

Title	室温磁気冷凍の試み
Author(s)	越智, 利彦; 西村, 真司; 青木, 亮三
Citation	大阪大学低温センターだより. 1992, 78, p. 9-12
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/11491
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

室温磁気冷凍の試み

工 学 部 越智利彦*・西村真司・青木亮三 (吹田4561)

1. はじめに

冷却の問題は現代社会において益々重要となっている。極低温域では例えば近時開発が進められているJosephson素子を用いた高集積高速計算機等においても量子雑音の除去などのため本質的であり、室温域では社会生活における空調や食品保存などの点で不可欠である。このように、いろいろの技術分野で低温環境に対する要請が高まっているがこの際、従来の冷凍方式にこだわらず、さまざまな方式の可能性を検討する必要がある。

磁気冷凍は1926年にDebye¹⁾やGiauque²⁾によって常磁性塩類の消磁により低温が得られることが提唱されたことに始まり、以後いわゆる“断熱消磁冷却法”として大型電磁石または超伝導磁石を用いて主として1 K以下の極低温の生成に応用されている。室温域の磁気冷凍については1976年にG. V. Brown³⁾が作業物質として、強磁性状態への転移点 $T_c=293\text{K}$ のガドリニウム (Gd) 金属と、励磁用の水冷電磁石 (7テラス) さらに水とエタノールの混合溶液を蓄冷材として用いた磁気冷凍試験機により室温を起点として47Kの温度冷却幅を得ることに成功している。

これらを背景として我々は永久磁石を用いてより実用的な室温作動冷凍装置を設計試作し、冷凍機としての可能性の検討を進めている。

2. 磁気冷凍試験装置

2-1 設計方針

試験装置の設計に際して以下の方針を設けた。

- 1) 室温から他の冷媒を用いずに冷却を可能とするため作業物質として磁気転移点が室温近傍 ($T_c=293\text{K}$) にあるGdを採用する。
- 2) 励磁には小型の永久磁石を用いる。⁴⁾この場合発生する磁場は1テスラ以下程度であって、Gdの磁

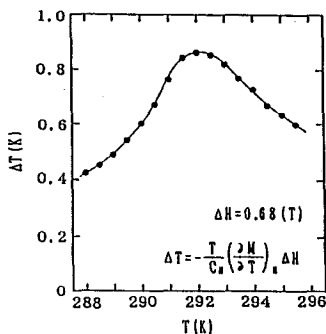


図1 Gd試料の磁気熱量効果
(断熱的に磁化した際の温度上昇; 消磁した場合には同等の温度降下が得られる)

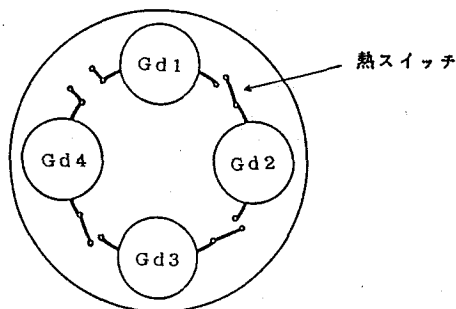


図2 熱スイッチを介したGdの多段連結

*受託研究員

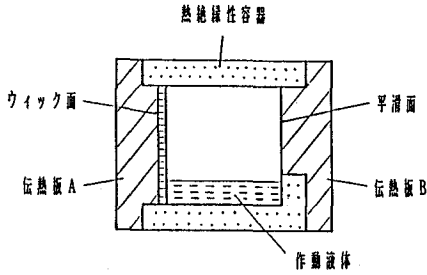


図3 ヒートパイプ式熱スイッチの構造

熱熱量効果により得られる温度変化は図1に示すように1 K以下である。

3) そこでGdを複数個熱スイッチを介してカスケード多段連結とする。(図2参照)

4) 外部との熱の吸収、排出を容易に行うため作業物質環を固定し磁石を回転させる。

2-2 熱スイッチの開発

上記の設計方針において最も重要な技術的課題はGdの永久磁石による励磁によって得られる僅かに1 K程度の温度差で熱流のON-OFF制御を可能にする熱スイッチの開発であった。熱スイッチとしては金属などの熱良導体の接触・分離や磁気ホール効果の利用など種々の方法⁹⁾が考えられたが結局ヒートパイプ方式を採用し、その開発を行った。⁹⁾

試作したヒートパイプ式熱スイッチ(以下、HPと表す)の構造は図3に示すように熱絶縁性中空容器の両端に非対称蒸発面をもつ伝熱板を設け、内部に作動液体としてメチルアルコールを注入封止したものである。伝熱板Aの内面は細溝(ウィック)が設けられており、毛管作用による作動液体の液膜が形成され、対向伝熱板Bの内面は平滑に仕上げてある。伝熱板Aを加熱すると作動液体はウィック面からの蒸発→伝熱板Bの平滑面での凝縮→重力による還流を経て蒸発部へ戻される。一方、伝熱板Bを加熱した場合は蒸発が生じないため熱流は阻止される。これにより熱流の方向性が得られる。この熱スイッチにより表1のような定常伝熱特性を得た。

2-3 磁気冷凍試験装置と動作原理

試作した磁気冷凍装置の全体構造概略を図4に示す。実際にはheat load(低温端)、heat sink(高温端)に銅塊(Gdと同型、約290 g)を設けた。

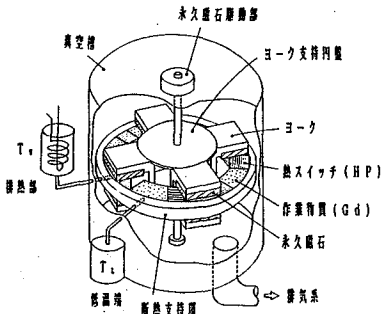


図4 カスケード型磁気冷凍装置の全体構造概略
断熱支持環に固定されたGdは永久磁石の回転駆動により発熱・吸熱し、熱スイッチにより一方向に熱が整流輸送される結果、低温端が冷却される。

表1 ヒートパイプ式熱スイッチの定常熱コンダクタンス特性

ON	0.67(W/K)
OFF	0.008(W/K)
ON/OFF	84

$$\text{熱コンダクタンス} = \frac{\text{入力熱量(W)}}{\text{両端温度差(K)}}$$

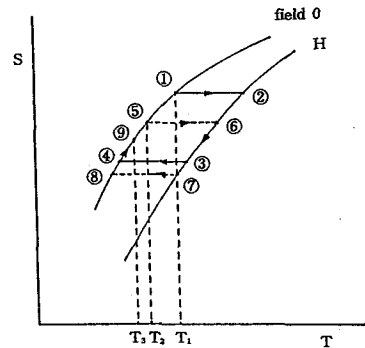


図5 磁気冷凍装置運転操作時のGdの熱サイクル

動作時のGdは図5のエントロピー対温度曲線 (S-T曲線) に示されるように、基本的にブレイトンサイクルで①→断熱磁化→②→磁場中排熱→③→断熱消磁→④→零磁場中吸熱→⑤→…のような熱サイクルを経て、温度降下する。

3. 動作実験

3-1 温度差を得る実験

動作実験としては、先ず、heat sinkに排熱部を設けずに、loadとsinkに温度差を得る実験を行った。^{7,8)}

1) 単位素子による動作特性

単位素子による動作実験データの例を図6に示す。磁化・消磁のステップ時間は5分である。Gdおよびsink、loadの銅塊とも設計動作原理

に従った温度変化特性を示し、この場合20回のステップの後に約0.45Kの温度差が得られている。

2) カスケード素子による動作特性

Gdの複数個の縦列接続による動作実験でも単位素子の場合と同様の温度変化特性が得られた。動作実験におけるloadとsinkの最終到達温度差はGdの個数を増やすと増加し、6素子では約1.4Kを得た。またloadとsinkに最大の温度差を得るステップ時間 τ はGdの個数 N とともに少し増加し、 $\tau = 5 \sim 7$ 分であった。このようにステップ時間がかかり長いのはGdの熱伝導率が小さく、また熱拡散係数 ($D = \kappa / \rho c$) が極めて小さいこと (Gd: $5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, Cu: $118 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$) とHPの熱輸送能力が不十分であることによる。

3-2 冷凍動作実験

次に、sinkに水冷の排熱部を設けて (排熱部温度20℃)、冷凍機 (“冷” を得る) として作動させる実験を行った。その際、3-1の2) の結果を踏まえて、Gd試料を上下に二分割し、その間にGaを介して厚さ1.5mmのCu板を挿入した。これにより伝熱が促進され、最大温度降下を得るステップ時間はCu板を挟む以前の70~80%程度に短縮されたが、一方で磁化・消磁により得られる温度差は挿入以前に比

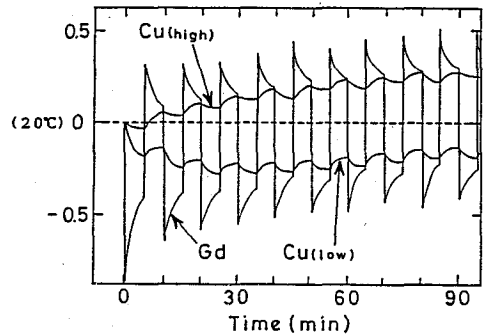


図6 単位素子におけるGdと高・低温端銅塊の温度の時間推移

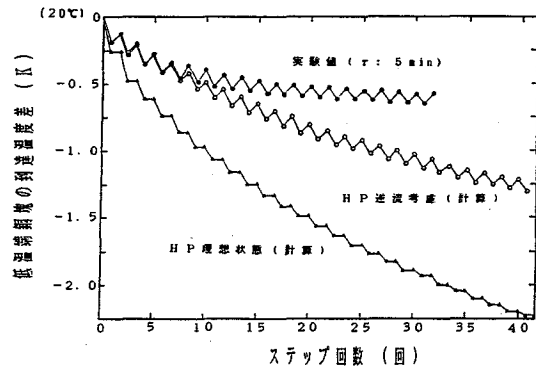


図7 Gd6素子を用いた磁気冷凍装置の運転操作時における低温端銅塊の温度の時間推移

べ、20%程度減少した。

冷凍動作実験でも3-1で述べたのと同様に到達温度差のGdの個数およびステップ時間に対する依存特性が得られ、単位素子の場合にはステップ時間 $\tau = 4$ 分のとき、最大の温度降下0.4Kが、6素子では $\tau = 5$ 分のとき最大0.65Kの温度降下が得られた。図7は6素子を用いた $\tau = 5$ 分の場合の冷凍動作実験より得られた、磁化・消磁のステップ回数に対するloadの温度推移を示したものである。

図中には比較のためGdの磁気熱量効果と比熱などの物性値が温度に依らず一定とし、HPがステップ時間内に十分な熱輸送（HP両端のGdの熱緩和）を行い、逆流もなく、さらに装置の支持部等による外部からの熱流入もない理想的な状態を仮定した場合と、HPによる約7 jouleの熱の逆流を考慮した場合についての動作シミュレーション結果を併せて示した。ここで上記の逆流熱量は、HPの熱輸送特性実験より求めたもので、これは液体のメチルアルコールに換算すると直径2 mm程度の液滴となる。シミュレーション結果から、この程度の平滑面側の残留液滴による逆流熱量でも、最終到達温度差に大きく影響することがわかる。我々の実験において得られたloadの温度低下が0.65Kと小さいのは主として、このHPの逆熱流特性が原因と考えられる。また上記6素子の動作による温度降下がほぼ飽和した状態の各素子の温度分布は理想的な条件下でのシミュレーション結果とは大きく異なり、排熱部に近いGd数個には温度降下が得られなかった。現在のところ、この原因は判っていない。

4. まとめ

小型永久磁石および作業物質（Gd）と熱スイッチのカスケード接続環を用いて室温より作動する磁気冷凍装置の開発を行い、初期動作実験を行った。試作した磁気冷凍装置は永久磁石のステップ駆動により期待されたとおりの各部の温度変化特性を示した。得られた温度降下はGdの6個縦列接続でも0.65Kであった。一方、シミュレーションの結果からHPの逆流熱量が温度降下性能の抑制に大きく影響することが示された。

今後の課題としては、i) 装置への熱流入等を考慮した動作シミュレーションを行い、到達温度を規制している要素因子の解析を進め、運転の最適動作条件をあきらかにする。ii) さらに低い到達温度を得るための条件として現在考えられている作業物質Gd内の熱拡散を促進する方法、およびより効果的な熱スイッチの構造について工夫していく予定である。

参考文献

- 1) P. Debye : Ann. Physik, 81, 1154 (1926)
- 2) W. F. Giauque : J. Am. Chem. Soc., 49, 1870 (1927)
- 3) G. V. Brown : J. Appl. Phys., 47, 3673 (1976)
- 4) T. Ochi and R. Aoki : “Application of Rare-Earth Magnets on Magnetic Refrigerator” in Proc. of 10th Int’l Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Application, vol. II, 195 (1989)
- 5) 青木 : 低温工学, 20, 294 (1985)
- 6) 田振他 : 「微小温度差で作動する小型ヒートパイプ式熱スイッチの研究」, 日本機械学会熱工部門講演論文集, 109 (1990)
- 7) 青木 : 「室温作動磁気冷凍機の設計試作に関する研究」平成元年度文部省科学研究成果報告書 (No.63850046)
- 8) 越智, 青木 : 希土類, No. 19, 19 (1991)