

氏 名	おか 村 崇 弘
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号	エ ネ 博 第 103 号
学位授与の日付	平 成 16 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	エ ネ ル ギ ー 科 学 研 究 科 エ ネ ル ギ ー 応 用 科 学 専 攻
学位論文題目	Forced Convection Heat Transfer of He I and He II up to Supercritical Pressures (超臨界圧に到るまでの種々の圧力下における He I 及び He II の強制対流熱伝達)
論文調査委員	(主 査) 教 授 塩 津 正 博 教 授 宅 田 裕 彦 助教授 白 井 康 之

論 文 内 容 の 要 旨

超流動ヘリウム (He II) は常流動ヘリウム (He I) に比して優れた冷却特性を持ち、核融合炉や加速器などの大型超伝導マグネットの冷媒として期待されている。本研究論文は、He II や He I を超伝導コイルの冷却流路やコイル捲線の中に強制対流させて冷却する場合の冷却設計や安定性解析の基礎データを得ることを目標として、超臨界圧に到る種々の圧力下で試験ダクト中の平板発熱体における強制対流熱伝達を求め、熱流動現象を実験的・解析的に論じた結果をまとめており、6 章からなっている。主な内容は以下のとおりである。

第 1 章は序論で、通常液体とは全く異なった超流動ヘリウムの物性や、熱輸送特性とそれを記述する 2 流体モデルについての概要、これまでの実験的及び解析的研究の歴史を説明し、超電導マグネットの強制対流冷却設計のデータベースとして、超臨界圧に到る種々の圧力下における熱流動現象解明の必要性を指摘し、これを研究の目的としている。

第 2 章は、He II の強制対流熱伝達実験について記述している。まず実験装置と方法について、加圧超流動状態を実現するクライオスタットやその中に組み込まれたベローポンプとその駆動機構、流速や熱伝達の測定方法を説明している。次に、試験ダクト長さや断面積、ダクト中央内部に張り付けた平板試験発熱体の表面積等が異なる 4 種類の試験部について、定常熱伝達と臨界熱流束を測定し、臨界熱流束の流速、液温、試験部寸法依存性を明らかにし、超流体熱輸送と顕熱輸送の効果を考慮した臨界熱流束表示式を提示している。さらに、発熱体に臨界熱流束より高い波高値をもつステップ状熱入力に加わった場合の非定常熱伝達についても実験を行っている。こうした場合、定常熱伝達曲線の外挿線上に有限の寿命を持つ準定常状態が存在してから発熱体温度が急上昇し膜沸騰に移行することを明らかにし、寿命とステップ熱流束の関係を明らかにし、その機構について考察を行っている。

第 3 章では、He II の強制対流熱伝達をより詳細に解析するため開発した二流体モデルと超流動乱流理論に基づく 2 次元計算コードについて説明している。第 2 章の実験に対応する条件で解析を行って、臨界熱流束解析結果が実験結果と 12% 以内で一致することを示し、このコードの有効性を確認している。数値解析により、流速が大きくなるに従い、発熱体近傍の温度境界層厚さが薄くなり、臨界熱流束時の発熱体位置流路断面平均温度がラムダ温度より低くなる結果、流速上昇による顕熱輸送の上昇が飽和してくることを明らかにしている。

第 4 章は、超臨界圧下 He II 及び He I の強制対流熱伝達を、上述の試験部を用い、亜臨界圧 1.5atm ～超臨界圧 2.8atm、流速 0m/s～4.0m/s、液温 1.8K～6.5K の範囲で求めている。熱伝達特性を、He II、臨界温度以下の He I、臨界温度以上の He I の場合に分類して、それぞれその特徴と流速、液温、試験部寸法依存性を明らかにし、層流域と乱流域からなる超臨界圧 He I の強制対流熱伝達表示式を提示している。

第 5 章は、超臨界圧下 He I の強制対流熱伝達を詳細に解析するため開発した計算コードについて説明している。臨界温度以上では流体の圧縮性が強くなるため、圧縮性を考慮した基礎式を計算精度と安定性に十分注意を払って解析する 2 次元コードを開発し、第 4 章の実験結果と比較してその有効性を検証している。また、速度分布や温度分布を解析し、流体の粘

性が温度が高くなるに従い急激に大きくなることに基づく発熱体近傍の特異な速度分布や温度分布を明らかにしている。

第6章は、本論文で得られた成果を総括して結論としている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、超伝導マグネットの強制対流ヘリウム冷却による冷却設計や安定性解析のための基礎データを得ることを目標として、大気圧から超臨界圧に到る種々の圧力における He II 及び He I の強制対流熱伝達を実験的・解析的に研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) 大気圧下 He II の強制対流熱伝達実験を試験ダクト長さや断面積、ダクト中央内部に張り付けた平板試験発熱体の表面積等を種々変えて行い、熱伝達や臨界熱流束の流速、液温、試験部寸法依存性を明らかにした。従来、臨界熱流束が流速上昇と共に直線的に増加するモデルが提示されていたが、流速が大きくなると飽和傾向を示すことを初めて明らかにした。こうした実験結果を基に超流体熱輸送と顕熱輸送の効果を考慮した臨界熱流束表示式を提示した。
- 2) 大気圧下、He II で強制対流冷却された発熱体に臨界熱流束より高い波高値をもつステップ状熱入力に加わった場合の過渡熱伝達について実験を行い、定常熱伝達曲線の外挿線上に有限の寿命を持つ準定常状態が存在してから発熱体温度が急上昇し膜沸騰に移行することを明らかにした。ステップ高さが非常に大きい場合は、伝熱面近傍の温度分布が急峻で、温度境界層が層流低層内となるため、寿命は流速の影響を受けず、浸漬冷却の場合の表示式と良く一致するが、ステップ高さが低くなるにつれて流速の影響が顕著に現れることを示した。
- 3) 二流体モデルと超流動乱流理論に基づく He II 二次元熱流動解析コードを開発し、臨界熱流束解析結果が実験結果と12%以内で一致することを示し、このコードの有効性を確認した。数値解析により、臨界熱流束実験結果が流速上昇に伴い飽和傾向を持つのは、流速が大きくなるに従い、発熱体近傍の温度境界層厚さが薄くなり、臨界熱流束時の発熱体位置における流路断面平均温度が He II から He I への転移温度（ラムダ温度）より低くなって顕熱輸送の上昇が少なくなる結果であることを示した。
- 4) 2.8atm の超臨界圧下で He II と He I の強制対流熱伝達実験を1)と同じ種々の形状の試験部を用いておこない、流速、液温、試験部寸法依存性を明らかにした。He II の場合、流速、液温、試験部寸法が同じ時の大気圧下のデータと比較すると、臨界熱流束は僅かに低くなり、臨界熱流束以上の熱流束域の熱伝達は大気圧下より良くなることを明らかにした。一方 He I の場合、臨界温度以下の液温では、熱伝達曲線が勾配の大きい低温域と勾配の小さい高温域からなるが、臨界温度以上では変曲点は観測されないことを実験的に明らかにするとともに、これは極低温でのみ生じる固体表面温度とそれに接する流体温度との間の温度ギャップ（Kapitza 抵抗）に起因することを示した。また試験ダクト内の発熱体設置部分は流体力学的には十分発達しており、熱的には助走領域であることを考慮した層流・乱流領域の熱伝達表示式を提示し、層流熱伝達から乱流熱伝達への遷移レイノルズ数を明らかにした。
- 5) 超臨界圧下 He I の2次元強制対流熱伝達解析コードを開発した。臨界温度以上では流体の圧縮性が強くなるため、圧縮性を考慮した基礎式を計算精度と安定性に注意を払ったアルゴリズムで解析し、実験結果と比較してその有効性を確認した。流体の速度分布や温度分布を求め、流体の粘性が温度が高くなるに従い急激に大きくなることに基づく発熱体近傍の特異な速度分布や温度分布を明らかにした。

以上要するに、本論文は超伝導マグネットの強制対流ヘリウム冷却に関して、採用しうる幅広い冷却条件に対する熱流動特性を実験的・解析的に明らかにしたもので、得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成16年10月22日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。