

東北大学 極低温科学センターだより

No. 24



Center for Low Temperature Science
Tohoku University

2023年12月

表紙の図の説明

金属材料研究所において日本で初めて導入された液体酸素デューワー。イギリス Siebe Gorman & Co Ltd 製で、4 リットルの容量を持つ。片平キャンパス内の「東北大学ギャラリーひすとりあ」に展示されている。

巻頭言

極低温科学センター長 佐々木孝彦

東北大学は、金属材料研究所において 1952 年にアメリカから輸入したコリンズ式液化機により、日本で最初にヘリウムの液化を開始し、全国の研究者に液体ヘリウム温度以下の低温研究環境を提供しました。現在の極低温科学センターは、この流れを汲み片平地区と青葉山地区に液化・回収拠点を置き、星稜地区を含む全学に液体ヘリウムの供給を行っています。その供給量と供給・回収システムは日本有数の規模となり、低温利用研究の推進に貢献しています。青葉山新キャンパスでは、2023 年度末の稼働、2024 年度の利用開始を目指して次世代放射光施設ナノテラスの建設が進められています。この施設での放射光利用実験において必要となる液体ヘリウムは、東北大学コアファシリティセンターの機器共用制度を利用した学外ヘリウム液化サービスにより本センター（青葉山地区）からの供給を予定しています。本学の研究・教育・開発力の強化に資する、次世代放射光施設の運用にも貢献してまいります。

このような東北大学における低温研究の土台を作られたのは、青山新一博士（理科大学化学教室）です。青山博士は 1925 年からヨーロッパに留学していましたが、1927 年 8 月から 1928 年 2 月まで、オランダライデン大学のカムリンオネスの研究室で低温技術を学び 1929 年に帰国されました。帰国後、東北大学における低温科学研究の計画を立案し、1930-31 年に本多光太郎と共同して斎藤報恩会から多額の補助金を得て金属材料研究所に低温研究室を建設し、空気液化機などの低温研究設備の導入・整備を行いました。この低温研究の基盤構築によって、その後の日本の低温研究をリードする人材が仙台から輩出され、また、第二次大戦後に日本で初めてヘリウムの液化が行われたことに繋がっています。

青山博士は、ヨーロッパ留学から帰られる際に、多くの研究機器を購入し持ち帰られました。その一つが、本号のセンターだより表紙に掲載した「液体酸素デュワー」です。この「液体酸素デュワー」（4 リットル）はイギリス製（Siebe Gorman & Co Ltd, London, Serial No.100）で、東北大学片平キャンパス金属材料研究所敷地内にオープンした「東北大学ギャラリーひすとりのあ」に収蔵、展示されています。銅製の渋い色合いで、姿形や大きさは現在市販されている小型球形の液体窒素デュワーとそっくりです。球体横の小さな突起部は、真空引きした後に封じ切った部分をネジ型の部品で覆った構造になっています。

この液体酸素デュワーを見ていると、100 年前の研究者も現在とあまり変わらないデュワーの使い方、実験をしていたのかなーと感慨深いものがあります。ぜひ多くの低温研究を行う方々に現物を見ていただき、この感動を共有していただけると幸いです。日本の低温科学研究発祥の流れを汲む本センターの活動に、今後ともご協力、ご支援いただきますようお願いいたします。

「東北大学ギャラリーひすとりのあ」<https://www.bureau.tohoku.ac.jp/somu/cca/index.html>
・開室時間：火曜日、木曜日 12 時～16 時（祝日を除く）・見学料：無料
東北大学ギャラリーひすとりのあが入る建物（旧東北帝国大学理学部生物学教室）は登録有形文化財（建造物）に登録されています。東北大学の歴史、学術成果を紹介するとともに、キャンパスツアーなどイベントの拠点となるスペースです。展示室では東北大学の歴史や学術成果の紹介を行っています。開室時間中は自由に見学できます。

窒化物超伝導体を用いた量子計算回路の開発

大学院工学研究科

山下太郎 (taro@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

近年、超伝導体をベースとした量子計算機の研究開発が世界的に加速している [1]。量子計算機はいくつかの特定の問題に対して従来の古典計算機の性能を凌駕することが期待されており、米国 Google や IBM 等の大企業を始めとして世界中の大学・研究機関等で熾烈な研究開発競争が繰り広げられている。量子計算機のハードウェアとしては、超伝導体だけではなく半導体やイオントラップ、光など様々な物理系が研究されているが、その中でも超伝導体は、高い設計自由度や集積可能性により最有力候補のひとつとして注目されている。2019年には Google が量子超越性（古典計算に対する圧倒的な優位性）の実証を報告する論文を発表し [2]、大きな話題を呼んだ。

2. 超伝導体ベースの量子計算回路

超伝導量子計算回路を構成する最小単位は量子ビットと呼ばれ、各ビットは“0”か“1”の2値だけではなく、それら任意の重ね合わせ状態を取りうる点が従来のデジタル信号処理における古典ビットとの大きな違いである。超伝導体を用いた量子ビットにはその設計パラメータの違いにより、大きく分けて電荷型・磁束型・位相型の3つのタイプが存在する。いずれのタイプも、その基本構造はジョセフソン接合（超伝導/絶縁体/超伝導接合）を含んだ超伝導ループである。現在の主流は、電荷型をベースに雑音耐性を改善したトランズモンと呼ばれるタイプであり、前述の Google から報告された量子回路も54個のトランズモン量子ビットから構成されている [2]。個々の量子ビットは固有のエネルギー（典型的には周波数換算で数 GHz 程度）によって特徴付けられるが、この値はジョセフソン接

合の臨界電流値やキャパシタンス等で決定するため、各接合を極力設計値通りに作製することが今後の量子回路の大規模化にとって重要となる。また、量子ビットの性能指標として最も重要なのがコヒーレンス時間である。コヒーレンス時間とは、量子ビットが量子状態を保持可能な時間であり、現在では長いもので $100\ \mu\text{s}$ を超えるまで改善がなされている [3]。一般的には、量子回路の大規模化に伴ってビット間のクロストークや配線数増加による雑音増大等により、コヒーレンス時間は減少するため、更なる改善が求められている。

また、量子ビット自体は受動素子であるため、量子回路を動作させるためには、各量子ビットの状態を制御し読み出すことが必要となる。現在は一般的に、量子ビットとコプレーナ導波路型の超伝導共振器を結合させた回路を作製し、回路量子電磁力学（circuit quantum electrodynamics; circuit QED）と呼ばれる手法を用いた制御・読み出しが行われている [4]。詳細は他の文献に譲るが、この手法ではコプレーナ導波路へマイクロ波のパルスを入射し、その周波数を制御対象の量子ビットのエネルギーにチューニングすることで量子状態の制御を行う。照射するパルスの時間幅もしくは振幅を調節することで、所望の量子状態へ遷移させることが可能となる。読み出しに関してもマイクロ波を利用する。一般的に用いられるのが分散読み出し（dispersive readout）と呼ばれる手法であるが、これは量子ビットと弱く結合したコプレーナ導波路共振器の共振周波数が、量子ビットの状態に応じて変化（シフト）することを利用する。マイクロ波の入射に対して、反射もしくは透過したマイクロ波の振幅や位相を測定することで、量子状態を判別することが可能である。量子ビット研究の黎明期

に用いられていた超伝導量子干渉素子 (SQUID) による状態読み出し等と異なり、量子ビットの状態を破壊することなく読み出すことができる (非破壊読み出し) のが大きな利点である。

3. 窒化物超伝導体を用いた量子ビット

現在、超伝導量子回路の研究開発における大きな方向性は、コヒーレンス時間の更なる改善と、十分なコヒーレンス時間を保持しつつ大規模化 (多量子ビット化) を達成することである。そこで我々は、窒化物超伝導体を用いた超伝導量子ビットの開発を進めている [5-7]。現在に至るまで、多くの超伝導量子ビットを構成するジョセフソン接合としては、斜め蒸着法により作製された Al/AIO_x/Al 接合が用いられてきた。ところが障壁層である AIO_x はアモルファス酸化膜であり、コヒーレンスを劣化させる要因なのである 2 準位系が多く含まれていることが知られている。そのためコヒーレンス時間の改善には、障壁層中に存在する 2 準位系密度の低減が必要となる。

そこで我々が開発を進めているのが、窒化アルミニウム (AlN) を障壁層に用いた窒化ニオブ (NbN) 接合 (NbN/AlN/NbN 接合) である。Si 基板上に窒化チタン (TiN) を反応性スパッタリングにより成膜することで、(100)配向した TiN 薄膜が得られる。TiN と NbN は格子定数が近いので TiN をバッファ層として用いることで、Si 基板上に(100)配向したフルエピタキシャル NbN/AlN/NbN 接合が得られる [6]。結晶化した AlN 障壁層では 2 準位系密度の低減が期待されるため、現在この NbN ベースのジョセフソン接合を用いた超伝導量子ビットを作製し、コヒーレンス時間の改善実証に向けた研究を進めている。最近では、開発した NbN 接合による磁束型量子ビットにおいて、20 μs 程度のコヒーレンス時間を得ることに成功している [7]。

3. 超伝導量子ビットへの π 接合応用

多量子ビット化に向けたもうひとつのアプローチとして、我々は新しいタイプの量子ビット開発も進めている。現在主流のトランズモンタイプの

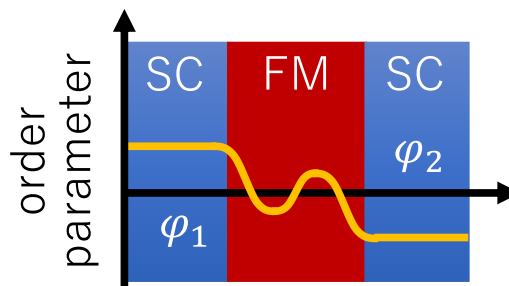


図 1 強磁性ジョセフソン接合 (SC/FM/SC 接合) による π 接合の概念図。超伝導オーダーパラメータが強磁性層内で空間的に振動し、両側の超伝導体における巨視的位相 φ_1 と φ_2 の符号が異なっている。

量子ビットは高い雑音耐性を達成した一方、量子ビットとして利用すべき基底状態と第一励起状態よりもさらに上のエネルギー準位への望まない状態遷移が起きやすくなる (小さな非調和性によるリーク) という問題がある。これに対し、3つのジョセフソン接合を有する磁束型量子ビットは高い非調和性を有するためこの問題を克服でき、多量子ビット化においてもビット間クロストークの低減も期待できる。また最近では、磁束型量子ビットにシャントキャパシタを付加した構造を採用することで、良好なコヒーレンス時間や歩留まりの改善も報告されている [7,8]。このような状況の中、磁束型量子ビットにおける残された課題は動作のために外部磁場を必要とする点である。最長のコヒーレンス時間を保持するためには、量子ビットを構成する超伝導ループ中に、磁束量のちょうど半分に対応する磁束 (半磁束量子) を定常的かつ正確にバイアスし続ける必要がある。これを最適動作点と呼ぶが、多量子ビット化した際には全ての量子ビットを最適動作点へチューニングすることは技術的に極めて困難となり、大規模化のボトルネックとなる。

この問題を解決できる可能性をもつのが、筆者が理論提案を行い [9,10]、現在開発を進めている磁束バイアスフリーな磁束型量子ビットである。ここに用いるのが、図 1 に示す強磁性ジョセフソン接合 (超伝導/強磁性/超伝導接合) であり、π 接合

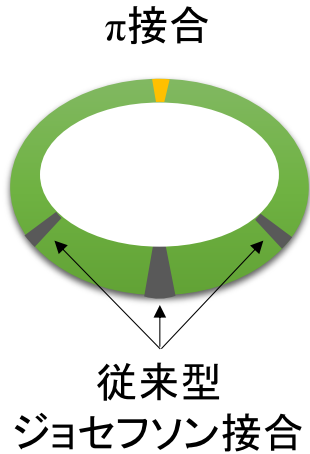


図2 π接合を組み込んだ磁束バイアスフリーな磁束型量子ビットの概念図。

と呼ばれる。π接合では、強磁性層へ染み込んだ超伝導オーダーパラメータが交換相互作用の影響により空間的に振動し、正または負の符号をとる。そのため、強磁性膜厚を適切に設定することにより、両側の超伝導体における巨視的位相がちょうどπの場合にエネルギー的に安定となる状態(π状態)が存在し、この接合をπ接合と呼ぶ。図2に示すように、このπ接合を磁束型量子ビットへ導入することにより、半磁束量子に相当する磁束バイアスを印加したと等価になり、外部磁場ゼロで最適動作点を実現できる。

そこで我々は、窒化物超伝導量子ビットと相性の良いNbNベースのπ接合開発を進めている。強磁性層としては希釈磁性体であるCuNiを採用し、NbN/CuNi/NbN接合を作製・評価した結果、CuNi膜厚及び温度依存性における0状態とπ状態の相転移[11]や、SQUID構造素子の臨界電流の磁場依存性における半磁束量子シフトを観測[12]し、窒化物π接合の実証に成功した。また最近では、強磁性層にPdNiを用いることで、より幅広い膜厚領域においてπ接合を実現できることを明らかとした[13]。現在、前述の窒化物超伝導量子ビットへこのπ接合を導入した素子の作製を行い、位相シフト動作実証まで完了している[14]。また並行して、従来の

AI接合と窒化物π接合のハイブリッド型量子ビットの開発・評価も進めており、磁束バイアスフリー動作実証に成功している[15]。今後、この強磁性ジョセフソン接合技術を発展させ、超伝導量子ビットの大規模化におけるコア量子技術として確立することを旨とする。

3. まとめ

本稿では、超伝導量子計算回路の概要と、我々が取り組んでいる窒化物超伝導技術をベースとした量子計算回路の開発について紹介した。従来のAI接合を用いたトランズモン量子ビットを置き換えるには、さらなる成膜条件の最適化やプロセス工程の改善、素子設計のブラッシュアップ、最適な材料探索を含む様々な研究開発が必要となるが、大規模集積化に適した新しい量子技術の可能性が大いに期待される。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の寺井弘高氏、川上彰氏、金鮮美氏、丘偉氏、布施智子氏、吉原文樹氏、仙場浩一氏、理化学研究所のKunZuo氏(現・シドニー大学)、浦出芳郎氏(現・産業技術総合研究所)、東京大学の中村泰信教授、産業技術総合研究所の猪股邦宏氏、理化学研究所の前川禎通氏、東北大学の高橋三郎氏、名古屋大学のDuong Pham氏(現・東北大学)、田中雅光助教、藤巻朗教授らとの共同研究である。また本研究の一部は、JST さきがけ(JPMJPR1669)、JST CREST(JPMJCR1775)、JSTERATO(JPMJER1601)、科研費基盤研究(S)(19H05615)、特別推進研究(18H05211)、文部科学省Q-LEAP(JPMXS0118068682)の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] J. Clarke and F. K. Wilhelm, “Superconducting quantum bits”, *Nature* **453**, 1031 (2008).
- [2] F. Arute *et al.*, “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”, *Nature* **574**, 505 (2019).

- [3] W. Oliver and P. B. Welander, “Materials in superconducting quantum bits”, MRS Bulletin **38**, 816 (2013).
- [4] A. Blais, R.-S. Huang, A. Wallraff, S. M. Girvin, R. J. Schoelkopf, “Cavity quantum electrodynamics for superconducting electrical circuits: An architecture for quantum computation”, Phys. Rev. A **69**, 062320 (2004).
- [5] Y. Nakamura, H. Terai, K. Inomata, T. Yamamoto, W. Qiu, Z. Wang, “Superconducting qubits consisting of epitaxially grown NbN/AlN/NbN Josephson junctions”, Appl. Phys. Lett. **99**, 212502 (2011).
- [6] K. Makise, H. Terai, and Y. Uzawa, “NbN/AlN/NbN/TiN Tunnel Junctions on Si (100) Substrate for Superconducting Devices”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 1100403 (2016).
- [7] S. Kim, H. Terai, T. Yamashita, W. Qiu, T. Fuse, F. Yoshihara, S. Ashhab, K. Inomata, K. Semba, “Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubits epitaxially grown on silicon substrate”, Communications Materials **2**, Article number: 98 (2021).
- [8] F. Yan *et al.*, “The flux qubit revisited to enhance coherence and reproducibility”, Nature Communications **7**, 12964 (2016).
- [9] T. Yamashita, K. Tanikawa, S. Takahashi, S. Maekawa, “Superconducting π qubit with a ferromagnetic Josephson junction”, Phys. Rev. Lett. **95**, 097001 (2005).
- [10] T. Yamashita, S. Takahashi, S. Maekawa, “Superconducting π qubit with three Josephson junctions”, Appl. Phys. Lett. **88**, 132501 (2006).
- [11] T. Yamashita, A. Kawakami, H. Terai, “NbN-based ferromagnetic 0 and π Josephson junctions”, Phys. Rev. Appl. **8**, 054028 (2017).
- [12] T. Yamashita, S. Kim, H. Kato, W. Qiu, K. Semba, A. Fujimaki, H. Terai, “ π phase shifter based on NbN-based ferromagnetic Josephson junction on a silicon substrate”, Sci. Rep. **10**, Article number: 13687 (2020).
- [13] D. Pham, R. Sugimoto, K. Oba, Y. Takeshita, F. Li, M. Tanaka, T. Yamashita, A. Fujimaki, “Weak spin-flip scattering in Pd₈₉Ni₁₁ interlayer of NbN-based ferromagnetic Josephson junctions,” Scientific Reports **12**, Article number: 6863 (2022).
- [14] T. Yamashita, K. Inomata, D. Pham, H. Terai, “Flux-bias-free superconducting flux qubits with coplanar waveguide resonator”, 16th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2023), Bologna (Italy), Sep. 3-7.
- [15] K. Zuo *et al.*, in preparation.

スピン三重項超伝導体 UTe_2 における 角度分解強磁場輸送測定

金属材料研究所 木俣 基 (e-mail address: motoi.kimata.b4@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

よく知られているように、多くの超伝導体では電子スピンの反平行となったスピン一重項クーパ対が形成される。一方で、超伝導クーパ対のスピンの揃った状態はスピン三重項超伝導と呼ばれる。こういった状態では、クーパ対にスピンや軌道の内部自由度が残るため、超伝導秩序変数にも自由度が生じる。その結果、超伝導相内で秩序変数が変化する超伝導-超伝導転移(超伝導多重相転移)や、クーパ対が磁化を持つことに起因する異常輸送現象など、一重項超伝導には決して現れない新奇物性が期待される。しかし候補物質が極めて限られるためそれらの理解や実験検証は進んでいない。

2018年に発見された重い電子系超伝導体 UTe_2 [1, 2] は、超伝導転移に伴うスピン磁化率 (NMR ナイトシフト) の減少が極めて小さく [3]、また磁場に対して非常に強固な超伝導 (常圧では $T_c \approx 1.6 - 2.1 \text{ K}$ に対して上部臨界磁場 B_{c2} は 35 T) [4-7] や、圧力下での超伝導多重相転移 [8, 9] を示す。これらはスピン三重項超伝導にまさに期待される特徴であり、大きな注目を集めている。

前述のように、 UTe_2 の大きな特徴の一つは、強磁場や圧力の印加によって、多彩な超伝導相が出現する点である。以下にその特徴を概観する。例えば強磁場の印加に対しては、磁場を b 軸方向に印加すると、いったん磁場によって抑制された超伝導転移が 15 T 以上から再び上昇し、約 35 T のメタ磁性転移まで生き残る [4-6]。また 40 T 以上の磁場を $\sim [011]$ 方向に印加した時にも超伝導が発見されている [4, 6]。 $B_{\parallel} \sim [011]$ の超伝導相はメタ磁性転移以上

で出現するため、ゼロ磁場とは全く異なる電子状態での磁場誘起超伝導である。さらに圧力下では、より多彩な超伝導多重相が出現する。例えば圧力下で磁場を a 軸方向に印加すると、温度や磁場に依存して複数の独立な超伝導相が発見されている [8, 9]。これらの多彩な超伝導相の出現は UTe_2 のクーパ対が内部自由度 (スピンと軌道) を持つことの強い証拠と考えられる。

2. 本研究の目的

本研究では、 UTe_2 の多彩な超伝導相の中で、 $B_{\parallel} b$ 、 15 T 以上で出現する磁場誘起超伝導相 (Field re-entrant superconductivity: FRSC 相) の起源解明に貢献する目的で実験を行った。前述のように、FRSC は磁場方位が b 軸に近い時に出現するが、磁場方位が b 軸から傾くと急激に抑制されることが知られている [5]。しかし、なぜこういった顕著な異方性が超伝導相図に出現するのか、その実験的な手掛かりは得られていない。

一般に、超伝導の出現にはクーパ対形成の起源となる相互作用が存在すると考えられる。特に非従来型超伝導の場合は磁気揺らぎが重要と期待される。そこで本研究では強磁場下の角度分解輸送測定から、FRSC の起源と深く関わると期待される異方的な磁気揺らぎの存在を検証できるのではないかと考え実験を行った。

本研究で着目した輸送現象は主に異常ホール効果である。一般にホール効果にはローレンツ力に起因する正常ホール効果と、電子のスピン依存散乱等に起因する異常ホール効果が知られている。

正常ホール効果は主にキャリア密度によって決定されるために顕著な温度依存性を示さないが、異常ホール効果は磁化を介した伝導電子のスピンの偏極率や散乱に依存するため、一般に強い温度依存性を示す。また特に重い電子系物質においては、磁気揺らぎによる散乱が異常ホール効果に寄与することが以前から知られており[10]、そのため、異常ホール効果の角度依存性から磁気揺らぎの異方性を検出できると期待される。

3. 実験手法

実験は東北大学金属材料研究所、強磁場超伝導材料研究センターの25 T 無冷媒超伝導マグネット(25T-CSM)とワンショット型 ^3He 冷凍機を用いて、最高24T、最低温0.5Kの条件で行った。 UTe_2 の単結晶試料は東北大金研大洗センターの青木研究室から提供いただいたものを用いた。今回用いた試料のゼロ磁場での T_c は約1.6 Kである。図1は実験のセットアップである。電流を結晶の a 軸方向に流し、縦抵抗とホール抵抗を交流四端子法を用いて同時測定した。またホームメイドの二軸回転機構を用い、磁場を結晶の ab 面ならびに bc 面内で回転させて実験を行った。

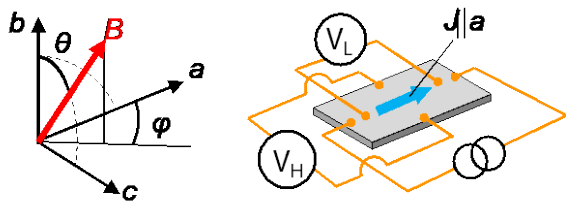


図1. 本研究で用いた実験セットアップ。二軸回転機構を用いた実験のためあらゆる方向に磁場の印加が可能であり、例えば本研究のように、 ab 面および bc 面での磁場回転実験も試料を取り出すことなく可能になる。

4. 結果と考察

図2に磁場を ab 面および bc 面で回転させたときの縦抵抗の角度依存性を示す。 $B \parallel b$ 近傍に着目すると、 $T=1.5\text{K}$ では抵抗率が極大となるが、 $T=0.6\text{K}$ では FRSC 相による急峻な落ち込みとゼロ抵抗が

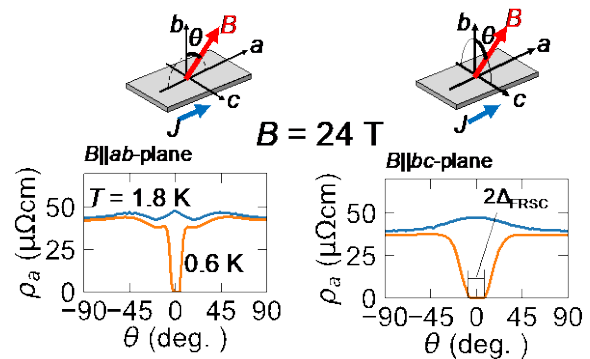


図2. ab および bc 面内で磁場を回転させた時の縦抵抗の角度依存性。左図が ab 面内の結果、右図が bc 面内の結果を示す。 $T = 1.8\text{K}$ では $B \parallel b$ で極大を持つが、 $T = 0.6\text{K}$ では FRSC 相による急峻な抵抗の減少とゼロ抵抗が観測される。

観測されている。また FRSC 相の出現する磁場の角度範囲は、 bc 面内の方が ab 面内よりも広い。このような FRSC 相の ac 面内での異方性は、過去の報告と定性的に一致している。

次にホール抵抗の角度依存性を図3(a),(b)に示す。磁場は結晶の bc 面内で回転している。一見してわかることは、ホール抵抗が強い温度依存性を示すことであり、このことから、この系のホール抵抗では異常ホール効果が支配的であり、磁気揺らぎの影響を強く受けていることが示唆される。また比較的高温ではホール抵抗は $\cos\theta$ に概ね比例している。ホール効果の起源が磁場方位に依存せず等方的な場合、ホール抵抗は試料面垂直な磁場成分に比例する。従って、この結果は高温では異常ホール

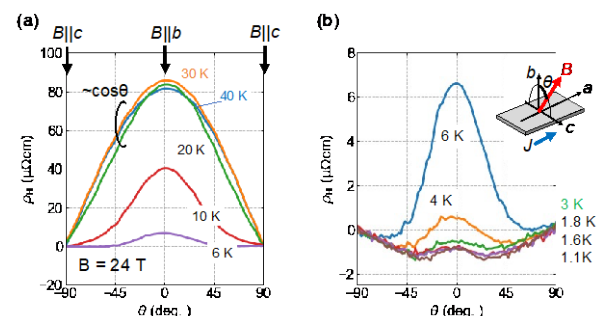


図3. 磁場を bc 面内で回転した時のホール抵抗の温度依存性。(a)比較的高温($T > \sim 20\text{K}$)ではホール抵抗が概ね $\cos\theta$ に比例しており、等方的な磁気揺らぎに起因すると考えられる。一方(b)に示す低温では $B \parallel b$ でピークを持つ振る舞いへと変化し、 $B \parallel b$ の近傍で磁気揺らぎが増強していることを示唆する。

効果の起源が等方的であることを示している。一方温度を下げると、ホール抵抗は $B||b$ でピークを持つ振る舞いへと変化する。このことは温度の低下に伴って、磁気揺らぎが異方的となり、 $B||b$ の近傍で揺らぎが増大することを示している。図 3(b) に示すようにさらに温度を下げると、この傾向は顕著になるが、 $T \approx 2$ K 以下ではほとんど温度依存しない振る舞いへと変化する。このような低温極限の温度依存しないホール効果は、正常ホール効果や不純物によるスキュー散乱など、系に本来的に内在する起源によるものである。重要な点は、温度依存しない低温極限でのホール効果においても $B||b$ 近傍のホール効果の増強が見られる点である。このことは、 $B||b$ における磁気揺らぎの増強がこの系に本質的なものであることを示している。

図 4(a) は $B = 24$ T における低温極限 ($T = 1.6$ K) のホール抵抗の拡大図を示している。磁場方位が c 軸に近い領域では $\cos\theta$ に比例するような振る舞いが観測されており、正常ホール効果によるものと考えられる。一方で、 $B||b$ の近傍でホール抵抗が増大していることがわかる。そこで、 $B||b$ 近傍のホール効果の異常を抽出するため、 $\cos\theta$ に比例するバックグラウンドを差し引いたものが、図中の異常ホール抵抗率 ($\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$) であり、 $B||b$ でピークを持つ異常が明確に観測されている。図 4(b) は $T = 1.6$ K での $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ の磁場依存性である。磁場強度を下げると $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ のピーク強度が減少し、約 14 T 付近でほぼ消

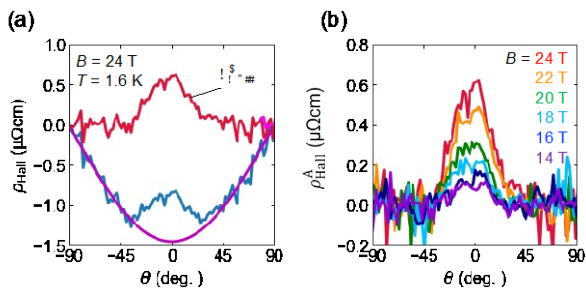


図 4. (a) $B=24$ T、 $T=1.6$ K におけるホール抵抗の角度依存性の拡大図。正常ホール効果に起因するバックグラウンドを差し引き異常ホール成分を抽出している。(b) 異常ホール成分の磁場依存性。磁場強度の減少にともないピーク強度も減少し、14 T でノイズレベルと同程度となる。

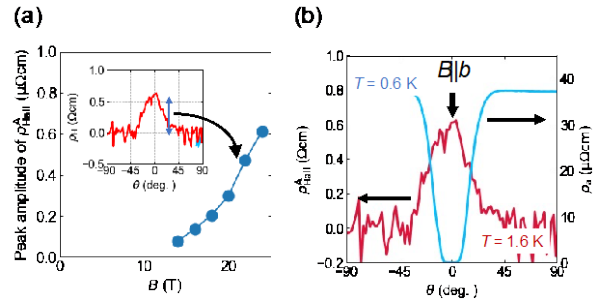


図 5. (a) $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ のピーク強度の磁場依存性。12-14 T 付近から $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ が出現している。(b) ノーマル状態 ($T = 1.6$ K) における $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ の角度依存性と $T = 0.6$ K における縦抵抗の角度依存性の比較。 $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ と FRSC の出現角度範囲が概ね対応している。

失することがわかる。ピーク強度の磁場依存性をプロットしたものが図 5(a) である。このように $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ はゼロ磁場から磁場に比例して生じるものではなく、12-14 T の磁場から出現しており、何らかの磁場誘起揺らぎに起因するものと考えられる。興味深い点は、 $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ の出現する磁場が、FRSC 相の出現する磁場 (~ 15 T) と概ね対応することである。さらに $B = 24$ T、 $T = 1.6$ K での $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ と $T = 0.6$ K での縦抵抗の角度依存性を重ねて示した図が図 5(b) である。異常ホール効果の増強を示す $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ と FRSC 相は出現する磁場角度の点においても概ね一致している。これらのことは、 $\rho_{\text{Hall}}^{\text{A}}$ の起源となる異方的な磁気揺らぎが FRSC と強く関連していることを示唆している。

5. まとめと課題

今回我々はスピン三重項超伝導体の強い候補物質である UTe_2 の強磁場中での角度分解輸送測定を行い、 $B||b$ 、 $B > \sim 15$ T で出現する磁場誘起超伝導 (FRSC) 相の近傍で、異常ホール効果が増強される振る舞いを観測した。このことは $B||b$ 近傍でのみ発達する異方的な磁気揺らぎの存在を示唆している。今後、この磁気揺らぎの性質がどのようなものなのかを微視的測定も含めて解明していくことが重要と考えられる。

6. 最後に

本稿の内容とは直接関連しないが、本研究で用い

た二軸回転機構は東北大金研強磁場センターの全てのマグネットで共同利用装置として使用可能である。特に最近では輸送測定だけでなく、交流磁化率、核磁気共鳴、超音波測定等の幅広い物性測定が二軸回転を用いて行われているので、興味を持っていただいた方はぜひ共同利用実験をご検討いただけると幸いです。

謝辞

今回紹介した実験は、清水悠晴、仲村愛、李徳新、本間佳哉、青木大、杉浦栞理、佐々木孝彦（以上東北大金研）、本多史憲（九大アイソトープセンター）の各先生との共同研究です。深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] S. Ran, C. Eckberg, Q-P. Ding, Y. Furukawa, T. Metz, S. R. Saha, I-L. Liu, M. Zic, H. Kim, J. Paglione, N. P. Butch, *Science*, **365**, (2019) 684.
- [2] D. Aoki, A. Nakamura, F. Honda, D. X. Li, Y. Homma, Y. Shimizu, Y. J. Sato, G. Knebel, J-P. Brison, A. Pourret, D. Braithwaite, G. Lapertot, Q. Niu, M. Vališka, H. Harima, J. Flouquet, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, (2019) 043702.
- [3] G. Nakamine, S. Kitagawa, K. Ishida, Y. Tokunaga, H. Sakai, S. Kambe, A. Nakamura, Y. Shimizu, Y. Homma, D. X. Li, F. Honda, D. Aoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, (2019) 113703.
- [4] S. Ran, I-L. Liu, Y. S. Eo, D. J. Campbell, P. M. Neves, W. T. Fuhrman, S. R. Saha, C. Eckberg, H. Kim, D. Graf, F. Balakirev, J. Singleton, J. Paglione, N. P. Butch, *Nat. Phys.* **15**, (2019) 1250.
- [5] G. Knebel, W. Knafo, A. Pourret, Q. Niu, M. Vališka, D. Braithwaite, G. Lapertot, M. Nardone, A. Zitouni, S. Mishra, I. Sheikin, G. Seyfarth, J-P. Brison, D. Aoki, J. Flouquet, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, (2019) 063707.
- [6] W. Knafo, M. Nardone, M. Vališka, A. Zitouni, G. Lapertot, D. Aoki, G. Knebel, D. Braithwaite, *Communications Physics*, **4**, (2021) 40.
- [7] H. Sakai, Y. Tokiwa, P. Opletal, M. Kimata, S. Awaji, T. Sasaki, D. Aoki, S. Kambe, Y. Tokunaga, Y. Haga, *Phys.*

Rev. Lett. **130**, (2023)196002.

[8] D. Braithwaite, M. Vališka, G. Knebel, G. Lapertot, J.-P. Brison, A. Pourret, M. E. Zhitomirsky, J. Flouquet, F. Honda, D. Aoki, *Communications Physics*, **2**, (2019) 147.

[9] D. Aoki, F. Honda, G. Knebel, D. Braithwaite, A. Nakamura, D. X. Li, Y. Homma, Y. Shimizu, Y. J. Sato, J-P. Brison, J. Flouquet, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, (2020) 053705.

[10] A. Fert and P. M. Levy, *Phy. Rev. B* **36**, 1907 (1987).

極低温理学部の共同利用機器 (MPMS・PPMS) の 保守と利用の要点

極低温科学センター 壁谷 典幸 (kabeya@tohoku.ac.jp)
水上 雄太 (mizukami@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

極低温センターでは液体ヘリウム寒剤の供給業務に加え、基礎的な物性測定を行うことのできる MPMS や PPMS (共に Quantum Design (以下、QD と略す) 社製) を学内向けの共同利用機器として提供しています。青葉山キャンパスの極低温理学部では、昨年度 (令和4年度) まで稼働していた最大磁場 1 T の MPMS2 (Ultra low field オプション付き) に加え、新たに最大磁場 5 T の MPMS-XL と 9 T の PPMS が導入されました。ユーザーの皆様においては、研究を効率よく進める上で是非これらの装置を有効活用していただければ幸いです。ここ数年のヘリウム価格高騰と供給の不安定化を受けて、当大学も含め国内のヘリウムリサイクルシステムでは一層の回収率向上が求められています。当装置はヘリウムリサイクルシステムを維持管理する極低温センターが自ら管理する装置であるため、ヘリウム回収に関するモデル設備としての役割も期待されます。

本技術ノートでは MPMS や PPMS の主に保守に関する様々な工夫を紹介します。本記事で紹介されている、もしくは当設備装置に設置されている部品類を導入したい、または図面を入手したいとお考えの方がいらっしゃいましたら、是非遠慮なく極低温センターまでご連絡ください。また、ユーザー側からの利用に関しては、当該装置の外部制御について紹介させていただきます。この記事内容が、同様の装置を維持管理されている方々や、さらに高度な計測を希望される方々への参考となれば幸いです。

2. MPMS の保守管理の要点

A) 回収率の向上のための工夫

MPMS・PPMS はユーザーが簡便に使用できるようにするための様々な工夫が随所に設けられています。一方で、ヘリウム回収にはあまり重点を置いていない様で、納入された状態では回収率を下げる要因がいくつか見受けられます。ここでは既存の装置を少し改良することで回収率を向上できる工夫をご紹介します。

ヘリウムリサイクルシステムが導入されている施設においては、装置から常時蒸発するヘリウムガスと付属の真空ポンプからの排気ガスを回収ラインに流す配管を整備しているかと思います。それにもかかわらず、MPMS や PPMS のヘリウム回収率は 90%以下になることもあります。その主な原因は、保圧弁周りのリークとトランスファー時のガス損失にあります。ヘリウム損失の大部分はトランスファーの際のヘリウムガス漏出に起因します。一般的なクライオスタットとは異なり、MPMS や PPMS には内部を保圧する弁が取り付けられています。これらの装置のトランスファー時には、①この保圧弁を専用のジグ (トランスファーアッセンブリ) に交換し、②トランスファーチューブを差し込み、③トランスファー後にチューブを抜き、④ジグを外して保圧弁を取り付ける、といった操作を行います。これら四過程全てにおいてヘリウムガスが漏出します。ガスの放出量を正確に見積もることは難しいのですが、類似した状況から推測すると一過程で液体ヘリウム換算 1 L 程度の損失が起きていると考えられます[1]。単純計

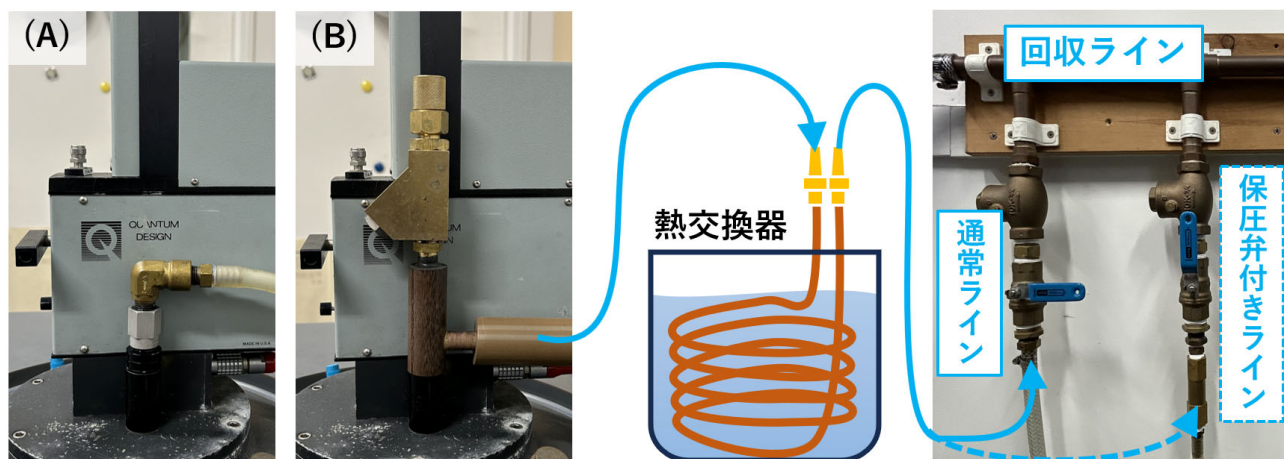


図1 MPMS・PPMSのヘリウムガス回収口。(A) 納入時の保圧弁付きガス回収ポート。(B) 吹き出し防止弁付きのトランスファーアッセンブリを常設した状態。トランスファーアッセンブリを常設する際の回収配管の模式図。(保圧弁付きラインは設置せずとも装置の動作には支障はないとのこと。)

算すると1回のトランスファーで4Lもの損失が起きることになります。1回のトランスファー量は液体換算 30~50 L程度であると考えれば、この損失で回収率は 90%程度まで下がってしまいます。実際にはその半分以下になるとは思いますが、それでも大きな損失です。

この問題への対策としては、以前本誌で紹介した吹き出し防止弁の設置が効果的です[1]。以下に図1(B), 1(C)に極低温理学部での設置事例を紹介します。保圧弁の代わりに常設されたトランスファーアッセンブリには吹き出し防止弁を追加し、低温の回収ガスが通過するホース部分には内径 12mm の耐寒性の真空ホース[2]を用いています。低温ガスにより回収ラインが凍結することを防ぐため、途中になまし銅管をコイル状に巻いた放熱器を蓋つきの水入りバケツに沈めて加温器としてしています[3]。導入時に設置されていた保圧弁は、回収ライン手前に移設してあります[4]。回収ラインは保圧弁のある系統とない系統に分かれており、トランスファーの際にのみ保圧弁のない系統のバルブを開けることで、トランスファー時の効率を上げています。(なお、QD社の技術者によれば、保圧弁の目的は空気の混入を防ぐことであり、MPMS・PPMSの動作に自体には不要であるとのこと。実際に2週間ほど保圧せずにMPMSを使用してみたところ、

特に問題なく動作しました。)この構成にすることで、保圧弁とトランスファーアッセンブリの交換によるヘリウム損失をなくし、損失量を半分程度まで減らすことができると期待されます。さらに、吹き出し防止弁でトランスファーチューブの抜き差しの際の漏出対策を行うことで回収率を向上させることができます[1]。これらの対策によって、当該装置の回収率は 98~99%程度を保持しています。簡易的には、図1(B)のようにトランスファーアッセンブリを常設することで損失を低減できます。

また、気が付きにくいところでは管用ねじの勘合部からのリークにも注意が必要です。しばしば回収ラインの金属部に設けられる管用ねじは、シールが不完全な場合にヘリウムガスがリークします。仮に 1 cm³/sec. のもれがあると、一日で液体ヘリウムにして約 0.1L 相当が漏出し、装置の蒸発量が 10 L/day 程度であれば約 1%の回収率低下を招きます。管用ねじの漏れ対策としては、単に締め付けを強くするよりも、一液型のシーリング材を塗ってから再組み立てをすることが有効です。リークがあるか否かは、極低温センターで貸し出しているハンディタイプのリークディテクターで調べることが可能ですし、簡便にはせっけん液を塗布する方法もあります。配管からの定常リークは軽視してはならず、管

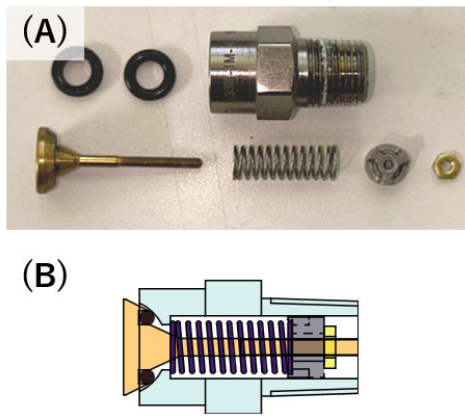


図 2. (A) 分解された 4psi リリーフバルブ。上段左上 2 個の O リングは左が既製品、右が交換品 (AS-568-008)。(B) 内部構造の断面模式図。

用ねじ配管部に対してはリークチェックを十分に行うことが重要です。

B) 試料空間への酸素の混入対策

MPMS の利用時にしばしば問題となるのが試料空間への酸素の混入です [5]。酸素が混入すると 70 K 付近にこぶ状もしくは階段状の信号が現れます。この信号が観測された場合には、酸素を除去するために試料空間を 300 K 程にして 1 時間ほど保持した後に、ブランクプラグを付けてエアロックバルブを開けた状態でパージを繰り返すことが効果的です。

酸素混入の主な経路は、リップシール部分と装置内部のリリーフバルブです。リップシール部分の漏れはユーザーでも対処できます。MPMS 標準の DC モードで使用するリップシールは二重シール構造となっており、その間に常にヘリウムガスが流れることで試料空間への空気の混入を防いでいます。この空間にグリスが詰まることでその機能が失われ、結果として酸素が試料空間に混入することがあります。対策としては、リップシール内部を分解清掃してグリスを取り除くことが効果的ですが [6]、それが難しい場合にはエアダスターなどで詰まったグリスを吹き飛ばすことで状況を改善できます。もちろん、予防措置としてグリスを塗りすぎない様にすることも重要です。

この対策を行っても酸素が度々混入する場合

には、管理者側でリリーフバルブの交換を検討する必要があります。交換用のリリーフバルブはそれなりに高価ですが、道具さえ用意すれば劣化した O リングを交換すること可能です。必要な道具は対辺 4mm のナットドライバ (外径 6.5 mm 以下) と、互換品の O リング (AS568-008) です。交換を検討する際は図 2 の分解写真と内部構造を参考にしてください。

C) インピーダンス閉塞の予防措置

MPMS の管理で発生率の高いトラブルの一つは温度調節の不具合です。特に 4 K 以下の低温が機能しない場合は、高い確率で液体ヘリウムを取り込むインピーダンス部分が閉塞しています [7]。この問題に対する対策として、センターでは液体ヘリウムに含まれる不純物を除去するフィルターの利用 [8] と、装置側からの空気混入経路であるリリーフ弁の移設を行っています。ここでは装置側の問題であるリリーフ弁の対策を説明します。このリリーフ弁は、温度調節空間 (クーリングアニュラス空間) 内の圧力上昇を抑制するために設置されています。4 K 以下から急激に温度を上昇させる操作を行うと、この空間に溜まった液体ヘリウムが蒸発し、一部がこの弁を通して排気されます。その後、リリーフ弁が再度閉じるまでの間に空気が混入し、閉塞の原因となるようです [9]。本来はこの弁の信頼性を高める必要があるのですが、その改造は難しいため、我々はリリーフ弁を移設することで対応しています。図 3 にこの移設の前後の模式図を示します。重要な変更点は、リリーフ弁の排気先を回収ラインに繋ぐことです。この変更により、リリーフ弁からガスが逆流した際においても空気の混入は生じません。この移設のために、MPMS 背面のクイックカップリング配管に別途部品を挿入し、元のリリーフ弁の箇所にはめくらの NPT プラグを設置してあります。表 1 に必要となった部品のリストを記載しました。インピーダンス閉塞に悩まされている場合は、この改造を行うことで改善するかもしれません。

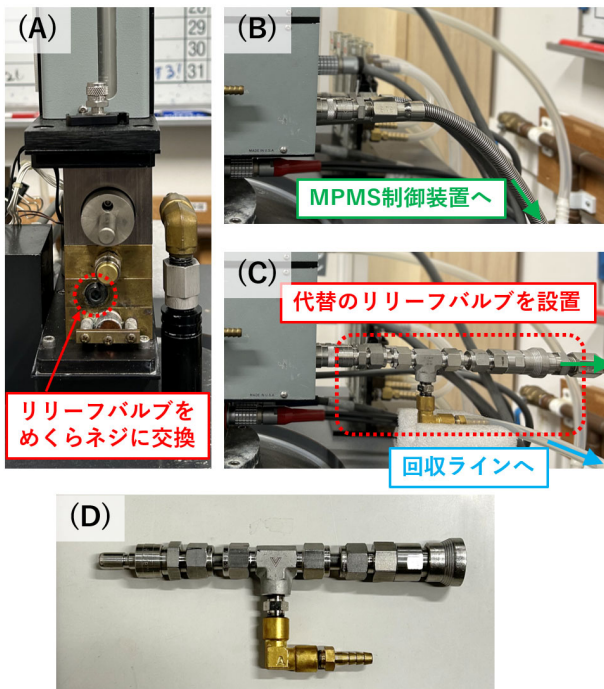


図 3. クーリングアニューラス空間のリリース弁の移設。(A)既設のリリースバルブをめくらネジに交換し、(B) 装置背面のフレキシブル配管の接続部に (C) 代替のリリースバルブを設置。(D) 新たに制作した代替のリリースバルブと分岐配管。(記事末尾の部品表を参照)

D) デュワーの補修

装置が老朽化してくると様々な箇所に問題が生じてきますが、その一つがデュワーのリークです。当センターの装置にもリークが発生し、デュワー交換について問い合わせたところ、QD社にある在庫がなくなったら対応はできなくなるのお話でした。また、交換用のデュワーは当然ながら高額です。今回のケースでは、リークはデュワーの破裂弁の劣化によるものでした。QD社からは修理は不可能と言われましたが、当大学の金属工作室の協力によりなんとか復旧できましたので、その手法をここに記します。今後、デュワー交換の費用捻出が難しい場合や、装置に対応したデュワーが入手できない場合などに参考になれば幸いです。QD社としては推奨しない修理とのことでしたので、その点をご理解いただければと思います。

表 1.リリース弁付き分岐配管図 3 (D) の部品表。

メーカー：[A] アソー、[G] 互省製作所、[S] Swagelok。

品名	規格・型番	個数
クイック継ぎ手 (オス)	SS-QC6-S-600 [S]	1
クイック継ぎ手 (メス)	SS-QC6-B-600 [S]	1
ティーゲージユニオン	VUWTG-9.52A-V [A]	1
チェックバルブ	AT-1011 [A]	1
内ネジエルボ	LF-1011 [A]	1
ホースニップル (7mm)	HN-1107 [A]	1
ステンレス配管	3/8 インチ径、3cm 程度	2
NPT 1/8 プラグ	GD1/8 [G]	1
合計価格 (税込) : 25,000 円程度		

MPMS 用のデュワーには、真空断熱層に破裂弁が設置されており、万一内部が高圧となった場合にも安全に圧力が解放されるように設計されています。しかし、経年劣化によってこの破裂弁自体にリークが生じることがあります。破裂弁部分の写真との構造の模式図を図 4 (A1), 4 (B1) に示します。破裂弁は 0.001 インチ厚の銅箔で構成されているようです。この銅箔部分を交換もしくは補修することは困難だと思われたので、代わりに、銅箔を撤去してデュワーを図 4 (A2), 4 (B2) のように加工し、図 4 (A3), 4 (B3) のように代替の逆止弁を取り付けることにしました。逆止弁の図面を図 4 (C) に示します。弁自体は極めて簡単な構造で、気密性を円筒面の O リングで保ち、内圧が高くなった際には O リングが滑ることで逆止弁自体が外れる構造です。ただし滑り始めの力はグリスの塗り具合などに依存するため (デュワーが破裂する前には外れそうではありますが)、万が一に備えて小型のチェックバルブを追加しています。この逆止弁を取りつけるために、デュワーに溶接されている破裂弁の保護蓋と銅箔周りの接着剤をリユーターで除去する必要がありました。さらに、内面の O リングと密着する部分を滑らかに処理しました。これらの作業は金属工作室に行っていただきました。この改造を施したデュワーを 1 か月程度使用してみましたが、液体ヘリウムの蒸発は修理前よりも緩やかになっており、少なくとも今のところ問題は生じていません。

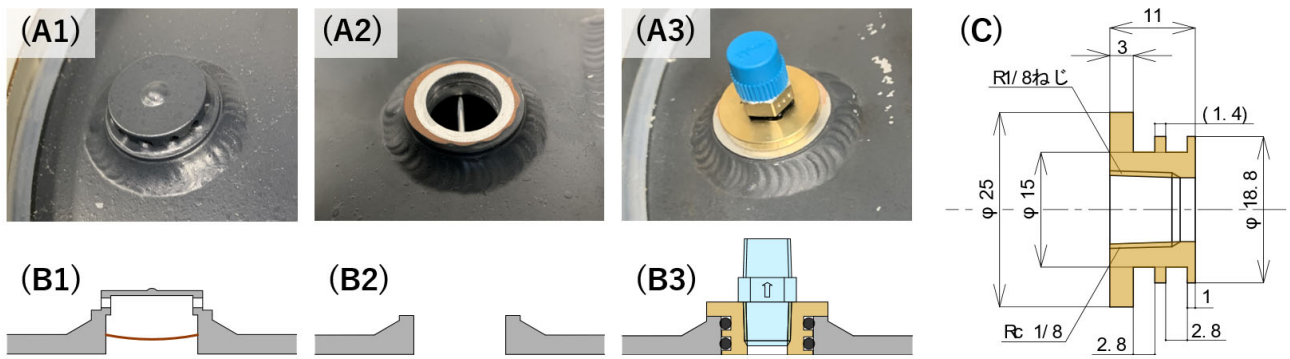


図 4. MPMS・PPMS のデュワーの破裂弁部分の (A1) 通常時、(A2) 弁除去後、(A3) 代替リリース弁設置時の写真と、(B1~3) それぞれに対応した断面の模式図。(C) 代替リリース弁の図面。

E) 制御用パソコン (PC) の交換

機器が古くなってくると、制御用 PC が不安定になり交換の必要に迫られることがあります。QD 社に依頼して新しい PC を購入するのも選択肢の一つではあるが、経費が限られている場合には手持ちの PC を流用することも可能です。制御用ソフトウェアは QD 社に問い合わせることで入手できます。英語版の Windows OS が必要な場合は、対応 OS の日本語版がインストールされた PC (32bit, 64bit のいずれも可) に英語版をインストールして使用することが可能です (日本マイクロソフトに問い合わせ済み)。

3. PPMS の保守管理の要点

A) ヘリウムリーク箇所の補修について

PPMS の利用において、ヘリウム回収率を低下させる要因は、当然 MPMS 利用におけるものと多く共通します。PPMS においてヘリウム回収率を下げる要因は、主にヘリウムトランスファー時のガス漏出と、デュワー本体や配管からのヘリウムガスリークになります。ヘリウムトランスファー時のガス漏出の対策については、MPMS 同様に吹き出し防止弁 [1] を設置していません。PPMS のデュワー本体や配管においてヘリウムガスリークしやすい個所としては、図 5 (A) に示す PPMS 本体トッププレートからリード線が出る出口、および図 5 (B) に示す保圧弁につながるポートの PPMS 本体トッププレートへのねじ込み口 (二か所) になります。後者について

は、ポートのねじ込みが緩くなっていないことやオーリングが劣化していないかを定期的に確認することでリークを防げますので、より対処が難しい前者について書かせて頂きます。前者のリード線出口ですが、当該箇所はリード線が図 5 (A) 中のコの字型の部品を貫通し、この部品と本体トッププレートの間にあるオーリングがつぶされることでヘリウムガスを止める構造になっております。しかしながら、当該オーリングは、コの字型部品上のねじ二つのみによっておさえられており、当然ながら現在のヘリウム回収率の基準では、ヘリウムリークが止められる構造にはなっておりません。当該箇所から出るリード線は、超伝導マグネットやヘリウムレベルメーターに関するものであり、コの字型部品は、PPMS 本体のチャンバーを取り出さない

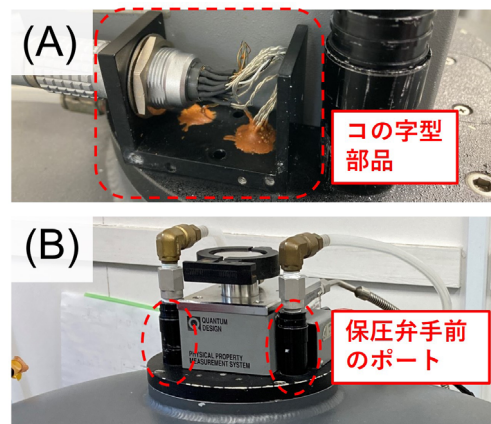


図 5. (A) PPMS 本体トッププレートにおけるリード線の出口とコの字型部品。(B) 保圧弁へつながる PPMS のポート。

と取り外せない構造になっております。従って、当該箇所をユーザーが修理することは上記リード線等の損傷、および装置根幹部分の故障の原因となり、当然のことながら QD 社からは推奨されておりません。その点を十分ご理解頂いた上での対策としては、コの字型部品が止めているオーリングを、太い規格のものに交換すること、また、コの字型部品と本体トッププレートの隙間をシーリング材等で埋めることとなります。当該部分は基本的には外すことが想定されていない部分ですので、シーリング材としてはスタイキャストなど、一度硬化すると除去が難しいもので処置することも可能ですが、センターでは CAF4 というシーリング材を用いております。CAF4 は塗布後数時間で固まりシーリング材として機能しますが、柔らかいため除去が容易です。この二つの対策により、現在はハンディタイプのリークディテクターLD 239 (GL Sciences Inc.)においては、ヘリウムガスリークが検出されない状況となっております。当該箇所においては、この他にもリード線とその被覆の間からリークするといった可能性も指摘されております。センターにおいてはそのようなリークは検出されておりませんが、もしリークが生ずるならば今後その対処法につきましてもご報告させていただきます。

B) 窒素ジャケットの閉塞防止

センターの PPMS は、ヘリウム蒸発率を低減させるための窒素ジャケットを内蔵しております。このオプションは MPMS にもありますが、この種の窒素ジャケットを持つクライオスタットの一般的な問題として、窒素ガス出口の閉塞とそれによる窒素ジャケット内の圧力の上昇が挙げられます。QD 社の PPMS の窒素ジャケットポートには基本的にはリリーフ弁が付帯されておりますが、それでもこのリリーフ弁の周辺に水分が付き、大きな氷の塊が形成されるといったトラブルが度々報告されております。窒素ジャケット内部の圧力を知る手立ては通常はありませんので、ユーザーや管理者としては、大



図 6. 窒素ジャケットの閉塞防止用のゴムチューブ。

変気を遣う点であります。

この対策は、一般的ではありますが、図 6 に示すようにリリーフ弁に適度な長さのゴムチューブを取り付けることで、窒素ガス出口における閉塞を防ぐことができます。ここで、ゴムチューブの他端はクリップ等で塞いでおき、チューブ横に少し切り込みを入れ、簡便な逆止弁として働くようにしておきます。これにより空気混入を防ぎつつ、圧力が上昇した際には窒素ガスを逃がすことができます。

C) 外部機器を用いた測定

PPMS を用いることで、電気抵抗や比熱、熱輸送係数といった様々な物理量を簡便に測定することが可能です。一方、ユーザーとしては測定機器として PPMS 付帯のものではなく、外部の測定機器を用いたいという状況もあるかと思われます。PPMS 付帯の機器では測定できない物理量を測定する場合は当然ですが、例えば PPMS で測定可能な電気抵抗でも、より高精度に測定したいといった状況があるかと思われます。センターの PPMS 付帯の抵抗測定機器である Model 6000 においては、PPMS のマニュアル [10]によると電圧の原理上の測定分解能は最小レンジで 3.81 nV になります。これが、測定機器内部や周辺環境におけるノイズにより 20 nV 程度まで分解能が下がると記載されております。しかし、実際にはこれよりもさらに数倍以上分解

能が下がることが多く、この状況では低抵抗の金属などの低温における電気抵抗測定は困難となる場合があります。

そこで、PPMS において外部の計測機器により測定を行うことができれば、PPMS の優れた温度制御機能を活かしつつ、ユーザーが独自に構築している既存の測定系を用いた実験が可能となります。センターでは、温度や磁場制御は PPMS の制御ソフトウェアである MultiVu で行いつつ、電気抵抗を外部機器により測定することを行っております。まず、試料の電気抵抗の信号を外部機器で読む必要がありますが、PPMS 本体の上部裏側から出るケーブルを新しく外部機器に合うように作り変える必要があります。PPMS 側のケーブルコネクタの型番は FGG.3B.314.CLAZ であり、ケーブルの另一端を外部測定機器に合うように変更することになります。また、PPMS 用の制御 PC とは別にもう一台 PC を用意し、この PC により外部機器制御しつつ、PPMS 用の PC と通信して、MultiVu を介して温度磁場制御やそれらの値の読み取りを行っております。実際、QD 社の方でもそのような利用方法が想定されており、外部通信に QDInstrument_Server.exe と呼ばれるソフトウェアが配布されております。これを PPMS 用の制御 PC で動作させ、外部 PC において LabVIEW 等のソフトウェアを用いて、PPMS 用の制御 PC と通信し、温度や磁場の読み込みや制御を行っております。これにより、様々な測定系の構築が可能となります。

D) ピストンシリンダー圧力セルの利用

PPMS においては、圧力セルを用いた圧力下の物性測定も可能となります。これは既にある程度確立しており、活用されている研究者の方も多い状況かと思われます。センターの方で改めて紹介する必要はないかもしれませんが、今回の機会に備忘録として記載させていただきます。

PPMS の低温試料空間は、上下方向約 11 cm 程度にわたって温度が均一となるように設計されており [10]、さらに高い冷却能力および温度調

整機能を有しております。従って、サイズや熱容量が比較的大きくなる圧力セルを冷却するためには適した環境となります。PPMS の試料空間の内径は 26 mm であり [10]、例えばセンターで用いている内径 24 mm のピストンシリンダーセルであれば、無理なく挿入が可能です。実際に圧力セルを PPMS で利用するにあたっては、圧力セルを装着して試料チャンバーへ挿入可能なインサートを作製する場合や、PPMS の試料パック上部に圧力セルを取り付け、通常の試料パックと同様に Puck-Insertion Tool を用いて PPMS へ挿入する場合があります。センターでは後者の方法を採用しておりますが、図 7 に示すように①ピストンシリンダーセルを装着するためのねじを上部に加工した PPMS 試料パック、②ピストンシリンダーセル下部ナットと試料パックをつなぐアダプター、③ピストンシリンダーセル上部ナットに装着する Puck-Insertion Tool でグリップ可能な溝を持つ部品、を作製する必要があります。配線が下部ナットの底面から出るピストンシリンダーセルの場合は、配線が側面から出るようなスリットを持った下部ナットを新しく作製する必要があります。このような加工は、既に圧力セルを取り扱ういくつかの業

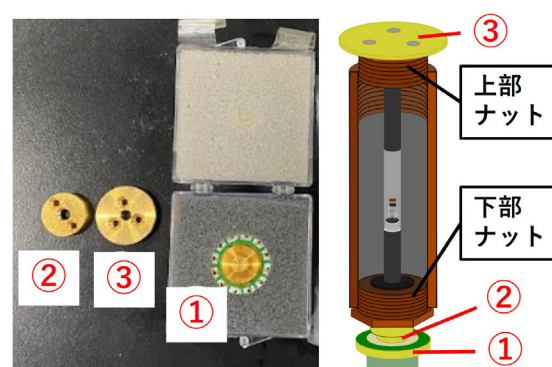


図 7. PPMS で用いるピストンシリンダー圧力セルに必要な部品と組立後の概略図。①ねじを上部に加工した PPMS 試料パック、②ピストンシリンダーセル下部ナットと試料パックをつなぐアダプター、③Puck-Insertion Tool でグリップ可能な溝を持つ部品。

者が実績を持っており、PPMS の試料パックと使用予定の圧力セルの情報を業者に提供し、加工を依頼しております。実際に測定を実施すると、PPMS 内蔵の温度計と、ピストンシリンダーセルに取り付けた温度計とで温度の差がほとんど出でおらず、試料の温度調節が通常の PPMS の利用時と同様に問題なく行えることが確認できております。

4. まとめ

本技術ノートでは、当センターで運用している MPMS・PPMS の保守管理や使用に関する様々な工夫を説明してきました。これらの商用装置は使いやすく便利であり、今後もますます普及していくと思われまます。本記事でご紹介した装置のメンテナンス手法や利用方法が装置管理者やユーザーの皆様のご参考になれば幸いです。

謝辞

インピーダンス閉塞対策の方法は、当センターの木村憲彰氏が行った改良を参考にさせていただきました。また、PPMS における圧力セルの利用について、理学研究科物理学専攻の青山拓也氏から有益なご意見を頂きました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 壁谷 典幸, 東北大学 極低温センターだより No.19 (平成 30 年 11 月) 技術ノート: ヘリウムガス吹き出し防止弁の試作と評価。
- [2] コクゴ社製クラウン真空エコホースを使用。耐寒ホースであれば大丈夫ですが、PVC 材質のブレードホースは低温で割れることがあるため不可。
- [3] なまし銅管 (外径 $\phi 12 \times t1.2\text{mm}$) を 5 m ほどコイル状に巻き、山研工業社製ラウンドペール (容量 16L) に水を入れて沈め、熱交換機として使用。
- [4] 保圧弁の両端は NPT ねじのため、NPT-PT 変換ソケットをつけることで一般的な管用ねじ配管に固定できます。また、同等の保圧能力を持つ PT ねじ付き保圧弁 (CVF02-02A、PISCO) も入手可能。
- [5] Quantum Design, MPMS Application Note 1014-210.
- [6] 分解・組み立ての際には、次の資料を参照して下さい: Quantum Design, MPMS Service Note 1014-602.
- [7] Quantum Design, Service Note 1070-315.
- [8] 野島 勉, 東北大学 極低温センターだより No.14 (平成 25 年 10 月) 技術ノート: 液体ヘリウムへの水素混入とその対策。
- [9] 多くのリリース弁は解放圧力よりも再封止圧力の方が低い、いわゆるヒステリシス的な動作をします。
- [10] Quantum Design, Physical Property Measurement System, Hardware Manual.
- [11] Quantum Design, Application Note 1070-210.

センターからのお知らせ

最近のできごと

1. センター訪問（1）

令和4年10月19日に宮城第一高校の金属材料研究所・多元物質科学研究所合同見学会があり、同校理数科2年生43人が片地区低温科学部の施設見学に訪れました。見学では、物質科学研究における低温の意義を説明した後、ヘリウム液化から回収、貯蔵、再液化までの一連の流れを実際の設備を見せながら紹介しました。更新されたばかりの新しいヘリウム液化システムの部屋は、貯槽が2台となったこともあり、少々手狭ではあったのですが、14-15名のグループで3回に分けて巡回してきたので、比較的ゆったりと見学してもらえました。中二階にある60m³の大きな回収ガスバッグが特に面白かったようで、何人もの生徒さんがはしごを登って間近で観察していました。引率の先生方も興味をもって聞いてくれていました（図1）。



図1 宮城一高見学で、ヘリウム液化システムの説明をしている様子。

2. センター訪問（2）

令和5年9月26日-28日の日程で低温工学・超電導学会東北北海道支部の若手セミナーが仙台で開催され、そのイベントの一つとして、27日に金研



図2 低温工学・超電導学会東北・北海道支部若手セミナー見学の様子。大学院生向けに少し高度な説明をしましたが、熱心に聞いてくれました。

強磁場超伝導研究センター・片平地区極低温科学センターの見学会がありました。東北・北海道地区の工学系大学院生、高専学生を含む約40人が2グループに分かれて見学に来ました。超伝導材料の研究をしている学生さんも多かったのですが、日常液体ヘリウムを使っているもの、それを作る現場は初めて見たようで、彼らにとって新鮮な体験だったようです。熱心な質問も多くありました（図2）。

3. 片平まつり・きんけん一般公開

令和5年10月7日に片平まつり・きんけん一般公開が6年ぶりに開催されました。今回は例年とは趣向を変えて、簡単なデモ実験の体験ブース（小学生向け）と、研究室において少人数で本格的な実験ができる体験コース（中高生向け）という2種類の形式で行われました。センター低温科学部のメンバー（教員・野島研学生）は金研の低温関係の研究室（佐々木研・塚崎研）と合同で、



図3 片平まつり・きんけん一般公開「低温体験ーマイナス200°Cの世界と超伝導ー」ブースでの体験実験の様子。



図4 片平まつり・きんけん一般公開「極低温体験コースー絶対零度へのアプローチと超流動観察ー」において、ガラスデュワーに入った超流動ヘリウムを観察している中高生の様子。ヘリウムトランスファー体験も行いました。

小学生向けに「低温体験ーマイナス200°Cの世界と

超伝導ー」、中高生向けに「極低温体験コースー絶対零度へのアプローチと超流動観察ー」と題する体験企画を実施しました。小学生向けのブースでは、液体窒素を使った酸素の液化や超伝体の磁気浮上のデモ実験を行いました。特に銅酸化物超伝導体を使った超伝導ジェットコースターや磁気浮上列車は来場者の列が絶えないほどの高い人気がありました(図3)。中高生向けには、透明ガラスデュワーを用いて、液体ヘリウムトランスファー体験と超流動の観察を行いました。どちらも中高生にとっては、難しめの内容でしたが、液体ヘリウムがデュワーに溜まり始めた時やポンピングして超流動になった瞬間は歓声があがるくらい盛り上がりました。実際に作業をして結果を眼で見るとというのが効果的だったようです(図4)。

6年ぶりのということもあり、小中高生への対応がはじめての職員、学生が多かったのですが、事前にリハーサルを行うことで、徐々に慣れてきてなんとか上手く進めることができました。特に学生さんにとっては、わかりやすく説明するという点に関して、よい勉強の場にもなったようです。

4. オープンキャンパス

東北大学のオープンキャンパスが、令和5年7月26日および27日に開催されました。オープンキャンパスは、主に高校生を対象として大学での講義や研究内容に実際にふれてもらうために、毎年開催されております。今年度は昨年度に引き続き現地での開催となりました。当日は暑い中、大変多くの方に足を運んで頂きました。青葉山地区の極低温物理学部は「極低温の世界」というテーマで2日間とも参加し、液体窒素を用いて様々なものを冷却するデモンストレーションを行いました(図5)。

5. 出前授業

極低温物理学部の木村憲彰教授が、令和5年7月7日に青森県立五所川原高等学校にて、高校生を対象として「極低温の世界」というテーマで出前授業を行いました。

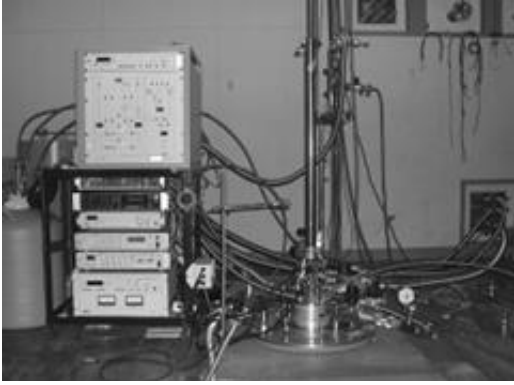



図5 オープンキャンパスでの様子。当日は多くの高校生に、大学院生によるデモンストレーションと解説を楽しんで頂きました。

センターからのお知らせ

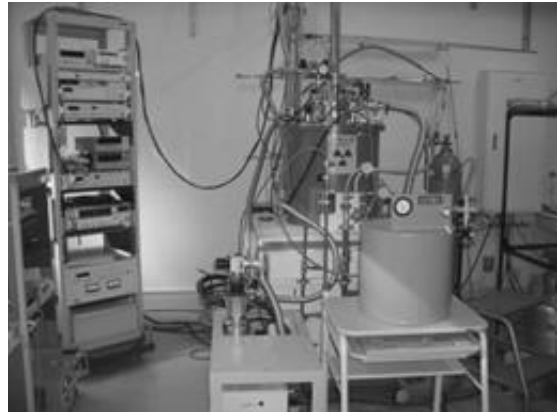
共同研究、共同利用設備一覧

極低温科学センターでは、共同研究、共同利用実験のため、実験室に以下のような装置を提供しております。ここで「共同研究設備」とは本センター職員と共同で行う研究用の実験装置、「共同利用設備」とは基本的に利用者のみで実験を行う装置です。共同利用の装置は共同研究として使用することも可能です。共同研究および共同利用の申込法、マシンタイム、装置の詳しい性能等に関しましては、Web ページ(<http://www.clts.tohoku.ac.jp/equipment.html>)をご覧くださいか、極低温科学センタースタッフ（極低温物理学部（青葉山）：内線 92-6478、低温科学部（片平）：内線 91-2167 または ltcenter-imr@grp.tohoku.ac.jp）にご相談ください。また装置に関係なく低温技術に関する相談にもできる限り応じております。どうぞお気軽に連絡ください。

装置名	場所	分類
トップローディング式希釈冷凍機システム	極低温物理学部	共同研究
装置の説明		
装置仕様 形式：トップローディング方式 試料空間径：24 mm 最低到達温度：20 mK 最高磁場：17 T プローブ：試料回転装置付プローブ 圧力用プローブ 常圧、静水圧、一軸圧下で電気抵抗などの輸送現象、AC 帯磁率、dHvA 効果などの測定が可能です		

装置名	場所	分類
³ He クライオスタットインサート	低温科学部	共同研究
装置の説明		
装置仕様 試料空間口径：25mm φ 最低到達温度：340 mK（ワンショット運転） 530 mK（連続運転） 最低温度到達時間：1.5K より 2 時間 低温科学部にある 9/11T 超伝導マグネット、およびファラデー型超伝導マグネットに挿入可能な自作の ³ He 冷凍機です。トップローディングとバキュームローディングの両方の形式で実験が行えます。現在、磁場中輸送特性とファラデーセルを用いた DC 磁化測定が可能です。		

装置名	場所	分類
トップローディング式 ³ Heクライオスタットシステム	低温科学部	共同研究
装置の説明		
<p>装置仕様</p> <p>Oxford 社 Heliox-TL 形式：トップローディング方式 試料空間径：38 mm 最低到達温度：260 mK 最低温度保持時間：50 h 以上 最高磁場：8 T プローブ：輸送特性測定用プローブ</p> <p>装置をウォームアップすることなく、試料の交換が簡単にでき、かつ数時間で室温から最低温度に達することのできる便利なクライオスタットです。</p>		





装置名	場所	分類
ファラデー型超伝導マグネット	低温科学部	共同研究
装置の説明		
<p>装置仕様</p> <p>a. バックグラウンドマグネット 均一度：0.1%/cm 最大磁場：8T 口径：63.5mm φ</p> <p>b. グラディエントマグネット 最大磁場勾配：+/- 6 T/m リニアリティ：+/- 0.1%/cm DSV</p> <p>1-8T の磁場中で試料空間に一定の磁場勾配を作るマグネットです。³He クライオスタットインサートと組み合わせて磁化と電気抵抗、VTI (1.5-300K) と組み合わせて電気抵抗が測定可能です。</p>		





装置名	場所	分類
温度可変インサート&9/11T 超伝導マグネットシステム	低温科学部	共同研究
装置の説明		
<p>装置仕様</p> <p>a. Cryomagnetics 社製 NbTi マグネット 均一度：0.1%/cm (磁場安定性 1ppm/時間) 最大磁場：9T/11 T (11 T はラムダープレート使用時) 口径：63.5mm φ</p> <p>b. VTI (温度可変型インサート) 試料空間口径：45mm φ 温度可変領域：1.5K-325K (安定度 0.1K)</p> <p>磁場中輸送特性が測定可能です。</p>		




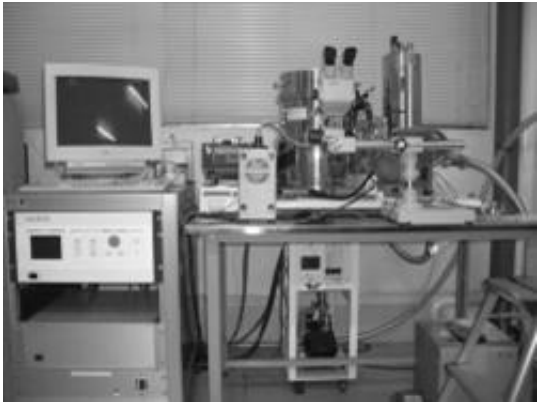
装置名	場所	分類
VSM 磁化測定装置	低温科学部	共同利用
装置の説明		
装置仕様 Oxford 社 MagLab ^{VSM} 最大磁場：14 T 温度範囲：3.8－300 K ノイズレベル： 2×10^{-6} emu(P to P) 分解能： 1×10^{-8} emu 最大 14T までの DC 磁化の温度、磁場依存性が自動測定できます。		

装置名	場所	分類
SQUID 磁化測定装置-1	低温科学部	共同利用
装置の説明		
装置仕様 Quantum Design 社 MPMS ₂ 最大磁場：5.5 T 温度範囲：1.7－350K 分解能： 1×10^{-8} emu 5.5T までの DC 磁化の温度、磁場依存性が自動測定できます。		

装置名	場所	分類
SQUID 磁化測定装置-A	極低温物理学部	共同利用
装置の説明		
装置仕様 Quantum Design 社 MPMS ₂ 最大磁場：1 T 温度範囲：1.8－350K 分解能： 1×10^{-8} emu 1T までの DC 磁化の温度、磁場依存性が自動測定できます。 Ultra-low field オプションを使用して極低磁場 ($\sim 5 \times 10^4$ Oe) を実現可能です。		

装置名	場所	分類
SQUID 磁化測定装置-B	極低温物理学部	共同利用
装置の説明		
装置仕様 Quantum Design 社 MPMS XL 最大磁場：5 T 温度範囲：1.8–350K 分解能： 1×10^{-8} emu 5T までの DC 磁化の温度、磁場依存性が自動測定できます。		

装置名	場所	分類
PPMS 物理特性測定システム-A	極低温物理学部	共同利用
装置の説明		
装置仕様 Quantum Design 社 PPMS 最大磁場：9 T 温度範囲：2.0–350K 分解能： 1×10^{-8} emu 9 T までの DC 電気抵抗の温度、磁場依存性が自動測定できます。		

装置名	場所	分類
走査型 SQUID 顕微鏡	低温科学部	共同利用
装置の説明		
装置仕様 セイコーインスツルメンツ（株）SQM200 温度範囲：2–90 K センサーコイル径：10 μm 空間分解能： $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ 程度 試料表面の磁化（磁気）分布測定が可能です。		


装置名	場所	分類
試料評価用 X線回折装置	低温科学部	共同利用
装置の説明		
<p>装置仕様</p> <p>リガク社 RINT2100PC</p> <p>最大出力：2kW（60 k V、50mA）</p> <p>封入管式ターゲット</p> <p>ゴニオ部：$\theta/2\theta$ 運動、θ、2θ 単独 （範囲：$2\theta = -60 \sim 158^\circ$ 精度：0.002°）</p> <p>アライメント自動調整、</p> <p>自動可変スリット</p> <p>モノクロメータ</p> <p>カウンタ：NaI シンチレータ（700000cps 以上）</p> <p>オプション：薄膜用回転試料台 ラウエカメラ（ポラロイドフィルム）</p> <p>解析：自動ピークサーチ、多重ピーク分離、</p> <p>定性分析（PDF2 カード）</p> <p>結晶系決定、格子定数精密化等</p>		





センターからのお知らせ


貸出機器一覧


極低温科学センターでは、低温実験に必要な各種機器の貸し出しを行っております。各機器の貸し出し条件および詳しい使用方法に関しましては、Web ページ (<http://www.clts.tohoku.ac.jp/equipment.html>) をご覧いただくか、極低温科学センタースタッフ (極低温物理学部 (青葉山) : 内線 92-6478、低温科学部 (片平) : 内線 91-2167 または ltcenter-imr@grp.tohoku.ac.jp) にご相談ください。また装置に関係なく低温技術に関する相談にもできる限り応じております。どうぞお気軽に連絡ください。


装 置 名	貸 出 部 局
リークディテクターA	極低温物理学部 (青葉山)
装 置 の 説 明	
<p>装置仕様</p> <p>PFEIFER 社 Quality Test HLT260 真空およびスニファーモードでの検出可能 最高検知感度：5×10^{-13} Pa m³/s インレットポート圧力：2500Pa 以下 立ち上がり方式：自動 立ち上がり時間：3 分以下 内蔵ポンプ排気性能：補助ポンプ 3.9 m³/h ターボ分子ポンプ 70 l/s 重量：44 kg キャスター付 ディスプレー方式：グラフィック</p>	

装 置 名	貸 出 部 局
リークディテクターB	極低温物理学部 (青葉山)
装 置 の 説 明	
<p>装置仕様</p> <p>OERLIKON LEYBOLD 社 PhoeniXL 300 真空およびスニファーモードでの検出可能 最高検知感度：5×10^{-12} mbar-l/s インレットポート圧力：15 mbar 以下 立ち上がり時間：2 分以下 内蔵ポンプ：ロータリーポンプ 3.2m³/h ターボ分子ポンプ 70 l/s 排気性能：2.5 l/s 以上 (FINE) 0.4 l/s 以上 (GROSS) 重量：40 kg キャスター付</p>	


装置名	貸出部局
リークディテクターC	極低温物理学部（青葉山）
装置の説明	
<p>装置仕様</p> <p>LEYBOLD 社 PHOENIX L300i 真空およびスニファーモードでの検出可能 最高検知感度：5×10^{-12} mbar·l/s インレットポート圧力：15 mbar 以下 立ち上がり時間：2分以下 内蔵ポンプ：ロータリーポンプ 3.2m³/h ターボ分子ポンプ 70 l/s 排気性能：2.5 l/s 以上（FINE） 0.4 l/s 以上（GROSS） 重量：40 kg キャスター付</p>	
	

装置名	貸出部局
リークディテクター1	低温科学部（片平）
装置の説明	
<p>装置仕様</p> <p>LEYBOLD 社 UL200 真空およびスニファーモードでの検出可能 最高検知感度：5×10^{-11} mbar·l/s インレットポート圧力：2 mbar 以下 立ち上がり時間：3分以下 内蔵ポンプ：ロータリーポンプ ターボ分子ポンプ 排気性能：1 l/s 以上（FINE） 0.3 l/s 以上（GROSS） 重量：32 kg キャスター付</p>	
	

装置名	貸出部局
リークディテクター2	低温科学部（片平）
装置の説明	
<p>装置仕様</p> <p>OERLIKON LEYBOLD 社 PhoeniXL 300 真空およびスニファーモードでの検出可能 最高検知感度：5×10^{-12} mbar·l/s インレットポート圧力：15 mbar 以下 立ち上がり時間：2分以下 内蔵ポンプ：ロータリーポンプ 3.2m³/h ターボ分子ポンプ 70 l/s 排気性能：2.5 l/s 以上（FINE） 0.4 l/s 以上（GROSS） 重量：40 kg キャスター付</p>	
	

装置名	貸出部局
リークディテクター(ハンディタイプ)	極低温物理学部 (青葉山)
装置の説明	
<p>配管からのヘリウムガスの漏れ検査に用います。</p> <p>装置仕様 ジーエルサイエンス社 LD239 検出方式：熱伝導度比較測定 感度：0.0005mL/min 電源：充電式、連続動作時間約5時間 充電時間約2.5時間 重さ：約95g</p>	
	

装置名	貸出部局
リークディテクター(ハンディタイプ)	低温科学部 (片平)
装置の説明	
<p>配管からのヘリウムガスの漏れ検査に用います。</p> <p>装置仕様 ジーエルサイエンス社 LD229 検出方式：熱伝導度比較測定 感度：0.01mL/min 電源：充電式、連続動作時間約5時間 充電時間約3時間 重さ：約310g</p>	
	

装置名	貸出部局
各種シールオフバルブ用オペレータ	低温科学部 (片平)
装置の説明	
<p>ヘリウム容器やトランスファーチューブの断熱空間引き口に取り付けられたシールオフバルブのオペレータ（真空中で開閉を行う治具）を各種取り揃えています。</p> <p>仕様 シールオフバルブ側引き口： (1)外径 16 mmφ短管, (2)21 mmφ短管, (3)35 mmφ短管, (4)NW40 フランジ 真空ポンプ側引き口： NW25 フランジ</p>	
	

センターからのお知らせ

2022 年度共同利用成果

<SQUID 磁化測定装置（青葉山）>

- S. Nakamura, N. Kabeya, M. Kobayashi, K. Araki, K. Katoh, and A. Ochiai, “Magnetic phases of the frustrated ferromagnetic spin-trimer system $Gd_3Ru_4Al_{12}$ with a distorted kagome lattice structure”, *Phys. Rev. B* 107, 014422 (2023).
- Y. Choi, J-H. Lee, S. Lee, D. Wulferding, H. Fujihara, F. Sato, Y. Imai, K. Ohgushi, M-J. Seong, and K-Y. Choi, “Magnetic and spin-orbit exciton excitations in the honeycomb lattice compound $RuBr_3$ ”, *Phys. Rev. B* 106, 174430 (2022).
- T. Amano, Y. Kawakami, H. Itoh, K. Konno, Y. Hasegawa, T. Aoyama, Y. Imai, K. Ohgushi, Y. Takeuchi, Y. Wakabayashi, K. Goto, Y. Nakayama, H. Kishida, K. Yonemitsu, and S. Iwai, “Light-induced magnetization driven by interorbital charge motion in the spin-orbit assisted Mott insulator α - $RuCl_3$ ”, *Phys. Rev. Research* 4, L032032 (2022).
- T. Aoyama, M. Kudo, K. Igarashi, K. Emi, S. Kimura, Y. Imai, and K. Ohgushi, “Enhanced anisotropic magnetoresistance in the odd-parity multipole-ordered conductor $Ba_{1-x}K_xMn_2As_2$ ”, *Phys. Rev. B* 105, 224422 (2022).

<SQUID 磁化測定装置（片平）>

- D. X. Li, Y. Shimizu, A. Nakamura, Y. J. Sato, A. Maurya, Y. Homma, F. Honda, and D. Aoki, “Transition from spin glass to paramagnetism in the magnetic properties of $PrAu_2Si_2$ ”, *J. Phys.: Condens. Matter* 34, 195805 (2022).
- D. X. Li, Y. Shimizu, A. Nakamura, Y. J. Sato, Y. Homma, F. Honda, D. Aoki, “Anisotropic spin-glass and magnetic behavior in single-crystalline U_2PtSi_3 ”, *J. Magn. Magn. Mater.* 562, 169820 (2022).
- N. Abe, D. Oka, K. Kaminaga, D. Shiga, D. Saito, T. Yamamoto, N. Kimura, H. Kumigashira, T. Fukumura, “Rocksalt CeO epitaxial thin film as a heavy-fermion system transiting from p-type metal to partially compensated n-type metal by 4f delocalization”, *Phys. Rev. B* 106, 125106 (2022).

- S. Sasaki, D. Oka, K. Kaminaga, D. Saito, T. Yamamoto, N. Abe, H. Shimizu, T. Fukumura, “A high- T_C heavy rare earth monoxide semiconductor TbO with a more than half-filled 4f orbital”, Dalton Trans. 51, 16648-16652 (2022).
- T. Miyakawa, T. Ito, X. Xu, T. Omori, R. Kainuma, “Martensitic transformation near room temperature and hysteresis in (Ni-Co)₅₀-Mn-Sn metamagnetic shape memory alloys”, J. Alloys Compd. 913, 165136 (2022).
- S. Nakamura, N. Kabeya, M. Kobayashi, K. Araki, K. Katoh, and A. Ochiai, “Magnetic phases of the frustrated ferromagnetic spin-trimer system Gd₃Ru₄Al₁₂ with a distorted kagome lattice structure”, Phys. Rev. B 107, 014422 (2023).
DOI: 10.1103/PhysRevB.107.014422

<ベクトル超伝導マグネット>

- J. Shiogai, K. Fujiwara, T. Nojima, and A. Tsukazaki, “A large unidirectional magnetoresistance in Fe-Sn heterostructure devices”, Jpn. J. Appl. Phys 61, 0083001 (2022).
DOI 10.35848/1347-4065/ac7bc8

<X線回折装置>

- Y. Nii, Y. Hirokane, S. Nakamura, N. Kabeya, S. Kimura, Y. Tomioka, T. Nojima, and Y. Onose, “Elastic study of electric quadrupolar correlation in the paramagnetic state of the frustrated quantum magnet Tb_{2+δ}Ti_{2-δ}O₇”, Phys. Rev. B 105, 094414 (2022).

センターからのお知らせ

ヘリウムの利用法と供給報告

1. 液体ヘリウムの申込方法と受取方法

各地区の部局別の申込方法、受取方法を下記表に示します。所属する部局の場所と実際に実験を行う場所が異なる場合、実験を行う場所の申込方法、受取方法に従って下さい。

<青葉山地区>

※予約はなるべく使用予定日の1週間前までをお願いします。小型のクライオスタットを持参して極低温科学センター棟別館(旧理学部低温サブセンター)か工学研究科低温センターで液体ヘリウムを汲み出す場合にはそれぞれの場所へ申し込んで下さい。詳細は極低温科学センターのホームページ <http://www.clts.tohoku.ac.jp/aobayama/>の「受け取りと使用料金」を参照下さい。

部局名	申込方法	受取方法
理学研究科	Web サイトよりログイン http://www.clts.tohoku.ac.jp/aobayama/	各研究棟の決められた場所に極低温科学センターが配達します。又は極低温科学センター棟別館で受け取って下さい。
工学研究科		各研究棟の決められた場所に極低温科学センターが配達します。又は工学研究科低温センターで受け取って下さい。
薬学研究科		各研究棟の決められた場所に極低温科学センターが配達します。
その他の部局		各部局の決められた場所に極低温科学センターが配達します。

<片平地区、星陵地区>

※予約は使用予定日の2日前の16:00までをお願いします。詳細は極低温科学センターのホームページ http://www.clts.tohoku.ac.jp/katahira_seiryou/の「受け取りと使用料金」を参照下さい。

部局名	申込方法	受取方法
金属材料研究所*	Web サイトよりログイン http://www.clts.tohoku.ac.jp/katahira_seiryou/	低温科学部オペレーター室に液体ヘリウム容器を受け取りに来た旨を伝えて受け取ってください。
電気通信研究所		各研究棟の決められた場所に極低温科学センターが配達します。
多元物質科学研究所		各研究棟の決められた場所に極低温科学センターが配達します。
原子分子材料科学 高等研究機構 [AIMR ラボ棟]		低温科学部オペレーター室に液体ヘリウム容器を受け取りに来た旨を伝えて受け取ってください。
原子分子材料科学 高等研究機構 [上記以外]		各研究棟の決められた場所に極低温科学センターが配達します。
その他の部局		各部局の決められた場所に極低温科学センターが配達します。

(* 金研強磁場超伝導材料研究センターで液体ヘリウムを利用する際は、金研受入教員の指示に従って下さい)

2. 供給報告

令和4年度に極低温科学センターが供給した全学の液体ヘリウムの使用量は約17万3千リットルで、昨年度より約1割増加しました（図1、表1参照）。これは一昨年度、低温科学部（片平地区）の液化システムの更新により減った供給量分が、今年度回復したことによると考えられます。

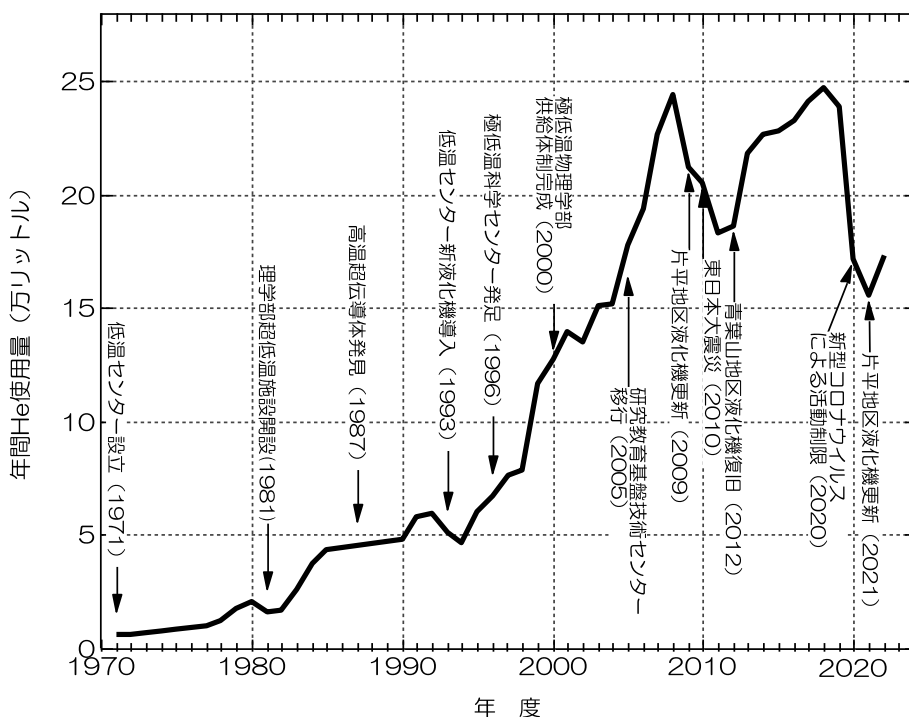


図1. 液体ヘリウムの年間使用量の推移

表1. 最近5年間の液体ヘリウム使用状況

(単位 リットル)

部局名	平成30年	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
理学研究科	51,634	43,129	33,949	43,297	45,677
薬学研究科	812	771	781	768	773
工学研究科	29,032	19,778	7,986	11,022	13,639
金属材料研究所	111,016	107,906	69,968	58,889	72,903
電気通信研究所	785	992	2,519	2,439	916
多元物質科学研究所	21,779	19,932	22,052	12,038	12,391
極低温科学センター	17,367	20,657	10,764	7,219	12,911
学際科学フロンティア研究所	0	0	127	228	195
材料科学高等研究所	12,350	23,045	19,531	16,703	10,309
東北メディカル・メガバンク機構	2,790	2,811	2,863	2,854	3,393
国際集積エレクトロニクスセンター	—	—	1,140	—	265
流体研	—	—	—	—	112
合計	247,564	239,021	171,681	155,457	173,484

3. 使用料金について

- ・使用料金は、ブロック（建物または研究科）ごとの回収率により決定されたヘリウム単価に使用量（使用前と使用後における液体ヘリウム容器内の液量の差）を乗じて算出します。
- ・無回収を前提として供給を受ける場合の液体ヘリウム利用料金は5,445円/リットルですが、昨今の世界情勢により現在ヘリウムの調達が困難となっており、原則無回収を前提とした供給は行わないこととしております。
- ・回収率が100%を超えた場合はこれを100%とみなして計算します。

4. ヘリウム回収状況

学内平均の回収率は令和4年1月～令和4年12月の期間平均94%（片平地区：93%、青葉山地区：95%）でした。また運営委員会で承認された令和4年度における回収率に応じたヘリウム料金の計算式は

$$\text{前期：1リットル当りのヘリウム利用価格(¥) = } 115 + 2635 \times \{100 - \text{回収率}(\%)\} / 100$$

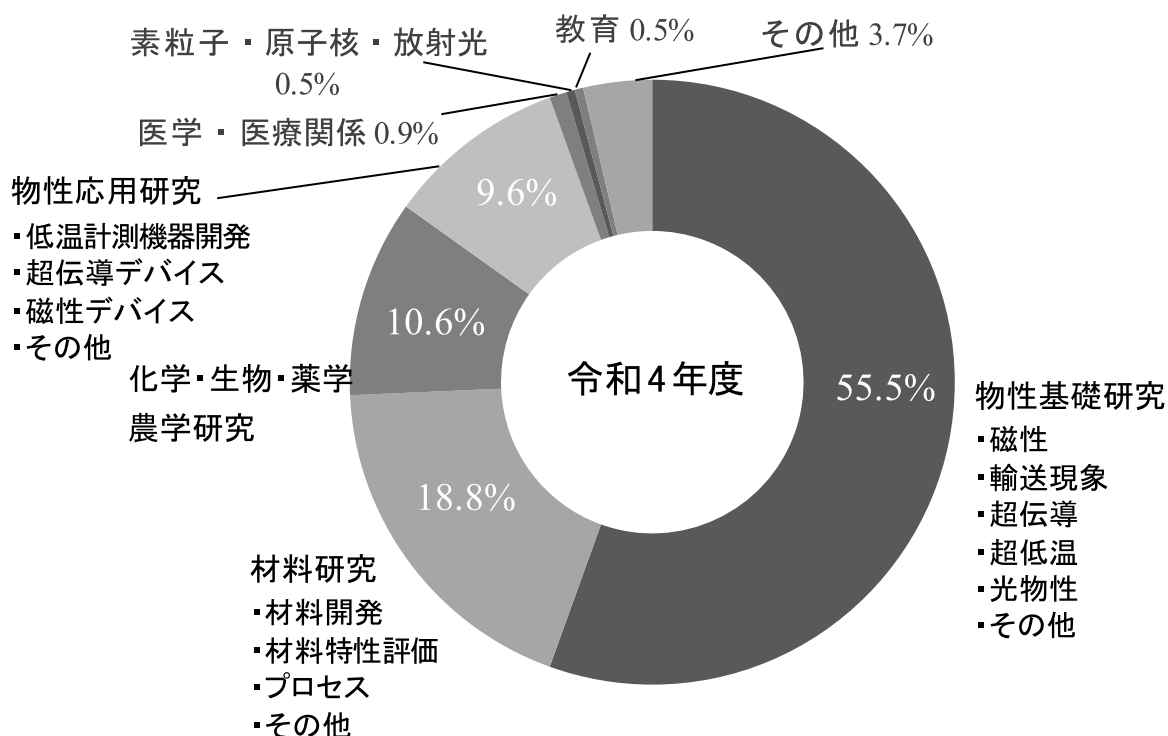
$$\text{後期：1リットル当りのヘリウム利用価格(¥) = } 115 + 3427 \times \{100 - \text{回収率}(\%)\} / 100$$

となり、この方式により計算すると令和4年度前期（後期）の平均価格は320（334）円/リットルとなりました（R3年：269円、R2年：331円、R元年：331円、H30年：261円）。

- ・料金、回収率、支払い方法についての質問は内線92-6478（青葉山地区）、内線91-2167（片平、星陵地区）までご連絡下さい。

液体ヘリウムを利用した研究

令和4年度の液体ヘリウムを利用した研究について、研究テーマ、研究者数、論文数等のアンケート調査させていただきました。液体ヘリウムを利用した研究テーマの分布は下図のように、液体ヘリウムを利用した研究者数とその成果は下表の通りです。

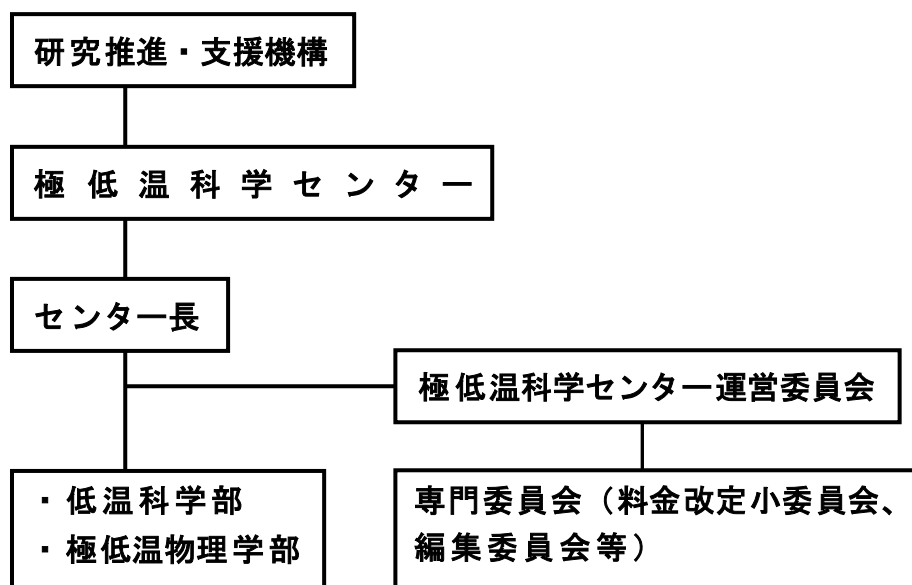


図：液体ヘリウムを利用した研究のテーマ分析

表：液体ヘリウムを利用した研究者数と成果

部 局	教職員数(ポストクを含む)	大学院生数	R4 年度論文
理学研究科	52	93	62
薬学研究科	10	31	9
工学研究科	41	81	29
金属材料研究所	43	49	91
多元物質科学研究所	37	106	12
電気通信研究所	15	19	18
流体科学研究所	3	2	0
材料科学高等研究所	13	18	17
東北メディカル・メガバンク機構	13	1	7
計	227	400	245

センターの組織と運営



極低温科学センター運営委員会

委員長	極低温科学センター長（兼任）	教授	佐々木孝彦
委員	理学研究科	教授	遊佐 剛
	医学系研究科	教授	武田 賢
	薬学研究科	教授	吉戒 直彦
	工学研究科	教授	大兼 幹彦
	農学研究科	教授	山下 まり
	金属材料研究所	教授	塚崎 敦
	流体科学研究所	教授	石本 淳
	電気通信研究所	教授	枝松 圭一
	多元物質科学研究所	教授	佐藤 卓
	極低温科学センター（兼任）	教授	木村 憲彰
	極低温科学センター（兼任）	准教授	野島 勉
	極低温科学センター（兼任）	准教授	水上 雄太