

J-PARC COMET 実験用冷却システムの構築状況(2)

○大中政弥[#]、大畠洋克、岡村崇弘、飯田真久、黒澤宣之、
吉田誠、角直幸、飯尾雅美、荻津透、佐々木憲一、榎田康博
高エネルギー加速器研究機構 J-PARC センター 低温セクション

概要

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、大強度陽子ビームを用いて 10^{-16} の分岐比でミュオンが電子に転換する事象を探索する COMET(COherent Muon to Electron Transition) 実験の建設が進行中である。このプロジェクトではパイオンを生成する標的を内包し 5 T を発生する捕獲ソレノイド、パイオンの崩壊によって生成されたミュオンを 3 T の磁場で輸送する輸送ソレノイドならびに検出器ソレノイドで構成される超伝導磁石システムを整備する。このうち検出器ソレノイドは、GM 冷凍機によって単独で冷却されるが、熱負荷の比較的大きな捕獲ソレノイドと輸送ソレノイドは、ヘリウム液化冷凍機から供給される 4 K の気液二相流ヘリウムによって冷却される。このヘリウム液化冷凍機を核とした冷却システムの構築を 2015 年から行っており、ヘリウム液化冷凍機、電流リードボックス、輸送ソレノイド及びそれらを接続する断熱 4 重配管までの整備が完了し、冷却試験及び輸送ソレノイドを励磁してビーム調整運転(COMET Phase α)を行った。本報では、冷却システムの概要と具体的な構築状況、運転時の冷却状況や予冷、クエンチ処理・復旧シーケンスについて報告する。

1. 冷却システムの概要及び構築状況

本冷却システムの概要を図 1 に示す。冷却システムは地上部の中圧タンク、ヘリウム圧縮機(以下「圧縮機」)、ヘリウム液化冷凍機(以下「冷凍機」)、電流リードボックス(以下「CLB」)及び地下部の輸送ソレノイド、それらを結ぶ断熱 4 重配管(以下「TRT」)で構成される。

このうち、圧縮機と冷凍機に関しては、コスト削減のためにトロイダル超伝導電磁石システムで使用されてきた KEK に既存の冷凍機を再利用し、1989 年製の冷凍機に対して制御系を含めてフルオーバーホー

ルを行い、カタログスペック以上の冷凍能力を発揮できることを確認した[1-4]。

また、TRT は 4 K のヘリウムを流すために 50 K のアルミシールドを持っており、CLB から導入した電流を流すための超伝導線も 4 K のヘリウム配管から間接冷却している。この間接冷却は KEK が設計したアルミ製の部品を 4 K の配管にクランプさせることにより実現しており、超伝導線には大電流を流すことから、電気絶縁と熱伝達の両立が必要となった。これを両立するためのアルミクランプパーツの R&D を行い、最適なクランプ方法及びクランプパーツ間の距離を決定した。特に、超伝導線を挟み込む部分に

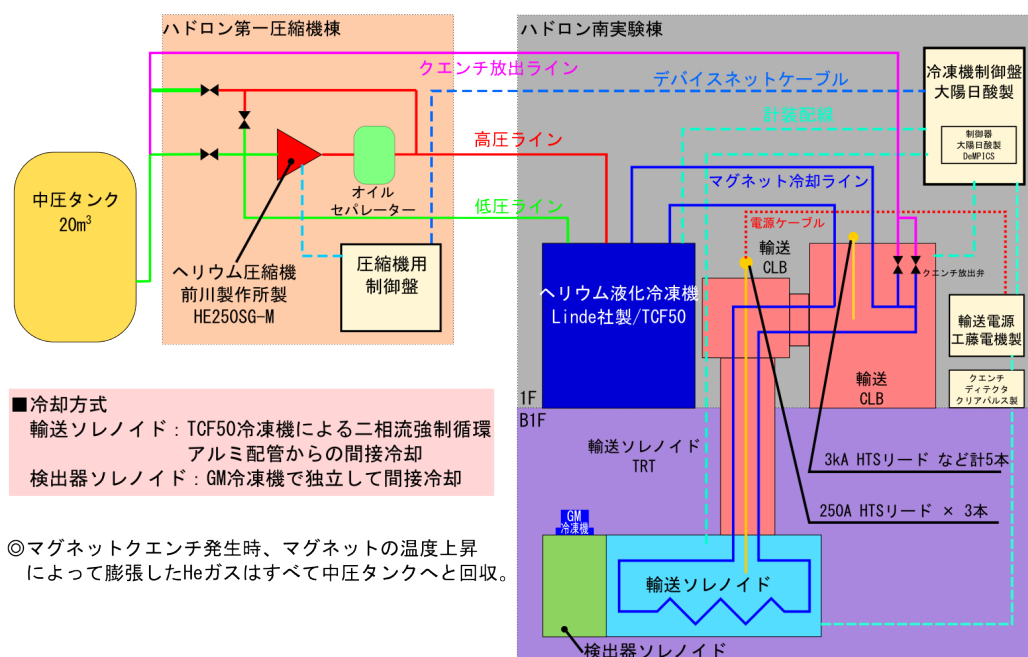


図 1.COMET Phase α 実験用冷却システムの概要

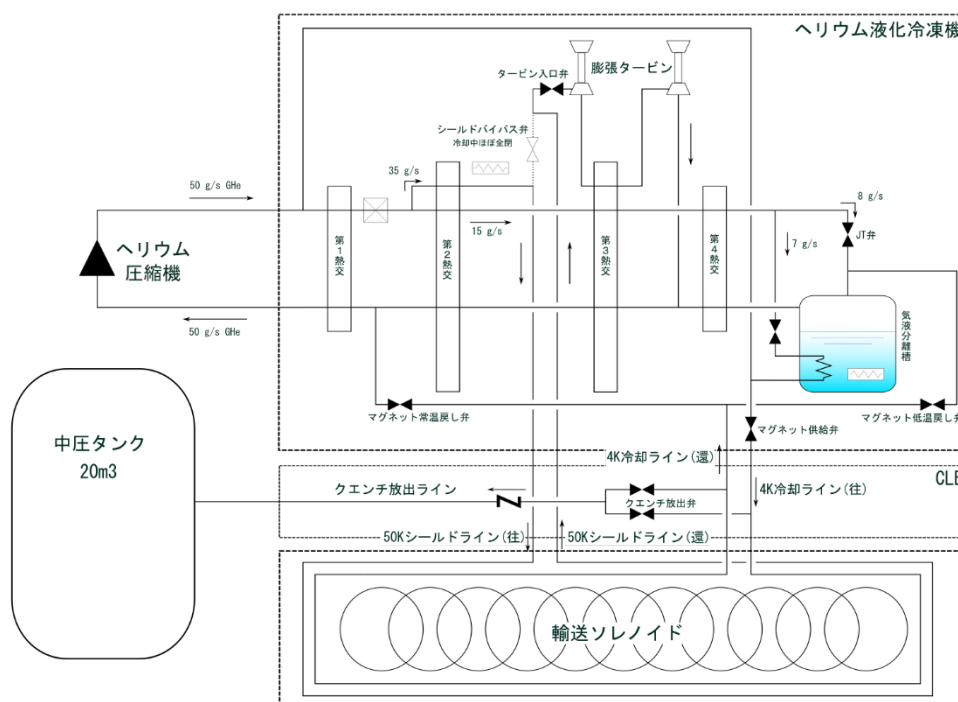


図5. 本冷却システムの概略フロー図

2.4 手順書の整備

今後、運用フェーズに入るにつれてユーザーや業務委託など多くの人が冷凍機側の機器操作を行う場合を考え、冷凍機の起動・停止方法やクエンチ後の処理方法、再冷却方法など種々の手順書を整備した。本冷却システムは今後更に機器追加を予定しているため、追加される機器に対応した手順書の更新も予定している。

3. 試運転及びビーム調整

3.1 試運転

冷却試運転については、輸送ソレノイドの励磁も含めた設備の健全性の確認を目的として2022年5月から3ヶ月に渡って行われた。

輸送ソレノイドの予冷は図6に示すように約21日間であった。冷凍機単体運転時は定常まで10時間程度であったことから、輸送ソレノイドの冷却に日数がかかっていることがわかる。輸送ソレノイドは、磁石内の温度差が大きすぎると、熱応力によって磁石破損の恐れがあったため、磁石内の温度差を100Kに抑えるようにオペレーションを行った。当初、手動で行っていたこの温度差オペレーションは後に自動化してシーケンスとして機能させ、ボタン一つで常温からの冷却が可能となった。

また、輸送ソレノイドのコイルは、ターゲット端(捕獲ソレノイド側)のコイルがTS2a、反ターゲット端(検出器ソレノイド側)のコイルがTS3となっており、それらに挟まれた中央のコイルがTS2-1~TS2-16となっている。このうち、中央のコイル群はアルミ配管から伝導冷却されているが、TS2aとTS3については隣のコイルからアルミストリップを伸ばし、これを通

じた伝導冷却が行われている。そのため、図6~図8に示すように、特にTS3については、他の磁石と比較すると冷却速度が遅くなっている。

磁石励磁可能状態で定常となった後は、輸送ソレノイドの励磁試験及び遮断試験を行い、遮断試験においてはクエンチ処理が正常に作動することを確認した。また、試運転時には再冷却は自動化されていなかったため、このときに手動操作での再冷却、復旧を行い、これを元に自動化を行った。

試運転終了後には試運転結果を含めた書類をまとめ、高圧ガス保安法上の完成検査を受験し、これに合格した。

3.2 COMET Phase α ビーム調整

2023年2月からはビーム調整運転として実際にターゲットにビームを通し、輸送ソレノイドにて実際に粒子を輸送する実験が行われた。

このビーム調整に間に合うように輸送ソレノイドの予冷を完了しなければならないため、年末を含んで2022年12月中旬から2023年1月中旬の間で予冷運転を行った。図8並びに図9に示すように、予冷期間は年末年始6日間の停止期間を含めて24日間であった。試運転時は21日間であったため、停止期間を含めると短くなっているように見えるが、ビーム調整時の予冷の際は、常温からの磁石予冷のシーケンスが自動化されていたため、効率が良かったこと、TS3及びTS2aについては隣のコイルから伝導冷却しているため、年末年始の停止期間中もその部分が少しずつ冷えていっていたことが理由として挙げられる。

磁石励磁可能状態となり、定常冷却に入った後は、遮断試験を行い、クエンチ処理及び再冷却シーケンスの健全性を確認した後、ビームタイムとなった。ビ

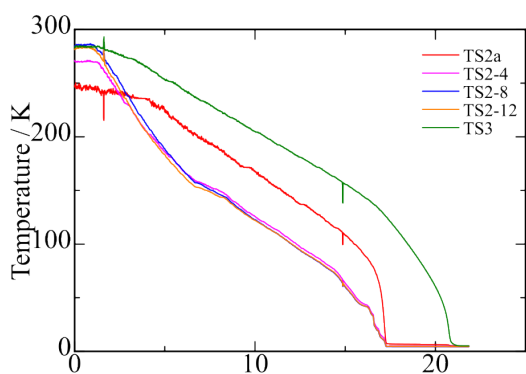


図6. 試運転時の輸送ソレノイド予冷カーブ

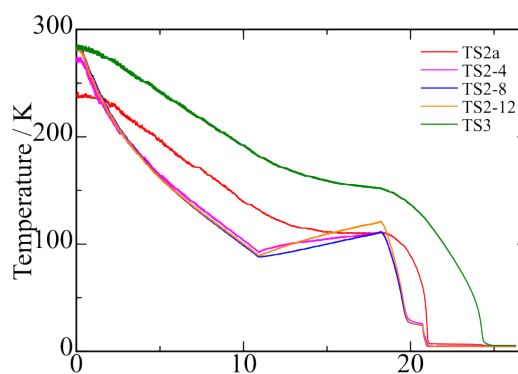


図8. ビーム調整時輸送ソレノイド予冷カーブ

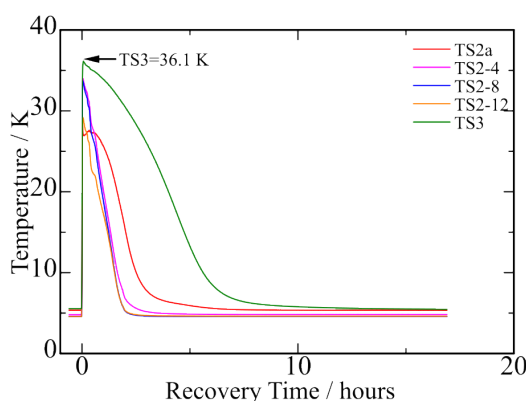


図7. ソレノイド 105 A 遮断時の再冷却カーブ

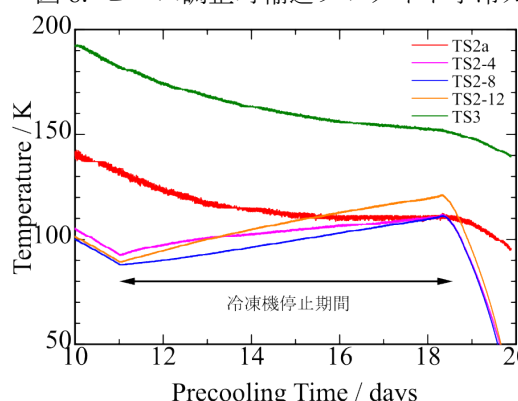


図9. 冷凍機停止期間の伝導冷却の様子

ームタイムは2月と3月で合計2回、延べ3週間のビーム受け入れをすることができた。

輸送ソレノイド冷却運転はビームタイム終了後も2023年6月まで続いたが、約半年の間、計画停止以外での冷凍機停止なども特になく、非常に安定して運転できたと言える。

4. まとめ

2015年から構築が始まったCOMET実験用冷却システムだが、冷却系のコンポーネントはすべて低温セクションが設計・製作に携わってきた。2022年12月の完成検査をもって一旦の区切りを迎え、無事にビーム運転を受け入れることができた。

特に、輸送ソレノイドの冷却、インターロックについては職員のみでプログラムの作成、確認、調整、運用をすることにより大幅なコストダウンを図り、かつ業者を介さずに条件の追加など調整を即座に行いやすい環境を整えてきた。

今後、捕獲ソレノイドなどを設置し、こちらも冷凍機に接続して冷却励磁試験を実施する予定である。このときの冷却手順の自動化やインターロックについても同様に職員のみで行うことを予定している。

参考文献

- [1] J. Imazato et al., "A superconducting toroidal magnet for charged particle spectroscopy," Proceedings of 11th International Conference on Magnet Technology (MT-11), Tsukuba (1989), pp.366-369
- [2] H. Ohhata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.154
- [3] H. Ohhata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92 (2015) p.84
- [4] M. Onaka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.87