

核断熱消磁冷却 V

矢山, 英樹
九州大学基幹教育院

<https://doi.org/10.15017/1866701>

出版情報 : 九州大学低温センターだより. 10, pp.26-28, 2016-03. 九州大学低温センター
バージョン :
権利関係 :

核断熱消磁冷却 V *

矢山英樹
九州大学 基幹教育院

前号からの続き

5.3 2 段核断熱消磁

希釈冷凍機の下に、直列に連結された2つの核ステージを有する二段核断熱消磁装置を用いることにより、 10^{-5} K オーダーに到達することが可能になった[1, 2, 3]. 第一ステージは、最終的に最低温度に達する第二ステージを予冷するのが目的である. 第一ステージの特徴は、第二ステージの磁気エントロピーを吸収するための全ての過程が比較的高い温度 (5 mK 以上) で実行されることである. この要求に沿った物質はヴァン・ヴレック常磁性金属である.

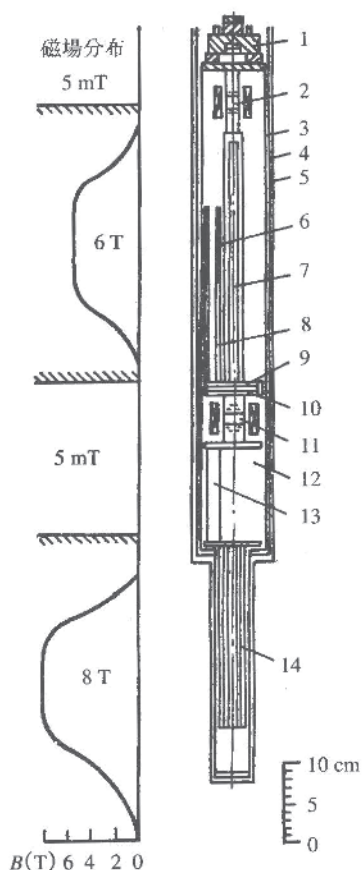


図 1 二段核ステージをもつクライオスタットの低温部分[2].

1 は混合室, 2 は第一アルミニウム熱スイッチ, 3 は混合器からの熱シールド, 4 はスチールからの熱シールド, 5 は真空チェンバー, 6 は第一核ステージ (60 本ある PrNi_5 の内 2 本のみ示す), 7 は主熱伝導体, 8 は PrNi_5 へつながる熱伝導体, 9 と 10 は上下の銅板, 11 は第二アルミニウム熱スイッチ, 12 は実験空間, 13 は第二核ステージとの熱接続, 14 は銅の第二核ステージ.

この装置の一般的な模式図を図 1 に示す. 希釈冷凍機が、超伝導熱スイッチ 2 によって第一核ステージと連結されている. この第一ステージは複数の PrNi_5 ロッド 6 でできており、その一端は 6 本の銅線によって上側の銅プレート 9 に連結されている. 中央の銅バンドル製の熱伝導

* 本稿は、ウクライナ科学アカデミー低温物理工学研究所編、矢山英樹、I.B.ベルクトフ訳「超低温の実験技術」九州大学出版会、2000 年、からの抜粋である。

体7は、この銅プレートに溶接されており PrNi₅ ロッド6 と第一熱スイッチ2 の間の熱を運ぶ役目をする。上側の銅プレート9 に溶接された下側の銅プレート10 は、第二熱スイッチ11 とさらに3本の銅ロッド製熱伝導体13を通して、銅バンドル製の第二ステージ14 に連結されている。

表1 二段核ステージ断熱消磁クライオスタットの特性

第一核ステージ			
冷媒	PrNi ₅ [2]	PrCu _{7.2} PrCu ₈ [3]	PrNi ₅ [1]
冷媒の量	4.29 mol (1.86 kg)	13 g	11 mol
$R_{100}/R_{4.2}$	16~27	—	24~32
構造	直径6.4 mm, 長さ120 mm のロッド60本	6枚の板	3本のロッドを含むセルを52個束ねたもの
混合器との熱結合	直径1 mm の銅線を500本束ねたもの	直径1.8 mm の銅線	直径1 mm の銅線を束ねたもの
出発磁場	6 T	5.5 T	6 T
出発温度	25 mK	15~20 mK	20~25 mK
熱スイッチ	アルミニウム	鉛	アルミニウム
第二核ステージ			
冷媒	銅	銅	銅
冷媒の量	2 kg	1.2 g	40 mol
磁場に曝される部分	10 mol (640 g)	1.2 g	19 mol
$R_{300}/R_{4.2}$	800	560~610	700
構造	2×3×245 mm ³ のロッドを96本束ねたもの	直径1.8 mm のワイヤー1本	直径1.4 mm 長さ450 mm のワイヤーを590本束ねたもの
温度計	Pt-NMR, 超伝導転移点温度計	核整列温度計	Pt-NMR, 核整列温度計
出発磁場	8 T	5.5 T	7.6 T
出発温度	5.5 mK	3 mK	5 mK
エントロピー変化	23%	30%	24%
最終磁場	8 mT	28 mT	7 mT
最低電子温度の測定値	48 μK	37 ± 14 μK	27 μK
核温度の計算値	5 μK	22 ± 2 μK	7.5 μK
熱流入	0.1 nW/mol	1.64 ± 1.42 nW/mol	470 nW (トータル)

冷媒と熱スイッチがそれぞれ2つ必要なのに加えて、超伝導マグネットも2つ必要になる。冷媒の特徴と二段核断熱消磁用クライオスタットのパラメータを表1に示す。2つの熱スイッチを閉じ、2つの超伝導マグネットをONにした状態で、パワフルな希釈冷凍機を用いて第一第二の両ステージを温度20~25 mKに予冷する。通常この過程は40~50時間かかり、第一ステージのエントロピーの60~80%が取り除かれる。その後、上部熱スイッチが開かれ、第一ステージの断熱消磁過程が開始される。磁場の時間変化と第一および第二ステージの温度変化を図2に示す。温度5 mK付近まで下がったところで、第一ステージが吸収できる熱量の約半分が第二ステージから移動した。それは第二ステージのエントロピーを23~30%取り除いたことに相当する。第一ステージは、下部熱スイッチを開いて、さらに2~3 mKに断熱消磁され、第二ステージの熱シールドとして用いられる。

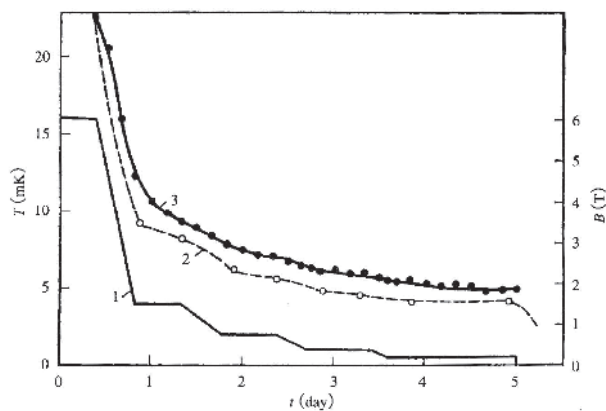


図2 第一核ステージを断熱消磁したときの両核ステージの温度変化[1].
1は磁場変化, 2は第一核ステージの温度, 3は第二核ステージの温度.

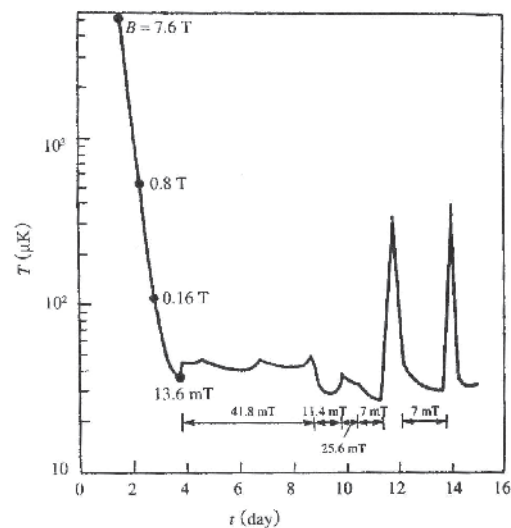


図3 第二核ステージを断熱消磁したときの電子温度[1].
温度は NMR 温度計で測定された. 小さなピークはクライオスタットに液体ヘリウムを補給した時のもので, 2つの大きなピークは系を特別に磁化したときのものである.

次の過程は, 第二ステージの断熱消磁である. この過程での温度変化を図3に示す. 磁場の減少速度もここに示されている. 最終温度は最終磁場に強く依存する. $B_f = 7 \text{ mT}$ のとき, 最低温度の記録は $27 \mu\text{K}$ である. 二段核断熱消磁クライオスタットにおいてそのような低温を得るには, 熱流入を $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ W}$ 程度に低く抑えることが必要である.

次号に続く

参考文献

1. Ishimoto H., Hishida N., Furubayashi T. *et al.*, Two-stage nuclear demagnetization refrigerator reaching $27 \mu\text{K}$, *J. Low Temp. Phys.*, 1984, 55, No. 1/2, pp. 17-31.
2. Mueller R.M., Buchal C., Folle H.R., *et al.*, A double-stage nuclear demagnetization refrigerator, *Cryogenics*, 1980, 20, No. 7, pp. 395-407.
3. Oho K., Kobayashi S., Shinohara M., *et al.*, *J. Low Temp. Phys.*, 1980, 38, No. 5/6, pp. 737-745.