

中温度域における直接接触熱交換式潜熱蓄熱システムの研究

藤澤 拓己, 白土 博康, 富樫 憲一, 平野 繁樹, 保科 秀夫

Study on Direct-contact Heat Storage System using Erythritol as a Latent Heat Storage Material

Takumi FUJISAWA, Hiroyasu SHIRATO, Kenichi TOGASHI,
Shigeki HIRANO, Hideo HOSHINA

抄 録

約100~250℃の中温度域の未利用熱の活用を目指し、熱輸送媒体にシリコンオイル、蓄熱材にエリスリトールを用いた潜熱蓄熱装置を試作した。高温のシリコンオイルを蓄熱装置に流入させ、装置内のエリスリトールを融解状態にすることで、蓄熱が可能であることを確認した。また、融解状態のエリスリトールに低温のシリコンオイルを流入させて、蓄熱した熱を回収し利用することが可能であることを確認した。さらに蓄熱操作、放熱操作時の蓄熱材の融解・凝固挙動を把握した。

キーワード：潜熱蓄熱、直接接触熱交換、未利用熱

1. はじめに

日本の工場排熱量の7割以上が100~250℃の中温度域の温度の排熱とされており¹⁾、この温度域の排熱の活用が省エネルギー推進に効果的だと考えられる。蓄熱技術は、そのような工場排熱や太陽熱などの未利用熱を活用する際に課題となる「時間」の差異や、「場所」の不一致による熱損失を軽減する技術の一つである。

主な蓄熱方式に、顕熱蓄熱、潜熱蓄熱、化学蓄熱がある。顕熱蓄熱では、物質の比熱と温度差の積である顕熱を利用する。潜熱蓄熱では、蓄熱材の固相-液相間の相変化時の潜熱を利用する。化学蓄熱は、化学反応時の反応熱を利用する。一般的に、単位質量あたりの貯蔵熱量である蓄熱密度の大きさは、化学>潜熱>顕熱の順だが、化学蓄熱は蓄熱材の劣化や装置への腐食性、化学反応の制御など課題が多いため、本研究では潜熱蓄熱を選択した。

潜熱蓄熱技術は、蓄熱材の固相-液相間の相変化に伴って吸収又は放出される熱(潜熱)を利用する技術で、単位質量あたりの貯蔵熱量が大きい蓄熱方式である。また、相変化している間は融点付近の温度を保つため、温度を保持できる時間が長い。潜熱蓄熱に関しては、長年研究が進められている

が²⁾、固相の熱伝導率が低いという伝熱における課題などがある。この課題を改善する方法の一つとして、たとえば直接接触式の熱交換が検討されている³⁾。一般に、熱交換器を用いて熱輸送媒体と蓄熱材の熱移動を行う間接触式が用いられるが、放熱時には熱交換器周囲に蓄熱材が凝固し熱抵抗となる。一方、熱交換器を用いずに熱輸送媒体と蓄熱材を直接接触させて熱移動を行う直接接触式では、熱媒が次々流入し熱交換するため、蓄熱材が熱抵抗となりづらく、蓄熱材自体の流動により熱移動が促進される。デメリットとして蓄熱材が流出する危険性があるが、本研究では高い熱交換効率を持っている直接接触式を選択した。それぞれの熱交換方式のイメージを図1に示す。

本研究では、100℃以上の温度の熱利用を目的とした潜熱蓄熱装置を試作し、基礎的な蓄熱・放熱特性を把握したので、以下に報告する。

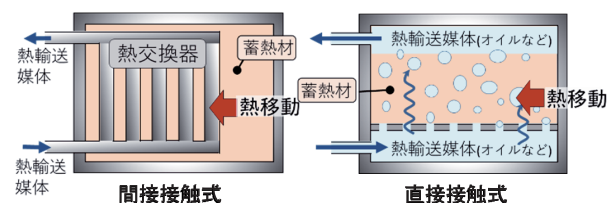


図1 熱交換方式のイメージ

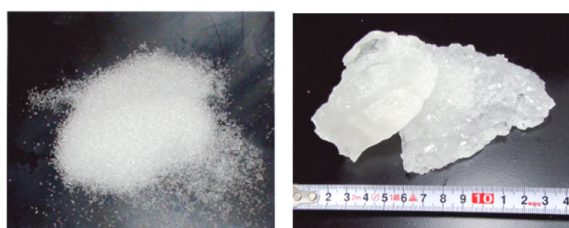
事業名：職員研究奨励事業

課題名：中温未利用熱活用のための直接接触熱交換式潜熱蓄熱システムに関する研究

2. 試験方法

2.1 蓄熱材 (エリスリトール)

本研究では蓄熱材としてエリスリトールを用いた。エリスリトールの写真を図2に、物性を表1に示す。エリスリトールは糖類の一種で、果物やキノコ類、ワインや清酒、醤油などの発酵食品に含まれる安全な食品素材である⁴⁾。融点は118℃、融解潜熱量は約320kJ/kgであり、この潜熱量は1kgの水を25℃から100℃まで温度上昇させる熱量に相当する。また、熱輸送媒体に使用したシリコンオイルに溶解しない特徴を持っている。



白色結晶粉末 融解→凝固後の固体

図2 エリスリトール写真

表1 エリスリトールの物性

化学式	C ₄ H ₁₀ O ₄
分子量	122.12 g/mol
特徴	耐熱 (150℃まで), 低吸湿, 安全 (ワインや果物に含まれる), シリコンオイルに不溶
融点	118℃
融解(凝固)潜熱量	320 kJ/kg

2.2 蓄熱装置

2.2.1 装置の概要

試作した蓄熱装置の概略図を図3に示す。蓄熱装置は蓄熱材を投入した蓄放熱槽、熱輸送媒体の温度調整槽 (高温側・低温側)、放熱用熱交換器、ポンプ、流量計で構成し、それぞれをSUS304配管で接続し、グラスウールで断熱した。温度調整槽では、電気ヒーターと攪拌機で熱輸送媒体であるシリコンオイル (以下、Oilという) の温度調整を行った。蓄熱材は蓄放熱槽内に投入し、Oilをポンプで循環させる仕組みとなっている。

2.2.2 蓄放熱槽

蓄放熱槽の写真を図4に示す。蓄放熱槽は観察用に、外径φ200mm、高さ400mmの耐熱ガラス管を用いた。蓄放熱槽下部にはφ1.6mmの孔が多数空いた多孔板を設置しており、Oilが下部より流入し、蓄熱材との直接接触により熱交換し

た後、蓄熱材とOilの密度差と相互不溶性を利用して、Oilのみを上部から回収する仕組みである。蓄放熱槽内の蓄熱材温度とOil温度はT型シース熱電対で測定し、蓄熱材温度は中心部の高さ10mm、100mmの位置、Oil入口温度は多孔板の下部、Oil出口温度は蓄放熱槽上部のOil送出配管内を測定点とした。

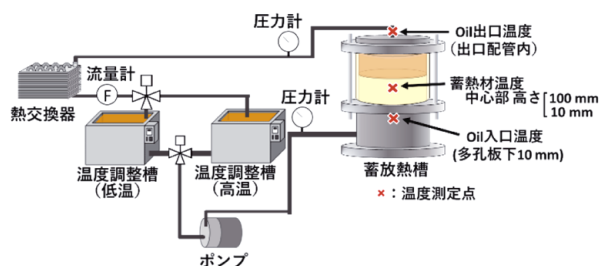


図3 蓄熱装置概略図

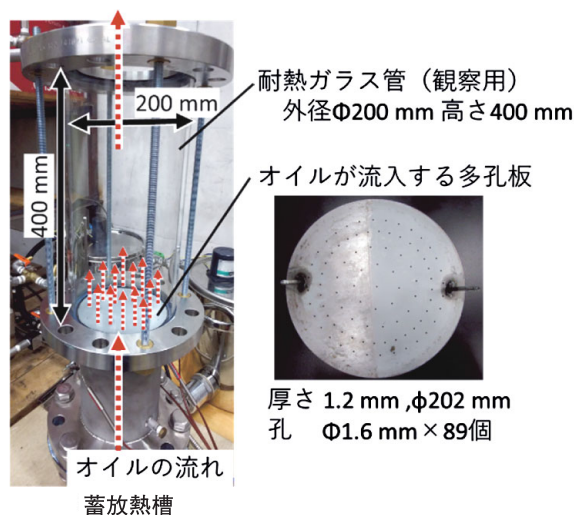


図4 蓄放熱槽写真

2.3 実験と放熱量計算

2.3.1 蓄放熱実験

蓄熱操作として、蓄放熱槽にエリスリトール固体4kgを投入し、高温用温度調整槽で145℃に加熱したOilを蓄放熱槽内に流量1L/minで流入させて、蓄放熱槽内のエリスリトールを完全に融解させた。その後、放熱操作として、低温用温度調整槽で55℃に調整したOilを流量1L/minで流入させて蓄熱材から放熱を行った。蓄熱時及び放熱時の装置を流れるOilの動きと蓄熱材の状態変化のイメージを図5、図6にそれぞれ示す。

2.3.2 放熱量計算

放熱実験時のOil出入口温度差とOilの流量、比熱、密度から放熱量 \dot{Q} を(1)式で定義して計算した。測定間隔は1秒とした。また、Oil出口温度が130℃から100℃になるまでの各測定時間における放熱量の合計を累計放熱量 Q_c として(2)

式で定義して計算した。

$$\dot{Q} = f_{oil} \times \rho_{oil} \times c_{p_{oil}} \times (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

$$Q_C = \sum_{t=t_{130}}^{t_{100}} \{f_{oil} \times \rho_{oil} \times c_{p_{oil}} \times (T_{out} - T_{in})\} \Delta t \quad (2)$$

※ t_{130} は, $T_{out} = 130^\circ\text{C}$ (403K) となった時間, t_{100} は, $T_{out} = 100^\circ\text{C}$ (373K) となった時間とする。

- \dot{Q} : 放熱量 [W] (J/s)
- Q_C : 累計放熱量 [J]
- f_{oil} : Oil 流量 [ml/s]
- ρ_{oil} : Oil 密度 [g/ml]
- $c_{p_{oil}}$: Oil 比熱 [J/(g·K)]
- T_{out} : Oil 出口温度 [K]
- T_{in} : Oil 入口温度 [K]
- Δt : 測定間隔 [s]

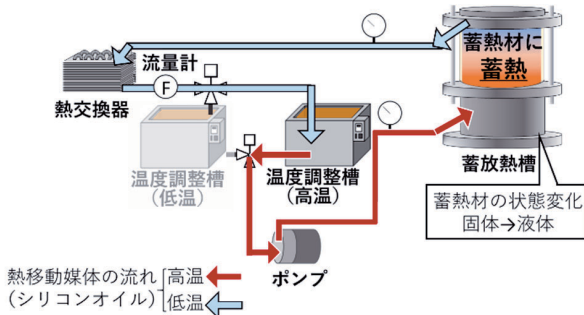


図5 蓄熱時のシリコンオイルの流れ

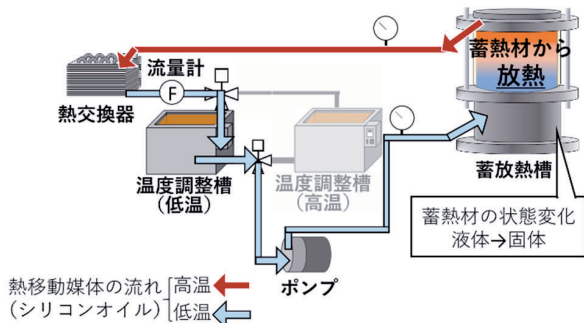


図6 放熱時のシリコンオイルの流れ

3. 実験結果と考察

3.1 蓄熱

図7に, Oil温度調整槽設定温度 145°C , Oil流量 1 L/min の条件における, 蓄熱時の各温度測定点の温度経時変化を示す。また, 蓄熱材の融解状況写真を図8に示す。Oil入口温度が上昇するにしたがって蓄熱材(高さ 10 mm)の温度が上昇し, その後, エリスリトール融点である 118°C で一部の融解が始まると蓄熱材温度は融点付近で温度上昇が緩やかになった。経過時間 25 分 の蓄熱材画像より, エリスリトールの一部

が融解してオイル液滴周りを包んだ泡状になっていることが観察された。経過時間 55 分 の画像より, 蓄熱材下部の融解が進んでいることが観察され, その時間の蓄熱材(高さ 10 mm)の温度は融点よりも高くなった。経過時間 70 分 を過ぎると蓄熱材(高さ 100 mm)の温度が融点付近で横ばいとなったため, この位置の融解が進んでいると考えられる。経過時間 85 分 の画像を見ると蓄熱材下部の融解は完了し, 蓄熱材(高さ 100 mm)付近より上部位置に固体のエリスリトールが残っていることが見られた。経過時間 110 分 の画像を見ると, エリスリトールが全て融解し, 蓄熱が完了していることが確認された。

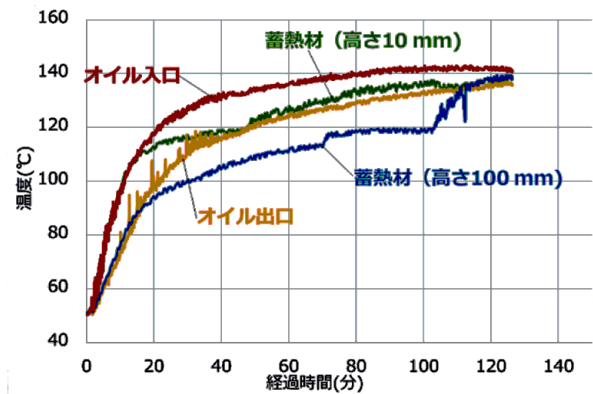


図7 蓄熱時の温度経時変化

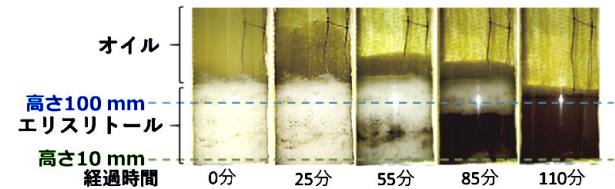


図8 蓄熱時の蓄熱材融解状況

3.2 放熱

図9に, Oil温度調整槽設定温度 55°C , Oil流量 1 L/min の条件における, 放熱時の各温度測定点の温度経時変化を示す。また, 蓄熱材の凝固状況写真を図10に示す。Oil入口温度が低下すると蓄熱材の温度が低下し, 経過時間 10 分 程度でエリスリトールの融点である 118°C 付近で横ばいとなった。経過時間 10 分 の画像を見ると, 蓄熱材上部にエリスリトールの凝固体が形成されていることがわかる。凝固が進む際には, まず, Oilとエリスリトールの境界面付近で凝固体の層が形成された後, その下部の融解状態のエリスリトール中に細かい固体が生じて, 上昇と下降を繰り返しながら, 細かい固体が積み重なっていく様子が観察された。Oilとエリスリトールの境界面付近に, Oil液滴と液体状のエリスリトールで形成された液泡が生じるため, その液泡部分で熱交換が進み, Oilとエリスリトールの境界面付近で凝固体が形成されると考えられる。

経過時間15分では、下部の凝固が進んでいる様子が確認され、経過時間30分では、さらに凝固領域が拡大しており、グラフから蓄熱材温度が融点よりも低くなっていることが確認された。

次に、Oil入口温度とOil出口温度を見ると、経過時間15分以降には50～60℃程度で流入したOilが、蓄熱された熱を受け取ることで、昇温されて蓄放熱槽から送出されており、最大で55K程度の温度上昇が確認された。しかし、経過時間12～25分のOil出口温度と蓄熱材温度を比較すると、蓄熱材温度が融点付近の高い状態であるにもかかわらず、Oil出口温度は低い状態となっており、熱移動が速やかに行われていない可能性がある。

糖アルコール類を蓄熱材とし、シリコンオイルを熱輸送媒体とする直接接触式潜熱蓄熱では、放熱時に流入するオイルの流路周りに、円筒状の凝固体が形成されることが報告されている³⁾。本実験においても、Oilの流路周りに柱状の凝固体が形成された(図11)。このOil流路周囲に形成された凝固体が、Oilの拡散と熱移動を阻害している原因の一つであると考えられる。速やかな熱移動のため、今後Oil流入の方法やOil流入多孔板の改良などを検討する必要がある。

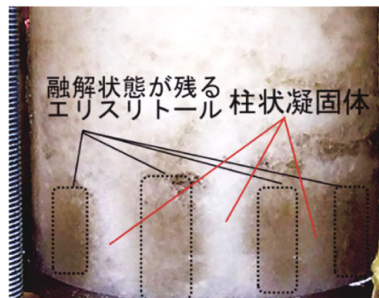


図 11 放熱時の凝固途中に観察された柱状凝固体

3.3 放熱量

本研究では、100℃以上の熱利用を想定しているため、放熱時のOil出口温度が130℃から100℃になるまでの各測定時間における放熱量を合計すると約1670kJであり、蓄熱材の顕熱量、潜熱量、Oil顕熱量から計算した理論値の約78%であった。蓄熱材中に、熱が回収しきれていない部分があると考えられるため、より効率のよい熱交換を行うための改良が必要であると考えられる。

4. まとめ

試作した潜熱蓄熱装置を用いて、高温のシリコンオイルを流入し、蓄放熱槽内のエリスリトールを融解状態にすることで、蓄熱が可能であることを確認した。また、融解状態のエリスリトールに低温のシリコンオイルを流入させることで、蓄熱した熱の回収が可能であることを確認した。さらに、本試作装置を用いた際のエリスリトールの融解・凝固挙動を把握した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、岡山大学堀部明彦教授にご助言、ご協力頂きました。心より感謝致します。

参考文献

- 1) 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(2019)
- 2) 鈴木 洋他：潜熱蓄熱・化学蓄熱・潜熱輸送の最前線，シーエムシ出版，251PP.，(2016)
- 3) 堀部明彦・春木直人・頃末英之：混合潜熱蓄熱材を充填した直接接触蓄熱槽の凝固・融解特性，日本機械学会2013年度年次大会講演論文集，G061043(2013)。
- 4) 早川幸男他：良くわかる食品新素材，食品化学新聞社，684PP.，(2010)

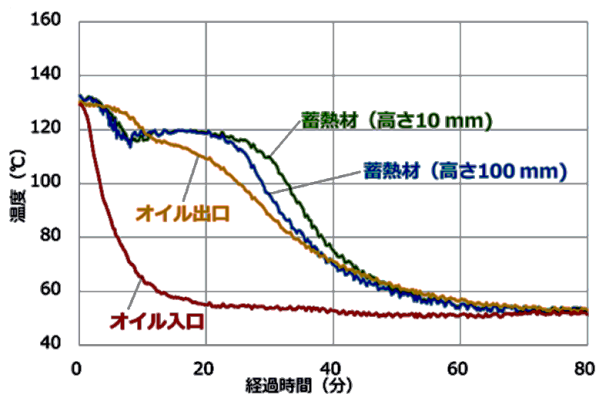


図 9 放熱時の温度経時変化

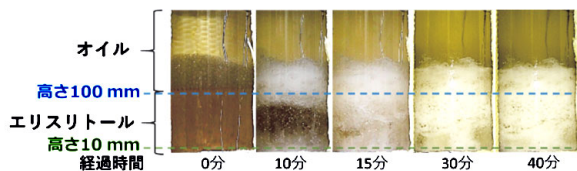


図 10 放熱時の蓄熱材凝固状況