

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360401

研究課題名(和文)パッシブ調湿・太陽熱高密度蓄熱を有する統合型ヒートポンプシステムに関する研究

研究課題名(英文) Research on passive humidity-controlling and high solar thermal energy storage integrated heat pump

研究代表者

長野 克則 (NAGANO, Katsunori)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80208032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、天然メソポーラス材料である稚内層珪質頁岩(WSS)を吸着材として用い、80℃の低温排熱や太陽熱などが利用可能な開放型および密閉型の蓄熱システムを開発した。開放型はハニカム形状をしており、吸湿性を高めるため塩化カルシウムまたは塩化リチウムをWSSのメソ孔に担持させたものである。80℃で再生した後、加湿空気を通風することで、長時間にわたり温風を取り出すことが出来た。また密閉型では、低温排熱や太陽熱を用いて冷熱を取り出すことが可能なシステムである。塩化リチウム担持WSSを塗布した熱交換器を試作。80℃の再生で、吸着材重量あたり200W/kgの冷熱を取り出すことに成功した。

研究成果の概要(英文)： In this research, an open and closed thermal energy storage systems by using Wakkanai Siliceous Shale (WSS) have been developed to store low temperature industrial waste heat and solar thermal energy (<80 deg C). For the open thermal energy storage system, the WSS was constructed into a honeycomb shape. Then CaCl₂ or LiCl were impregnated into the mesopores of WSS. The composite material can be regenerated at 80 deg C and it can release warm air (>40 deg C) for a long time by high humidity air. For the closed chemical thermal energy storage system, which is operated under vacuum condition, it can produce cooling energy. In order to increase the heat and mass transfer of the material, a composite material made by impregnating LiCl into the mesopores of micropowders of WSS has been developed. As a result, two prototypes of closed thermal energy storage systems were developed. A cooling power of 200 W/kg sample was obtained with a regeneration temperature of 80 deg C.

研究分野：工学

キーワード：ヒートポンプ 太陽熱 蓄熱 低温 調湿

1. 研究開始当初の背景

わが国の民生分野におけるエネルギー需要の50%以上は暖冷房、給湯という低温の熱利用が占めている。一方、80℃以下の低温産業排熱が大量に存在しており、その有効活用が求められている。また、将来的には大規模な太陽集熱システムからの余剰な温熱利用も考えていかなければならない。従って、これらの80℃以下の低温熱を利用した暖冷房・給湯、さらには農業や漁業などの一次産業および工業プロセスなどの二次産業における加温・冷却システムへの低温排熱利用などの技術開発が重要な課題となっている。

この場合、熱供給と需要の不整合をマッチングさせるための高密度蓄熱、そして低温熱を利用した高効率な冷熱発生技術を開発できれば、従来利用されずに環境に捨てられてきた低温排熱や再生可能エネルギーの利用拡大に寄与する。これは、化石エネルギー消費量を大幅に削減させると共に、そしてそれに伴うCO₂排出量を減少させ、地球温暖化抑制に大きく寄与する。

蓄熱技術には、物体の温度差を利用した顕熱蓄熱、物体の相変化を利用した潜熱蓄熱、さらに化学蓄熱として、固体表面に蒸気の吸着現象を利用したものと反応熱を利用したものがあるが、蓄熱材には、蓄熱密度大、熱損失小、化学的安定、毒性や可燃性がないことが求められる。この点から言えば、水蒸気の吸着現象を利用した化学蓄熱はこれらの要求を満たしており、また、密閉型では化学ヒートポンプと駆動させることにより、温熱と冷熱の供給も可能となるなど、大きな魅力がある。ただし、吸着現象を利用した化学蓄熱の場合、吸着材が多孔質であるため有効熱伝導率が低く、これより熱移動・物質移動に関して両者同時に大きくすることが極めて難しいという課題がある。それにより、機器が非常に大型となること、また、合成材料を使用した場合には吸着材の価格が非常に高いこと、80℃以下の低温再生の場合に効率が低下することなどが、

実製品への展開の阻害要因になっている。

2. 研究の目的

本研究では、80℃程度の低温の産業排熱や再生可能エネルギー熱の利用を目的として、高蓄熱密度の開放式化学蓄熱システムと冷熱取り出しが出来る密閉型蓄熱システムを開発することにある。

3. 研究の方法

開放式化学蓄熱については、試作した材料の水蒸気の吸放湿に伴う熱特性について、基礎的な測定を行った。次に、ラボスケールの小型ユニットを開発し、蓄熱材の評価を行った。最後にシミュレーションを行い、蓄熱材システムの性能を予測した。

密閉型蓄熱システムの内部は真空状態であり、80℃程度の熱を投入することで、冷房に利用可能な7℃～15℃の冷熱を取り出すことが可能なシステムである。吸着材を用いた小型試作機を設計開発し、80℃再生時の冷熱熱量など、性能評価を行った。

4. 研究成果

(1) 稚内層珪質頁岩(WSS)を主成分とするハニカム形状セラミックスを基材として、塩化カルシウムを担持した開放型の蓄熱体の開発を試みた。図1に示すような水蒸気の吸着特性評価、およびTG/DTAによる吸脱着試験より、塩化カルシウムをWSS細孔へ担持させることで、塩化カルシウム単体よりも低い温度で再生できることを見出した。次に開放式化学蓄熱装置(図2)を構築し、塩化カルシウム担持ハニカム蓄熱材の性能を測定した。その結果、塩化カルシウムを担持させたハニカム蓄熱体でも、80℃で再生できること、さらに10時間以上の長時間、40℃以上の熱を取り出せる(図3)など、蓄熱密度も高いことが分かった。また100回以上の繰り返しでも性能が維持されており、耐久性も高いことが分かった。

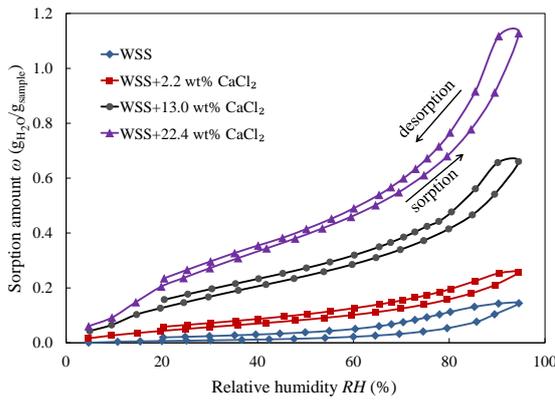


図1 開発された材料の吸着等温線 (25°C)

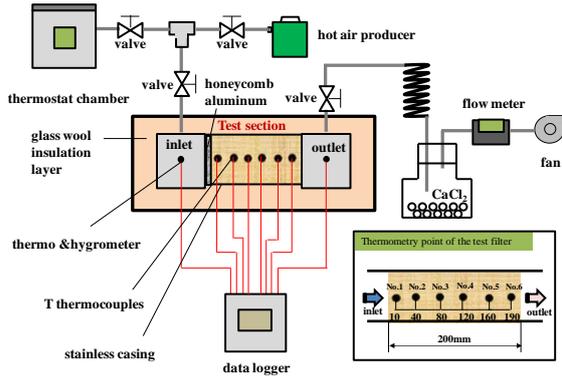


図2 開放式蓄熱装置

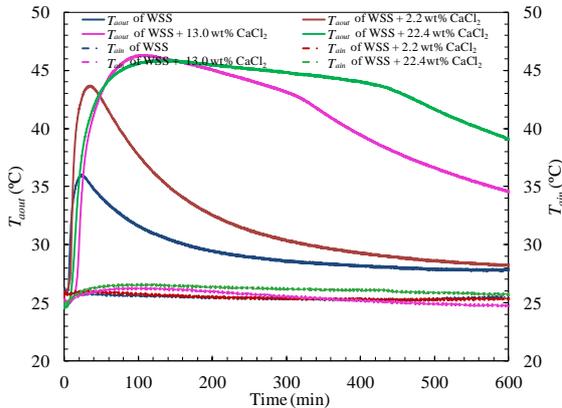


図3 入口と出口の温度変化 (再生温度: 80°C; 湿り空気風量: 2.0 m³/h)

(2) 図4に示す熱水分同時移動の一次元モデルを構築して数値解析を行った結果、入口空気温湿度 ($T_{a,in} = 25^\circ\text{C}$ or 30°C , $RH_{a,in} = 95\%$)、風量 $3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 、ハニカム蓄熱体長さ ($L = 20$ or 25 cm) の条件で最も良い性能が得られた。次に、開発した蓄熱体の応用例として、塗料乾燥システムに、蓄熱体ユニットを組み合わせるシステムについて検討した。その結果、日中の灯油排熱を蓄熱し、夜間に蓄熱体から放熱させることで、

排熱の約 50%を回収できることが分かった(図

6)。

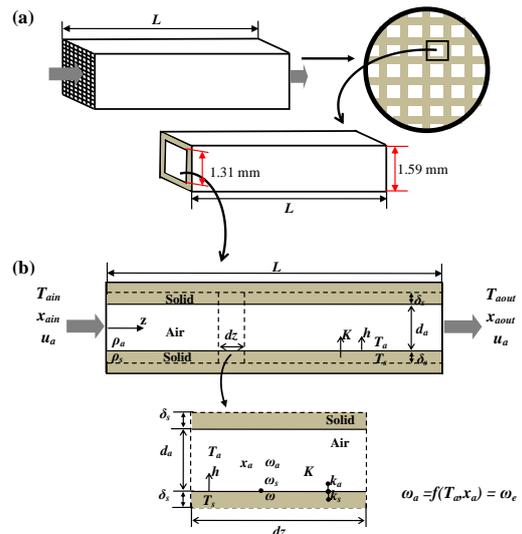


図4 一次元のシミュレーションモデル

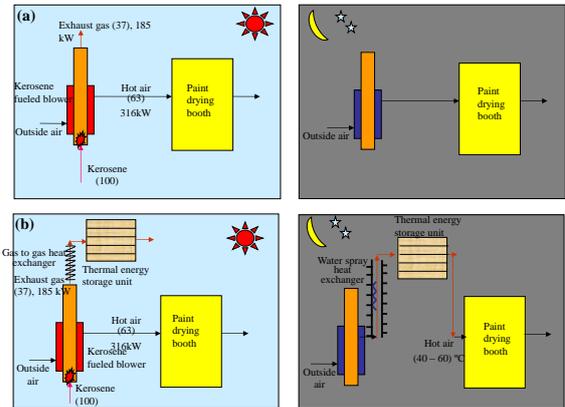


図5 (a) 従来の塗装乾燥システム; (b) 蓄熱装置を含めた塗装乾燥システム

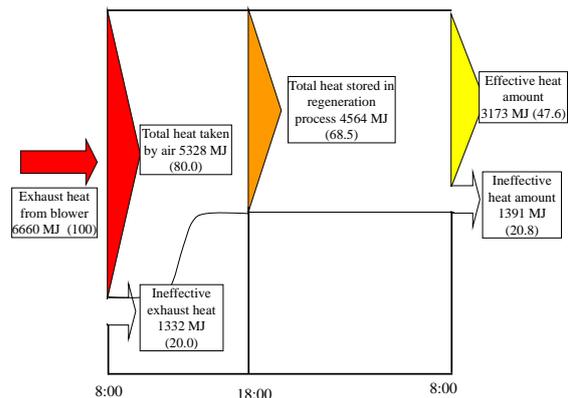


図6 塗装乾燥システムのエネルギーフロー

(3) 塩化カルシウムと同様に、塩化リチウムを担持したハニカム蓄熱材も試作した。図8に60°Cの空気を通風させたときの入口・出口空気の絶

対湿度変化を示す。その結果、塩化リチウム担持では 60 °C でも再生できることが分かった。TG/DTA による吸・脱着試験より、脱着時の活性化エネルギーは 22.4 wt% 塩化カルシウム担持 WSS では 125 kJ/mol、9.6 wt% 塩化リチウム担持 WSS では 88 kJ/mol と求まり、塩化リチウム担持の方が低い温度で再生出来ることが明らかとなった。また 250 回の繰り返し試験の結果から、高い耐久性を確認出来た (図 8)。

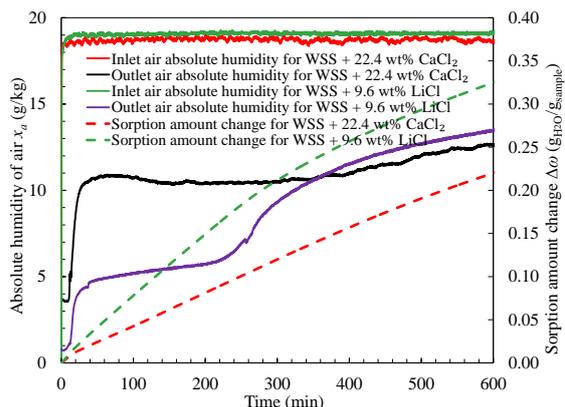


図 7 60°C で再生した後の蓄熱ユニットの入口と出口の温度変化(WSS + 9.6 wt% LiCl and the WSS + 22.4 wt% CaCl₂)

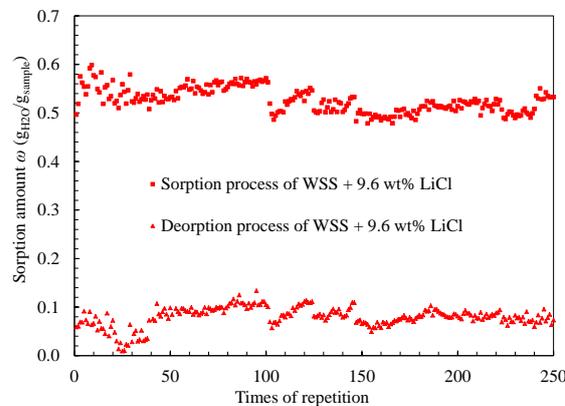


図 8 WSS + 9.6 wt% LiCl の耐久性

(4) 塩化リチウム担持 WSS を用い、真空条件下での平衡吸着量を TG/DTA で測定した(図 9)。その結果、試料温度 80 °C における平衡吸着量と、30°C における平衡吸着量を比較すると、40 wt% 担持塩化リチウムでは、800 mg/g 以上の高い吸着量が確保出来ることが分かった。さらに冷熱取り出し試験を行った結果、表 1 に示すように、Freni [1]等の塩化カルシウムの結果と比較して、

同等以上の COP と冷熱を得ることが出来た。

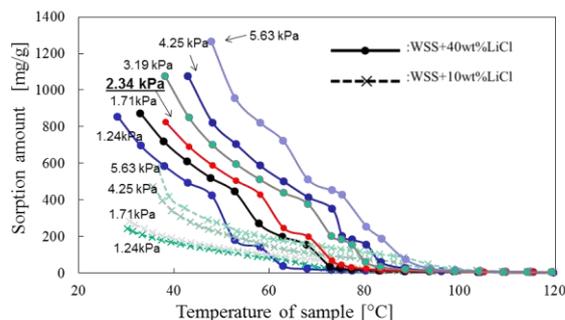


図 9 試料温度に対する平衡吸着量

表 1 開発された材料およびその他の複合材料との性能比較[1]

	SWS-IL coated HEX	SWS-IL pelletized bed	WSS +40 wt% LiCl
Salt content α (%)	33.7 wt% CaCl ₂	33.7 wt% CaCl ₂	40 wt% LiCl
q _{sc} (W/kg)	150-200	20-40	180
τ _{cycle} (min)	10-20	90-150	120
COP _c	0.15-0.3	0.4-0.6	0.3
T _{des} (°C)	90-100	90-100	80

(5) 塩化リチウム担持 WSS をコルゲート熱交換器のフィン表面にコーティングし、その熱交換器の再生、冷熱取り出し試験を行った(図 10)。その結果、80 °C 再生で、約 200 W/kg の冷熱を取り出すことが出来た。

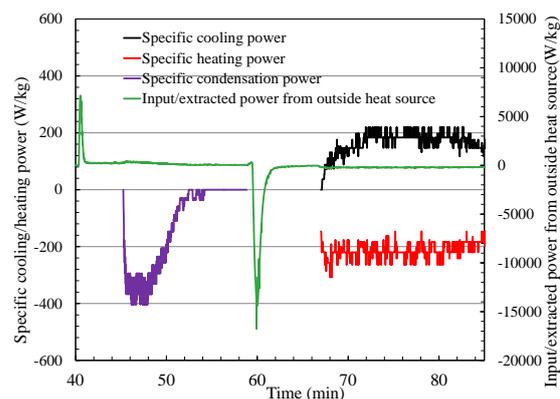


図 10 40wt%LiCl 担持 WSS を塗布したコルゲート熱交換器の冷暖房能力

参考文献

[1] A. Freni, F. Russo, S. Vasta, M. Tokarev, Y.I. Aristov, G. Restuccia, An advanced solid sorption chiller using SWS-1L, Applied Thermal Engineering, 27 (2007) 2200-2204.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. Hongzhi. Liu, Katsunori Nagano, Junya Togawa. A composite material made of mesoporous siliceous shale impregnated with lithium chloride for an open sorption thermal energy storage system. Solar Energy 111, 186-200, 2015(査読有).

2. Hongzhi. Liu, Katsunori Nagano, Atsushi Morita, Junya Togawa, Makoto Nakamura. Experimental testing of a small sorption air cooler using composite material made from natural siliceous shale and chloride. Applied Thermal Engineering, 82, 68-81, 2015(査読有).

3. Hongzhi Liu, Katsunori Nagano. Numerical simulation of an open sorption thermal energy storage system using composite sorbents built into a honeycomb structure. International Journal of Heat and Mass Transfer , 78, 471-480, 2014(査読有).

4. 鍋島佑基、長野克則、外川純也。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調の開発【第7報】外気条件に対する予冷・再生温度の検討。

日本冷凍空調学会論文集、31(2),111 - 121,2014(査読無)。

5. Hongzhi. Liu, Ktsunori Nagano, Daichi Sugiyama, Junya Togawa, Makoto Nakamura. Honeycomb filters made from mesoporous composite material for an open sorption thermal energy storage system to store low-temperature industrial waste heat. International Journal of Heat and mass transfer, 65, 471-480, 2013 (査読

有)。

[学会発表](計 17 件)

1. 鍋島佑基、外川純也、吉本周平、小牧あゆみ、中村真人、長野克則。稚内層珪質頁岩を用いた中小ビル用デシカント換気ユニットの開発【その 5】ビル用デシカントシステムの実性能評価。空気調和・衛生工学会、3 月 10 日,2015,北海道大学,札幌。

2. 小牧あゆみ、鈴木峻太、中村真人、長野克則、外川純也、鍋島佑基。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調システムの開発【その 19】換気ユニットに搭載するエレメントの臭気移行特性評価。空気調和・衛生工学会、3 月 10 日,2015,北海道大学,札幌。

3. 小椋凌、長野克則、鍋島佑基、外川純也。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調システムの開発【その 20】実験による運転パラメーターの検討と年間再生投入熱量の推定。空気調和・衛生工学会、3 月 10 日,2015,北海道大学,札幌。

4. 外川純也、鍋島佑基、小椋凌、中村真人、長野克則、仁木康介、古川修、内野晶弘、石井幸雄、伊藤康之。家庭用デシカント換気空調ヒートポンプシステムの実証試験【その 6】家庭用統合システムの実性能評価試験。空気調和・衛生工学会、3 月 10 日,2015,北海道大学,札幌。

5. 森田敦、中村真人、劉洪芝、長野克則、外川純也、黒石広明。天然メソポーラス材料を用いた低コスト吸着式ヒートポンプの研究開発。空気調和・衛生工学会、3 月 10 日,2015,北海道大学,札幌。

6. H.Z. Liu, A. Morita, M. Nakamura, K. Nagano. Study on Solar Energy Driving Domestic Hot Water Supply and Cooling system: Part 2 Development of a Sorption Air Cooling Device. The 48th Symposium of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, March 11, 2014, Hokkaido University Sapporo, Japan.

7. H.Z. Liu, K. Nagano, A. Morita, J. Togawa, M.

Nakamura. Solar thermal energy storage using sorption/desorption of a composite honeycomb filter. Grand Renewable Energy 2014 International Conference and Exhibition, June 27th-August 1st, 2014, Tokyo Big Sight Tokyo, Japan.

8. H.Z. Liu, K. Nagano, D. Sugiyama, J. Togawa, M. Nakamura. A Composite Mesoporous Material for an Open Sorption Thermal Energy Storage System. The 15th International Heat Transfer Conference, August 10-15, 2014, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan,

9. 姜 允敬、長野克則、中村真人。札幌市内住宅における省エネルギー換気装置の微生物汚染調査。空気調和・衛生工学会。9月3日-5日,2014,秋田大学,秋田。

10. 外川純也、小椋凌、中村真人、長野克則、鍋島佑基、石井幸雄、仁木康介、古川修、伊藤康之。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調システムの開発【その 16】実験住宅における改良型デシカント統合ヒートポンプシステムの夏季実証実験。日本冷凍空調学会、9月9日-11日,2014,佐賀大学,佐賀。

11. 長野克則、鍋島佑基、外川純也、小椋凌、中村真人、中村靖、吉本周平。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調システムの開発【その 17】中小ビル用デシカントユニットの空調消費電力削減効果。日本冷凍空調学会、9月9日-11日,2014,佐賀大学,佐賀。

12. 長野克則、鍋島佑基、外川純也、小椋凌、中村真人、杉山大地。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調システムの開発【その 18】外気負荷変動に対する運動条件の検討。日本冷凍空調学会、9月9日-11日,2014,佐賀大学,佐賀。

13. 小椋凌、長野克則、鍋島佑基、外川純也、石井幸雄。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調システムの開発【その 19】全熱交換素子のサイズと効率の検討。日本冷凍空調学会、9月9

日-11日,2014,佐賀大学,佐賀。

14. 森田敦、小椋凌、中村真人、外川純也、鍋島佑基。稚内層珪質頁岩を用いたデシカント空調システムの開発【その 20】太陽熱利用型家庭用デシカント空調機の実験的研究。日本冷凍空調学会、9月9日-11日,2014,佐賀大学,佐賀。

15. Hongzhi LIU, A small sorption air cooler using developed composite material. The 17th SNU-HU Joint Symposium. December 1-2nd, 2014, Hokkaido University, Sapporo.

16. H.Z. Liu, D. Sugiyama, M. Nakamura, K. Nagano. An Open Chemical Thermal Energy Storage (TES) System Used Honeycomb Filters Made from Mesoporous Material Supported by CaCl_2 . The 47th Symposium of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, March 16, 2013, Hokkaido University Sapporo, Japan.

17. H.Z. Liu, K. Nagano and D. Sugiyama. Experiment and numerical simulation of open chemical thermal energy storage system using developed mesoporous composite filter. The 2nd International Energy Storage Conference Sustainable Energy Storage in Buildings, June 19-21st, 2013, Trinity College Dublin, Ireland.

6. 研究組織

(1)研究代表者

長野 克則 (NAGANO Katsunori)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号:80208032