

学位論文題名

Design of Energy System Based on Latent Heat Storage

(潜熱蓄熱によるエネルギーシステム設計)

学位論文内容の要旨

持続可能エネルギー社会構築の基盤となるエネルギー循環利用、及び再生可能エネルギーの積極的導入には、需要と供給の時間的、空間的不均衡を埋めるエネルギー貯蔵・輸送技術が不可欠である。特に、産業排熱や太陽熱等、代表的な未利用エネルギーは熱として多量に存在するため、高度な蓄熱技術の確立が切望されている。代表的蓄熱法として、顕熱蓄熱法、潜熱蓄熱法、及び化学蓄熱法がある。熱を物質の顕熱として貯蔵する顕熱蓄熱法は、技術的に確立されているが、低蓄熱密度が問題である。熱を化学エネルギーとして貯蔵する化学蓄熱法は、高蓄熱密度、長期間熱貯蔵が実現可能だが、反応制御及び繰り返し特性、経済性に課題があり、実用に至る反応系は少ない。一方、相変化物質 (Phase Change Material: PCM) の固液相変化時の潜熱を利用する潜熱蓄熱法は、蓄熱密度が高く、熱的安定性、耐久性に優れ、間欠熱源を恒温熱源へ変換可能である。そのため、時間単位、日単位での操業サイクルを持つ産業プロセスでの排熱回収や太陽熱利用等、エネルギー循環利用、再生可能エネルギー利用分野における最重要プロセスへの適用が期待できる。しかし、未利用熱回収に適した 373 K 超で利用可能な PCM が比較的少ないこと、一般に PCM の熱伝導率は低く、熱的応答性向上が困難なことが課題となっている。そこで本論文は、物質と伝熱機構の観点から潜熱蓄熱技術の高温域への適用、高速熱交換を実現し、エネルギー需要と供給の時間的、空間的不均衡を解消するエネルギーシステムの設計、提案を目的とした。

第一章は、本論文の序論である。蓄熱技術の必要性に言及し、潜熱蓄熱の最新動向を総説する。

第二章では、373 K 超に融点を持つ中高温用 PCM 開発について述べる。現在までに、多数の PCM が提案されているが、中高温域で使用可能な PCM は比較的少なく、検討が不十分である。そこで、本章では、373 K~573K に融点を持つ PCM を選定し、各種熱分析及び耐久性試験を実施した。その結果、473 K~673 K の未利用熱回収用 PCM として、溶融塩系 PCM が安定して使用可能であった。また、ナノ細孔内への PCM を含浸担持させることで、PCM 候補の融点を調節し、広い温度域で利用可能な新規 PCM を開発した。その結果は、440 K に融点を持つ D-マンニトールをナノ細孔中へ含浸担持させることで融点が 413 K 程度まで低下し、蓄熱性能寿命が大幅に向上することを示した。

第三章では、PCM の複合化による伝熱特性改善及び PCM 封入法に関して述べる。PCM は一般的に低熱伝導性が問題である。また、蓄熱時の液体 PCM 漏出防止のため、カプセルに封入する必要があるが、簡便な封入法は未確立である。本章では、PCM としてエリスリトールを使用し、グラファイト粉末及び多孔質 Ni との複合化による PCM の熱伝導率改善、及び各種粒状多孔質材料との複合化による簡便な PCM 封入法を試みた。液体 PCM 中へのグラファイト粉末の分散及び、多

孔質体細孔中への液体 PCM の真空含浸によりコンポジットを作成した後、試料の熱物性値を測定した。その結果は、グラファイト粉末とのコンポジットにおいて、粉末同士のネットワークがパーコレーションした時、急激に高熱伝導化することを示した。また、多孔質 Ni への完全含浸に成功し、その結果純エリスリトールの約 15 倍の熱伝導率向上に成功した。さらに、多孔質媒体への含浸処理は、簡便かつ有効な PCM 封入法であり、そのコンポジットは粒状潜熱蓄熱媒体として利用可能となった。

第四章では、直接接触式潜熱蓄熱熱交換器による高速熱交換に関して述べる。潜熱蓄熱では、シェル・チューブ型、カプセル充填型等、伝熱壁を介した間接接触式熱交換が一般的である。しかし、間接接触式では PCM の低熱伝導性のため、多数の伝熱管が必要となり、蓄熱システムの蓄熱密度低下が問題である。一方、PCM と熱媒体との直接接触熱交換方式は、伝熱管が不要で、システムの蓄熱密度が増大する。更に、熱媒体が液滴となって PCM 層内に分散するため、間接接触式と比較して簡易かつコンパクトに伝熱面積の拡大が可能である。本章では、直接接触式潜熱蓄熱熱交換器における蓄放熱機構を解明し、高速熱交換実現を試みた。ステンレス製円筒縦型容器を蓄熱槽、エリスリトールを PCM として使用し、蓄熱槽に PCM を所定量充填後、下部入口ノズルから熱媒油を流入させ、直接接触熱交換を実施した。蓄熱、放熱共に、PCM 層高、熱媒油温度、熱媒油流量、熱媒油吐出ノズル孔数を変数とし、蓄熱槽内部に設置した熱電対及び蓄熱槽出入口に設置した 2 点の熱電対の温度変化を測定し、蓄放熱性能を評価した。放熱時、凝固 PCM 粒子が蓄熱槽底部に堆積する過程で形成される無数の熱媒油流路が、熱媒油の液体 PCM 層中への均一分散を促進させた。蓄熱時はその流路に沿って融解が開始することが明らかとなった。また、吐出ノズル孔数が多い程、均一分散が実現され、その時、熱交換性能は熱媒油流量、及び PCM 融点と熱媒油流入温度に比例して増大した。本報告における蓄放熱速度は、従来報告値の約 3 倍を達成し、高速熱交換を実現した。

第五章では、潜熱蓄熱によるエネルギーシステムの総合システム解析について述べる。本章では、第二、四章で開発した PCM 及び蓄熱システムを用いた潜熱蓄熱輸送システムを提案し、潜熱蓄熱輸送による鉄鋼・化学コプロダクションの可能性をエネルギー、エクセルギー、二酸化炭素排出量の観点から評価した。その結果は、潜熱蓄熱輸送システムの導入により、投入化石エネルギー量、エクセルギー損失、二酸化炭素排出量のそれぞれを、既存システムに比べて半減可能であることを示した。さらに、製造プロセスへの蓄熱技術の応用展開を検討し、新規製鉄プロセスを提案した。その結果は、現行高炉製鉄法に比べ、コークス投入量の大幅削減が可能であることを示した。

第六章は、結論である。

本研究は潜熱蓄熱技術の高温熱源へ拡張し、伝熱機構を解明することにより、高速熱交換技術を確立した。その結果、需要と供給の時間的、空間的不均衡を解消するエネルギーシステム構築を促進し、材料工学及びエネルギー化学工学の発展に貢献した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 秋 山 友 宏
副 査 特任教授 井 口 学
副 査 教 授 埜 上 洋 (室蘭工業大学)
副 査 教 授 長 野 克 則
副 査 准教授 沖 中 憲 之

学位論文題名

Design of Energy System Based on Latent Heat Storage (潜熱蓄熱によるエネルギーシステム設計)

持続可能エネルギー社会構築の基盤となるエネルギー循環利用、及び再生可能エネルギーの積極的導入には、需要と供給の時間的、空間的不均衡を埋めるエネルギー貯蔵・輸送技術が不可欠である。特に、産業排熱や太陽熱等、代表的な未利用エネルギーは熱として多量に存在するため、高度な蓄熱技術の確立が切望されている。代表的蓄熱法として、顕熱蓄熱法、潜熱蓄熱法、及び化学蓄熱法がある。熱を物質の顕熱として貯蔵する顕熱蓄熱法は、技術的に確立されているが、低蓄熱密度が問題である。熱を化学エネルギーとして貯蔵する化学蓄熱法は、高蓄熱密度、長期間熱貯蔵が実現可能だが、反応制御及び繰り返し特性、経済性に課題があり、実用に至る反応系は少ない。一方、相変化物質 (Phase Change Material: PCM) の固液相変化時の潜熱を利用する潜熱蓄熱法は、蓄熱密度が高く、熱的安定性、耐久性に優れ、間欠熱源を恒温熱源へ変換可能である。そのため、時間単位、日単位での操業サイクルを持つ産業プロセスでの排熱回収や太陽熱利用等、エネルギー循環利用、再生可能エネルギー利用分野における最重要プロセスへの適用が期待できる。しかし、未利用熱回収に適した 373 K 超で利用可能な PCM が比較的少ないこと、一般に PCM の熱伝導率は低く、熱的応答性向上が困難なことが課題となっている。そこで本論文は、物質と伝熱機構の観点から潜熱蓄熱技術の高温域への適用、高速熱交換を実現し、エネルギー需要と供給の時間的、空間的不均衡を解消するエネルギーシステムの設計、提案を目的とした。

第一章は、本論文の序論である。蓄熱技術の必要性に言及し、潜熱蓄熱の最新動向を総説する。

第二章では、373 K 超に融点を持つ中高温用 PCM 開発について述べる。現在までに、多数の PCM が提案されているが、中高温域で使用可能な PCM は比較的少なく、検討が不十分である。そこで、本章では、373 K~573K に融点を持つ PCM を選定し、各種熱分析及び耐久性試験を実施した。その結果、473 K~673 K の未利用熱回収用 PCM として、溶融塩系 PCM が安定して使用可能であった。また、ナノ細孔内への PCM を含浸担持させることで、PCM 候補の融点を調節し、広い温度域で利用可能な新規 PCM を開発した。その結果は、440 K に融点を持つ D-マンニトールをナノ細孔中へ含浸担持させることで融点が 413 K 程度まで低下し、蓄熱性能寿命が大幅に向上することを示した。

第三章では、PCM の複合化による伝熱特性改善及び PCM 封入法に関して述べる。PCM は一般的に低熱伝導性が問題である。また、蓄熱時の液体 PCM 漏出防止のため、カプセルに封入する必

要があるが、簡便な封入法は未確立である。本章では、PCMとしてエリスリトールを使用し、グラファイト粉末及び多孔質 Ni との複合化による PCM の熱伝導率改善、及び各種粒状多孔質材料との複合化による簡便な PCM 封入法を試みた。液体 PCM 中へのグラファイト粉末の分散及び、多孔質体細孔中への液体 PCM の真空含浸によりコンポジットを作成した後、試料の熱物性値を測定した。その結果は、グラファイト粉末とのコンポジットにおいて、粉末同士のネットワークがパーコレーションした時、急激に高熱伝導化することを示した。また、多孔質 Ni への完全含浸に成功し、その結果純エリスリトールの約 15 倍の熱伝導率向上に成功した。さらに、多孔質媒体への含浸処理は、簡便かつ有効な PCM 封入法であり、そのコンポジットは粒状潜熱蓄熱媒体として利用可能となった。

第四章では、直接接触式潜熱蓄熱熱交換器による高速熱交換に関して述べる。潜熱蓄熱では、シェル・チューブ型、カプセル充填型等、伝熱壁を介した間接接触式熱交換が一般的である。しかし、間接接触式では PCM の低熱伝導性のため、多数の伝熱管が必要となり、蓄熱システムの蓄熱密度低下が問題である。一方、PCM と熱媒体との直接接触熱交換方式は、伝熱管が不要で、システムの蓄熱密度が増大する。更に、熱媒体が液滴となって PCM 層内に分散するため、間接接触式と比較して簡易かつコンパクトに伝熱面積の拡大が可能である。本章では、直接接触式潜熱蓄熱熱交換器における蓄放熱機構を解明し、高速熱交換実現を試みた。ステンレス製円筒縦型容器を蓄熱槽、エリスリトールを PCM として使用し、蓄熱槽に PCM を所定量充填後、下部入口ノズルから熱媒油を流入させ、直接接触熱交換を実施した。蓄熱、放熱共に、PCM 層高、熱媒油温度、熱媒油流量、熱媒油吐出ノズル孔数を変数とし、蓄熱槽内部に設置した熱電対及び蓄熱槽出入口に設置した 2 点の熱電対の温度変化を測定し、蓄放熱性能を評価した。放熱時、凝固 PCM 粒子が蓄熱槽底部に堆積する過程で形成される無数の熱媒油流路が、熱媒油の液体 PCM 層中への均一分散を促進させた。蓄熱時はその流路に沿って融解が開始することが明らかとなった。また、吐出ノズル孔数が多い程、均一分散が実現され、その時、熱交換性能は熱媒油流量、及び PCM 融点と熱媒油流入温度に比例して増大した。本報告における蓄放熱速度は、従来報告値の約 3 倍を達成し、高速熱交換を実現した。

第五章では、潜熱蓄熱によるエネルギーシステムの総合システム解析について述べる。本章では、第二、四章で開発した PCM 及び蓄熱システムを用いた潜熱蓄熱輸送システムを提案し、潜熱蓄熱輸送による鉄鋼・化学コプロダクションの可能性をエネルギー、エクセルギー、二酸化炭素排出量の観点から評価した。その結果は、潜熱蓄熱輸送システムの導入により、投入化石エネルギー量、エクセルギー損失、二酸化炭素排出量のそれぞれを、既存システムに比べて半減可能であることを示した。さらに、製造プロセスへの蓄熱技術の応用展開を検討し、新規製鉄プロセスを提案した。その結果は、現行高炉製鉄法に比べ、コークス投入量の大幅削減が可能であることを示した。

第六章は、結論である。

本研究では、潜熱蓄熱技術を高温熱源へ拡張し、伝熱機構を解明することにより高速熱交換技術を確立した。その結果、需要と供給の時間的、空間的不均衡を解消するエネルギーシステム構築を促進し、材料工学及びエネルギー化学工学の発展に貢献した。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。