周辺においてオフライン熱輸送型での実証試験を行った⁵⁻⁷⁾。各実証サイトに構築した設備の設計には、前述の設計

ツールを使用した。各実証サイトのスケールイメージとして、蓄熱槽に充填し使用された蓄熱材量を表 1 に示す。

表 1 各実証サイトでの蓄熱槽への蓄熱材量

種類	蓄熱	放熱	蓄熱材量 ton	台数
定置型蓄熱システム	石原産業四日市工場 産業プロセス		2.2	2
オフライン熱輸送型蓄熱システム	日野自動車 羽村工場 CGS	羽村市 スイミングセンター	5.5	1
		日野自動車羽村 工場塗装工程	2.2	1

(1)定置型蓄熱システムの実証試験

図 8 (a)、(b) に、四日市工場における実証試験の概要を示す。酸化チタン製造工程における乾燥ラインで実証試験を行った。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負荷低減のために、ラインへの給気に蓄熱槽からの放熱空気を供給した。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。その結果、ヒートポンプのような蓄熱温度以上に放熱温度を昇温する機能を付加できること、バッチ運転制御によって連続的・安定的な熱供給を確認した。

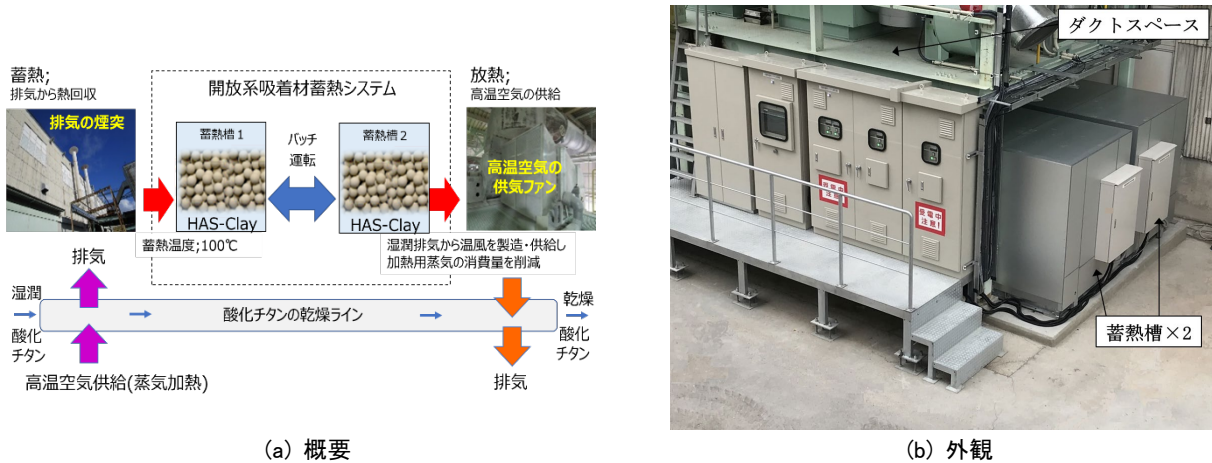


図 8 定置型蓄熱システムの実証試験

(2)オフライン熱輸送型蓄熱システムの実証試験

図 9 に、羽村工場周辺における実証試験の概要を示す。羽村工場内のコージェネレーションシステム (CGS) の排熱を蓄熱し、羽村市スイミングセンターに高温低湿空気を供給して既設ボイラ燃料の消費量を削減した。また、羽村工場内の塗装工程の産業空調設備にも高温低湿空気を供給して空調機で使用する冷水と温水の消費量を削減した。

図 10 に蓄熱サイトの実証設備の系統図を示す。羽村工場の CGS の蓄熱設備では、100℃以上の排ガスと 88℃のジャケット温水から熱回収し、蓄熱材に蓄熱した。

図 11 (a)、(b) に羽村市スイミングセンターの実証設備の系統図と蓄熱槽と搬送用の大型トレーラーの外観をそれぞれ示す。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 2km 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。輸送後、蓄熱槽にプール室内の湿潤空気が供給され、蓄熱槽内での吸湿・発熱反応で昇温した空気は、間接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。その結果、既設ボイラ燃料の消費量が削減された。このように顕熱回収された空

気は常温低湿状態になったため、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。とくに、プール室内とプール天井内では結露防止の効果が期待され、実際に結露が防止されたが、それを経済的に評価することは難しかった。

図 12 (a)、(b) に羽村工場内の塗装工程の産業空調設備における実証設備の系統図と蓄熱槽と搬送用の小型けん引車の外観をそれぞれ示す。CGS 設備から数百 m 離れた塗装工程の空調設備までは、小型けん引車で運搬した。この小型けん引車は通常、場内で資材や完成部品の運搬用に使用されている。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、塗装ミストなどを除去するためブース下部で散水され、相対湿度が 90%RH と高湿になっている。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。リサイクル空調機の内部には、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。図のように今回設置した放熱設備では、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た。実証試験の結果、エネルギー費は導入前と比較して 57% のコストダウンとなることを確認した。本実証設備の構築費用に基づき算出した単純投資回収年数は、8 年以下になる見通しを得た。ただし、運用コストには輸送の人件費は含まれていない。

定置型蓄熱システムやオフライン熱輸送システムの実証試験では、夏季・中間期・冬季におけるの経済性評価のための運用データや省エネルギー効果量等のデータを蓄積した。また、設計ツールを用いて予測した蓄放熱特性と実測した蓄放熱特性を比較した結果、当数値解析モデルは設計ツールとして活用できると判断した。

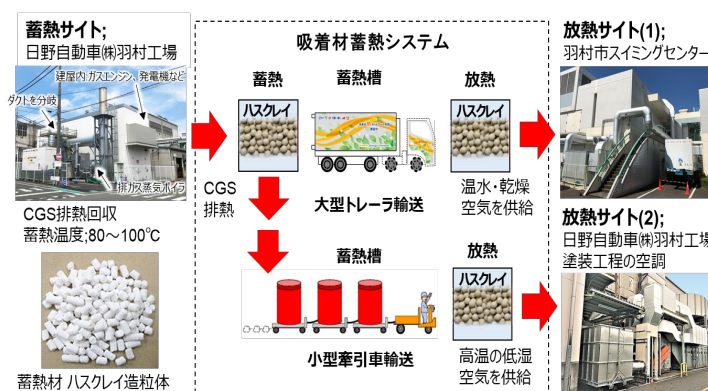


図 9 オフライン熱輸送型実証装置

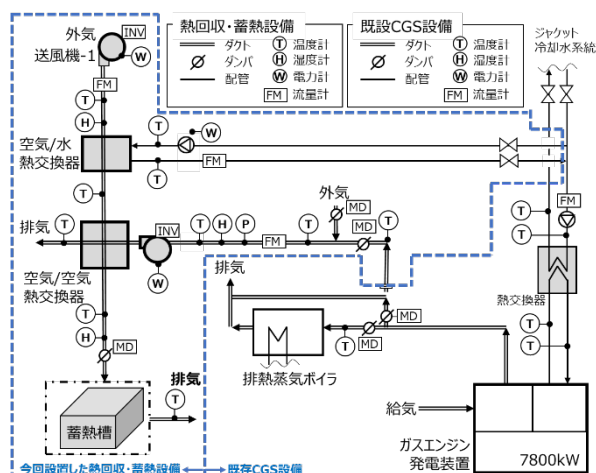
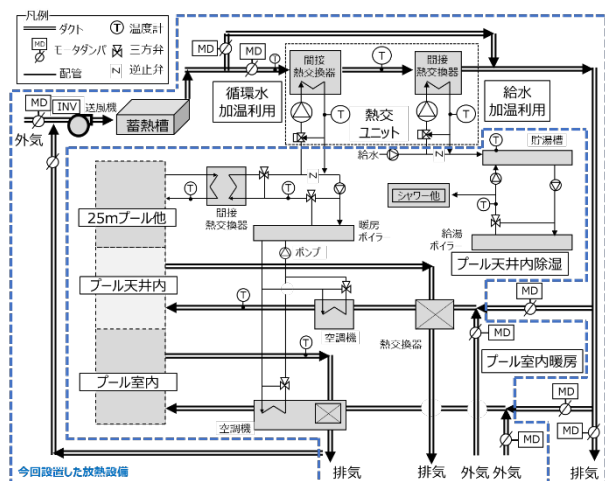
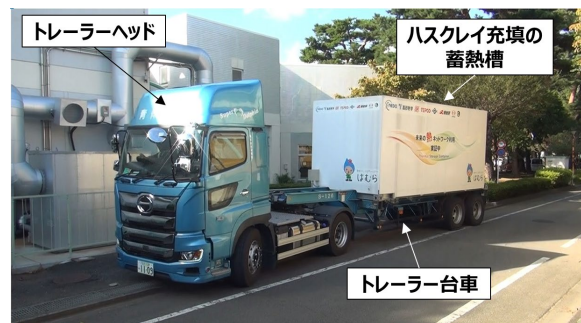


図 10 蓄熱サイトの実証設備の系統図

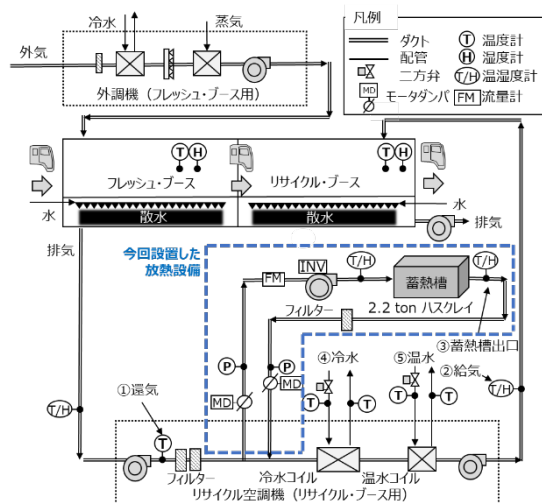


(a) 概要



(b) 蓄熱槽と搬送用大型トレーラー

図 11 羽村市スイミングセンターの実証設備



(a) 系統図



(b) 蓄熱槽と搬送用小型けん引車

図 12 塗装工程の空調設備および実証設備

4. 吸着材蓄熱システムの導入事例

4.1 建物概要

図 13 に建物外観と建物概要を示す。TDK の創業者齋藤憲三氏の出身地である秋田地区は、世界 30 か国以上に事業を展開している TDK の中心となる製造拠点である。中でも、本荘工場西サイトは、身の回りのあらゆる電子機器で使用する積層セラミックチップコンデンサの主要製造拠点で、従業員約 2,000 名が在籍する国内最大規模の製造・開発拠点である。



導入場所	TDKエレクトロニクス ファクトリーズ株式会社 本荘工場西サイト
所在地	秋田県由利本荘市
竣工	2008年3月
敷地面積	184,637m ²
延床面積	65,703m ²

図 13 建物外観と建物概要

4.2 導入システムの概要

積層セラミックチップコンデンサは、誘電体(セラミックシート)と内部電極(金属ペースト)が 100～1000 槽積み重ねられており、この製造過程において、セラミックシートを乾燥させる工程がある。乾燥にはボイラで作った蒸気の熱で加温した空気を利用しており、乾燥後の排気は熱燃焼式排ガス処理装置にて燃焼処理し、大気に放出していた。この製造工程は 24 時間、年間 364 日稼働しており、蓄熱燃焼式排ガス処理装置からの排気(100℃程度)も 24 時間、年間 364 日、大気に放出していた。そこで、蓄熱燃焼式排ガス処理装置からの排気をセラミックシートの乾燥用供給空気の加温補助に有効活用して、蒸気使用量及び CO₂ 排出量を削減することを目的として、今回新たに顕熱熱交換器を設置した。顕熱熱交換器を使用して蓄熱燃焼式排ガス処理装置の排気と外気を熱交換し、昇温した外気をセラミックシートの乾燥工程へ供給することで蒸気の使用量を削減する。さらに、それでも使い切れない排気は吸着材蓄熱システムを活用して、蓄熱槽に一旦熱を蓄熱して、工場内で近接するクリーンルームヘトラックで熱輸送し、外調機の加温の補助に使って蒸気使用量及び、CO₂ 排出量を抑制するシステムとした。図 14(a)にシステムの概要、(b)に蓄熱サイトの外観、(c)に放熱サイトの外観、(d)に搬送トラックの外観をそれぞれ示す。蓄熱槽は底辺 2.7m×1.7m の矩形型で高さは 1.4m の直方体であり、その内部に蓄熱材ゼオライトが乾燥質量で 1.6ton 充填されている。車両は積載荷重 4ton の汎用的な車種で、車両のアームで蓄熱槽の積み下ろしが可能な脱着装置付きコンテナ車とした。この設備は 2023 年 12 月末日に竣工し、2024 年 2 月から運用を開始している。顕熱熱交換器による熱回収は、24 時間、年間 364 日、吸着材蓄熱システムによる熱回収は、1 日 2 回、中間期～冬期に運用している。本設備導入による CO₂ 削減効果は、年間 249 ton-CO₂ と試算しており、本荘工場西サイト全体における CO₂ 排出量の約 5%に相当する。

また、図 15 に示すように、今後、TDK では、本荘工場西サイトで蓄熱した熱を、事業所内での利用だけでなく事業所外・地域へ供給する等、地域全体での熱利用を検討している。当システムは工場排熱などの広域熱利用システムとして活用が期待できることから、排熱の有効利用を検討する顧客へご紹介を続け、今後の排熱利用を広げることで脱炭素へ貢献していく予定である。

5. おわりに

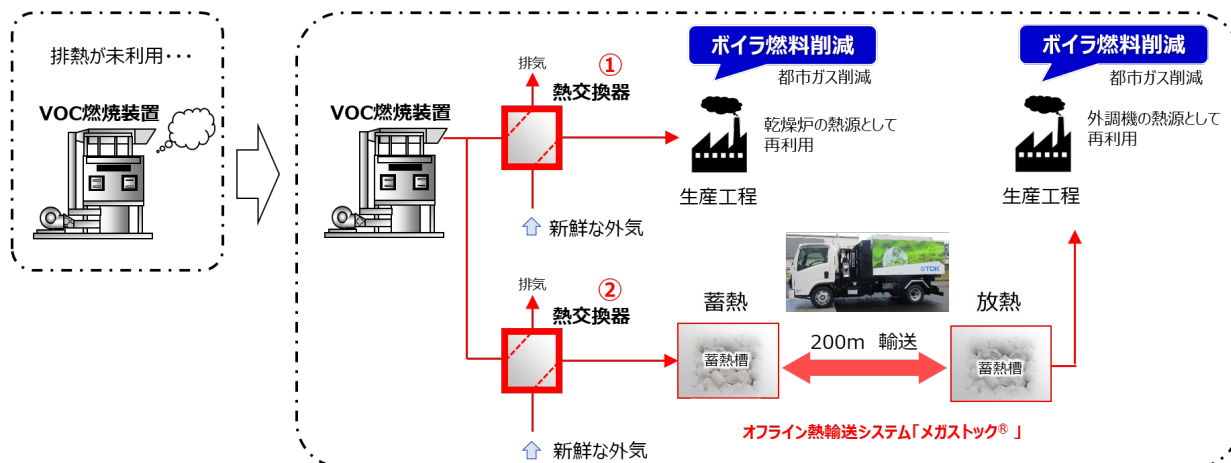
以上のように、石原産業四日市工場や日野自動車羽村工場周辺での実証試験を行い、定置型蓄熱システムやオフライン熱輸送システムの蓄放熱特性を確認した。また、小型装置の実験データを基に作成した設計ツールが実際に活用できることを確認した。

2020 年に当システムを販売開始して以降、工場や自治体の担当者から多くの問い合わせを頂いており、排熱利用の機運の盛り上がりを実感している。当社は、これらの問い合わせに対し、上述した設計ツールを用いて、提案活動を行っており、その提案活動の中から TDK 本荘工場西サイトに実導入した。

今後は、当システムを活用した新たな取り組みも見据えつつ、継続して提案活動を行い、当システムの導入を通じて 2050 年のカーボンニュートラルに貢献していきたい。

従来

設備導入後



(a) 系統図



(b) 蓄熱サイトの外観



(c) 放熱サイトの外観



(d) トラックの外観

図 14 TDK 本荘工場西サイト 導入システムの概要

TDKから地域に熱を供給することで、官民連携により地域脱炭素社会に貢献することができます。

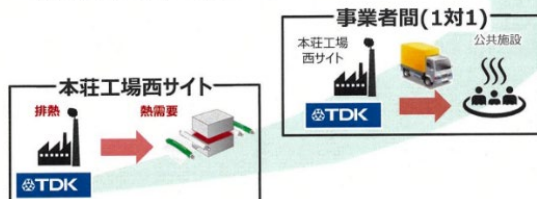
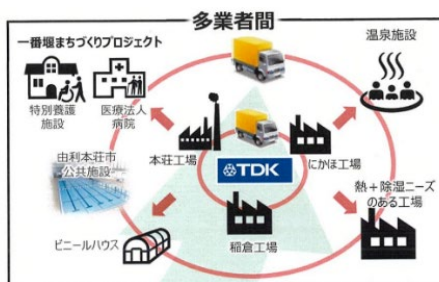


図 15 今後の展開イメージ

謝辞

NEDO 助成事業の成果は、(国研) 新エネルギー・産業技術総合開発機構助成事業「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」において、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)、森松工業(株)、日野自動車(株)、(国研)産業技術総合研究所が共同実施した実証開発の結果、得られたものである。関係各位及び実証場所をご提供頂いた羽村市様に御礼申し上げます。

また、TDK 本荘工場西サイトの小野氏、高橋氏、榎原氏には、導入に際し適切なご助言を賜りました。御礼申し上げます。

文 献

- 1) 15 業種の工場設備の排熱実態調査報告書, NEDO,2019.3.4,https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101074.html
- 2) 鎌田ら：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, 45-281(2020-8).
- 3) 宮原ら：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, 45-285(2020-12).
- 4) 川上ら：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, 46-290(2021-5).
- 5) 川上ら：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, 46-297(2021-12).
- 6) 鎌田ら：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, 47-301(2022-4).
- 7) 鎌田ら：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, 47-308(2022-11).

ABSTRACT

We have developed the adsorption thermal storage system, that can utilize the low-temperature exhaust heat. Since 2014, experimentally, we have investigated the charging and discharging characteristics in the adsorption thermal storage tank. We also conducted demonstration tests of a stationary heat storage system and an off-line heat transport system. In December 2023, the off-line heat transport system was installed in a plant in operation. In this paper, the outline of adsorption thermal storage system, the development of adsorption thermal storage system and case study were described.