

吸着材蓄熱システムのスケールアップ試験計画における ゼオライトエコボイラの設計検討※

澁澤朱音・鎌田美志・松井一騎*1
馬場大輔・谷野正幸・川上理亮
青木温哉*2・中垣隆雄*2・藤井祥万*3

Exploratory Design Study on Zeolite eco-Boiler through Scale-up Test Planning of Adsorption Thermal Storage System

Akane Shibusawa・Haruyuki Kamata・Kazuki Matsui
Daisuke Baba・Masayuki Tanino・Yoshiaki Kawakami
Haruya Aoki・Takao Nakagaki・Shoma Fujii

未利用熱の融通拡充を目的として、排熱発生地と熱需要地の時間的・空間的ギャップを解消する吸着材を用いた蓄熱輸送システムの構築を検討した。従来研究にて加圧蒸気の連続生成を可能にする移動床型の蒸気回生装置ゼオライトエコボイラ (ZeB) のベンチスケールでの基礎試験は完了している。本研究では、商用化へのステップアップとして商用モデルのおよそ1/10規模のZeBを数値解析により設計した。このとき、スケールアップによる数値解析結果と実試験結果の差を、商用化まで完了している固定床型の蓄熱輸送システム「メガストック®」の実証試験結果を基に予測し、ZeBの設計にフィードバックした。メガストック®において、充填槽内の吸着材厚さの不均一性が蓄熱/放熱時間に影響を与えることがわかっている。ZeBにおいてはゼオライト移動床の沈降速度分布が性能に関与することが推算された。

1. はじめに

2050年の脱炭素社会および持続可能な社会の実現に向けて、産業プロセス・バイオマス・廃棄物処理等に由来する排熱を地域内で有効に活用することが求められる。しかしながら、排熱(排ガス)の大部分を占める250°C以下の低温排熱は発生地での利用用途が限定され^{1,2)}、さらに排熱の発生地と熱需要地の時間的・空間的ギャップによりその多くが未利用のままである³⁾。これらの未利用熱の融通を拡充するためには、これらの熱の時空間ギャップの課題を解決する技術が必要であり、本研究では長期保管可能であり蓄熱温度が比較的低い吸着材を、蓄熱材として採用する蓄熱輸送システムに着目した。

ゼオライトなどの吸着材は水分を吸着すると発熱する性質を持ち、未利用熱により吸着材を乾燥(蓄熱)させることで、繰り返し利用できる。この吸着熱を熱需要地に供給することで既存設備の化石燃料の削減が可能となり、これまでに吸着材を用いた蓄熱システムが多数研究されてきた⁴⁻⁸⁾。我々は、従来研究にて、蓄熱輸送システムの出熱過程において高温低湿空気の供給を可能にする吸着材蓄熱システム「メガストック®」を開発し、ベンチスケールから商用スケールまでのスケールアップが完了している⁹⁻¹²⁾。

一方で、蓄熱輸送システムの更なる適用拡大を目指して、出熱過程において蒸気生成を可能とするゼオライトエコボイラ(以下ZeB)を開発している¹³⁾。これまでに、ベンチスケールにおける数値解析モデルを確立し¹⁴⁾、加圧蒸気の連続生成を検証した。現在、商用化へのステップアップとして商用モデルのおよ

※ 本論文は、第29回動力・エネルギー技術シンポジウムの講演論文²¹⁾を加筆修正したものである。

*1 関信越支店 埼玉営業所1課、*2 早稲田大学、*3 東京大学

そ 1/10 規模までスケールアップした ZeB を設計・製作している。吸着材を用いたシステムのスケールアップにおいて、ベンチスケールでは出現していなかった課題が発生することが多々あり¹⁵⁻¹⁸⁾、その課題を可能な限り予見した試験設計が求められる。

そこで本報では、商用化まで完了している吸着材蓄熱システムで見られたスケールアップの課題の一例から、ZeB のスケールアップにおける出熱過程の課題を抽出し、スケールアップ試験装置の設計へフィードバックすることを目的とした。

2. 吸着材蓄熱システムの概要

2.1 ゼオライトエコボイラ

ZeB の概要図を **図 1** にベンチスケールの試験装置を **写真 1** に示す。本システムでは、ゼオライトと熱媒である水との熱交換方式は、矩形タンクに内蔵したフィンチューブ式熱交換による間接熱交換方式を採用した。また、上部から蓄熱されたゼオライトが連続的に投入され、下部から放熱したゼオライトが定量的に排出される、移動床型を採用した。なお、本システムでは、装置自体は輸送せず、ゼオライトのみを輸送する機構を採用しているため、未利用熱の発生地に設置される蓄熱装置¹⁹⁾にて別途蓄熱されたゼオライトが ZeB に供給される。ZeB は既設ボイラとの協調運転を想定しており、既設ボイラが生成した蒸気の一部を ZeB に供給する。このとき、蒸気は大気圧まで減圧され、ZeB 上部からゼオライト移動床へ噴射され、水蒸気が吸着することでゼオライトが発熱し 200°C 以上まで温度が上昇する。そして、熱交換器下部から給水される熱媒水がゼオライトの吸着熱により沸騰することで、熱交換器の最上部から加圧蒸気として連続的に送られる。以上の構造により、ZeB 筐体全体を加圧させることなく、既設ボイラから噴射した蒸気量以上の 0.1 MPaG/120°C の乾き飽和蒸気を連続的に供給することで既設ボイラの燃料削減が可能となる²⁰⁾。

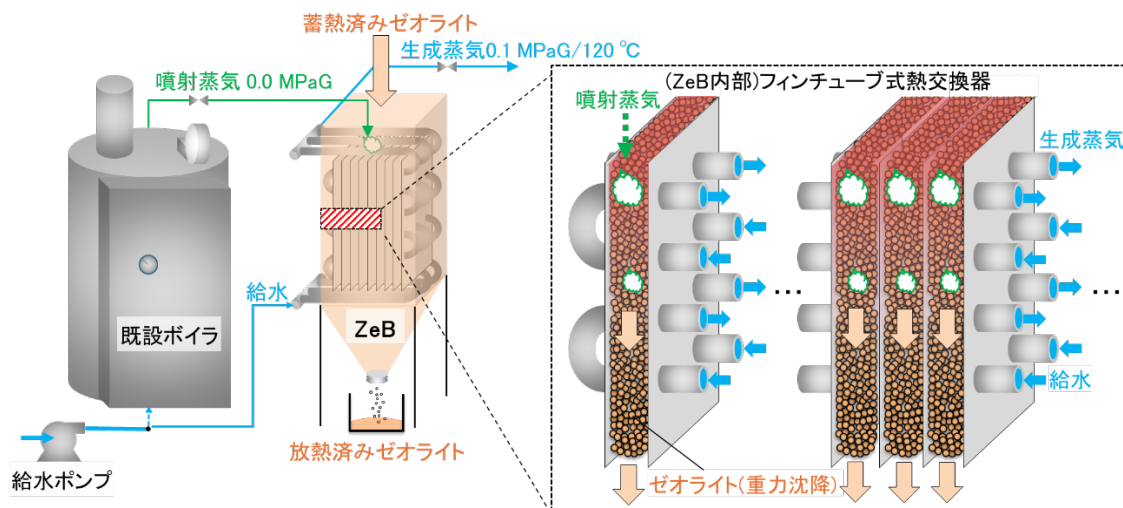


図 1 ZeB 概要図

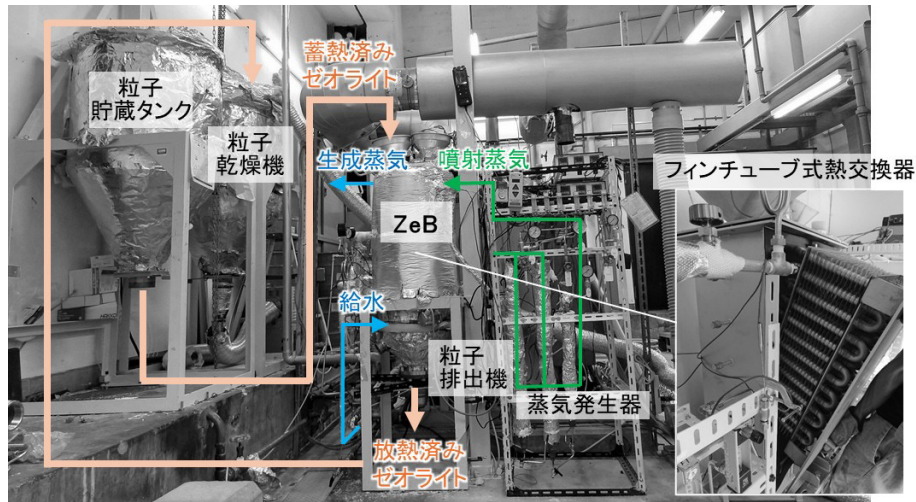


写真 1 ZeB ベンチスケール試験装置

2.2 メガストック®

メガストック®の概要図を**図 2**に示す。吸着材と熱媒である空気との熱交換方式は直接熱交換方式であり、矩形型容器に吸着材を充填する固定床型を採用している。吸着材充填槽の上部と下部には通気層となる空間が設けられており、この空間の壁側面に手動着脱式のダクト接続口が設置されている。このダクトを通じて吸着材充填槽に対して通気することで、同一槽において蓄熱と放熱が可能な構造になっている¹⁰⁾。蓄熱運転時は未利用熱由来の高温空気を下部通気層から供給することで、吸着材を乾燥させる。そして、放熱運転時は湿潤空気を供給し、吸着材に水分を吸着させることで吸着材が発熱し、高温低湿空気が送出され、加温または乾燥工程に用いられる。なお、メガストック®では、吸着材充填槽ごとと輸送する機構を採用しており、未利用熱の発生地および熱需要地へはトレーラーにて輸送する。商用機を**写真 2**に示す¹¹⁾。

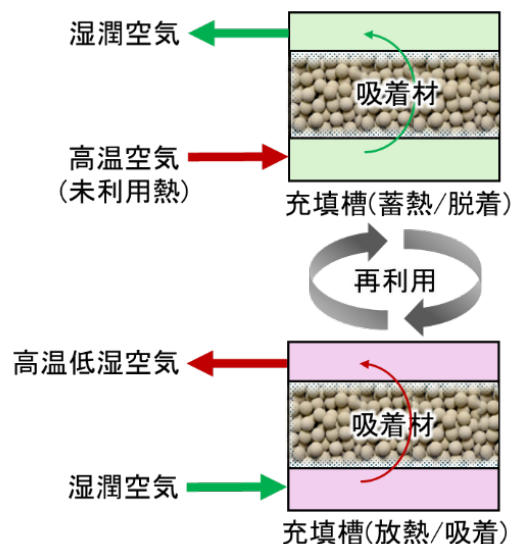


図 2 メガストック®概要図



写真2 メガストック®商用機

3. スケールアップ試験装置の設計

商用機の 1/100 規模であるゼオライト流量 (ZeB 下部から排出される量) 15 kg/h 級のベンチスケール試験において妥当性を確認した、ZeB の性能を予測するエネルギー・質量・化学種 (蒸気)・運動量の各保存則を連成した一次元数値解析モデルを用いて、商用機のおよそ 1/10 規模のゼオライト流量 200 kg/h 級までスケールアップした ZeB の概念設計を実施した。数値解析モデルを構成するゼオライト・気体・水のエネルギー保存方程式を、それぞれ式(1)、(2)、(3)に示す¹⁴⁾。その結果、必定の噴射蒸気量は 30 kg/h であり、生成蒸気量は 45 kg/h が見込まれることがわかった。熱交換器の伝熱面積は上述の数値解析を用いて選定することとなる。

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_{zeo} u_{zeo} c_{p_zeo} T_{zeo}) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff_zeo} \frac{\partial T_{zeo}}{\partial x} \right) + \rho_{zeo} r_{ad/des} \Delta H + \dot{s}_{zeo-g} + \dot{s}_{zeo-w} + \dot{s}_{zeo-amb} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho_g u_g c_{p_g} T_g) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff_g} \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \dot{s}_{zeo-g} + \dot{s}_{g-w} + \dot{s}_{g-amb} \quad (2)$$

$$- \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w u_w h_w) = \dot{s}_{zeo-w} + \dot{s}_{g-w} \quad (3)$$

メガストック®は既にスケールアップを達成し、乾燥重量で吸着材 5.5 ton を充填した商用機が稼働している。スケールアップにおける課題は複数あるが、そのうち主要な 1 つの事例は充填状態の不均一性である。従来研究では、10 kg 級の試験において妥当性を確認した一次元数値解析モデル⁹⁾による予測と、5.5 ton の実証機の蓄熱運転結果を比較したところ、蓄熱完了時間は解析結果よりも 25%程度長い結果となった。これは実際の蓄熱槽内における充填高さの分布による通気分布が発生しているためと考えられ、数値解析において充填高さの分布を与えて蓄熱完了時間を予測したところ、実測値とほぼ一致した¹¹⁾。

ZeB のスケールアップにおいても、同様な課題として、ゼオライト移動床の沈降速度分布が考えられる。そこで、1/10 規模の概念設計に対して本課題の解決手段を検討するため、各ゼオライト流量の筐体断面における温度分布を試算した。商用規模のゼオライト流量 1500 kg/h を基準として、ベンチスケール試験で確立した数値解析モデルにより、ゼオライト流量を基準から 0.5、0.9、1.1、1.5 倍した値を用いた。また、いずれのゼオライト流量においても噴射蒸気量は一定とした。その結果を図 3 に示す。図中凡例のカッコ内は 1500 kg/h に対する倍数を示す。装置上部で 200℃以上まで発熱したゼオライトは、水と熱交換しながら

下部へ移動し、100°C以下まで温度が低下した状態で排出される。図3より、ゼオライト流量が基準より1.5倍速い場合、装置下部のゼオライト温度が基準流量より高いことから、下部での熱交換が間に合わず、熱回収率が低下することがわかった。また、ゼオライト流量が0.9、0.5倍に低下した場合は、給水量に対して熱量が不足するため、熱交換器出口での生成蒸気の乾き度が低下する。この結果から、1500 kg/hで一樣に重力沈降する場合と、沈降速度分布が発生した場合の既存ボイラの燃料削減量を試算し比較した。移動床を通過するゼオライトを、全流量を一定として二等分し、それぞれ1.1および0.9倍で沈降したと仮定した場合、一樣の速度で重力沈降する場合とほぼ同程度を維持した。しかしながら、差異を拡大し、1.5および0.5倍として沈降する場合は、10%程度低下することがわかった。以上の結果から、沈降速度分布が発生した場合も性能を維持して運転できるように、1/10規模の概念設計に対して、伝熱面積においては数値解析で得た値から余裕率を考慮して90 m²とした。また、ZeB上部の噴射蒸気口は噴射蒸気量とゼオライト流量のバランスを調整できる構造とし、写真3のような商用機1/10規模のスケールアップ試験装置を製作した。この試験装置において、0.1 MPaG/120°Cの飽和蒸気の連続生成および噴射蒸気に対する増熱効果を確認した。今後、さらなるデータ取得および数値解析の妥当性確認を実施する予定である。

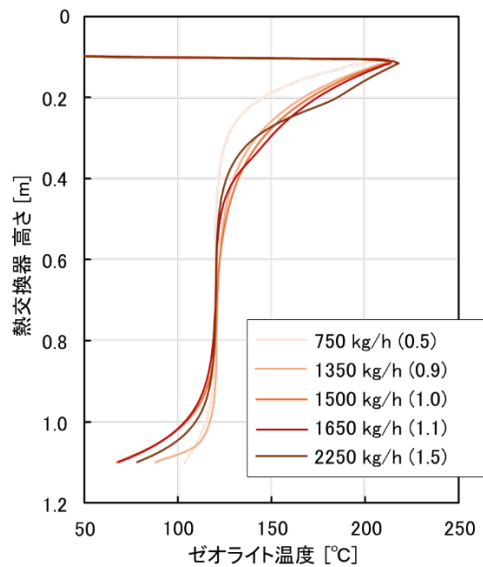


図3 各ゼオライト流量におけるゼオライト温度分布

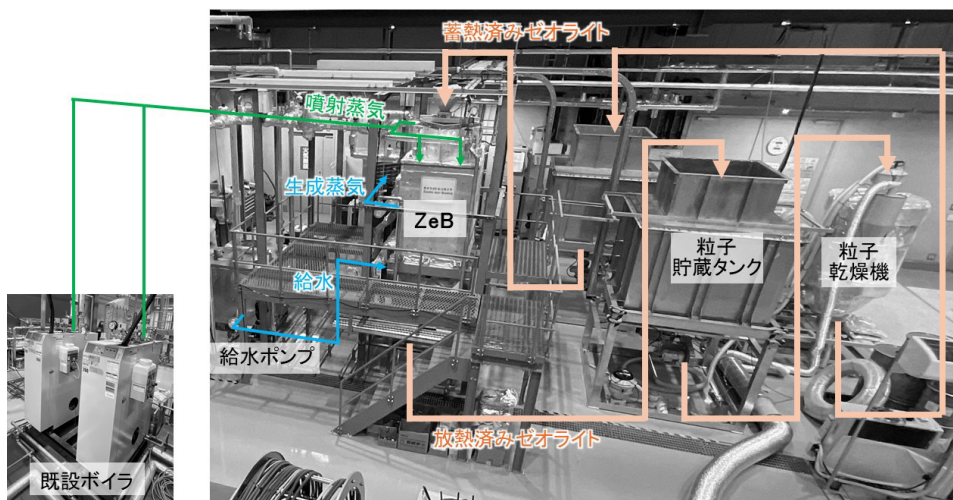


写真3 ZeB スケールアップ試験装置

4. おわりに

数値解析を基にベンチスケールから約 10 倍スケールアップした ZeB を設計した。スケールアップにおける課題については、既に商用規模までのスケールアップを達成している吸着材蓄熱システムの実証試験結果から、ゼオライトの沈降速度分布が ZeB の性能に与える影響を推算した。沈降速度分布による性能低下を抑えるため、伝熱面積は数値解析結果から余裕率を考慮した値として、スケールアップ試験装置を設計し製作した。そして、スケールアップ試験装置にて加圧蒸気の連続生成を確認した。今後は、実験データを蓄積し、数値解析モデルと設計値の妥当性を評価、必要に応じて修正する。さらに商用規模の ZeB の設計および実証試験に取り組む予定である。

謝辞

本研究は、環境省総合推進費（JPMEERF20243G01）、JST 共創の場形成支援プログラム(COINEXT:JMJPFF2003)、JST さきがけ（JPMJPR2278）、JSPS 科研費若手研究(22K18061)の成果を含んでいる。関係各位に御礼申し上げます。

Nomenclature

Symbols

- c_p : 比熱 [J/(kg·K)]
- h : 比エンタルピー [J/kg]
- $r_{ad/des}$: 吸脱着速度 [s^{-1}]
- \dot{s} : 相間熱伝達項
- T : 温度 [K]
- u : 速度 [m/s]
- x : 軸方向距離 [m]
- ΔH : 吸着/脱着熱 [kJ/kg]
- λ_{eff} : 有効熱伝導率 [W/(m·K)]
- ρ : 密度 [kg/m³]

Subscripts

- amb : 装置周辺環境
- g : 気体
- w : 水
- zeo : ゼオライト

文献

- 1) 根津浩一郎, 下田學, 井口光雄: 排熱利用に関する実態調査 第 1 報—工場排熱の賦存量・利用可能量に関する調査研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.22, 79-87 (1983.6).
- 2) 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 Jan. 14th 2026), <https://www.nedo.go.jp/content/100957934.pdf>.
- 3) 山田心治: オフライン熱供給システム普及に向けて～都市に賦存する未利用排熱の有効活用～, Best Value, 13,(2006).
- 4) Elham Abohamzeh, Georg Frey: Numerical Investigation of the Adsorption Process of Zeolite/Water in a Thermochemical Reactor for Seasonal Heat Storage, Energies, 15, 5944 (2022).
- 5) Henri Schmit, Simon Pöllinger, Tobias Schubert, Eberhard Lävemann, Stefan Hiebler: Application oriented material characterisation and simulation for adsorption thermal energy storage, Frontiers in Thermal Engineering, 5 (2025.5).
- 6) Christian Finck, Rongling Li, Rick Kramer, Wim Zeiler: Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy

- storage in the control of building heating systems, *Applied Energy*, 209, 409-425 (2018).
- 7) R. van Alebeek, L. Scapino, M.A.J.M. Beving, M. Gaecini, C.C.M. Rindt, H.A. Zondag: Investigation of a household-scale open sorption energy storage system based on the zeolite 13X/water reacting pair, *Applied Thermal Engineering*, 139, 325-333 (2018).
 - 8) Michelangelo Di Palo, Vincenzo Sabatelli, Fulvio Buzzi, Roberto Gabbriellini: Experimental and Numerical Assessment of a Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications, *Applied Sciences*, 10, 8517 (2020).
 - 9) 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*, 281, 9-17 (2020.8).
 - 10) 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*, 290, 39-46 (2021.5).
 - 11) 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*, 301, 9-16 (2022.4).
 - 12) 高砂熱学工業株式会社, TDK(株) 国内最大規模の工場へ吸着材蓄熱システム「メガストック®」を納品, CO₂ 排出量削減に貢献～未利用の低温排熱(100°C程度)を蓄熱し, 離れた場所へ運び, 再利用～, (accessed Jan. 14th 2026), https://www.tte-net.com/article_source/data/news/detail/2024/678.html.
 - 13) 藤井祥万: 産業廃棄物由来等の未利用熱の蓄熱輸送による蒸気回生システムの開発, 環境省総合推進費, (accessed Jan. 14th 2026), https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/db/pdf/kenkyu_gaiyou/3G-2401.pdf.
 - 14) Shoma Fujii, Takao Nakagaki, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi: Prospective life cycle assessment for designing mobile thermal energy storage system utilizing zeolite, *Journal of Cleaner Production*, 365, 132592 (2022).
 - 15) Asnakech Lass-Seyoum, Dmitry Borozdenko, Thomas Friedrich, Timo Langhof, Simone Mack: Practical test on a closed sorption thermochemical storage system with solar thermal energy, *Energy Procedia*, 91, 182-189 (2016).
 - 16) Andreas Krönauer, Eberhard Lävemann, Sarah Brückner, Andreas Hauer: Mobile Sorption Heat Storage in Industrial Waste Heat Recovery, *Energy Procedia*, 73, 272-280 (2015).
 - 17) 中曾浩一, 深井潤, 中川二彦, 伊藤香澄, 安部義男, 川上理亮, 谷野正幸, 板谷義紀, 小林信介, 丸毛謙次, 青山俊之, 増井龍也: 吸着式蒸気生成器のスケールアップ性能試験, *化学工学論文集*, 44(1), 71-77 (2018).
 - 18) Asnakech Lass-Seyoum, Mike Blicher, Dimitry Borozdenko, Thomas Friedrich, Timo Langhof: Transfer of laboratory results on closed sorption thermochemical energy storage to a large-scale technical system, *Energy Procedia*, 30, 310-320 (2012).
 - 19) 藤井祥万, 宮川大河, 中垣隆雄, 兼松祐一郎, 菊池康紀, 濱田洋輔: 製糖工場の未利用エネルギーを蓄熱する向流接触式ヒートチャージャーのベンチスケール実証試験と設計, *化学工学論文集*, 47(6), 191-199 (2021).
 - 20) Shoma Fujii, Naoyuki Horie, Ko Nakabayashi, Yuichiro Kanematsu, Yasunori Kikuchi, Takao Nakagaki: Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill, *Applied Energy*, 238, 561-571 (2019).
 - 21) 澁澤朱音, 馬場大輔, 鎌田美志, 谷野正幸, 青木温哉, 松井一騎, 中垣隆雄, 藤井祥万, 川上理亮: 吸着材蓄熱システムのスケールアップ試験計画におけるゼオライトエコボイラの設計検討, “第29回動力・エネルギー技術シンポジウム”, D133(2025).

ABSTRACT

To expand the flexibility of utilization of unused heat, it is necessary to develop a mobile thermal energy storage system that can resolve the spatiotemporal gap between generating unused heat and heat demand. In the previous study, the adsorption thermal storage system named “Mega Stock[®]”, employing a fixed bed and direct heat exchanging system to supply high temperature and low humidity air, has already been commercialized. On the other hand, the steam generator called Zeolite eco-boiler, ZeB, employing a moving bed and indirect heat exchanging system combined with zeolite steam ad/desorption cycle, has been developed to expand the applicability of thermal energy storage system to industrial sectors. The demonstration test of ZeB had been conducted on a bench scale, and a developed numerical model had been experimentally validated. In this study, 10 times scaled up experimental setup of ZeB from the bench scale, was numerically designed and constructed based on previous scaled up experiences of the commercialized adsorption system. The discrepancy between simulated and experimental results because of scale-up of the adsorption system was examined from the demonstration results, and it was suggested that ununiform velocity of zeolite affected the performance of ZeB. The heat transfer area of heat exchanger, settled in the ZeB, was designed considering the margin ratio from the values obtained by the numerical model, so that the system can be operated without losing performance when ununiform velocity of zeolite might be generated.
