

! " " # \$ % & ' ( ) \* + , & - . - / &  
0 + 1 \* 2 ( " 3 4 & ' ( 5 ( \$ + 4 6 & 0 ( " , ( + &  
7 6 ( & 8 " 3 9 ( + 5 3 , 1 & \* : & 7 \* ; 1 \* &

!! "# \$ % & \$ '

!

" # \$ % & ' ( %) \* + , - .

/ O 1

#

#

#

#

#

#

#

( ) ( # \* + + , - . # ) / ! 0 1 2 # 3 4 3 % 5 # 6 0 . , 7 / # % 8 # 9 : ; 2 0 < / 1 5 # 3 4 3 3 = #  
( 1 > 0 ? / + ; # ) / A / - 1 ; B # ( / + 2 / 1 5 # C B / # D + 0 E / 1 A ? 2 > # O F # C O G > 0 #

# ミリケルビン量子プラットフォームの開設

低温科学研究センター・研究開発部門

福山 寛

## ミリケルビン量子プラットフォームについて

量子コンピュータの基本素子である量子ビットにはさまざまな方式が提案されているが、近年実用化への期待が急速に高まっているのが、ミリケルビン (mK) の極低温下でジョセフソン接合をもつ超伝導素子の量子もつれ状態をマイクロ波で制御・観測する超伝導方式である。あるいは、表面微細加工技術を使った次世代の高感度量子センサの開発研究が素粒子物理学、宇宙科学、物質科学、医療をはじめ広い分野で近年活発となり、ここでもできるだけ低温でセンサ素子を動作させる必要がある。今日、mKの実験技術は従来の低温物理学や物性物理学の枠を超えて、先端科学のユビキタスな素養の一つとなりつつある。

低温科学研究センターでは2021年3月、これら広い意味の量子技術のハードウェア研究開発に資する新しい共同利用装置群を新規導入した。装置群は主に、 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  希釈冷凍機、極低温マイクロ波エレクトロニクス、磁気特性測定システムの3つからなる。この導入は文部科学省「先端研究設備整備補助事業（量子技術分野）」[1]の対象機関として東京大学が選定されたことに伴うものである。これらの設備を学内にとどまらず学外の研究教育機関や企業も含めて広く共同利用に供し、mK実験技術の普及教育を図る目的で「ミリケルビン量子プラットフォーム」（略してmKプラットフォーム）を開設し、その活動を開始したので報告する。このうち、種々の素材や部品の磁気特性を測定するシステム（米国Quantum Design社製MPMS3型）については2021年6月から本格的な共同利用を開始し、すでに多くのユーザーに利用いただいている。その性能や利用にあたっての詳しい技術面の解説は既報である[2]。ここでは、2022年度からの本格的な共同利用開始を目指して整備を進めてきた希釈冷凍機を中心に紹介し、具体的にどういう研究開発に利用できそうか、学内外のポテンシャルユーザーのヒントとなるような情報を提供したい。

## 希釈冷凍機

mKプラットフォームの中心設備は10 mKの極低温を連続的に生成できる $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 希釈冷凍機（BlueFors社製LD400型）である（図1）。その動作原理を簡単に説明する。寒剤として利用される液体ヘリウム（液体 $^4\text{He}$ ）とその同位体である $^3\text{He}$ の液体は、1気圧下の沸点がそれぞれ4.2 Kと3.2 Kである。その飽和蒸気を真空ポンプで強制減圧すると沸点が蒸気圧とともに下がるので、それぞれ1.4 Kと0.3 K程度の冷凍機になる。このとき冷却力は飽和蒸気圧に比例し、飽和蒸気圧は温度の指数関数で急減するので、この方法で300 mK以下の温度は実現できない。一方、希釈冷凍機では、 $^3\text{He}$ 原子が絶対零度でも液体 $^4\text{He}$ 中に濃度6.6%まで溶け込むことができ（ $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合液）、その中で気体のように振る舞うという性質を利用する（厳密には縮退したフェルミ気体として振る舞う）。液体 $^3\text{He}$ にとって、液体 $^4\text{He}$ への混合は、蒸気圧が絶対零度でも有限かつ大きな値にとどまる“蒸発”現象のようなもので、この混合を連続的に維持できるようさまざまな工夫を凝らした装置が $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 希釈冷凍機である（詳細は[3]を参照されたい）。

本機は、最低温を生成する混合器の温度が8 mK、混合器が100 mKのときの冷却力が0.6 mWという大きな冷却能力をもつ（いずれも実測値で、冷却力は温度の2乗に比例する）。混合器温度にある実験空間は直径230 mm・高さ477.5 mmの円筒形（または直径270 mm・高さ252.5 mmの円筒形と直径270



図1 希釈冷凍機とマイクロ波エレクトロニクスの全景。右側白い円筒形真空槽内の下部（点線部）が実験空間。

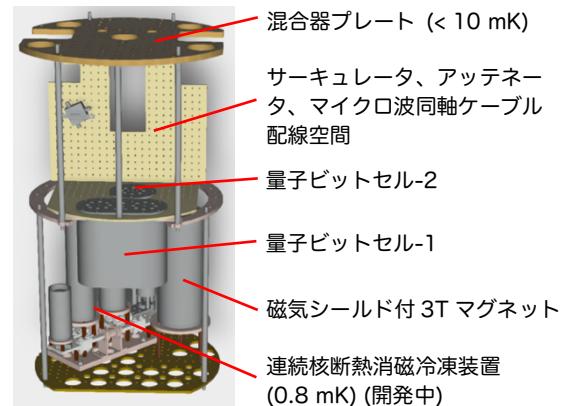


図2 希釈冷凍機内の実験空間に複数の測定装置を搭載した場合の例。

mm・高さ 220 mm の円筒形の二つの空間）と広く、その空間に実装できる装置の重量は約 10 kg である。一方で、真空槽や輻射シールドの着脱に要する時間は 2 名で 1 時間程度なので、扱いやすさも備えている。室温から最低温度までの冷却時間は 1.5～2.5 日間で、搭載する測定装置の重量に依る。反対に最低温度から室温に戻るまでも同程度の時間がかかる。本機は 4 K までの冷却にパルス管冷凍機を使ういわゆるドライタイプの希釈冷凍機であるが、液体窒素フローを併用すると初期冷却時間を 8 時間以上短縮できる。測定装置の重量が増すほど短縮できる時間は長くなる。将来的には、液体 He フローも追加して初期冷却時間をさらに短縮できるかも知れない。共同利用装置の性格上、3 ヶ月間を超えるような連続冷却能力は必須ではないが、装置自体は半年あるいはそれ以上の連続冷却ができるよう設計されている。

超伝導方式の量子コンピュータの冷却には、液体ヘリウムを寒剤とするいわゆるウェットタイプではなくドライタイプの希釈冷凍機の方が適している理由を説明する。現行方式では、量子ビット数が 10 ビット未満の装置であっても数十本のマイクロ波同軸ケーブルを室温から混合器まで導入する必要があり、クラストットのネック部の直径は優に 400 mm あるいはそれ以上になる。ウェットタイプの希釈冷凍機でここまでネック径が大きくなると、液体ヘリウム蒸発量が経済的・労力的な許容範囲を超えてしまうことは、ウェットタイプの NMR 分析装置や MPMS などのネック径が通常その 1/10 に押さえられていることから容易に想像がつく。室温部からの輻射熱や蒸発ヘリウムガスの対流による熱流入はネック径とともに急増するからである。ネック部の長さを長くして蒸発量を減らそうとしても、液体ヘリウムデューワーが長大となってしまう、特殊な実験室や多くの専任スタッフが必要となることから、設備の導入や維持のハードルは高い。これに対し、ドライタイプの場合、ネック径の増大はパルス管冷凍機の冷却力の増強や増設で補うことができる。何より、真空槽が室温部にしかないため、これを 2～3 セクションに分割することで、標準的な部屋（例えば天井高 2.6 m）に設置可能である。このメリットは大きな実験空間が必要な量子コンピュータの開発研究では特に重要である。

## マイクロ波測定エレクトロニクス

本機には、主に超伝導量子ビット実験を想定して、入力用として各温度ステージに 6～20dB のアッテネータで熱アンカーした低温マイクロ波同軸ケーブルが計 24 本室温から混合器まで配線されている。出

力用には 4 本の同軸ケーブルが混合器から室温まで配線されているが、4K ステージまでは超伝導材料 (NbTi) で製作されており、同ステージでは低温プリアンプ (LNF 社 LNC4 8C 型×2、LNC0.3 14A 型×2) とアイソレータ (LNF 社 ISISC4 8A 型×2、CIISC4 12A 型×2) が装備されている。なお、各温度ステージには未接続の SMA コネクタも 4 つずつ用意されており、ユーザー独自の低温同軸ケーブルを配線することもできる。

極低温下でのマイクロ波実験用に、局所発振器 ( $\leq 12.5 \text{ GHz} \times 12\text{ch}$ )、任意波形発生器 ( $1 \text{ GSa/s} \times 16\text{ch}$ , 14 bit)、各種シングルサイドバンド変調器、イメージ除去復調器 ( $4 \sim 8 \text{ GHz} / 30 \sim 90 \text{ MHz} \times 2\text{ch}$ ,  $8 \sim 12 \text{ GHz} / 30 \sim 90 \text{ MHz} \times 5\text{ch}$ )、デジタイザ ( $500 \text{ MSa/s} \times 8\text{ch}$ , 14 bit)、ネットワークアナライザ ( $\leq 20 \text{ GHz} \times 2$ ) 等のエレクトロニクス一式を揃えている。

このように、キャリブレーションの必要のない単一側波帯 (SSB) 方式を採用し、現状で超伝導量子ビットのマイクロ波制御・読み出し実験が 10 量子ビットまで実施できる設備になっている。測定の種類にも依るが、拡張すれば 16 量子ビット程度までは可能である。さらに、量子ビットの光情報伝達やハイブリッド量子系の研究を想定して、混合器ステージまで光ファイバー (シングルモード、波長 1550 nm) が 4 本敷設してある。必要ならば他種のファイバーケーブルも導入可能である。

## 量子物性測定

本機には、量子物性測定用に 3.0 テスラ (T) の磁場を発生する小型磁気シールド付超伝導マグネットが設置されている。ボア径は 25 mm で、発生磁場の不均一度は中心軸上長さ 6 mm にわたり  $1 \times 10^{-4}$  以下、20 mm にわたり  $1 \times 10^{-3}$  以下、50 mm にわたり  $1 \times 10^{-2}$  以下である。これを FeCoV 製の磁気シールド (外径 69 mm、高さ 170 mm) で覆うことで、シールド外への漏れ磁場を、距離にも依るが 0.1 mT 以下に遮蔽している。

このマグネット内に試料を挿入することで、10 mK・3 T の極低温・高磁場下で比熱、交流磁化率、電気伝導、熱伝導、ホール伝導など多様な熱的・磁氣的測定が可能となる。正確には、それらを必要とするユーザーと測定系を一つ一つ立ち上げている段階である。これらの物性測定をサポートする交流レジスタンスブリッジ、交流インダクタンスブリッジ、ロックインアンプ、直流及び交流電流・電圧発生器、周波数カウンターなど基本的な計測器は揃っており、ユーザーが持ち込む測定機器を接続することも可能である。

多様な測定や制御に対応するため、前述のマイクロ波同軸ケーブル以外に多彩なリード線が室温から混合器まで配線されている。具体的には、数十 MHz 以下の交流測定用としてセミリジッド同軸ケーブルが 12 本 (各温度ステージにアッテネータは装着されていない)、高周波の外来ノイズに弱い測定のために THERMOCOAX ケーブルが 12 本、リン青銅ツイストペアが 12 対 (24 本)、銅線 (高温部) と超伝導 NbTi 線 (低温部) を直列接続した低抵抗のツイストペアが 12 対 (24 本) 配線されている。

希釈冷凍機の混合器温度は 10~300 mK の範囲ならばヒーター制御だけで自由に変えられる。もっと広い 0.3~300 K の範囲も測定可能であるが、本機のような比較的大型の希釈冷凍機の場合、“高温”域の測定は初期冷却や最終昇温の際のデータ取得に限られる。熱スイッチを介することで試料のみの温度を 15 mK~4 K の範囲で自由に変えられる技術開発も、機会があれば今後進めたい。

## mK プラットフォームの運営

本設備は、量子コンピュータに直結する研究に限らず、次世代の量子ビットや量子センサ開発に資する研究やその基礎となるような量子物質の物性研究まで幅広い実験研究に利用していただける。また、東京大学だけでなく国内他機関や企業の関係者も利用できるのが大きな特徴である。設備の利用料金は、「ユーザー負担」の原則に基づき、低温科学研究センター運営委員会で適切に決められている。詳しくはウェブページ[4]をご覧ください。

希釈冷凍機の初期冷却と昇温には上記のように数日間を要するので、共同利用期間の最小単位は 1 週間とし、冷却期間の前後には測定装置の入れ替えのために 1 週間ずつの準備期間を設けている。本機がもつ大きな実験空間を活かして複数の実験装置を同時搭載し、同時測定あるいは **time sharing** などで時間的・経済的な効率を上げる試みも今後、試行する予定である（図 2 はその一例）。運営スタッフが利用開始前にユーザーと測定手法や試料の組み込み方法について、十分打ち合わせをさせていただいている。

共同利用は 2021 年 11 月から試行的に国内企業 1 社に対して実施したが、本格的には 2022 年度から始まる。

## まとめ

本稿では、動き始めた東京大学低温科学研究センターのミリケルビン量子プラットフォームの設備と運営の概要を紹介した。こうした共同利用設備は世界でもほとんど類例を見ない。できるだけ広い分野の研究者にとって使い勝手の良いものになるよう、ユーザーとの共同作業が進んでいる。「間口が広く敷居も低いしかし高性能の共同利用設備」が目指すところである。今後、その機能がどのように強化され、どのような量子技術の研究成果がそこから生まれてくるか、運営に携わる我々自身楽しみにしている。

最後に、**mK** プラットフォームの設備導入や開設は、以下のように多くの方々のご協力のもとで実現しました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。相原博昭理事・副学長、先端研究設備整備事業実施責任者の浅井祥仁教授（大学院理学系研究科）、湯本潤司教授（同）そして理学系研究科等事務部経理課経理チームの皆さまには、設備の導入にあたり多大なご尽力をいただきました。低温科学研究センター前センター長の太越慎一教授（大学院理学系研究科）と現センター長の鹿野田一司教授（同工学系研究科）からは、**mK** プラットフォームの開設にご理解と惜しみない援助をいただいています。野口篤志准教授（大学院総合文化研究科）からは、マイクロ波エレクトロニクスを選定をはじめ量子ビット実験の組み込みについて、継続的な助言をいただいています。戸田亮技術専門職員（低温科学研究センター・共同利用部門）には筆者と共に運営スタッフとして、瀧本翔平氏（大学院理学系研究科・博士課程）には当センター内ユーザーとして日々協力いただいています。

## 参考文献

- [1] 先端研究設備整備補助事業（量子技術分野）：  
[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/boshu/detail/mext\\_00085.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/mext_00085.html)
- [2] 戸田亮「磁化物性評価システム(MPM3)の紹介」、2020 年東京大学低温科学研究センター年報（pp. 93-98）
- [3] 福山寛「希釈冷凍機の原理としくみ - ミリケルビン温度の獲得」：  
[http://qfs2018.sakura.ne.jp/kelvin/files/dilution\\_fridge\\_v1.x.pdf](http://qfs2018.sakura.ne.jp/kelvin/files/dilution_fridge_v1.x.pdf)
- [4] ミリケルビン量子プラットフォーム：  
<http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/FSI/index.html>