

## 論文の内容の要旨

論文題目 4K-GM 冷凍機に関する研究

氏名 稲口 隆

本論文は絶対温度 4.2 K 以下の温度を発生可能なギフォード・マクマホンサイクル (GM) 冷凍機の開発について行った一連の研究成果についてまとめたものである。

GM 冷凍機は蓄冷器を用いる極低温用の小型冷凍機で、超電導マグネット等に適用されている。超電導マグネットは超電導状態を維持するため、通常液体ヘリウムで冷却されている。従来の GM 冷凍機の無負荷時の温度 (到達温度) は 10 K 程度が限界であったため、液体ヘリウムの消費を完全に無くすことは不可能であった。このため液体ヘリウムを定期的に補充する必要があったが、この液体ヘリウムの補充作業は煩わしい作業であり、超電導マグネットの普及を阻害する一つの要因になっていた。また一度大気中に散逸したヘリウムを再び採取することは困難なため、ヘリウム資源の浪費にもなっていた。

そこで、液体ヘリウムの補充が不要な、あるいは液体ヘリウムそのものが不要な超電導マグネットを実現するため、ヘリウムの大気圧下の沸点である 4.2 K 以下の温度を発生可能な GM 冷凍機 (4K-GM 冷凍機) の開発を行った。

前述のように GM 冷凍機の到達温度は従来 10 K 程度が限界であったが、到達温度が制限される明確な理由があったわけではない。その動作特性があまり理解されていなかった

のが実状である。

そこでまず、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た。図 1 に測定結果を示す。この結果から、蓄冷器損失が最も大きな損失であり、また温度が低く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低減する必要があることがわかる。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つき、低温で熱容量の大きな蓄冷材を蓄冷器低温部に充填し、それ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た。

次に上記結果を踏まえ、ヘリウム液化可能な 4.2 K 以下の温度を発生させ、4.2 K での冷凍能力を向上可能な諸条件を実験的に検討した。まず蓄冷材の比熱を大きくしその影響を調べた。図 2 は 2 段型 GM 冷凍機の 2 段蓄冷材に鉛を充填した場合（図中、白丸）と、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（図中、黒丸）の冷凍能力の測定結果である。図 2 の結果から 4.2 K 以下の温度を発生するには蓄冷材の比熱を大きくすることが有効であることがわかる。

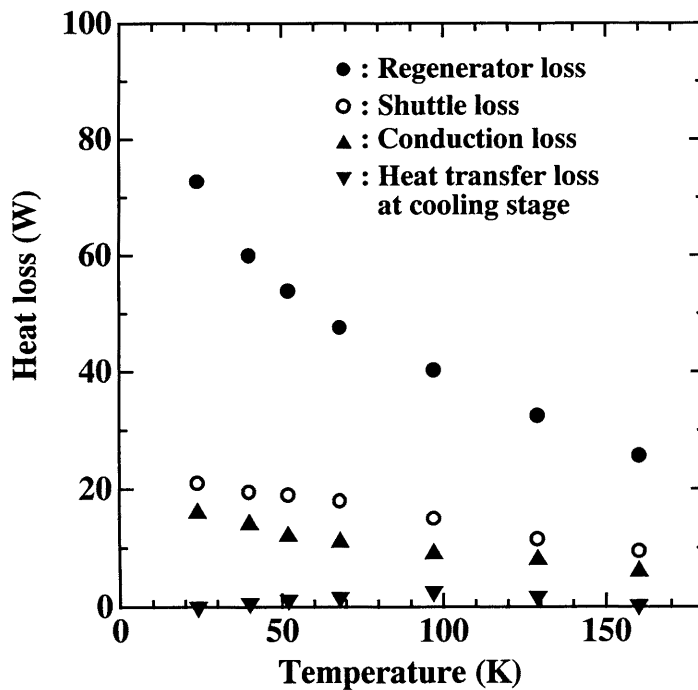


Fig. 1 Measurement result of total heat loss

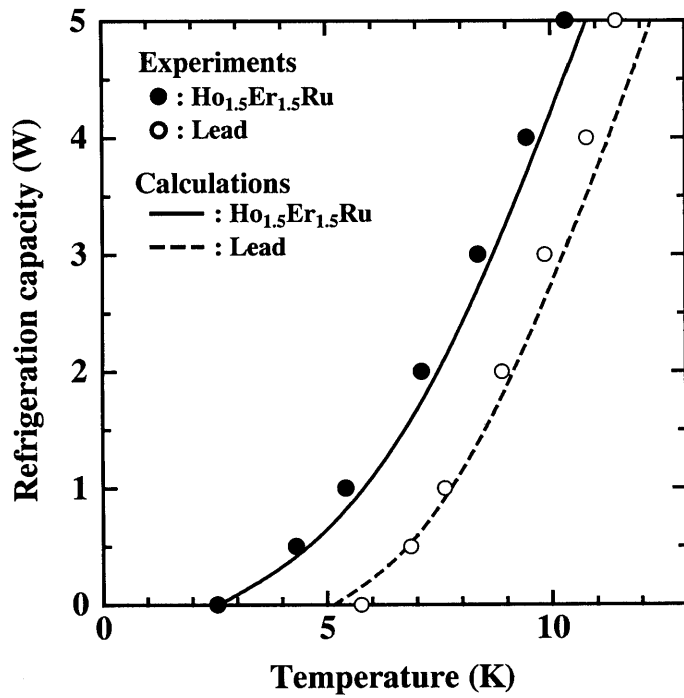


Fig. 2 Comparison between calculations and experiments about effect of specific heats of regenerator materials on refrigeration capacity

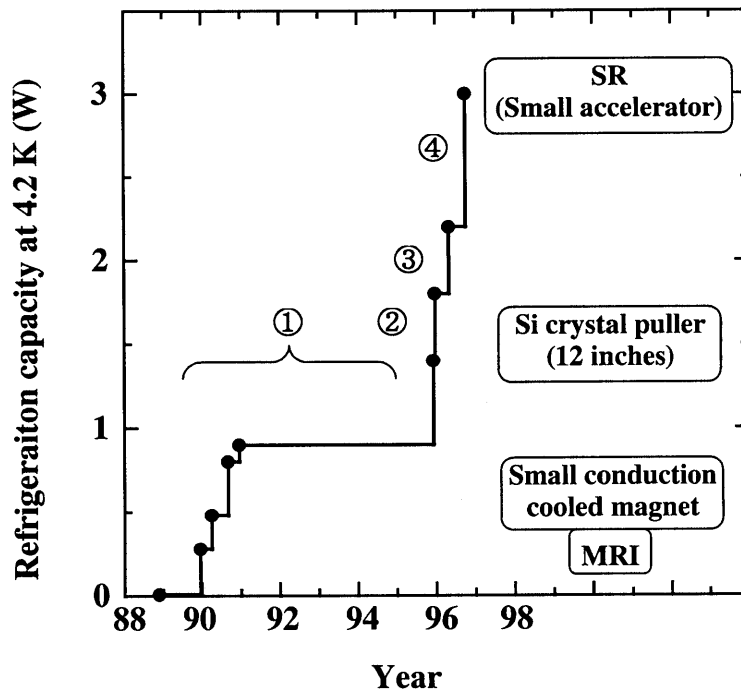


Fig. 3 Progress of refrigeration capacity of 4K-GM refrigerator and applications to superconducting magnets

- ① Increase of volume of expansion space,
- ② Improvement of the optimum cycle frequency,
- ③ Stack of different kinds of regenerator materials,
- ④ Improvement of thermal conductance of cooling stage

次に図示仕事を増加すること、および膨張空間の体積の増加が有効であることを実験により示すとともに、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、それを実証した。これらにより、ほぼ全ての産業用超電導マグネットへ 4K-GM 冷凍機を適用可能な 4.2 K で 3 W の冷凍能力を達成することができた。図 3 は冷凍能力の進捗状況を示したものである。

上記結果を解析的にレビューするとともに、冷凍能力及び効率向上のための設計指針を得るため、蓄冷器、膨張空間及び冷却ステージから構成され、冷凍能力を精度よく計算可能な計算モデルを提案した。この計算モデルの定式化にあたり、膨張空間の体積変動を考慮するため、流体の方程式を座標軸が時間とともに変動する一般座標系で記述した。図 2 中の実線と破線はそれぞれ蓄冷材として  $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$  を充填した場合と鉛を充填した場合の計算結果で、どちらも実験結果とよく一致しており、本計算モデルが比熱の影響を精度よく計算可能であることがわかる。この他、諸条件を変更した場合も実験結果とよく一致しており、本計算モデルの有効性を確認した。

開発した計算モデルにより、蓄冷材の比熱及び蓄冷器形状が冷凍能力に及ぼす影響について調べた。

蓄冷材の比熱が冷凍能力に及ぼす影響の検討結果から、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がわかった。また蓄冷材の比熱が十分ある場合、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との指針を得た。更に 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入点近傍の温度であることが明らかになった。

また、蓄冷器形状が冷凍能力に及ぼす影響の検討結果から、蓄冷器の長さ、空隙率、蓄冷材の球径には、4.2 K 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 4.2 K 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がわかった。また蓄冷器の断面積や長さの増加により蓄冷材の熱容量を増加させるより、蓄冷材の比熱を大きくし熱容量を増加させた方が、達成可能な冷凍能力及び単位処理流量当たりの 4.2 K での冷凍能力は勝っていることが明らかになった。

最後に本 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を実証した。