

氏 名 さ とう しん た ろう  
佐 藤 新 太 郎

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 53 年 11 月 1 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 22 年 9 月

東北帝国大学工学部化学工学科卒業

学 位 論 文 題 目 液体ヘリウムの熱伝達に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 武山 斌郎 東北大学教授 大塚 芳郎

東北大学教授 大谷 茂盛

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 言

本研究は、超電導現象を応用した機器の冷却に関連して行われた実験的研究であるが、本章ではその背景となった超電導体 (superconductor) と液体ヘリウムによる冷却との関係について概括的に述べる。

超電導体は一定温度以下では本質的に電気抵抗が零であるので、電力損失がなく、極めて大きい電流密度で通電できる。また超電導体を巻線としたマグネットは高磁界の発生が可能となる。このような特徴から、発電や送電などの電力エネルギー機器をはじめ、車両船舶、高エネルギー物理、情報機器、医療などの分野において、超電導体を使用した革新的な開発研究がすすめられている。

一般に超電導体には flux-jump と呼ばれる不安定性とこれに起因する quench 現象のため、超電導体が常電導に転移し大きなジュール熱を発生する。これらを防止するため、超電導体に銅やアルミニウムを安定化材 (substrate) として被覆した複合超電導体または安定化線材と呼ばれるものが実用線材として使用されてきた。この複合超電導体の一部が常電導に転移して、安定化材に電流のすべてが流れたときに発生するジュール熱を液体ヘリウムによって除去し、超電導状態に回復せしめる必要がある。したがって超電導体の冷却技術を確立するためには、まず液体ヘリウムの熱伝達に関する知見を得ることが重要な基礎的課題となる。

液体ヘリウムの熱伝達については、従来から単純な伝熱面におけるプール沸騰に関して多くの

研究が報告されてきているが、実際の超電導の構造や冷却方式に適用し得るようなデータは極めて少なく、超電導機器を設計するに当たっての問題点の一つとしてその説明が望まれていた。

ここで、超電導機器の実用的設計および未来志向的な概念設計を行うために、種々の冷却条件における液体ヘリウムの熱伝達を実験的に解明し、超電導機器の設計資料として有用な基礎的データを得る必要から本研究に着手したものである。

本論文においては、超電導コイルの層間をモデル化した冷却間隙内における液体ヘリウムの自然対流沸騰熱伝達、管内における超臨界圧状態と二相流状態のヘリウムの強制対流熱伝達および凝縮熱伝達に関して行った実験的な研究について述べた。

## 第2章 狭い間隙における液体ヘリウムの限界熱流束

液体ヘリウム中に超電導コイルを浸漬して冷却する方式においては、コイル層間に設けられる冷却間隙内の液体ヘリウムによってコイル内の発熱をどの位除去できるかということ、すなわち、間隙内の液体ヘリウムの限界熱流束の値を明らかにすることが浸漬冷却された超電導コイルの完全安定化の設計を行うために不可欠のこととなる。本章では、MHD発電実験用の超電導コイルを設計する必要から、モデル化した冷却間隙について、間隙の寸法と傾斜の度合によって液体ヘリウムの限界熱流束の値がいかに変化するかを実験的に調べた。

垂直な間隙について実験した結果、限界熱流束  $q_c$  は間隙の長さ  $l$  と間隙の相当直径  $d_e$ 、およびプール沸騰の限界熱流束  $q_0$  によって次式で表わされる。

$$q_c = \left( \frac{1}{q_0} + 0.096 \frac{l}{d_e} \right)^{-1} \quad [\text{W/cm}^2]$$

間隙の傾斜の影響については、これまで報告された例はなかったが、本実験では、垂直面からの傾斜角  $\theta$  が約  $30^\circ \sim 60^\circ$  において限界熱流束が極大値を示し、上向きと下向き面での限界熱流束を同一の傾斜角において比較すると上向き面の方が大きい。さらに気泡の浮力による二次流れの影響があると考えた。

以上の実験結果に基づき、通産省の大形プロジェクトであるIMWのMHD発電用の超電導マグネットを設計した。製作した超電導マグネットの励磁実験において、過負荷試験を行い、コイルの一部の常電導転移による異常電圧を測定した結果、限界熱流束の値は  $0.42 \text{ W/cm}^2$  となり、これは上記の  $q_c$  の表示式からの計算値  $0.44 \text{ W/cm}^2$  に近い値である。これより本研究の成果は実機の冷却間隙の設計に適用し得ることを確認することができた。

## 第3章 超臨界ヘリウムの強制対流熱伝達

送電用の超電導ケーブルや中空の超電導体 (hollow conductor) を用いた大容量の超電導コイルにおいては冷却管路に冷媒ヘリウムを強制的に流すが、ヘリウムの臨界圧 ( $2.2 \text{ atm}$ ) が低いので、長尺の冷却管路の圧力損失を考慮すれば、冷媒ヘリウムは超臨界圧以上で圧送する必要がある。また超電導発電機の界磁コイルの冷却においても遠心力のためヘリウムの圧力は超臨界圧以上となる。このように超臨界ヘリウムによる冷却は応用面からも注目されてきており、熱伝達な

どの基礎的な研究が必要となった。

一方、ヘリウムの超臨界領域における熱伝達の研究については、二三の報告はあるが、今後さらに実験データを重ねることにより臨界点近傍の特異な挙動を解明する必要があると考え、管内における超臨界ヘリウムの強制対流熱伝達の実験を行った。

実験には、圧縮機と熱交換器および液体ヘリウムを用い、一定の圧力、温度、流量の超臨界ヘリウムを測定管に圧送した。測定はステンレス管自体の抵抗加熱による熱入力と管壁温度および流体温度より熱伝達率を求めた。

温度  $4.2 \sim 11^\circ\text{K}$ 、圧力  $3 \sim 15 \text{ atm}$  の超臨界状態のヘリウムについて測定した結果、低熱流束における熱伝達率は擬臨界温度近傍で極大となり、その値は臨界点に近いほど大きくなる。高熱流束においては、逆に熱伝達が劣化する現象がみられ、臨界点に近いほどその傾向が著しい。これらの実験データを従来の無次元表示式によって比較検討した結果、超臨界ヘリウムの熱伝達率は  $\pm 30\%$  の精度で表わされることがわかった。

#### 第4章 液体ヘリウムの強制対流沸騰熱伝達

第2章に述べたごとく、現在では超電導体を液体ヘリウムに浸漬して冷却する方式が一般に採用されているが、最近では液体ヘリウムを強制的に循環して冷却する方式が注目されてきており、超電導コイルの構造や強制冷却のシステムと関連する熱伝達も始められてきた。

本研究は、垂直なステンレス管内を一様加熱のもとで上昇する液体ヘリウムの圧力を  $1.1 \sim 1.9 \text{ atm}$ 、温度  $4.2 \sim 5^\circ\text{K}$ 、流速  $8 \sim 32 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$  で、熱流速を  $0.004 \sim 0.5 \text{ W/cm}^2$  の範囲で強制対流沸騰熱伝達の実験を行ったものである。実験によれば、液体中の蒸気含有率が比較的小さい領域では核沸騰による熱伝達が支配的であり、熱流束の上昇時と下降時の核沸騰曲線にヒステリシスがみられるが、限界熱流束と膜沸騰の最小熱流束の間にはほとんど差はみられなかった。蒸気含有率が大きくなると飽和蒸気単相の強制対流に近くなる。中程度の蒸気含有率の場合は沸騰と強制対流の両方の影響がみられるが、熱流束下降時には核沸騰の下降曲線に対応した熱伝達になると考えられた。また一般に限界熱流束は圧力および蒸気含有率の増加とともに低下していくことがみられた。以上の実験データを一般流体の二相流と同様にマルチネリのパラメータとボイリング数の関数として表示し、従来の研究と比較した。なお、非沸騰域では液体単相の強制対流熱伝達と考えられた。

#### 第5章 液体ヘリウムの膜状凝縮熱伝達

ヘリウム資源や経済性から考えて、冷却系を完全に閉ループにして冷媒ヘリウムを循環して使用することが必要である。ここでヘリウムの液化冷凍系と超電導体の冷却系のヘリウムの回路を隔離し、冷却系内で蒸発するヘリウムを冷凍系回路との熱交換によって凝縮、再液化する方式が運転操作上から考えて極めて望ましいものである。この方式が国鉄の超電導磁気浮上高速列車の冷却に適用すべく計画されたが、凝縮器の設計に必要なヘリウムの凝縮熱伝達に関するデータが全くなかった。そこで最も基本的な垂直管壁におけるヘリウムの凝縮熱伝達について実験を行っ

た。

両端を閉じた垂直銅管の下部を加熱し、上部を凝縮面とした熱サイホン式の装置を用いて、熱流束と凝縮管壁  $T_w$  および蒸気温度  $T_b$  を測定し、凝縮熱伝達率を求めた。実験結果によれば、熱流束  $q$  と凝縮液膜における温度差  $\Delta T = T_b - T_w$  は直線的関係にあり、その平均凝縮熱伝達率  $h_m$  はほぼ一定値 ( $0.065 \text{ W/cm}^2$ ) を示した。

この結果を Nusselt の層流理論からの計算値と比較すると、温度差  $\Delta T$  が約  $1.0^\circ\text{K}$  の場合は計算値と一致するが、 $\Delta T$  は小さくなるほど計算値より  $q$  または  $h_m$  が小さくなる。この原因について層流理論の導入仮定と実験条件について検討した結果、凝縮壁面の粗さに起因するのではないかと推察した。すなわち壁面粗さの実測値が数ミクロンであるのに対して、液膜の厚さ  $\delta$  は凝縮壁上端からの距離  $l$  と温度差  $\Delta T$  の  $1/4$  乗に比例し、ヘリウムの場合は  $0 \sim 50$  ミクロン程度の範囲にある。したがって壁面の凹凸部の液の滞留を無視できなくなり、実際の液膜の有効厚さは理論計算より大きくなるので、熱伝達率が小さくなる。この効果は  $q$  または  $\Delta T$  が小さいほど大きくなるので、実験結果が示すような結果になったと思われる。

## 第 6 章 結 論

本論文に述べた液体ヘリウムの熱伝達の研究は、超電導機器の冷却にともなう実際的な必要性和未来志向的な新しい冷却方式の基礎を確立するために行ったものである。それぞれの研究の具体的な背景と目的については各章のはじめに記述し、その成果については各章の終りに列挙した。本章では第 2 章から第 5 章までの結果を総括した。さらに本論文以降にヘリウムの熱伝達に関する研究も多く発表されていることを付言した。

本論文は、武山斌郎教授および大谷茂盛教授の懇切なる御指導によりまとめたもので、ここに深く感謝いたします。とくに本論文の執筆に当り、懇篤なる御教示と御配慮を賜りました前田四郎先生に対し厚く御礼申し上げます。

本研究を行うに当っては日立製作所の超電導研究グループの方々に多大の御援助をいただいた。また実験と計算には、尾形久直研究員に多大の協力を得た。ここに厚く謝意を表します。

## 審査結果の要旨

超電導機器の超電導特性を安定させるために、常電導への転移によって発生する大きなジュール熱を吸収し、超電導状態を回復させ、さらにこの状態を持続する必要がある。この発生熱をヘリウムの沸騰熱伝達によって除去することに成功して以来、MHD発電用超電導マグネットあるいは超電導磁気浮上などの革新的な技術がようやく開発の軌道に乗り始めた。しかし、実際の超電導体の構造に適用できる研究は少なく、さらに、効率のよい冷却方式のための基礎的研究は皆無に近い状態であった。

本論文は超電導機器の将来性を志向しながら、設計資料として有用な基礎的データをを得ることを目的として行われた液体ヘリウムの熱伝達に関する実験的研究をまとめたものである。すなわち、液体ヘリウムの自然対流沸騰熱伝達、超臨界圧状態と二相流状態におけるヘリウムの強制対流熱伝達および凝縮熱伝達など、相変化をともなうヘリウムの熱伝達に関する研究が、全編6章としてまとめられている。

第1章は緒言である。

第2章は超電導コイルの層間をモデル化した冷却間隙内における液体ヘリウムの自然対流沸騰熱伝達に関する研究であり、限界熱流束の値が実験で示され、さらに、気泡の浮力による二次流れを考察し、間隙の傾斜の影響を明らかにしている。これは超電導コイルを浸漬して冷却する方式に応用される知見であり、実際の励磁実験において、その適用性が確認されている。

第3章は超臨界ヘリウムの強制対流熱伝達に関する研究である。ヘリウムの臨界圧力が低いことから、長い冷却管路を必要とするものあるいは遠心力の場にあるものを冷却する場合は、超臨界圧のヘリウムが圧送されなければならない。このため、精密な実験がおこなわれ、低熱流束における熱伝達率は擬臨界温度近傍で極大となり、その値は臨界点に近いほど大きく、逆に、高熱束では熱伝達が劣化する現象がみられることを新たに見出している。

第4章では、液体ヘリウムの強制対流沸騰熱伝達の実験が、超電導コイルの構造や強制冷却のシステムの開発のもとにおこなわれ、液体ヘリウムの沸騰熱伝達特性として、熱流速の上昇時と下降時の核沸騰曲線にヒステリシスがみられるが、限界熱流束と膜沸騰の最小熱流束との間には熱流束にはほとんど差異のないこと、さらに、蒸気含有率の熱伝達にあたる影響が詳細に検討されている。

第5章では、冷却系を完全に閉ループにしてヘリウムを循環して使用できるように、液化冷凍系と超電導体の冷却の回路を隔離し、冷凍系内のヘリウムが凝縮・再液化する新しい方式の設計資料を得るために、ヘリウムの凝縮熱伝達率が熱サイホン式の独創的な装置で測定されている。その結果をNusseltの層流理論と比較し、低熱流束の領域で実験値が理論値よりも小さくなる原因は凝縮面の粗さによるとの考察を加えている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文はヘリウムの相変化をともなう熱伝達の総合的な研究であり、極低温工学上数多くの有用な結果が得られ、機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。