

# PRESENT STATUS OF CRYOGENIC SYSTEM FOR SUPERCONDUCTING SOLENOID AT J-PARC MUSE

Yasuhisa Nemoto<sup>#</sup>, Koichiro Shimomura

J-PARC Center, Materials and Life Science Division, Muon Section,  
2-4 Shirakata-shirane, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1195

## Abstract

Muon Science laboratory at Material Life Science Facility is now under operation in J-PARC. The conventional muon channel, which contains the superconducting solenoid cooled by on-line He refrigeration system, can provide the world strongest pulsed muon beam from 4 to 120 MeV/c. In this report we will describe the present status of this system briefly.

## J-PARC MESE における超伝導ソレノイドシステムの現状

### 1. はじめに

J-PARC ミュオン施設では 3 GeV 陽子がグラファイト標的に衝突する際、原子核の陽子および中性子との核反応からパイ中間子が創られ、このパイ中間子が崩壊してミュオンが得られる。こうして生成したミュオン粒子をできるだけ多く実験エリアまで導くためには、超伝導ソレノイドによる大きな磁場が必要となる。超伝導ソレノイドは長さ 50 cm ボア径 12 cm の 12 連の超伝導コイルから成り、中心磁場 5 T を 6 m に亘って発生させることが可能である。その強い軸方向の磁場で飛行中のパイ中間子を閉じ込めながらミュオンに変換させる。超伝導コイル (NbTi 線材で構成) の周りは 2 重の温度シールド (6 K シールド、80 K シールド) が配され、外部からの熱侵入を遮断する。このような高磁場を発生させる超伝導ソレノイド電磁石の冷却回路は上流部の 6 つのコイル ( $\mu 1$  コイル) と下流部の 6 つのコイルおよび 6 K シールド ( $\mu 2$  コイル) の二分割構造になっている。その冷却にヘリウム冷凍機システムが使われる。

### 2. 冷却原理

ヘリウム冷凍機システムは図 1 に示すように、ヘリウムガスを圧縮機で高圧 (0.85 MPaG) にし循環させ、タービン、JT 弁にてソレノイド電磁石に供給して冷却するシステムである。超伝導ソレノイドは冷却回路上、前述の 2 つ ( $\mu 1$  および  $\mu 2$  コイル) に分けられている。冷却の初期においては、超伝導ソレノイドに供給して戻ってきたヘリウムはまだ温度が高い。そのため冷凍機の高圧部と低圧部間の熱交換器を通過させず、太い配管で圧縮機に直接戻したほうが、冷凍能力が高まる。このような冷却経路をウォームリターンと呼んでいる。この際  $\mu 1$  および  $\mu 2$  コイルはヘリウム風量を最大限にするため並列に経路は組まれている。次に徐々に全体の系が冷えて来た後には、超伝導ソレノイドから戻ってくるヘリウムは十分冷えているので、供給側経路

のヘリウムを冷却するために使用できる。そのため熱交換機を通して冷やせるように経路を変更する。これがコールドリターンである。

コールドリターンに変更した後も、超伝導ソレノイドを並列に冷却する経路から直列に冷却する経路にバルブをコントロールして変更する。この温度領域ではすでに循環ヘリウムガスの温度は低く、その密度は室温時に比べ大きくなっているため、直列経路にしても冷却能力は十分にある。また最終的には超伝導ソレノイド内でのヘリウムの圧力を 0.5 MPaG 以上にとることで、ヘリウムの気液混合状態 (いわゆる超臨界状態) に相転移させて冷却能力を飛躍的に高めることができる。このような経路をシリーズと呼んでいる。

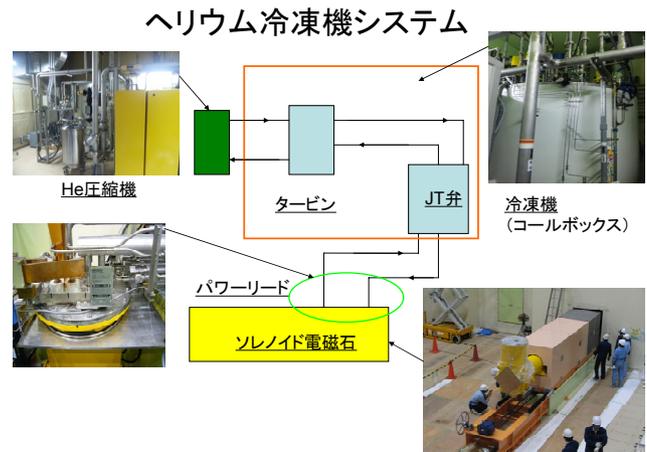


図 1 : ヘリウム冷凍機システム

次に、ウォームリターン冷却回路に関して図 3 に示す。ヘリウム圧縮機をスタートさせマグネット接続運転を開始すると、マグネットバルブ CV814 ( $\mu 2$  コイルウォームリターン)、CV815 ( $\mu 1$  コイルウォームリターン) がすぐに 100% 全開になる。これにより、冷凍システム全体の暖かいヘリウムガスは直接圧縮機へ戻される。 $\mu 1$  コイル戻り温度 TE818、 $\mu 2$  コイル戻り温度 TE817 が 50 K になるまで行われる。ここで  $\mu 1$  の流れを

<sup>#</sup> nemotoy@post.kek.jp

青色、 $\mu 2$ の流れをピンク色、バルブの開を水色、バルブの閉を赤色で示す。スタートから47時間（ $\mu 1$ コイルTE818の場合）、さらにそれから2時間30分後に $\mu 2$ コイルTE817が50Kになる。（ $\mu 2$ コイルは、6Kシールドコイルを持っている為、冷却時間を要する。）50Kに達する時間は、ソレノイドが以前の運転で既に冷却されている場合はさらに短縮される。

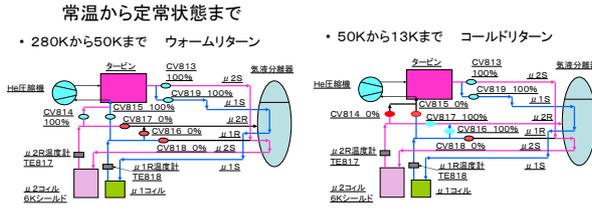


図2：ウォームリターン 図3：コールドリターン

次に、コールドリターン冷却回路に関して図3に示す。 $\mu 1$ コイル戻り温度TE818がTE817より先に50Kになるとバルブが切り替わる。CV815が100%から98%と徐々に閉まり始めると、CV816が0%から2%と徐々に開き始める。最終的にはCV815が0%、CV816が100%になる。途中、双方の開閉度が足して100%になる様に行われていく。50%になるまで2時間程度を要しその後、4時間30分～5時間を要しCV815が0%、CV816が100%になる。TE818が先に50Kになってから、2時間前後を経て $\mu 2$ コイル戻り温度TE817が50Kになると、同様にCV814、CV817がバルブの開閉動作を徐々に始める。最終的にはCV814が0%、CV817が100%になる（コールドリターン冷却回路の完成）。この時、 $\mu 1$ コイル戻り温度TE818が12Kで、 $\mu 2$ コイル戻り温度TE817が14Kである。コールドリターン冷却回路のままでは、TE818、TE817が13K前後で何日何時間経過しても変化が無く4Kにならない。さらに冷却するには、シリーズ冷却回路（図4）がある。CV816が100%から98%と徐々に閉まり始めると、1分後、 $\mu 2$ 送り供給バルブCV813が0%閉へ、 $\mu 1$ 戻りバルブCV818が100%開へ同時に作動する。CV816が100%から0%閉（所要時間14分）、CV813が0%閉、CV818が100%開に到達時刻は13分で、3つのバルブは同時に各々の開閉度になる。この時、 $\mu 1$ コイル戻り温度TE818が9Kで、 $\mu 2$ コイル戻り温度TE817が10Kである。後は、待つだけである。その後、3時間30分要してTE818が4K、TE817が5Kに達成する。この値が、通常運転の状態である。

・13Kから4.0Kまで シリーズ

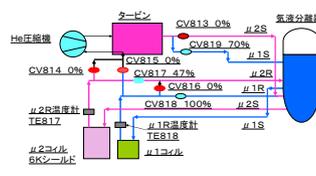


図4：シリーズ冷却回路

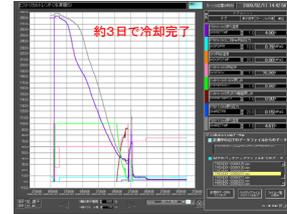


図5：冷却完成曲線

常温から冷却をスタートして、図5より $\mu 1$ コイル戻り温度TE818（左側紫色）、 $\mu 2$ コイル戻り温度TE817（右側灰色）がグラフから伺えられるように、順調に冷えて行く。4K完成間際、バルブユニットのPIA-S6R2の圧力が0.55MPaGになるようにCV817開閉度を定常状態で54%になるように調整する（図6ヘリウム冷凍機参照）。

PIA-S6R2とは、 $\mu 2$ コイル戻りの圧力であり。CV817を絞り過ぎては圧力が高く、ソレノイドの冷却能力が低下し、開き過ぎては、気液分離器の液体ヘリウムの量を一定に保持できない。この値の関係は試行錯誤の結果、冷凍処理能力のもっとも高い最適な圧力とバルブ開閉度との関係である。4.2K～4.3Kで、ヘリウムガスが超臨界状態になる。この時、現場コールドボックス周辺から「シュー、カラカラ、シュー、カラカラ」と、音が聞こえ30分近く続き、鳴り止む。すると4Kになり、気液分離器にヘリウム液が徐々に溜り始め通常1時間30分（場合によって3時間）掛かって、60%まで溜る。常温から冷却完成が3日間要す。冷却完成後、パワーリード（+、-）に、50L/minの安定した液体ヘリウム流量を得るために、CV152開閉度を調整する。（90%開）図6ヘリウム冷凍機参照。

## ヘリウム冷凍機

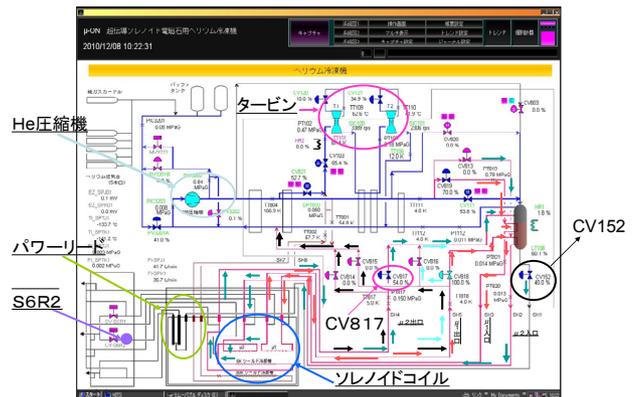


図6：ヘリウム冷凍機PC監視画面

### 3. 運転及び保守管理

#### 3.1 運転・操作

冷凍機運転は概ね以下の手順で行われ、詳細については別途取り扱いマニュアルが整備されている。

尚、これらの状態は全て PC 監視画面上で確認操作できる。超伝導ソレノイド用直流電源 PC 監視画面の横に電流可変用のリモートコントローラ（図 7 参照）を設置してある。電流設定は今のところ、表面ミュオン 40 A、崩壊ミュオン 340 A にて供給している。

超伝導ソレノイド用直流電源



図 7: 電流可変用リモートコントローラ及び超伝導ソレノイド用直流電源  
(左)、カードル (中央) バッファータンク

### 3.2 保守管理体制

保守管理においては定期的な巡視確認を実験室内外において以下のように行っている。

- (1) 冷凍機システムの保守・管理 (実験室内)
  - ・ヘリウム冷凍機 PC 監視画面の確認 (頻繁)
  - ・トレンドグラフ各 11 画面。圧力、温度、流量等のチェック
  - ・PC 監視画面の現在 (リアルトレンド)、過去 (ヒストリカルトレンド) から異常を確認
  - ・コールドボックスの状態の巡視 (図 8)
  - ・漏れ、圧力 (計空)、バルブの開閉度、冷却水温度 (タービン)、パワーリード (図 9) およびバルブユニット (図 10) の状態確認
- (2) 冷凍機システムの保守・管理 (実験室外)
  - ・屋外ヤード (図 11) のバッファータンクの巡視。圧力状態を確認 (漏れをチェック)。
  - ・配管、継ぎ手 (フランジ等) チェック。
  - ・カードル及び送気台の巡視。漏れ、配管、継ぎ手状態確認。圧力計確認
  - ・第 2 ヘリウム圧縮機棟 (図 12) の巡視。圧縮機、制御系 (電源、ブレーカー)、配管、継ぎ手、バルブ等の確認。圧縮機、オイルセパレーターからの油漏れ、冷却水の漏れ確認
  - ・冷却塔の巡視。各モーター (水ポンプ、散水ポンプ、ファン) の動作、状態 (錆び具合) ファンベルトの状態 (張り、傷等)、全体の状態、冷却水洩れ確認。
  - ・保守備品の補充等

## 4. 問題点と今後の課題

### 4.1 異常時の対応

立ち上げ時は毎回、冷凍機が定常状態に達するまでの時間、過程が異なる。また、トレンドグラフのバルブ開閉度と実際の開閉度が異なる事がある。



図 9: パワーリード



図 10: バルブユニット



図 11: 屋外ヤード冷却塔



図 12: 第 2 ヘリウム圧縮バッファータンク 2 基 (右) 機棟: 圧縮機、オイルセパレーター

これはバルブ自体の個体差と推測されるが、この時点で、運転継続可能か判断しなければならない。経験的な対応として、冷却の時間経過を観察し、手動でバルブ調整等を行うこともある。それでも尚、冷却に時間が掛かり過ぎたり、バルブの切り替わりに時間が掛かり過ぎたりするときは、停止してメーカーに対応を依頼する。

### 4.2 監視体制の充実

運転中、高い頻度でパワーリードへの流量が不規則になる。トレンドグラフの流れを見てみると、一定不変状態であった流量が、突然減少し始めたりする。この場合、回復させる為にバルブの手動操作が必要になる。原因、前触れもなく起こる現象に今の所未然に防ぐ手段が無い。バルブ、配管等の詰まりが考えられるが、今のところ明確ではない。今後、あらゆる情報を分析し、流量の不規則性を究明する必要がある。ただ、このような被害を最小限に抑えるためには、異常を即座に知ることが重要である。通常の監視体制は、平日に担当者及びミュオン関係者で実施しているが、その他は現場における監視のみならず、物質生命科学実験施設中央制御室及びニュートリノ制御室において、冷凍機の状態が常時ネットワークを通じてモニターできるシステムを構築し、万全の体制がとられている。

### 参考文献

- [1] K.Shimomura, et al., "Superconducting muon channel at J-PARC", Nucl. Instr. Meth. A600,1,-21,192-194(2009).
- [2] 下村他、J-PARC MUSE にミュオンビームライン 低温工学 45 巻 4 号 174-180(2010)