

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14296

研究課題名(和文)長期貯蔵・輸送に適したカプセルフリーPCMを用いた次世代潜熱蓄熱技術の開発

研究課題名(英文)Next generation latent heat storage technology using non-encapsulated PCM suitable for long term storage and transportation

研究代表者

沖中 憲之(OKINAKA, Noriyuki)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20250483

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：潜熱蓄熱材(PCM)は高密度蓄熱が可能である。しかし、従来の潜熱蓄熱法は長期間の蓄熱・熱輸送が不可能であり、液体状態のPCMで蓄熱するため、PCMの漏出防止のためのカプセル化が必須であった。一方、物質を液体状態から特定の冷却速度以上で急冷すると、過冷却状態を経て「ガラス状態」に移る。本研究では、このガラス化現象を蓄熱に応用した潜熱蓄熱法を提案する。液体PCMを急冷し、ガラス化させることで、PCMのカプセル化が不要で蓄熱、熱輸送が可能となる。この、ガラス化利用型PCMを用いた熱輸送プロセスについて検討し、未利用率の高い高温排熱蓄熱・輸送・再生利用プロセスへの適用可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：It's possible to store the heat in high-density using phase change material (PCM). But long term heat-storage and transportation of heat are impossible by conventional latent heat-storage technique, and heat to be stored with PCM of the liquid phase, the encapsulation to prevent leakage of PCM is indispensable. On the other hand, when a substance is quenched beyond specific cooling speed from liquid state, it change into glass state via supercooled state. In this study, new latent heat storage system using "glass-transition" is proposed. In this study, new latent heat storage system using "glass-transition" is proposed. Encapsulation of PCM is unnecessary and heat-storage and heat-transportation become possible to quench liquid PCM and make them glass-transition state. A reuse process of the heat stored by PCM using the glass transition state were considered, as a result, it was indicated its high utility.

研究分野：エネルギー工学

キーワード：潜熱蓄熱 PCM ガラス化 熱輸送

## 1. 研究開始当初の背景

潜熱蓄熱は Phase Change Material (PCM) の固液相変化潜熱を利用する蓄熱法で、高密度蓄熱が可能である。また、貯蔵された熱は相変化温度一定の恒温熱源として熱供給可能なため、未利用熱利用に最適である。潜熱蓄熱の方式としては融点以上の熔融状態で熱貯蔵する方式(正統的 PCM)と、過冷却状態で熱貯蔵する方式(過冷却利用型 PCM)が報告され、実用化に至っている。

正統的 PCM は最も一般的だが、融点以上の熔融状態で熱貯蔵するため、短期的熱貯蔵(日単位)以外には適用できない。また、液体 PCM 流出防止のためのカプセル化が必要である。

次に、過冷却利用型 PCM は、融点以下の過冷却状態で熱貯蔵できるため、長期間の熱貯蔵が可能である。しかし、過冷却解除のハンドリングは極めて困難であり、カプセル化も必要である。

一方、物質を液体状態からある冷却速度以上で急冷すると、過冷却液体を経て「ガラス状態」に転移する。ガラス状態は非晶質で、外部刺激等で解除されず、物質によっては長期間(年単位)ガラス状態を維持可能である。さらに、ガラス転移点以上に昇温すると、ガラス状態は容易に解除され、結晶化潜熱を放熱する。研究代表者らは、このガラス化現象を蓄熱に応用した革新的潜熱蓄熱法を着想した。即ち、液体 PCM を急冷し、ガラス化させることで、ガラス化した PCM=疑似固体で熱貯蔵することが可能となる。

未利用熱有効利用において、熱エネルギーの需要と供給の時間的・空間的ギャップを埋めることが最重要かつ最難関である。本研究は、「潜熱蓄熱×ガラス化」の発想で、潜熱蓄熱の常識を覆す、長期間熱貯蔵(年単位)かつ任意の時間・場所で容易に放熱可能な画期的蓄熱・熱輸送システムを実現できる。この時空を超えた未利用熱有効利用法は革新的省エネを導く可能性がある。また、潜熱蓄熱技術の進歩において常に課題となっていた PCM カプセル化を必要としない点で、技術的に普及しやすく、大きなインパクトがある。

## 2. 研究の目的

本研究はガラス化現象を潜熱蓄熱に応用し、長期間熱貯蔵(年単位)、カプセルフリー熱輸送を実現する次世代「ガラス化利用型 PCM」を用いた潜熱蓄熱技術の創成を目指す。特に、未利用熱の 50%以上を占める 150 以下の熱源の回収を狙い、

(1) 糖アルコール類系ガラス化利用型 PCM の開発

(2) ガラス化利用型 PCM を用いた次世代熱輸送プロセスの設計

を目的とする。

## 3. 研究の方法

マンニトール等の糖アルコールは 100 付近に融点を持つ PCM として研究されている一方、医薬品分野では極めてガラス化しやすい性質が見出され、薬の成分として広く使われている。即ち、ガラス化現象を潜熱蓄熱に応用する試みのスタートとして、糖アルコール類は最適である。そこで、本研究では糖アルコール系 PCM に着目する。当成果は、蓄熱分野の新領域を開拓するのみならず、未利用熱の 50%以上を占める 150 以下の熱源の有効利用による省エネに直結する。

(1) 糖アルコール系ガラス化利用型 PCM の開発

多元系糖アルコールの基礎熱物性調査

100 以上に融点を持つ糖アルコール類を共晶組成に調整し、熱分析装置にて融点、潜熱量を測定、PCM 候補を特定する。二元系及び三元系を重点的に調査する。組成の候補としてキシリトール、スレイトール、エリスリトール、マンニトール、マルチトール、ズルシトール、イノシトール等を予定している。

多元系糖アルコールのガラス化

特性及び蓄放熱特性調査

PCM 候補のガラス化特性及び蓄放熱特性を、熱分析により調査する。本項目は本研究における最重要テーマである。図 5 は本研究を着想するきっかけとなったマンニトール-イノシトール-ズルシトール共晶混合物の熱分析結果の一例を示す。熱分析より、ガラス転移点、冷結晶化温度が取得できる。本研究では、PCM 熔融状態からの冷却速度がガラス転移点に及ぼす影響、及びガラス状態からの昇温速度が結晶化温度に及ぼす影響を調査する。また、これらの結果からガラス化保持時間(=緩和時間)を導出する。成果として、ガラス転移点 30 以上(室温でガラス状態を維持可能)、融点 120 以上、結晶化潜熱 300kJ/kg 以上を達成可能な次世代ガラス化利用型 PCM を開発する。

(2) ガラス化利用型 PCM を用いた次世代熱輸送プロセスの設計

PCM 微粒化プロセスの検討

ガラス化利用型 PCM は液体 ガラス状態に転移する際に急冷が必要である。また、結晶化の際にはガラス転移点以上までの昇温が必要である。そこで本研究では、これらの操作を簡潔に実行するための PCM 微粒化を検討する。マイクロ粒子化を成果の目安に設定するが、ナノ粒子化にも挑戦する。

熱輸送特性調査、熱輸送実験

蓄熱部、ガラス化処理用冷却部、ガラス化解除処理用昇温部を備えた循環流動層熱交換装置を作成し、微粒化したガラス化利用型 PCM の熱輸送特性を調査する。ここで取得したガラス化 PCM の熱輸送特性を基に、微粒化プロセスの再設計も同時に実施する。

## 2-3 ガラス化利用型 PCM を用いた排熱輸送システムの設計

150 程度の排熱を対象とした熱輸送システムを設計する。新システムの省エネルギー効果、二酸化炭素削減ポテンシャル、およびスケール感を概算し、鉄鋼、化学をはじめとする企業に提案する。

### (3) 研究成果の発表

積極的に成果の発表を行い、他の研究者からの助言、批判を受ける。助言や批判の内容はそれぞれの検討課題へフィードバックさせる。

## 4. 研究成果

本研究では、このガラス化現象を蓄熱に応用した潜熱蓄熱法を提案、すなわち、液体 PCM を急冷し、ガラス化させ、ガラス化 = 疑似固体状態で蓄熱することで、次の革新的特徴を提供する。

- 1) ガラス状態で長期間(数年単位)蓄熱が可能
- 2) ガラス転移点以上の熱を与えるのみで、必要な時・場所で(結晶化潜熱を)放熱可能
- 3) 「ガラス化 = 疑似固体状態」なので、PCM のカプセル化が不要(カプセルフリー)で蓄熱、熱輸送が可能

以上の利点を持つ、ガラス化利用型 PCM を用いた熱輸送プロセスの設計について検討し、未利用率の高い高温排熱蓄熱・環境温度保持(輸送)・再生利用プロセスへの適用可能性を示した。しかし、排熱量の豊富な中温排熱蓄熱・環境温度保持(輸送)・再生利用のプロセスについては最適な PCM の発見に至らず課題を残した。

## 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 3 件)

1) Macro-encapsulation of metallic phase change material using cylindrical-type ceramic containers for high-temperature thermal energy storage  
R. Fukahori, T. Nomura, C. Zhu, N. Sheng, N. Okinaka, T. Akiyama  
Applied Energy, 170(2016) pp. 324-328  
DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.106  
査読有り

2) Thermal analysis of Al-Si alloys as high-temperature phase-change material and their corrosion properties with ceramic materials  
R. Fukahori, T. Nomura, C. Zhu, N. Sheng, N. Okinaka, T. Akiyama  
Applied Energy, 163(2016) pp. 1-8

DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.164  
査読有り

3) Improvement on Heat Release Performance of Direct-contact Heat Exchanger Using Phase Change Material for Recovery of Low Temperature Exhaust Heat  
T. Nomura, M. Tsubota, A. Sagara, N. Okinaka, T. Akiyama  
ISIJ international, 55(2015) pp. 441-447  
DOI: 10.2355/isijinternational.55.441  
査読有り

〔学会発表〕(計 5 件)

1) 鉄鋼排熱の利用と蓄熱技術・熱交換技術  
沖中憲之  
日本鉄鋼協会 第 174 回秋季講演大会 北海道大学(札幌) 2017.09.06-08

2) 供給側としての鉄鋼産業：鉄鋼排熱の利用と蓄熱技術  
沖中憲之  
日本鉄鋼協会 第 173 回秋季講演大会 シンポジウム 首都大学東京(八王子) 2017.3.15-17

3) 排熱利用と蓄熱技術  
沖中憲之  
日本鉄鋼協会 第 172 回秋季講演大会 シンポジウム 大阪大学(豊中) 2016.9.21-23

4) 高温蓄熱システムのための合金 PCM カプセルの開発  
深堀諒, 能村貴宏, 朱春宇, 沖中憲之, 秋山友宏  
日本化学工学会 第 47 回秋季大会 一般講演 北海道大学(札幌) 2015.09.09-11

5) 次世代太陽熱発電のための合金 PCM カプセル化技術  
深堀諒, 能村貴宏, 朱春宇, 盛楠, 沖中憲之, 秋山友宏  
日本エネルギー学会 第 24 回大会 一般講演 札幌コンベンションセンター(札幌) 2015.08.03-04

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

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〕  
ホームページ等  
なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

沖中 憲之 (OKINAKA Noriyuki)  
北海道大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：20250483

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし

##### (4) 研究協力者

修士学生 2名