

Title	強磁場と極低温
Author(s)	鳴海, 康雄
Citation	大阪大学低温センターだより. 108 P.9-P.12
Issue Date	1999-10
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/6418
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

超強磁場と極低温

CREST, 大阪大学極限科学研究センター 鳴海 康雄 (内線6687)

E-mail: narumi@mag.rcem.osaka-u.ac.jp

はじめに

100 mK以下の極低温を実現するためには、多くの場合そのクライオスタットとして ^3He - ^4He 希釈冷凍機が用いられる。そして、この希釈冷凍機を強磁場中に持ち込むためには、一般的に超伝導マグネットを用いる場合が多いが、その最高磁場は約20 T程度で、ハイブリッドマグネット*を用いた場合でも40 Tが限界である。さらにこれより高い超強磁場領域となると、パルスマグネット*を用いることになるのだが、逆に極低温を実現するための希釈冷凍機を組み合わせることに困難な問題が生じ、実際にこの極低温と超強磁場を実現している研究機関は世界的にも数少ない*。

近年、より低温-強磁場をめざした複合極限の必要性が盛んに取り沙汰されている。1998年のノーベル賞受賞対象となった分数量子ホール効果などは、低温-強磁場でのみ観測できる物理現象の際たるものではないだろうか。このような背景のもと、我々極限科学研究センター超強磁場実験室では、希釈冷凍機とパルスマグネットを組み合わせることで、最低温度約60 mK、最高磁場約60 Tまでの複合極限を実現し、磁化、磁気抵抗（ホール抵抗）測定を可能にしたので、技術的なことを中心に紹介したい。

パルスマグネット

ところで、ひとくちにパルスマグネットと言ってもその種類は様々で、大まかには破壊型と非破壊型に分類される。さらに磁場の発生と同時にマグネットが壊れてしまう破壊型には、一巻きコイル法、電磁濃縮法、爆縮法がありそれぞれ100 Tを越える磁場を容易に発生することが出来る。一方で、理学部旧伊達研究室に始まる大阪大学での非破壊型マグネットに関する技術開発は、極限科学研究センターの金道助教授に引き継がれた今も、一層精力的に行われており、最近開発された新しいタイプのマグネットにより、その最高到達磁場は世界最高の80.3 Tに達している。ここで重要なのは、阪大で開発されてきたパルスマグネットは、破壊型に比べて発生できる磁場は小さいが、物性測定をする上でそれ以上に多くの利点がある非破壊型という点である。その利点とは、1) 繰り返し再現性の高い磁場を発生でき、精度の良い物性実験が可能である 2) パルス幅を比較的長くすることが可能であり、強相関電子系などの金属的な試料の測定にも十分対応できる 3) 低温を作るためのクライオスタットや他の実験装置との

組み合わせが容易である、というようなことが挙げられると思う。

今回、希釈冷凍機と組み合わせるために、上記のものより発生磁場は10 T程度落ちるが、マグネット内径が18 φと比較的広い空間に、パルス幅7 msecの磁場を発生することの出来るパルスマグネットを用いることにした。このマグネットは、引っ張り強度90 kgf/mm²のCu-Ag線を9層まで巻き上げた後、真空にした状態でエポキシ樹脂を注入して固めたもので、これをマルエージング鋼（引っ張り強度200 kgf/mm²）製のリングに入れて、外側への応力に対する補強を行い完成する。そしてこのマグネットは、大電流によるジュール熱を抑えるために、全体を液体窒素に沈めた状態で使用される。

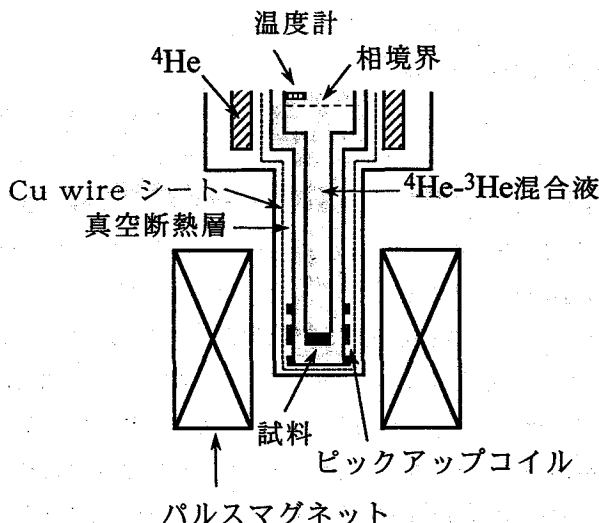
希釈冷凍機

このパルスマグネットに希釈冷凍機を組み込む訳であるが、その際にパルス磁場故の問題が生じてくる。通常希釈冷凍機は、⁴Heクライオスタット以上に深刻な熱の問題があり、そのうえ非常に精度の高い工作が必要となってくるため、ステンレスのデュワーをはじめ、ほとんどが金属部品から成り立っている。ところがこのような金属部品、特に金属パイプはパルス磁場中に持ち込むことが出来ない。なぜなら、パルス磁場中の金属には、時間変動する磁場により、磁場を打ち消す方向に電流が誘起されるため、パイプの場合には収縮する方向に電磁応力が働き、壊れてしまうからである。

一般的に使われている⁴Heクライオスタットでは、ガラスデュワーを用いているため、電磁応力によって壊れることはない。しかし、熱輻射の問題から希釈冷凍機に透明なガラスを使うことは出来ない。そこで、今回開発した希釈冷凍機ではこの問題を克服できるように、マグネットに挿入される混合器先端部が、非磁性、非金属の繊維強化プラスチックF.R.P.で作られている。またこれに加えて、パルスマグネットに挿入できるほどのコンパクトさを実現するために先端部の⁴He層をなくして、代わりに約2 KにアンカーされたCuシートで覆うことにより輻射シールドを行っている。このシートは0.1 φのCu線を短冊状に束ねたもので、これによってパルス磁場による渦状の電流の誘起を防ぐことができる。

図にマグネット挿入部周辺の概略を示す。液体窒素に浸された先端部の外径は15 φで、そこから真空断熱層、Cu wireシート、F.R.P.の壁を経て、内径4 φの空間の試料空間に至る。試料は混合液の相境界から延長されたパイプの先端に設置され、循環する超流動状態の混合液によって冷やされる。以下にこの冷凍機の性能を示す。

- 冷凍能力 約30 μW at 100 mK
- 最低温度 約60 mK（循環モード）、約50 mK（1ショットモード）
- 循環開始から最低温度までの到達時間 約1時間
- 最低温度の持続時間 10時間以上



当初このような性能が、大きな振動やノイズを伴うパルス磁場発生時に実現可能であるかについては、いくらかの不安もあったが、実際には最高磁場発生時でもこの性能は十分に達せられている。最後に、このF.R.P.製希釈冷凍機の製作は、肉薄のF.R.P.を用いた低温機器の製作技術を有する、大陽東洋酸素(株)によって行われた。

磁気抵抗、磁化測定

磁気抵抗の測定は、熱シールドのための超伝導線を介した銅線を、混合器内に直接を持ち込んで、パルス磁場と同期させた矩形のパルス電流を試料に流した直流4端子法により行う。また、これに加えて磁場反転を行えば、同様にしてホール抵抗も測定することが出来る。

一方磁化測定は、パルス磁場中での最も一般的な磁化測定法として知られている誘導法*を用いて行う。0.08φのスズ入り銅線で巻かれたピックアップコイルは、混合器先端部の断熱真空層に取り付けられており、約2Kまで冷やされたCuのブロックにこの銅線はアンカーされた後に、BNCコネクタを介して断熱真空層外部に取り出される。ところで、この希釈冷凍機の一つの特徴に、試料の付いた混合器をはじめ、熱交換器、分溜器などのインサートと呼んでいる冷凍機本体が、デューワー部分とは別に、試料交換時にトップローディングで引き抜けるように可動となっている、というのがある。この可動部分はOリングを介して真空シールされており、³He循環時にもこのインサートを動かすことができる。実際の測定では、試料をピックアップコイルに入れた状態のシグナルから、試料をピックアップコイルから約20mm引き抜いたバックグラウンドのシグナルを差し引かなければならないが、この特徴によりそれが可能となっているのである。実は、この時点で混合器温度は約200mK程度上昇するが、この温度上昇は最高磁場発生時のマグネット冷却のための待ち時間程度、約30分程度で回復することから連続的に磁化測定の実験を行うことができる。

すでに我々は、いくつかの低次元量子スピン系*の磁化測定、近藤絶縁体YbB₁₂*の磁化、磁気抵抗、擬二次元伝導体η-Mo₄O₁₁*の磁気抵抗、ホール抵抗の測定を行い、詳細にはふれないがいくつかの興味深い結果を得ている。今後は更に感度の改善などの改良を行い、この未知なる極低温—超強磁場領域での、新しい物理現象の探求を行っていきたい。

用語説明

ハイブリッドマグネット：

超伝導マグネットに水冷式常伝導マグネットを組み合わせたタイプのマグネットで、超伝導マグネットよりも大きな磁場を発生させることができるが、非常に大型でまたランニングコストが莫大に掛かる。

パルスマグネット：

大きな磁場を発生させるためには、コイル状の導線に大きな電流を流せば良いが、30 Tを越えるような超伝導マグネットでは発生できない領域の磁場の場合は、そこに加わる電磁応力とジュール熱が深刻な問題となってくる。パルスマグネットとは、これらの問題を克服するために開発された、コンデンサーに貯めた電荷を短時間にコイルに放電することにより、短時間に大きな磁場を得られるマグネット。

超強磁場と極低温：

希釈冷凍機とパルスマグネットを組み合わせた実験は世界的にはU.S.AのNational High Magnetic Field Lab. (49 mK, 50 T)で行われているが、そこで行われているのは磁気抵抗測定のみであり、磁化、磁気抵抗測定の両方を可能にしたのは、我が研究室が世界で初めてである。

誘導法：

時間変化する磁場に呼応した試料の磁化の時間変化を、試料外部に巻かれたピックアップコイルに誘起される電圧として取り込む方法。

低次元量子スピン系：

その低次元性によって、絶対零度においても磁気秩序をとらないことから、量子多体効果に起因する様々な興味深い物理現象が期待される系。

近藤絶縁体 YbB_{12} ：

局在性の強いf電子と伝導電子との強い混成効果により、フェルミレベルにギャップが開く物質。強相関電子系の一つとして注目されている物質群である。

擬二次元伝導体 $\eta\text{-Mo}_4\text{O}_{11}$ ：

電荷密度波転移に起因するという、通常の二次元電子系とは異なる機構に基づく量子ホール効果が観測されたことから、注目されている化合物。