

## 審査の結果の要旨

論文提出者 稲口 隆

本論文は「4 K-GM 冷凍機に関する研究」と題し、液体ヘリウムの補充が不要あるいは液体ヘリウム自体が不要な超電導マグネットを実現するため、蓄冷器を用いる極低温小型冷凍機であるギフォード・マクマホンサイクル (GM) 冷凍機について、絶対温度 4.2 K (液体ヘリウムの沸点) 以下で 3 W の冷凍能力を実現するとともに、その計算モデルを構築し、冷凍能力や効率を向上させるための設計指針を得たものである。

論文は 7 章よりなる。第 1 章の「序論」では、到達温度 (無負荷時の最低発生温度) が 10K 程度であった GM 冷凍機の歴史的背景を述べる一方で、産業用超電導マグネットの用途を概観し、4.2K での冷凍能力が 3 W 程度の冷凍機の開発が必要であることを示している。そして、高い信頼性が期待できる GM 冷凍機によりこれを実現するための研究計画について述べている。

第 2 章は「GM 冷凍機の損失に関する基礎研究」と題し、到達温度を制限する各種損失について実験的検討をまとめている。即ち、GM 冷凍機の動作特性を理解するため、単段型 GM 冷凍機において、各種損失の測定方法を組み合わせて各種損失の分離測定を実施し、従来不明であった各種損失の定量的位置づけを行なっている。この結果として、蓄冷器損失が最も大きな損失であるとともに、全損失に占める蓄冷器損失の割合は低温となるほど増大するため、到達温度及び冷凍能力を向上するには蓄冷器損失を大幅に低減する必要があることを示している。そこで、蓄冷器損失に最も関係のある蓄冷材単位体積当たりの熱容量に注目し、低温で熱容量の大きな蓄冷材を蓄冷器低温部に充填することにより到達温度が顕著に下がることを実証し、蓄冷器損失の低減の重要性を検証している。

第 3 章は「4 K-GM 冷凍機の実験的評価」と題し、2 段型 GM 冷凍機について、具体的にヘリウム液化の可能な 4.2 K 以下の温度を発生させ、4.2 K での冷凍能力の向上を図るための蓄冷器条件および動作条件を実験的に検討している。まず、第 2 章の結果に基づき、蓄冷器に鉛および (鉛より 15 K 以下で比熱が大きい)  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  を充填した場合の到達温度と冷凍能力を実験的に比較し、後者により到達温度 2.56K、4.2 K での冷凍能力 0.47W を実現している。次に動作条件として図示仕事、サイクル周波数、1 段冷却ステージ温度

などを選定し、これらを独立に変化させた実験を行ない、各因子の影響を示している。特にサイクル周波数については、より低い温度が得られる周波数は冷凍能力のレベルに依存することを示し、4.2Kにおける冷凍能力は45rpmで最大となり、最適周波数が存在する見出している。

第4章は「4K-GM冷凍機の冷凍能力の向上」と題し、第2、3章の結果に基づき、4.2Kにおける3Wの冷凍能力を得るための改善方法を検討している。即ち、膨張空間体積の増大による図示仕事の増大、蓄冷器内流動の整流による最適サイクル周波数の向上、異種蓄冷材の積層化、冷却ステージの熱コンダクタンスの改良法を提案し、それを実証するとともに、4.2Kで3Wの冷凍能力を達成している。

第5章は「4K-GM冷凍機の解析的評価」と題し、冷凍能力及び効率向上のための設計指針を得るための計算モデルを構築し、各種因子の影響を調べている。まず、膨張空間の体積変動を考慮するために、時間とともに変動する一般座標系で流体の方程式を記述し、蓄冷器、膨張空間及び冷却ステージから構成される冷凍機全体システムの計算モデルを初めて提案している。そして、本計算モデルにより、比熱の影響をはじめとして諸条件の影響について実験結果をよく再現できることを示し、本計算モデルの有効性を確認している。また、この計算モデルにより、到達温度は蓄冷材の比熱に大きく依存するが、蓄冷材の比熱は $0.8 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ あれば十分であること、蓄冷材の比熱が十分ある場合は冷却ステージの熱コンダクタンスを十分大きくとる必要があること、4K-GM冷凍機が原理的に到達可能な最低温度はヘリウムの $\lambda$ 点近傍の温度であること、蓄冷器の長さ、空隙率、蓄冷材の球径には4.2Kでの冷凍能力に関し最適値があり、(単位処理流量当たりの4.2Kでの冷凍能力では上記のほか)蓄冷器の断面積にも最適値があることなどの設計指針を示している。

第6章は「4K-GM冷凍機の適用研究」と題し、本4K-GM冷凍機をクライストロン用の伝導冷却型超電導マグネットへ適用し、液体ヘリウムを必要としない超電導マグネットの実証結果を示している。

第7章は、以上をまとめた「結論」である。

以上要するに、本論文は4K-GM冷凍機につき、各種損失および動作条件の影響の実験的定量化、各種損失の低減法の提案と実証、冷凍機全体の計算モデルの構築とそれによる設計指針の獲得を行なったものであり、機械工学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。