

小型超低温連続冷凍システムの開発 I

Development of a Compact and Continuous Ultra-low Temperature Refrigerator (I)

戸田 亮, 村川 智, 福山 寛 (東京大学)

TODA Ryo, MURAKAWA Satoshi, FUKUYAMA Hiroshi (The Univ. of Tokyo)

E-mail: toda.ryo@mail.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

従来、一部の研究に限られてきたサブ mK の超低温実験環境をより広い分野に応用できるよう、操作の簡便な小型超低温連続冷凍システムの開発を進めている。本装置は、磁気作業物質に増強核磁性体 PrNi₅を採用し、これを磁気遮蔽した小型超電導磁石で断熱消磁するユニットを2つ組み合わせ、コンパクトでありながら 1 mK 以下の超低温を連続発生できる。今回は、その概要と設計について報告する。

2. 開発の背景と目的

今日、自動制御機能をもつ市販の希釈冷凍機を使えば、20 mK 程度までの極低温環境を得るのはそれ程困難ではない。これより 1 桁以上低い温度は、磁気作業物質に銅核スピンの用いる断熱消磁冷凍機[1]で得られるが、大型の希釈冷凍機と超電導磁石を使うため、コスト、スペース、専門知識など設置のハードルは高い。例えば、実用的な冷却力をもつ銅核ステージは、直径 50 mm、長さ 300 mm 程度の大きさとなり、これ全体に 8 T の強磁場を印加する大型の超電導磁石が必要である。そして、その磁化熱を効率よく奪って 20 mK 以下まで予冷できる大冷却力 (200 μ W@100 mK 以上) の希釈冷凍機も必要である。被冷却物に高磁場を印加するときは、その超電導磁石と消磁冷却用磁石との磁場干渉を避けるために両者の距離を離す必要があり、装置はさらに長大となる。このため、従来の核スピ断熱消磁冷凍機は十分な天井高のある特殊な実験室でなければ設置困難であった。断熱消磁法は単発式の冷却手段なので、これを連続冷却運転するには、2 つの核ステージを直列(あるいは並列)接続して独立運用しなければならない。しかし、これも装置があまりに大型化してしまうため、実用化されていない。

こうした理由から、サブ mK の超低温実験環境は、これまで超流動および固体ヘリウム 3、金属核磁性、一部のアモルファス物質などごく一部の研究分野での活用に限られてきた。ところが近年、試料の高品質化が進んだ半導体低次元電子系[2]や重い電子系[3]などより広い物質科学分野で超低温環境が必要とされるようになってきた。衛星搭載する X 線・赤外線・ミリ波検出器でも、感度向上のための動作温度の低温化が急速に進んでいる。現在 50 mK の動作温度[4]をサブ mK まで下げることができれば、さらなる高分解能化が期待できる。

3. 小型超低温連続冷凍システム

以上のような背景のもと、本研究では、作業物質として増強核磁性体 PrNi₅を用いて小型化した連続冷却システムの開発を進めている。Van Vleck 常磁性物質である PrNi₅中の Pr 原子核スピンの感じる磁場は、超微細相互作用の効果により外部磁場の約 12 倍に増強される[1]。磁気秩序化温度は 0.4 mK と核スピ系としては高いが、目標の最低動作温度より低いので問題ない。実効磁場が増強されるため、1.2 T の印加で、8 T 印加した同体積の銅と同じ冷却容量(スピンエントロピーの減少量)が得られる。印加磁場(1.2 T を予定)が低いので超電導磁石を小型化でき、遺漏磁場を抑えるよう電磁石全体を高透磁率材で囲めば、2 つの断熱消磁ユニットを近接配置できる。

図 1 は、小型超低温連続冷凍システムの概略図である。希釈冷凍機の混合器より上のスペースに、消磁ユニット 2 つと Zn

の超伝導熱スイッチ(Zn-HSW)を搭載し、単体の希釈冷凍機に大きな改造を施すことなく、超低温環境を連続発生することができる。このシステムで、最低連続運転温度 0.7-1 mK、冷却力 1-10 nW 程度の実現できると考えている。

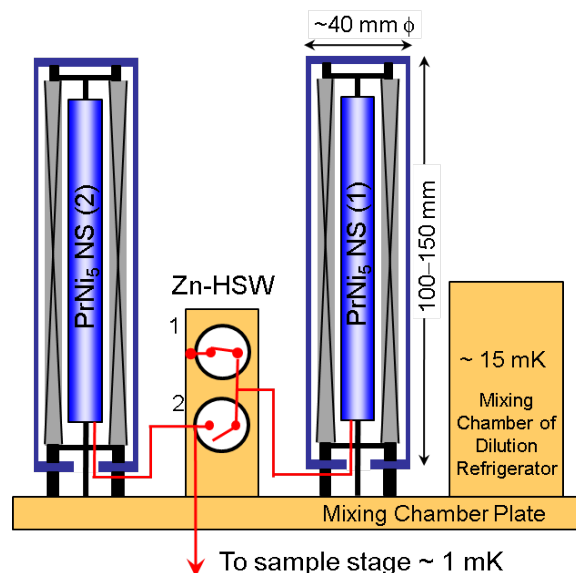


Fig.1 Schematic illustration of compact and continuous ultra-low temperature refrigerator

連続運転中は超伝導熱スイッチを使って 2 つの消磁ユニットの熱的な切替を頻繁に行う。このため、スイッチには臨界磁場の小さい Zn を使い、超伝導転移に伴う磁気発熱や磁場掃引時の渦電流発熱を抑える。断熱消磁冷却自体の冷却力は理想的には温度に比例するが、システム全体としての冷却力は、被冷却部と核スピ系とを結ぶ熱伝導度によって大きく制限される。このため、各ユニット間を結ぶ銀の熱リンク、熱スイッチの Zn 板、作業物質 PrNi₅の間の接触熱抵抗を小さくすることが重要となる。現在は、良好な熱接触を得られる接合の開発を行っている。

参考文献

1. F. Pobell: Matter and Method at Low Temperatures (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, 3rd ed.)
2. W. Pan, et al.: Phys. Rev. Lett., Vol. 83 (1999) p.3530; A. C. Clark, et al.: Rev. Sci. Instrum., Vol. 81 (2010) p.103904
3. D. H. Nguyen, et al.: J. Phys. Conf. Ser., Vol. 400 (2012) p.052024
4. P. J. Shirron, et al.: Cryogenics, Vol. 74 (2016) p.2