

## 核断熱消磁冷却III(前号からの続き)

矢山, 英樹  
九州大学基幹教育院教育実践部 : 教授

<https://doi.org/10.15017/1456037>

---

出版情報 : 九州大学低温センターだより. 8, pp.18-21, 2014-03. 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Ⅲ \*

矢山英樹

九州大学 基幹教育院

前号からの続き

## 5 核断熱消磁用クライオスタット

核断熱消磁を用いた最近の超低温クライオスタットは、パワフルな希釈冷凍機と、1段または2段の核ステージを、熱スイッチでつないだ構造をもっている。

## 5.1 ワイヤーバンドル型核ステージ[1-18]

ワイヤーを束ねた核ステージの構造が、現在では最もポピュラーである。その典型的な構造を図5に示す。核ステージは直径0.1 mm、抵抗比 $R_{300}/R_{4.2}=150$ の7万本の絶縁された銅線でできており、充填率は55%である。高磁場が印加される金属の体積は $160\text{ cm}^3$ である。束の強度を増すために、ワイヤーはスタイクキャストで固められている。

ワイヤーは上部で互いに溶接され、さらにそれが銅製の円筒継ぎ手の内部に溶接されている(図6参照)。測定ポットの枠がその円筒継ぎ手に溶接されている。全体が銅の枠にネジで熱接触を保って固定され、それが混合器に錫の熱スイッチを通してつながっている。ネジによる熱接触の代わりに、コーンコネクタに似たプレスコンタクトが多くのクライオスタットで用いられている[1, 9, 15]。

核ステージは、振動による熱発生を減らすために、しっかりしていることが非常に重要である。ワイヤーバンドルの上部は3つのグラファイト支柱(図5には示されていない)によって支持され、横方向の動きは同心リングによって制限されている。

$T=4.2\text{ K}$ で $B=7.5\text{ T}$ を発生する超伝導ソレノイドが用いられた。核ステージ部分の二乗平均磁場は $5.6\text{ T}$ であった。ソレノイドの中央から30 cm離れたところにある測定セル部分の磁場は、2つの補償ソレノイドで $10^{-4}$ 倍に減少させられている。 $^3\text{He}$ を溜める測定ポットは、直径20 mm、長さ40 mmであり表面積 $30\text{ m}^2$ の焼結熱交換器を含んでいる。

温度測定は、核整列温度計とプラチナNMR温度計を直接 $^3\text{He}$ の中に置いて行なわれる。このクライオスタットの動作特性を表5に、また冷却過程の温度変化を図7に示す。磁場を $B_i$ から $B_f$ まで3~4時間かけて減少させても、渦電流による発熱は見られなかった。断熱消磁開始後4~6時間で、 $^3\text{He}$ の温度は $0.7\text{ mK}$ より少し下まで下がった。

核ステージや $^3\text{He}$ セルへの熱流入を減少するために別の構造[447]が考えられた。10モルの銅から成るワイヤーバンドル核ステージと $3.1\text{ cm}^3$ の $^3\text{He}$ を含む $^3\text{He}$ セルが、15モル

\* 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。

の銅ワイヤーでできた外側の核ステージの中にある。両核ステージは超伝導熱スイッチでつながれ、一つのソレノイドで断熱消磁される。超伝導熱スイッチは主ソレノイドの磁場を利用して動作する。結果として、内側の核ステージへの熱流入は 1.2 nW に、 $^3\text{He}$  セルへの熱流入は 0.2 nW に減少した。圧力ゼロでの  $^3\text{He}$  の最低温度は 0.38 mK であった。

磁場 50 mT 以上の実験を計画するのなら、構造材料としては、銅よりも銀の方が適している。それは、熱伝導率はほとんど同じであるが、低温での銀の核比熱は銅の 1/2000 だからである。また、銀は銅に比べてスピン-格子緩和時間が長くコリンハ定数が大きいいため、断熱消磁過程で核の温度低下が電子系の温度より明らかに遅れる。つまり、高温の核から電子系への熱流が問題にならない[18]。銀と  $^3\text{He}$  との間のカピツァ抵抗は 10 mK 以下で  $1/T$  に比例し[5]、その値は他の金属と同じオーダーである。

エポキシ樹脂「Stycast 1266」はポピュラーな絶縁体で、低温でよく用いられる。この材料は機械工具で加工でき、真空に対して信頼できる。4.2 K でのヤング率は  $7.5 \times 10^3$  MPa、比線膨張率は  $(L_{300\text{K}} - L_{4.2\text{K}})/L_{300\text{K}} = 1.2\%$  である[18]。この材料や他のプラスチック材料の欠点は、発熱の元になる多くの水素を含むことである（6 節参照）。

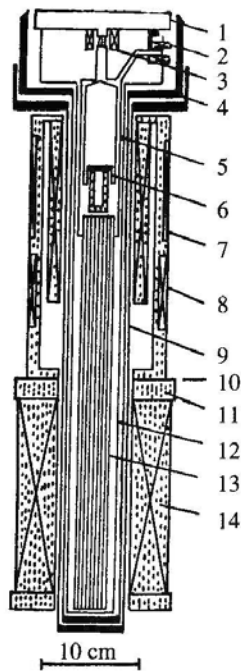


図5 ワイヤバンドル核ステージの下部模式図 [2]

1 は混合器, 2 は核整列温度計, 3 は錫熱スイッチ, 4 は内側の真空チェンバー, 5 は銅サポートのフレーム, 6 は  $^3\text{He}$  ポット, 7 と 8 は上下の磁場補償コイル, 9 は外側の真空チェンバー, 10 は  $^4\text{He}$  バス, 11 はマグネットのサポート, 12 は輻射シールド, 13 は核ステージ, 14 は消磁用ソレノイド。

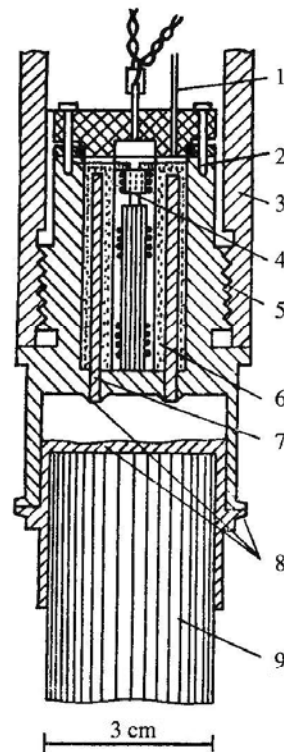


図6 核ステージの上部と  $^3\text{He}$  研究のための測定セルの模式図 [2]

1 は  $^3\text{He}$  導入ライン, 2 はゴールドシール, 3 は銅サポートのフレーム, 4 は 195 Pt の NMR コイル, 5 はネジ接合, 6 は焼結銅, 7 は銅の柱, 8 は溶接接合, 9 は核ステージ。

最近、回転クライオスタットに、ワイヤー製の核ステージが用いられた[250]。このクライオスタットは、角速度 1.5 rad/s で回転することができ、 $^3\text{He}$  の回転状態での超流動相の研究に用いられた。予め、回転していない状態で、希釈冷凍機により循環速度 400  $\mu\text{mol/s}$  で冷却された。断熱消磁後、希釈冷凍機は吸着ポンプを用いてワンショットの冷却モードで運転された。核ステージへの熱流入は回転速度 0.6 rad/s のとき 2 ~ 9 nW であった。銅ワイヤーは、最初のクライオスタットのものに比べて 10 倍太い直径 0.5 mm のものが用いられた。ワイヤーの直径を太くするのは一般的傾向であり、銅の伝導電子による熱伝達を容易にするためである。渦電流による冷却損失は、核ステージの動作に関しては深刻ではない(6節参照)。2 mm $\times$ 3 mm の断面をもつ銅の角棒でさえ、核ステージに用いられる[15](3節参照)。また、高純度の銅ブロック(円柱)に、特別な形の溝を彫って(スリットを入れて)核ステージを作ることも可能である。

表5 核断熱消磁クライオスタットの特性 [2]

冷媒の量	22 mol
測定セル中の $^3\text{He}$ の総量	8 cm <sup>3</sup>
出発温度	17 mK
出発磁場	7.5 T
核ステージを 17 mK まで予冷するのに要する時間	15 h
最終磁場	100~200 mT
NMR 温度計で測定した $^3\text{He}$ の最低温度	0.7 mK
セルの最低電子温度の計算値	0.5 mK
核ステージへの熱流入	5 nW; ~0.2 nW/mol
ヘリウムへの熱流入	0.5 nW

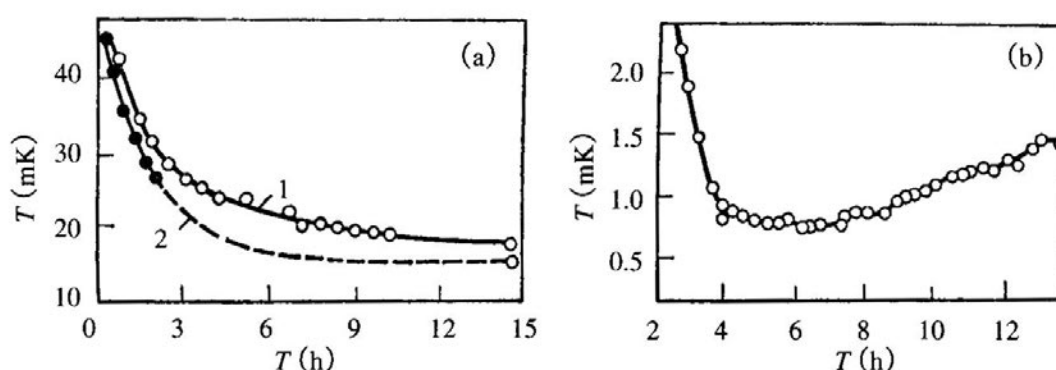


図7 核ステージの冷却曲線 [2]

(a) は核ステージの予冷過程で、核整列温度計で測定された。1 は  $B = 7.5$  T, 2 は  $B = 0$ 。(b) は  $^3\text{He}$  の温度で、プラチナ温度計で測定された。消磁開始時を時間 0 とする。

次号に続く

## 参考文献

1. Боровик-Романов, Буньков Ю.М., Дмитриев В.В. и др., Криостат ядерного размагничивания и криостат растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  большой хладопроизводительности, ПТЭ. 1985, No. 3, С.185-192.
2. Ahonen A.I., Berglund P.M., Haikara M.T., *et al.* Nuclear refrigeration of liquid  $^3\text{He}$ , *Cryogenics*, 1976, vol. 16, No. 9, pp. 521-531.
3. Andres K., Bucher E., Nuclear cooling in  $\text{PrCu}_6$ , *J. Low Temp. Phys.*, 1972, pp. 267-289.
4. Andres K., Darack S., Cooling of  $^3\text{He}$  to mK by nuclear demagnetization of  $\text{PrNi}_5$ , *Physica B+C*, 1977, 86-88, pp. 1071-1076.
5. Andres K., Sprenger W.O., Kapitza resistance measurement between  $^3\text{He}$  and silver at very low temperatures, Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Low Temp. Phys., Eds. M. Krusius, M. Vuorio. Helsinki; North-Holland: American Elsevier. 1975, Vol. 1, pp. 123-125.
6. Berglund P.M., Ehnholm G.J., Gylling R.G. *et al.*, Nuclear refrigeration of copper, *Cryogenics*. 1972, 12, No. 4, pp. 297-299.
7. 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.
8. Ehnholm G.J., Ekstrom J.P., Jacqinot J.F., *et al.*, NMR studies on nuclear ordering in metallic copper below 1  $\mu\text{K}$ , *J. Low Temp. Phys.*, 1980, 39, No. 3/4, pp. 417-450.
9. Hakonen P.J., Ikkala O.T., Islander S.T. *et al.*, Rotating nuclear demagnetization refrigerator for experiments on superfluid  $^3\text{He}$ , *Cryogenics*, 1983, 23, No. 5, pp. 243-250.
10. Hensel P., The nuclear refrigeration of copper, *J. Low Temp. Phys.*, 1973, 13, No. 3/4, pp. 371-382.
11. Hunik R., Banger E., Konter J.A. *et al.*, Two-stage nuclear demagnetization experiments, *J. Phys. (France)*, Colloq. C6, 1978, 39, suppl. 8, pp. 1155-1156.
12. Ishimoto H., Nishida 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.
13. Konter J.A., Hunik R., Huiskamp W.J., Nuclear demagnetization experiments on copper, *Cryogenics*, 1977, 17, No. 3, pp. 145-154.
14. Kurusius M., Paulson D.N., Wheatley J.C., Properties of sintered copper powers and their application in a nuclear refrigerator with precise temperature control, *Cryogenics*, 1978, 18, No. 12, pp. 649-656.
15. Mueller R.M., Buchal C., Folle H.R. *et al.*, Superconductive aluminum heat switch and plated press-contacts for use at ultralow temperatures, *Cryogenics*, 1980, 20, No. 7, pp. 395-407.
16. Oho K., Kobayasi S., Shinohara M. *et al.*, Two-stage nuclear demagnetization refrigerator, *J. Low Temp. Phys.*, 1980, 38, No. 5/6, pp. 737-745.
17. Osgood E.B., Goodkind J.M., Nuclear cooling applied to measurements in  $^3\text{H}$ , *Phys. Rev. Lett.*, 1967, 18, No. 21, pp. 894-896.
18. Veuro M.C., A double nuclear demagnetization for cooling  $^3\text{He}$ , *Acta Polytechn. Scand. Appl. Phys.*, 1978, Ser. 122, pp. 7-72.