

東 北 大 学

極低温科学センターだより

No. 23



Center for Low Temperature Science
Tohoku University

2022年11月

巻頭言

極低温科学センター長 佐々木孝彦

極低温科学センターは、前身である学内共同利用施設低温センターとして1971年に設立されてから、2021年4月に50年の節目を迎えました。これを記念して昨年に発刊した本センターだより50周年特集号では、諸先輩による貴重な設立時代の思い出やエピソードなどを掲載し好評をいただいています。本センターwebサイトからPDFで閲覧できますのでご一読いただければ幸いです。東北大学金属材料研究所においてコリンズ式液化機の輸入によりヘリウムの液化が日本で初めて行われて以来、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。

全世界的に猛威を振るっているコロナ禍の中で、大学・研究機関での教育・研究のオンライン化・リモート化が予期せぬスピードで進み、テレワークの推奨、実験のリモート化も進められています。しかし、液体ヘリウムを利用した多くの研究は、寒剤の補給を含めて完全リモート化には技術的にまだまだ難しいのが現状です。また、本センターでの液体ヘリウム製造・供給・回収業務もリモート勤務では対応できません。本年度以降もしばらくは予断を許さない状況が続くと思われませんが、研究インフラとしての液体ヘリウム供給が安定的に継続できるように必要な対策を実施して研究支援業務を行ってまいりますので、ご協力よろしくをお願いいたします。

最近の本センターを取り巻く状況・話題をご紹介します。

片平地区では、2021年12月ー2022年3月末にかけてヘリウム液化機の更新を行い、無事完工し、星陵地区への供給も含めて順調に稼働しております。供給停止期間中には利用者の方には大変ご迷惑をおかけいたしました。現在、コロナ禍による物流停滞やロシアによるウクライナ侵攻に対する経済制裁などによりヘリウム資源の世界的な需給ひっ迫・価格高騰ー「ヘリウム危機」ーが現実化しています。できるだけ安定的な供給を維持できるように努めてまいりますので、ユーザーの皆様には、ヘリウムガスの回収率向上にこれまで以上のご協力をお願いいたします。

青葉山新キャンパスでは、2023年度の稼働を目指して次世代放射光施設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について本センター（青葉山地区）からの供給を予定しています。現在、次世代放射光施設への供給に必要なヘリウム回収配管、供給方法についての協議を行っています。また、学外に対しての供給となるため、テクニカルサポート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の開始を予定しています。本学の研究・教育・開発力の強化にも大きく資する、次世代放射光施設の運用にも貢献してまいります。

青葉山地区のヘリウム液化機（東日本大震災時大破、2012年に更新復旧）、片平地区センター建物（1971年築）など更新期を迎える設備・老朽化した施設の改築にも計画的に取り組み円滑な研究支援ができる体制を維持してまいります。本センターの活動に、今後ともご協力・ご支援をよろしくをお願いいたします。

ミリ波観測による初期宇宙探査

大学院理学研究科

天文学専攻 服部 誠 (hattori@astr.tohoku.ac.jp)

東北大学で液体ヘリウムを使用した実験を開始した当初、ヘリウムを入れたクライオスタット運搬中にすれ違った物性実験の先生に「天文が何の為にヘリウムを使うのか？」と素朴な質問な投げかけられたことが今でも強く印象に残っています。本研究ノートはその質問への回答として執筆させて頂くことにしました。詳しい研究内容は、参考文献を当たって頂くこととし、本論はヘリウムを使い出してから過去 20 数年間何をやってきたのかの概説とさせていただきます。

1. ミリ波観測による初期宇宙探査



図 1. スペイン領テネリフェ 島テイデ観測所近辺の夜空。
本多俊介氏撮影。

私の研究室は、2000 年以降、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測により宇宙年齢がまだ 10^{-38} 秒歳程度しか経っていない宇宙創成期の解明 [1,2] を目指した研究に取り組んでいます¹。この時

¹ 以下の URL から私の大学院の講義ノートをダウンロードできます。このことについて詳しく理解したい方はこちらをご参照ください。

“<https://www.astr.tohoku.ac.jp/~hattori/CMBCosmology>”

期の真空の相転移により、それ以前は統一されていた強い力・弱い力・電磁気力から強い力の分離が起きたと考えられています。この真空の相転移に伴い僅か 10^{-36} 秒の間に宇宙の半径が 10^{30} 倍以上となる急膨張が起こります。宇宙創成期にこのような激しい膨張が起きた時期があったとする宇宙進化モデルをインフレーションモデルと呼びます。現代の最先端の観測結果から、宇宙の幾何学がほぼ平坦であることが示されていますが、これはインフレーションモデルの予言通りです。また、インフレーションモデルは、銀河・銀河団・超銀河団などの天体の起源について見事な説明を与えます。インフレーション期の時空の量子揺らぎにより生成された重力波が宇宙背景重力波として現在も宇宙に充滿していることを予言します。宇宙背景重力波は非常に微弱で直接検出が可能になるには恐らく 100 年はかかると思われる。宇宙背景重力波の存在は、CMB に特徴的な偏光シグナルを刻印します。この偏光シグナルの検出による宇宙背景重力波の存在証明によるインフレーションモデルの検証が、私の研究室の最大の目標です。

CMB はビッグバン宇宙の残光で、そのスペクトルは、温度 2.725K の黒体スペクトルと非常に良い精度で一致しています。放射強度のピークは、波長約 2mm・周波数約 150GHz のミリ波域に現れます。高精度の CMB 観測には、大気吸収の影響を極力抑えるため標高が高く乾燥した場所あるいは宇宙空間からの観測が要求されます。図 1 は、私の研究室が開発・観測運用に関わる日西蘭韓共同 CMB 偏光観測実験 GroundBIRD 望遠鏡 [2] を設置するカナリア諸島テネリフェ 島の観測

サイトで作業の合間に日本の若手研究者達を撮影した写真です。シルエットの人物は、右から私の研究室の院生の田中氏、京大院生の末野氏、筑波大助教の本多氏と奥様です。GroundBIRD 実験は、来年度から本格観測を開始します。私の研究室では、主にリモート運用のための環境整備と和蘭宇宙研究所(SRON)と共同で本観測用ミリ波超伝導カメラ(Microwave Kinetic Inductance Detectors [3,4])の開発を行っています。

以下の節では、CMB 偏光観測による初期宇宙探査を目指して私の研究室が極低温センターから液体ヘリウムの供給を受けて、これまで行ってきた研究活動について概説します。

2. ミリ波ボロメトリック天体干渉計の開発

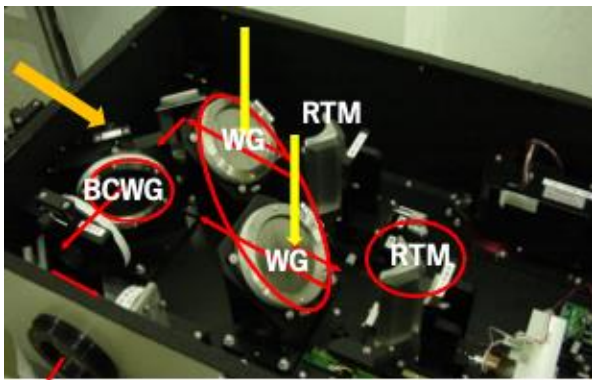


図 2.相互相関型フーリエ分光器。無限遠にある点光源からのビームを黄色の矢印で示した鉛直上方から 2つのワイヤーグリッド(WG)に入射するよう導く。WGによって反射された成分は、ルーフトップミラー(RTM)で反射され再び WGに入射する。偏光方向がフリップするため再入射したビームは、WGを透過し、BCWG と名付けたワイヤーグリッドで合成される。赤丸で囲った RTM を前後に動かすことで合成する二つのビームの光路差に変調をかける。オレンジ色の矢印の方向からビームを入射させることでフーリエ分光器として使用することもできる。

地上からのミリ波観測の大敵は大気存在です。大気の揺らぎを克服して宇宙からのシグナルを拾い出すために、大気放射が変動するより速くシグナルに変調を掛ける手法がとられます。私達は、フーリエ分光器を拡張したミリ波ボロメトリック天体干渉計を開発し、可動鏡の移動によりシグナルに変調を掛けることで大気揺らぎを克服する方針を採用しました[5-7]。通常フーリエ分光器は、自己相関干渉シグナルを測定します。

Wiener-Khinchin の定理に基づいて、取得したシグナルをフーリエ変換することで分光が行えます。ボロメトリック天体干渉計では、相互相関シグナルを測定します。図 2に私たちが作成した相互相関型フーリエ分光器の写真を示しました。二つのワイヤーグリッドに入射するビームの合成することで相互相関干渉シグナルが取得できます。まずフーリエ分光器の場合と同様、光路差についてフーリエ変換し、相互相関シグナルを周波数毎に分解します。得られたデータから Van Cittert Zernike の定理に基づいて、光源の像を合成することができます。光源からのビームが入射する二つのワイヤーグリッドに張られるワイヤーの向きの組み合わせを変えることで4つ全てのストークスパラメーターの天球面上での空間分布を測定することができます。

検出器は、中性子を適量ドーピングした Ge サ-

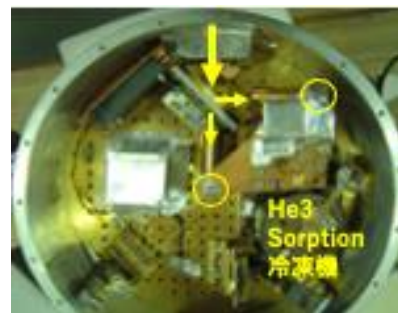


図 3. ボロメータ検出器のクライオスタット内部の写真。

ミスターを用いて私の研究室で開発したミリ波ボロメータを用います。内部の写真を図 3 に示しました。



図 4.左：クライオスタットへのヘリウム注入の様子。右：ガスバックによるヘリウムガス回収の様子。

ボロメータは、 ^3He 吸着型冷凍器を用いて 0.3K 以下に冷却して駆動します。液体ヘリウムをクライオスタットに注入後、減圧して 1.5K まで温度を下げ、 ^3He 冷凍器を駆動します。図 4にサブセンターで液体ヘリウムを注入する様子を示しま

した。ヘリウムの回収率が各研究棟別に計算され課金率が決められる為、注入した場所で回収を行うことが原則です。その為、図4の右の写真のように一立米のガスバックに一旦回収して、サブセンターで回収します。

野辺山電波観測所にこれらの装置を設置して、天体観測への応用実験を行いました。図5にこの時の観測装置の写真を示しました。この装置は、地物の先生のご協力を得て、一時期合同A棟の屋上に設置していました。



図 5. 野辺山電波観測所に設置したミリ波ボロメトリック天体干渉計試験観測施設。

この研究の立ち上げ時、旧科学計測研究所の池澤先生と柴田先生にご指導とご協力を頂きました。図4でヘリウム1000容器から伸びるトランスファーチューブとクライオスタットとの結合に用いるトランスファーチューブは、科計研の工場で作成していただいたもので今も大事に使わせていただいています。

この開発は、実験室[6]および天体観測[7]での実証実験を完了したところで一段落させ、CMB観測への応用は断念し、GroundBIRD実験[2]とSimons Observatory実験[1]に参画して今に至っています。

3. ミリ波吸収源の開発

宇宙背景重力波の存在証明に繋がるCMB偏光シグナルは、非常に微弱な為、検出器への雑音混入を抑制するための様々な工夫が凝らされています。その一つが、望遠鏡の鏡筒などで反射した

光が、検出器へ混入することを防ぐため、望遠鏡内部をミリ波吸収源で覆い尽くすことです。私達は、様々なエポキシ材にカーボンパウダー等様々な物質を色々な割合で混合した物質を3次元プリンターで成形して、優れたミリ波吸収源の開発を行っています[9,10]。図6に京都大学の共同研究者が開発したミリ波吸収源の例を示しました。ミリ波吸収源の設計の最適化には、用いる物質の光学定数(屈折率・吸収率)を知る必要があります。特に使用環境である1Kでの光学定数測定が重要です。その測定が私の研究室の担当です。



図 6. 左: Moth-eye 構造を参考にして 3D プリンターで成形したミリ波吸収源[9,10]。右: 蛾の目の顕微鏡画像。光を反射して目がキラッと目撃動物に発見されないよう広帯域の光に対して反射率を抑制する理想的反射防止構造になっている[8]。

現在、試料の液体ヘリウム温度以下での光学定数測定を実現するため試料用クライオスタットの立ち上げ準備を進めています。これまでは、試料を液体窒素に浸す事で、液体窒素温度での光学定数測定が限界でした。図7に試料用クライオスタットを用いた試料の液体ヘリウム温度での光学定数測定の風景を示しました。この測定では、節2で紹介した相互相関型フーリエ分光器を自己相関型フーリエ分光器として使用し、節2で紹介したボロメータを検出器として用います。

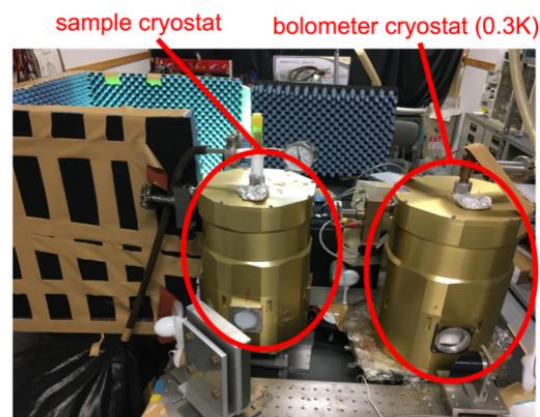


図 7. 試料のミリ波光学定数測定の様子。

現在、異常に速い試料クライオスタットのヘリウムの蒸発速度を抑えるために、クライオスタットの解体・改修・ヘリウム注入実験を繰り返し、一刻も早い1Kに少しでも近い温度での試料の光学定数測定実現を目指して悪戦苦闘しています。

4. フーリエ分光器を応用した垂直入射光に対するミリ波反射率測定系の開発

成形後のミリ波吸収源の性能を知る直接的方法の一つは、使用する温度1Kでの反射率を測定することです。特にシミュレーションとの比較が容易な、垂直入射光に対する反射率測定が重要です。私の実験室で手持ちの装置を有効に活かして、この測定を実現するためフーリエ分光器を応用した垂直入射光に対する反射率測定系の構築に着手しました。図8にこの測定系のポンチ絵を示しました。肝になる光学素子は、偏光無依存で波長に依らず透過と反射に半々に分割できる理想的半透鏡です。

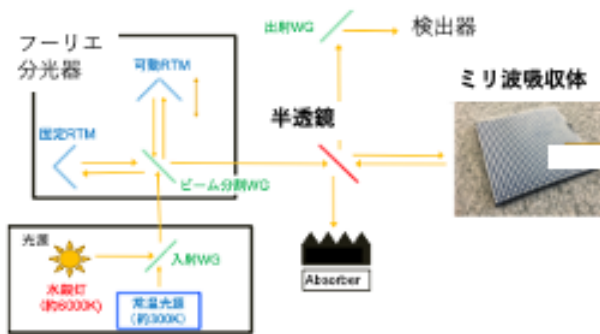
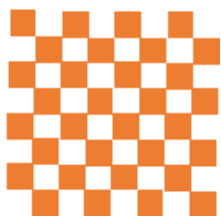


図 8. フーリエ分光器を応用した反射率測定計概念図。

昨年から高度教養教育・学生支援機構の富田知志先生と多元物質科学研究所の菊池伸明先生にご指導・ご協力頂き、自己補追膜を応用した理想的半透鏡の開発に着手しています。図9に自己補追デザインの例を示しました。赤色の部分は、鏡で白抜き部分は空洞です。Babinetの原理によりこのデザインで作られた膜は、波長に依存せず反



射と透過が半々になることが期待されます。ミリ波に対する実際の応用例が、既に発表されています[11]。

図 9. 自己補追膜の例。

5. 星間塵からの熱放射モデル構築

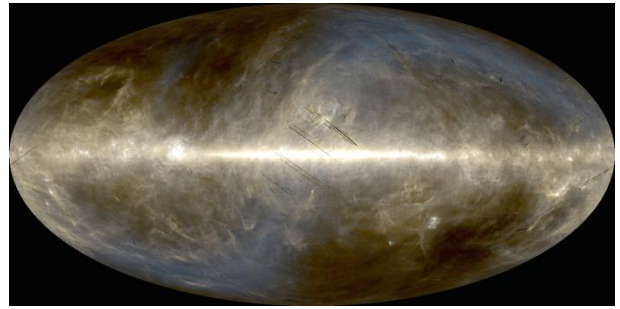


図 10. 「あかり」遠赤外線全天地図。JAXA 提供。

2014年に南極点でCMB偏光観測を行う米国のチームが宇宙背景重力波起源のCMB偏光シグナルを検出したという論文を発表しました[12]。ヤラレタ！と意気消沈したのですが、その後彼らが検出したシグナルが、銀河系内の星間塵からの熱放射であることが判明しました。現在も目指すシグナルは未検出のままで、私たちにも世界初検出のチャンスが残されています。図10に2006年に打ち上げられ、遠赤外線域(波長100ミクロン近辺)で全天探査を行った日本の赤外線観測衛星「あかり」が取得したデータから得られた遠赤外線全天地図を示しました[13]。青白い成分は、太陽系内の塵からの熱放射です。残りの赤みがかった成分は、その殆どが銀河系内の温度約20Kの星間塵からの熱放射成分です。画像中央に帯状に分布する放射強度の強い場所は、銀河系の円盤部分に該当します。この結果は、銀河系の星間塵が円盤状に分布していることを示しています。冒頭の図1の写真では、天の川の中央部が暗くなっています。これは、大量の星間塵によって星からの光が遮られているためです。星間塵の円盤の厚みが星が形作る円盤の厚みより薄いため天の川の中央が暗く、周囲は明るく見えています。図10を見ると星間塵からの熱放射線が無い天域が存在せず、空の至る方向も星間塵に覆われているこ

² BICEP2による原始重力波起源のCMB偏光シグナル検出発表時、私はハーバードに滞在していました。その時行われたセレモニーの様子を取材しまとめた漫画が以下のURLからダウンロードできます。
“https://www.astr.tohoku.ac.jp/~hken/us.tohoku.abc/newsletter/BCNewsLetters_extra.pdf”

とが分かります。「あかり」遠赤外線全天探査は、打ち上げから搭載した液体ヘリウムが枯れるまでの1年半の間、行われました。

私のグループは、JAXA と東大の研究者と協力して得られたデータを処理して、遠赤外線全天地図を作成するプロジェクトに参画しました。私の目的は、CMB 観測にとって邪魔者の星間塵からの熱放射線をCMB観測データから精度良く差し引くことです。プロジェクトは2007年夏に立ち上がり、2014年12月全天地図第一版を完成し全世界に公開しました。私のグループは、「あかり」の装置開発や観測の実施には全く関わっていませんが、遠赤外線全天地図作成には大きな寄与を果たしました。

CMB 観測データから CMB 成分を正しく引き出すことを目的に着手した星間塵の研究ですが、最近はその物性の研究に興味を持って研究に取り組んでいます[14]。実験室で模擬的に星間塵を作成して、20K以下に冷却した時のそのミリ波光学定数を測定できないかと考えています。

6. まとめ

以上、今日まで20数年間天文(私)が何の為に液体ヘリウムを使ってどんな研究を行ってきたのか、を概説させていただきました。詳しい解説は、端折って参考文献をあたってくださという姿勢で記述しました。そのため、突っ込んで理解したいと思われた方にはフラストレーションが溜まる内容になっていると思います。ご質問を持たれた方や研究内容に興味持たれた方は、下記担当者までお問合せください。

服部 誠 :

内線 6509, hattori@astr.tohoku.ac.jp

謝辞

野辺山での観測では、液体ヘリウム4000を自分で購入し、自分達でクライオスタットに注入していました。購入量の半分程度は、無駄に蒸発させていました。一方、東北大では、技官の方に注入をお任せできます。さらに使用料も使った分

だけリッター400円程度という破格の価格です。天国のような研究環境を提供して頂いている極低温センター様には、心より感謝しています。研究開発と一緒に取り組んでくれた共同研究者・学生の方々に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Simons Observatory Collaboration, *J. Cos. Astropart. Phys.* **02** (2019) id.056.
- [2] S. Oguri *et al*, *J. Low. Temp. Phys.* **184**, (2016) 786.
- [3] J. Zmuidzinas, *Ann. Rev. Cond. Matt. Phys.* **3** (2012) 169.
- [4] H. Kutsuma *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **115** (2019) 032603.
- [5] I. S. Ohta, M. Hattori and H. Matsuo, *Appl. Opt.* **45** (2006) 2576.
- [6] I. S. Ohta, M. Hattori and H. Matsuo, *Appl. Opt.* **46** (2006) 2881.
- [7] I. S. Ohta *et al*, *IRMMW-THz* **32** (2007) 4516522.
- [8] P. B. Clapham, and M. C. Hutley, *Nature* **244** (1973) 281.
- [9] S. Adachi *et al*, *Rev. Sci. Instr.* **91** (2020) 016103.
- [10] T. Otsuka *et al*, *Appl. Opt.* **60** (2021) 7678.
- [11] Y. Urade *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, (2015) 237401.
- [12] BICEP2 Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) id. 241101.
- [13] Y. Doi *et al*, *Pub. Astron. Soc. Jap.* **67** (2015) id. 5022.
- [14] M. Nashimoto, M. Hattori, F. Poidevin, and R. Genova-Santos, *Astrophys. J. Lett.* **900** (2020) L40.

GaN FET における量子ドット形成

材料科学高等研究所、電気通信研究所 大塚 朋廣
(tomohiro.otsuka@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

半導体量子ドットは電子を微細な領域に閉じ込めるデバイスである。半導体微細加工技術を活用してデバイスを作製し、微小電極による電界印加やエッチングにより、電子を閉じ込めるためのポテンシャルを形成する。その内部では単電子帯電効果やサイズ量子化が生じ、量子準位が形成され、またその状態を電極に印加する電圧等で制御できる。さらにその状態を電気伝導等を通して調べることができるため、人工的に制御、観測が可能な量子状態として活用できる[1]。この特性を生かして、人工的に制御された量子系の実験[2]や、量子情報処理に向けた量子ビットの候補として研究が進められている[3]。

量子ドットの形成には、微小電極やエッチングによる微細構造の形成だけではなく、材料中に内在する不純物や欠陥等を利用する方法もある。例えば SiFET では、不純物が作り出す閉じ込めポテンシャルによって量子ドットが形成されることが報告されている[4]。不純物自体が量子ドットとして機能し、不純物による強い閉じ込めポテンシャルのおかげでエネルギースケールの大きな量子準位が形成され、より高温で動作する半導体量子ビット等への活用も期待されている[5]。

本研究では、このような不純物や欠陥由来の量子ドット形成について、GaN を用いて調べた。GaN およびそのヘテロ構造は、大きな直接遷移型のバンドギャップ、高い電子密度、良好な電子移動度を持つ魅力的な材料である。このため、LED やパワーデバイス、高周波デバイス用途で活用されている[6]。特に電子デバイス応用においては、GaN/AlGaN のヘテロ構造が重要であり、高密度、高移動度な二次元電子ガスがその界面に形成され

る[7]。私たちはこの GaN/AlGaN FET における電気伝導測定を極低温環境下で行い、FET のピンチオフ近傍で量子ドット形成を示す電気伝導特性を観測した。またクーロンダイヤモンドの解析から、不純物誘起のポテンシャル変調に起因すると思われる多重量子ドットの形成を確認し、その絶縁膜依存性を調べた[8]。

2. 実験方法

測定デバイスは GaN/AlGaN のヘテロ構造を用いて作製した (図 1(a))。GaN と AlGaN を Si 基板の上に化学気相成長により成膜し、GaN と AlGaN の界面に二次元電子ガスが形成される。典型的な電子濃度は $6.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、移動度は $1700 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ となっている。この基板に対して Ti と Al の蒸着によりソースドレイン電極を作製し、さらにゲート電極を SiN と SiO₂ の絶縁膜を介して TiN により作製した。特に伝導チャンネル近傍の絶縁層となる SiN は GaN/AlGaN の成膜後に同じチャンバー

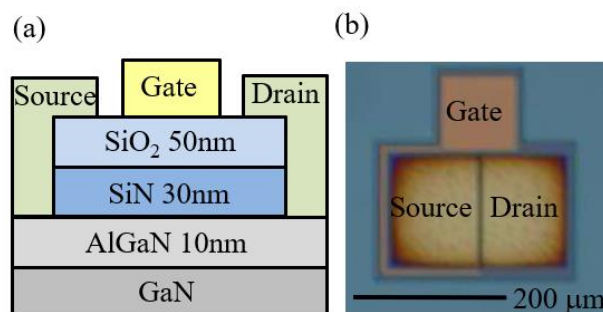


図 1 (a) GaN/AlGaN FET デバイスの断面図。GaN と AlGaN の界面に二次元電子ガスが形成される。(b) デバイス平面構造の光学顕微鏡写真。ソースドレイン電極の間にゲート幅 $1.4 \mu\text{m}$ のゲート電極が形成されている。

内で成膜し、不純物や欠陥の混入を最小化している。デバイスの平面構造は図 1(b)のようになっており、ゲート電極がソースドレイン電極の間に形成されている。ゲート幅は $1.4 \mu\text{m}$ 、ゲート長は $150 \mu\text{m}$ とした。

この GaN/AlGaIn FET デバイスの電気伝導特性について、ソースドレイン電流をソースドレイン電圧とゲート電圧の関数として測定した。低温での測定は希釈冷凍機を用いて 50 mK の極低温で行った。

3. 結果と考察

50 mK での GaN/AlGaIn FET デバイスのソースドレイン電流の測定結果を図 2(a)に示す。ゲート電圧がマイナスに小さい領域では伝導チャンネルが開き、ソースドレイン電圧の印加とともに電流が流れていることが分かる。一方、ゲート電圧をマイナスに大きくしていくと、伝導チャンネルが空乏化して電流が流れなくなる。このことから極低温環境下でも二次元電子ガスが形成され、GaN/AlGaIn FET が動作していることが分かる。またピンチオフ電圧については、室温の値と比べるとプラス側にシフトしており、これは低温による熱誘起キャリアの減少に伴うものと考えられる。なお、この測定セットアップでは、低温用のフィルタ回路の形成のため、デバイスと直列に $2 \text{ k}\Omega$ が挿入されており、これが FET が ON の際の伝導チャンネルの電流を制限している。

次にこの FET デバイスのピンチオフ近傍の電気伝導についてより詳細を調べた。図 2(b)にピンチオフ近傍での測定結果を示す。測定されたソースドレイン電流を数値微分して、伝導度としてプロットしている。これをみるとゼロバイアスの近傍でソースドレイン電流がブロックされており、またこのブロックされているソースドレイン電圧領域の幅が、ゲート電圧により変調されていることが分かる。これは量子ドットに特徴的なクーロンダイヤモンドと呼ばれる構造である。クーロンダイヤモンドの幅はゲート電圧がマイナスに大きくなるほど大きくなっており、電圧の印加とともに

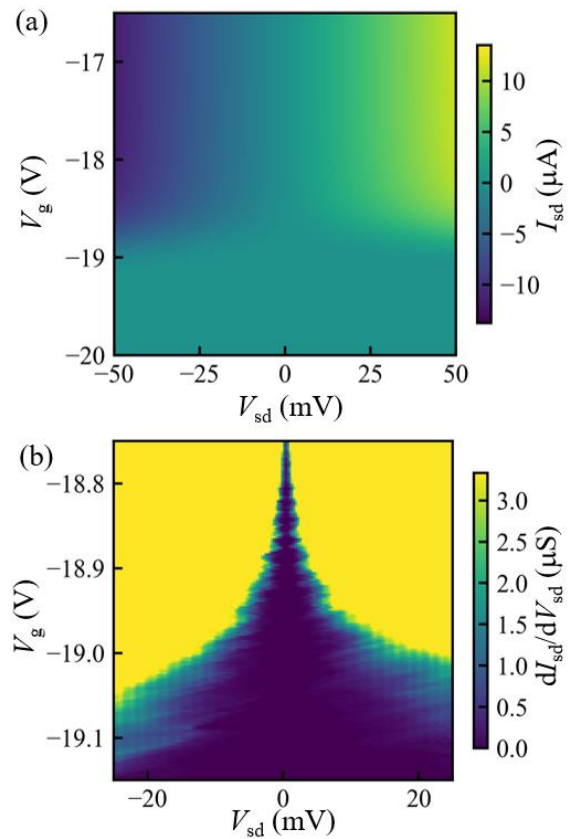


図 2 (a) 50 mK で観測された GaN/AlGaIn FET の電気伝導特性。ソースドレイン電流をソースドレイン電圧とゲート電圧の関数として示している。(b) FET のピンチオフの近傍で観測された電気伝導度。非線形な電流電圧特性、およびクーロンダイヤモンドを見ることができる[8]。

に量子ドットサイズが小さくなり、帯電エネルギーが大きくなることを反映している。

クーロンダイヤモンドが観測される領域をさらに拡大したものを図 3 に示す。クーロン閉塞となる状況においては、伝導度が 0.1 nS 以下 (今回の測定セットアップの測定限界) になっている。またクーロンダイヤモンドの外側の領域においては、量子ドット中の励起状態の電気伝導に起因する伝導度の変化 (励起線) とと思われる構造も観測されている。これらの結果から、GaN/AlGaIn FET の伝導チャンネルの中に、量子ドットが形成されていることが分かる。

また観測されたクーロンダイヤモンド構造はゼロバイアス付近で完全には閉じきっていない。これは複数の量子ドットが直列結合し、複数のクー

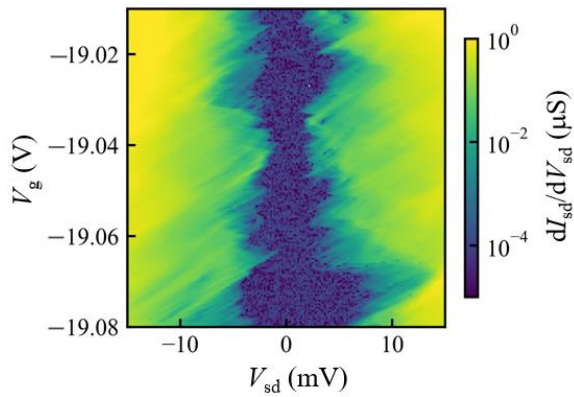


図3 クーロンダイヤモンドが観測される領域を拡大したもの。複数のクーロンダイヤモンドが観測されている。ゼロバイアス付近でクーロンダイヤモンドが完全には閉じきらず、複数の量子ドットの形成が示されている[8]。

ロンダイヤモンドが重なっている状況であることを示している。さらに観測された励起線の多くは、一方向の傾き（左下から右上方向）をもつものが強調されており、このことは量子ドットとソースドレイン電極の間のトンネル結合のうち、一方の結合のみが強くなっている非対称な状況であることを示している。

量子ドット形成のメカニズムについて、今回のGaN/AlGaNFETデバイスでは、量子ドットを意図的に形成するためにデザインされた微小電極等はなく、伝導チャンネル近傍の不純物や欠陥に起因する静電ポテンシャル変動が量子ドット形成の原因となっていると考えられる。二次元電子ガスの空乏化条件近傍では、部分的に伝導チャンネルが残り、ポテンシャル変動の極小周辺に電子が閉じ込められる。これに伴い単電子帯電効果やサイズ量子化が生じて量子ドットが形成され、クーロンダイヤモンド構造や励起線が観測されたと考えられる。

このようなポテンシャル変動により形成される多重量子ドットモデルの模式図を図4(a)に示す。この模式図では、FETのピンチオフ近傍でポテンシャル変動の底に電子がトラップされることにより、三重や四重に直列結合した量子ドットが形成

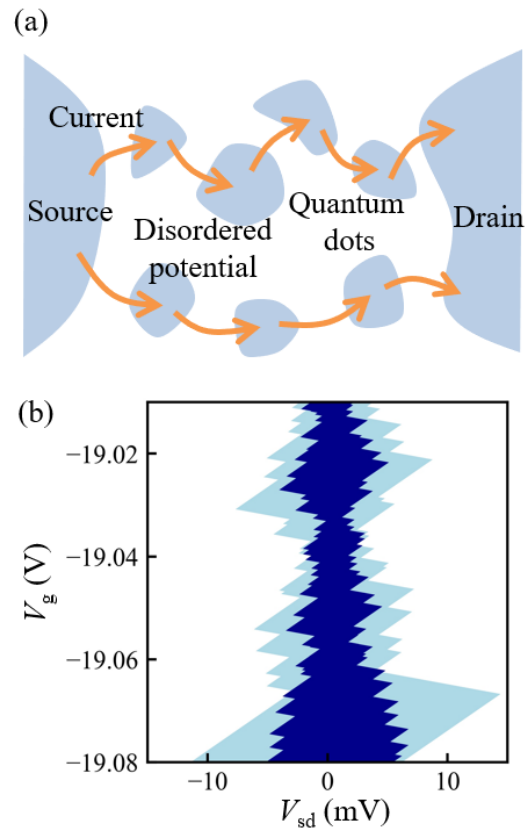


図4 (a) 不純物や欠陥に起因する静電ポテンシャル変動により形成される多重量子ドットモデルの模式図。(b)(a)の多重量子ドットモデルにおいて期待されるクーロン閉塞領域。薄い色の領域が電流が一部抑制される領域、濃い色の領域が完全に抑制される領域を示している。

され、さらにこれらが並列に結合したモデルとなっている。この結果、それぞれの量子ドットによるクーロンダイヤモンドが重なったものが全体の電気伝導測定で観測されることになる。単電子帯電エネルギーや軌道エネルギーを仮定してクーロンダイヤモンドを重ねてみると、図4(b)のようになる。薄い色で示された領域が、三重量子ドットにより部分的にブロックされる領域、濃い色で示された領域が三重量子ドットと四重量子ドットで完全にブロックされる部分である。このモデルは図3の実験結果の主要な特徴を再現していることが分かる。

さらに伝導チャンネル近傍の不純物や欠陥による量子ドット形成メカニズムを調べるために、不純物や欠陥の状況の異なるゲート絶縁膜を用いた

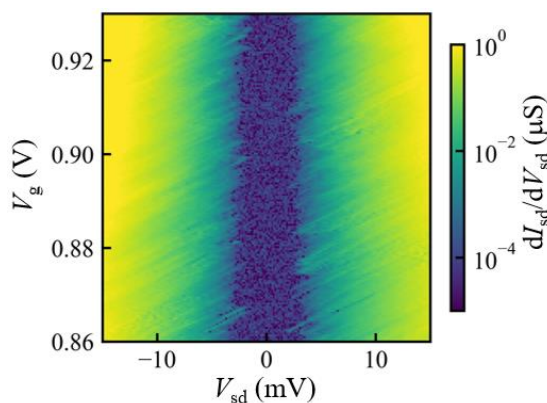


図5 SiN/SiO₂絶縁膜成膜条件の異なるデバイスで観測された電気伝導特性。より多数のクーロンダイヤモンドが重なることにより、ゼロバイアス付近に比較的一様なギャップが開いている[8]。

試料の測定を行った。ここで紹介する比較用のデバイスでは、絶縁膜となる SiN/SiO₂ の成膜を、GaN/AlGa_N の成膜後にチャンバーから一度取り出し、さらにエッチングのプロセスの後に実施した。これにより同一チャンバー中で連続して成膜した先のデバイスに比べて、この比較デバイスでは酸化や分子吸着のために不純物や欠陥の濃度が増えることになる。図5にこの比較デバイスで測定された測定結果を示す。より多数のクーロンダイヤモンドが重なることにより、ゼロバイアス付近に比較的一様なギャップが開いている。これはより多くの量子ドットが形成され、直列に結合していることを示している。この結果は、量子ドット形成の原因が、不純物や欠陥によるポテンシャル変動によるものであることを支持するものである。

5. まとめ

私たちは GaN/AlGa_N FET における電気伝導特性を極低温で測定し、量子ドットの形成を観測した。量子ドットは FET の伝導チャンネルのピンチオフ近傍で観測され、複数の量子ドットが結合した多重量子ドットの伝導特性が観測された。この形成メカニズムは不純物や欠陥によるポテンシャル変動によるものであると考えられる。またこの

量子ドット形成の絶縁膜依存性についても調べた。これらの結果は、量子ドットを利用した量子ビットや量子センサといった新しいデバイスへの応用が考えられるとともに、GaN/AlGa_N FET の特性改良に向けたマイクロな不純物や欠陥評価にも活用できる可能性がある。

謝辞

ここで紹介した内容は、阿部峰也、北田孝仁、伊藤範和（ローム株式会社）、田中岳利（ローム株式会社）、中原健（ローム株式会社）各氏との共同研究による成果である。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Tarucha, D. G. Austing, T. Honda, R. J. van der Hage, and L. P. Kouwenhoven, *Phys. Rev. Lett.* 77, 3613 (1996) 等
- [2] D. Goldhaber-Gordon, H. Shtrikman, D. Mahalu, D. Abusch-Magder, U. Meirav, and M. A. Kastner, *Nature* 391, 156 (1998) 等
- [3] J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, T. Kodera, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, and S. Tarucha, *Nature Nanotechnol.* 13, 102 (2018) 等
- [4] H. Sellier, G. P. Lansbergen, J. Caro, S. Rogge, N. Collaert, I. Ferain, M. Jurczak, and S. Biesemans, *Phys. Rev. Lett.* 97, 206805 (2006) 等
- [5] K. Ono, T. Mori, and S. Moriyama, *Sci Rep* 9, 469 (2019) 等
- [6] I. Akasaki and H. Amano, *J. Electrochem. Soc.* 141, 2266 (1994) 等
- [7] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger, and J. Hilsenbeck, *J. Appl. Phys.* 85, 3222 (1999) 等
- [8] T. Otsuka, T. Abe, T. Kitada, N. Ito, T. Tanaka, and K. Nakahara, *Sci. Rep.* 10, 15421 (2020)

ヘリウムトランスファー用加圧装置の製作

極低温科学センター

木村憲彰 (kimura@mail.clts.tohoku.ac.jp)

壁谷典幸 (kabeya@tohoku.ac.jp)

1. はじめに

ここ数年ヘリウムの供給が不安定な状態が続いており、今年度(2022年度)に入ってからヘリウムガスの購入ができないという事態にまで発展している。これは外因的な事情によるもので、ユーザーである我々にはいかんともしがたいものがある。一方で、研究を継続するにはヘリウムガスの消費を極力少なくするしかなく、いろいろと工夫をする必要がある。とりわけ、液体ヘリウムをクライオスタットに移送(トランスファー)する際にヘリウムガスボンベから加圧を行っているユーザーの中には、代替の方法を模索されている方も多いのではないだろうか?しかたなしにバルーンを使って加圧している方もいらっしゃるかとは思いますが、破裂の危険があったり、膨らみすぎたバルーンを絞るのに結構な力が必要だったり、これはこれでなかなか骨が折れる作業である。そこで本稿では、我々が数年前から導入しているコンプレッサー(ポンプ)による加圧方法について紹介したいと思う。おそらくこういっ

た装置は低温実験を日常的に行っている研究室ではすでに導入済みかと思う。実際、この企画の話が出てきたときに、金研の佐々木グループからも、同様な方法で加圧を行っているとお話をいただいた。さらには野島グループでは加圧が楽なバルーン(ガスバッグ)を使っているそうなので、ヘリウムガスボンベが入手できずにヘリウムのトランスファーに苦慮されている方々の参考になればと思い、併せて紹介する次第である。

2. コンプレッサー(ポンプ)を使った加圧

さて、もともとのアイデアは、トランスファー時に蒸発して回収するヘリウムガスを加圧してヘリウム容器(ベッセル)に戻せば、加圧ボンベがいなくなるのではといったごく単純なものであった。コンスタントにガスボンベを買わないといけないのも負担に感じており、一度作ってしまえばあとはコストがかからないようにしたいと考えたのが、そもそもの発端であった。



図1 トランスファー用加圧装置の写真。流量調節バルブ(ニードルバルブ)を絞ると加圧され、開けると減圧される。これは電磁弁がついているバージョンであるが、電磁弁は必ずしも必要ではない。

求められる性能は、加圧に必要な流量と圧力が発生できること、リークしないようにすること（吸い込み側・吐出側ともにノズルが取り付けられるような機構になっていること）、動作にオイルを使っていないことなどがあげられる。また、市販のコンプレッサーは凝縮した水を取り除くようなドレインがついていたり、圧力タンクがついていたりするものもあるので、こういったものがついていないものを選定した。性能については、ヘリウムガスボンベから加圧しているときの流量を見てみると、我々の研究室では 10~15 L/min 程度であった。加圧時の圧力は 0.02 MPa 程度なので、これを満たすようなコンプレッサーを選べばよい。多くのコンプレッサーは空気を圧縮することを想定しているため、リークタイトかどうかについては実際に購入してみないとわからない。念のため理科学実験用途のものを選ぶことにした。さらに、吸い込み口と吐出口はいろいろと改造する必要があるため、カタログの写真を見て改造しやすそうなものを選んだ。

はじめ我々が選んだのはアズワンで取り扱っている研究用マルチエアーポンプ吸排両用型 LMP-100 という機種である。これはダイヤフラム式でオイルフリー、かつ軸受けからの漏れを心配する必要がないこと、吐出量 18/22 L/min (50/60 Hz) で、排気側の最大圧力も 6.8 bar と安全上も問題なく、カタログの写真を見る限り改造は容易そうである。連続運転時間はカタログに記載はなかったが、真空ポンプとしても使えることから、おそらく長時間の使用に耐えられるであろうと判断した。今回はたまたまこの機種を選んだが、このような条件を満たす機種はほかにもあり、これでないといけないということはない。実際、この後に紹介する機種でも何の問題もない。

圧力の調整ができた方が良いのと、圧力もモニターしたかったので、図 1 のような接続を組んで圧力の調整ができるようにした。バルブ（キット・N1-A-2-8A）を開けることによって吐出されたヘリウムガスが吸入側（回収側）に戻り、吐出口の圧力を下げることができる。圧力が上がりす

ぎないように別途リリーフバルブ（スウェージロック・B-4CPA4-3）を取り付けてある。このバルブは内部にあるねじを調整することによって圧力のリミットを 3~50 psi (0.021~0.35 MPa) の範囲で調整できるようになっている。

出来上がったコンプレッサーは試運転しながらスニファー式のリークディテクターでリークをチェックしてみたが漏れはなく、加圧も問題なく行うことができた。一つ注意点があるとすると、始動時に吐出側の圧力が高いとモーターが始動しないことがあるので、圧力が低い状態でスイッチを入れる必要がある。

この構造だと、トランスファー終了後にうっかり流量調整バルブを閉め忘れていたりすると、あるいはコンプレッサーは電源を切った後に吐出口と吸い込み口が内部でつながった状態になっていると、回収側のヘリウムガスが吐出側に回って大気に逃げってしまう可能性がある。仕組みを理解している人たちが使っている分にはあまり問題にならないが、よくわかっていない人が使う場合を想定して、吸い込み口に電磁バルブ（CKD・AB41-02-5-AC100V）を取り付け、加圧ポンプを OFF にしたときに自動的に回収ラインからの供給を閉じるバージョンも作ってみた（図 1 がそうである）。コンプレッサーのスイッチではなく、スイッチ付きのテーブルタップで集中的に ON-OFF するようにしている。

3. 使用感

最初はいろいろなことを心配して使い始めてみたが、使ってみると問題なく動作しており、案外便利である。流量調整バルブも、トランスファーの最初に一度調節してしまえば途中で微調整する必要はない。同じ条件であれば、最初の調整もいらない。ガスボンベだと空になるたびに交換する必要があったが、コンプレッサーを使えばその心配もない。すでに 3 年以上使用しているが、不具合はない。問題があるとすれば、振動とノイズに注意する必要があるところだろうか。気になるようであれば除振マットを敷くとか別電源を

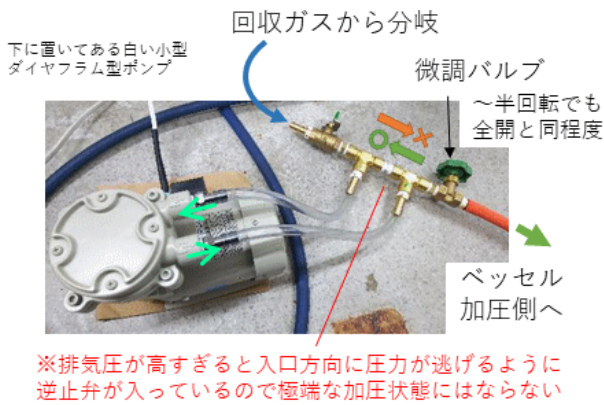


図2 金研佐々木研で用いている加圧ポンプ。

用意するなどすればよいと思う。

現在のところ耐久性がどのくらいかもう少し様子を見る必要があるが、十分元は取ったように思う。あとは、もう少し安く作れないかといったところであるが、これについては次節で詳しく紹介する。

4. よりシンプルに

はじめにでも述べたが、金研佐々木グループでも同じような方法で加圧をしておられるので、許可をいただいて紹介させていただく。彼らは我々よりもシンプルに、図2にあるようなやり方で接続している。ポンプはアルバック製DAP-15（加圧減圧両用ダイヤフラム型）で、吐出量が15/18L/min（50/60 Hz）である。逆止弁（エーチェック インラインチェックバルブ、AT1022）と流量調整バルブがついており、圧力のコントロールもできる。圧力はベッセルの圧力計でわかるので、ポンプ側の圧力計は省かれている。シンプルであるが、無駄がなく、安全性、性能ともに十分である。おそらく我々よりも安価に作られていると思われる。なお、逆止弁のクラッキング圧は1 psi（0.007 MPa）で、調整はできない。金研では回収側にも1 psiの逆止弁がついているため、ベッセル側は最大14 kPa（=0.014 MPa）の圧力がかかるようになっている。この装置を用いてMPMSへのトランスファーを行っている。

本稿を書くにあたり、もう少し工夫ができないかと思い、改めて機種選定をして圧力調整の方法

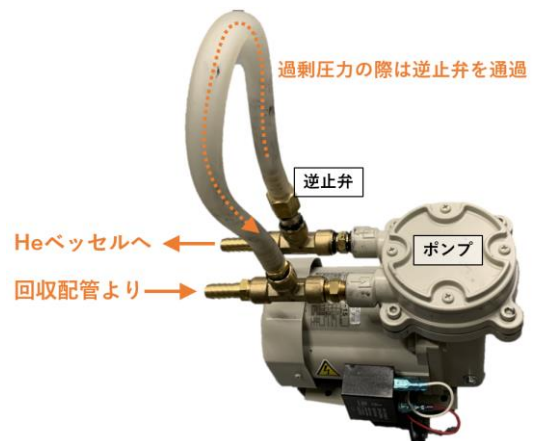


図3 逆止弁を一体化した加圧ポンプ。

も見直してみた。ポンプは、佐々木グループで使用しているものがより安くコンパクトなので、こちらを採用した。また、ポンプと逆止弁を一体化し、取り回しが簡便になるように構造を変更した。DAP-15の吸排気口には、購入時に9 mmのホースニップルが取り付けられているが、それを取り外すことでPT 1/4規格の管用テーパ雄ねじを取り付けることができる。この部分に逆止弁等の必要部品を取り付けてポンプと圧力調整配管を一体化したものが図3である。なお、DAP-15の仕様により停止している状態でも順方向にはガスが流れるため、ポンプの使用後には吸気もしくは排気ラインのバルブを忘れずに閉じる必要がある（この点はLMP-100と同様である）。

最大到達圧力の設定のため、入手が容易な逆止弁をいくつか検討した。比較的安価に入手できた弁のクラッキング圧力は0.007 MPa（アソー・AT1022）と0.02 MPa（CKD・CVF02-02A）の二種類のみであった。これらを使用したポンプでトランスファーを行った際のベッセルの最大到達圧力を表3に示す。意外なことに、ベッセル側の圧力はどちらを用いた場合も0.01 MPa程度となった。おそらく逆止弁の構造によってクラッキング後の再封止圧が異なるためだと考えられる。

この圧力が適当である場合はこれらの逆止弁をそのまま利用すればよいが、場合によっては異なる圧力が望ましいこともあるだろう。そこで、簡単な改造により最大到達圧力の変更を試みた。逆止弁の圧力変更はB-4CPA4-3を用いれば可能

であるが、比較的高価（6,000 円程度）であり、可変範囲が広いため微調節が難しい。そこで先の逆止弁 AT1022（1,700 円程度）のばねを交換することで設定圧力の変更を行った。交換用のばね（500 円程度）はミスミから購入した。ばねを交換した場合のトランスファー時の圧力を表3に示した。なお、ばねの交換には逆止弁内部の C リングを外す必要があるが、専用工具が無い場合はピンセットでも簡単に取り外せる。

上記は組み立て時の圧力設定であるが、ポンプ使用時の圧力調整が可能であれば使い勝手がよいであろう。そこで小型のレギュレーター（AR-20-12BG-1N-A、SMC）をポンプの排気側に取り付けた構造も試してみたが、これは全くの失敗であった。実際に使用すると、設定圧力をいくら調節しても、ガスが流れ始めるとそれをはるかに上回る圧力まで加圧されてしまう。これはポンプ側（レギュレーターの高圧側）の圧力が流量によって変動することが原因とみられる。ポンプとレギュレーターの間大きな体積をもつバッファを挿入すれば解決すると思われるが、安価で取り回しのよい加圧機構というコンセプトからは外れてしまうため、これ以上の検討は断念した。

上記のようなポンプユニットを組み立てる際、管用テーパねじの気密保持にしばしばテフロンテープが用いられるが、テープの巻き方や締め具合によっては勘合時にリークが発生することがある。この対策としてテフロンテープの代わりに溶媒揮発型の液状ガスケット（KE3418-100、信越化学工業）を用いたところ、リークに悩まされることはなくなった。これは別の用途で購入した高温用の製品であるが、液状ガスケットであればより安価な製品でも使用できると思われる。

5. バルーン（ガスバッグ）を使う方法

最後に本稿の趣旨とは外れるが、ガスポンベの代替ということで、バルーンによる加圧方法について紹介する。バルーンを使うメリットは手軽さにある。電源も必要なく置き場所にも困らない。単純につながりだけなので準備も楽で安全である。

ところが、研究室に転がっているバルーンはたいがいゴム製で、トランスファーに必要な圧力だと膨らみすぎて破裂したり、加圧に相当な力が必要となったりと扱いが大変である。おそらく網でできた袋をかぶせたりして工夫している方もいらっしゃるのではないと思う。

そんななか、当センターの野島グループから（株）ニシヤマ製のシームレスガスバッグ（HS-140-100）が非常に良いとの情報をいただいた。このガスバッグはガス管の内部で膨らましてガスの流れを遮断するために使われるもので、0.1 MPa の圧力をかける仕様となっているため、トランスファー時の圧力でも過度に膨らまない。そのため、加圧が容易で、図4のように台の上で体重を乗せて（心臓マッサージをするような感じだそう）押せば、楽に加圧できるようなのである。今後ガスポンベが入手できるようになっても、こちらを使うかもしれないとのことで、なかなかよさそうである。ただし、残念ながらこのガスバッグは現在廃番となっており、入手困難になっている。同じ用途の物であれば別のメーカー、形状のものでも使える可能性はある。



図4 （株）ニシヤマ製ガスバッグを使った加圧。

最後に、本稿で紹介した加圧装置の部品表を載せておく。研究室で製作される際の参考になれば幸いである。合計価格はモノタロウなどの表示価格から計算した。出入りの業者から入手することでより安価に入手することもできるかもしれない。

表 1 図 1 の加圧装置の部品表

品名	規格・型番	個数
ポンプ	LMP-100	1
ニードルバルブ	N1-A-2-8A	1
逆止弁 (圧力調整型)	B-4CPA4-3	1
グリセリン入圧力計	SPA1/4R50×0.2MPa	1
六角ニップル	PT 1/4	8(7)
ホースニップル	PT 1/4 ホース山径 φ10.5	8
チーズ	可鍛鉄製 1/4	5
エルボー	可鍛鉄製 1/4	2
ボールバルブ	UBVN-14B-BU-R	1
電磁弁	AB41-02-5-AC100V	1(0)
電源タップ	TAP-3405	1(0)
合計価格 (税込) : ¥110,000 程度 (¥105,000)		

()内の数字は電磁弁を使わない場合の個数、価格。

表 2 図 2 の加圧装置の部品表

品名	規格・型番	個数
ポンプ	DAP-15	1
逆止弁 (Acheck)	AT-1022	1
ニードルバルブ	N1-A-2-8A	1
六角ニップル	NT-1022	2
ホースニップル	PT 1/4 ホース山径 φ10.5	4
チーズ	1/4	2
ボールバルブ	ZET シリーズ 1/4	1
合計価格 (税込) : ¥50,000 程度		

表 3 図 3 の加圧装置の部品表

品名	規格・型番	個数
ポンプ	DAP-15	1
逆止弁 (Acheck)	AT-1022	1
六角ニップル	NT-1022	2
チーズ	1/4	2
ホースニップル	PT 1/4 雄ねじ ホース山径 φ10.5	3(2)
ホースニップル	PT 1/4 雌ねじ ホース山径 φ10.5	1
ボールバルブ	ZET シリーズ 1/4	(1)
合計価格 (税込) : ¥48,000 程度		

()内の数字は図 3 に掲載されていないベッセル側の手元バルブを構成するための部品

表 4 逆止弁の型番とベッセルの最大到達圧力

型番、メーカー名	クラッキング圧力	到達圧力
CVF02-02A、CKD	0.02 MPa	0.011 MPa
AT-1022、アソー	0.007 MPa	0.010 MPa
+ UV5-10	-	0.007 MPa
+ UY5-10	-	0.012 MPa
+ UR5-10	-	0.035 MPa
+ UV5-15	-	0.016 MPa
+ UY5-15	-	0.029 MPa

+ に続く文字はバネの型番 (ミスミから入手)

謝辞

井口敏氏には佐々木研で使用している加圧ポンプの資料を提供していただいた。野島勉氏にはガスバッグの情報と写真を提供していただいた。ここに感謝申し上げます。

片平地区ヘリウム液化システムの更新

金属材料研究所・極低温科学センター 野島 勉 (t.nojima@tohoku.ac.jp)
細倉和則、緒方亜里

1. はじめに

極低温科学センター低温科学部(片平地区)では、2021年12月から2022年3月にかけて、ヘリウム液化システムの大規模な更新工事を行った。このシステムは、1971年の低温センター発足時に導入されたものから数えて4代目(1952年、日本で最初に本学金属材料研究所へ導入されたヘリウム液化機を含めると5代目)となる[1,2]。前回(3代目)の更新は2009年度末であり[3]、その後12年目半ばにして、今回の更新が行われたことになる。ヘリウム液化機およびその周辺機器の寿命はフル稼働状況を続けると、概ね10年と言われているが、実際に3代目の液化機は、導入直後から、年間供給量10万~16万リットルといった高い稼働率を維持したせいか、9年目を迎えた2018年くらいから、

小さな故障が多発するようになった。学内の関係者の多大な協力(予算申請に向けたアンケートを含む低温関連研究者からの資料提供、および事務の方の予算獲得に向けた精力的な働き)のおかげで、4年間にわたった予算申請が認められ、今回の更新が実現した。

本稿では、新しくなった4代目ヘリウム液化システムの特徴について、特に技術的改善点に焦点をあてて紹介する。

2. 更新したヘリウム液化システムの概要

図1に更新された低温科学部のヘリウム液化システムの概要図を示す。ヘリウム液化システムは、大きく分けて(i)ヘリウム液化のための機器から成る「液化部」、(ii)ガス回収およびその貯蔵に係る「回

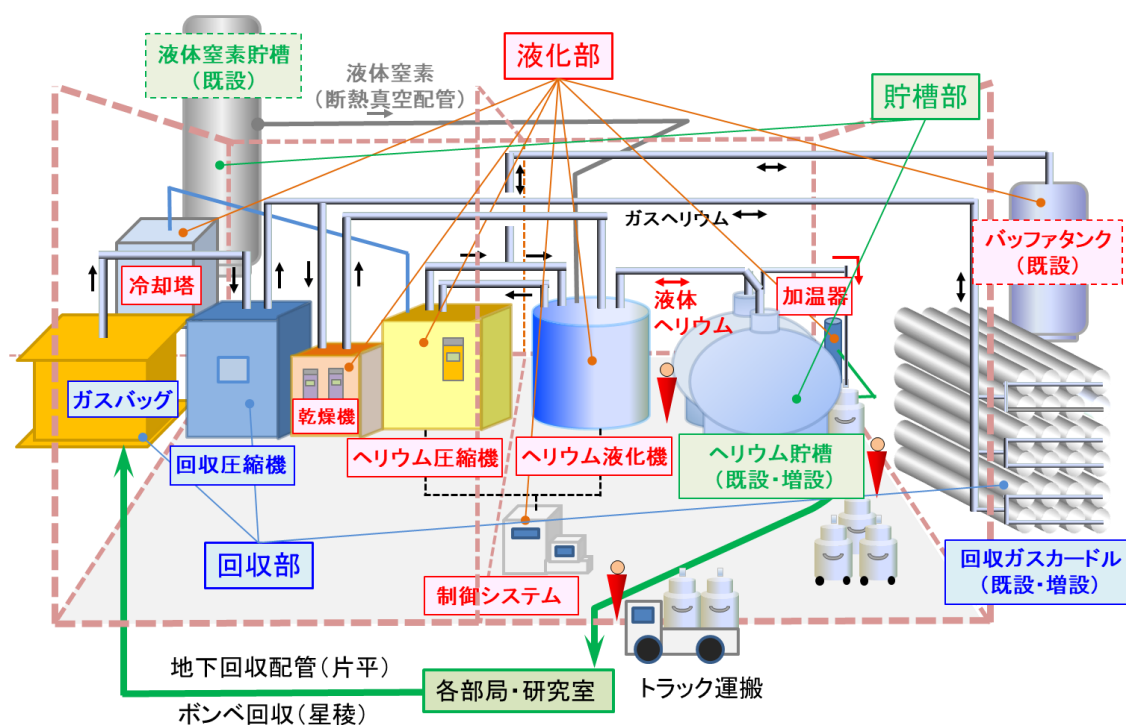


図1 更新したヘリウム液化システム(片平地区)の概要図

収部」、(iii)作製した液体ヘリウムを一時的に貯めておく「貯槽部」といった3つのセクションで構成される。今回の更新では、これらの内、液体窒素貯槽と液化用バッファタンク（液化機運転時の圧力安定性を維持するためのタンク）を除く、すべてのセクションでの機器を更新もしくは増設することができた。

実際に導入されたヘリウム液化機本体と2台の貯槽、ヘリウム液化圧縮機、回収圧縮機といった主要機器の写真を図2(a)-(c)にそれぞれ示す。ヘリウム液化機本体は前回と同じ型名のL280型（Linde社製）であるが、液化用タービン型膨張エンジンや内部精製機に改良が加えられている。さらに、新たな機能として後述するEJモードとJTモードという2種類の液化運転方式が選べるようになっている。この液化機にインバータ方式を採用した液化用圧縮機（Keizer社製）を組み合わせることにより、前回より20%減の200 kWhの電力消費で15%増の230 L/hの液化能力（99%純度のガスで運転時）を持つ高効率な液化機の構成となっている。

回収用圧縮機（田邊空気機械製作所製）は、最大圧力14.7 MPa、130 m³/h（大気圧換算）での処理能力を有し、1時間あたり最大約200リットルの液体ヘリウムの蒸発に対応可能である。比較的大型であることから、運転時の騒音低減と排熱効率を重視して水冷式を採用した。またこれまで問題となっていた回収圧縮機の運転時に発生する建物の振動を抑えるため、床に新規の基礎工事を行った後、圧縮機を据え付けた。回収ガスカードルも既設の56本に加えて16本増設されている。

液体ヘリウム貯槽は、既設の5000 L容器に加え新たに5000 L容器を増設した。後述するように、将来ヘリウムの輸入が困難になった場合でも、一年程度は学内供給が継続できるような貯槽量を目指したものである。両貯槽ともに内部にヘリウムポンプが内蔵されており、これらを使うことで100 Lの小分け容器への汲み込みを、約5分で完了できる。液化機の能力に加えて、この汲み込み時の利便性向上は、供給量の更なる増加への対応および技術職員の労力低減の決め手となるため、今回の更

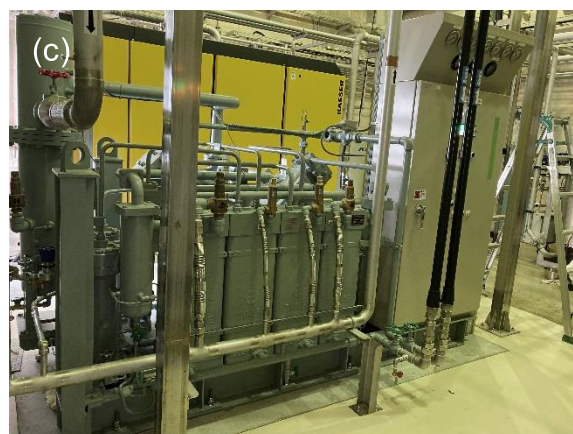


図2 更新した (a) ヘリウム液化機と貯槽、(b) ヘリウム液化圧縮機、(c) 回収圧縮機

新で重視した部分の一つである。

このような数字上のスペックだけでなく、今回のヘリウム液化システムでは、様々な細かいソフト・ハード面で改良・能力強化が図られた。次章に新システムの特徴としてその内容を紹介する。

3. 新システムの特徴

3.1 2種類の運転方式：EJモードとJTモード

大学等の研究機関で使われているヘリウム液化機の多くでは、2段の膨張エンジンを用いた断熱膨張に

よる冷却と、ジュールトムソン (JT) 効果による自由膨張 (ここで最終的な液化が起こる) を組み合わせた機構によりヘリウムの液化を行っている (図3)。この動作原理の基本概念は 1952 年当時のコリンズ式液化機から変わっていない [2]。今回更新した液化機では、図3 のガス回路図 (右側) に示すよう、2つの JT 弁から構成される2種類の液化運転方式を持つ。

一つはイジェクター (Ejector : EJ) モードと呼ばれる方式である。この方式では、JT 弁で液化されたヘリウムが、イジェクターを通して噴射されながら液化機内部にある、気液分離器に一旦貯まり、ここから低差圧で貯槽へ移送される。移送の際、発生する貯槽内 (ロス分) の蒸発ガスは、イジェクター効果により貯槽から吸いあげられ、一部は気液分離器、その他は液化機のガス回路に戻され再液化される構造となる。この工程により、液化中においても貯槽内の圧力がほぼ大気圧 (ゲージ圧で 0.01 MPa 以下) に保たれることになる。貯槽で汲み込み時に働くヘリウムポンプは、液体の内圧に敏感な (0.02 MPa 程度で働かなくなる) ため、EJ モードはヘリウムポンプを用いて、液化運転中に小分け容器に充填する場合に不可欠な方式である。

もう一つは、JT モードと呼ばれるもので、JT 弁から直接貯槽に送液される方式である (図3 中の橙線)。

この方式では蒸発ガスのエジェクターによる吸い上げがないので、液化時の貯槽の内圧が 0.02-0.03 MPa 程度に上昇することになる。この内圧は液化運転中にポンプを使わず差圧式で貯槽から小分け容器等に汲む場合にむしろ好都合な圧力となる。JT モードのもう一つの特徴は、気液分離器を通らない (貯槽からの戻りガスを冷却しない) ため、液化効率がさらに上昇することである。実際、初期試験では EJ モードで 230 L/h であったヘリウム液化能力は 260 L/h (高純度ヘリウムガスを使うと 280 L/h) まで上昇した。

この2つの運転方式があることにより、液化しながら汲み込みをする定常運転時は、小分け容器への汲み込み時間を重視した EJ モード、貯槽のみに短時間で貯めこみたい時やヘリウム液化中もう一つの貯槽へ移送したい時 (この場合、貯槽間の移送は差圧方式を利用)、ヘリウムポンプが故障した時等の非定常運転時に JT モードを使用する、というケースバイケースでの使い分けが可能となる。また2つの JT 弁を同時に使って、EJ モードの開始時、JT モード用のラインから少しヘリウムを流し、移送管を予冷するという裏技的な使い方もあり、これが貯槽への移送中のロス分まで含めた液化効率の向上に一役買っている。

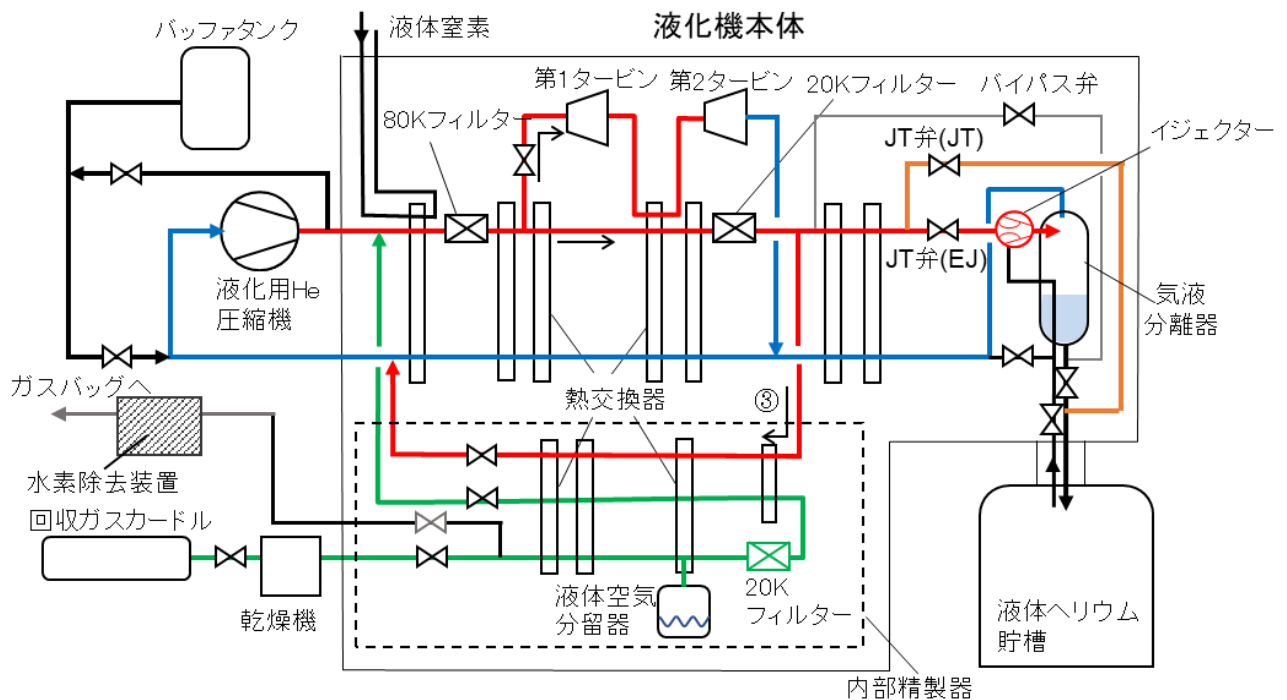


図3 更新したヘリウム液化機 (片平地区) のガス回路概略図

3.2 小分け容器自動充てんシステムの進化

前章および前節でも述べたように、本ヘリウム液化システムの一つの特徴は、貯槽内にヘリウムポンプを導入し、短時間での小分け容器への汲み込みを可能にしていることである。しかしこれまでの液化システムでは、充填の完全な自動化は実現できていなかった。自動充てんシステムは、図4のように小分け容器をロードセルにのせ、その重量を計測する構造になっている。従来の方式は、満タン重量になったら汲み込みを止めるという方式であった。しかし容器重量に比べ液体ヘリウムの重量の方が軽く（ヘリウムの密度が小さいため）誤差が大きいこと、また汲み込み時に上昇する圧力変動によって実質的にロードセルが感じる重さが増えることといった理由で、結果的に誤作動をしてしまう問題を抱えていた[4]。さらに容器ごとに満タン重量を装置のメモリーに覚えさせなければならないという煩雑さもあった。

この欠点を改善するため、今回の更新では、満タン時に対する2種類の判定方式を用いた。一つは計測された重量の時間微分値が一定になるという重量の判定、もう一つは満タン時に必ず容器圧力が上昇することを利用した圧力値による判定である。このどちらかの条件が満たされると汲み込み弁を閉じるという論理回路をつくることで、前回と同じハードウェア構成

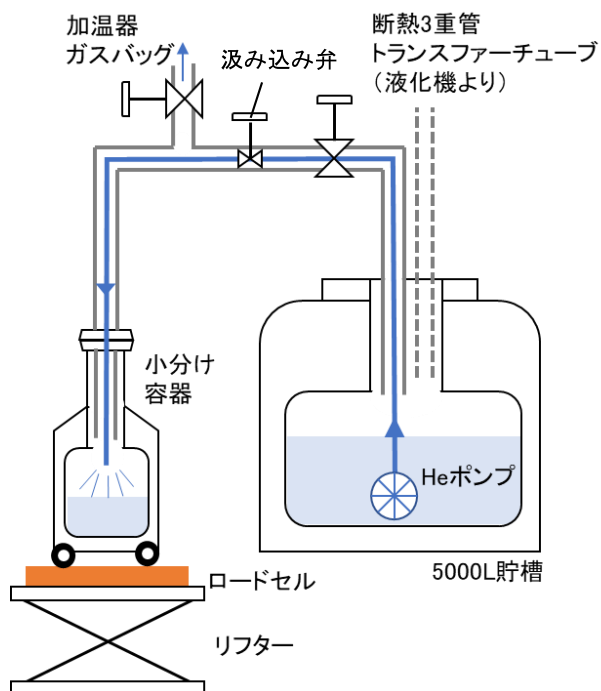


図4 液体ヘリウム自動充てんシステムの概略図

で、ソフト的に安定な自動充てんシステムの動作が可能となった。さらにこの方法では、容器の満タン重量を必要としないため、今後新たな小分け容器を購入しても、初期重量設定なしですぐ使えるという利点もあり、充てん作業に対する利便性は向上した。

3.3 精製運転モードの改善

ユーザーにより使用され蒸発した回収ヘリウムガスには、多少なりともヘリウム以外の不純物が含まれる（本学片平青陵地区の平均的な回収ヘリウムガスの純度は99%程度であり、不純物の主成分は空気である）。これが膨張エンジンを含む高压液化ラインに入ると、少量でも固化して深刻な物理的故障を引き起こす。このため、本システムを含む最近のヘリウム液化機の多くには、内部精製器が附属されている（図3の点線で囲まれた部分）。この内部精製器内では精製過程（冷却して不純物を固化し残った高純度ヘリウムを液化高压ラインに入れる過程）と加温再生過程（精製機を暖めて不純物を含むガスを液化機の外に出す過程）という2つの過程が常に繰り返されている。

これまでのヘリウム液化システムでは、液化高压ラインにつながるバッファタンクの圧力の時間変化を計測し、(i)昇圧時の圧力がある上限値になるまでを精製過程とし、(ii)その後、すぐに加温再生過程に移行する（高压ラインへの精製ヘリウムガス供給を止め、加温しながらバッファタンク圧力がある下限値になるまで不純物を排出する）、といういわゆる三角型の制御方法をとっていた（図5(a)に示すようバッファタンクの圧力の時間依存性が三角の形となる）。今回更新された液化機では、バッファタンクだけでなく、精製機内の圧力（不純物が溜まると徐々に上昇する）を計測し、精製機内の圧力がある基準圧力になるまで、バッファタンクの高圧状態を保つという台形型の制御ができるように進化している（図5(b)に示すよう圧力の時間依存性が台形の形となる）。これにより、これまでと同じヘリウム液化圧縮機の性能で、より長い実効的な液化時間が得られることになり、これが高い液化能力につながっている。

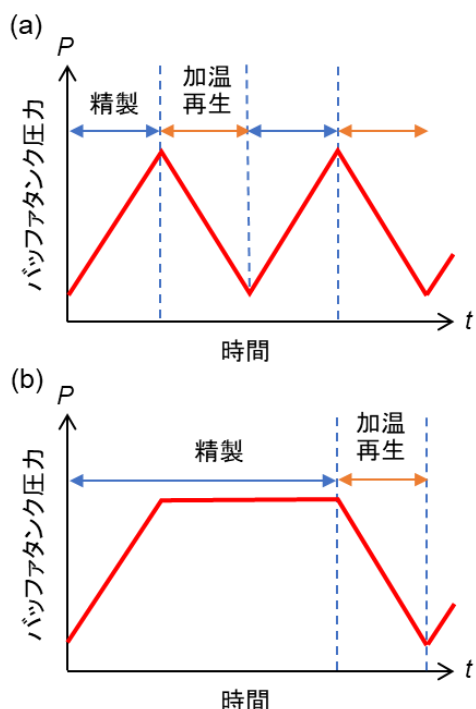


図 5 (a) 旧液化機と(b) 新液化機における内部精製器の運転モードの比較 (精製および加温再生過程はバッファタンク圧力の時間変化に反映される)

3.4 液体・ガスヘリウム貯蔵力の強化

今回の更新で、5000Lの液体ヘリウム貯槽、回収ガス貯蔵用の長尺カードル（大気圧の容量 500 L）を 16 本増設した（図 6）。これにより液体ヘリウム貯槽と回収ガスカードルを加えたヘリウム貯蔵可能総量は液体換算で 17500L となった。低温科学部での年間購入量に相当する、この貯蔵能力の大幅な向上は、ヘリウムの深刻な調達難の際も学内供給が比較的長期に持続可能になることを図ったものである。しかし、本システム完成から本稿を書いている現在においても、長期にわたる世界的なヘリウム不足の状況が続いており[5]、まだ貯蔵空間を満たすのに十分なヘリウムが入手できていない（現状では総量の少ないヘリウムガスの液化と回収を自転車操業で回転している状況である）。今後、機会があるたびにヘリウムガス購入を最優先し、この貯蔵能力の効果をフルに発揮できる状態にしたいと考えている。

3.5 水素除去に関する仕組み

更新前のヘリウム液化システムでは、回収ガス中の不純物に水素が含まれる場合、内部精製機で



図 6 増設された回収ヘリウムガス長尺カードル群

これを取り切れず、固体となった水素が液化機本体の液化ラインに蓄積し、液体ヘリウム貯槽、小分け容器へと移った後、ユーザーの装置を閉塞させるという、いわゆる水素問題が発生した[6-8]。同様な事例は、日本だけでなく世界中で起こり、筆者のところにも多くの問い合わせがあったことは記憶に新しい。学内のヘリウム回収ラインのどこから水素が混入するかということに関しては、例えば大気中やポンプオイルからといった様々な予測があるが、現在でもそれほど明確でない。ただ回収ヘリウムガス中に水素は少量でも必ずあるものとして、この除去に十分対処できる仕組みが新システムでは強く要求された。

今回更新された液化機の内部精製器では、20 K フィルターが復活した（図 3 中の緑線）。これにより回収ガス中の水素は内部精製機中で固体もしくは液体となってほとんど止まり、高圧ヘリウム液化ライン中（図 3 赤線）へ侵入できなくなった。加温再生過程で発生する水素を含んだヘリウムガスは、2020 年度に導入した水素除去装置を流用し[9]、ここを通過してガスバッグへ回収される構造とした（図 3 に位置を示す）。この水素除去装置は 2014 年に極低温物理学部（青葉山地区）に導入されたものと同じ吸着式の構造を持つ（サイズは一回り小さい）[7]。これにより、ヘリウムガスを損失することなく、内部精製器の段階で水素を効率的に取り除くことが可能となった。新システムでは当面は水素問題を心配する必要はないであろう。

4. まとめ

極低温科学センター低温科学部（片平地区）で2021年度に更新されたヘリウム液化システムの概要と新たな特徴について紹介した。2022年3月に完成後、初期設定に係る調整に時間を要しながらも、システムはほぼ順調に稼働していると言ってよい。しかし、昨年度より続く、国内でのヘリウム調達難により、肝心のヘリウムガスの購入がままならず（実際、試運転用のヘリウム確保にも苦心した）、新システムのポテンシャルを十分に発揮できていないのが実に歯がゆいところである。この原稿を書いている現在も、ヘリウムの価格や電気料金の高騰が続いており、今後、学内の低温研究が縮小してしまうのではないかと危惧している。一日もはやく、現在の世界的なヘリウム不足の複合的要因（ヘリウムプラントの不調、新型コロナウイルス感染症や国際紛争による流通の遅延等々）が解決され、2018年以前の状況まで戻ることを心から願って止まない。

大規模なヘリウム液化システム更新のため、2021年12月から2022年3月の長期にわたって、片平地区のヘリウム供給と回収を完全に停止した。停止期間中、ユーザーの皆様には多大なご迷惑をおかけした。センターが中心となって外部からのヘリウムが購入できるよう手配はさせていただいたが、価格的にも量的にもとても満足いくものではなかったと感じている。ここにお詫びを申し上げたい。にもかかわらず、不平不満を言うこともなく、完成まで辛抱強く待っていただいたことに感謝を申し上げたい。

今回は、床の基礎工事や全ての機器につながる冷却系配管の更新工事、といったシステムの根本に係る変更があったため、全面停止を余儀なくされた。次の更新（さらに10年以上後になるとは思うが）では青葉山地区のセンターとの連携も活用しながら、セクション毎の更新をして、停止期間が最小限に抑えられるようにしたい。そのための綿密な準備を今からスタートしていこうと考えている。

参考文献

- [1] 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 22 (2021) p. 31.
- [2] 野島勉, 伝熱 Vol. 61, No. 255, p. 46 (2022).
https://www.htsj.or.jp/wp/media/2022_4.pdf
又は
http://www.wattandedison.com/hito_to_netsu_9.pdf
- [3] 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 11 (2010) p. 1.
- [4] 中村慎太郎, 丹野伸哉, 細倉和則, 緒方亜里, 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 11 (2010) p. 11.
- [5] 日本物理学会ホームページでの声明,
<https://www.jps.or.jp/information/2019/12/helium.php>
- [6] 野島勉, 極低温科学センターだより vol. 14 (2013) p. 11.
- [7] 木村憲彰, 菊池将史, 森山弘章, 吹上菜穂, 極低温科学センターだより vol. 17 (2016) p. 17.
- [8] 野島 勉, 木村憲彰, 固体物理 Vol.52, No.1, 47 (2017).
- [9] 「最近のできごと」, 極低温科学センターだより vol.21 (2020) p. 19.

東北大学片平地区における極低温の研究

Research of low temperature science in the Katahira campus of Tohoku University

野島 勉 (東北大学)

Tsutomu NOJIMA (Tohoku University)

e-mail: t.nojima@tohoku.ac.jp

1. はじめに

1952年、東北大学片平地区の金属材料研究所(金研)にヘリウム液化機が日本で初めて導入され、国内での絶対0度に迫る本格的な極低温研究が始まった。金研の低温施設には当時全国から多くの研究者が集まり、昼夜を問わず盛んに実験研究がなされるとともに、ここで培われた低温科学の知識が国内の研究機関に普及した。これらの歴史より、東北大学金研は「日本の低温科学発祥の地」と呼ばれる。しかし、実はそれ以前からのヘリウム液化に向けた努力と奮闘があった。

学内においてもヘリウム液化機導入後、低温科学研究は片平地区を中心として広範囲な分野へと波及し、液体ヘリウムの需要が急増することとなった。これに応えるため、1971年に全学共同利用施設となる「低温センター」が設立され、その後、現在の「極低温科学センター」へと発展を遂げている。最近では、東北大学全体での液体ヘリウムの使用量は年間25万リットルにも達するようになった。これは全国的に見ても屈指の値である。この発展は、ヘ

リウム液化機の能力向上だけでなく、ヘリウム供給・回収体制のソフト・ハード両面での進化に支えられたものであるが、同時にこれを可能にした歴代の低温関係の研究者、および技術職員の献身的な努力も見逃せない。

本稿では、過去の記録や筆者が見聞きした情報・体験を基に東北大学片平地区における極低温の研究に係る歩みについて紹介する。2021年に東北大学極低温科学センターは設立50周年を迎えた。偶然ではあるが、同年に本稿のきっかけとなった日本伝熱学会創立60周年記念でのシンポジウム講演の機会を与えられたことに、何かの縁を感じている次第である。

2. 東北大学における液体ヘリウム供給体制の歩み 2.1 ヘリウム液化時代以前の奮闘 (1929-1952)

東北大学での低温研究の歴史は、冒頭で述べた1952年より20年以上前の金研低温研究室建設までさかのぼることができる[1-4]。大正の末期(1925年頃)、極低温における金属研究の重要性を認識した金研初代所長の本多光太郎先生は、日本における低温科学研究の開拓の必要性を感じ、低温研究室の建設を立案した。当時欧州留学中であつた青山新一先生(当時理学部化学教室助教授、後に金研教授)を担当者に指名し、命を受けた青山先生は、液体ヘリウム発祥の地である、オランダライデン大学Kamerlingh Onnes 研究所滞在を経て日本に帰国した。その後、1929-1930年にかけて、財団法人齋藤報恩会(仙台)から主な援助を受け、空気液化機および水素液化機を含む、低温研究棟が建設された(図1)。特に水素液化機は翌1931年に入所した神田英蔵先生(後に金研教授および低温センター初代センター長)により整備・運転され、液体窒素温度(77K)よりはるかに低温の液体水素温度(20K)までの研究が可能となった。ここに日本の低温科学研究の礎が築かれたわけである。



図1 当時の金属材料研究所低温研究棟
(齋藤報恩会より極低温科学センター低温科学部へ寄贈された写真)

当時の世界的な情勢を見ると、1908年にオランダライデン大学の Kamerlingh Onnes が大気圧での沸点 4.2K のヘリウムの液化に成功し、1911年にこれを用いた水銀の超伝導を発見していた。1926年には断熱消磁による 1K 以下の極低温到達への可能性も提案され、1933年にパークレイの Giauque が 0.25 K に達していた。一見、日本の低温研究はかなり後発であったように思えるが、1930年当時、液体ヘリウムが使える研究施設は世界中でも、ライデン大学の他、ドイツの Physikalisch- Technische Reichsanstalt (PTR) , ロシアのモスクワ大学、カナダのトロント大学等と数える程しかなかった[1, 3]。当時の液化方式は Onnes 型と呼ばれるカスケード方式(液体窒素および液体水素で冷却したヘリウムガスを Joule-Thomson 膨張で液化させる方式)を基にしたものであり、液体水素を必須としていた。加えてさらにこの方式では大量の液化が難しかったことが広く普及しなかった要因と思われる。よって国内初のヘリウム液化を目指して、すでに製品化の段階にあった水素液化機(最初の水素液化は 1892年 Dewar による)を導入したのは、賢明な判断であったと思われる。

とはいえ液体水素温度の研究でも当時としては日本で初めてのこともあり、デュワー(魔法瓶)用のガラス材料の選別から始まって諸所の低温技術に関する苦労があったようである[1, 5, 6]。1934年に英国ケンブリッジ大の Kapitza が、液体水素を使わず、断熱膨張と Joule-Thomson 膨張のみで大量のヘリウム液化が可能となる手法を開発して以降、青山先生らは、この方式でのヘリウム液化機実現へ向け新たな舵を切った[7, 8]。しかし Kapitza 型は材料および加工の両面において精度の要求が厳しかった。その上、第二次世界戦中における資材面、工作面での難や国内の基礎研究への厳しい風当たり等、様々な不運が重なり、試作のヘリウム液化機は未完成のまま終わった。当時の時代背景や諸事情については文献[2, 3-4, 6]を参照されたい。これとは別に神田先生は 1938年に脱着法という手法を用いて 6K というところまで迫っていたことも記しておきたい[3, 4]。ヘリウム液化を目指してあらゆる方向からたゆまぬ努力が続いていた。

2.2 ヘリウム液化機の導入と発展(1952-1971)

第二次世界大戦敗戦後の混乱からしばらくして、

日本全体における研究復興への気運が高まるとともに、金研でも袋井忠夫先生や神田先生の研究室でヘリウム液化に向けて研究が再開していた。1950年頃、袋井先生が Journal of Applied Physics の広告で、ヘリウム液化機が市販されていることを見つけ、同研究室の渋谷喜夫先生らに相談された。彼らは、「すでにヘリウム液化を誇る時代から、液体ヘリウムを利用して極低温物性を研究する時代になったという」観点からこれを購入すべく、政府(当時文部省)への予算要求に奔走された。これが A. D. Little 社製の Collins 式液化機である(図2)。その後様々な国内関係各所の先生方の尽力もあって要求が認められ、1952年に日本初となるヘリウム液化として金研に導入された。

Collins 式液化機は図3にその概要を示すよう、2機の断熱膨張エンジンを有し、これによりヘリウムを約 10K まで冷却後、Joule-Thomson 膨張により 4K までさらに冷却して液化するという Kapitza 型の延長にあるものであった。膨張エンジンがレシプロからタービンに変わった現在のヘリウム液化機においても、その基本的な設計観念は受け継がれている。

この液化機は当時としても大変高価であり、戦後の復興途上にある国内情勢および国際情勢(当時、朝鮮戦争も勃発し GHQ の支配下にあった)より、2代目は当分買えないと考えられた。そこで予算交渉時の文部省の意向もあり、国内の物性研究者に共同利用されることとなった。いわば現在の全国共同利用施設の走りとなったわけである。導入までの苦労は袋井先生や渋谷先生の記録[2,9]に残っている。

導入直後、金研内でのヘリウム回収・精製設備も



図2 日本初の Collins 式ヘリウム液化機
左：設置当時の写真(東北大学資料館写真データベースより)、右：現在金属材料研究所展示

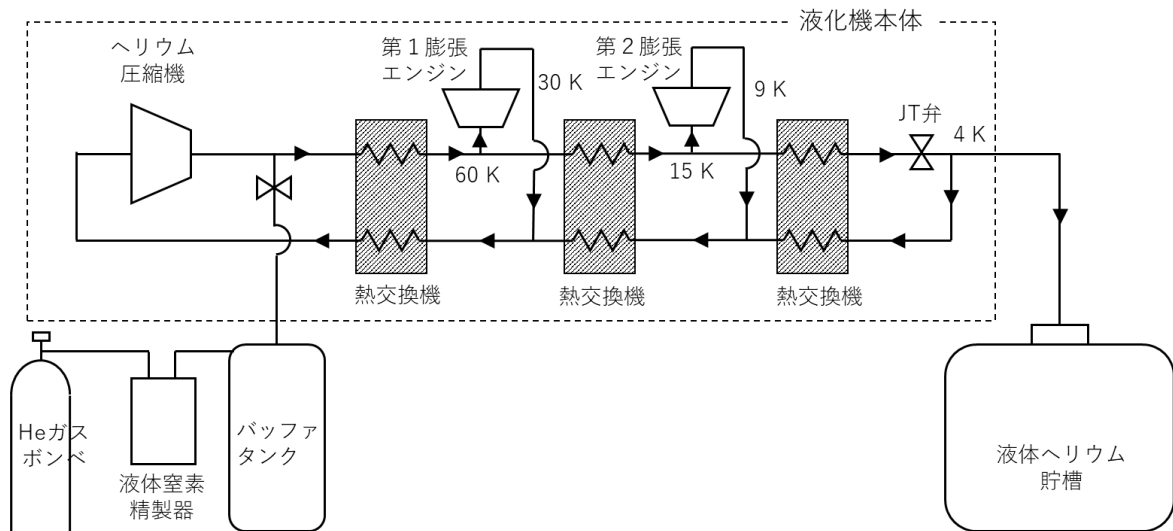


図3 Collins式ヘリウム液化機概念図

整備されるとともに、国内の大学、研究機関から、長い人は半年、短い人でも数週間滞在して、盛んな低温研究がなされた。こうやって東北大金研で培われた極低温研究の手法や設備設計、低温技術のノウハウは全国に普及することとなった。この間、ヘリウム液化能力も4L/hから圧縮機を増強することによって8L/hに上昇され、実験に使用された液体ヘリウム量は、年間600-800Lに達した。当時の実験装置の容量が3-5L程度とすると、一年中休みなく実験が行われていたことが伺える。

金研でのヘリウム液化機導入が成功を収めた背景に、液体水素時代に培われた研究者および技術職員(当時技官)の高い技術力と情熱があったことは特筆すべきである。製品化されてまだ間もないこともあり、この頃の液化機および圧縮機等の周辺機器は、日常的に故障が発生していたらしい。特に技術職員の方々は液化機および周辺機器の分解修理を含むメンテナンスを自力で実行されていた。これは低温(熱力学)・真空・高圧・機械・電気にわたる幅広い知識と経験を持ち合わせないと不可能なことである。故障があった際には、日曜、祝日でも研究最優先とばかり献身的に対応されたという話である[10]。また、この時代の液化に使われた圧縮機は騒音が大きく、多くの技術職員は耳を悪くしたという話も聞く。現在とは比べ物にならない劣悪な環境の中、頑張ってこられたことが想像される。

金研でのヘリウム液化機導入が成功裏に進むにつれ、Collins式液化機は1958年の電気試験所(現NIMS)を皮切りに、東京大物性研、大阪大等々と様々な大学、研究機関に導入されることとなった。

これにより全国共同利用施設として金研ヘリウム液化機の使命は徐々に役目を終えることとなる。

2.3 東北大学低温センター発足(1971-1996)

金研低温施設のヘリウム液化機は、全国的な共同利用研究のみならず、東北大学内の低温科学研究も著しく発展させた。当初から液体ヘリウムの利用範囲は、金研から片平地区にあった理学部、工学部、電気通信研究所(通研)へと広がっていたが、他の部局からも利用の要望も増え、8L/hのCollins型液化機では学内需要に応えられない状況になってきた。実際、供給量は1970年には年間4,000Lに迫る勢いであった。そこで初代センター長となる神田先生をはじめとする金研の関係者、片平地区低温研究関係者らの尽力により、1971年に全学共同利用施設となる低温センターが金研の構内に新しい建屋とともに設立された(図4)。

低温センターは、液体ヘリウムを供給と低温実験機器開発という2本柱の使命をもって組織構成された。単なる液体ヘリウムの供給のみならず、低温物性物理学、低温工学の先導的発展を図った訳である。供給関係では、国産第1号機となる日本酸素社製60L大型ヘリウム液化機(図5)、同社製ヘリウム回収・精製圧縮機、総量1,260m³の回収ガスボンベカードル、フィリップス社製水素液化機等の設備が主力機器として新たに導入された。60L/hというヘリウム液化能力は当時としては飛びぬけて大きなものであるが、これをさらに国産製としたことは、ヘリウム液化機開発に挑んできた神田先生の強い思いによるものと聞く。神田先生は青山先生と



図4 1973年当時の低温センター建屋
(東北大学低温センター1973年広報誌より)

もに前述の Collins 型液化機導入以前から、日本酸素と共同してヘリウム液化機の試作を行っていた。ヘリウム液化機の完全国産化は関係者の悲願でもあったように推測される。

機器開発関係では、共同利用実験室を設け、そこに当時としては最高スペックとなる 10 T の磁場を発生する NbTi 超伝導マグネットとクライオスタット、NMR 用 6 T 高均一超伝導マグネット、リークディテクター等の実験機器が整備された。10 T 超伝導マグネットは当初予定されたスペックの磁場が出せず、当時機器開発の担当をされていた金研の能登宏七先生や坂爪新一先生は苦勞されたようである。線材の見直しをして、まき直しを行うことにより予定の性能を引き出すことに成功した。その後、1978年に 8 mK までの極低温、9 T までの強磁場で実験が行える ^3He - ^4He 希釈冷凍機(米国 SHE 社製)も整備された。希釈冷凍機の納入にまつわる詳細は金研の小林典男先生の記事が極低温科学センターだよりに掲載されている[11]。これら共同利用機器に関して、一日で消費される液体ヘリウム量が 10 T マグネットで 15 L、希釈冷凍機で 20 L と、当時としてはかなり大きかったことも目を引く。つまり通常の研究室では簡単に維持できない装置を用いた実験が、低温センターの豊富な液体ヘリウム供給に支えられて可能となった訳である。実際、これらの装置は学内のみならず学外からの研究者にも頻繁に利用され、利用日数は 10 T マグネットで年間 300 日、希釈冷凍機で 150 日に達した。

液体ヘリウム供給関係に話を戻すと、低温センターの目新しい機能として、各部局に設置されたサブセンターの存在が挙げられる。供給回収フロー図

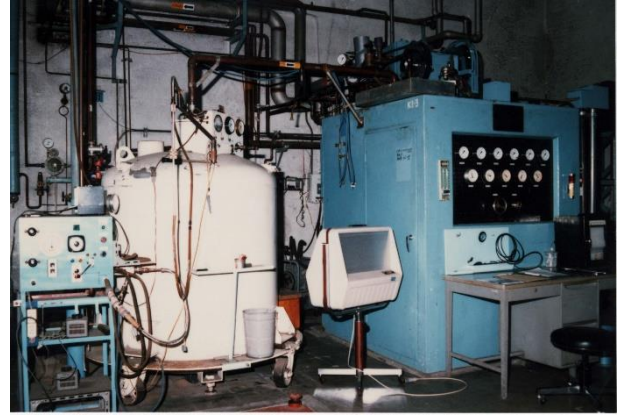


図5 日本酸素社製 60Lヘリウム液化機
(写真：東北大学極低温科学センター蔵)

(図6)に示すよう、低温センターより遠く離れた部局の研究者は、サブセンターにトラック運搬された 100 L や 50 L の中型容器から、実験装置や小分け容器へ液体ヘリウムの汲み込みができ、サブセンター内で使用後のガスヘリウム回収もできるようになった。低温センターへ直接出向かなくてもサテライトとして機能するサブセンターで主な用事が済む仕組みである。これにより、研究者にとって液体ヘリウムの利便性はかなり良くなり、液体ヘリウムの需要やそれを利用する研究分野は年々と増加していった。サブセンターは 1971 年に金研と工学部(青葉山地区)、1972年に通研(片平地区)、1976年に理学部(青葉山地区)、1981年に科学計測研究所(科研、片平地区)へと順次設置されていった。但し人員の追加は厳しく、どこのサブセンターも各部局所属の技術職員によって運営されていた。低温センターとサブセンター間の情報交換や技術交流は自然となされ、各部局の技術職員は「低温」というワードで連携されていた(低温関連の技術職員による忘年会や旅行といった交流も頻繁に行われていたらしい)。

一方、低温センターではサブセンターで充填された回収ガスポンベを替わりの空ポンベに交換し、低温センターへトラックで運搬するという日々の業務が発生することとなる。一回の運搬で可能な量は 5 本組ポンベカードル 35 m³ (液体に換算して 50 L) である。これは年間 10,000 L 供給した場合の一日の使用量に相当する。これに加え、前述の液体ヘリウム中型容器の供給・回収のための運搬も加わることになる。ヘリウムの蒸発は待って欲しくないため、どんな悪天候の中でも必要となれば、低温センター

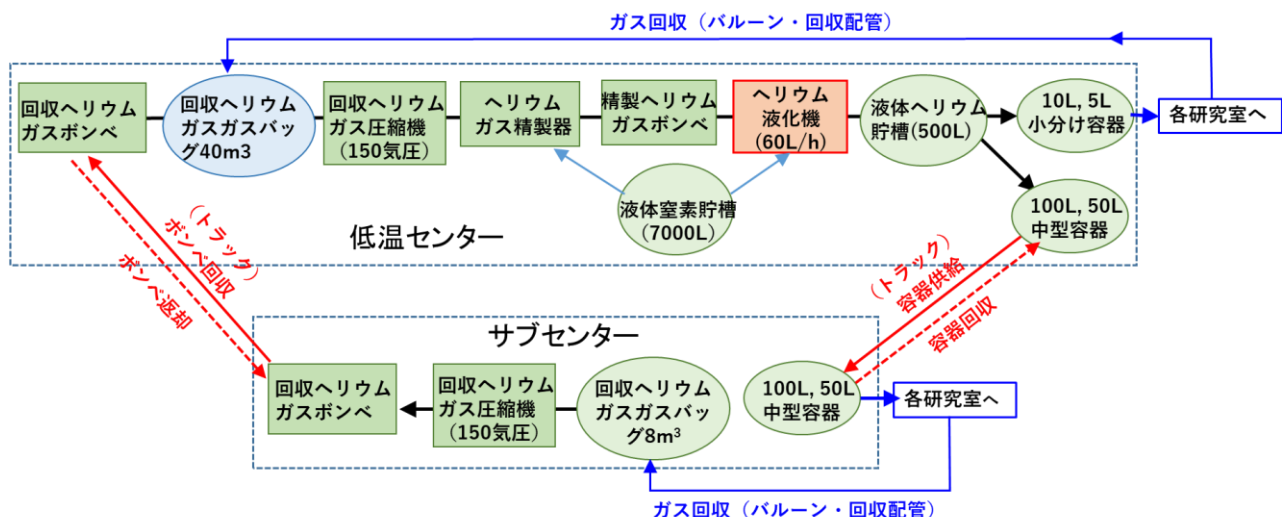


図 6 低温センターとサブセンターのヘリウム供給・回収フロー図

の技術職員はサブセンターにトラックで出向いた。低温センターに昔から在籍していた技術職員との世間話では、運搬にまつわる思い出話が今でもよく出てくる。

さて順調に動き始めたように見えた低温センターの 60 L 液化機および周辺機器は、設置から 5 年を待たず膨張エンジントラブルや圧縮機ピストン破損等といった問題を起こすようになった[12]。それでも Collins 型液化機の時代から培われた技術力により、長期の中断なく安定供給がなされていたようである。10 年後の 1981 年には液体ヘリウム使用量は 20,000 L に達し、15 年後の 1986 年までに 4 年計画の液化機の大規模改修を行いながらも年間使用量が 40,000 L に達している。20 年後の 1991 年には、60,000 L とさらに増加を続け、故障続きの液化機は満身創痍となりながらもフル稼働といってよい状況となった（ヘリウムの汲み込みロス等を考慮に入れると、使用量の倍以上の液体ヘリウムを製作していた）。そこでより高い液化能力を持つヘリウム液化機への更新が学内からも強く要望されるようになった。

学内の低温センター関係者の多大な尽力により、液化機更新の予算要求が認められ、1993 年にそれまでの 2.5 倍となる 150 L/h の能力を持つヘリウム液化機（スイス・リンデ社製 TCF50 型）を含むヘリウム液化システムが導入されることとなった（図 7）。この能力上昇は膨張エンジンがレシプロ式からタービン式になったこと、当時職人芸であった JT 弁をはじめするバルブ調整が自動化されたことに

よる。

液化能力の上昇に加え、この 3 代目の液化機の新たな特徴は、液化機本体がヘリウムガスの精製機能を内部に持つことであった。ユーザーより回収されてきたヘリウムガス中には、空気をはじめ多くの不純物が含まれており、これらが低温で固化すると液化機の膨張エンジンに大きなダメージを与える。よって、2 代目の液化機までは、図 6 に示すよう、ヘリウムを液化する前段階として、液体窒素による精製処理を行わなければならなかった。内部精製装置の追加により、この作業の必要性がなくなり、高い液化能力も相まって技術職員の労働環境は大幅に改善されたと言える。この結果、1996 年には 70,000 L まで増加した液体ヘリウムの需要へも十分対応

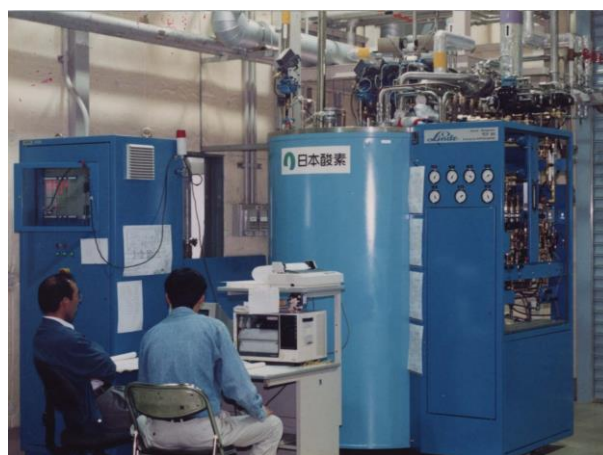


図 7 リンデ社製 150L ヘリウム液化機
（写真：東北大学極低温科学センター蔵）

できるようになった。

2.4 極低温科学センターへの発展（1996-現在）

東北大学における極低温科学研究の新たな飛躍を期して、1996年に「低温センター」は理学部物理学学科で独自に運営されていた「理学部附属極微量エネルギー物理学実験施設」と統合し、「極低温科学センター」として新たに発足することになった。これまでの低温センターは極低温科学センター低温科学部として、片平地区の金研、通研、科研、流体研、反応研等の研究所群への低温研究支援を、極微量エネルギー物理学実験施設は極低温科学センター極低温物理学物部として、青葉山地区の理学、薬学、工学研究科の支援を行うよう分業体制が敷かれた。これにより片平地区の低温科学部では、それまで行っていた青葉山地区への液体ヘリウム配達やガスボンベ回収業務がなくなった。

この改組と同時に、片平地区では、関連部局からの予算協力を得て、地下の共同溝を通して液体ヘリウムを使用する建物をつなぐヘリウムガス回収網が建設された（図8）。この結果、建物毎に回収配管とガスバッグ、回収ガスを圧送するための小型のペビコンを設置すれば、どこでも液体ヘリウムを用いた実験が可能となった。これに伴いサブセンターに

設置された回収ガス圧縮機と高圧ガスボンベは廃止され、ガスボンベのトラックによる運搬業務もなくなった。センターの業務負担が低減すると同時に研究者の液体ヘリウムの利便性はさらに大きくなり、結果として液体ヘリウムの需要はさらに増加することとなった。極低温科学部による青葉山地区への液体ヘリウムでの供給体制が整う2000年までには、年間使用量が120,000Lまでに達した。

それまで調子よく働いていた3代目ヘリウム液化機も2006年頃から、電子部品やバルブ類の故障が頻繁に起こるようになり、同年液化用圧縮機も大きな故障に見舞われた。通常、液化機およびその周辺機器の寿命は、概ね10年と言われており、この不具合は設置から13年間のフル稼働状態に近い酷使によるものと考えられた。そこで更なる液化能力と効率向上および省電力化を狙った、液化システムの更新の計画を立てることとなった。

大学内でのマスタープランへの組み入れ、さらに文科省への予算要求を含め、様々の関係者の協力を得て、2009年度に200L/hの能力をもつ液化機（リンデ社製L280型）を含む、4代目のヘリウム液化システムへの更新が実現した（図9）。このシステムではこれまで以上の高効率化（1L液化ヘリウム当たりの電力量と液体窒素量の低減）も図られたが、



図8 東北片平キャンパスヘリウムガス回収網（赤線）と共同溝内の配管の写真（左上）



図9 リンデ社製200Lヘリウム液化機
(写真：東北大学極低温科学センター蔵)

特筆すべき新規性は、小分け容器に組み込むための、液体ヘリウムポンプが導入されていることである。これにより、これまで30分程度かかっていた100L小分け容器への汲み出しが、5分程度で済むようになった。この効果もあって2018年にまでには、年間使用量が160,000Lを超えるまでに至った。供給先も、従来からあった金研、多元物質科学研究所（多元研、旧科研・反応研・素材研が統合）に加え、2009年に原子分子材料科学高等研究機構、2014年より星陵地区の東北メディカルメガバンクが新たに加わった。

図10に1971年の低温センター設立から現在に至るまでの東北大学全体の液体ヘリウム使用量の推移を示す。2000年以降は、極低温物理学部による青葉山地区への供給の合算となっているが、概ね2/3が低温科学部（片平地区）分である。これまで述べて来たように、東北大学での液体ヘリウムの使用量は年々増加の一途をたどってきた。2009年から2012年は、液化システム更新と東日本大震災の影響、2020年以降は新型コロナウイルス感染症の流行が原因で、実験数が減り使用量が落ち込むものの、それらを除くと年間250,000L（片平地区で160,000L）という全国でも屈指の使用量を記録している。今後も急増こそはないにしても、減少することはないという見込みである。

あらためて振り返って見ると、液体ヘリウム供給の上昇は、その時々でのネックとなっていた問題（液化能力、内部精製機作業、回収ガス運搬作業、ヘリウム汲み出し時間）を順次改善したことによると気づく。もちろん、これらがうまく機能したのは、

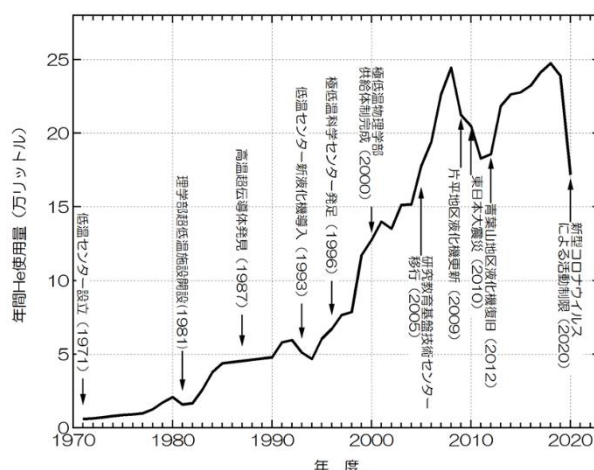


図10 東北大学における液体ヘリウム使用量の推移（1971年から現在）

ハード面での変化に対し、現場の職員が新たな機能への理解、それに伴うルール作りとシステム構築、ユーザーへの情報発信や個別指導等々とソフト面でも柔軟に対応できたからである。ヘリウムの注文を一つとっても、現在ではかつての電話・ファックスからWebサイトからの注文へと変わり、リアルタイムでの回収率や使用料金がわかるようなシステムへと進化させたことが、ユーザーの利便性につながっている。また近年の高効率な液化システムの内部は複雑であり、ブラックボックス化しているため、故障の際は、分解修理という職人技だけでは太刀打ちできず、コンピュータ制御や通信部をいかに理解・利用して早期に原因を特定するかにもかかっている。これからも変貌する業務内容に、「低温」という専門性を失うことなくいかに対応できるかが、今後の更なる発展のカギとなるであろう。

3. 東北大学の極低温の研究の歴史

これまで、液体ヘリウム供給の歩みについて述べてきたが、極低温の研究の歴史について以下簡単に述べる。1952年以前の液体水素を用いた低温研究では、水素液化機を整備した神田先生の研究室の成果が主となる。

神田先生らは来たるべく液体ヘリウム時代の準備期間として、また日本で液体水素温度(20K)を手にした数少ない(多分当時は唯一の)研究室として、様々なテーマに取り組んでいた。例として、(1)凝縮気体の物性(フッ素液体と固体)、(2)液体水素温度までの相転移の研究(酸素の3重点以下の相転移曲線)、(3)低温でのカロメトリー(アルコールの

液体・固体比熱，熱緩和，ガラスを含む結晶成長過程)，(4)低温での光の分光（ベンゼンやトルエンの吸収スペクトル），(5)低温 X線カメラ，等がある[1]。室温や窒素温度でやってきた物性実験を，水素温度でも同じようにできるようにするという方向性があったように伺える。とにかく当時は何をしても相当開拓的であったということであるし，ここで培った低温実験技術は後の液体ヘリウム時代においても大いに役立った。

さらに低温の数少ない研究者として，物性物理学以外の問題も持ち込まれ，液化ガス製造の諸問題（空気液化プラントでの爆発問題や重水素の製造）にも取り組んだ。当時の苦労や研究の詳細は文献[1]を参照されたい。

最初のヘリウム液化機が導入された 1952 年からは，研究の方向やスピードが一変したようである。というのも Collins 式液化機の普及もあって，世界的にも低温物理学が定着しつつあり，競争の時代であったためである。前述したように，液体ヘリウムを利用した低温実験は全国共同利用の研究だけでなく，学内でも通研，理学部，工学部での研究に使われていた。勉強不足なこともあり，筆者は全部の研究把握しきれていない。ここでは筆者の所属する金研でのテーマの一部を抜粋する。

当時の世界的な流れとして，低温での磁気共鳴（NMR や ESR）と超伝導を含む金属の基礎物性があった。金研の神田先生の研究室では，古くから金研での磁性研究の学風もあったことから，固体水素の NMR や固体酸素の帯磁率，Fe 塩 ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等) や Co 塩 ($\text{CoCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等) の ESR や常磁性緩和の研究が行われた[1]。特に Fe 塩や Co 塩の研究は，日本のお家芸となる「低次元磁性」の走りとなった。これらの研究のため，断熱消磁法を用いて 0.03 K の極低温にも達していた（断熱消磁に用いた大型水冷マグネットやガラスのクライオスタットは，斎藤報恩会の博物館に展示されていたが，閉館とともにそのレプリカが極低温センター低温科学部に移されている）。

金研の袋井先生・武藤芳雄先生の研究室では，超伝導，ドハースファンアルフェン効果，合金の輸送特性，半導体の電流磁場効果，化合物半導体の光・超音波物性，高い臨界温度の超伝導化合物，といった低温での金属物性を開拓した[13]。特に超伝導の研究は，後に金研に設置された強磁場超伝導材料研

究センター（当時超伝導材料開発施設）での強磁場マグネット開発にもつながる（金研で低温と強磁場は深いつながりをもって発展してきた歴史もある）。

この他，通研では超伝導エレクトロニクス等，理学部では超伝導体，磁性体の極低温における基礎物性等，工学部では超伝導マグネット応用等において様々な研究が展開されるようになった。

1971 年に低温センターが設立されから，その利便性向上もあって，低温科学研究の分野はより学内の広い範囲へと広がっていった。開設以前の金研，通研，理学部，工学部に，教養部，科研，非水溶液化学研究所（非水研）が加わり，それぞれ核断熱消磁・光物性，微粒子磁性・重い電子系，分子物質の光物性等が研究されるようになった。その後 1980 年代に入ると，歯学部（1980 年），医学部，抗酸菌病研究所（1983 年），薬学部（1986 年）といった部局も液体ヘリウムを利用するようになった。そこでは液体ヘリウムは極低温の基礎研究ではなく，SQUID（超伝導量子干渉計）といった超伝導デバイスや，MRI（NMR-CT）や NMR（分子構造解析用）装置内の超伝導マグネットを冷却する手段として使われるようになった。

低温センター 20 周年記念誌（1991 年）に金研の増本健先生（第 7 代低温センター長）が「液体ヘリウムは，かつては低温科学研究に携わる人達だけの秘境の霊泉でしたが，液体ヘリウムの利用は今では広く一般の科学研究における必須の実験手段になって来ているのではないのでしょうか」と述べられている[14]。つまり低温センター開設 20 年後には，当初基礎研究の一部でしかなかった低温科学の分野が，低温の素子やマグネットといった機器開発へ使われ，やがてはそれらを組み入れた低温機器利用を含む分野まで広がったことになる。

1996 年に極低温科学センターに改組されてからも，上記の分野広がりには維持されつつ，液体ヘリウムを使った実験数は増加した。図 11 に 2020 年の東北大学における研究テーマの分布を示す。物性基礎が全体の約 50%，物性応用と材料研究が合わせて約 25% を占めている。化学・生物・薬学・農学研究が 15% と比較的大きな割合となるが，このほとんどが NMR に利用されている。数は少ないが，医学・医療関係（1%）や素粒子・原子核・放射光（0.5%）にも，守備範囲は広がっている。

共同利用機器を用いた低温実験環境の提供は，極

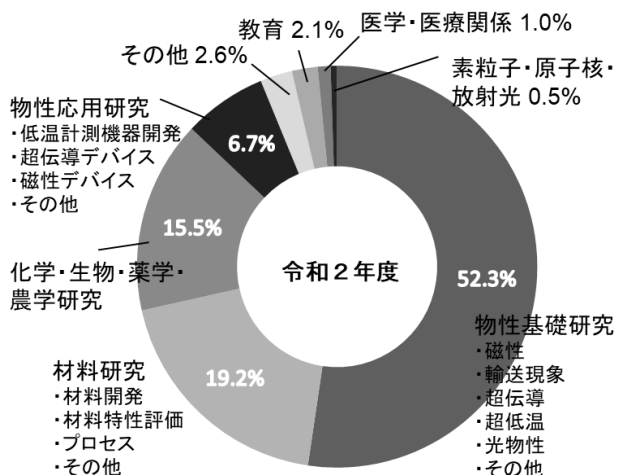


図 11 液体ヘリウムを利用した研究テーマ分布

低温科学センター改組後もセンターの液体ヘリウム供給と並ぶもう一つの柱となる業務であった(2006年の法人化後、共同利用の部分は解除されたが、ユーザーの強い要望もあり現在でも実質的には継続されている)。上述の通り、低温センターの時代では10Tの超伝導マグネットや希釈冷凍機はその主力機器であったが、低温実験装置の普及やヘリウム供給能力の大幅な向上とともに、10T以上の磁場を発生する装置は一般の研究室レベルでも所有可能となり、1K以下の極低温に到達可能な研究室も珍しく無くなってきた、それとともに、センターの共同利用頻度は減少してきた。2000年くらいから、共同利用実験室の方針を「一般の研究室では長期維持管理が難しい装置を集中管理して使いやすくする」、つまり低温を必ずしも専門としない研究室へターゲットを変更し、実験室の再整備を進めてきた。現在では、共同利用設備として、SQUID磁化測定装置(MPMS)2台、SQUID顕微鏡システム、リークディテクター2台、9/11T超伝導マグネット、トップローディング式³He冷凍機、ファラデー型マグネット付³He冷凍機、ベクトル超伝導マグネットシステム、小型希釈冷凍機が整備されている。特にSQUID磁化測定装置、各種超伝導マグネット、希釈冷凍機の利用頻度は高く、夏期と冬期の休業期間を除いて、常に実験室で誰かが実験している状況に戻ってきている。この状況は今後の新既学内低温研究者開拓へのきっかけとなるかもしれない。

4. ヘリウムを取り巻く環境の変化

「ヘリウムの一滴は血の一滴」とは、1952年当初

から低温センター設立後もしばらくの間、研究者の間で使われてきた教訓である。これは当時ヘリウムガスの入手が難しく[3]、その貴重なヘリウムを苦勞して液化していたわけであるから、領けることである。当時の先生方の話を聞くと、液体ヘリウムの供給は、朝から15分刻みのスケジュールで行われ、15分経ってもヘリウムが装置に溜まらない時は、予冷不足・技術不足として中断されるという厳しいものだったらしい[15]。いわば供給者主導でヘリウム実験が行われたと言ってよいであろう。筆者が低温の研究を始めた1980代後半には、研究室の先生から昔話として聞いてはいたが、すでに「血の一滴」という意識は薄れていたように思う。

一方、現在の状況を見るとヘリウムの注文は極低温科学センターのホームページ上でいつでもでき、100L単位で供給日や時間も指定して入手できる。センターの技術職員が、利用者の要望に応じて準備する、利用者主導の体制となり、液体ヘリウムを使った極低温実験はかなり身近になったと感じる。特に物性科学研究では、液体ヘリウムは研究に必要なインフラの一つと言われるまでになっている。

ところが、近年「ヘリウム危機」と呼ばれるヘリウムの入手困難な状況が幾度となく生じるようになってきた。現在世界中で出回っているヘリウムは天然ガスの副産物として産出され、0.3~1%のヘリウム濃度の天然ガスを低温分離精製することによって得られるものである(昔はモナズ石中にあるヘリウムを高温で熱することにより抽出して得ていたらしい)。しかしヘリウムを含む天然ガス田は世界中でも米国(57%)、カタール(28%)、アルジェリア(9%)、オーストラリア(3%)、ロシア(2%)、ポーランド(1%)といった限られた場所にしかなく(括弧内の数字は2018年の(株)ガスレビューの発表による産出割合)、日本はヘリウムの調達を100%輸入に頼っている。天然ガス田があればそこに必ずヘリウムが存在するのではなく、分子が小さく軽いため透過しやすいヘリウムを溜め込むための、特殊な岩盤構造を持ったガス田にしかヘリウムがないのが実情である。日本は過去には米国から95%を輸入していたが、2018年に予定された米国土地管理局(BLM)での備蓄ヘリウム輸出終了を見越して、カタールにその軸足を移しつつある。2021年の財務省統計によると米国から54%、カタールから44%の輸入へと変化している。いずれにせよ日本

におけるヘリウムの入手は国際情勢に左右される不安定な要素を常に抱えていることになる。

記憶に新しいのは、2002年の米国湾岸スト、2007年の米国でのヘリウムプラントの不具合、2012年の米国での複数のヘリウムプラントの不具合と定期メンテナンス重複、2017年のカタール断交、2019年以降の需要と供給のアンバランスによるタイト化、による国内ヘリウム不足である。特に2019年以降のタイト化は、米国のシェールガス（ヘリウムを含まない天然ガス）による置き換えやBLMの民間払い出し、中国・韓国等アジア圏でのヘリウム需要国の新興等、の複合要因によるものである。この原稿を書いている2021-2022年では、これに新型コロナウイルス感染症の影響による米国コンテナ船積荷の遅延問題も重なり、学術研究用のヘリウムが国内ではほとんど入手できない状況になっている。

日本におけるヘリウムの用途は、本稿の主題である低温（冷却）だけでなく、多岐にわたっている。図12に2021年の国内ヘリウム販売実績の内訳を示す（日本産業・医療ガス協会の発表による）。液体としての利用は医療分野における磁気共鳴画像イメージング（MRI、16%）であり、液体ヘリウムが磁気共鳴現象に不可欠な強磁場を発生させる超伝導マグネットの冷却に使用される。一方、ヘリウムはガスとしても半導体（17%）や光ファイバー（9%）の製造プロセスに欠かせないものとなっている。これはヘリウムガスの持つ高い熱伝導性や化学的安定性（反応がないこと）による。その他、ヘリウムの原子サイズが小さい（小さな穴でも透過することや天然の空気にはほとんど含まれない（質量分析しやすい）こと）を利用して、リークテスト（13%）にも広く使われている。溶接や分析、バルーン・飛行船、その他も含めると、ガスとしてのヘリウム用途が75%以上を占めることになる。

液体ヘリウムの学術研究利用に戻ると、その国内販売量は全体の5%程度にしかならない（図12中の低温工学がこれに相当）。研究機関にはヘリウム液化システムが設備されている所も多く、蒸発したガスを回収して再液化していることから、実際の使用量として比較したら、その割合は30~40%程度まで増えると予測されている。とはいえ「ヘリウム危機」と言える現状において、医療と産業（経済）を優先させれば、もともと商業的需要の小さい学術研究にヘリウムが回ってこないことは致し方ない

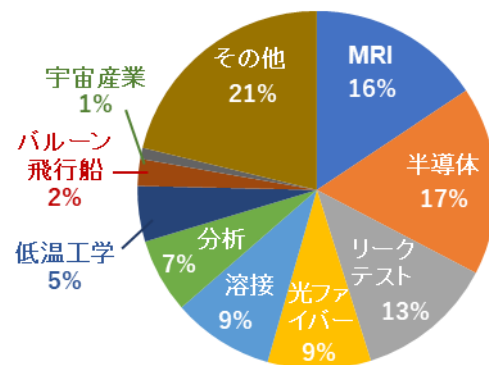


図12 2021年国内ヘリウム販売量の内訳（日本産業・医療ガス協会の報告データを集計）

ことなのかもしれない。低温科学研究が過去だけでなく未来においても産業に多大な影響をもたらすこと（例えば、MRI、量子コンピュータ、リニア新幹線、核融合炉等々）を考えると、この危機の中でもなんとか低温科学の火が絶えないようにさせたいものである。様々の方面から支援・協力を低温関係者の一人として切に願っている（2019年12月に「ヘリウム危機」に臨んでの緊急声明が、日本の6学会、2協議会、40研究機関の共同で発表されている[16]）。

一方で石油と同様にヘリウムも掘り続けると近い将来（30年~40年後）枯渇してしまう、というより根本的な危機も囁かれて久しい。この場合、(i)新たなヘリウム生産技術、もしくは(ii)ヘリウムの代替となる原子・分子を使った技術、の開拓が必要であろう。(i)に関しては、例えば大気中に含まれる微量（500ppm程度）のヘリウムを採取する方法や将来的には核融合の副生成物として発生するヘリウムを採取する方法等が可能性としてはある。しかしこれらは大量生産には向かず、かつコストのかかる方法であることから有望とは言えないかもしれない。新たな技術の出現に期待している。

(ii)に関して言えば、絶対0度付近の極低温環境を得るための寒剤としてのヘリウムの代替はない。現在使われている主な寒剤は、液体酸素（大気圧での沸点90K）、液体窒素（77K）液体水素（20K）があるが、これを減圧して（蒸気圧を下げ）さらに冷却しようとしても、3重点（酸素で54K、窒素で63K、水素で14K）で固化してしまうため、それより低温に達することが難しい。ヘリウムには

量子効果の影響で、この3重点がないことが鍵となっている（ただし、液体水素は20 K以上の環境で十分な場合（例えば高温超伝導体をつかった応用等で）、冷却に使用した後、蒸発ガスを発電や燃料電池等のクリーンエネルギーに変換できるため、低温とエネルギー輸送を組み合わせた応用に発展できそうである）。一方、半導体や光ファイバー作製プロセスに不可欠なガスとしてのヘリウム の代替え技術も、模索されてはいるが見つかっていない。上述のようにヘリウムガスの高い熱伝導性と化学的不活性さといった特徴が必要なわけだが、両方を同時に満たす代替え元素はないというのが現状であろう。

以上のようにヘリウムは低温科学研究だけでなく様々な用途（特に産業面）で利用されているが、それを取り巻く入手環境は、これからも安泰とはいえない。筆者が関係する低温科学研究といった比較的小さな利用規模で考えると、上述のような国際情勢や資源問題に左右されないためには、研究機関において100%に近いヘリウムリサイクル率を実現することが理想であろう（現状、東北大学では91%で上げ止まりとなっている）。貯蔵能力も含めたヘリウム液化システムが輸入量変動に対するバッファとなることも期待できる。そうすると今以上の利用者への啓蒙と回収設備の徹底的な管理が求められ、「ヘリウムの一滴は血の一滴」に近い教訓が戻る時代が再び来るのかもしれない。

5. おわりに

東北大学片平地区を中心とした、日本の低温科学発祥の地としての、液体ヘリウム供給体制の歩みと研究の歴史と現状を振り返ってきた。筆者が東北大学で職を得たのは、1999年であり、それ以前から今日に渡る90年以上の歴史は、過去の文献や先輩諸氏から伝え聞いた事象を中心にして文章にした。十分注意して、調べたつもりではあるが、正確な史実を反映していない箇所も残っているかもしれない。特に初代、2代目のヘリウム液化機を導入するまでの経緯は、本稿に登場する先生方だけでなく様々な方の関与があり、よりドラマチックな展開があったと聞く（本稿ではそこまで踏み込めなかった）。補足や修正部があればご指摘いただければ幸いである。

近年、GM冷凍機やパルス管冷凍機といった冷凍機の進歩と普及により、液体ヘリウムを消費しなく

ても、電気さえあれば4K以下の極低温環境が得られるようになった。これらの冷凍機では動作流体としてヘリウムが使われるが、閉じたガス回路内で使われるため実質的なヘリウム消費にはつながらない。実際、医療現場ではMRI装置に対して冷凍機を接続して、蒸発したヘリウムガスを液体に再凝縮させるシステムが普及しつつある。実際、図12におけるMRIの割合は2018年度では19%であり減少傾向にある。一方、東北大学の現状を見ると、冷凍機を導入する研究室の数は増え、液体ヘリウムの需要は減少するものと予測されたが、依然としてその兆しは見えない。冷凍機そのものが高価なこともあるが、装置の維持に必要な電気料金やメンテナンスにかかる費用がネックになっているようだ。ヘリウム液化機で大量生産することによるコストダウンや、それぞれの実験方法の利点と欠点（例えば、冷凍機では液体ヘリウムが不要であるが、冷えるのに時間がかかり、装置の構造も制限される）を勘案すると、今後液体ヘリウムと冷凍機をつかった実験装置の比率はある値でバランスするのではないかと予測している。

幸いなことに、東北大学極低温科学センター（片平地区）では、2022年3月に5代目となる液化システム（230 L/h）が導入される。青葉山地区では、2023年度の稼働を目指して次世代放射光施設の建設が進められており、ここでの液体ヘリウム供給も極低温科学センター（青葉山地区）がサポートすることになっている。これに伴って、学外へのヘリウム液化サービスに向けた体制を整えつつある。ヘリウム不足の続く昨今において、東北大学のヘリウム供給・回収システムの機能が大学内だけでなく、学外（特に東北地方の地域産業）にも有効活用される時代がくることを期待している。

謝辞

本原稿の作成にあたって、佐々木孝彦先生（金研教授、極低温科学センター長）から様々な資料の提供をいただいた。これらの資料には、以前に退職された武藤芳雄先生と小林典男先生（いずれも金研教授）が研究室に残されたものも多く含まれる。ここに感謝します。

[本稿について] 本稿は、2021年に郡山で開催された日本伝熱シンポジウムのオーガナイズドセッション「人と熱との関わりの足跡」におけるご講演

に修正・加筆して頂いたものである。ご講演と本稿のご執筆に心から感謝したい。(熱の科学技術史研究会)

参考文献

- [1] 神田英蔵, 低温 40 年の回顧と反省, 物性 1972 年 1 月号, (1972) 1-1.
- [2] 袋井忠夫, わが国における低温物理研究の起源, 低温工学, **3-5** (1968) 240.
- [3] 武藤芳雄, 低温研究発祥の地・仙台, 低温工学, **33-6** (1998) 354.
- [4] 小林典男, 金属材料研究所における低温研究の歩み, 金属材料研究所創立百周年記念誌, (2017) 201.
- [5] 神田英蔵, 軌道にのった極低温の実験研究, 科学, **25-2**(1955) 59.
- [6] 長崎誠三, ヘリウムはなぜ液化できなかったか?, 固体物理, **13-10** (1978) 614.
- [7] 青山新一, 講義 XI, 金属の研究, **12** (1935) 282.
- [8] 青山新一, 液体ヘリウム温度による低温の研究, 科学, **9-12** (1939) 445.
- [9] 渋谷喜夫, 思い出と所感, 低温工学, **10-1** (1975) 23.
- [10] 丹野武, 河野三尾留, 熱き心をもって, 東北大学低温センター15周年記念誌, (1986) 9.
- [11] 小林典男, 低温センターが生まれた頃, 東北大学極低温科学センターだより, **12** (2021) 12.
- [12] 佐藤常夫, 液体ヘリウムの供給状況, 東北大学低温センター5周年記念誌, (1976) 3.
- [13] 研究部門・研究施設の歴史, 金属材料研究所創立百周年記念誌, (2017) 69.
- [14] 増本健, 東北大学低温センター20周年にあたって, 東北大学低温センター20周年記念誌, (1991) 1.
- [15] 深瀬哲郎, 液体ヘリウム事情今昔, 東北大学極低温センターだより, **2** (2001) 1.
- [16] 例えば, 日本物理学会ホームページでの声明, <https://www.jps.or.jp/information/2019/12/helium.php>

最近のできごと

1. 片平地区への希釈冷凍機の移設

低温科学部（片平地区）では、理学研究科より希釈冷凍機を譲り受けることになり、2022年7月にその移設を完了しました。装置が比較的大型であったこともあり、移設に関しては金研と理学研究科双方の関係する研究室だけでなく、用度事務の方々にも大変お世話になりました。また移設期間が理学研究科の外壁工事と一部重なり、施設関係者にも特別なご配慮をいただきました。移設は大きな事故もなく解体、移動、再組立と順調に進み、30 mKまでの冷却テストにも成功しています。この装置はミキシングチェンバー（混合器）内に試料を入れるタイプの希釈冷凍機で、冷却能力も大きいことから、発熱を伴う極低温での輸送特性の実験にも対応できそうです。来年度からの共同研究開始を見据えて、温度計校正や周辺機器の整備を進めて行く予定です。

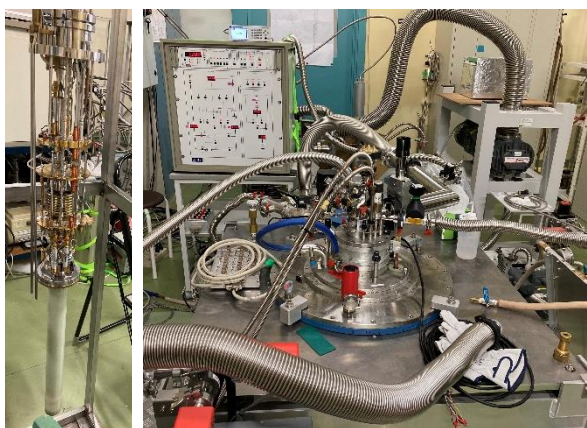


図1 移設された希釈冷凍機本体（左）とシステムの全体写真（右）

2. 青葉山地区における磁気特性測定システム (MPMS XL) と物理特性測定システム (PPMS) の移設

青葉山地区では、これまで Quantum Design 社の磁気特性測定システム (MPMS) を共同利用装置



図2 移設された MPMS XL（左）と PPMS（右）装置

として運用してきましたが、この度新たに Quantum Design 社の MPMS XL と、物理特性測定システム (PPMS) を譲り受けることになりました。これにより、従来の MPMS に加え、MPMS XL と PPMS の運用を行っていくことを予定しております。このため、MPMS の利用が一時的に停止になることにより、利用者の方々にはご迷惑をおかけ致しました。移設作業においては、大きな問題も発生せず、無事冷却ができている状況であります。現在、共同利用開始に向けた準備を進めております。

3. 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4年7月27日および28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3年ぶりに現地での開催となりました。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27日の部に参加し、液体窒素を用いて様々なものを冷却するデモンストラーションを行いました。



図3 オープンキャンパスでの様子。当日はたくさん
の高校生にデモンストレーションと大学院生に
よる解説を楽しんで頂きました

4. 出前授業

極低温物理学部の木村憲彰教授が、令和3年11月11日に宮城県仙台第一高等学校にて、高校1,2年生を対象として「極低温の世界」というテーマで出前授業を行いました。

5. 寒剤講習 e-learning

青葉山地区の極低温物理学部では、寒剤講習のe-learningを開始致しました。以下のURLから学内であれば参加可能です。

<https://classroom.google.com/c/NDQ3NTI4NzAxMDc0?cjc=34znnai>

6. 職員の退職

令和4年3月づけで金属材料研究所の丹野伸哉氏が退職致しました。

本人からの挨拶

退職の挨拶 丹野伸哉技術職員

2022年3月をもちまして、37年間勤めました金属材料研究所（極低温科学センター）を早期退職いたしました。退職までの間、時間が足りなかったこともあり、残務整理や引継ぎ、退職の連絡が十分に出来ず、行き届かなかった皆様には申し訳ありませんでした。高校時代に勉強好きでなかった自分が東北大学に就職でき、さらに37年も勤務するとは思

っていませんでした。2011年3月には東日本大震災で両親と実家がなくなるということもありましたが、今自分が生きていることを幸せに感じている次第です。今後は健康に気をつけて暮らしていけたらと思います。長い間本当にお世話になりました。また、お付き合いしていただきましてありがとうございます

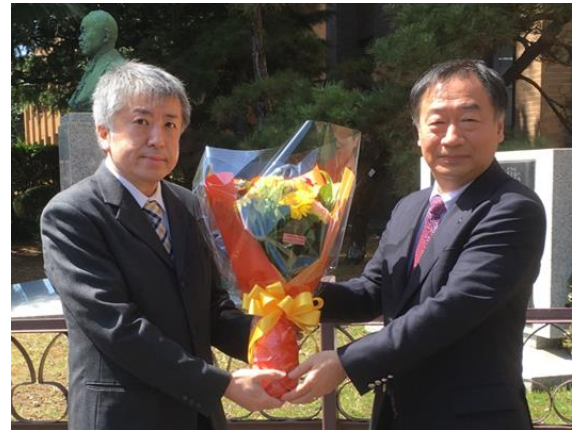


図4 丹野伸哉技術職員（左）と佐々木センター長（右）（2022.3.28本多記念館前で撮影）

ございました。皆様も健康第一でお過ごしください。

7. 新任職員の紹介

令和4年4月より極低温物理学部に水上雄太准教授が着任いたしました。



水上雄太准教授

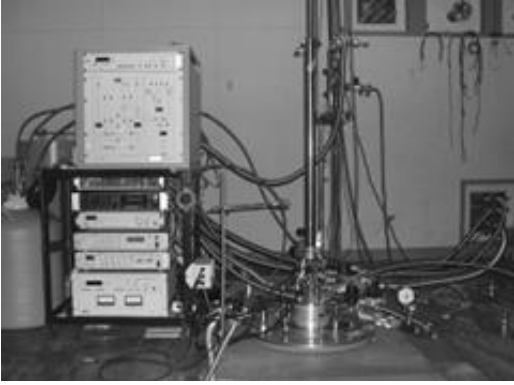
本人からの一言


令和4年4月1日付けで極低温物理学部の准教授として着任致しました水上雄太と申します。私は、京都大学大学院理学研究科にて博士を取得し、東京大学大学院新領域創成科学研究科にて低温固体物性、特に超伝導や量子スピ系に対する極低温測定を行ってまいりました。低温技術を生業に研究を行ってきたなかで、日本最初の低温科学研究に端を発する東北大学極低温科学センターに着任致しましたことを大変光栄に思います。これまでの先生方の貢献を踏襲しつつ、微力ではございますがセンターに尽力させて頂きたいです。どうぞ宜しくお願い申し上げます。

センターからのお知らせ

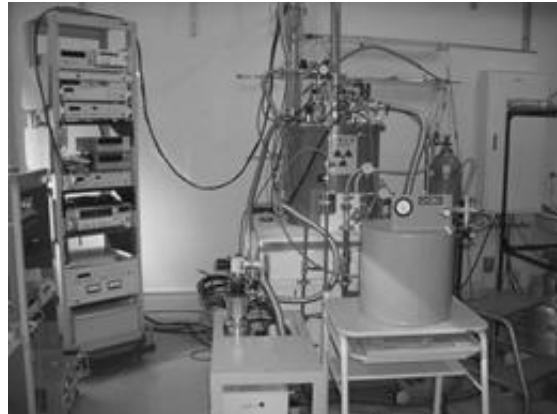
共同研究、共同利用設備一覧

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>		

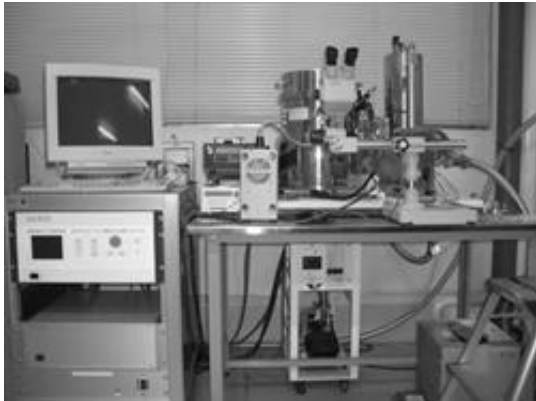


装置名	場所	分類
VSM磁化測定装置	低温科学部	共同利用
装置の説明		
装置仕様 Oxford 社 MagLab ^{VSM} 最大磁場：14T 温度範囲：3.8－300K ノイズレベル： 2×10^{-6} emu(P to P) 分解能： 1×10^{-8} emu 最大 14T までの DC 磁化の温度、磁場依存性が自動測定できます。		

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：5.5T 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：1T 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。		


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 最大出力：2kW（60kV、50mA） 封入管式ターゲット 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°） アライメント自動調整、 自動可変スリット モノクロメータ カウンタ：NaIシンチレータ（700000cps以上） 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） 解析：自動ピークサーチ、多重ピーク分離、 定性分析（PDF2カード） 結晶系決定、格子定数精密化等</p>		
		


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		
<p>装置仕様</p> <p>セイコーインスツルメンツ（株）SQM200 温度範囲：2-90K センサーコイル径：10 μm 空間分解能：$2 \times 2 \mu\text{m}^2$程度</p> <p>試料表面の磁化（磁気）分布測定が可能です。</p>		
		

センターからのお知らせ

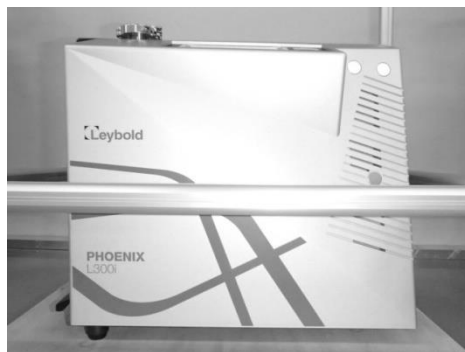
貸出機器一覧

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</p> <p>真空およびスニファーモードでの検出可能</p> <p>最高検知感度：5×10^{-13} Pam^3/s</p> <p>インレットポート圧力：2500Pa 以下</p> <p>立ち上がり方式：自動</p> <p>立ち上がり時間：3分以下</p> <p>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</p> <p>重量：44 kg キャスター付</p> <p>ディスプレイ方式：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</p> <p>真空およびスニファーモードでの検出可能</p> <p>最高検知感度：5×10^{-12} mbarl/s</p> <p>インレットポート圧力：15 mbar 以下</p> <p>立ち上がり時間：2分以下</p> <p>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</p> <p>排気性能：2.5 l/s 以上 (FINE) 0.4 l/s 以上 (GROSS)</p> <p>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 PhoeniXL300 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16mmφ短管, (2)21mmφ短管, (3)35mmφ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

2021 年度共同利用成果

<SQUID 磁化測定装置 (青葉山) >

- N. Kabeya, S. Takahara, T. Arisumi, S. Kimura, K. Araki, K. Katoh, and A. Ochiai, “Eigenstate analysis of the crystal electric field at low-symmetry sites: Application for an orthogonal site in the tetragonal crystal Ce_2Pd_2Pb ”, Phys. Rev. B **105**, 014419 (2022).
- A. Ochiai, N. Kabeya, K. Maniwa, M. Saito, S. Nakamura, K. Katoh, “Field-induced anomalous magnetic state beyond the magnetically ordered state in the slightly distorted triangular $S=1/2$ rare-earth antiferromagnet $CeZn_3P_3$ ”, Phys. Rev. B **104**, 144420 (2021).
- Kazuhiro Nawa, Yoshinori Imai, Youhei Yamaji, Hideyuki Fujihara, Wakana Yamada, Ryotaro Takahashi, Takumi Hiraoka, Masato Hagihara, Shuki Torii, Takuya Aoyama, Takamasa Ohashi, Yasuhiro Shimizu, Hirotada Gotou, Masayuki Itoh, Kenya Ohgushi, and Taku J. Sato, “Strongly Electron-Correlated Semimetal RuI_3 with a Layered Honeycomb Structure”, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 123703 (2021).

<SQUID 磁化測定装置 (片平) >

- N. Kabeya, S. Takahara, T. Arisumi, S. Kimura, K. Araki, K. Katoh, and A. Ochiai, “Eigenstate analysis of the crystal electric field at low-symmetry sites: Application for an orthogonal site in the tetragonal crystal Ce_2Pd_2Pb ”, Phys. Rev. B **105**, 014419 (2022).
- A. Ochiai, N. Kabeya, K. Maniwa, M. Saito, S. Nakamura, K. Katoh, “Field-induced anomalous magnetic state beyond the magnetically ordered state in the slightly distorted triangular $S=1/2$ rare-earth antiferromagnet $CeZn_3P_3$ ”, Phys. Rev. B **104**, 144420 (2021).
- Y. Chen, M. Sato, Y. Tang, Y. Shiomi, K. Oyanagi, T. Masuda, Y. Nambu, M. Fujita, and E. Saitoh, “Triplon current generation in solids”, Nature Communications **12**, 5199 (2021).

- Mayu Kibune, Shunsaku Kitagawa, Katsuki Kinjo, Shiki Ogata, Masahiro Manago, Takanori Taniguchi, Kenji Ishida, Manuel Brando, Elena Hassinger, Helge Rosner, Christoph Geibel, and Seunghyun Khim, “Observation of Antiferromagnetic Order as Odd-Parity Multipoles inside the Superconducting Phase in CeRh_2As_2 ”, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 057002 (2022).
- K. Ikeuchi, S. Wakimoto, M. Fujita, T. Fukuda, R. Kajimoto, and M. Arai, “Spin excitations coupled with lattice and charge dynamics in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ”, *Phys. Rev. B* **105**, 014508 (2022).
- Y. Shimura, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Osato, R. Yamamoto, Y. Kusanose, K. Umeo, Masaki Fujita, T. Onimaru, and T. Takabatake, “Magnetic refrigeration down to 0.2 K by heavy fermion metal YbCu_4Ni ”, *J. Appl. Phys.* **131**, 013903 (2022).
- S. Asano, K. Ishii, D. Matsumura, T. Tsuji, K. Kudo, T. Taniguchi, S. Saito, T. Sunohara, T. Kawamata, Y. Koike, and M. Fujita, “Distinct variation of electronic states due to annealing in T' -type $\text{La}_{1.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CuO}_4$ and Nd_2CuO_4 ”, *Phys. Rev. B* **104**, 214504 (2021).
- D. Ueta, M. Yoshida, T. Kobuke, Y. Ikeda, A. Nakao, T. Moyoshi, K. Munakata, Y. Liu, T. Masuda, and H. Yoshizawa, “Oval-cycloidal Magnetic Structure with Phase-shift in the Non-centrosymmetric Tetragonal Compound CePdSi_3 ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 114702 (2021).
- M. Fujita¹, T. Taniguchi¹, T. Wang¹, S. Torii, T. Kamiyama, K. Ohashi, T. Kawamata, T. Takamatsu, T. Adachi, M. Kato, and Y. Koike, “Reduction Annealing Effects on the Crystal Structure of T' -type $\text{La}_{1.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CuO}_{4+\alpha-\delta}$ ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 105002 (2021).
- D. Ueta, T. Kobuke, H. Shibata, M. Yoshida, Y. Ikeda, S. Itoh, T. Yokoo, T. Masuda, and H. Yoshizawa, “Crystalline Electric Field Level Scheme of Non-centrosymmetric CeRhSi_3 and CeIrSi_3 ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 104706 (2021).
- D. Ueta, M. Yoshida, T. Kobuke, Y. Ikeda, T. Masuda, and H. Yoshizawa, “Complex Magnetic Phase Diagram in the Non-Centrosymmetric Compound CePtSi_3 ”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 064712 (2021).
- H. Huang, S.-J. Lee, Y. Ikeda, T. Taniguchi, M. Takahama, C.-C. Kao, M. Fujita, and J.-S. Lee, “Two-Dimensional Superconducting Fluctuations Associated with Charge-Density-Wave Stripes in $\text{La}_{1.87}\text{Sr}_{0.13}\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{O}_4$ ”, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 167001 (2021).

- H. Yamase, Y. Sakurai, M. Fujita, S. Wakimoto and K. Yamada, “Fermi surface in La-based cuprate superconductors from Compton scattering imaging”, *Nature Commun.* **12**, 2223 (2021).
- Y. Nambu and S. Shamoto, “Neutron Scattering Study on Yttrium Iron Garnet for Spintronics” (Special Topics: Renewed Interest in the Physics of Ferrimagnets for Spintronics), *Journal of the Physical Society of Japan* **90**, 081002 (2021).
- 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 PrAu₂Si₂”, *J. Phys.: Condens. Matter*, **34** 135805 (2022).
- Chihiro Tabata, Kenji Shirasaki, Ayaki Sunaga, Hironori Sakai, Dexin Li, Mariko Konaka and Tomoo Yamamura, “Supercritical hydrothermal synthesis of UO_{2+x}: stoichiometry, crystal shape and size, and homogeneity observed using ²³Na-NMR spectroscopy of (U,Na)O_{2+x}”, *CrystEngComm*, **23** 8660 (2021).
- T. Eto, X. Xu, T. Ito, F. Honda, D.X. Li, G. Oomi, F. Nakamura, H. Masumoto, R. Kainuma, T. Kanomata, “Martensitic and magnetic transitions in Ni_{2+x}MnGa_{1-x} ferromagnetic shape memory alloys”, *J. Alloys Compd.* **871** 159480 (2021).
- K. Nakamura, A. Miyake, X. Xu, T. Omori, M. Tokunaga, R. Kainuma, Martensitic Transformation and Metamagnetic Transition in Co-V-(Si, Al) Heusler Alloys, *Metals* **11**(2) 226 (2021).
- Sambe, K.; Hoshino, N.; Takeda, T.; Nakamura, T.; Akutagawa, T., “Crystal Structures and Physical Properties of (M⁺)(Crown Ethers)_x(TCNQ)_y Salts with M⁺ = Li⁺, Na⁺, K⁺, Rb⁺, and Cs⁺”, *Cryst. Growth Des.* 2021, **21** (10), 5928–5942.
- Hoshino, N.; Akutagawa, T., “Ionic Conductivities Induced by the Partial Solvent Molecule Removal from Diruthenium(II,III) Adamantanecarboxylate Salts”, *Cryst. Growth Des.* 2021, **21** (8), 4640–4646.
- H. Kijima-Aoki, Y. Endo, T. Miyazaki, T. Nojima, K. Ikeda, N. Kobayashi, S. Ohnuma, and H. Masumoto, “Shape effect of Co nanoparticles on the electric and magnetic properties of Co-SiO₂ nano-granular films” *AIP Advances* **12**, 035229 (2022).
- Tahta Amrillah, Daichi Oka, Hirokazu Shimizu, Satoshi Sasaki, Daichi Saito, Kenichi Kaminaga, and Tomoteru Fukumura, “Rock salt-type HoO epitaxial thin film as a

heavy rare-earth monoxide ferromagnetic semiconductor with a Curie temperature above 130 K” Appl. Phys. Lett. **120**, 082403 (2022).

- Hirokazu Shimizu, Daichi Oka, Kenichi Kaminaga, Daichi Saito, Taku Yamamoto, Nobuto Abe, Noriaki Kimura, Daisuke Shiga, Hiroshi Kumigashira, and Tomoteru Fukumura, “Rocksalt-type PrO epitaxial thin film as a weak ferromagnetic Kondo lattice”, Phys. Rev. B **105**, 014442 (2022).
- “粒子形状を制御したナノグラニューラ膜の巨大保磁力発現機構の検討”
青木 英恵*, 打越 雄央, 曹 洋, 野島 勉, 遠藤 恭, 増本 博, 川井 哲郎,
大沼 繁弘 IEEJ, MAG-21-135(2021)
- H. Kijima-Aoki, Yasushi Endo, Takamichi Miyazaki, Tsutomu Nojima, Kenji Ikeda, Nobukiyo Kobayashi, Shigehiro Ohnuma and Hiroshi Masumoto, “Shape effect of Co nanoparticles on the electric and magnetic properties of Co-SiO₂ nano-granular films”, AIP Advances, (2022) accepted.

<ベクトル超伝導マグネット>

- J. Shioyai, K. Fujiwara, T. Nojima, and A. Tsukazaki, “Three-dimensional sensing of the magnetic-field vector by a compact planar-type Hall device”, Commun. Mater. **2**, 102 (2021).

<X線回折装置>

- N. Jiang, Y. Nii, H. Arisawa, E. Saitoh, J. Ohe, and Y. Onose, “Chirality memory Stored in Magnetic Domain Walls in the Ferromagnetic State of MnP”, Phys. Rev. Lett. **126**, 177205 (2021).
- M. Akaike, Y. Nii, H. Masuda, and Y. Onose, “Nonreciprocal electronic transport in PdCrO₂: Implication of spatial inversion symmetry breaking”, Phys. Rev. B **103**, 184428 (2021).
- Y. Nii, Y. Hirokane, T. Koretsune, D. Ishikawa, A. Q. R. Baron, and Y. Onose, “Effect of symmetry breaking on short-wavelength acoustic phonons in the chiral magnet MnSi”, Phys. Rev. B **104**, L081101 (2021).

- 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 $\text{Tb}_{2+\delta}\text{Ti}_{2-\delta}\text{O}_7$ ”, *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3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15万5千リットルで、昨年度より約1割減少しました（図1、表1参照）。これは全体的な減少傾向に加え、低温科学部（片平地区）の液化システムの更新に伴う液体ヘリウム供給停止（期間：2021年12月-2022年3月）が大きく影響しているものと考えられます。

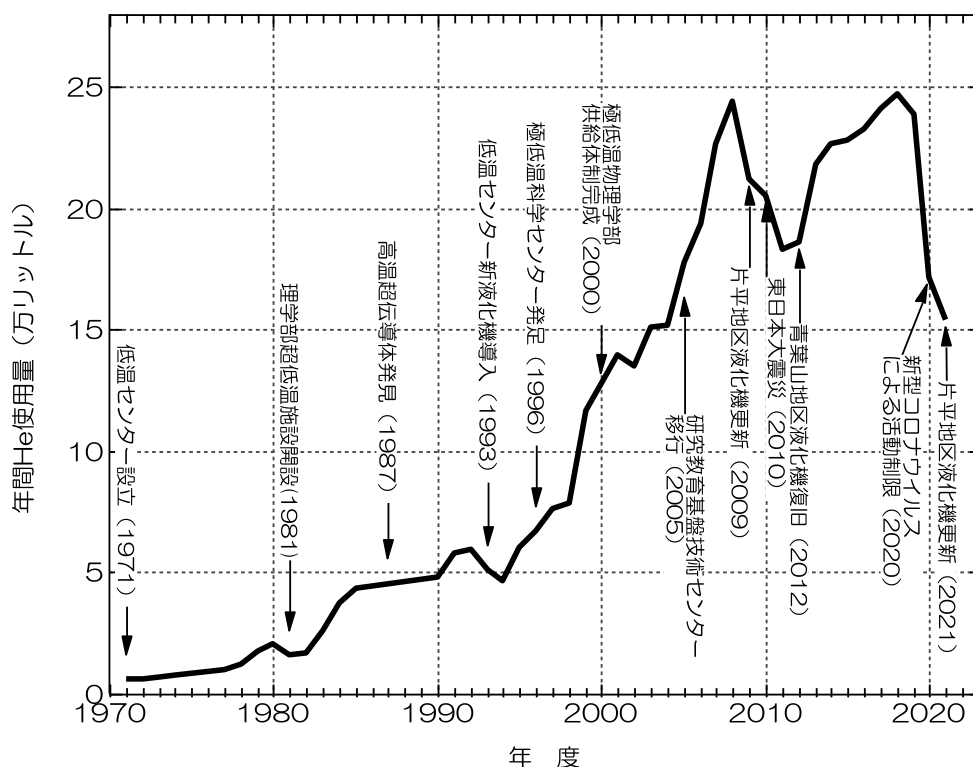


図1. 液体ヘリウムの年間使用量の推移

表1. 最近5年間の液体ヘリウム使用状況

部局名	平成29年	平成30年	令和元年度	令和2年度	令和3年度
理学研究科	67,165	51,634	43,129	33,949	43,297
薬学研究科	783	812	771	781	768
工学研究科	21,592	29,032	19,778	7,986	11,022
金属材料研究所	108,138	111,016	107,906	69,968	58,889
電気通信研究所	399	785	992	2,519	2,439
多元物質科学研究所	18,411	21,779	19,932	22,052	12,038
極低温科学センター	9,577	17,367	20,657	10,764	7,219
学際科学フロンティア研究所	30	0	0	127	228
材料科学高等研究所	12,461	12,350	23,045	19,531	16,703
東北メディカル・メガバンク機構	2,773	2,790	2,811	2,863	2,854
国際集積エレクトロニクスセンター	—	—	—	1,140	—
合計	241,328	247,564	239,021	171,681	155,457

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3,542円/リットル(令和4年度前期は2750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3年1月～令和3年12月の期間平均92%（片平地区：90%、青葉山地区：95%）でした。また運営委員会で承認された令和3年度における回収率に応じたヘリウム料金の計算式は

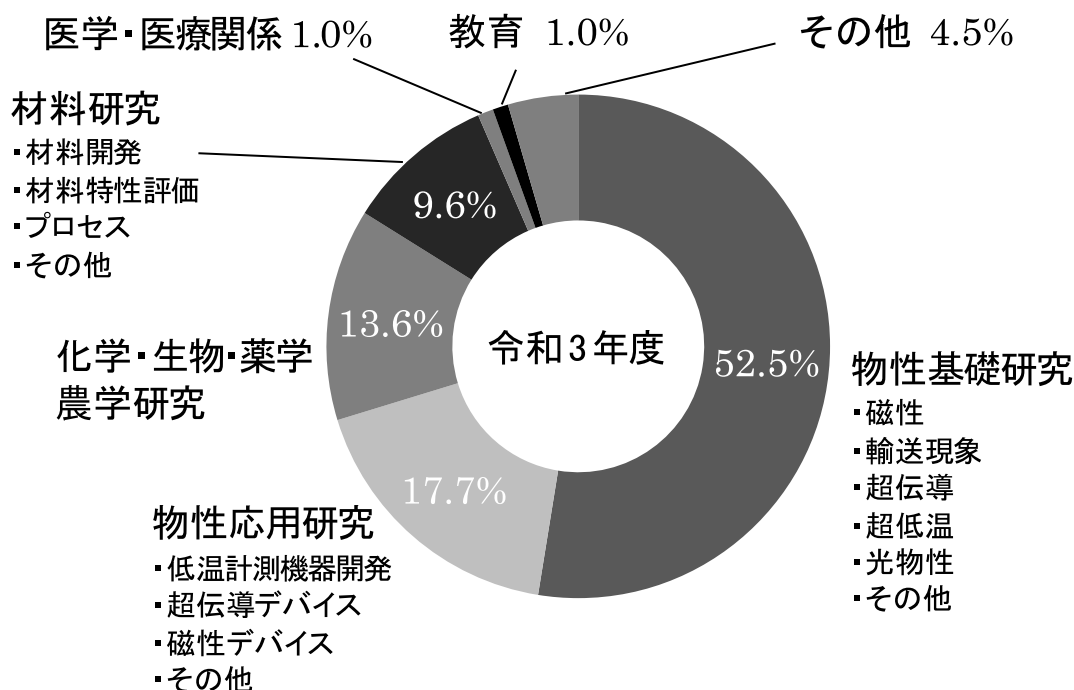
$$1 \text{ リットル当りのヘリウム利用価格(¥)} = 120 + 1860 \times \{100 - \text{回収率}(\%) \} / 100$$

となり、この方式により計算すると令和3年度の平均価格は306円/リットルとなりました（R2年：331円、R元年：331円、H30年：261円、H29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3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。

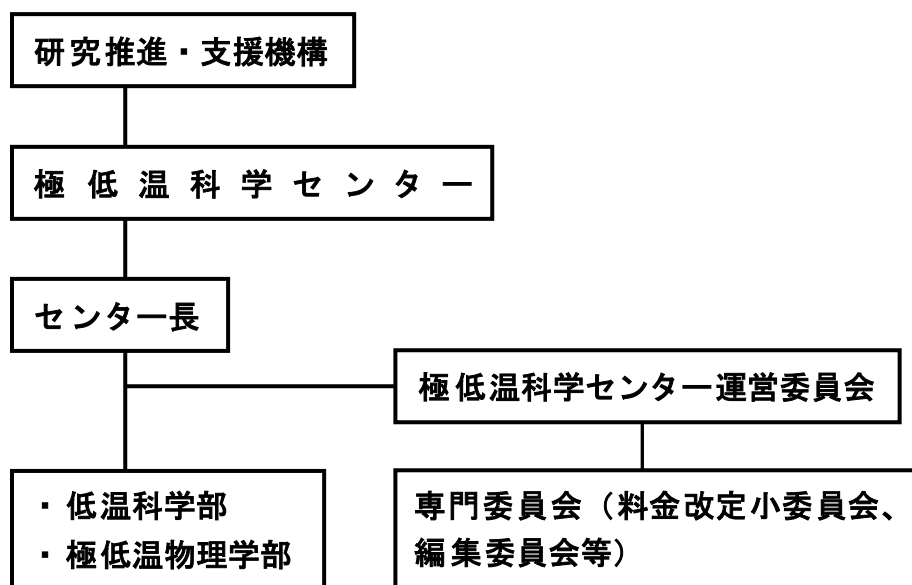


図：液体ヘリウムを利用した研究のテーマ分析

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	R3 年度論文
理学研究科	46	115	74
薬学研究科	14	48	8
工学研究科	46	80	42
金属材料研究所	52	63	115
多元物質科学研究所	56	71	15
電気通信研究所	9	14	33
材料科学高等研究所	18	16	20
東北メディカル・メガバンク機構	15	0	8
学際科学フロンティア研究所	1	1	0
計	257	408	315

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