

■冷凍部会だより

4月11日に、川崎重工工業東京本社において、2025年度第1回冷凍部会（公開）例会を開催した。今回は、低温工学に関する基礎講座として、「冷凍技術～極低温から室温まで～」をテーマとし、超伝導機器を運転する極低温領域から室温まで幅広い温度範囲における冷凍技術について、講師に東京科学大学の岡村哲至先生を招き、本分野に関する多くのご経験などを元にご講演いただいた。

なお、参加者は面着とMicrosoft Teamsを利用したハイブリッド開催とし、29名（面着24名＋リモート5名）の参加があった。以下に今回のプログラムを示す。

【講演会】

1. 「開会挨拶」 冷凍部会長
2. 「超流動ヘリウムとMHD発電機用超伝導マグネット」
岡村哲至先生（東京科学大学）
3. 「熱電素子によるHTSコイル通電と室温磁気冷凍」
岡村哲至先生（東京科学大学）
4. 「閉会挨拶」 冷凍部会庶務

まず、前半の講演では、超流動ヘリウム（He-II）の特徴として、状態線図を用い定圧比熱や密度変化について紹介するとともに、超流動ヘリウムの熱-機械効果の例としてフィルムフローや噴水効果などの現象について解説いただいた。特に、超流動ヘリウム内の熱伝導は、内部対流によって行われており、熱流束が小さいときは層流的な流れであるが、熱流束がある値を超えると超流動成分と常流動成分の間に相互摩擦を生じる特性を有している。

東京科学大学（旧東京工業大学）では、超伝導コイルの浸漬冷却に超流動ヘリウムの熱機械効果を利用した冷却性能の実証試験として、コイルのスペーサーにFRPやアルミナを用いた場合や材質を多孔性にした場合などの影響について、解析と実験を行っている。

同大学での実証試験において、He II槽温度が1.92Kに達したとき、ヒーターによる熱供給を停止してから流路内の最高温度が2.10Kになるまでの時間を計測。試験結果として、アルミナスペーサーを用いた場合は、その他のスペーサーに比べ、素早く温度が下がっていることが確認できた。これは、スペーサーに多孔質材を用いることで、熱-機械効果によりHe IIに超流動流れが生じ、流路からの排熱が促進されたことを示している。

また、同大学に設置されたクローズドサイクルMHD発電実験装置は、MHD発電機用の超伝導マグネットを有し、10数年間運転され、100回ほど励磁・消磁された実績を有している。ディスク型MHD発電機内には、円周方向にフェラデー電流が流れ、その変動によってコイル内に誘導起電力が発生する。そのため、クエンチ保護に関わるコイル端電圧の検出設定にはノウハウが必要であるとのこと。

クライオスタットの内部構造は、ヘリウム容器と液体窒

素シールドの接合部分にSUS304L、SUS304、FRPの3つの異なる材質による円筒を組み合わせることで材料の熱抵抗に加え、熱侵入経路の距離を長くとりつつ、必要となる電磁力を支持できる構造となっている。なお、この各々の円筒の接合には強い接合強度を必要とするわけではないが、特殊な構造を採用した重要なノウハウを有しているとのこと。

後半の講演では、熱電素子によるHTSコイル通電と室温磁気冷凍について解説いただいた。高温超伝導（HTS）コイルは、接続抵抗などによる微小な電流減衰を熱電素子による起電力で補い、低温超伝導マグネットに匹敵する小さな電流減衰率（疑似永久電流モード）の実現を目指している。HTSコイルの熱電素子には低温域で高い性能をもつ Bi_2Te_3 を採用した。このとき、システム性能を決める設計パラメータは熱電素子の形状パラメータ L/S （長さ/断面積）、冷凍機の除熱能力、熱電素子外部の回路の電気抵抗である外部抵抗である。冷凍機は現有の冷凍性能を参考とし、外部抵抗には施工ばらつきを考慮した上で、形状パラメータ L/S の最適化を行った。疑似永久電流モード運転される高温超伝導磁石システムの課題は、定格到達後の磁場の安定制御である。時定数の大きな熱電素子の温度制御により磁場を安定させるには、熱電素子の内部抵抗の変化を考慮する必要がある。

また、永久磁石を使った商用化レベルの室温磁気冷凍機の試作は、2000年以降に盛んに行われており、室温で大きな磁気熱量効果を示す材料の開発とともに、材料特性を活かした冷凍システムの開発が世界各国で進められている。

磁気冷凍機の作動原理は、磁界を印加すると発熱し、磁界を取り去ると冷える磁気熱量効果を利用したものであり、その潜在能力としては、磁場変化による仕事量と冷却部から受ける熱量により、COP（磁性材料のする仕事に対する冷凍能力）によって表される。しかし、現実には、ガドリニウムは周囲の水と熱交換するため、冷却部に流入する水の温度は理論値より高い温度となる。また、実際の磁気冷凍システムでは、磁性材料のする仕事に対応するのは、磁石を回転させるモーター動力であり、モーター効率やロータリー弁の摺動摩擦などにより、より大きくなる。さらに水を循環させるポンプ動力等もシステム動力として考慮する必要があり、磁性材料と水の熱容量の割合の最適化や磁石回転や水循環のための動力を低減することが、システムの効率向上のポイントである。

同大学では、磁気冷凍システムの冷凍能力とCOP向上を目指し、2つのネオジム磁石を用いた構造改良による強磁界化や水の流路を工夫した低圧力損失化などに取り組み、磁気冷凍機の冷凍能力の改善を行うとともに、水循環ポンプの所用動力の低減化などをすすめ、COP向上を図った成果について、多岐にわたり、ご報告いただいた。

ご多忙中、本講演会に向け、事前資料の準備や講演対応いただいた岡村哲至先生、および活発な議論をいただい

た参加者の皆様に厚く御礼を申し上げます。
(川崎重工業，新郷)



写真 1 岡村哲至先生のご講演



写真 2 第 1 回例会講演会の会場様子