

学位論文題名

氷スラリー蓄冷熱のための基礎研究

学位論文内容の要旨

1973年に発生した第1次石油危機は、当時エネルギー供給の大半を石油に依存していたOECD(経済協力開発機構)諸国に大きな衝撃を与えた。しかしながらそれを契機として、多大な石油エネルギーを消費していた先進諸国は、石油代替エネルギーの開発・導入、および省エネルギー対策を積極的に進めてきた。わが国においても二度にわたる石油危機の経験から、1980年には内外の経済的社会的環境に応じたエネルギーの安定的かつ適切な供給の確保、および国民経済の健全な発展と国民生活の安定に寄与することを目的とした、「石油代替エネルギーの開発及び導入の促進に関する法律」を制定し非化石燃料への移行を促した。

また、時を同じくして、石油に代表される化石燃料の大量消費に伴う新たな問題が注目され始めた。いわゆる「地球温暖化」である。現在、環境問題の代名詞とも言える地球温暖化は、化石燃料の大量消費による二酸化炭素等の排出量の増加、および森林破壊による二酸化炭素の吸収源の減少という相乗効果により加速度的に進行しており、何らかの対策を施さなければ地球温暖化傾向の収束または改善は望めない状況となっている。

わが国の二酸化炭素排出量の構成を見ると、排出量の約9割は石油や石炭などの化石エネルギーの消費によるものであり、その多くはわれわれが日々消費している電力の発電過程で消費されている。電力会社の統計によると夏期に1日の電力需要が最も大きくなるのは14時から15時の間、逆に最も需要が減るのは早朝4時から5時の間であり、両者の電力需要格差は約2.5倍にもなる。このような電力需要格差を是正し、電力負荷の平準化を行うことは、最大消費電力量の低下とともに、発電源構成比の非化石燃料割合の増加をもたらすため、先に述べた二酸化炭素排出削減へとつながると考えられる。

この電力需要格差を是正する対策の一つとして、夜間の余剰電力を利用して蓄冷媒体に冷熱を蓄え、その冷熱を昼間の冷房冷媒として利用する、蓄冷熱システムが考案され既に実用化されている。氷蓄熱によるピークシフトを行った場合、石油燃料の使用比率の低い夜間電力を用いるため、発電により排出される二酸化炭素量は、昼間の約80%程度に抑制できると見積もられている。また、昼間と比較し外気温が低い夜間に製氷を行うため冷凍機のCOPが高くなり、さらなる省エネルギー効果が期待できる。

氷蓄熱システムは、その氷の製氷方法から、氷の成長と融解が静的に繰り返されるスタティック型と、氷に流動性をもたせたダイナミック型とに大別される。ダイナミック型の氷蓄熱システムは、スタティック型よりも氷に流動性があるため配管輸送が可能であり、また、氷の成長に伴う製氷能力の低下および氷同士のブリッジングといった問題が起こらない等の利点を有するため、水または水溶液と微細な氷粒子の混合物である氷スラリーを蓄冷媒体としたダイナミック型氷蓄熱システムが近年注目されている。

現在実用化されているダイナミック型氷蓄冷熱システムの多くは、生成された氷スラリーを用いて水等の二次冷媒を冷却し、それを空気冷却用熱交換器内に流入させるタイプのものであるが、生成した氷スラリーを安定的に直接熱交換器内に流入させることが可能であれば、

単位冷熱量当たりのポンプ駆動力の低減および蓄冷熱槽の小型化による設備投資の削減が可能となると考えられる。しかしながら、氷スラリーは密度の異なる固相と液相が混在する固液二相流体であるため、搬送流路や熱交換器の形状および設置姿勢により、流路内における氷粒子の分布状態が変化し、複雑な流動・熱伝達挙動を示すことが予想される。従ってダイナミック型氷蓄冷熱システムの運転特性を把握するためには、氷スラリー搬送流路ならびに採冷熱用熱交換器内を流れる氷スラリーの融解熱伝達特性を詳細に解明することが不可欠であるが、これらの諸問題に対する、伝熱工学的立場からの詳細な検討はほとんどなされていない。

このような現状に基づき、本研究では、ダイナミック型蓄冷熱システムを開発・運転する上での基礎資料を得ること、また、ダイナミック型氷蓄冷熱システムにおける氷スラリー搬送流路および採冷熱用熱交換器の伝熱特性に関する基礎資料を得ることを目的として、氷スラリーを用いた小型のダイナミック型氷蓄冷熱システムを構築し、その運転特性について実験的検討を行うとともに、シミュレーションモデルを構築して数値解析を行い、システムの運転特性および最適運転条件の評価を行った。さらに、静止氷スラリー層の融解熱伝達挙動ならびに、直行流路および下向き曲がり流路内を流れる氷スラリーの流動および熱伝達挙動に及ぼす諸因子の効果に関して実験的検討を行った。なお、本研究で用いた氷スラリーは微細な氷粒子とエチレングリコール水溶液の混合物であり、良好な流動特性を有している。

本論文は7章より構成されている。第1章は序論であり、本研究の着想に至った経緯ならびに研究の意義と概要を述べている。

第2章では、氷スラリーを用いた蓄冷熱システムの採冷熱特性および氷スラリーの流動・熱伝達特性に関する従来の研究について、本研究との関連および問題点を述べ、本研究の目的および位置づけを明らかにしている。

第3章においては、氷スラリーを用いた小規模なダイナミック型氷蓄冷熱システムを実際に構築し、初期水溶液濃度および運転モードをパラメータとして実験を行うことにより、ダイナミック型氷蓄冷熱システムの運転特性に及ぼす諸因子の影響を明らかにしている。また、ダイナミック型氷蓄冷熱システムのシミュレーションモデルを構築して数値解析を行うことにより、本研究で構築したシステムの運転特性の評価および最適運転条件の指針を示している。

第4章では、等熱流束加熱面を有する水平円筒容器を用いて、静止氷スラリー層の融解挙動および熱伝達に及ぼす加熱面熱流束および初期水溶液濃度の影響について実験的検討を行うことにより、氷スラリー層の詳細な融解パターンを示すと同時に、熱拡散および濃度拡散を伴う自然対流の影響が、氷スラリー層の形状ならびにその融解熱伝達特性に与える影響を明らかにしている。

第5章においては、上下に等熱流束条件の加熱面を有する水平矩形ダクトを用い、熱流束、氷スラリー主流速度、および流路断面高さをパラメータとして、流路内の流速分布および氷充填率分布が氷スラリーの融解熱伝達挙動に及ぼす影響を詳細に検討し、流路内における氷充填率分布および流速分布と熱伝達特性の関係について明らかにしている。また、流路内の局所的な氷粒子分布を考慮した、加熱壁面における熱伝達特性に関する実験整理式を示している。

第6章では、凹面壁または凸面壁が等熱流束条件である矩形返しバンドを用い、曲がり流路内を流れる氷スラリーの流動・熱伝達特性に及ぼす氷スラリーの主流速度および氷充填率の影響に関して検討を行っており、浮力による氷粒子の堆積と遠心力に起因するディーン型渦の発生が、加熱壁面の熱伝達特性に及ぼす影響を明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究で得られた結果を要約して述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 川 昌 弘
副 査 教 授 宮 本 登
副 査 教 授 近 久 武 美
副 査 教 授 工 藤 一 彦

学 位 論 文 題 名

氷スラリー蓄冷熱のための基礎研究

電力負荷の平準化を行うことは、最大消費電力量の低下ひいては二酸化炭素排出削減に寄与できると考えられ、この対策の一つとして、夜間の余剰電力を利用して蓄冷媒体に冷熱を蓄える、蓄冷熱システムが考案され既に実用化されている。現在実用化されているダイナミック型氷蓄冷熱システムの多くは、生成された氷スラリーを用いて水等の二次冷媒を冷却し、それを空気冷却用熱交換器内に流入させるタイプのものであるが、生成した氷スラリーを安定的に直接熱交換器内に流入させることが可能になれば、ポンプ駆動力の低減および蓄冷熱槽の小型化による設備投資の削減が可能となる。このようなシステムの運転特性を把握するためには、搬送流路ならびに採冷熱用熱交換器内を流れる氷スラリーの融解熱伝達特性を詳細に解明することが不可欠であるが、氷スラリーは固液二相流体であり、搬送流路や熱交換器の形状および設置姿勢により複雑な流動・熱伝達挙動を示すため、伝熱工学的立場からの詳細な検討は殆どなされていない。

このような現状に基づき、本研究では、この新しい蓄冷熱システムを開発・運転する上での基礎資料を得ること、また、氷スラリー搬送流路および採冷熱用熱交換器の伝熱特性に関する基礎資料を得ることを目的として、小型の新ダイナミック型氷蓄冷熱システムを構築し、実験ならびにシミュレーションモデルによる数値解析を行い、システムの運転特性および最適運転条件の評価を行っている。さらに、静止氷スラリー層の融解熱伝達挙動ならびに、直行流路および下向き曲がり流路内を流れる氷スラリーの流動および熱伝達挙動に及ぼす諸因子の効果に関して実験的検討を行っている。

本論文は7章より構成されている。第1章は序論であり、本研究の着想に至った経緯ならびに研究の意義と概要を述べている。

第2章では、氷スラリーを用いた蓄冷熱システムの採冷熱特性および氷スラリーの流動・熱伝達特性に関する従来の研究について、本研究との関連および問題点を述べ、本研究の目的および位置づけを明らかにしている。

第3章においては、氷スラリーを用いた小規模なダイナミック型氷蓄冷熱システムを実際に構築し、初期水溶液濃度および運転モードをパラメータとして実験を行い、ダイナミック型氷蓄冷熱システムの運転特性に及ぼす諸因子の影響を明らかにしている。また、ダイナミック型氷蓄冷熱システムのシミュレーションモデルを構築して数値解析を行い、本研究で構築したシステムの運転特性の評価および最適運転条件の指

針を示している。

第4章では、等熱流束加熱面を有する水平円筒容器を用いて、静止氷スラリー層の融解挙動および熱伝達に及ぼす加熱面熱流束および初期水溶液濃度の影響について実験的検討を行うことにより、氷スラリー層の詳細な融解パターンを示すとともに、熱拡散および濃度拡散を伴う自然対流の影響が、氷スラリー層の形状ならびにその融解熱伝達特性に与える影響を明らかにしている。

第5章においては、上下に等熱流束条件の加熱面を有する水平矩形ダクトを用い、熱流束、氷スラリー主流速度、および流路断面高さをパラメータとして、流路内の流速分布および氷充填率分布が氷スラリーの融解熱伝達挙動に及ぼす影響を詳細に検討し、流路内における氷充填率分布および流速分布と熱伝達特性の関係について明らかにしている。また、流路内の局所的な氷粒子分布を考慮した、加熱壁面における熱伝達特性に関する実験整理式を提案している。

第6章では、凹面壁または凸面壁が等熱流束条件である矩形返しバンドを用い、曲がり流路内を流れる氷スラリーの流動・熱伝達特性に及ぼす氷スラリーの主流速度および氷充填率の影響に関して検討を行っており、浮力による氷粒子の堆積と遠心力に起因するディーン型渦の発生が、加熱壁面の熱伝達特性に及ぼす影響を明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究で得られた結果を要約して述べている。

これを要するに、本研究は、ダイナミック型氷蓄冷熱システムに関し、氷スラリーを直接熱交換器に流入させる新しいタイプの蓄冷熱システムを提案し、その運転特性や、種々の条件下における氷スラリーの管内流動特性並びに融解熱伝達特性を明らかにし、本システム構築に必要な基礎的伝熱資料を提供しており、冷凍空調工学、伝熱工学に貢献するところ大なるものがある。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あるものと認める。