

■ 液体ヘリウムがなくても 50mKに到達できる

超低温中性子散乱研究グループ ■ 森 井 幸 生 ■

Refrigeration to 50mK without Liquid Helium Coolant

Yukio MORII

Research Group for Neutron Scattering at Ultralow Temperatures

A liquid-He-free dilution refrigerator, "mK Cryocooler", for neutron scattering research is constructed. It obtained the lowest sample temperature of 41 mK in the neutron beam experiment. The mK Cryocooler has a pulse tube cryocooler as 4 K stage and a Joule-Thomson type dilution refrigerator as mK stage. The new cryocooler will enable any researcher to carry out the experiments at mK temperatures with good movability, easy handling, low running cost, stable and continuous operation and no neutron beam loss due to refilling liquid Helium.

1. はじめに

物質を低温にすると、超伝導や超流動のような新しい物性が出現する。これらの多くは、科学としても実用としても重要であり、研究者や社会の興味を引いてきた。新しい物性を研究するうえで中性子ビームは不可欠なプローブであり、世界のトップレベルに達したJRR-3Mの中性子散乱施設で利用可能となっている。こうした状況の中で、中性子強度の弱さを補いつつ更に先端的な物質研究を行い、社会に貢献するための一つの鍵は、物質を極端条件下に置いた際に現れる特異な物性を理解し利用することである。超低温は代表的な極端条件であるが、これまで、なかなかそれを使いこなすことが難しかった。しかし、最近我々は、液体ヘリウムを使わないで極めて簡単に41mKまで到達できる冷凍機 "mK Cryocooler" を開発し、mK領域での中性子散乱研究が手軽に出来るようになった。

2. 開発の背景

超低温を生成するためには、普通、稀釈冷凍機を使用するが、冷却手順のまず第一は、液体窒素を冷凍機に充填させ一晩放置して77Kにすることである。続いて、液体窒素を完全に取り除いた後、液体ヘリウムを移送して4.2Kにする。たまった液体ヘリウムを1Kポットに流し込み、排気ポンプで減圧して1.5Kにする。稀釈冷凍機の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 作業ガスを液化して ^3He ガスのみを選択的に循環させる。このような手順を追って、予冷開始から超低温まで約1日かかる。定常運転にはいると、液体ヘリウム寒剤の補給をほぼ2日に一度行い、液体ヘリウムを1Kポットに流し込むための細管が詰まらないように細心の注意を払う必要がある。これらの何れの行程を失敗しても、稀釈冷凍機を室温まで暖めて、最初からやり直しとなるのが普通である。したがって、超低温実験を行うにはかなりの低温実験知識と経験を持っている必要がある。さらに、稀釈冷凍機の運転には液体窒素や液体ヘリウム寒剤が

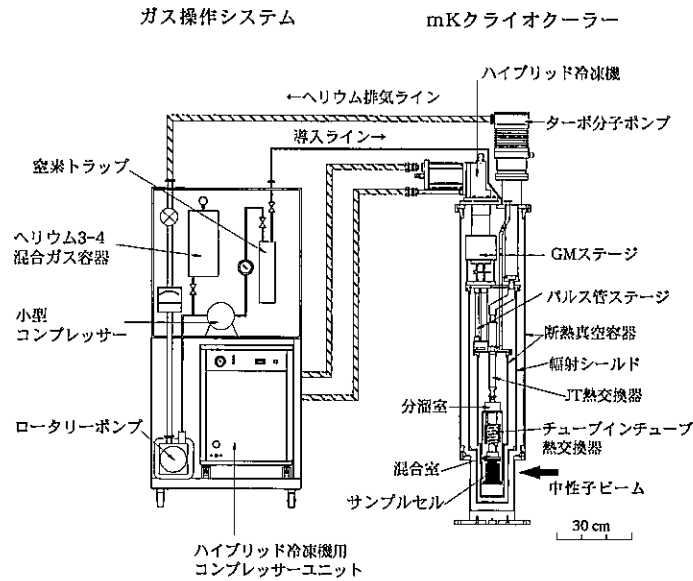


図1 mK Cryocooler の構成

大量に必要で経費が高くつく。このような技術的困難や経済的困難があるために、超低温での中性子散乱研究はこれまでなかなか増大しなかった。

ところが、近年、この困難を解消できる新しい技術が発達してきた。先ず第一に、ヘリウムガスの熱サイクルを利用した4 K冷凍機の発達が目覚ましく、液体ヘリウムを使わないでも4 Kまでの温度を自由に制御できるようになった。また、ヘリウム液化ができる程大きな冷却能力をもつ冷凍機があらわれた。事実、4 K冷凍機は病院のMRI マグネット用液体ヘリウム容器の上部に取り付けられて、ヘリウムガスを再凝縮させるようになり、保守作業を一変させた。第二に、稀釈冷凍機の発展も近年めざましい。従来機でのトラブルの主たる原因であった液体ヘリウムを取り込む1 Kポットをなくし、代わりにジュールトムソン膨張弁を持つ閉回路のJT弁型稀釈冷凍機が開発された。この新しい稀釈冷凍機を液体ヘリウムの中で使い、一年以上の安定連続運転が可能になった。

そこで我々は、この4K冷凍機とJT弁型稀釈冷凍機を組みあわせて、ボタン一つ押すだけで誰もが超低温条件を手に入れ、運転中の手間もかからない、中性子散乱用ヘリウムフリー稀釈冷凍機 "mK Cryocooler" を開発することにした¹⁾。

3. mK Cryocooler の構成と動作原理

図1にmK Cryocoolerの模式図を示す。mK Cryocoolerで採用された4 K冷凍機は、コンプレッサー

ユニットから供給されるヘリウムガスを作動ガスとする、ハイブリッド冷凍機²⁾である。この冷凍機はGifford-McMahon サイクルを使って30KとなるGMステージと、最近開発された無振動型のパルス管冷凍機を使って4 Kとなるパルス管ステージから構成されている。GM冷凍機は熱サイクルをつくりだすピストンが上下するので振動を生じるが、冷凍能力は大きい。一方、パルス管冷凍機は冷凍能力で劣るが、ピストンが無く振動を生じないので、mK生成には好ましいシステムである。このハイブリッド冷凍機は、熱サイクルを繰り返すことにより、GMステージで約10 W、パルス管ステージで約0.3Wの冷却能力を生みだし、mK温度を生成するJT弁型稀釈冷凍機を冷やしている。

JT弁型稀釈冷凍機³⁾では、4 K近くに予冷された³He-⁴He 混合作業ガスが熱交換器やジュールトムソン膨張によってさらに冷却、液化される。³He-⁴He 混合液は温度が下がると、³He濃度の濃い相と薄い相の二相に分離する。定常状態になったとき、二相分離は混合室でおこる。その相境界を越えて³He原子が濃い相から薄い相へと稀釈されると、あたかも沸騰水分子が蒸気を含んだ空気へ蒸発するとき吸熱するように、冷却能力を生み出し、自らの温度を下げる。³He原子を選択的に循環するために、ターボ分子ポンプを使って分溜室を減圧している。蒸気圧が下がって混合液の温度が1 K以下になると、³Heと⁴Heの分圧は³Heガスが圧倒的に大きくなり、選択的な排気が可能となる。排気された³Heガスは、ガス操作シス

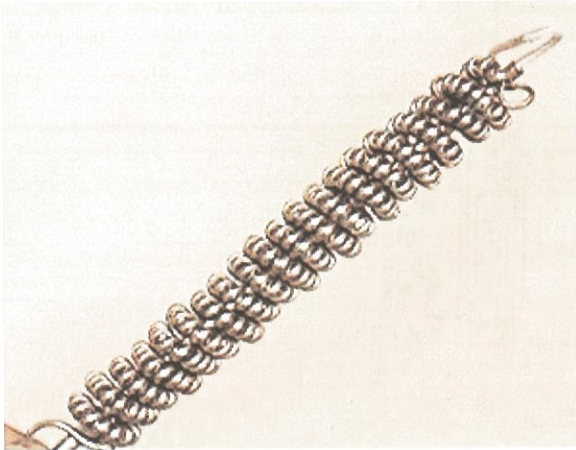


図2 JT熱交換器

テムのロータリーポンプと小型コンプレッサーによって加圧され、再びJT弁型希釈冷凍機へもどされる。ハイブリッド冷凍機によって室温から4 K近くに予冷された後、分溜室から排気される1 K程度の ^3He ガスによってJT熱交換器で冷却され、再びジュールトムソン膨張と分溜器によって冷却、液化される。さらに、チューブインチューブ熱交換器で混合室から戻ってくる冷たい ^3He 原子によって冷却されながら混合室へと導かれる。この動作を繰り返して、混合室が最低温度をつくりだすこととなる。

冷凍機ではいかに熱接触を良くして熱交換の効率を

高めるかが、重要なポイントとなる。特に4 K以下の熱交換には冷たいヘリウムと温かいヘリウムとの間の接触面積を大きくとる必要がある。例えばJT熱交換器では、 ^3He 液化用CuNi細管(外径2.0mm, 内径1.4mm, 長さ5 m)を外径約7 mmの螺旋状に巻き、それを更に外径5 mmの支持パイプに螺旋状に巻きつけて、 ^3He 排気用SUS管(外径30mm, 内径29mm)に挿入して製作した。図2は挿入直前のCuNi細管である。分溜器やJT熱交換器でも同様の工夫がされている。

最低温度となる混合室の底面にサンプルセルに納められた試料をとりつけ、中性子ビームによる散乱実験を行う。

4. mK Cryocoolerの冷却結果

図3の挿入図は室温から4 K迄の予冷結果である。ハイブリッド冷凍機のスイッチを入れた後、約26時間でパルス管ステージと混合室が4 Kまで冷却された。その後、JT弁型希釈冷凍機の運転を始めて、約8時間で混合室が50 mKに到達した様子が図3に示されている。この冷却過程で行なわれた ^3He 液化開始、ターボ分子ポンプ起動、最低温度での熱流入テストを矢印で示してある。室温から50mKまで合計34時間程度かかったことになる。この所要時間は、従来型の希釈

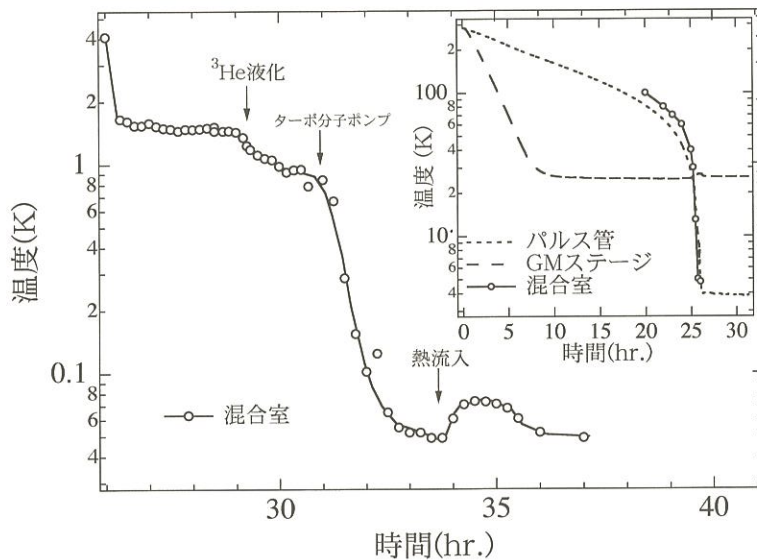


図3 mK Cryocoolerの冷却過程

冷凍機の冷却時間約24時間よりかなり長いですが、その大部分を占める4Kまでの冷却に全く手間がかからないため、むしろ便利さを実感した。また、一旦定常状態に入ると、冷凍機の調節が不要で、長期にわたり安定に作動した。この冷却テスト時の冷却能力は100mKで43 μ Wであった。

単独の冷却テストに成功したmK Cryocoolerを中性子散乱装置に組み込み、結晶方位調整のための移動、回転、傾斜運動を与えたが、その機械的な振動による発熱や、中性子ビームによる核発熱は認められなかった。このmK Cryocoolerは、重い電子系超伝導体UPd₂Al₃の磁気励起に関する研究に約一週間にわたって使用されるなど、成果を上げている⁴⁾。今後は、引き続き重い電子系や、Sr₂RuO₄等の他の強相関係の研究に使用する予定である。これまでの最低到達温度は41mKであった。

5. 今後の展望

以上述べてきた中性子散乱用ヘリウムフリー希釈冷凍機 "mK Cryocooler" の開発により、次のような利点がもたらされた。(1) mKを得るための操作が、格段に容易になった。(2) 液体ヘリウム移送の労力、時間が不必要になると共に、この操作による実験中断のために失っていた中性子ビームを完全に利用できるようになった。(3) 維持費が電気代のみとなり、従来型冷凍機の液体ヘリウム購入費等に比べ約1/10に低減した。(4) コンパクトな冷凍機となり、中性子散乱装置への組み込み、回転、傾斜が容易となった。(5) 長期間の中性子散乱実験中、ほとんどメンテナンス無しで安定運転ができ、放射線被曝量を低減できる。

今後の課題は次の二点である。第一は、冷却能力と最低到達温度の改善である。これは、チューブインチューブ熱交換器と混合室の間にステップ熱交換器を追加することによって改善されるはずである。また、充分大きな冷却能力を有する二段パルス管冷凍機開発のニュース⁵⁾があるので、その導入も大きなポイントとなろう。第二は、これまで、手動で行っていた4K

から最低温度までの冷却を自動化することである。これに必要なガス操作、圧力と温度の測定が自動化されると、室温から超低温まで自動的に冷却することができる。現在、自動化の予備実験を終えて総合テストを繰り返しているところである。これが完成すれば、正にボタン一つでmKが得られることになる。

我々は中性子散乱用希釈冷凍機の開発を目指して出発したが、ボタン一つの簡便性ゆえに、広範な科学分野でmK Cryocoolerが使われる日が来るのではないかと秘かに期待している。

6. 謝辞

この研究は当グループの小池良浩博士研究員、東京大学物性研究所の久保田実助教授、五十嵐武技官、株式会社鈴木商館の齋崎有、谷田広士両氏との共同研究であることを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Y. Koike, Y. Morii, T. Igarashi, M. Kubota, Y. Hiresaki and K. Tanida, Proc. 17th Int. Cryogenic Engineering Conf.(1998) 263, Y. Koike, Y. Morii, T. Igarashi, M. Kubota, Y. Hiresaki and K. Tanida, Cryogenics(1999) accepted.
- 2) K. Tanida, J. L. Gao, Y. Hiresaki and Y. Matsubara, Proc. 16th Int. Cryogenic Engineering Conf./ Int. Cryogenic Material Conf. (1997)303.
- 3) M. Kubota, T. Igarashi, M. Fukuda, V. Kovacic and Y. Hiresaki, Proc. 17th Int. Cryogenic Engineering Conf. (1998) 161.
- 4) N. Metoki, Y. Koike, Y. Haga and Y. Onuki, Physica B 259-261(1999) 660.
- 5) C. Wang, G. Thummes, K. J. Best, B. Oswald and C. Heiden, Proc. 17th Int. Cryogenic Engineering Conf.(1998) 69.