

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14543

研究課題名(和文)凝固相剥ぎ取りによる超高速熱交換潜熱蓄熱システムの開発

研究課題名(英文) Development of Latent Heat Storage System with High Heat Transfer Rate by Scraping Solidified Layer of PCM

研究代表者

丸岡 伸洋 (Maruoka, Nobuhiro)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：40431473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギー消費削減にはエネルギーのカスケード利用が必要で、その実現に「潜熱蓄熱法」は有用である。従来の潜熱蓄熱法では放熱時の蓄熱剤凝固層生成による伝熱速度の著しい低下が問題である。本研究では回転伝熱管および固定羽根により伝熱管表面を機械的に更新する「凝固層剥ぎ取り型高速熱交換潜熱蓄熱槽」を提案した。蓄熱材 1 kg を搭載した試験装置を開発し、放熱時の凝固相剥ぎ取り現象の観察、放熱/蓄熱速度に及ぼす伝熱管回転効果を検討し、従来の間接式熱交換式に相当する無回転条件と比較し100倍以上の伝熱速度を有し、その効果が放熱率約80%以上まで持続することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Energy cascade utilization from higher temperature to lower temperature processes is necessary to establish a sustainable society. Latent heat storage (LHS), the heat is stored by using the latent heat of phase change material (PCM), is one of the key methods. However, a solidification layer of PCM on the heat exchange wall blocks the heat transfer, in consequence, it takes a long time to release the stored heat. Authors proposed a new concept for rapid heat exchange for LHS, "Scraping Solidified Layer of PCM on the heat transfer wall", which, heat transfer tube is rotated, and solidified PCM on the tube is continuously removed by fixed blade. In this study, laboratory scale setup (PCM weight: 1 kg) was developed, and the effects of rotation rate on the heat transfer rate and the heat utilization ratio were examined experimentally. The results showed that the heat release rate during rotation is accelerated by more than 100 times compared with the rate without rotation.

研究分野：熱工学

キーワード：潜熱蓄熱 PCM 高速熱交換 未利用熱有効利用 CO2排出削減 熱工学 凝固相剥ぎ取り 機械的伝熱面更新

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会の構築には、化石燃料など高価値エネルギーは鉄鋼業など高温産業で使用し、その排熱を順次低温プロセスに供給するエネルギーカスケード利用が必要である。排熱の断続発生・温度の不均一性、熱利用先との需給・位置関係などの観点から、廃熱の一時貯蔵(蓄熱)が有用で、潜熱蓄熱材(Phase Change Material, PCM)溶融時の潜熱を利用して高密度に熱貯蔵する潜熱蓄熱法が注目を浴びている。PCM内に熱媒油流通させる直接接触式や、管型やプレート型などの間接熱交換式のPCM熱交換器が提案されてきたが、前者はPCM流出、後者は装置重量増、PCM搭載密度減だけでなく、伝熱壁表面でのPCM凝固による著しい伝熱速度低下が問題となる。試算によるとわずか1mmの固相生成で総括伝熱係数は1/3以下に減少することがわかる。PCM中への炭素繊維分散による伝熱特性向上など検討されてきたが、抜本的な解決には至っていない。そこで本研究ではPCM固相剥取型超高速熱交換器を提案・開発する。基本構造はPCM充填装置内に伝熱管を設置した管型熱交換器で、伝熱管を回転させることで表面に生成するPCM固相を隣接する固定羽で剥ぎ取る特徴を持つ。この構造により、著しい伝熱特性低下を抑制し、高速熱交換が期待できる。

2. 研究の目的

CO₂排出削減にはエネルギーを段階的に使用する熱のカスケード利用が重要で、蓄熱はその実現に必須の技術である。固/液相変態時の潜熱を利用して高密度蓄熱する「相変化物質(PCM)」が注目されているが、伝熱面での凝固相生成による熱伝達率低下のため、その熱交換特性は低い。そこで本研究は、伝熱面を回転円筒にし、接触する固定羽で伝熱面に生成する固相を剥ぎ取ることで伝熱面を更新することで高い熱交換特性を有する「固相剥ぎ取り型潜熱蓄熱」を開発する。本研究ではその装置開発および効果を実験的に検討し、超高速熱交換潜熱蓄熱システムを開発する。

3. 研究の方法

伝熱面を観察可能なアクリル製小型PCM固相剥取型超高速熱交換器を開発し、回転伝熱面上の凝固・剥ぎ取り現象を詳細に観察するとともに、熱交換特性を評価し支配因子を明確にする。パラメーターは熱媒温度、PCM温度、熱交換器回転速度とし、熱交換特性を評価する。最終的にスケールアップおよび次期プロジェクトへの発展を計画する。

4. 研究成果

開発した装置は回転する伝熱管(外径55×高さ334×厚さ2mm)、円筒形の蓄熱槽(内径110×高さ228mm)、矩形の保温槽(幅130×奥行130×高さ218mm)および伝熱管外

側の固定羽根から構成され、伝熱管回転時に伝熱管外側表面に形成された凝固層を固定羽根で連続的に剥ぎ取る特徴を有する。伝熱管内側には境界膜剥ぎ取りによる伝熱速度の向上のための固定内羽根を設置した。蓄熱槽にPCMとして酢酸ナトリウム三水和物(融点58℃)1kgを装入し、発核剤としてリン酸三ナトリウム十二水和物を36g添加した。

伝熱管に70℃の温水を流通してPCMを溶融し、さらに65℃まで昇温した。その後、70℃の温水を40℃の温水に切替えて1L/minの流量で流通させた。入口と出口の間の温度変化より蓄熱槽からの放熱速度を求めた。また、凝固層の形成および剥ぎ取りの挙動を録画した。伝熱管回転数や入口温度などの諸条件が放熱速度に及ぼす影響を調査した。

放熱試験開始後300s経過時のPCM凝固状態の観察結果によると、無回転の場合は伝熱面近傍のみが凝固し、外側は液相のまま存在した。この状態は3000s経過後も維持されており、PCM槽の外側まで熱交換出来ないことがわかる。一方、回転有り、つまり本研究で提案した凝固相剥ぎ取り型の場合は、伝熱管表面で凝固したPCMが随時剥ぎ取られ、PCM相全体がスラリーになり、300s経過時にはPCM槽の最外部まで均一に凝固した。

熱媒入口温度40℃、流量1.0L/minにおける放熱速度の経時変化に対する伝熱管回転数の影響を検討した。実験開始直後は全条件で装置および溶融PCMからの顕熱放出により高い放熱速度を示した。その後放熱に伴いPCM温度は低下し、約5℃の過冷却を経た後、凝固を開始した。放熱速度も同様の傾向を示し、初期に低下しPCM過冷却が解除後、凝固開始にともない上昇した。その後、従来の間接式熱交換に相当する0rpmの条件では放熱速度は緩やかに低下した。一方、500rpmで伝熱管を回転させた条件では、前述のとおり、伝熱管表面の凝固層の剥ぎ取り現象が観察され、PCMはスラリー状に凝固している期間の約200秒間はほぼ一定値の熱出力を保持することが明らかになった。

PCM利用率の経時変化に及ぼす回転数の影響を整理した。PCM利用率はPCMのもつ潜熱および顕熱量に占める放熱量の割合で定義した。時間経過とともにPCM利用率は増加し、放熱により凝固が進行していることがわかる。高回転ほどPCM利用率の増加速度は高速で、蓄熱槽全体のPCMが熱交換出来ることを示す。一方、0rpmの場合は1000s経過のPCM利用率はわずか22%で、3600s経過後も熱利用率は43%にとどまった。これは前述の通り、放熱進行に伴い0rpmでは伝熱管表面をPCM凝固層が被覆し、蓄熱槽外周との熱交換を阻害したためである。一方、100, 300, および500rpmでは伝熱管表面で凝固したPCMが伝熱管外側の固定羽根により剥ぎ取られ、凝固PCMが蓄熱槽内に分散し、槽内全域のPCMがスラリー状に変化しながら放熱するため高いPCM利用率を達成した。

熱利用率と放熱速度の関係で整理したところ、従来の熱交換機に相当する無回転条件では約 20%放熱した時点で放熱速度はほぼ 0 を示したのに対し、500rpm で回転させた条件では 87%まで高速放熱速度を維持することを明らかにした。また、放熱速度、蓄熱速度は伝熱管回転数、羽根枚数増加に伴い高速化することが明らかになった。以上の結果より、回転伝熱管による凝固層剥ぎ取り機構は、潜熱蓄熱槽からの放熱速度の高速化に寄与するだけでなく、熱利用率の大幅な改善に貢献することを明らかにした。本研究の成果を元に、NEDO 未利用熱小規模研究(蓄熱)へ展開させ、60 kg 規模の試験を行い、スケールアップ後も同様の機能を発現することを明らかにしている。

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 0 件)

[学会発表](計 11 件)

1. 丸岡伸洋, 伊藤昭久, 早坂未穂, 埜上洋, 凝固層剥ぎ取り型潜熱蓄熱システムの放熱速度におよぼす固定羽根枚数の影響, 化学工学会第83回年会, 2018.
2. 丸岡伸洋, 伊藤昭久, 早坂未穂, 埜上洋, 凝固層剥ぎ取り型潜熱蓄熱槽の放熱速度におよぼす伝熱管径の影響, 日本鉄鋼協会第175回春期講演大会, 2018, p. 218.
3. 丸岡伸洋, 伝熱面の機械的制御による潜熱蓄熱の革新的高速熱交換技術, 東北大学 新技術説明会, 2018.
4. 丸岡伸洋, 堤太一, 埜上洋, 凝固相剥ぎ取り型潜熱蓄熱槽の蓄熱特性, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, 2017, p. D131.
5. 丸岡伸洋, 堤太一, 伊藤昭久, 早坂美穂, 埜上洋, エネルギーカスケード利用のための高速熱交換型潜熱蓄熱槽の開発, 第 5 回アライアンス若手研究交流会, 2017.
6. 丸岡伸洋, 低温未利用熱の革新的超高速熱回収法, 熱エネルギー有効利用のための蓄熱技術, 2017.
7. T. Tsutsumi, N. Maruoka, A. Ito, M. Hayasaka, K. Yamamoto, H. Nogami, Development of Latent Heat Storage System

with High Heat Release Rate by Scraping Solidified Layer of PCM, 1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry, 2017.

8. N. Maruoka, T. Tsutsumi, A. Ito, M. Hayasaka, H. Nogami, Acceleration of Heat Release Rate in Latent Heat Storage Bath by Scraping Solidified PCM Layer, 10th World Congress of Chemical Engineering (WCCE2017), 2017.
9. 堤太一, 丸岡伸洋, 埜上洋, 凝固相剥ぎ取りによる高速潜熱蓄熱システムの開発, 東北大学多元物質研究所発表会, 2016.
10. 堤太一, 丸岡伸洋, 埜上洋, 凝固相剥ぎ取りによる潜熱蓄熱システムの高速化, 第2回エコテクノロジー若手研究フォーラム講演会, 2016.
11. 堤太一, 丸岡伸洋, 埜上洋, 凝固層剥ぎ取りによる潜熱蓄熱の放熱速度高速化, 化学工学会 第 48 会秋期大会, 2016, p. O123.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 潜熱蓄熱装置

発明者: 丸岡伸洋 埜上洋 伊藤昭久 堤太一

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-161454

出願年月日: 2016/8/19

国内外の別: 国内

名称: 潜熱蓄熱装置

発明者: 丸岡伸洋 埜上洋 伊藤昭久 堤太一

権利者: 東北大学

種類: 特許

番号: PCT/2017/29687

出願年月日: 2017/8/18

国内外の別: 国外

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ

https://shingi.jst.go.jp/kobetsu/tohoku/2017_tohoku/tech_property.html#pbBlock70994

6. 研究組織

(1)研究代表者

丸岡 伸洋 (Maruoka, Nobuhiro)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：40431473

(2)研究分担者

埜上 洋 (Nogami, Hiroshi)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：50241584

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()