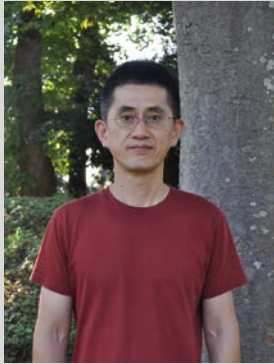


# 低温における温度計測の信頼性確保のために



島崎 毅

しまざき たけし  
t.shimazaki@aist.go.jp  
産業技術総合研究所  
計量標準総合センター  
物理計測標準研究部門  
極限温度計測研究グループ  
主任研究員

1996年3月、筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。博士(工学)。同年4月、日本学術振興会特別研究員。同年11月、米国NASAジェット推進研究所客員博士研究員併任。1998年4月、通商産業省工業技術院計量研究所入所。2001年、組織改編により産業技術総合研究所研究員。低温域における温度標準の実現、精密温度計測、精密温度制御、物性測定に関する研究開発に従事。また極低温冷凍機等を含む低温域での実験装置の開発にも従事。

従来、低温環境の利用は限定的で、温度計測についても最先端研究分野を除けば比較的大きな不確かさが許容されていました。しかし、近年の社会ニーズの変化により、液体水素や液体ヘリウムに代表される低温流体や、それらが作り出す低温環境の利用が急速に広がり、併せて高精度温度計測へのニーズが増大しています。NMIJ では低温における温度標準の実現や操作性の高い温度計校正装置を開発してきました。これらを活用することで、温度計測の信頼性確保に貢献できることが期待されます。本稿では、低温での温度計測の特徴や開発した装置を紹介します。

現在、エネルギーのより効率的な利用や水素社会の実現に向けた研究開発が、各方面で進められています。その中で、これまで余りなされていなかった低温環境の産業分野での利用に向けた研究開発が活発化しています。それに伴い、低温環境下における精密な温度計測に対するニーズも増大しています。

従来、低温環境の利用は、物性研究、加速器開発、ロケット開発、半導体製造等の限られた分野で主になされ、特に産業界での利用は限定的でした。これは、低温環境の生成と維持には、特殊で高価な設備・技術や低温寒剤の定期的な補充などが必要であり、その利用が経済的に正当化されにくかったことが一因と言えます。しかし近年、より高いエネルギー利用効率の達成や機器の高性能化を目指し、低温環境の利用が広がっています。具体的には、超伝導現象を利用した産業用機器や送電設備、医療機器等の開発や利用が拡大してきました。これらの機器を動作させる際の冷却温度は、使用する超伝導材料に依存しますが、液体窒素温度、約 77 K (-196 °C) や液体ヘリウム温度、約 4.2 K (-269 °C) などです。また、加速化する水素社会の実現に向けた取り組みにおいて、液体水素を社会インフラの中のエネルギーの輸送・貯蔵媒体として活用するための研究開発も進んでいます。液体水素は、水素を冷却し液化させた約 20.3 K (-253 °C) の低温流体です。

20 K 前後より低温で精密温度計測を行うためには、複数の選択や検討が必要です。通常、高精度の温度計測には、白金の電気抵抗が温度に依存する事を利用した、測温抵抗体を使用することが一般的ですが、低温では事情が異なります。白金の温度変化に対する電気抵抗の変化率が概ね 30 K 以下で急激に低下し、高精度温度計測のための感度を維持することが難しくなることが知られています。そのため、白金以外に、低温で十分な感度を有する合金や半導体

を感温部に使用した温度計も使われるようになり。但し、いずれの温度計も性質や取扱いにそれぞれの特徴があるので、用途や温度範囲に応じて適切に選択する必要があります。また低温では、感温部の材料組成や含有する不純物の僅かな違いに温度特性が強く依存し温度計の個体差が大きくなるので、測温抵抗体のようなロットに依存しない、広く受け入れられた抵抗値と温度の関係を規定する式などがありません。したがって、高精度の温度計測を行うためには、計測する温度範囲を網羅する多数の温度で温度計を個別に校正することが一般的です。一方、低温で温度計を多点校正するためには、液体ヘリウムなどの取扱いの煩雑な寒剤を補充しながらの、長期間の作業が必要となります。寒剤に替えて機械式冷凍機を使用する場合もありますが、室温部からの熱負荷が大きな場合には校正に必要な最低到達温度が得られないといった事や、機械式冷凍機の冷却原理に起因する周期的な温度変動が精密な校正の妨

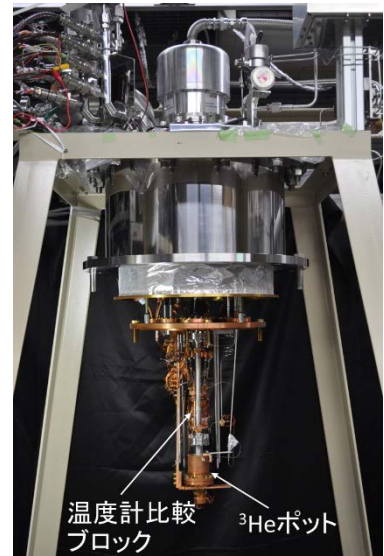


図1 校正装置低温部

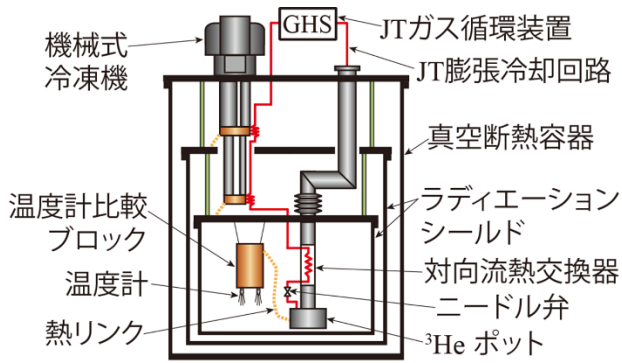


図2 校正装置模式図

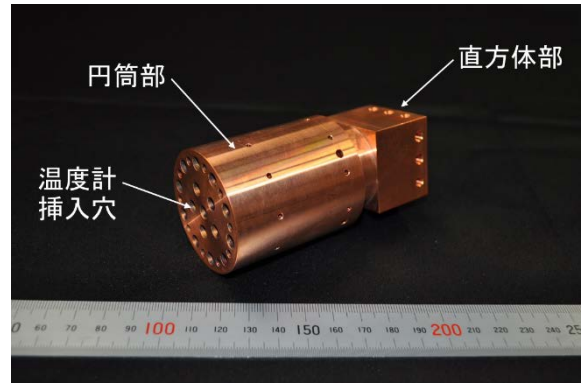


図3 温度計比較ブロック

げになるといった問題が生じることがありました。  
 NMIJではこれまでに、1990年国際温度目盛 (ITS-90) に基づいた下限温度 0.65 K までの温度目盛を実現し、2009年に標準用ロジウム鉄抵抗温度計を対象にした 25 K から 0.65 K の標準供給を開始しました[1]。2014年には、国内でより広く使われている標準用白金コバルト抵抗温度計を校正対象に含め、低温における温度計測の信頼性を確保するための体制を整備しています。また冷却技術として、機械式冷凍機と  $^3\text{He}$  ジュール・トムソン (JT) 膨張冷却回路を組合せた、液体ヘリウムを寒剤として使用せずに動作する操作性の高い冷却装置を開発し、抵抗温度計校正装置に応用しています[2, 3]。この装置は、機械式冷凍機単体では到達できない低温を  $^3\text{He}$  JT 膨張冷却回路を併用することで生成します。また、機械式冷凍機によって誘起される温度変動を抑制する構造となっており、温度計を ITS-90 に基づいた温度目盛で高精度に評価することが可能です[4]。

図1に校正装置低温部を、図2に校正装置の模式図を示します。市販の機械式冷凍機を予冷段として使用しています。 $^3\text{He}$  JT 膨張冷却回路は NMIJ で開発しました。室温部に設置した  $^3\text{He}$  JT ガス循環装置で加圧された  $^3\text{He}$  ガスは、真空断熱容器内に導かれ機械式冷凍機と対向流熱交換器で十分に予冷されます。そして、ニードル弁の小さな穴を通して  $^3\text{He}$  ポットにむけて噴出させると、ガスが膨張し温度が降下します。条件を整えばガスは  $^3\text{He}$  ポット内で凝縮し液体になります。 $^3\text{He}$  ポットからのガスは、 $^3\text{He}$  JT ガス循環装置に戻り再び加圧され冷却回路を循環します。装置で一番低温になる部分が  $^3\text{He}$  ポットで、0.5 K までの冷却が可能です。校正対象の温度計と ITS-90 に基づいてあらかじめ校正された基準温度計は、一緒に温度計比較ブロックに装着されます。そして、温度計比較ブロックの温度を高精度に安定させた状態で、校正対象の温度計と基準温度計を比較し校正対象の温度計を校正します。温度計比較ブロックは、糸で懸架するなどしてなるべく周囲から断熱された状態で設置された上で、熱的には  $^3\text{He}$  ポットとだけ銅製の熱リンクで接続される構造を採用しています。図3に無酸素銅製の温度計比較ブロックを示します。円筒部底面の温度計挿入穴に下からカプセル型の基準温度計と評価対象の温度計を挿入します。複数の温度計が装着できるようになっています。直方体部には配線用端子や温度制御用のヒータを装着します。熱リンクもここに接続します。本装置では、複数の冷却ステージを熱リンクで繋ぎ、個別に温度制御することで、温度計比較ブロックの温度を高い安定度で長時間制御することが可能です。図4に温度計比較ブロックを 4.52 K で温度制御した際の温度変動を示します。本装置を

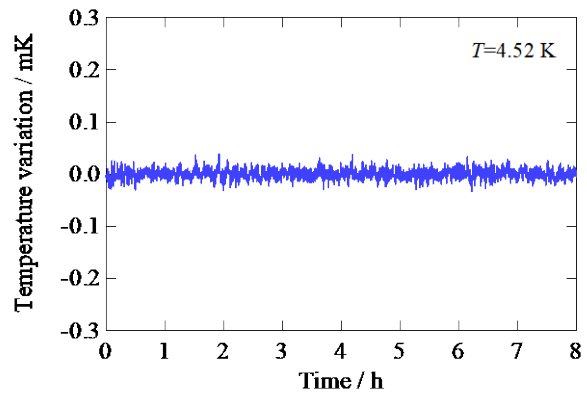


図4 温度計比較ブロックの温度制御

用いれば、校正対象の温度計の安定性にも依りますが、例えば 4.2 K において、不確かさ 1.2 mK で ITS-90 に基づいた校正が可能です。

低温環境の一般生活や社会インフラへの活用が急速に拡大する中、従来は求められていなかった高い精度での温度計測のニーズは増大しています。低温での温度計測は一筋縄ではいかない面がありますが、その信頼性確保に貢献できればと考えています。更に、ここで開発した冷却、温度制御技術は広く物性測定やデバイス評価などにも応用が可能であると考えています。

参考文献

- [1] 島崎 毅, 産総研 TODAY, **10**(9), 21 (2010).
- [2] T. Shimazaki et al, *Int. J. Thermophys.*, **32**, 2171-2182 (2011).
- [3] 島崎 毅, 低温工学, **50**(6), 306 (2015).
- [4] T. Shimazaki et al, *Int. J. Thermophys.*, **38**, 96 (2017).