解 説

J-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石システム

— 冷却系の設計・性能 —

槇田 康博^{*,†}, 岡村 崇弘^{*}, 大畠 洋克^{*}, 木村 誠宏^{*},
安島 泰雄^{*}, 寺島 昭男^{*}, 荒岡 修^{*}, 鈴木 祥仁^{*}, 飯田 真久^{*}

Superconducting Magnet System for J-PARC Neutrino Beam Line

— Cryogenic Design and Performance —

Yasuhiro MAKIDA^{*,†}, Takahiro OKAMURA^{*}, Hirokatsu OHHATA^{*}, Nobuhiro KIMURA^{*}
Yasuo AJIMA^{*}, Akio TERASHIMA^{*}, Osamu ARAOKA^{*}, Shoji SUZUKI^{*} and Masahisa IIDA^{*}

Synopsis: A helium cryogenic system has been constructed to circulate 300 g/s of Supercritical Helium (SHe) at 4.5 K through a series of superconducting magnets for a neutrino beam line at J-PARC. The conceptual cryogenic system design, considering the cooling characteristics of the magnets, was defined in 2005. The engineering design was subsequently carried out by Taiyo Nippon Sanso Corp. The main elements are a screw compressor with a capacity of 160 g/s at 1.4 MPa, a refrigerator with a capacity of 1.5 kW at 4.5 K and a centrifugal SHe pump with a flow rate of 300 g/s. After system integration in 2008, performance tests were conducted. In a preliminary cooling test to confirm the cryogenic capacity, the cryogenic system successfully performed to the required specifications by circulating a supercritical helium flow of 300 g/s at 0.4 MPa and 4.5 K through a bypass line with a simulated heat load of 520 W and simulated pressure drop of 0.85 MPa. Following this, a full system test with the magnets was carried out. The magnets were pre-cooled from the ambient temperature for eight days and were kept below 4.8 K by circulating pumped SHe. The measured heat leakage at the magnets during these tests, including SHe transfer lines, was 210 W. Since the maximum beam loss predicted is 150 W, the cooling capacity of the cryogenic system is large enough to manage beam operations expected in the future.

Keywords: supercritical helium pump circulation, Claude cycle refrigerator, cascade refrigeration, J-PARC neutrino beam line

1. はじめに

J-PARC¹⁾の 50 GeV シンクロトロン（主リング：MR）で加速された陽子は、太平洋に一番接近した個所で分岐し、ニュートリノを人工的に生成する実験施設へと導かれる。この実験施設は、日本列島をまたいで配置される T2K（東海から神岡へ）長基線ニュートリノ振動実験の実験装置群の一翼を担い、J-PARC より 295 km 先の岐阜県飛騨市の神岡にあるニュートリノ検出器（スーパーカミオカンデ）に向けてニュートリノを発射する。ニュートリノは鉄、

コンクリートも岩盤も通り抜け、約 1 ミリ秒後にスーパーカミオカンデに到達する。スーパーカミオカンデと J-PARC 敷地内でのニュートリノ観測結果を比較し、ニュートリノが飛行中に別の種類のニュートリノに変わるか否か、すなわち「ニュートリノ振動」現象の探求が本実験の目的である²⁾。

ニュートリノビームラインに分岐された陽子は、150 m に渡る超伝導磁石列が主体のビームライン装置群（1 次ビームライン）によってニュートリノを生成するターゲットステーションへと導かれる。この超伝導磁石列は、NbTi ラザフォードケーブルで巻線された複合磁場磁石（Combined Functions Magnet）28 台で構成され、5 K 以下に低温保持されなければならない。本稿では、この超伝導磁石列を冷却するために建設されたヘリウム低温設備について報告する。

Received January 31, 2010

* 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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
Cryogenics Section, J-PARC Center,
High Energy Accelerator Research Organization,
2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki 319-1195, Japan

† E-mail: yasuhiro.makida@kek.jp

Fig. 1 Overall layout (a), and the external appearances of the superconducting magnet and cryogenic system (b).

2. 全体設計

ニュートリノビームライン超伝導システム³⁻⁸⁾ (以降「超伝導システム」と略す。)の全体配置を **Fig. 1** に示す。28 台の超伝導磁石は地下 12 m のビームライントンネル中に曲率半径約 105 m で約 150 m にわたって配列される。超伝導磁石を冷却する寒冷を生成する低温設備は、地上のニュートリノ第 1 設備棟 (以降「NU1 棟」と記す。)及び隣接する屋外ヤードに配置され、NU1 棟内の冷凍機室とビームライントンネルを連絡するサブトンネルに敷設されたトランスファーチューブ (以下「TRT」と記す。)を通じて超伝導磁石列に寒冷を供給する。TRT はサブトンネルからビームライントンネルに達した後、磁石列とともにビーム上流側に延びて、ビーム最上流側のクライオスタット (以降「フィードボックス」と記す。)と接続する。フィードボックスは常伝導磁石と超伝導磁石との接続及び TRT と最上流側の超伝導磁石とを接続させる役割を担う。TRT と磁石列のクライオスタットの断熱真空はすべて共

通で、TRT 地上端に接する電流リードボックス (以下「CLB」と記す。)より真空排気される。

NU1 棟屋内に圧縮機、コールドボックス、サブクーラー、CLB、精製・乾燥器などの装置が、屋外ヤードにはヘリウムタンク、液体窒素貯槽、ヘリウムローダーなど塔槽類やそれに付随するバルブユニットが設置されている。

2.1 被冷却体 (超伝導磁石、TRT、CLB) の仕様

ニュートリノビームラインに配置された 28 台の超伝導磁石列は、陽子ビームを偏向させるとともに収束させている。通常、偏向機能と収束機能はそれぞれ双極磁石と四極磁石が担うが、本超伝導磁石は新たな試みとして双極磁石の導体配置を工夫することで、双極成分と四極成分が複合した磁場分布 (偏向磁場 2.6 T, 収束磁場勾配 19.6 T/m @ 7345 A) を実現している。超伝導磁石は、ラザフォードケーブルによる単層鞍型コイルで、上下対称、左右非対称の線材配置で複合磁場を誘起する。ケーブルはポリイミドテープ (ユーピレックス) で電気絶縁処理されており、その表面は B-stage エポキシレジンが塗布されている。巻線後の圧縮加熱処理でエポキシを硬化させてコイル成型している。このように成型されたコイルとそれを囲むプラスチックカラー及びリターンヨークは、**Fig. 2** に示すようにコイル内側のビームパイプとリターンヨーク外側のアウターシェル及びエンドフランジによって構成される 2 重円

Fig. 2 Two-in-one structure cryostat.

Fig. 3 Cooling circuit of the superconducting magnet system for the neutrino beam line at J-PARC.

筒容器に収納される。冷媒は2重円筒容器内の流路（以降「冷却チャンネル」と記す。）、具体的にはビームパイプ外径169 mmとコイル内径173 mmに挟まれた隙間やリターンヨーク内の貫通孔などを通して流れるが、コイル巻線は直接冷媒に接して冷却される。このため、絶縁耐圧の低いガス相が入り混じる二相流ではなく超臨界ヘリウム（以後「SHe」と略記する。）でコイルは冷却されなければならない。

コイルを冷却する SHe は、サブクーラー（Fig. 3 中で「SC」と表記）内で生成され、ポンプによって循環される。SHe ポンプの詳細に関しては後述する。

ビームパイプ周りの隙間に加え、リターンヨーク中の円形流路、リターンヨークとヘリウム容器外筒となるシェルの間の空隙が磁石容器中の冷媒チャンネルとなる。Fig. 2 に示すように、磁石クライオスタットは磁石2台を1台のダブレットクライオスタット（以降「ダブレット」と記す）に収納する構造で各磁石容器間はコイルケーブルを内包するパイプによって接続される。ダブレットの真空容器は各磁石容器を内包する長さ約5 mの2つの直管が2.88°の曲げ角度で接続された構造を持ち、合計14台がビーム軌道上に並ぶ。2つの磁石は、コイル口出し部がダブレットの端部側になるように、すなわち反対向きに口出し線が出るようにダブレットに収納される。このようにすることで、双曲磁場は同じだが四極磁場は反転し、1つのダブレットでビーム光学的にも1つの節が構成される。

先に述べたように、磁石のリターンヨークは、容器の中に収納されてコイルとともに冷却されるコールドアイロン方式で、被冷却重量は大きくなる。TRTも含めて全体の被冷却重量は鉄換算で204トンとなる。

ダブレット内のそれぞれの磁石容器はサポートポストと呼ばれる、GFRP製の円筒支持架台によって2点支持され、その中間温度段では輻射シールドも支えている。磁石及びシールドの熱収縮は、サポートポスト間で約6 mm、ダブレット全体で36 mmになりダブレット端側のサポートポストを摺動構造とすることと、ダブレット内外とも磁石容器間にはベローズ配管を入れることで、吸収している。

(a) Cross-section of TRT

(b) Cross and longitudinal section of the flexible structure that absorbs the thermal contraction of pipes.

Fig. 4 Configuration of the transfer tube (TRT).

磁石容器シールド間の断熱距離は十分大きく、かつ熱収縮による制限もないので、冷却ガス温度の調整は不要で、予冷、加温にあたっては、各予冷温度領域で最大の能力を発揮するように低温設備は制御されればよい。

Fig. 3 に示すように13か所になるダブレット間には、1 m 強の3種類のインターコネクト（図中で「SIC」と略）と称される短いクライオスタットが挟まれる。ここではコイル口出し線のハンダ接続、合計4本の冷却配管の溶接接続が設置後に実施されるとともに、4か所の緊急放出ラインの分岐、3組のコレクター超伝導磁石、5台のビームモニター、1台の予備（図中ではそれぞれ(I), (II), (III), (IV)と表記）が分散して組込まれる。これらはいずれも室温までの伝導熱進入路を形成する。インターコネクト部分の輻射シールドはダブレットの輻射シールド板に延長板を取り付けることで施される。

直列に接続された14台のダブレット内のビーム上流端にはTRTと接続するフィードボックス（図中では「FB」と記す。）が、ビーム下流端にはSHeとシールド冷却ガスが折返すエンドボックス（以後「EB」と記す。）が設置される。EBで折返したSHeは、ダブレット内に組込まれた配管を通り、FBからTRTを通して低温設備に戻っていく。この磁石容器中の冷却チャンネル及び磁石容器間の配管、ダブレット内戻り配管、TRTでのSHeの圧力損失は、低

Table 1 Cryogenic load and required parameters for the cryogenic plant.

被冷却部での熱負荷予測		
	磁石冷却	シールド冷却
被冷却温度	5 K以下	100 K以下
磁石システムでの侵入熱	185 W	1420 W
ダブレット+SIC	127 W	987 W
TRT + CLB + FB + EB	58 W	432 W
ビームロス	Max 150 W	0 W
電流リード	1.0 g/s @ 7600 A	
熱負荷見積分計	336 W + 1.0 g/s	1420 W
被冷却部その他の負荷予測		
圧力損失	57 kPa	
コールドマス	鉄換算 204 ton	アルミ換算 7.4 ton + 鉄換算 2.8 ton
インベントリ (容積)	3550 ℓ	1620 ℓ
低温設備設計時に前提条件とした被冷却負荷		
熱負荷 (+20%)	410 W	1710 W
圧力損失 (+50%)	85 kPa	
電流リード (+10%)	1.1 g/s	
冷媒・流量	SHe・300 g/s	He・指示流量なし
コールドマス (+10%)	鉄換算 225 ton	
インベントリ(+10%)	3900 ℓ	1780 ℓ

補足1) 上記予測は低温設備設計時の値で、その後クライオスタットの設計修正による熱負荷増や管摩擦係数値の見直しによって4.3.2節及び4.3.3節にて述べているように増加している。特に圧力損失に関しては滑らかな管壁を前提にした予測値より50%の安全率を全て消費する圧力損失が実測されている。

補足2) 圧力損失はSHeの供給温度4.5 K、圧力0.4 MPa、流量300 g/sで計算している。

温設備に対する重要な負荷要素である。圧力損失に関しての詳細検討は実測結果とともに後の項で詳述する。

ダブレット内の輻射シールドは磁石容器を取り囲むように配置されるが、サポートポストによって支えられる下部はボトムトレイとよばれるアルミ合金 (A6063 相当品) の引抜き材で形成され、シールド上部の荷重を支える共に、シールド冷却配管も形成している。シールド冷却の冷媒も、TRT を介して低温設備より供給され、各磁石のボトムトレイを通してエンドボックスに達した後は、ダブレット内の配管を通してフィードボックスに戻る⁹⁾。

なお、これらサポートポスト、ボトムトレイそして真空容器外筒は LHC クライオスタットのために設計されたものを流用し、開発・エンジニアリング経費を節約している。

TRT は、Fig. 4 (a) に示すように超臨界ヘリウムの往復、シールド冷媒 (ヘリウムガス) の往復の 4 本の配管を内包する真空断熱配管で、シールド冷却供給配管には輻射シールド板が取り付けられ、4 本の配管を囲っている。4 本の配管のうちシールド冷却供給管が JIS 40A 配管とする以外は 50 A 配管を基本とし、Fig. 4 (b) に示すように熱収縮吸収フレキや現地溶接接続部などが分散している。また、磁石間配管同様、超臨界ヘリウム供給配管には超伝導ケーブ

Fig. 5 Schematic view of the circulation method which uses a SHe pump.

ル及び信号線群を通し、現地配管接続部では、ケーブル同士のハンダ接続も行っている。

TRT の地上側である NU1 棟冷凍機室には CLB が設置され、電流リードを介して超伝導ケーブルへと励磁電源からの電流を送りこむ。電流リードは、通常よく用いられるガス冷却式のものであるが、冷却ガスは超臨界ヘリウム流路より直接分流する。飽和ヘリウム貯液槽を電流リード低温端に設けて、温度アンカーとする例が多いが、①SHe の配管との間に電流フィードスルーを有する圧力壁が必要となり、②低温設備から飽和ヘリウムの供給も必要となる。本低温設備ではより単純な冷却回路とするため SHe ラインより直接分流することにした。電流リードへの分流は冷凍サイクルより冷媒を取出すために、低温設備にとっては液化と同等となる。本電流リードは定格 8000 A 一对で 1 g/s の SHe を消費し、冷凍機に対しては 90 W ~ 110 W 相当の負荷となる。

以上説明した冷却設計の被冷却体の低温設備に対する熱負荷・動力負荷 (圧力損失) の見積分結果を Table 1 にまとめる。低温設備はこのような被冷却体の超伝導部分を SHe で 5 K 以下に、輻射シールド部分は 80 K 以下に冷却し、電流リードには 5 K 以下の冷却ガスを最大 1 g/s 供給しなければならない。

また、侵入熱以外にはビームロスと呼ばれる陽子ビームからの熱負荷が最大 150 W と推定され、低温設備への熱負荷見積分にはこれも加算しなければならない。Table 1 にまとめるように、低温設備設計にあたっては、これらの見積分にさらに 10~50% の安全率 (Contingency) を加えたものを前提条件とした。

2.2 低温設備設計方針

前項の被冷却体からの要求仕様を基に、低温設備設計の方針を立てた。

- 前節でまとめた熱負荷と SHe の圧力損失計算から、単純な 300 g/s の SHe の循環で磁石は 5 K 以下に保持でき、かつポンプのヘッド圧力 0.1 MPa で流量 300 g/s は循環可能と判断した。
- SHe の供給（循環）は SHe ポンプによって行う。SHe を供給する別の手法として、JT 膨張をさせる前の冷凍機ヘリウムガスを飽和ヘリウムと熱交換させる方法もあるが、410 W という熱負荷に対応した冷却サイクル流量は約 150 g/s で、このうち SHe として磁石列に供給できる流量はせいぜい 70 g/s 程度にとどまる。この低い流量で磁石を 5 K 以下に保つためには、ダブレットクライオスタット内に SHe を再冷却する熱交換器と、飽和液体ヘリウムを生成する JT 弁がエンドボックス（EB）内に必要となる。ダブレット内部構造が複雑になり、JT 弁という重要な機器が高放射線環境下で使用されるというデメリットを生じるため、この SHe 循環方法は採用しなかった。従って低温設備は、Fig. 5 に示すように室温圧縮機+冷凍機による冷凍サイクルと低温ポンプ循環を組み合わせた二元冷凍サイクルの構成になる¹⁴⁾。
- 高放射線環境下となるビームトンネル内には後述するクエンチリリーフ弁以外の低温設備機器は設置しない。
- 定常時には液体窒素は使用せず、輻射シールドの冷却は冷凍機より分流させたヘリウムガスで行う。一方鉄換算で約 200 トンものコールドマスを予冷する寒冷源としては、液体窒素を使用することにした。このようにすることで①予冷時以外は液体窒素受入管理とコストを省くことができ、②予冷用にタービンや熱交換器の増量をする必要はなくなる。また冷却前に液体窒素を使用するヘ

リウム冷媒精製運転を行うので、いずれにせよ液体窒素は必要となり、液体窒素貯槽を冷凍機に併設することとした。

- 低温設備は液体窒素部分を除き、高圧ガス保安法冷凍則に準拠して設計・製作・検査を行う。なお、これまで KEK の冷凍則設備では低温精製器を、冷媒充填時の仮設備として申請対象外としてきたが、今回は本設備として対象内とした。

2.3 低温設備設計

前項でまとめた方針の下、受注者となった太陽日酸と共同で低温設備の設計を行った。概略フローを Fig. 6 に示す。クロードサイクルとポンプによる SHe 循環が熱交換器を介して組合わさる二元冷凍システムに分類される。

主圧縮機は 2 段のスクリー式で、5 段のオイルセパレーターと結合し、1.4 MPa の圧縮ヘリウムガスを 160 g/s 吐出する。スクリー部にはアンローダー機構が付いており、後述する冷凍能力調整運転時にはこれを用いて容量制御を行っている。オイルセパレーターユニットでのオイル分離状況の監視は、①1000 時間ごとのガスサンプリングによる分析、②2, 3 次セパレーターから戻り油分量の測定、③圧縮機出口と冷凍機入口に取り付けたサイトグラスによる目視監視を行っている。②の戻り油分量の測定というのは、2, 3 次セパレーターで分離された油分を吸入側に戻す動作を油面レベルスイッチによる断続的なものにして、その作動時間間隔を測定することで、相対的な 2, 3 次セパレーター内コアレッサーの油分離性能劣化を監視している。

冷凍機（コールドボックス）は、リンデ社の新系列の膨

Fig. 6 P & I diagram of the cryogenic plant.

Table 2 Specifications of each component in the cryogenic plant.

圧縮機	
メーカー	前川製作所
タイプ	スクリュウ2 段
型式	HE3225MSC-KLBM
吐出圧力	1.5 MPa
風量	160 g/s
オイルセパレーター構成	1 段 デミスター 2 段 コアレッサー 3 段 コアレッサー 4 段 活性炭 5 段 ゼオロダイト
オイル分離性能	0.1 Vol. ppm 以下
容量制御	アンローダー式
電動機定格	570 kW 6600 V
冷凍機	
メーカー	LINDE Kryotechnik AG
型式	TCF-200
膨張タービン	3 台, TED 第 1-第 2 直列 第 3 SHe タービン
サブクーラー	
メーカー	ジェック東理社
貯液槽	容積 2000 ℓ 貯液量 800 ℓ
SHe ポンプメーカー	Barber-Nichols INC
ポンプヘッド圧	Max 100 kPa
ポンプ送液量	Max 300 g/s
ポンプ回転数	12500 rpm

張タービン（TED タービン）3 基とアルミプレートフィン式の熱交換器、80 K・20 K 吸着筒及びバルブ類で構成される。第 1 及び第 2 タービンは直列に接続され、輻射シールドを冷却してきた冷媒ガスを 1.2 MPa から 0.15 MPa まで 2 段膨張して、JT 系冷媒ガスを冷却する。JT 系の冷媒ガスは第 3 タービンで 0.4 MPa まで膨張して SHe 状態になりサブクーラーへと送られる。

サブクーラーは、ジェック東理社で製作され、液体ヘリウム貯槽と JT 弁、ポンプと熱交換器及びバルブ類で構成され、ヘリウムの液化と貯液、ポンプによる SHe の循環と冷却を行う。ポンプはボールベアリング方式の遠心ポンプを使用する。

屋外には 100 m³ のヘリウムタンクが 4 基設置され、うち 3 基は低温設備待機時の冷媒の貯蔵設備（インベントリの確保）及びクエンチ時の緊急放出先として機能し、残り 1 基は圧縮機の定圧制御のバッファースとして機能する。補助寒冷となる液体窒素は屋外の貯槽（CE）にて受入及び貯蔵し、コールドボックスや低温精製器に供給される。その他、ヘリウムガスから水分を除去する乾燥器、空気分を除去する低温精製器、不純物を分析する露点計、分光計、ガスクロマトグラフが設置される。被冷却体は、先に詳述したが 28 台の超伝導磁石、TRT、CLB で構成される。主要機器の仕様を **Table 2** にまとめる。

3. 冷却設備の製作・建設・法規対応・安全対策

3.1 冷却設備の製作・建設

低温設備は 2007 年度より約 2 年をかけて主要機器が製作され 2008 年 3 月末には工場検収を終えた。同時期に NU1 棟と屋外塔槽類の基礎も完成し、2008 年 6 月末に 4 日間かけて現地へ搬入・据付された。地下ではそれに先立つ 2008 年 2 月から磁石の搬入・据付が始まっており、7 月中旬には完了し、引き続いて TRT や緊急放出ラインの据付が行われた。9 月から低温設備の配管/配線工事が始まり、3 か月を経た 2008 年 11 月末に、地下から延びてきた TRT や緊急放出ラインと締結された。これをもって超伝導システム冷却系は完成した。

3.2 冷凍設備の法規対応

低温設備は高圧ガス保安法の対象となり、液体窒素 CE と周辺配管が一般高圧ガス保安規則適用される以外は冷凍保安規則が適用された。また液体窒素貯槽と 50 A 以上の配管は同法上の耐震設備対象となり、それぞれ必要な耐震強度基準を満たした設計となっている。法規への対応は製造者と使用者（KEK）の共同作業で、高圧ガス保安協会による各種合格証取得はメーカーが、茨城県への許可申請及び完成検査受検は KEK が主体として行った。

3.3 超伝導磁石システムの安全対策

超伝導磁石システムにおける安全対策として特に次の 2 事項に留意する必要がある。

① クエンチ時の冷媒の急激な膨張に起因した圧力上昇を
超伝導磁石システムの設計圧力（2.0 MPa-G）以下に
抑えるための対策

② その他の事故による SHe 配管破損時の対策

①のクエンチ時には膨張したヘリウムガスはビームラインの 4 箇所に設置されたクエンチリリーフ弁から緊急放出配管(125 A, 200 A)を経由して、地上に設置された 3 機の中圧タンクに吸収される。緊急放出配管長は最大で約 150 m ほどありヘリウムガスは膨張しながら地上部へと移流する。緊急放出配管口径はこうした流体挙動をシミュレーションすることにより決定されている。また緊急放出配管は熱収縮するため、約 10 m ごとにベローが設けられており、かつ前項で述べた耐震基準に基づく敷設がなされている。②に関して SHe 配管が何らかの理由で破損すると冷媒はまずダブレットクライオスタットの断熱真空槽内に吹出す。断熱真空槽の内圧が大気圧以上になると、ダブレット列内 4 箇所に設置された安全弁が作動し、ヘリウムガスは「スタックライン」と呼ばれる 150 A 配管を通して、スタック（希釈煙突）に移送された後大気放出される。スタックラインからの放出にも係らず断熱真空槽圧力が上昇し続けるような大規模な SHe 配管破損時は、クライオスタット断熱真空槽の 4 箇所に設置されたラプチャーディスク（作動圧力 0.207 MPa-G, 口径 50 A）が作動する。このケースでは

ヘリウムガスはトンネル内に放出されることとなる。トンネル内には酸素濃度計が要所に設置されており、酸素濃度が低下すると警報が発令される仕組みになっている。またこのような最悪の事故が万が一発生した場合に備えて、ヘリウムガスのトンネル内への移流拡散挙動を ANSYS-CFX でシミュレーションし適切な避難経路を把握するとともに、トンネル入域者は酸素マスク及び酸素濃度計を携帯することを義務付けている。

4. 冷却設備の性能試験

4.1 冷却開始前準備：ガス置換、精製運転

低温設備の性能試験は、システム完成とともに 2008 年 12 月初めより開始した。まず、磁石を含めた全系ガス置換の後、圧縮機を起動し、露点（水分計）が -70°C 以下になるまで低温設備側単独で循環精製運転を行った。

4.2 冷却設備単独：冷却性能確認試験

サブクーラーには、低温設備の仕様性能確認のため、超臨界ヘリウムポンプ出口のバイパス、シールドラインのバイパスが設けられており、バイパスへは、マグネット部の圧損を模擬するバルブと熱負荷を模擬するヒーターが取り付けられている。Table 1 にまとめる仕様熱負荷 $410\text{ W} + 1.1\text{ g/s}$ は、 520 W の等価ヒーター熱負荷で、 85 kPa の圧力損失はバイパスバルブ調整で模擬した。

この模擬熱負荷 520 W にヘッド圧（圧力損失） 85 kPa で 300 g/s の SHe を循環するポンプの断熱圧縮発熱 350 W とサブクーラー液体ヘリウム液面制御ヒーターの 650 W の合計からクロードサイクル部の寒冷発生量は液体窒素無しで 1500 W 達することを確認した。この結果は、ポンプ発熱を差し引いた約 1100 W が SHe 循環系への許容熱負荷であることを意味する。

4.3 超伝導磁石冷却・励磁性能試験

4.3.1 予冷

低温設備としては、仕様を満たす冷凍能力を得たので、超伝導磁石系の循環精製を始めた。約 2 日後にはマグネットへの供給ガスの露点が -86.4°C 、マグネットからの戻りガスの露点が -74°C 、窒素分光計が 0.03 ppm 、ガスクロの分析 $\text{CO } 0\text{ ppm}$, $\text{CO}_2\text{ } 0\text{ ppm}$, $\text{N}_2\text{ } 0\text{ ppm}$, $\text{O}_2\text{ } 0\text{ ppm}$ となり、予冷を開始した。

予冷曲線を Fig. 7 に示す。前項で報告したように寒冷能力に余力があるので、予冷日数は仕様値の 20 日及び予測値の 16 日をはるかに下回る 9 日となった。ただ初回は最終的なヘリウム冷媒の充填を、液化時行ったので液化に時間がかかっており、ヘリウム冷媒量固定後の 2 回目の予冷では Fig. 7 に示すように 8 日間で予冷を完了している。予冷が促進された理由は、液体窒素の寒冷が効かなくなる 100 K 以下の領域でのタービン能力が高かったためである。また、液体窒素の消費量は、 65000 l となった。単純に液体窒素のみで 77 K まで超伝導磁石（鉄換算 225 ton ）を冷

Fig. 7 Cool down curve of the superconducting magnet system.

却すると 116000 l 必要で、 100 K 以上の領域でもタービンの発生する寒冷が予冷に貢献していることが確認された。

8 K 以下で、磁石冷却は圧縮機循環よりポンプ循環に切り替わる。そして SHe 擬臨界線よりポンプ循環系の温度が下がるに従いポンプ送液量は 40 g/s より 300 g/s 近くまで徐々に増え、サブクーラーの貯液槽に液体ヘリウムが溜まると 0.4 MPa , 4.6 K の SHe が送り込まれ、 4.8 K , 0.32 MPa の SHe が戻り定常状態になる。またこの温度領域ではインベントリ 3750 l の磁石・TRT 系の冷媒質量が急激に増加するので、逆に貯蔵用の 3 基の中圧タンク合計 300 m^3 の圧力は 1.3 MPa から 0.12 MPa まで下がる。

4.3.2 定常冷却及び磁石断熱性能評価

ポンプ循環系と冷凍機系は、Fig. 6 に示すように、第 3 タービンの出口とポンプの出口がつながっており、JT 弁によって第 3 タービンの出口圧力を 0.4 MPa に圧力制御することでポンプ出口圧力も 0.4 MPa に制御される。一方電流リードより抜けていく磁石循環系の冷媒は、この制御の中で自動的に補充され、圧力は一定に保たれる。

まずビームロスが無い状況の下、循環流量や電流リード流量を変動させながら磁石列や TRT の温度分布を測定して熱侵入量を見積もった。測定された熱侵入量はおおよそ $210\text{ W} \sim 220\text{ W}$ で、低温設備検討開始時の 185 W より高くなっている。これは、インターコネクト部のビームモニター的设计変更やダブレットのセンサー信号線が増えたた

Table 3 Budget of the heat load in the superconducting magnets which is composed of 14 CCFMs and 13 SICs.

	1 台分 (W)	合算値 (W)
ダブレット	5.95	83.9
SIC (クエンチリリーフ弁)	5	20
SIC (コレクター磁石)	5.8	17.4
SIC (ビームロスモニター)	3.4	17
SIC (その他)	3.4	3.4
FB + EB + TRT	61	61
磁石系 + TRT 侵入熱量合計		210

めである。ダブレット単独試験結果も踏まえた熱負荷の再見積りを **Table 3** にまとめる。

磁石励磁は、当初の J-PARC メインリング陽子エネルギーが 50 GeV から 30 GeV に変更されたことに対応して、超伝導システムの性能確認試験としては 5000 A をもって励磁確認とした。低温設備の SHe 循環による冷凍能力が 1100 W を有するのに対して、磁石・TRT 侵入熱が 210 W ~ 220 W と 4400 A でのリード冷却流量、0.6 g/s に相当する 50 W の合算 260 W に過ぎない。過剰な寒冷はサブクーラー内の液体ヘリウム液面一定制御の中で 800 W ~ 900 W のヒーター負荷で消費されている。この数値は将来予測されるビームロス最大 150 W に対しても、また 7345 A 通電 (50 GeV 定格運転) に対しても低温設備が余力を持っていることを示している。またこのことが、後述するように、余力分を圧縮機動力の低減に結び付ける運転方法を開発する動機になった。

4.3.3 圧力損失の評価

SHe 供給ライン内には上述のように超伝導ブスバー、信号線を保護する絶縁チューブ、それを支持するためのスパーサー、フレキ管等を有する複雑な断面形状を持つため、SHe の圧力損失を見積もるためには、管摩擦係数の評価が設計時の課題となっていた。そこで総長 500 m の SHe 循環系の圧力損失を測定し、超伝導磁石内冷却流路の平均的な管摩擦係数を見積もった¹³⁾。なお一般に管摩擦係数はレイノルズ数依存性を示すため、動粘度が異なる室温ヘリウムガスによる循環精製時にも圧力損失を測定した。Fig. 3 に示すように圧力発信器は最上流・下流部にそれぞれ 1 箇所ずつ、超伝導磁石システム冷却流路内に 8 箇所の合計 10 箇所に設置されている。

Fig. 8 (a) に定常冷却運転時の圧力損失測定 (流量=237 g/sec, 266 g/sec, 330 g/sec) 結果と計算結果を示す。図示するように圧力損失の大部分が SHe 供給ライン及び磁石部で占められている。これは SHe 供給ラインや磁石が上述のように内部構造をもつ複雑断面構造を有していることに起因している。なお磁石内の圧力勾配はほぼ一様で冷却流路に異常が無いことも確認できた。

Fig. 8 (b) には超伝導磁石内冷却流路の平均レイノルズ数と平均壁摩擦係数の循環精製時・定常運転時の測定値および比較のため層流領域、乱流領域の理論式・実験式^{10, 11)}ののせた Moody 線図である。超伝導磁石流路内は場所により断面構造が異なり局所レイノルズ数を用いた厳密な管摩擦係数の評価は不可能であるが、ダブレット 1 台分の冷却流路内平均管摩擦係数は実験的に求められた。図中の RR とは管壁荒さの度合い (Relative Roughness) を意味しており、 $RR=1 \times 10^{-4}$ から 1×10^{-1} までの荒さを有する管摩擦係数のレイノルズ数依存性 (Colebrook の関係式) も参考のため載せている。図示するように、平均壁面摩擦係数のレイノルズ数依存性が見られる。また滑らかな管を想定した乱流領域

(a) Pressure distribution for the superconducting magnets in steady state operation.

(b) Average of the measured wall friction factor for the SHe supply line in the superconducting magnets.

Fig. 8 Pressure drop through the superconducting magnets and the transfer tube.

の Prandtl-Karman, Blasius 式の値より大きく $RR=1 \times 10^{-2}$ 程度の Colebrook 式と比較的良好一致を示している¹³⁾。

4.3.4 クエンチ処理

クエンチが発生するとサブクーラー SHe の送り弁、戻り弁が閉止し、単独試験時に用いたポンプバイパス弁が開きポンプ循環から磁石は切り離される。クエンチ発熱を受けて上昇する圧力は緊急放出ラインを経由して 3 基の貯蔵用中圧タンクに直接吸収される。このようなクエンチ後の処置で冷凍機のみならずポンプにもほとんど擾乱は伝わらない。インターコネクトの内 4 か所には緊急放弁の役割を果たす、クエンチリリーフ弁 (「QRV」と略す。詳細構造は本特集号の技術ノート参照) が組込まれ、磁石の内圧が 0.45 MPa を超えると開となる。予冷中は 1.3 MPa に設定されている。

4400 A 通電時に、クエンチ保護ヒーターを用いて 28 台全てのマグネットをクエンチさせたときの SHe 温度およびサブクーラー貯液槽液面の時間推移を Fig. 9 に示す。クエンチ時の急激な圧力上昇や温度上昇など状態変化が一段落すると再予冷を開始する。クエンチ直後はかなり高い温度になった巻線部もヨークなどへの熱散逸後は 6 K 以下の

Fig. 9 Time evolution of the SHe temperature in the magnet line and the liquid He level of the sub-cooler tank.

温度に落ち着く。そのため、再予冷もポンプの能力が十分発揮できる温度領域なので、ポンプ循環により磁石を再予冷する。まず SHe 戻り弁を開けて磁石内圧を QRV 吹出し圧力の 0.45 MPa から 0.40 MPa まで下げ、その後バイパス弁を閉めつつ SHe 送り弁を開けてゆき、ポンプ循環を始める。ただしいくら 6 K とはいえ定常時の 300 g/s 循環すると、サブクーラー貯液槽の液体ヘリウムの蒸発が激しく、冷凍機の戻りの温度以上低下や低圧圧力の上昇を招くので、100 g/s 位まで流量を落として再予冷を進める。全ての磁石がクエンチした場合は、Fig. 9 の温度トレンドに示すように、マグネットから戻ってきた約 5.5 K のヘリウムはサブクーラー内での熱交換器では完全に熱交換されず 5 K 程度の SHe となり再び磁石システムに送り込まれる。その後約 2~3 時間をかけてマグネット内温度が 4.5 K 近傍に到達すると、液面は低下から上昇に転じ、ヒーター液面制御を開始する。すなわち、再予冷にはその時点での冷凍機による冷凍能力以外に液体ヘリウムとして保存した寒冷を用いて短時間に再予冷が完了するようにしている。4400 A フルクエンチから約 5.5 時間後にサブクーラー貯液面レベルも含めて定常運転モードに回復した。クエンチ時の冷却系における挙動の詳細は今後の国内・国際学会で行う予定である。

4.3.5 効率の評価と省電力運転

先に述べたように冷凍機の生成する寒冷は 1500 W 近くあり、磁石・TRT の熱負荷や SHe ポンプ断熱圧縮熱を差し引いた 900 W 近くがヒーター発熱で消費されている。最終的には圧縮機動力を下げた電気代を節約するように、冷凍能力を調整する運転方法を試みた。スクリー圧縮機は容量式に分類され、吐出流量と吐出圧力を減らすことが最終的な動力低減に結びつく。使用しているスクリー圧縮部はアンロード機構を備えている一方で電動機はインバータの様な回転数制御が備えられていないので、アンロードを操作することで容量を調整し、省電力へと結びつける。シーケンスプログラムを制御系に追加し、自動的に安

Table 4 Typical parameters which are changed by the power saving sequence.

		before	after
1st stage unloader	%	100	87
Refrigerator flow	g/sec	150	110
LHe level control heater power	W	850	200
Compressor input	kW	570	410
SHe flow (just for information)	g/sec	300	300

全にアンロードを下げて省電力を実現した。この省電力シーケンスは大まかに分けて 2 つの行程から成り立っている。

行程 1

① 冷凍機の熱バランスに影響を与えないよう、寒冷流量が 155 g/s から 140 g/s 以下になるまで第 1 タービンと第 3 タービンの個々の入口弁を一定スピード(0.1%/10 sec)で絞り、冷凍能力を低下させる。

② 冷凍機への流量が減ると、吐出圧力を制御している高圧側のアンロード弁の開度が増し、バッファータンクへの流量が増すので、吐出圧力が急激に変動しないように圧縮機の低段アンロードを一定の速度で減量し、高圧側のアンロード弁の開度が 50%以下になるまで減量すると、使用電力は低下する。

行程 2

③ 吐出圧力の設定値を圧力変動が起こらない速度(0.1 kPa/sec)で 1.4 MPa から 1.2 MPa に下げると、冷凍機の第 1 タービン入口弁と第 3 タービン入口弁は固定開度なので、冷凍機の寒冷流量は 110 g/s 程度まで減少し、冷凍能力は低下し、使用電力は僅かに低下する。

④ 吐出圧力の設定値を下げて行くと再びアンロード弁の開度が開いて行くので、開度が 50%以下になるよう圧縮機の低段アンロードを一定の速度で減量すると、使用電力は低下する。

このシーケンスの実行で注意すべき点は、1) 圧縮機のアンロードの容量制御特性を十分に理解し、オイルセパレーター内の流速 (10 m/min) を上げ過ぎてオイルを破過させてしまわないこと、2) アンロード弁の開度をみてバッファータンクへの流量が 2 g/s ~ 7 g/s の範囲となるよう圧縮機の低段アンロードを制御すること、3) タービンの最低回転数を守ること、4) サーマルオシレーションの原因となる圧力変動は起こさないこと、である。

省電力シーケンスの成果を、Table 4 にまとめる。72%近くまで電力が節約された。液体窒素を定常時には使用しないことも含めてランニングコストを下げることができた。

5. まとめ

ニュートリノ超伝導システムの低温設備は、クロードサイクルの冷凍機と遠心ポンプによる SHe 循環系を組み合わせた冷凍サイクルで、約 150 m、28 台の超伝導磁石列を

4.8 K 以下に安定して低温保持し、励磁運転を支えている。予冷日数は 8 日で、クエンチ後の復旧時間は最大 5.5 時間であった。クエンチ時には緊急放出ラインを通じて中圧タンクと磁石を直結させて、クエンチ圧力を抑えけるとともに、冷媒ガスの外部への散逸を防いでいる。これらの動作は制御系によって自動的に行われ、装置が安全な状態におかれたことを確認した。低温設備の冷凍能力は、冷凍機単体で 1500 W で、ポンプでの SH_e の 100 kPa の断熱圧縮熱を差し引いた 1100 W が SH_e 循環側での冷凍能力となる。これは磁石部や TRT での侵入熱などの熱負荷実測値約 220 W と電流リード 1.0 g/s (等価 100 W) にビームロス (最大 150 W) を加えても大きな余力を持っていることを示す数値である。この余力は、熱負荷や圧力損失など負荷の予測値に 10 - 50%の安全率を加味して低温設備の要求仕様を作成したこと、メーカー側もこれにマージンを加味した冷凍機や圧縮機の設計を行ったことに起因している。この余力は予測より大幅に短縮された予冷時間や、クエンチ後の復旧時間をもたらした。一方で、定格運転中は生成した寒冷を無駄に消費することを意味しており、このことが冷凍能力を調節し電気代を節約する運転方法を検討するきっかけとなった。現在 1500 W の冷凍能力を 850 W 程度まで抑え、電力消費も 72%程度まで下げた運転方法を確立している。

J-PARC ニュートリノビームライン低温設備は、ニュートリノ実験施設建設グループを始め、KEK、JAEA などの関係各位の御尽力で無事完成することができました。特に KEK 定年退官後にもかかわらず土井義城氏には仕様作成時に親身に助言いただきました。またエンジニアリング設計、製作、現場工事では、伊藤厚之氏、金田知士氏、熊木卓也氏、高橋亘氏、永見将和氏、中島俊哉氏を始めとする大陽日酸の方々や市原直氏、岡田泰之氏、湊恒明氏を始めとする三菱電機の方々、また双葉工業を始めとする数多くの民間会社から多大なる御協力を頂きました。心より感謝致します。

参 考 文 献

- 1) M. Furusawa, et al.: "The joint project for high-intensity proton accelerators", KEK Report 99-1; JAERI-Tech 99-056; JHF-99-3, (1999)
- 2) Y. Ito, et al.: The JHF-Kamioka neutrino project, hep-ex/0106019
- 3) T. Ogitsu et al.: "Superconducting combined function magnet system for J-PARC neutrino experiment", IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 1175-1180
- 4) T. Nakamoto, et al.: "Design of superconducting combined function magnets at the 50 GeV proton beam line for the J-PARC neutrino experiment", IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (2004) 616-619
- 5) T. Nakamoto, et al.: "Development of superconducting combined function magnets for the proton transport line for the J-PARC neutrino experiment", Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee (2005) 495-499
- 6) K. Sasaki, et al.: "Test results of superconducting combined function magnets for the J-PARC neutrino beam line", IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1083-1086
- 7) K. Sasaki, et al.: "Magnet field measurement system in superconducting combined function magnets for the J-PARC neutrino beam line", IEEE Trans. Appl. Supercond. **18** (2008) 142-145
- 8) K. Sasaki, et al.: "Performance tests of superconducting combined function magnets in the first full-scale prototype cryostat for the J-PARC neutrino beam line", IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1255-1258
- 9) N. Kimura, et al.: "Development of full scale prototype cryostat of superconducting magnet system for J-PARC neutrino experiment", Proceedings of International Cryogenic Engineering Conference 21 (2007) 1117-1120
- 10) H. Blasius: "Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung", Z. Math. Phys. **56** (1908) 1-37, English translation NACA TM, No. 1256
- 11) S. Goldstein: "Modern Developments in Fluid Dynamics", Vols. I&II, Oxford University Press (1938); also Dover Publications.
- 12) Y. Makida, et al.: "Cryogenic system for J-PARC neutrino superconducting magnet beam line -design, construction, and performance test-, " presented at Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Tucson, Arizona, USA, June 28-July 2 (2009), Advances in Cryogenics Engineering, to be published.
- 13) T. Okamura, et al.: "Cryogenic performance of a superconducting magnet system for the J-PARC neutrino beam line," presented at Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference, Tucson, Arizona, USA, June 28-July 2 (2009), Advances in Cryogenics Engineering, to be published.
- 14) Y. Makida, Y. Doi, et al.: "Conceptual design of a 2kW cryogenic system for the neutrino superconducting beam line magnet system in the J-PARC 50 GeV proton accelerator", International Cryogenic Engineering Conference 20, edited by Butterworth, Beijing, China (2005) 27-30

植 田 康 博 1962 年 8 月生。1987 年高エネルギー物理学研究所 (現「高エネルギー加速器研究機構」) 勤務。主に粒子検出器用超伝導磁石開発に従事。低温工学協会会員。工学博士

岡 村 崇 弘 1976 年 5 月生。2004 年高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所勤務。2008 年より J-PARC センター低温セクション併任。主に低温機器製作に従事。低温工学協会、日本流体力学会会員。

大 畠 克 洋 1969 年 1 月生。1987 年高エネルギー物理学研究所共通研究系低温部門勤務。2009 年より J-PARC センター低温セクション併任。主にヘリウム冷凍設備の設計・運転・制御システムの構築に従事。

木 村 誠 宏 1958 年 2 月生。1984 年高エネルギー物理学研究所物理研究系に勤務。1992 年同低温センター助手。1995 年より、文部省在外研究員及び CERN 客員研究員。2008 年より J-PARC

センター低温セクション併任。主として He II による超伝導磁石の冷却技術の研究開発に従事。低温工学協会会員。工学博士。

安 島 泰 雄 1957 年 4 月生。1976 年高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）入所。機械工学センター所属。低温工学協会、溶接学会会員。

寺 島 昭 男 1954 年 2 月 3 日生。1973 年高エネルギー物理学研究所（現 高エネルギー加速器研究機構）勤務。主として超伝導電磁石の製作、冷却・励磁試験設備の開発に従事。低温工学協会会員

荒 岡 修 1955 年 1 月生。1973 年高エネルギー物理学研究所入所物理研究系に勤務。水素泡箱部門に所属。液化水素

の製造に従事。2009 年より J-PARC センター低温セクション併任。大型実験装置の液化ヘリウムの製造に従事。

鈴 木 祥 仁 1958 年 4 月生。1977 年高エネルギー物理学研究所入所物理研究系に勤務。2009 年より J-PARC センター低温セクション併任。主に JPARC ニュートリノ超伝導システム用ヘリウム冷凍施設のガスクロマトグラフや制御 LAN 監視端末構築及びハドロン実験用水素ターゲットに従事。

飯 田 真 久 1965 年 10 月生。1991 年高エネルギー物理学研究所入所共通基盤研究系低温センター勤務。2009 年より同研究所 J-PARC センター低温セクション併任。低温機器製作、高圧ガス機器の保守、冷凍機制御及び回収系システムの構築に従事。