

核断熱消磁冷却IV

矢山, 英樹
九州大学工学研究院応用化学部門

<https://doi.org/10.15017/1866694>

出版情報：九州大学低温センターだより. 9, pp.16-18, 2015-03. 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IV *

矢山英樹
九州大学 基幹教育院

前号からの続き

5.2 超微細冷媒による核ステージ

もともと、最初に提案された核ステージの構造は、 ^3He の中に浸漬した超微細銅粉を冷媒として用いるものであった[1,2]. この構造では、冷媒である銅の核から実験試料までの距離が短くなる. また、カピッツァ抵抗も最小にできる.

断熱消磁過程がうまく行なわれるためには、出発温度で磁場を印加したときの銅のエントロピー減少分が、ヘリウムのエントロピーよりも大きいことが必要である. すなわち、

$$n_{\text{Cu}}KB^2/2\mu_0T_i^2 \geq n_{\text{He}}\gamma T_i$$

でなければならない. n_{He} はこの場合十分大きいので、断熱消磁の出発温度に対して、次式で表わされる臨界値が存在する.

$$T_{\text{icr}}^3 \leq \frac{n_{\text{Cu}}}{n_{\text{He}}} \cdot \frac{KB_i^2}{2\gamma\mu_0} .$$

もし T_i がこの温度よりも高ければ、冷却効果は小さい.

図8に、出発磁場と最終磁場中の銅と ^3He (体積比 1:3) の全体のエンロピーを温度の関数として示す. この場合、 $B_i=7\text{T}$ とすれば臨界温度は 18 mK であり、 $T_i=16\text{ mK}$ から理想的な断熱消磁を行なった場合、 $T_f \sim 50\ \mu\text{K}$ が期待できる.

一つの実験例を次に示す. 冷媒として、通常メタルペイントとして用いられている銅の薄片を用いる. その大きさは、25 μm 四方、厚さ 1 μm 以下の薄片である. その表面は、酸化を防ぎ、圧力をか

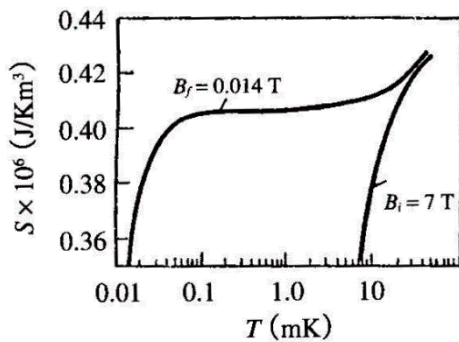


図8 体積比で25%の銅と75%の ^3He (圧力ゼロ) を含む系の磁場中でのエンロピー[1].

* 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。

けて密度を高めるときに隣の薄片との間を絶縁するために、銅ステアリン酸でカバーされている。実験結果は、予想に反して、最終磁場中で冷媒が非常に大きな熱容量を示すものであった。銅薄片とヘリウムで満たされた実験セルの熱容量は $B_f = 14 \text{ mT}$ で測定されたものであるが、それが $B = 0.35 \text{ T}$ のものに相当したのである。これは、冷媒中の内部磁場が異常に高いことの証拠である。この原因は、明らかに薄片中に存在する他の磁気不純物か力学的応力によるものである。熱容量が予想される値より 2~3 オーダー高いという事実は、この冷媒が内側のセルを熱遮蔽するためのガードセルとして利用できるという可能性を示している。

このことを利用して、微細冷媒を液体 ^3He の中に浸漬した二重核断熱消磁セルが製作されている。このクライオスタットの構造を図 9 に示す。外側のセルは充填率 30% の薄片で満たされ、アニールした直径 1 mm の銀線 6 本とアルミニウムの熱スイッチを通して混合器へつながっている。銀線は両端に焼結銀の熱交換器を備えている。外側と内側のセルの間も、銀線とアルミニウムの熱スイッチによって熱接触されている。内側のセルの冷媒は 9 つの銅板 ($1 \times 18 \times 50 \text{ mm}^3$) でできている。その表面は銀メッキされ厚さ 0.5 mm の焼結銀粉でカバーされている。内側のセルの表面積は 13 m^2 である。容積 80 cm^3 の内外両セルは、内径 0.22 mm のキャピラリーを用いて ^3He で満たされている。

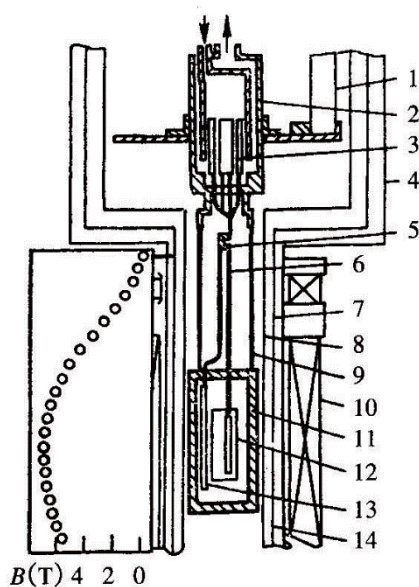


図9 ダブル核ステージのクライオスタット[1]. 1は混合器を支える3本のサポートの1つ, 2は混合器, 3と13は焼結銀の熱交換器, 4は真空チェンバー, 5は熱スイッチ, 6は銀線, 7は熱シールド (0.5K), 8は熱シールド (0.02K), 9はサポートパイプ, 10は主ソレノイド, 11は外側のセル, 12は内側のセル, 14は最終磁場のソレノイド。

内側セル中の ^3He の温度は、 ^3He の粘性を測定することによって決定された。さらに、直径 $12.5 \mu\text{m}$ のプラチナ線 1,000 本を用いた NMR 温度計も銀熱交換器と熱接触させて用いられた。出発磁場 $B_i = 7 \text{ T}$ は超伝導マグネット (ボア 90 mm) で作られた。その磁場分布を図 9 に示す。核ステージを $T = 8 \text{ mK}$ に冷却するのに 120 時間要した。 $B_f = 14 \text{ mT}$ に消磁した後、プラチナ NMR 温度計で測定した内側の核ステージの温度を図 10 に示す。冷媒と温度計の間の緩和時間は長い。記録された最低温度 $T_f = 127 \mu\text{K}$ は消磁の 3 日後であるが、粘性温度計は液体 ^3He が数時間後に平衡状態に達したことを示している。

内側のセルへの全熱流入は 50 pW であり、それは ^3He を温度 $200 \mu\text{K}$ に 4 日間保つことができた。このとき、時間に依存する大きな熱流入は観測されなかった。内側と外側のセルの主な材料はエポキシである。その理由は、消磁過程で磁場が大きく変化する所に内外両セルが置かれるためである。エ

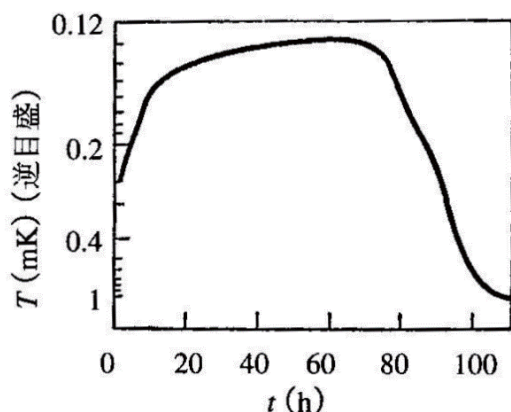


図10 消磁開始後に測定した内側の核ステージの温度変化 [1]. 温度はプラチナ温度計で測定された. ^3He の圧力はゼロである.

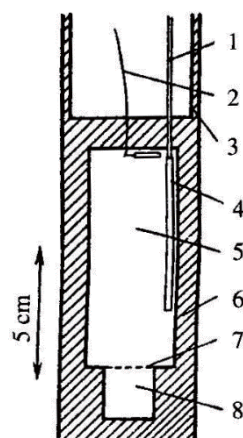


図11 超微細冷媒を用いた簡単な構造の核ステージ [1]. 1は銀の熱伝導体, 2は ^3He 導入ライン, 3はエポキシ製シリンダー, 4は焼結熱交換器, 5は超微細冷媒で満たされた空間, 6はエポキシ樹脂チャンバー, 7はフィルターペーパー, 8は実験試料.

ポキシ樹脂は低温で熱を発生するため、内側のセルを作るときにエポキシの量は最小にされた。このセルの壁には、スタイキャストを染み込ませた紙を用い、厚みは0.25 mmにしてある。

ヘリウムを用いずに、セル中の冷媒だけの特性を調べる実験が行なわれている。外側のセルは銅薄片と液体ヘリウムで満たされ、内側のセルには冷媒である3枚の銅板 ($30 \times 30 \times 0.5 \text{ mm}^3$) だけが置かれている。その銅の冷媒と熱接触したプラチナ NMR 温度計で、温度が測定される。結果的に、記録された最低温度は $T_i = 7 \text{ mK}$, $B_i = 7 \text{ mT}$ のとき $13 \mu\text{K}$ であり、熱流入は 1.5 pW であった。

以上のように、微細冷媒を用いた核ステージは重要な特長をもっている。すなわち、比較的簡単かつコンパクトな装置（核ステージの全長はたった 25 cm）で超低温を得ることができる。

もし、例えば T_c 近傍での超流動 ^3He の研究のために、約 1 mK の温度を得る必要があるならば、核ステージは外側のセルだけを用いて簡単にすることができる（図 11 参照）。 $T_i = 10 \text{ mK}$, $B_i = 6.5 \text{ T}$ で充填率 30% のセルを用いると、温度 $T_f = 0.7 \text{ mK}$ が得られ、 1.3 mK 以下の低温を 1 週間持続できる。また、冷媒 [3] として用いられる銅薄片は大きな有効内部磁場 (0.35 T) をもっているため、消磁過程で磁場をゼロまで減少することができる。

次号に続く

参考文献

1. Bradley D.I., Guenault A.M., Keith V. *et al.*, New methods for nuclear cooling into the microkelvin range, *J. Low Temp. Phys.*, 1984, 57, No. 3/4, pp. 359-390.
2. Dow R.C.M., Guenault A.M., Pickett G.R., Copper powder nuclear demagnetization – a feasibility study, *J. Low Temp. Phys.*, 1983, 47, No. 5/6, pp. 477-490.
3. Bradley D.I., Bradshaw T.W., Guenault A.M., A dilution refrigerator combining low base temperature high cooling power and low heat leak for use with nuclear cooling, *Cryogenics*, 1982, 22, No. 6, pp. 296-403.