

J-PARC 超伝導ビームライン用低温設備の設計、建設、性能試験

○大畠洋克^{A)}、槇田康博^{A)}、荻津透^{A)}、荒岡修^{A)}、鈴木祥仁^{A)}、岡村崇弘^{A)}、木村誠宏^{A)}、
佐々木憲一^{A)}、中本建志^{A)}、都丸隆行^{A)}、飯田真久^{A)}、田中賢一^{A)}
伊藤厚之^{B)}、永見将和^{B)}、熊木卓也^{B)}、高橋亘^{B)}、中嶋俊哉^{B)}、金田知士^{B)}
市原直^{C)}、村井隆^{C)}
A) 高エネ研、B) 太陽日酸、C) 三菱電機

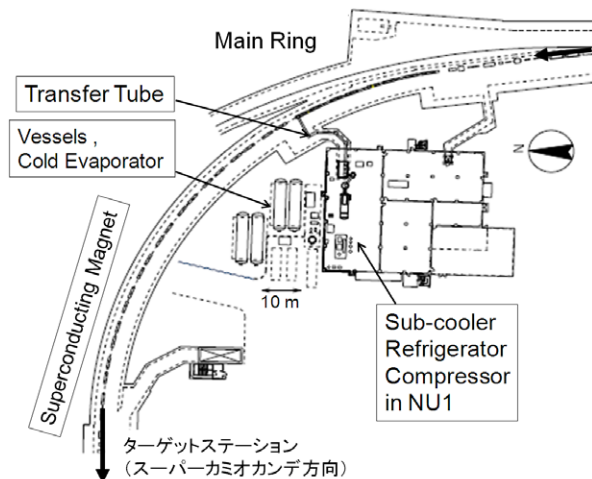
1. 概要

J-PARC¹⁾の 50GeV 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 J-PARC 敷地内の前置検出器と約 1 ミリ秒後にスーパーカミオカンデにて観測される。これらの観測結果を比較し、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、すなわち「ニュートリノ振動²⁾」現象の研究が本実験の目的である。ニュートリノビームラインに分岐された陽子は、150m

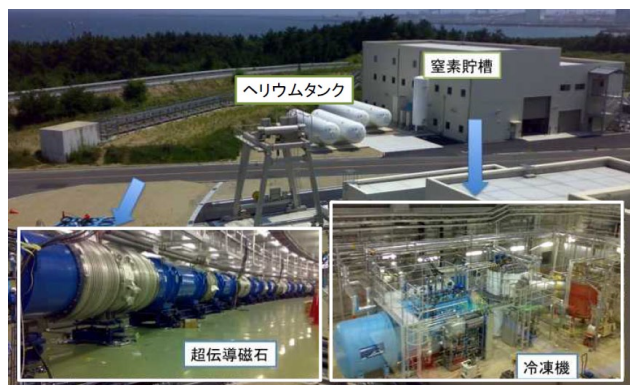
に渡る超伝導磁石列が主体のビームライン装置群 (1 次ビームライン) によってニュートリノを生成するターゲットステーションへと導かれる。この超伝導磁石列は、NbTi ラザフォードケーブルで巻線された複合磁場磁石 (Combined Functions Magnet) 28 台で構成され、5 K 以下に低温保持されなければならない。この超伝導磁石列を冷却するため、ヘリウム低温設備が建設された。

2. 低温設備の設計

ニュートリノビームライン超伝導システム (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」と略記する) 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」と略す) 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、



(a) 超伝導システム全体配置



(b) 超伝導システム外観

Fig. 1 超伝導システム全体配置及び外観

フィードボックスを介してビーム最上流側の磁石のクライオスタットと接続する。フィードボックス（以下「FB」と略す）は常伝導電磁石と超伝導電磁石との接続及び TRT と最上流側の超伝導電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」と略す）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。

Table 1 低温設備に対する被冷却体(超伝導磁石、TRT、CLB)及び超臨界ポンプの各種負荷のまとめ

2-1 被冷却体 - 超伝導磁石列、TRT、CLB

低温設備を設計するにあたって前提となった被冷却体である超伝導磁石列の冷却仕様をまとめる。

- 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、線材は直接冷媒に接して冷却される。このため、絶縁耐圧の視点からガス相が入り混じる二相流ではなく超臨界ヘリウム単相流でコイルは冷却されなければならない。
- コイルの冷却チャンネルは、磁石中央を貫通するビームパイプの外壁とコイル間の 2 mm 程度の隙間にて構成される。この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間の空隙が磁石中の冷媒流路となる。この磁石中の冷却チャンネル及び磁石間の配管、低温設備と磁石列間の TRT での超臨界ヘリウム流の圧力損失は、低温設備の負荷の 1 つとなる。
- コールドアイロン方式で、リターンヨークも被冷却体に含まれる。
- 磁石クライオスタットは磁石 2 台を 1 台のダブルットクライオスタット（以降「ダブルット」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。ダブル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。
- 磁石間配管及び TRT 中の配管の 1 つには超伝導ケーブルを通し、CLB からの電流を磁石に供給する。
- 電流リードは、通常よく用いられるガス冷却式のもので、超臨界ヘリウム流路より直接分流する。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で、1g/s 当たり 90~110 W 相当の負荷となる。
- 予冷、加温にあたって、温度勾配、冷却速度等の制限項目はない。
- 輻射シールドは 60~100K に冷却すればよく、厳しく温度管理はしない。
- 被冷却部と超臨界ポンプの熱負荷は Table 1 にまとめる。

	4.5 K	80 K
冷媒	SHE	ヘリウムガス
被冷却体全体の熱負荷	730 W+ 1.1g/s	1419 W
SHe ポンプ	320 W	
ダブルット+SIC	180 W	1033 W
TRT,CLB,FB,EB	61 W	386 W
ビームロス	150 W	
電流リード	1.0 g/s	-
+ 20 % 安全率	876 W + 1.1g/s	1703 W
コールドマス	204 ton	6.8 ton (アルミ) 2.5 ton (鉄)
+ 10 %安全率	225 ton	7.5 ton、2.8 ton
インベントリ	3550 ℓ	1620 ℓ
+ 10 %安全率	3900 ℓ	1780 ℓ
圧力損失	84 kPa	36 kPa
設計圧力	2.0 MPa(G)	2.0 MPa(G)

2-2 低温設備設計方針

前項の被冷却体からの仕様を基に、低温設備設計の方針を立てた。

- SHe は熱負荷を受けると温度上昇する。従って SHe で冷却される超伝導磁石列中には飽和ヘリウムと熱交換される再冷却器が設置されるが、前節でまとめた熱負荷と SHe の圧力損失計算から、SHe ポンプのヘッド圧力で必要な流量 300 g/s は循環可能と判断し、再冷却器は置かず、飽和ヘリウムの供給も行わないことにした。
- 前項でも触れたが、SHe の供給（循環）は SHe ポンプによって行う。JT 膨張をさせる前にコールドボックスからのヘリウムガスを飽和ヘリウムと熱交換させて SHe を生成する方法もあるが、この場合熱負荷すなわち所要冷凍能力を考慮すると 150 g/s 程度が循環冷媒量として必要となる。しかしながら磁石列に供給される SHe 流量は 70 g/s 程度にとどまるため、ダブレットクライオスタット内に再冷却器を設置する必要があり、構造が複雑になってしまう。そのため、①磁石クライオスタット内の構造や配管はなるべく単純にしたい、②JT 弁の様な重要な装置を放射線による立入制限がかかるビームトンネル内に設置したくない、といった理由から、SHe の循環のみが、低温ポンプによって行われる。従って低温設備は、Fig. 2 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。
- 超伝導磁石は、陽子ビームからの放射線に晒されるため、低温設備の機器はビームトンネル内に極力設置しないようにした。クエンチリリーフ弁や真空ゲート弁以外は放射線管理区域内に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。具体的には膨張タービンに分岐する冷媒をタービン入口弁の手前で磁石輻射シールドに迂回させる。シールド熱負荷及びシールドでの圧力損失はタービンでの所定の膨張比や入り口温度を損なう規模ではない。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。また冷却前に冷媒ガス中の不純物を除去するために液体窒素による低温精製器を使用するので、いずれにせよ液体窒素は必要で、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。

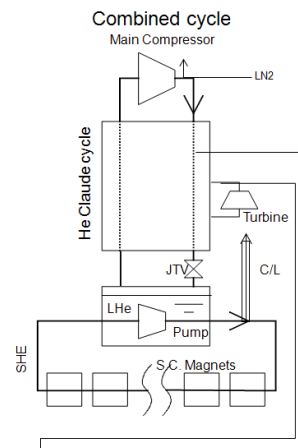


Fig. 2 SHe 循環方法の概略図

2-3 低温設備設計

前項でまとめた方針の下、受注者となった大陽日酸殿と共同で低温設備の設計を行った。概略フローを Fig. 3 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み合わせる二元冷凍システムに分類される。

主圧縮機は前川製作所製のスクリー式 2 段圧縮機 (HE3225MSC-KLBM) 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おこなっている。オイルセパレーターユニット出口での不純物濃度は 0.1 vol. ppm を上限値とし長期連続運転に備えた。オイル分離状況の監視は組込タイプ

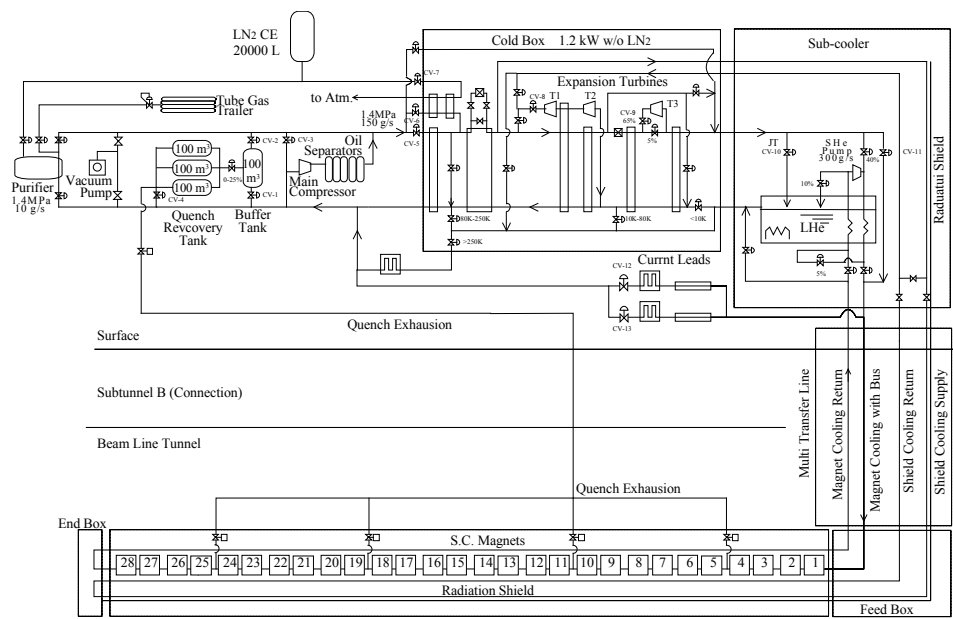


Fig. 3 冷凍設備概略フロー図

の油分センサーというものがなく、後述するガス純度監視装置も油分は検出できないので、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る油分量の測定、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実施し、相対的な2, 3 次セパレーター内の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 (LINDE Kryotechnik AG) で組立てられた TCF-200 型で、リンデ社の新系列の膨張タービン（TED タービン）3 基とアルミプレートフィン式の熱交換器、80K・20K 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0.4MPa 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。ポンプはバーバー・ニコルス社 (Barber-Nichols, Inc.) 製で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

Table 2 低温設備各機器の仕様一覧

圧縮機	
メーカー	前川製作所
タイプ	スクルー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	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 1600 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

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、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. 低温設備の設計・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6月末に現地へ設置され、9月から3カ月の配管/配線工事を経て2008年11月末に完成した。建屋（ニュートリノ第1設備棟）やタンクなどの屋外機器の基礎は、KEK施設部に依頼して建設された。液体窒素CEの基礎及び配管の支持スパンの一部は高圧ガス保安法上、耐震設備となっている。また、冷却水、換気設備、配電設備も施設部が担当した。

特に2008年11月からは地上の低温設備側と地下の磁石側の接続作業が始まり、インターフェイスとなるCLBの周りで磁石側と低温設備側が錯綜し、裏ガスの流路や溶接接続順序の工夫が必要であった。法規対応は、KHK冷凍則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（使用者）が主体としておこない、特に問題は生じなかった。

4. 低温設備の性能試験

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、地上設備側のガス置換と圧縮機を起動してヘリウムガス循環精製運転を行い、水分は露点で -70°C をクリアした。一方マグネット側は、真空ガス置換をして露点 -70°C の窒素ガスをCEより繰返し送りこんでも、露点 -50°C を下回らなかった。断熱真空部への水分の付着も相当で、ロータリー真空ポンプのバラスト弁からは水滴がしばらく出続けた。これは超伝導磁石システムの現場設置・アライメント作業時期（2008年2月～11月）において空調管理されず結露の激しいトンネルでの設置、組合せ作業のために、マグネット表面やスーパーインシュレーション等に水分が吸着したためであると考えられる。窒素ガス置換と真空引を約3週間繰り返した結果露点は -50°C を下回るようになり、最終的にヘリウムへガス置換した。

4-2 低温設備単独：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る。

低温設備の性能試験結果は良好で、寒冷発生量は窒素無しで仕様値の1.2kWを上回る1.5kWに達した。この発生した寒冷は、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を差し引いた約1.1 kWが許容熱負荷となることが測定された。

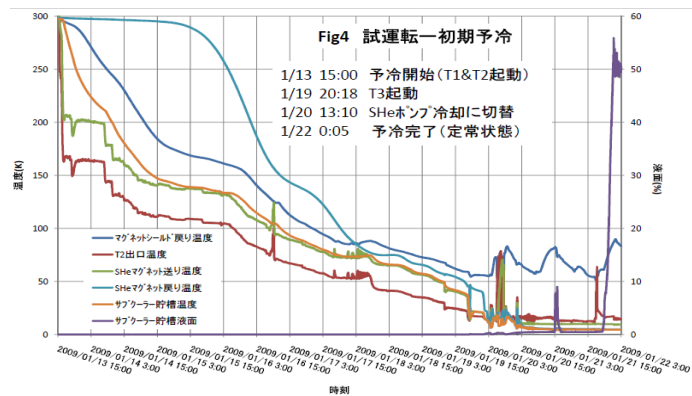
4-3 超伝導磁石冷却・励磁性能試験

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開始し、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

口の分析 CO 0 ppm, CO2 0 ppm, N2 0 ppm, O2 0 ppm となったところで循環精製運転を終え、予冷を開始した。

予冷曲線を Fig4 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 14 日をはるかに下回る 9 日となった。ただ今回は液化時にヘリウムガスの供給が不足するというトラブルが起きたため、これがなければ 8 日以内で冷却できる。予冷が促進された理由としては、液体窒素の寒冷は効かなくなる 100K 以下の領域でのタービン能力が高く、この温度領域での予冷速度が早くなったためである。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 200 ton）を冷却すると 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は貢献している。



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 3850 m³ 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 m³ の圧力は流量増加に伴い 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. 3 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、電流リードより抜けていくポンプ循環系の冷媒量が JT 弁による第 3 タービンの 0.4 MPa の保圧制御の下、自動的に補充されるとともに、ポンプ出口の圧力を一定に保ってポンプ系全体の圧力レベルを維持している。

まずビームロスの無い状況の下、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進入量を測定した。測定された熱進入量はおよそ 210 W ~ 220 W で、低温設備検討開始時の 180 W よりは高くなっているが、インターコネクト部のビームモニターの設定変更やダブレットのセンサー信号線が増えたためである。ダブレット単独試験結果も踏まえた熱負荷の再見積もりを行い Table. 3 にまとめている。

磁石励磁は、J-PARC の運転計画の変更で陽子エネルギーが 50 GeV より 30 GeV 下がったことに対応して、超伝導システムとしては通電電流 7600 A が可能な設備を整えてきたものの、運転励磁値が 4400 A に下るため、性能確認試験では実機システムであることと磁石単独ではすでに 7700 A 通電は確認していることを配慮して、5000 A の励磁をもって励磁確認とした。低温設備としては励磁が開始されると電流リード分の冷凍能力を消費されることになるが、SHe 循環による冷凍能力が 1.1 kW にたいして、磁石・TRT 侵入熱が 220 W に、4400 A でのリード冷却流量、0.5 g/s に相当する 50 W を加算してもほとんど影響は無かった。結局過剰な寒

Table.3 超伝導磁石システムの侵入熱内訳

	1台あたり(W)	合算値(W)
CCFM	5.95	83.3
SIC(クエンチリリーフ弁)	5	20
SIC(コレクター電磁石)	5.8	17.4
SIC(ビームロスモニター)	3.4	17
SIC	3.4	3.4
フィードボックス	1.34	1.34
エンドボックス	0.71	0.71
マグネットシステム侵入熱量		143

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 ~ 900 W のヒーター負荷で消費している。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) に対しても余力を持っていることを示している。

4-3-3 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經由して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か所には緊急放出弁の役割を果たす、クエンチリリース弁 (JPARC用に開発された開発責任者の名前を取り「NKV」と命名 Fig. 5) が組み込まれ、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。

Fig. 6に28台全てのマグネットが4400Aでクエンチしたときの再予冷時のマグネット温度およびサブクーラー貯液槽液面の時間推移を示す。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、SHe戻り弁をまず開けて磁石内圧をNKV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、ポンプ循環系による磁石の再予冷を始める。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。約2時間で全てのマグネットは5 K以下になり、液面は低下から上昇に転じ、約5.5時間後にヒーター液面制御を開始する。よって再予冷時間は仕様値の8時間を下回ることが確認された。

5. まとめ

ニュートリノ超伝導システムの低温設備は、当初の建設予定を遅らせることなく完成させ、性能試験の結果も要求仕様を上回る結果を示せた。現在、制御系の自動運転も問題なく動作しており、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、4400 Aでの励磁運転を行なっている。

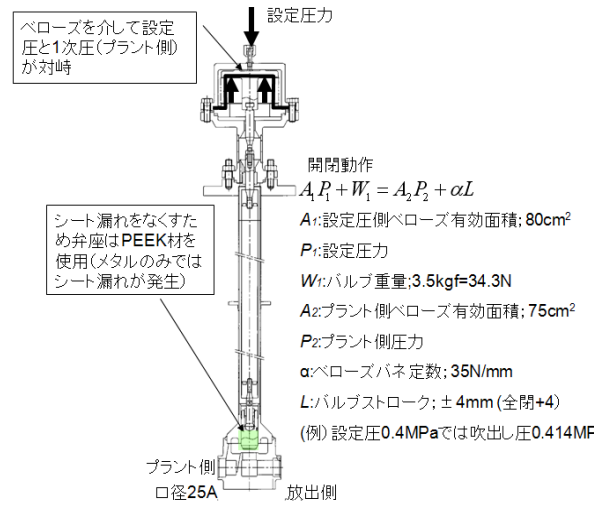


Fig6 NKV

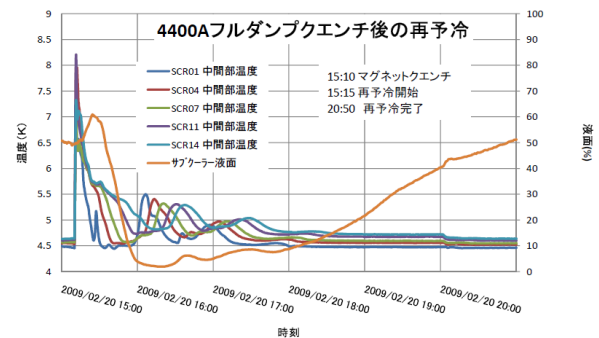


Fig. 6 28 台全てのマグネットが 4400A でクエンチしたときの再予冷時のマグネット温度およびサブクーラー貯液槽液面の時間推移