

12. ニュートリノ二次ビームライン

高エネルギー加速器研究機構

多 田 将

目 次

ニュートリノ二次ビームライン

1	はじめに	12-1
2	二次ビームラインの概要	12-1
3	ターゲットステーション	12-1
3.1	サーヴィスピットとヘリウム容器	12-2
3.2	ヘリウム容器内鉄遮蔽体	12-5
3.3	ヘリウム容器側部・底部鉄遮蔽体	12-5
3.4	ディケイヴォリューム・コリメーター	12-5
3.5	機械室	12-6
3.6	保管庫	12-6
3.7	メンテナンスエリア	12-7
4	ディケイヴォリューム	12-8
5	ビームダンプと第3設備棟	12-10
5.1	ビームダンプコア	12-10
5.2	ヘリウム容器と遮蔽体	12-11
5.3	ミュオンモニター	12-12
5.4	ニュートリノ第3設備棟の設備	12-12
6	ビーム窓	12-13
7	電磁ホーン	12-13
7.1	電磁ホーン本体	12-13
7.2	電磁ホーン電源	12-15
7.3	電磁ホーン冷却水システム	12-16
7.4	水素再結合器とフラッシングシステム	12-17
7.5	バップル	12-18
8	冷却水システム	12-18
8.1	冷却水システム概要	12-18
8.2	大強度化	12-19
8.3	脱酸素装置と黒皮問題	12-20
9	ヘリウム循環システム	12-20
9.1	ターゲット冷却系統	12-20
9.2	ビーム窓冷却系統	12-20
9.3	ヘリウム容器循環系統	12-21
9.4	電磁ホーン冷却水気相循環システム	12-22
9.5	ガス分析システム	12-22
9.6	ヘリウム供給システム	12-22
10	排水システム	12-22
10.1	ターゲットステーション側	12-22
10.2	ニュートリノ第3設備棟側	12-23
10.3	工水浄化システム	12-23
11	リモートメンテナンスシステム	12-23
11.1	電磁ホーン	12-24
11.2	ターゲット交換システム	12-29
11.3	ビーム窓交換システム	12-31
12	おわりに	12-34

ニュートリノ二次ビームライン

1. はじめに

J-PARC のニュートリノ実験施設は、3つの部分から構成されている。メインリングから陽子ビームを受け、神岡方向へとビームの向きを変えた上、ターゲットまでビームを導く一次ビームライン。陽子ビームをターゲットに打ち込むことで、ニュートリノを生成する二次ビームライン。そして、生成したニュートリノを、神岡に向けて飛ばす前に、その方向・量・性質（エネルギーなど）を調べるニュートリノモニターである。このうち、本稿では、二次ビームラインについて説明する。

ニュートリノは、陽子をターゲットに撃ち込み、その際に生じた π 中間子が、ニュートリノとミュオンに崩壊することで得られる。このため、ニュートリノ二次ビームラインは、ターゲットを中心としたニュートリノ生成装置と、反応し切れなかった陽子などを止めるビームダンプ、そしてその両者を結び、 π 中間子がニュートリノへと崩壊する空間を提供するディケイヴォリュームから構成されている。

これらの二次ビームラインの構成要素は、かつての K2K 実験でのニュートリノビームラインを基に開発されたが、それとは桁違いに大きなビーム強度で運転される J-PARC で使われるため、完全に新たに検討・設計・開発されたものである。

2. 二次ビームラインの概要

二次ビームラインの中心となるニュートリノ生成装置は、ビームが空気を反応させて生じる窒素酸化物による腐食を防ぐため、ヘリウムを充填した気密容器（以下、ヘリウム容器）に収められている。ビームダンプも別のヘリウム容器に収められ、両ヘリウム容器を繋ぐ全長 94 m のディケイヴォリュームも合わせ、全長 120 m、容積 1,500 m³ に及ぶ巨大な一体型の気密容器を構成している。ビーム運転に際しては、これを一旦真空に引

き、その上でヘリウムを大気圧+5 kPa まで充填する。

この巨大な気密容器は、J-PARC メインリングのビームラインの高さ、即ち地下に埋め込まれているが、後述する冷却水の運転や、内部機器のメンテナンス等のため、上流端部と下流端部のところだけ地上まで繋がる建屋に収まる形となっている。前者の建屋をターゲットステーション、後者の建屋をニュートリノ第3設備棟と呼ぶ。ターゲットステーション側、即ち上流端部のみ、蓋を開けられるようになっており、そこに、ターゲットを中心としたニュートリノ生成装置を収納し、これらを交換できるようになっている。この交換システムについても後述(11.)する。

Fig.1 に、二次ビームラインの側面図を示す。赤で示した部分が上流端部のヘリウム容器、緑で示した部分が下流端部のビームダンプ部、それらを繋ぐ青で示した部分がディケイヴォリュームである。

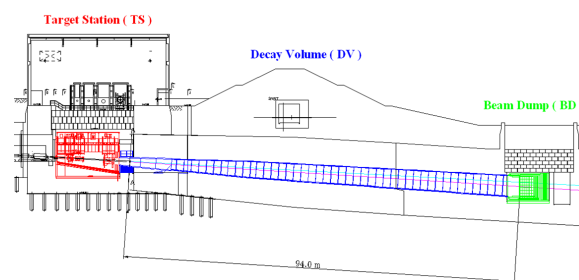


Fig. 1 二次ビームライン側面図

3. ターゲットステーション

ニュートリノ生成装置を収納する、ニュートリノビームラインの核とも言うべき建屋がターゲットステーションである。Fig.2 に、ターゲットステーションのカットモデルと、上面図を示す。ターゲットステーションは、地下が、コンクリート壁で仕切られた、ビームラインに沿った3列の空間に分かれている。中央に Fig.2 に示されているヘリウム容器が設置されており、その上部だけ、ビーム停止時には人間がアクセス出来るようになっており、その部分をサーヴィスピットと呼ぶ。

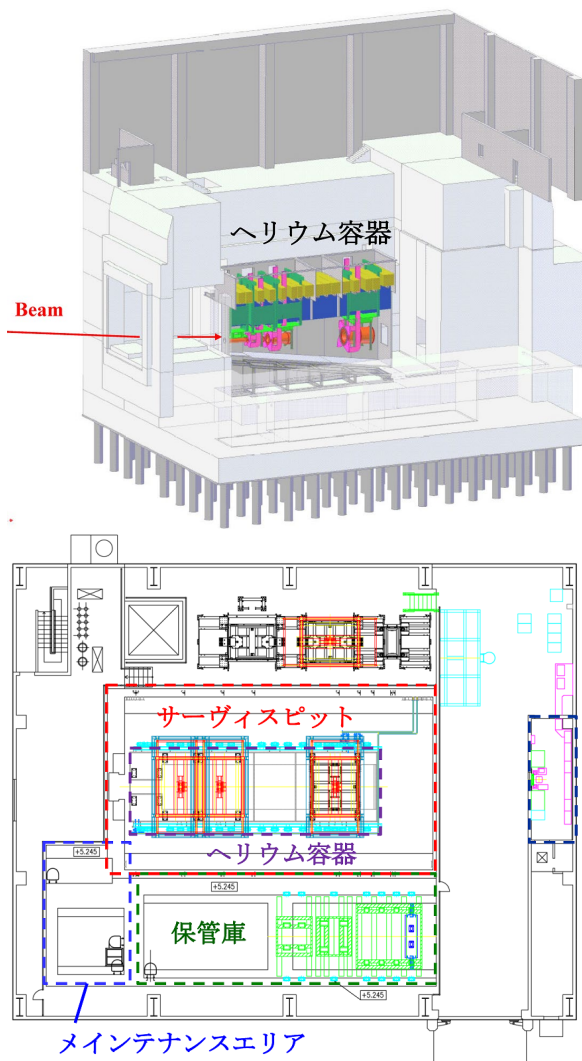


Fig. 2 ターゲットステーション

その南側（ビーム上流から見て左側）は地下 2 階建ての部屋となっており、その両室に、地下の空調システム、冷却水システム、ヘリウム循環システム等が収められている。この両室を機械室と呼ぶ。このうち、地下 1 階機械室の扉から、サーヴィスピットに入る。

サーヴィスピットの北側（ビーム上流から見て右側）は高さ 13 m の空洞となっており、ここに使用済みの各種機器を保管する。ここを保管庫と呼ぶ。保管庫のうち、上流部はコンクリート壁で仕切られて別室となっており、ここでは高放射化物を取り扱うための各種機器（マニピュレーター等）が設置されている。ここをメンテナンスエリアと呼ぶ。

サーヴィスピット、メンテナンスエリア、保管庫は、建物としては上方が開口した状態となっており、そこに可動式のコンクリート遮蔽体を設置し、ビーム運転を行う。メンテナンス期には、このコンクリート遮蔽体を互いに積み上げる形で必要な部分を開口する。ビーム運転時にはこのコンクリート遮蔽体で完全に塞いだ上、コンクリート遮蔽体最上面をコーキングし、更にその上に一体物の気密シートを被せて、放射線だけでなく、地下から上がって来る放射化空気を遮断するようにしている。保管庫とメンテナンスエリアには扉はなく、アクセスするためにはこのコンクリート遮蔽体を移動させて開口部をつくるしかない。コンクリート遮蔽体は、ビーム運転時には、サーヴィスピット上方は 3 段（厚み計 4.5 m）、保管庫とメンテナンスエリア上方は 2 段（同 3.0 m）、それぞれ設置している。

3.1. サーヴィスピットとヘリウム容器

ターゲットステーションの中心がサーヴィスピットである。この底には、ヘリウム容器が埋め込まれている。この部分のヘリウム容器の高さは 11 m である。Fig.3 にヘリウム容器のカットモデルを示す。ヘリウム容器の内側には、ターゲットと、ターゲットで生成した π 中間子を収束させてニュートリノをビーム状にする電磁ホーンが収納されている。電磁ホーンはトロイダル形の電磁

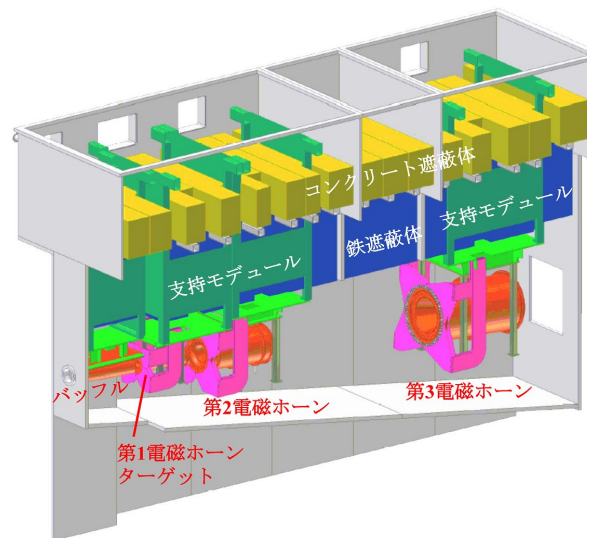


Fig. 3 ヘリウム容器

石で、3台直列に設置され、上流側から、第1電磁ホーン、第2電磁ホーン、第3電磁ホーンと呼ぶ。ターゲットは、第1電磁ホーンに、同軸に差し込む形で取り付けられている。

電磁ホーンは、後述(11.1)するように、箱状の構造物に懸架する形で設置され、その中(電磁ホーンの上)に、高さ方向の厚さ2.3mの鉄遮蔽体と、同じく1mのコンクリート遮蔽体が設置される。このコンクリート遮蔽体の上からであれば、ビーム運転停止中には、人間がアクセス出来る。このため、ヘリウム容器は、その上部が、人間が作業可能な空間となっており、ターゲット冷却システムのヘリウム配管、電磁ホーン冷却システムの冷却水配管、電磁ホーンに電流を流すバスバー等は、鉄遮蔽体とコンクリート遮蔽体を貫通してこの上部空間に通されており、ターゲットや電磁ホーン交換の際には、これらをこの上部空間にて手作業で取り外し/取り付けするようになっている。そして、これらの配管/バスバーは、ヘリウム容器上部側面の気密フィードスルーを通じてヘリウム容器外側に繋がっている。ヘリウム容器上部は、これらのフィードスルーを取り付けるフランジが多数設けられている。また、その上面は、全長方向に3分割された全幅に亘る3枚の蓋で閉じられており、ヘリウム容器への人や機器の出入りは、その蓋を開けて行う。ヘリウム容器上部の最下部には建屋と繋がる梁が溶接され、耐震荷重を受け持つ。

ヘリウム容器下部は、ビーム窓(6.)の部分を除いてフランジ等はなく、その左右(上記の梁の下)に鉄遮蔽体を設置した後、梁の上にコンクリート製の床を設置している。この床の上が、人間が作業するサーヴィスピットに当たる。サーヴィスピットには、ターゲット冷却システムと電磁ホーン冷却システムの一部(放射線に強いものだけ)、電磁ホーンへ供給する電流のトランスなどが設置されている。このサーヴィスピット上の機器はビーム停止時にメンテナンス可能である。

ヘリウム容器下部の最上部(上部との接続部)に、電磁ホーン、ヘリウム容器内の鉄遮蔽体、ヘリウム容器内のコンクリート遮蔽体とその荷重



Fig. 4 プレートコイル

を預けている。そのため、下部はそれに耐え得る強度を持つことに加え、ビーム運転中の熱伸びを抑えるため、冷却も必要となる。伸びると電磁ホーンとターゲットの高さが変化するためである。ヘリウム容器下部(側面、底面、前面、背面)には、プレートコイルと呼ばれる冷却チャンネルが溶

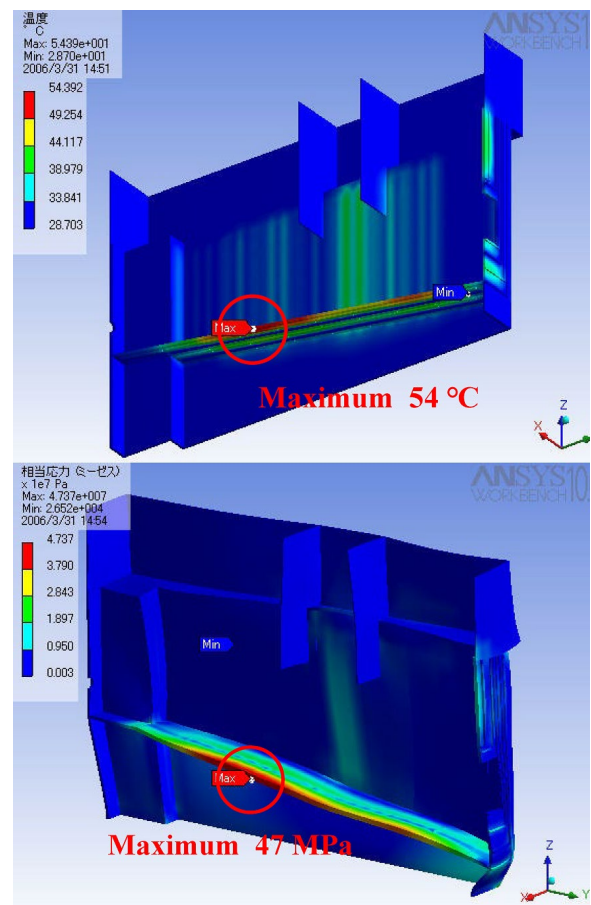


Fig. 5 ヘリウム容器の熱解析例

接されている。これは、熱交換器を半割りにしたもので、これを冷却したい鋼板に熔接し、そこに冷却水を流すことで、対象の鋼板に直接冷却水を触れさせて冷却するものである (Fig.4)。本稿でこの後度々登場するように、二次ビームラインでは多用されている冷却構造である。このプレートコイルに、ビーム強度に応じた流量の冷却水を流すことで、ヘリウム容器の熱伸びによる電磁ホーン並びにターゲットの高さの変化は、1 mm 以内に抑えられている。また、熱変形によってヘリウム容器にかかる応力が許容応力以下となるようにも配慮しなければならない。そのため、プレートコイルの設計に当たっては、ビーム運転時に発生する熱を MARS によって計算し、その熱とプレートコイルの熱伝達をモデルに入力して ANSYS による解析を行った。Fig.5 は、その解析例である。尚、プレートコイルは、側面と前面と背面はヘリウム容器外側に、底面は内側に、それぞれ取り付けられている。

更に、このヘリウム容器は、一旦真空に引いてからヘリウムを充填するため、大気からの圧力に耐え得る強度も必要とされる。そのため、真空引きの際の強度解析も行い、設計に活かしている (Fig.6)。加えて、電磁ホーンや鉄遮蔽体といった荷重を加えた上での、地震解析も行っている (Fig.7)。地震解析は、最大 650 Gal の加速応答スペクトルを入力した動解析を行った。以上のこ

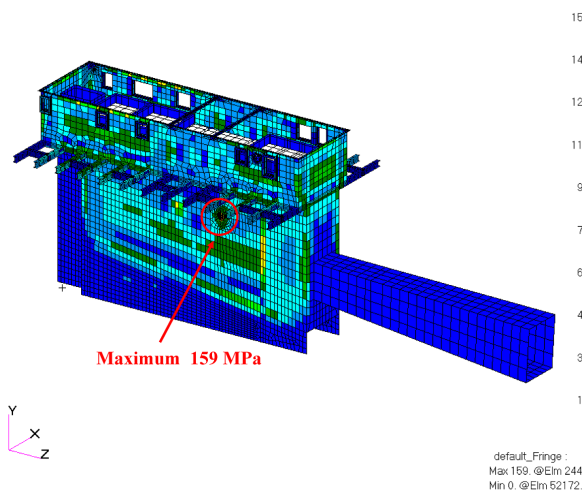


Fig. 6 ヘリウム容器の強度解析 (真空引き)

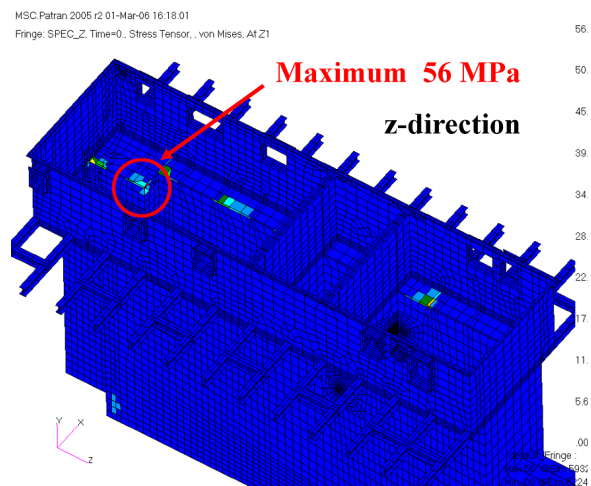
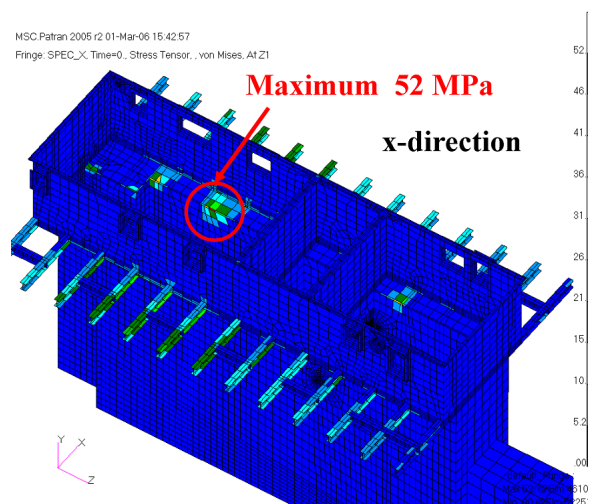


Fig. 7 ヘリウム容器の強度解析 (地震)

とを考慮して設計したため、現在までのビーム運転では予想通りの挙動を示しているほか、2011年の東北大震災の際にも、全く損傷なく、ヘリウムの漏洩などの異常も一切なかった。

ヘリウム容器は、下部 (側面、底面、前面、背面) は厚さ 100 mm の炭素鋼、上部は厚さ 50 mm の炭素鋼の、熔接構造によってつくられている。上面の蓋は、残留放射線量を低減するためにアルミニウム合金製で、厚さ 150 mm である。ヘリウム容器の重量は 300 t を超えている。この巨大な構造物を、所定の工期で設置するため、製造にはブロック工法を用いた。J-PARC は、建設当時は、港側からの仮設道路を用い、常陸那珂港からは、一般道を通らなくても搬入が可能となっていた。しかしその仮設道路上の仮設橋の耐荷重を考慮し、1ブロック 60 t 以下となるよう、また、仮設

道路の幅を超えないよう、ヘリウム容器を6つのブロックに分割した。各ブロックはプレートコイルも含めて工場で完成させ、工事現場に搬入・据付した後、ブロック同士を溶接して接続するという方法を採用した。この作業は、ターゲットステーションの建屋の地下部分が完成した直後、地上部の工事が開始される前に、そのための工期を取って行われた。ブロックを、ターゲットステーションに横付けした移動式クレーンを用いて、建屋内に据え付けるためである。移動式クレーンは650 t 吊り、搬入・据付・溶接・試験には、後述のディケイヴォリューム最上流部も含めて、4か月の工期を要した。ヘリウム容器とディケイヴォリューム上流部を繋いだ真空引き／リーク試験では、真空到達度 7 Pa、リークディテクターを用いたヘリウム噴き付け試験で 10^{-9} Pa m³/s 以下の漏れと、好成績だった。



Fig. 8 ヘリウム容器ブロックの搬入と据付

Fig.8 は、ヘリウム容器上部ブロックの搬入と下部ブロックの据付の様子である。

3.2. ヘリウム容器内鉄遮蔽体

ヘリウム容器には、前述の通り、ビーム運転中にターゲットと電磁ホーンから上がってくる放射線を遮蔽するための鉄遮蔽体が、これらの上方に設置されている (Fig.3)。この鉄遮蔽体は、電磁ホーンを交換する際に先に取り出す必要があるために、20体に分割されている。最大のものは1体 36 t で、合計重量 600 t である。これらは全てダクタイル鋳鉄製である。ビーム運転中に発生する熱を取り除くため、内部には冷却水配管が埋め込まれている。この配管を入れた状態で鋳造するには、配管が溶けてしまわないよう、鋳造メーカー独自の特別な技術が用いられた (冷やし金を入れるなど)。

3.3. ヘリウム容器側部・底部鉄遮蔽体

ヘリウム容器側部と底部にも、ビーム運転によって発生する放射線を遮蔽するための鉄遮蔽体が設置されている。これは、建屋の壁や底板と合わせて、建屋境界の放射線量が J-PARC 基準値以下 (法令よりも更に低く設定されている) となるような厚みとなっている。底部には、200 mm 厚の鉄遮蔽体が 2 層 (ヘリウム容器底板と合わせて計 500 mm) の鉄遮蔽体が設置されている。側部には、300 mm 厚と 250 mm 厚の鋼板を組み合わせ、北側 (保管庫側) で 1,500 mm (ヘリウム容器側板と合わせて計 1,600 mm)、南側 (機械室側) で 1,800 mm (同計 1,900 mm) の遮蔽厚を確保している。

3.4. ディケイヴォリューム・コリメーター

ヘリウム容器下流部は、前述のように、ディケイヴォリュームと繋がっているが、ディケイヴォリュームへ過度の熱を落とさないようにするため、ターゲットステーション側に遮蔽体を置き、そこである程度の熱を吸収する構造となっている。これをディケイヴォリューム・コリメーターと呼ぶ。これは、ヘリウム容器内最下流部 (第 3



Fig. 9 ディケイヴォリューム・コリメーター

電磁ホーンの後方に設置した鋼板と、ヘリウム容器外（下流側）に設置した鋼板とから構成されている。前者は水冷式で、ディケイヴォリューム入口と同じ形の角穴を中央に配し、両面にプレートコイルを溶接した、厚さ 180 mm の鋼板をビーム方向直列に 3 枚設置してある (Fig.9)。後者は空冷式で、ディケイヴォリューム本体の鋼板（後述）を上下左右に取り囲むようにして、厚さ 100 ~ 300 mm の鋼板を組み合わせて、ビーム方向の合計厚さ 3,800 mm となるように設置してある。3.3 のヘリウム容器側部・底部の鉄遮蔽体と、ヘリウム容器外のディケイヴォリューム・コリメーター、合わせて、ヘリウム容器の周辺（外側）に設置された鉄遮蔽体の総重量は 3,000 t に達する。

3.5. 機械室

サーヴィスピット南側にある機械室は地下 2 階構造で、地下 1 階にヘリウム循環システム (9.) と電磁ホーン冷却水システム (7.3)、機械室とサーヴィスピットと保管庫／メンテナンスエリアの空調システムがあり、地下 2 階に電磁ホーン以外の冷却水システム (8.1) と排水システム

(10.1) がある。冷却水システム、排水システム、ヘリウム循環システムについては後述する。

空調システムは、空調と循環・排気を兼ねている。この運転モードには、ビーム運転中の実験モードと、ビーム運転停止中に人間が立ち入る場合の排気モード、そして休止モードがある。実験モードは、地上に地下の空気を送らないよう、地上へと繋がるダンパーを閉じた状態で地下の空気を循環させる。その間、機械室やサーヴィスピットで生じた熱を除熱し、機器の温度を一定に保つ。前述の空冷式の鉄遮蔽体を除熱しているのは、この空調システムである。休止モードは、この実験モードに於いて、除熱を行わないモードである。正月・盆休みなどに使われる。排気モードでは、外気を取り入れ、地下で循環し、排気する。空調も稼働させて地下の温度を一定に保つ。

ターゲットステーション地上には地下とは別系統の排気システムがあり、ビーム運転中も含め、常時排気している。地上・地下とも、排気は、HEPA フィルターを通し、排気モニターでその放射能濃度を常時監視した後、排気スタックを通じて排気されている。

機械室には階段を通じて地上からアクセス出来るようになっている。但し、階段室からはインターロック区域になっており、ビーム運転中には立ち入ることが出来ない。階段室入口には、他の J-PARC のインターロック区域と同じく、二重扉で構成される入域管理室が設けられており、パーソナル・プロテクション・システムの下、決められた手順で入域するようになっている。また、機械室の上方には一部開口部があり、ビーム運転中にはコンクリート遮蔽体を設置するが、メンテナンス期にはこれを移動させて開口し、各種機器を搬入することが出来る。

3.6. 保管庫

サーヴィスピット北側にある保管庫には、使用済みの各種機器が保管してある。その中で最大のものは、過去に交換した電磁ホーンである。電磁ホーンは、キャスクに収納した状態で、保管庫東側に保管する。電磁ホーンの交換やキャスクにつ

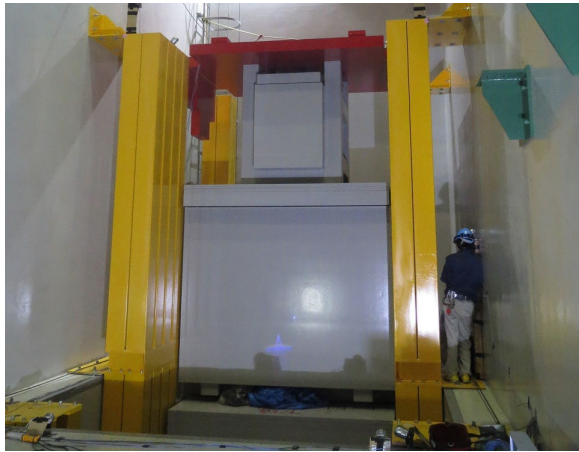


Fig. 10 保管庫内の電磁ホーン用キャスク

いは 11.1 で述べる。保管庫には最大 9 台の電磁ホーン用キャスクを収納可能で、ビーム運転で使用する電磁ホーンは前述の通り 3 台なので、3 回交換出来るだけの空間があることになる。それ以降は、そのキャスク入り電磁ホーンを、別の保管建屋に移す必要がある。Fig.10 は、保管庫に収納されたキャスクの様子である。灰色の箱がキャスクで、黄色い柱状のものは、キャスク転倒防止のガイドである。

また、保管庫西側には、鉄遮蔽体仮置架台と呼ばれる構造物がある (Fig.11)。これは、11.1 で述べる電磁ホーン交換の際に、その上方にあるヘリウム容器内鉄遮蔽体 (3.2) を仮置きするための架台である。写真の緑の部分仮置架台、灰色の物体が鉄遮蔽体である。



Fig. 11 鉄遮蔽体仮置架台

3.7. メインテナンスエリア

ターゲットステーション北東角にある空間がメインテナンスエリアである。名前の通り、高放射化物をメインテナンスするための場所である。このメインテナンスエリアは、機器を置くホットエリアと、操作を行う人間が入るコールドエリアとに分かれている。両エリアは 1 m 厚のコンクリート壁で仕切られ、人間の視線の高さに鉛ガラス製の窓が設けられている (Fig.12)。

ホットエリアには、油圧式のリフトテーブル (定格荷重 5 t) と、マニピュレーターが設置されており、どちらもコールドエリアから操作する。そのほか、メインテナンスには空圧工具を使うことも多く、そのための空圧配管が 8 系統分予め配置されている。高放射化物作業の際には、事前準備の際に、それらの空圧配管のホットエリア側に空圧工具を接続しておいて、作業時には、コールドエリア側から、そのときに使いたい工具が繋がっている空圧配管にエアコンプレッサーからの配管を接続することで、工具を選択する。ホットエリア側の工具を持つのはマニピュレーターであるが、そのマニピュレーターで工具を脱着しなくてよいようにする措置である。空気を流すためのヴァルヴ開閉も、コールドエリアで行う。

メインテナンスエリアでの作業は、扱う機器ごとに様々であるが、基本的には以下の通りである。その作業で用いる機器や工具を、事前に (高放射化物を持って来る前に) ホットエリア側に設置する。マニピュレーターで操作するものは、マ

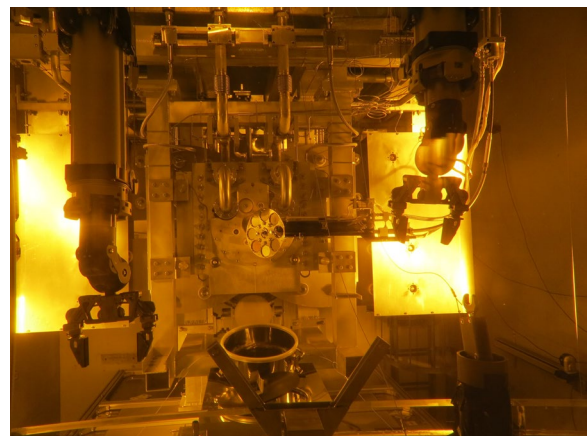


Fig. 12 鉛ガラス窓から見たホットエリア

ニピュレイターで掴み易いように持ち手をつける。鉛ガラス窓から見えない領域も多いので、ネットワークカメラも多数設置する。その後、高放射化物をホットエリアに持ってくる。必要に応じて、ホットエリアの上方をコンクリート遮蔽体で覆い、遮蔽する（電磁ホーンやターゲットの交換時には必須）。それから作業となるが、作業中に追加で必要となる工具などは、上方のコンクリート遮蔽体の隙間から降ろすことになる。

4. ディケイヴォリューム

陽子ビームがターゲットに撃ち込まれることで生成する π 中間子がニュートリノとミュオンへと崩壊する、その空間がディケイヴォリュームである。J-PARC ニュートリノビームラインでは、その長さは 94 m で、内面幅は上流側 1/3 までで 1.2 m から 3.0 m まで広がり、以降は 3.0 m のまま、内面高さは 1.7 m から 5.1 m まで下流に向けて広がっている。高さ方向が長いのは、縦方向にビームの角度を変えても対応出来るようにしたもので、オフアキス角 2.5 度を中心に、 ± 0.5 度変えても対応出来るようになっている。

オフアキス角とは、スーパーカミオカンデの方角と、ビーム中心の方向との間の角度のことである。J-PARC ニュートリノビームラインでは、この角度を 0 度としない、つまり、ビームを中心から外してスーパーカミオカンデに撃ち込んでいる。その理由は、ニュートリノ振動を最適化するためである。ニュートリノ振動の様子は、ニュートリノのエネルギーによって変わる。一方、ニュートリノのエネルギーは、ビーム中心が最大（J-PARC で 2 GeV）で、中心から外れるに従ってエネルギーが下がっていく。J-PARC からスーパーカミオカンデまでの 295 km の距離で、ミュオンニュートリノから電子ニュートリノへの変化の割合が最大となるのは、中心から 2.5 度ずれたところである（エネルギー中央値 0.7 GeV、Fig.13）。そこで、J-PARC ニュートリノビームラインでは、2.5 度ずらした状態でスーパーカミオカンデにビームを撃ち込み、実験結果によっては ± 0.5 度の範囲でその角度を変えられるようにし

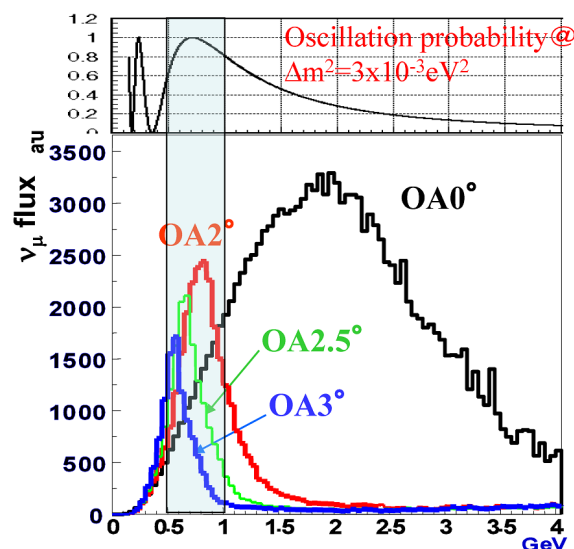


Fig. 13 オフアキス角

た。しかし、実際の実験で良い結果が得られているので、実験開始（2010 年 1 月）以来、ずっと 2.5 度のまま、これを変えずに実験を続けている。尚、この角度を変えるときには、一次ビームライン側ではビームの向きを変えるだけだが、二次ビームライン側では、電磁ホーン自体をその角度に合わせて作り直す必要がある。また、このビーム方向は、スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデを結んだ線の垂直二等分線に向いているので、スーパーカミオカンデに対するオフアキス角と、ハイパーカミオカンデに対するそれとは、常に同じになる。

ディケイヴォリュームは、内面を構成する鋼製の矩形断面パイプを、コンクリート壁が取り囲むような形になっている。この鋼製パイプは水冷式で、内面には、冷却水がビーム方向に流れるよう配置された 40 列のプレートコイルが取り付けられている（Fig.14）。天板と底板が各 8 列、側板が各 12 列である。厚みは、ディケイヴォリューム・コリメーター（3.4）の内側に位置する最上流部の 13 m だけ 200 mm で、残りは 16 mm である。最上流部にはビーム運転によって大きな熱が落ちるからである。この鋼製パイプ部分は、自身を冷却するとともに、その周囲のコンクリート壁を冷却する役割も担っている。コンクリート壁はディケイヴォリューム全長に亘っており、その厚

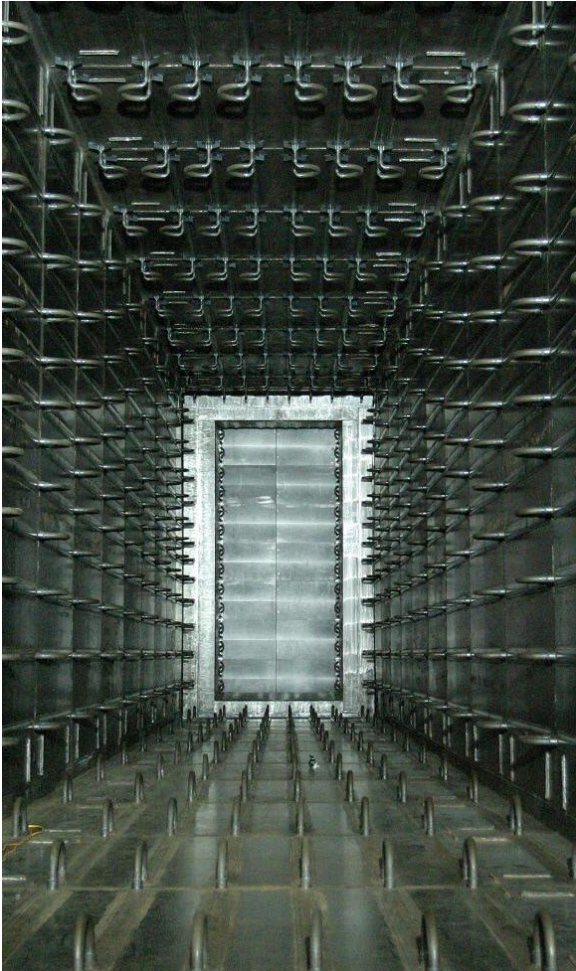


Fig. 14 ディケイヴォリューム内面

みは 6 m である。設計に当たっては、ビーム運転時の、コンクリート部分も含めた熱解析を行い、出力 4 MW のビーム運転時に於いても、コンクリートの最高温度が 120 度を超えないようにした

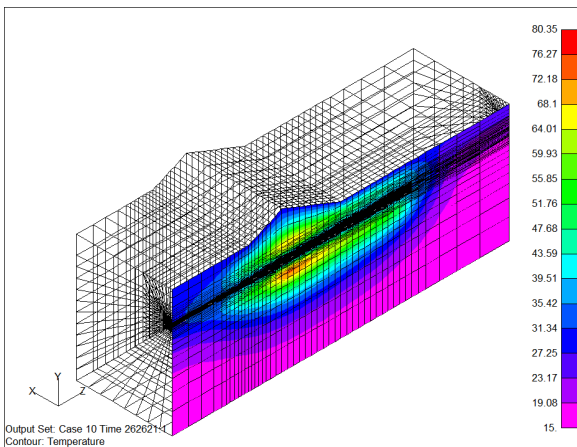


Fig. 15 ディケイヴォリュームの熱解析例

(Fig.15)。その条件を満たすために、40列のプレートコイルには、1.2 m/s の流速（流量にして 48 L/min.）の 30°C の冷却水を流すこととなった。プレートコイルが損傷して漏水した場合、そのシステムのヴァルヴを閉じてその列を封鎖するが、均等に封鎖した場合には、半分（20列）を封鎖しても、出力 2 MW までの運転が可能となるように設計されている。この措置は、一旦ビームを通すと、修理どころか立ち入ることも不可能となるディケイヴォリュームならではの設計思想に基づくものである。ディケイヴォリュームだけでなく、前述のヘリウム容器のプレートコイル (3.1) も、ディケイヴォリューム・コリメーター（水冷部分）のプレートコイル (3.4) も、同様に、全て定格流量で通水して 4 MW、均等に半分通水して 2 MW まで耐えられるように配置してある。

建設に当たっては、ディケイヴォリュームの上流部の上に RCS から MLF へとビームを運ぶ 3NBT ビームラインが交差するために、ニュートリノビームラインとしては最も早い、2004 ~

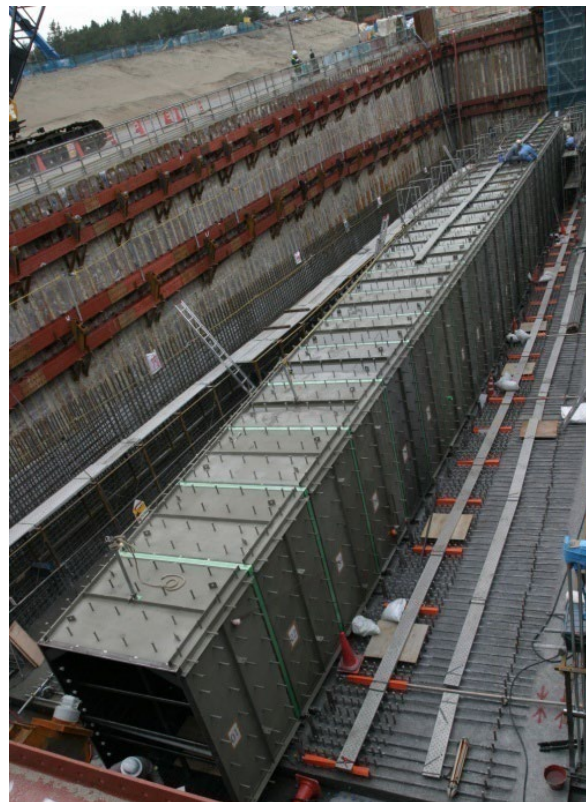


Fig. 16 建設途中のディケイヴォリューム

2005 年度にこの部分の建設が行われた。最初に底部の 6 m 厚のコンクリート部分が打設され、その上に鋼製パイプ部分が設置された。同部分は、工場にて、ビーム軸方向の長さ 1.8 m の輪切り状態として製造した上、それを現場に設置していき、溶接により接合したものである。Fig.16 は、輪切りを並べ終わり、溶接直前の状態の写真である。その後、側部のコンクリート部分を打設し、続いて上部のコンクリート部分を打設した。コンクリート打設後、内面のプレートコイル同士を配管で接続した。輪切りになっているため、その接続部は配管も接続しなければならないためである。Fig.14 で表面から飛び出した半円状の配管がその接続部である。尚、このプレートコイルの列は、ディケイヴォリュームの中央で折り返している。その理由は、後述する冷却水システム (8.) の設備が、ターゲットステーションとニュートリノ第 3 設備棟とに分かれているため、上流側をターゲットステーションの冷却水システムが、下流側を第 3 設備棟のシステムが、それぞれ冷却を受け持っている。

この上流部が完成した後、ターゲットステーションが建設され、上流部に、ディケイヴォリューム最上流部とヘリウム容器が接続された。更にその後、ディケイヴォリューム下流部とニュートリノ第 3 設備棟が建設され、上流部に、下流部とビームダンプ側のヘリウム容器が接続された。ディケイヴォリューム下流部の鋼製パイプ (輪切り) とコンクリート壁の建設方法は上流部と同じである。

5. ビームダンプと第 3 設備棟

5.1. ビームダンプコア

ディケイヴォリューム最下流部には、ニュートリノとミュオン以外の粒子を止めるビームダンプが設置されている。ミュオンも、大部分がここで止められる。

ビームダンプのうち、最も上流にあり、ビームが直撃するのが、ビームダンプコアである。その大部分はターゲットで反応し切れなかった陽子ビームで、元々の陽子ビームの 20% がここに到達



Fig. 17 コアモジュール

する。その大強度ビームを受け止めるため、コアはグラファイトで出来ている。密度が軽い物質のほうが、ビーム軸方向に広い範囲に熱が落ちるからである。コアは、ビーム軸方向の長さ 3.174 m、全高 4.69 m、全幅 1.94 m だが、これを一体で製造出来ないため、98 のブロックに分けて製造し、組み上げた。ブロックはビーム軸方向に 7 つを 1 組とし、これに 1 枚の冷却板を取り付けたものをコアモジュールと呼んで、基本単位とした。このコアモジュールを左右に組み合わせると、1 段分となり、これを上下に 7 段積み上げてコアの完成である。左右で分割したのは、熱伸びを吸収するためである。ビーム中心に空隙が出来ないようにするため、コアモジュールのビーム中心側は波形になっており、左右で噛み合うようになっている。Fig.17 がそのコアモジュールの写真である。奥側がビーム中心で、グラファイトブロックが波形になっているのが判る。正面の銀色の部分が冷却板である。

コアが耐えられるビーム強度の上限は、ヘリウム雰囲気中に含まれる酸素によってグラファイトが損傷する、その損傷が抑えられる温度まで、ということによって決まっている。我々はその温度を 500°C と設定し、その温度以下に保つよう、冷却板を設計した。冷却板は、鋼製の冷却水配管を挿入し、アルミニウム合金製の鋳造品である。この冷却板とグラファイトブロックとの接触状態が、ブロックの温度、延いてはビーム運転の上限を決めるため、両者の締結方法は、多くの R&D

を通じて決定した。小型の試験モジュールを試作して接触圧と熱伝達の関係調べた上、その接触圧を実現する締結方法の R&D には、実物と同じ試験モジュールを使用した。その結果、多数の皿発条を用いた締結方法を採用している。そして、この冷却板を、耐震構造の架台に締結することで、コアは固定されている。組み上がったコアと、それを設置する際の写真を Fig.18 に示す。この条件で熱解析を行ったところ、3 MW のビームで最高温度が 500°C となる結果が得られた。これが限



Fig. 18 完成したビームダンプコアと設置

界であると考えている。実際のビーム運転にてコアの温度を測定したところ、500 kW までは熱解析の結果よりも低めになっている。これはブロックと冷却板との間の熱伝達を保守的に見積もったからで、より大きなビーム強度でもこの傾向が続けば、3 MW 以上のビーム運転にも耐えられる可能性がある。

5.2. ヘリウム容器と遮蔽体

ビームダンプ側にも、ビームダンプコアを収めるヘリウム容器があり、ディケイヴォリュームと接続して一体の気密容器となっている。但しこちらは開閉出来る構造になっておらず、このヘリウム容器と後述する遮蔽体が設置されている空間(ダンプピットと呼ぶ)にも、人間はアクセス出来ない。

ヘリウム容器は、200 mm 厚の炭素鋼板の溶接構造をしており、その側面・上面・底面・背面には、やはりプレートコイルによって冷却されている。このうち、側面・上面・底面のプレートコイルは計 40 列で、ディケイヴォリューム下流端のプレートコイルと接続され、同系統となっている。ディケイヴォリュームのプレートコイルに繋がる冷却水配管は、ディケイヴォリューム最下流端部で一旦外に出た後、ヘリウム容器の外側のプレートコイルと接続されている。ヘリウム容器のフィードスルー部は、コアと内部鉄遮蔽体(後述)とディケイヴォリューム/ヘリウム容器の底板の冷却水配管、コアの温度を測る熱電対の配線、万が一の漏水の際の水抜き配管などが貫通している。

ビームダンプコア周辺にも多数の遮蔽体が設置されている。まず、ヘリウム容器内、ビームダンプコアの上流側に、コアのグラフィイト部分以外(冷却板など)をビームから隠すように、上下左右に「口」字形に鉄遮蔽体が設置されている。これは 200 mm 厚の鋼板(片面にプレートコイルを取り付けた水冷式)を 2 枚重ね合わせて計 400 mm 厚としたもので、ビーム軸方向の長さは 1.5 m である。ビームダンプコアの後方にも、ビーム軸方向の厚み 200 mm の鋼板(両面にプレートコ

イルを取り付けた水冷式)が2枚設置されている。ビームから見た正面の大きさは、ヘリウム容器内部をほぼ完全に覆っている。ヘリウム容器外側には、ヘリウム容器背後に、200 mm の鋼板 3 枚と 300 mm の鋼板 4 枚が設置され、ヘリウム容器背面、ヘリウム容器内部遮蔽体と合わせ、計 2.4m の遮蔽厚がある。その背後には 1 m 厚のコンクリート壁があり、後述 (5.3) のミュオンディテクターの部屋 (ミュオンピット) がある。ヘリウム容器側部には、300 mm 厚の鋼板が設置されている。上方と下方には、それぞれ 200 mm 厚の鋼板が設置されている。これらヘリウム容器外の遮蔽体 (鋼板) は、空冷式である。これらの外側に当たる、建屋の底面・側面・上面のコンクリート躯体の厚みは、5 m である。

5.3. ミュオンモニター

ダンプピットの下流側、1 m 厚のコンクリート壁を隔てた空間は、ミュオンピットと呼ばれる。ここまで到達するのはミュオンとニュートリノだけで、ここにはミュオンモニターが設置されている。ミュオンピットには、ビーム停止時には、ニュートリノ第3設備棟の階段を通じて人間が入ることが出来る。

ミュオンモニターは、イオンチェンバー (Fig.19 上) とシリコンディテクター (Fig.19 下) の2種類の検出器から成っており、ビーム運転中、ミュオンを測定することで、常時ビーム中心をモニタリングしている。一次ビームラインの陽子ビームモニターで測定したビーム中心と、このミュオンモニターで測定したビーム中心とを結んだ線が、ニュートリノビームの方向なので、ビーム運転中にビームが常に正しい方向を向いているかどうかを知る、極めて重要なモニターである。

5.4. ニュートリノ第3設備棟の設備

ニュートリノ第3設備棟は、二次ビームライン下流側を運転するための設備が入った建屋である。地上1階、地下2階の構造で、地下はそこに降りる階段室からインターロックエリアとなっ



Fig. 19 ミュオンモニター

ており、ビーム運転中には入域出来ない。地上はビーム運転中も入域可能である。

地下2階は、前述 (5.3) のミュオンピットで、ミュオンモニターが設置されている。地下1階には、ビームダンプコア、ヘリウム容器、ヘリウム容器内遮蔽体、ディケイヴォリューム下流部の冷却水システムと、それらの排水システム、並びに、地下システムの空調システムが設置されている。地上には、地上の空調システムと、排水システムが設置されている。地下1階に機器を搬入す

るための開口部があり、ビーム運転中はコンクリート遮蔽体によって閉じられているが、ビーム停止中の搬入時にはこれを開口して搬入する。そのためのクレーンも設置されている。冷却水システムについては 8.1 で、排水システムについては 10.2 で、それぞれ述べる。

空調システムは、ターゲットステーション(3.5)と同様、ビーム運転中は、地下の空気は循環させる(実験モード)。地下は、ダンプピット、ミューオンピット、機械室を別系統で循環させている。ビーム停止中に排気モードとなるのもターゲットステーションと同様である。地上が常時排気となっているのも、全ての排気はヘパフィルターを通った後に、排気モニターで放射能濃度を測定してから、排気スタックからのみ排気する、というのも同様である。

また、地下機械室には、ヘリウム雰囲気を測定するシステムと、エアフラッシングシステムがある。5.1 で述べたように、ビームダンプコアの健全性は、温度とヘリウム雰囲気中の酸素濃度によって決まるので、その濃度を測定する必要がある。このため、ヘリウム容器内のヘリウムをサンプルし、酸素濃度や露点を測定し、またヘリウム容器内に戻す、測定系と呼ばれる循環系統がある。

エアフラッシングシステムとは、ディケイヴォリューム内に空気を送り込むシステムである。これは、ビーム停止後、ターゲットステーションのヘリウム容器を開けて、容器内で作業をする際に、そのトリチウム濃度を下げるためのものである。ビーム運転が停止し、ヘリウム容器/ディケイヴォリュームのヘリウムを空気に置換した後も、ヘリウム容器の鉄板内に吸収されたトリチウムが、徐々に湧き出してくる。そのため、ヘリウム容器内の換気をよくしないと、トリチウム濃度が高くなってしまふためだ。空気置換が終わったあと、蓋を開けるまでに、通常は1か月ほど、ニュートリノ第3設備棟機械室のエアコンプレッサーを用いて、ビームダンプ側から乾燥空気を送り、ターゲットステーション側から空気を抜くことで、エアフラッシングを行う。その後、ヘリウ

ム容器を開けて作業を行う際には、逆に第3設備棟機械室のポンプを用いて、ビームダンプ側から空気を吸ってやり、ターゲットステーションのヘリウム容器側では蓋の外から新鮮な空気が入ってくるような流れをつくってやる。

6. ビーム窓

ヘリウム容器にはヘリウムが充填され、その上流の一次ビームラインのビームダクトは真空であるから、その間に仕切りが必要である。それがビーム窓である。ニュートリノビームラインのビーム窓は、0.3 mm 厚のチタン合金(Ti-6Al-4V)で出来ていて、圧力差に耐えるよう、ビーム上流側(一次ビームライン側)に膨らんだ半球殻形をしている。また、常時ビームが直撃するため、ヘリウムを流して冷却している。そのヘリウムの流路を確保するために、ビーム窓は二重になっている。その2枚のビーム窓の間をヘリウムが流れる。

ビーム窓は常時ビームが直撃するため、それによって損傷し、交換が必要となる。1号機のビーム窓は2009年から使い始め、2017年に交換した。現在はそのときに交換した2号機がビームラインに設置されている。交換に関しては 11.3 で述べる。

ビーム窓は全て英国の Rutherford Appleton Laboratory(以下、RAL)が開発・製造し、J-PARC側で運用・交換等を行っている。現在、3号機のビーム窓が RAL で製造されているが、3号機以降は、大強度ビーム運転に合わせて、厚みが 0.4 mm となっている。

7. 電磁ホーン

7.1. 電磁ホーン本体

ターゲットと並んでニュートリノ生成装置を構成し、二次ビームラインの、そしてニュートリノビームラインの心臓部となるのが、電磁ホーンである。ターゲットに関しては別稿で述べているので、本稿では、ニュートリノ生成装置のエンジンとも呼ぶべき電磁ホーンについて、簡単に説明する。

電磁ホーンの役割は、ターゲットに陽子が撃ち込まれることによって生じた π 中間子を集束させ、ビーム状にすることである。電磁ホーンがなければ、ニュートリノ「ビーム」とはならない。神岡に到達するニュートリノも極僅かとなり、実験は成立しない。極めて重要な装置である。

電磁ホーンは、二重円筒のトロイダル形の電磁石で、内側（内部導体と呼ぶ）の前後がラップ状に広がっているため、その形から、「ホーン」と呼ばれている。J-PARC の電磁ホーンは、内部導体と外部導体（こちらは単純な円筒形）を、上流側を絶縁碍子で、下流側を導電性のガスカートで、それぞれ接続している。上流側には、内外導体それぞれに電流導入板が接続され、それを通じて電流を流す。この電流の向きは、7.2 で述べる電源側で切り替えることが出来る。内部導体側から流して外部導体側に返すと、正の電荷を持つもの、即ち π^+ 中間子が収束される（ π^- 中間子は周囲に飛び散る）。これをフォワード（FWD）カレントと呼んでいる。一方、電流を逆向きにして、外部導体側から内部導体側へと流してやると、負の電荷を持つもの、即ち π^- 中間子が収束される。これをリヴァース（REV）カレントと呼んでいる。陽子ビームがターゲットに撃ち込まれたとき、 π^+ 中間子も、 π^- 中間子も、同時に生成している。我々は、電磁ホーンに流す電流の向きを選ぶことで、 π^+ 中間子を集束させるか、 π^- 中間子を集束させるか、即ち、ニュートリノで実験を行うか（FWD）、反ニュートリノで実験を行うか（REV）、を選ぶことが出来る。

電磁ホーンに流す電流はピーク電流で 320 kA と膨大なものである。これを連続的に流すのは、電源能力的にも熱負荷的にも困難であるため、ビームが来る瞬間だけ流すパルス駆動式としている。それでも発生する熱は大きいため、冷却する必要がある。電磁ホーンの内側導体は、それと反応して π 中間子の収量が減ってしまうのを抑えるため、出来るだけ薄くつくってある。第 1 電磁ホーンの内側導体の最も薄いところで 3 mm の厚みである。そのため、内側導体のほうが発熱が大きく、より積極的に冷却する必要がある。そこで、外部導体

に内側に向かって取り付けられたノズルから、内部導体に向かって、冷却水を噴射することで、電磁ホーンを冷却している。ノズルは、周方向に 4 基、それがビーム軸方向に 4 列、計 16 基が取り付けられている。この噴射により、電磁ホーン内部は水煙状態となっているので、外部導体はそれによって冷却される。この方式により、後述 (7.3) の冷却水システムの能力と合わせ、ビーム強度 1.8 MW まで問題なく冷却可能である。

3.1 で述べたように、電磁ホーンは 3 台直列に設置され、ビーム上流側から順に、第 1 電磁ホーン、第 2 電磁ホーン、第 3 電磁ホーン、と呼ばれている。ビームの広がりに伴い、この順に大きくなっている。第 1 電磁ホーンの外側導体の直径は 380 mm だが、第 3 電磁ホーンの内側導体の直径は 1,400 mm である。このため導体の製造方法も異なり、例えば内側導体だと、第 1 電磁ホーンは削り出しで一体物としてつくるが、第 2 電磁ホーンと第 3 電磁ホーンは 3 つの部品として削り出した後、摩擦接合によって繋げている。

電磁ホーンはビーム運転によって高度に放射化するもので、耐放射線性の素材しか使えない。導体部分には導電性と強度を考慮してアルミニウム合金、支持架台には重量と残留放射線量を低減するためにアルミニウム合金、冷却水配管等にはステンレス鋼、絶縁碍子にはセラミック（酸化アルミニウム）をそれぞれ用いている。また、その一部の部品が壊れた場合でも、人間が近付けないためにそれだけを交換することは出来ず、電磁ホーン丸ごと交換することとなる。そのため、組み立てには慎重を期する必要がある。組み立て後、交換前には、地上で十分な（1,000,000 パルス以上）通電試験を行う。

電磁ホーンに電流を供給するのはバスバーで、内外導体共に上流側に接続された電流導入板に接続される。電磁ホーンの内側導体の円周方向に均一に電流を流すため、電流導入板は 4 方向に開く花弁のような形をしており、それぞれにバスバーが接続される。従って、バスバーは 4 枚×内外導体分で、計 8 枚、取り付けられている。バスバー 1 枚に流れる電流は 80 kA である。このバスバーは、絶縁

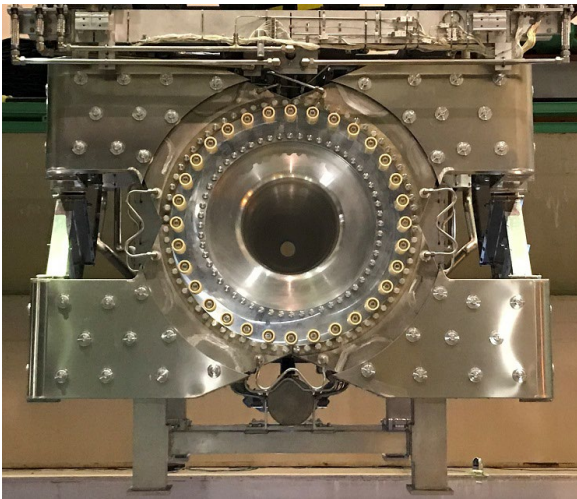


Fig. 20 第2電磁ホーン3号機

碍子によって強固に締結されているが、この大電流ではローレンツ力によって変形し、非常に大きな音を発生させる。地上の通電試験では近いので鼓膜が破れそうな大きな音だが、ビームラインにあるときですら、3.で述べたあの膨大な量の遮蔽体を突き抜けて、地上まで音が聴こえるほどである。

バスバーはヘリウムを流して冷却するが、第2電磁ホーンの、内外導体とバスバーを繋ぐ電流導入板だけは、ターゲット直後にあるために、ビームによる発熱が大きいので、3号機以降は水冷式としている。これは、バスバーに溝を彫り、そこに冷却水配管を埋め込み、摩擦接合によって表面をアルミニウム合金製の部品で閉じるものである。これにより、電磁ホーンはバスバーや電流導入板も含めて750 kWを超えるビーム強度での運転が可能となった。

電磁ホーンは、2009年から2013年までは1号機が使われ、2013年から2014年にかけて、2号機へと、3台全ての交換が行われた。2号機は2014年から2021年まで使われ、2021年から2022年にかけて、3号機へと、第1電磁ホーンと第2電磁ホーンの交換が行われた。このため、現在、ビームラインには、第1電磁ホーンと第2電磁ホーンは3号機、第3電磁ホーンは2号機が入っている。1号機と2号機は、第1電磁ホーンと第3電磁ホーンは日本国内で製造し、第2電磁ホーンは米国で製造した。米国側の担当はコロラド大学で

ある。3号機以降は、第1電磁ホーンと第2電磁ホーンに関しては、内外導体を日本国内で製造し、これをコロラド大学に送り、コロラド大学にて組み立てることとしている。第3電磁ホーンに関しては全て日本国内で製造している。

7.2. 電磁ホーン電源

前述のように、電磁ホーンはパルス駆動であるため、それに電流を供給する電源もパルス電源である。電源で直接320 kAもの電流を発生させるのは困難なので、電源では32 kAの電流を発生させ、パルストランスでそれを320 kAにして電磁ホーンに流している。電源はターゲットステーションに隣接するニュートリノ第2設備棟と呼ばれる建屋（その電源室）に設置し、そこからターゲットステーションまで電流ケーブルを引いて、ターゲットステーション内で地上から地下への貫通部を通してサーヴィスピットまで持っていき、サーヴィスピット（ヘリウム容器の北側）に設置したパルストランスの1次側に接続する。ケーブルは電源（或いはパルストランス）1台当たり8本である。パルストランスの2次側には1台当たり8枚のバスバーが接続され、ヘリウム容器のバスバーフィードスルーまで接続される。バスバーフィードスルーの内側は、また8枚のバスバーが

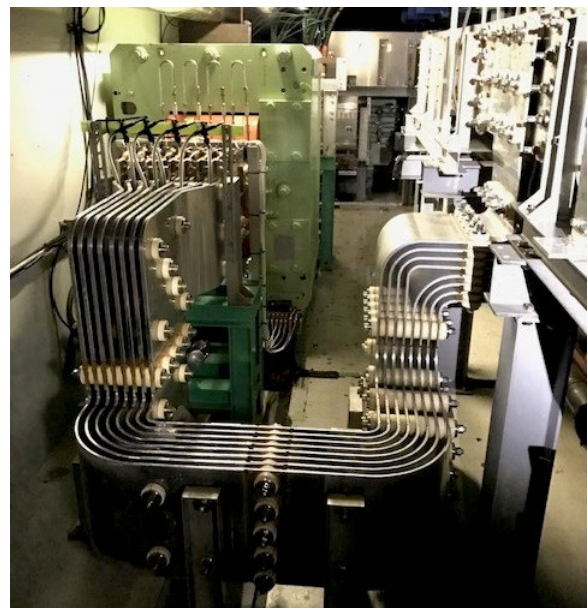


Fig. 21 パルストランスとバスバー

接続され、最終的に電磁ホーン本体に接続される。8枚のバスバーは、4枚ずつビーム方向正面から見て左右に分かれ、電磁ホーンを懸架する箱状の構造物（支持モジュール）の側壁に沿って、ヘリウム容器内を下りていく。

バスバーのフィードスルーは、ヘリウム気密を保持することと絶縁を保つことの両立が求められる難しい機器である。建設当初から、絶縁材にG10を使いバスバーとの間をエポキシ系接着剤で充填するフィードスルーを使ってきたが、長年の使用で経年劣化し、少しずつリーク量も増えていった。そこで、2021年から、米国のFermi National Accelerator Laboratory (FANL) と共同開発した新型フィードスルーに置き換えた。これは、バスバーの隙間に、絶縁材と充填材を兼ねたシリコン系材料を流し込んで固めるもので、バスバーも、フィードスルー部だけ9枚構成としてローレンツ力を低く抑えている。

電磁ホーン電源は、それぞれ、2系統のコンデンサーバンクを持つ。電源の充電部はこのコンデンサーバンクに交互に充電し、出力部が交互に放電することで電流を流す。充電が終わったバンクを放電、その間にもう片方のバンクを充電、を繰り返すのである。32 kAの電流を流す際の実出力電圧は、負荷である第1～3電磁ホーンによって多少の違いはあるが、5.4～5.8 kVである。

トランスは、320 kAもの大電流を流すために、1台7 tもの巨大なものである。バスバーを完全に浮かすと接地電圧が制御出来ないので、トランス出力部に中点接地回路を設け、行きと還りのバスバーで電圧が対称になるようにしている。

これらのシステムは、加速器の周期が2.4秒だった2021年までは、第1電磁ホーン用に1系統（電源とパルストランス各1台）、第2電磁ホーンと第3電磁ホーン用に1系統（同）だった。第2電磁ホーンと第3電磁ホーンは直列に接続されていた。しかし、2023年からの1.3秒周期運転に向けて、2020年度に3台目の電源とパルストランスを調達し、2021年度にそれらを設置し、各電磁ホーンに1台の電源と1台のパルストランスを接続する、3台独立系統とした。

また、電磁ホーン電源から出てすぐのところに、電源切替器があり、電流の向きをFWDかREVか切り替えられるようになっている。前述の通り、この切り替えは、ニュートリノで実験を行うか、反ニュートリノで実験を行うかの切り替えを意味する。切り替えは、ケーブルに接続された電極を、手作業で締結接続の組み合わせを変えることで行う。

7.3. 電磁ホーン冷却水システム

7.1で述べた導体を冷やす冷却水は、電磁ホーン冷却水システムから供給される。このシステムは、ターゲットステーション地下1階機械室にあるバッファータンクから、その隣にある循環ポンプを通じて送水され、機械室内の分岐ヘッダーで各電磁ホーンへの配管に分かれ、サーヴィスピットからヘリウム容器内に入り、電磁ホーンに向かう。内部導体に噴射された冷却水は、外部導体下端最下流部に設けられた排水口から、外部導体直下にあるドレインタンクに集まる。そのドレインタンクから、サーヴィスピットに設置された自吸式ポンプによって、ヘリウム容器外、サーヴィスピットまで吸い上げられる。その揚程は6 mに及ぶ。その後、冷却水は機械室のバッファータンクまで戻る。また、このような運用のため、冷却水には気相部分があるが（電磁ホーン本体の内外導体の間が大容量の気相である）、この部分には、気相の放射化を低減するため、ヘリウムを充填している。気相の総容量は、6 m³ほどである。

バッファータンクには、2次冷却水との間で熱交換を行う熱交換器と、トリチウム以外の成分を取り除くイオン交換樹脂にも接続されている。電磁ホーンは通電している導体に直接冷却水を噴射しているので、その導電率は低く抑える必要があり、そのためにイオン交換樹脂で導電成分を取り除いている。また、次節7.4で述べるように、2023年から脱酸素装置も接続した。

これらのシステムのうち、能動機器である循環ポンプと自吸式ポンプは、不意の故障に備えて、二重化が進められている。循環ポンプは既に二重化しており、自吸式ポンプに関しても設置は終わ

っており、2023 年度から運用する予定である。また、電動機では自吸式ポンプだけがサーヴィスピットにあるが、その制御器は機械室側に置き、高い放射線によって故障や誤作動を起こし難くしている。ヴァルヴ類も、サーヴィスピットに設置しているものは、空気圧で作動する空圧ヴァルヴを用いている。

熱交換器は、内面に放射物が附着して放射化していくことが観測されているため、二重化した上で個別に鉄遮蔽体で覆っている。二重化している理由は、片方が高放射化した場合、もう片方に切り換えて運転を継続し、高放射化したほうを冷ましてから交換するためである。

イオン交換樹脂は、それを収納するデミナーを5 基接続し、イオン交換能力が落ちると切り替えるという運用をしている。イオン交換能力が落ちるときは、即ち放射性物質を吸着しているので、デミナー自体も高放射化している。そのため、切り替えた後は冷ましてから交換することになる。そのために5 基用意しているのだ。それぞれのデミナーは個別に鉄遮蔽体で覆っている。ビーム停止時に、機械室内で最も放射線量が高いのが、このデミナーである。

7.4. 水素再結合器とフラッシングシステム

電磁ホーンの冷却水の一部が、ビームによって水素と酸素に分解される。水素は爆発性気体であるため、危険である。そのため、この水素を酸素と再結合させ、水に戻すシステムが、電磁ホーン冷却水システムには付け加えられている。これは、電磁ホーン本体とバッファータンクの気相部分のヘリウムを強制的に循環させ、その途中で触媒を収めた容器に通すことで再結合させるものだ。各電磁ホーンの内外導体の間の空間には、元々ヘリウムを充填するための配管が接続されていたが、2号機からはこれを往きと還りの2本とし、循環出来るようにした。その配管は各電磁ホーンごとにヘリウム容器外のサーヴィスピットまで延ばし、そこで接続している。循環経路は、3 台の電磁ホーン直列としており、ヴァルヴを切り替えることにより、第1 電磁ホーン側から第3

電磁ホーン側へ流すか、その逆方向に流すか、を選択出来る。サーヴィスピットの配管を変更すれば、並列循環も可能である。

循環にはメカニカルシールブロアを用いており、循環流量は、流量 30 m³/h である。2024 年度に、これを二重化する予定で、故障の際にヴァルヴの切り替えだけで運転を継続出来るようにする。

触媒には、パラジウムを用いており、それを含有したペレットを、容器に詰めている。この触媒容器は循環ブロアの直後にあり、そこにヘリウム気相を押し込んでから、各電磁ホーンに送るようになっている。触媒は 60°C で最適な状態となるため、容器にヒーターを巻き、断熱処理をし、温度制御でヒーターを ON/OFF するようになっているが、実際のビーム運転時には、ブロアによる圧縮熱と再結合の反応熱だけで 60°C に達しており、ヒーターはほとんど OFF の状態になっている。

Fig.22 に水素再結合器の写真を示す。正面の銀色の円筒が触媒容器（銀色の部分は断熱材）で、下奥の緑色の機器がブロアである。



Fig. 22 水素再結合器

この再結合器がなければ、500 kW のビーム運転でも、水素濃度は 24 時間以内に爆発限界 (4%) に達する。とても有用な機器であるが、それでも同ビーム強度で、1 週間で 3,000 ppm ほど水素濃度が上がる。その理由は、ガス分析により明らかで、酸素濃度がほぼ 0 になっているからだ。酸素は水素より遥かに溶解度が高いために、同時に発生しても、先に水に溶けてしまう。そのため、現時点では、フラッシングシステムにより、2 週間に一度、気相部分をフラッシングしている。

フラッシングシステムは、この気相の循環システムに接続されているもので、バッファータンクの気相側からターゲットステーション屋外に設置したボンベからのヘリウムを流し、電磁ホーンを通じて、地下機械室に設置した総容量 6 m³ の排気バッファータンクに貯めるものである。手順としては、予め排気バッファータンクを附属の真空ポンプで真空引きしておいてから、その排気バッファータンクと気相循環システムの間にある流量調整バルブを操作して、排気バッファータンクにヘリウムを引き込むものである。気相循環ラインが負圧にならぬよう、ボンベから新鮮なヘリウムを供給するのである。このフラッシングシステムの操作は、バルブの操作から真空ポンプの操作まで、全て地上から行える。ビーム運転中にも操作出来るように設計したが、今のところ、毎週ある加速器メンテナンス日にビーム運転が停止した際に行っている。

水素の再結合が完全でないのは、前述のように酸素が水中に溶け込むからである。そこで、電磁ホーン冷却水システムに、新たに脱酸素装置を接続した。これは、冷却水中の酸素を脱気して、それを冷却水システムの気相部分に戻す装置である。2022 年度に完成したので、2023 年度から運用する予定である。

7.5. バッフル

電磁ホーンではないが、第 1 電磁ホーンの直前に設置されているバッフルについても触れておく。これは、ビーム軌道がずれて、ターゲット以外の方向に向かったときに、即ちそれを取り囲む

ように位置する電磁ホーンに向かったときに、電磁ホーンを保護するものだ。バッフルは、ビーム方向の長さ 1 m のグラフィイトのブロックに、ターゲット直径より大きく電磁ホーン内部導体内径より小さな穴を開け、ターゲットと第 1 電磁ホーンの直前に置かれている。水冷式である。電磁ホーン同様、鋼製の箱状構造物 (支持モジュール) 下部に取り付けられた状態で、その箱ごとヘリウム容器内に懸架している。

8. 冷却水システム

8.1. 冷却水システム概要

本章では、電磁ホーン冷却水以外の冷却水システムについて述べる。Fig.23 に、二次ビームラインの冷却水システムの系統図を示す。J-PARC 標準では、ビームラインの機器の冷却水システムは、熱交換器を 2 台介した 3 段式としている。これは、熱交換器がひとつ破れても、ビームライン機器を直接冷却する水が外に漏れないようにするためだ。二次ビームラインでもその標準に従っている。

冷却水システムは、ターゲットステーションに 2 系統、ニュートリノ第 3 設備棟に 1 系統ある。ビームラインにある冷却水による冷却対象機器は、ターゲットステーションでは、バッフル、ターゲット冷却用ヘリウムの第 1 熱交換器、電磁ホーン、ヘリウム容器、ディケイヴォリューム上流部、ヘリウム容器内鉄遮蔽体、ディケイヴォリューム・コリメーター、である。第 3 設備棟側では、ビームダンプコア、ビームダンプ用ヘリウム容

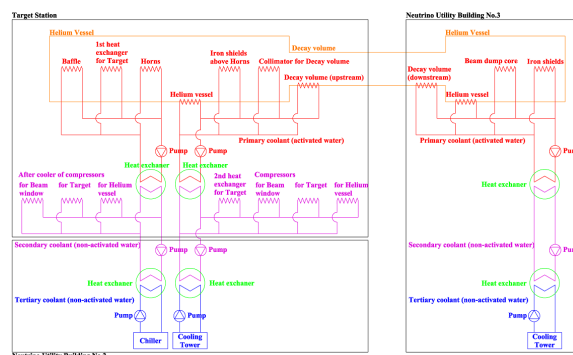


Fig. 23 冷却水システム系統図

器、ディケイヴォリューム下流部、ヘリウム容器内鉄遮蔽体、である。このうち、バッフル、ターゲット冷却用ヘリウムの熱交換器、電磁ホーンは、7.3 で述べた電磁ホーン冷却水システムが 1 次冷却水システムとなる。一方、それ以外の系統は、ターゲットステーションと第 3 設備棟にそれぞれ 1 次冷却水システムを持つが、これらは炭素鋼を直接冷却するプレートコイル式であるため、配管も全て炭素鋼で出来ており、鉄管系冷却水と呼んでいる。このため、ターゲットステーションでは、電磁ホーン冷却水システムと鉄管系系統、第 3 設備棟では、鉄管系統、が存在することになる。

これら 3 つの系統は、3 つの熱交換器を通して、それぞれの 2 次冷却水システムに繋がる。電磁ホーン系統の 2 次冷却水は、9. で述べる 3 系統のヘリウムコンプレッサーのアフタークーラーにも繋がりが、これらを冷却している。そして更に熱交換器を介して 3 次冷却水システムに繋がりが、チラーによって最終的な冷却を行っている。電磁ホーン系統の 2 次冷却水は最低 12℃まで冷却出来るが、現在は 20℃程度で運用している。

ターゲットステーションの鉄管系統の 2 次冷却水は、9. で述べる 3 系統のヘリウムコンプレッサー本体とターゲット冷却用ヘリウムの第 2 熱交換器にも繋がりが、これらを冷却している。コンプレッサー本体は炭素鋼製だからである。そして更に熱交換器を介して 3 次冷却水システムに繋がりが、冷却塔によって最終的な冷却を行っている。ターゲットステーションの鉄管系統の 1 次冷却水は 32℃、2 次冷却水は 31℃、3 次冷却水は 30℃で運用している。また、2 次冷却水システムの一部と 3 次冷却水システムはターゲットステーションに隣接するニュートリノ第 2 設備棟内に設置されている。

第 3 設備棟の鉄管系統は、2 台の熱交換器を介して 3 次冷却水システムに繋がりが、冷却塔によって最終的な冷却を行っている。第 3 設備棟の鉄管系統の 1 次冷却水は 32℃、2 次冷却水は 31℃、3 次冷却水は 30℃で運用している。

8.2. 大強度化

これらの冷却水系統のうち、鉄管系統は、出力 750 kW のビーム運転に合わせて設計された。但し、前述の通り（例えば 4. ディケイヴォリュームのプレートコイルの説明を見よ）、機器本体は、冷却水流量と除熱量を増やしさえすれば、より高いビーム出力まで耐えられるようにつくられている。J-PARC のメインリングが出力 1.3 MW のビーム運転を行う計画に合わせ、ニュートリノビームラインの二次ビームラインでも、冷却水流量と除熱量をそれに見合うだけ増強することとした。つまり、ポンプと熱交換器を大容量のものに交換するのである。また、チラーと冷却塔も増強する。

出力 750 kW に合わせて設計したとは言え、失敗がないように、そして長期運転による能力低下なども考慮して、余裕を持たせて設計してあった。そのため、500 kW 運転時の温度変化等から算出した実際の能力を外挿すると、現行の冷却水システムでも、ターゲットステーション側で 980 kW、ニュートリノ第 3 設備棟側で 1,020 kW までのビーム運転が可能であると評価出来た。今回の増強でも、その程度の余裕は見込むこととし、1.3 MW 運転時の定格流量と除熱量を算出した。鉄管系統の熱負荷はビーム強度に比例するとし、電磁ホーン系統は新型ターゲット／電磁ホーンの 1.3 MW 時の熱負荷、更に 2 次冷却水システムに新型ターゲット用冷却システムが接続されること、などを考慮して、必要な冷却水流量と除熱量を算出した。それを基に設備設計業者に設計を依頼し、増強すべきポンプと熱交換器を選定した。ターゲットステーションの鉄管系統の 1 次冷却水の流量は現行の 1,300 L/min. から 2,200 L/min. へ、熱交換器の除熱量は現行の 439 kW から 765 kW へ、第 3 設備棟の鉄管系統の 1 次冷却水の流量は現行の 1,350 L/min. から 2,330 L/min. へ、熱交換器の除熱量は 386 kW から 668 kW へ、それぞれ増強される。2 次冷却水システムや 3 次冷却水システムもそれに合わせて増強される。

ポンプと熱交換器は長納期品なので、先行して既に調達済みである。設計も完了しているので、

次回の長期シャットダウンの 2025 年度にこれらを現行機と交換し、冷却水システムの増強を完成させる予定である。

8.3. 脱酸素装置と黒皮問題

ディケイヴォリュームは、炭素鋼で出来ている。ヘリウム容器等もそれに合わせたため、全て炭素鋼で出来ている。そのため、鉄管系統は、冷却水中に鉄酸化物が混入している。色は赤色ではなく黒色なので、赤錆とも異なる。この起源は、当初、炭素鋼配管の黒皮が剥がれてきているのではないかと推測していた。二次ビームラインでは、炭素鋼でつくられた部分で塗装が出来ない箇所は、錆防止のため、製鋼時に表面に生じる酸化被膜（黒皮、ミルスケール）を、そのままにしている。こういった経緯から、我々はこれを「黒皮問題」と呼んでいる。しかし、この所謂黒皮は、その発生量がビーム強度に比例することから、ビーム由来の何らかのメカニズムで発生しているのではないかと近年では考えるようになった。実際、ビーム運転を停止すると、この量が激減する。しかし、以下本稿では、便宜上、黒皮と呼ぶこととする。

一方、冷却水中の酸素濃度が高いと、炭素鋼が腐食することから、鉄管系統には脱酸素装置が組み込まれており、冷却水中の酸素濃度を低く保っている。ところが、ビーム運転と共に、この脱酸素装置に黒皮が附着し、その能力を低下させる。それを防ぐためにフィルターにて黒皮を除去してはいるが、充分ではなく、2年に一度の割合で脱酸素装置の心臓部である脱気膜を交換している。また、この黒皮は、ポンプや熱交換器にも附着してその能力を低下させる。ポンプは数年に一度オーバーホールして内部に附着した黒皮を除去しているし、熱交換器は丸ごと交換している。熱交換器は、2009年の運転開始以来、これまでに、ターゲットステーション側で2回、ニュートリノ第3設備棟側で1回、それぞれ交換している。

この黒皮問題への対策として、これまではフィルターを増やすことで対処してきたが、それが充

分でないため、根本的に異なる対処方法を検討することとした。ひとつは、マグネティックストレイナーの採用で、強磁性体の不純物の除去には効果を発揮する。試験的に導入したものの運用実績が良好だったので、2025年度の大改修の際に、本格的なものを取り付ける予定である。もうひとつは、発生メカニズムなど根本原因の追究である。そのため、冷却水成分の化学分析を本格的に開始したところである。この成分が、ビーム運転によってどのように変化していくのか、などを詳細に調査している。

9. ヘリウム循環システム

9.1. ターゲット冷却系統

本稿にてこれまで見てきたように、ターゲットステーションの機器ではヘリウムが多用されている。それぞれ使用目的は異なるが、それを、ヘリウム循環システムごとに見ていくこととする。

ターゲット冷却用ヘリウム循環システムについては、別稿「ターゲット」のところで説明するので、本稿では省略する。

9.2. ビーム窓冷却系統

6.で述べたように、ビーム窓は、二重構造にした上、その2枚のビーム窓の間にヘリウムを流すことで冷却している。このために独立したヘリウム循環システムが運用されている。中心となるヘリウムコンプレッサーは地下1階機械室に設置されているが、ターゲット冷却系統やヘリウム容器循環系統と同じく、ウイング式コンプレッサーで、円筒の中を羽のついた軸が往復運動する仕組みである。定格流量は20 m³/hで、圧力は大気圧より極僅か低めに設定してある。その理由は、ビーム窓の構造にある。6.の通り、ビーム窓は厚さ0.3 mmの半球殻状で、上流側に向かって膨らむ形で設置されている。このため、常に上流側の圧力が低いか、或いは同じ圧力であるように運用しなければならない。逆圧は絶対にかけてはならない。そのため、2枚のビーム窓の間の圧力は、下流側、つまりヘリウム容器の圧力(大気圧+5 kPa)よりも低めである必要がある。また、ヘリウムを

充填する際には、一旦真空に引くが、その引き方にも手順があり、上流側が真空であることを必ず確認してからこれを行う必要がある。また、ヘリウム容器の真空引きの際には、先にビーム窓を真空に引いておく必要がある。ビーム窓冷却システムを真空引きするために、専用のスクロールポンプが設置されている。

ビーム窓の熱解析の結果、本システムは、1.3 MW ビーム運転時にも十分な能力であることが判っている。

9.3. ヘリウム容器循環系統

ヘリウム容器はディケイヴォリュームも合わせ総容量容積 1,500 m³にも及ぶが (2.)、そこに充填するヘリウムは、1 時間に 1 置換以上の循環を行っている。そのためのヘリウムコンプレッサーが地下 1 階機械室に設置されている。やはりウイング式コンプレッサーだが、その羽が内蔵されたシリンダーが 4 基あり、それを巨大な電動機とクランクシャフトで稼働させる、大掛かりなものである。定格流量は 1,800 m³/h に達する。シリンダー内の羽は往復運動をし、それが他のヘリウムコンプレッサーより巨大で、しかも 4 基が同時に稼働しているので、他の系統のコンプレッサーに比べて、遥かに振動が大きい。防振台の上に設置されてはいるが、それでも十分に振動を吸収出来ず、過去には、架台に亀裂が入ったり、潤滑油配管が破断したりしたこともあった。現在は、振動測定とそれに基づく動解析で得た結果に基づい

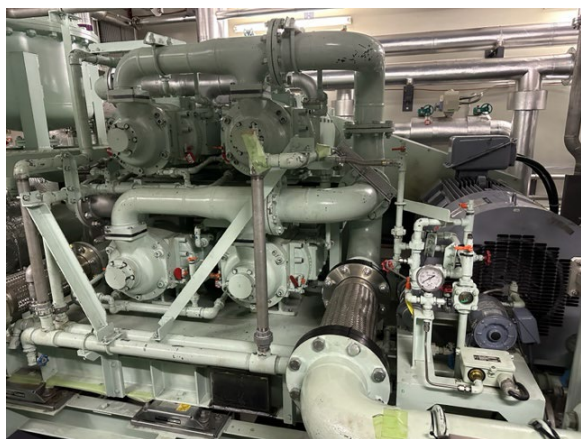


Fig. 24 ヘリウム容器系統用コンプレッサー

て、架台に補強を入れることで、振動を抑えて対処している。コンプレッサーの振動は、ビーム運転停止中に頻繁に測定するようにしている。今後は、防振台をより大型のものに変えるなど、一層の振動低減策を実施していく予定である。

このヘリウム循環システムには、もうひとつ重要な役割がある。それは電磁ホーンのバスバーの冷却である。バスバーは、自身のジュール熱に加え、ビームライン中心付近では、ビームによる熱も発生する。そこで、このヘリウムの吹き出し口を、3 台の電磁ホーンのバスバーを囲むバスバーダクトに接続し、ヘリウム容器内上部からヘリウムを流し、電磁ホーン導体部の電流導入板付近で吹き出すことで、バスバーを冷却している。熱負荷が最大となる第 2 電磁ホーンではそれに加えて水冷も併用していることは前述 (7.1) の通りである。還りは、ヘリウム容器下流側からサーヴィスピットを通して機械室のヘリウムコンプレッサーに戻る。ヘリウムコンプレッサーには、吐出口側にフィルター、吸入口側にストレイナーがあるが、ビーム運転により、特にストレイナー側に放射化物が蓄積し、高い放射線量となる。このため、ストレイナーは前後をヴァルヴで封止して配管ごと交換出来るようにしてある。内部のストレイナーを作業者が見ないようにする措置である。

ヘリウム容器は、一旦真空に引いてからヘリウムを充填するため、このヘリウム循環システムにも専用の真空ポンプが接続されている。これは、ロータリーポンプにメカニカルブースターポンプ (ルーツポンプ) を組み合わせたもので、それを 1 組として、1 組定格 1,000 m³/h の排気能力のものを 3 組使用して真空に引く。真空引きの際には、排気中に大量の結露水が出てくるので、排気側にはこれを分離する汽水分離タンクを通して、排気を排気スタック (3.5) まで送る。分離した水は、排水システム (10.1) を通して排水する。100 Pa 程度まで真空に引いてから、ヘリウム容器の各フランジに対して、ヘリウムリークディテクターによるリーク試験を実施し、10⁻⁷ Pa m³/s 程度以下のリークであることを確認してから、ヘ

リウムを充填する。充填圧は大気圧+5 kPa である。

このヘリウム循環システムはターゲットステーション側にあるため、94 m のディケイヴォリュームを隔てたビームダンプ側では、ヘリウムは淀むことになる。ビームダンプコアはグラファイト製であり、その耐ビーム強度は、温度と酸素濃度で決まる (5.1) ので、この部分の酸素濃度を常時監視している (5.4)。現在のところ酸素濃度は低く抑えられているが、今後これが上昇するようになってきた場合には、ビームダンプ側でもヘリウムを循環させることも検討している。そのため、ビームダンプ側ヘリウム容器から、ヘリウム循環用の配管だけは最初から敷設しており、ニュートリノ第3設備棟地下機械室まで通じ、そこで封止している。将来的に必要なであればこの配管にヘリウムコンプレッサーを接続して循環させる可能性もある。

9.4. 電磁ホーン冷却水気相循環システム

電磁ホーン冷却水の気相には、ビーム運転により、冷却水の分解によって生じた水素が溜まることを 7.4 で述べた。これもターゲットステーション内のヘリウム循環システムのひとつである。詳細については 7.4 を御覧頂きたい。

9.5. ガス分析システム

これらヘリウム循環システムに於いて、ビーム運転中にその中の不純物がどう変化するかを、我々は注意深く監視している。そのためのガスクロマトグラフが、ターゲットステーション地上に設置されている。各ヘリウム循環システムにはサンプル配管が設けられており、それが地上のガスクロマトグラフにまで繋がっている。J-PARC では、週に一度、加速器メンテナンスの日が設けられ、この日はビーム運転が停止するので、それに合わせて、4 つのヘリウム循環システムのガス分析を行う。

我々のガスクロマトグラフで測定出来るのは、水素、酸素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素である。それぞれの系統で注目している成分は異なる。

ターゲット系統では、グラファイトの損耗を気にしていることから、酸素濃度と、酸素との反応の結果生じたであろう一酸化炭素と二酸化炭素の濃度に注目している。ビーム窓系統とヘリウム容器系統では、漏れによる外気の侵入がないかを気にしているので、大気と同じ成分、即ち酸素と窒素の濃度に注目している。電磁ホーン冷却水気相系統では、水素の発生を気にしているので、水素濃度に注目している。これらの濃度の毎週の変化に注目し、通常とは異なる変化をした場合には、その対処を行う (電磁ホーン冷却水気相系統であれば、前述のフラッシングなど)。

9.6. ヘリウム供給システム

これらヘリウム循環システムそれぞれに、ヘリウムを供給するシステムがある。どれも地上から供給するが、ターゲット系統とビーム窓系統はターゲットステーション屋内から、ヘリウム容器系統と電磁ホーン冷却水気相系統は屋外から、それぞれ供給する。

また、ヘリウム容器系統以外は、市販のヘリウムポンペを接続して供給するものであるが、ヘリウム容器系統だけは、その容量が膨大であるため、ヘリウムトレーラーから供給する。ターゲットステーション屋外、建屋壁北東角には、ヘリウムトレーラーを接続する供給口が設けられ、ヘリウム充填の際には、供給業者のトレーラーに来てもらい、そこに接続して充填を行う。充填が終われば、供給業者がトレーラーを持って帰る。供給は数時間で完了する。

10. 排水システム

10.1. ターゲットステーション側

二次ビームラインの冷却水は、直接ビームが当たった領域を通るため、ビーム運転により放射化する。そのため、法令と J-PARC 内規則に従った手順で排水する必要がある。そのための排水システムを備えている。

二次ビームラインの冷却水は、配管の高低差・経路等から、完全に水抜きすることは出来ない。また、鉄管系統は、空気を入れると錆びることか

ら、空気を入れたくない。そこで、循環運転をしながら外部から水を入れて置換するという方法を採用。この置換を1回行うと、放射能濃度は1/eとなる。これを繰り返すことで冷却水の放射能濃度を下げ、人間がメンテナンス可能な状態とする。また、冷却水システムに於いて、頻繁にメンテナンスを行う場所は決まっているため（ポンプ周辺や脱酸素装置）、その部分だけを切り離して置換することも可能なようになっている。

ターゲットステーションでは、置換した排水は、先ず、地下2階のバッファータンク（容量8 m³）に集められる。ここから、ターゲットステーションに隣接するニュートリノ第2設備棟の機械室のバッファータンク（容量80 m³）に送水され、ここで、トリチウム以外の成分をイオン交換樹脂に通水することで除去する。また、排水が中性でない場合には、ここで中和する。それから同じ機械室内の希釈タンク（容量84 m³が2基）に送水し、トリチウム濃度がJ-PARC排水基準値以下となるよう、水で希釈し、濃度を測定して合格した後、排水する。

また、1.3 MW ビーム運転に対応するため、排水設備も増量した。具体的には、第2設備棟建屋を増築し、そこに大容量の希釈タンク（容量400 m³が2基）を設置することで実現している。これにより、1.3 MW のビーム出力で年間100日間の運転を行っても、その排水を処理出来る。

10.2. ニュートリノ第3設備棟側

ニュートリノ第3設備棟の排水システムもターゲットステーションと同様であるが、ひとつの建屋内で完結しているところがターゲットステーションとは異なる。機器からの排水を最初に受けるバッファータンクは地下1階機械室内にあり、そこから地上の機械室にある希釈タンクでトリチウム以外の成分の除去と希釈を行い、排水する。

また、ニュートリノ第2設備棟、第3設備棟共に、希釈前の排水を日本原子力研究開発機構側に引き取ってもらい、そちらで希釈して排水することも出来るようになっている。そのための、タン

クローリー車への接続口が、両棟に設けられている。現在のところの運用では、第3設備棟の最初と2回目の置換分（最初が最もトリチウム濃度が高い）だけ引き取ってもらい、それ以外は我々で希釈して排水する、という運用をしている。

10.3. 工水浄化システム

以上で述べた排水の希釈には、工業用水（以下、工水）が使われている。この工水は、飲料用にも使える水道水（上水）と異なり、その品質はあまり良くない。特に、河川由来の泥が多く残ったままである。これは、J-PARC内の他の施設でも問題となっているが、ニュートリノ実験施設は特に希釈で使う工水の量が多いので、大きな問題となっている。具体的には、希釈タンクの底にこの泥が蓄積していき、数年に一度は希釈タンクを清掃しなければならない。そこで回収した泥は、放射化水に触れているから、放射化物扱いとなる。つまり、放射化した泥を生産していることになり、これは倫理的にも大きな問題である。そこで、様々な改善案を検討した結果、第2設備棟に入るまえの工水から泥を取り除く、工水浄化システムを建設することとなった。このシステムで取り除いた泥は、放射化水と混ぜられる前なので、一般物として廃棄出来る。

第2設備棟増築部の新規の希釈タンクは、高さ7 mにも及び、その中に入っただけの清掃作業は安全性に問題がある。そこで、このタンクを使用する前にこの工水浄化システムを完成し、泥を入れないようにすることが重要だった。そのため、工水浄化システムは2021～2022年度の2年間で完成させ、2023年度から運用を開始出来た。

11. リモートメンテナンスシステム

これまで本稿で見てきたように、ターゲットステーション内には、高度に放射化するにも拘わらず、交換を必要とする機器が多数ある。これらは、遠隔操作によって取り扱い、作業者の被曝を低減するようにしている。ターゲットステーションは、これらの機器のリモートメンテナンスを行う場所でもある。

ターゲットステーションでのリモートメンテナンスの基本は、ビームラインにある機器を取り出し、メンテナンスエリアに持って行って、そこでメンテナンス（或いは交換）を行うことである。このため、各対象機器ごとに、それを遠隔操作でビームラインから取り出してメンテナンスエリアまで持って行ったりビームラインに再設置したりするハンドリング装置や、メンテナンスエリアで遠隔操作する機器を、それぞれ開発している。本章ではそれを各機器ごとに見ていくこととする。

また、ビームラインからメンテナンスエリアへの移動の全ての基本となるのがクレーンである。ターゲットステーションのクレーンは、高放射化物のハンドリングに適した特別仕様となっている。まず、3次元座標とフックの回転角が常時表示され、自動運転モードでは、その指示した座標まで自動で移動することも可能である。操作員は、ターゲットステーション内で遮蔽されたクレーン操作室内にいながら、それらの座標が表示される制御卓で操作が出来る。

次に、クレーンの制御機器が、全て、そのクレーン制御室に設置されていることも大きな特徴である。通常のクレーンでは、電動機へのケーブルを短くするため、制御機器を収めた制御盤が、ガーダーの上に乗せられている。しかし、この場合、何らかのトラブルで制御機器が故障した場合、ガーダーの上まで行って修理しなければならない。これだと、高放射化物を吊っている最中に故障した場合など、その修理作業が極めて困難となる。そこで、制御盤をクレーン制御室に置き、そこから長いケーブルで各電動機へ動力を供給している。これなら、修理も、安全なクレーン制御室で行える。

そして、走行、横行、巻上、回転といった全ての動作について、電動機を二重化している。これにより、高放射化物を吊った状態で電動機が故障した場合でも、もう一方の系統に切り替えて操作を継続することが出来る。切り替えは制御室で行える。但し、巻上に関しては、電動機を切り替える際にクラッチを切ると落下の危険があるため

に、最初から2台の電動機を動かしてその動力をプラネタリーギアで合成する構造としている。こうすることで、片方の電動機が故障した際には、半分の速度で稼働させることが出来る。

また、放射化物を慎重に扱うために、各動作の速度は一般的なクレーンよりも遥かに遅く設定してある。速度はどの動作も3段階の速度調整が出来るが、巻上で最低速度の場合、5 mm/s という遅さである。

クレーンの定格重量は43tであり、フックには後述する各種ハンドリング装置が取り付けられる。また、フック部には、各種ハンドリング装置の動力/信号ケーブル接続コネクタや、AC 100 Vの電源コンセントが設けられており、カメラ等の機器の電力も供給出来る。

11.1. 電磁ホーン

電磁ホーンは、リモートメンテナンス対象機器では最大で、その交換作業も最も大掛かりである。しかし、前述(7.1)のように、2013~2014年と2021~2022年に、計5回の交換作業を行っており、それ以外にもビームラインからメンテナンスエリアまでの往復も複数回行っており、最も経験豊富なリモート作業でもある。

電磁ホーンは、支持モジュールと呼ばれる箱型の鋼製構造物に懸架された状態でヘリウム容器に設置されている(Fig.25)。ビームラインとメンテナンスエリアを往復する移動作業では、この支持モジュールごとハンドリングする。支持モジュールの頂部の四隅には、全ての荷重を預けるアームと呼ばれる構造がある。ビームライン(ヘリウム容器)に設置され、上方に遮蔽体を設置した状態でも、このアームは遮蔽体の上に位置し、人間がアクセス出来るようになっている。アームの上面には、ハンドリング時には、ツイストロック(後述)の穴のあるブロックが取り付けられ、ここで電磁ホーン/支持モジュールを持ち上げる。ビームラインにあるときには、この部分をヘリウム容器に締結して固定する。アームの下面には、円錐状の穴が開いており、ヘリウム容器側に設置されたレヴェリングブロックの頂部の半球の上に載

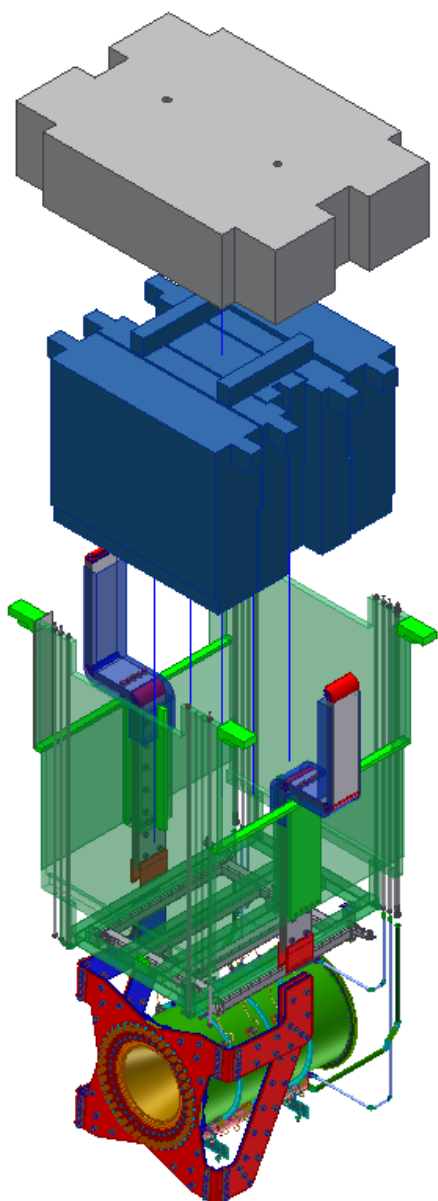


Fig. 25 電磁ホーンと支持モジュール

り、荷重を支える。レヴェリングブロックは、前後左右に動くリニアガイドの上に載り、高さも調整出来るので、電磁ホーンの位置の微調が出来る。支持モジュールの箱の中には、鉄遮蔽体とコンクリート遮蔽体が設置され、電磁ホーンやターゲットから上がってくる放射線を遮蔽するようになっている。このコンクリート遮蔽体の上からであれば、人間は作業可能である。尚、鉄遮蔽体とコンクリート遮蔽体はそれぞれ専用の受台で

ヘリウム容器に直接荷重をかけるので、それらの荷重が支持モジュールにかかることはない。

電磁ホーンと支持モジュールの結合は、支持モジュール頂部から、長いシャフトを回すことで脱着出来る。ここで脱着するものは、電磁ホーンの荷重を支えるシャフト（4本）、バスバー、冷却水並びにヘリウム配管、温度センサーのコネクター、である。バスバーは、シャフトを回すことで、締め付けと、逆の緩めが出来る脱着装置を開発し、使用している。配管は全て Swagelok で、そのナットを回すためのレンチとなるシャフトが、配管と同軸で被さるように常時設置されている（ビーム運転時も外さない）。



Fig. 26 ハンドリング装置に吊られた第1電磁ホーンと支持モジュール

電磁ホーンを支持モジュールごとハンドリングするのが、電磁ホーンハンドリング装置である。これは天井クレーンに取り付けて使用する。下端の4箇所にツイストロックがついており、これで支持モジュールのアームを掴む。ツイストロックは、吊荷側に楕円形の穴を設け、吊具側に楕円断面のロックピンを設け、穴に差し込んでからロックピンを90度回転させることでロックし、吊荷を持ち上げるもので、海上コンテナのハンドリングの標準装備である。電磁ホーンは3台とも大きさが異なり、支持モジュールもそれに合わせてビーム軸方向の長さが異なるので、このツイストロック部は、それに合わせて、ビーム軸方向に3段階で長さを変えられるようになっている。また、側面四隅に各2方向、上下合わせて計16台（ローラーの数は32個）のガイドローラーが取り付けられており、後述のガイドセルのレールと噛み合っており、電磁ホーンを正確な位置へとガイドする。電磁ホーンハンドリング装置にハンドリングされた支持モジュールと第1電磁ホーンをFig.26に示す。白いのがクレーンのフック部、赤い機器がハンドリング装置、灰色の箱が支持モジュール、その下が第1電磁ホーンである。

電磁ホーンの交換手順は以下の通りである。

- 1) 交換対象の電磁ホーンの直上のコンクリート遮蔽体とヘリウム容器の蓋を開ける。
- 2) ヘリウム容器内の、支持モジュール上方の各種配管並びにバスバーを取り外す。
- 3) 電磁ホーンの前後の隙間から、テフロンシートを垂らす。このテフロンシートは、万が一、電磁ホーンが隣接する機器に寄っていったとしても、それと衝突しないための措置である。
- 4) ヘリウム容器に、ガイドセルをドッキングする。このガイドセルは、内面四隅に計8本のレールを持った全高6mにも及ぶ構造物で、電磁ホーンの取り出し/再設置の際、正しい位置を出すためのものである。前述のハンドリング装置側のガイドローラーとガイドセルのレールとの間の隙間は $\pm 1\text{ mm}$ で（ $\pm 2\text{ mm}$ も選択出来る）、クレーンの座標センサーでcm、このガイドセルでmmの位置精度を出すようになっている。ガイドセル

は、3台の電磁ホーンそれぞれの位置にドッキング出来るようになっている。

5) メンテナンスエリア側で電磁ホーンを受け入れる準備をする。リフトテーブル上の、電磁ホーンの4本の脚が来る部分に、専用の荷重計を4台設置する。これは、リフトテーブルで電磁ホーンの荷重を受ける際に、均等に荷重がかかっていることを確認するためのものである。メンテナンスエリア頂部に、コンクリート遮蔽体で電磁ホーンが載り、かつ放射線を遮蔽する構造を組み上げる。コンクリート遮蔽体の上の4箇所には、前述のヘリウム容器内のレヴェリングブロックと同じものを設置し、この上に支持モジュールのアームが載るようにする。そして、その上方に、メンテナンスエリア用のガイドセルを設置する。

6) 電磁ホーンの移動経路、特に電磁ホーンと他の機器との隙間が見える位置に、ネットワークカメラを設置する。電磁ホーン交換作業で使うネットワークカメラは40台である。

7) 電磁ホーンハンドリング装置だけを使い、空荷で、リハーサルを行う。電磁ホーンが東西南北上下に移動する距離、方向転換する座標などは、予め全て設定しているが、それが合っているか、このリハーサルで確認する。また、ヘリウム容器内で、ハンドリング装置と電磁ホーン/支持モジュールを結合し、地切りする程度に持ち上げて、傾きを調べる。必要に応じてカウンターウェイトを取り付けて傾きを調整する。支持モジュールに懸架された状態の電磁ホーンは非常に長い（第3電磁ホーンで7m以上）ので、少し傾いただけで下部では大きく位置がずれ、隣接する機器に接触する恐れがある。そこで、支持モジュール頂部に無線式の傾斜計を取り付け、この移動作業中に傾きを常時監視している。カウンターウェイトは支持モジュール頂部に取り付けるもので、これにより傾きを補正する。

8) クレーンに遮蔽体ハンドリング装置を取り付け、ヘリウム容器内のコンクリート遮蔽体を取り出し、地上へと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。遮蔽体

ハンドリング装置は、コンクリート遮蔽体と鉄遮蔽体をハンドリングするリモート装置である。やはりツイストロックでハンドリングするが、電磁ホーンハンドリング装置のツイストロックが海上コンテナのそれと同じ寸法なのに対して、こちらはもっと大型である。また、電磁ホーンの4本に対してこちらは2本である。

9) 引き続き、ヘリウム容器内の鉄遮蔽体を取り出し、保管西側の鉄遮蔽体仮置架台(3.6)へと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。電磁ホーン上方の鉄遮蔽体は、第1/第2電磁ホーンで3台、第3電磁ホーンで5台ある。この作業は、第1/2電磁ホーンは1日で終わるが、第3電磁ホーンは2日かかる。Fig.27に、遮蔽体ハンドリング装置が鉄遮蔽体をハンドリングしている様子を示す。灰色の物体が鉄遮蔽体、赤と黒の機器が遮蔽体ハンドリング装置で、黒い部分はガイドである。その先端部がヘリウム容器側の受台と噛み合い、遮蔽体を正しい位置に設置する。

10) クレーンに電磁ホーンハンドリング装置を取り付け、ヘリウム容器内の電磁ホーンを取り

出し、メンテナンスエリアへと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。Fig.28に、ハンドリング装置に吊られた電磁ホーン/支持モジュールが、メンテナンスエリアに設置される様子を示す。青い機器がメンテナンスエリア用のガイドセルである。

11) クレーンに遮蔽体ハンドリング装置を取り付け、メンテナンスエリア用コンクリート遮蔽体を地上からメンテナンスエリアの電磁ホーン上方に移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。このコンクリート遮蔽体はヘリウム容器内部で電磁ホーン上方に設置されるコンクリート遮蔽体と同じ形である。これを設置することで、メンテナンスエリアでも、電磁ホーン上方から人間が作業出来る。

12) メンテナンスエリアにて、電磁ホーン上方のコンクリート遮蔽体の上から、シャフトを回すことで、バスバー、配管、温度センサーを外す。その後、リフトテーブルを上昇させ、電磁ホーンの荷重を荷重計で支えた上で、電磁ホーンと支持モジュールを結合する荷重シャフトを支持モジュール頂部から回し、この結合を外す。リフトテ



Fig. 27 ハンドリング装置に吊られた鉄遮蔽体



Fig. 28 メンテナンスエリアへの電磁ホーン
の設置

ケーブルを下げ、電磁ホーンが支持モジュールと完全に切り離されたことを確認する。

13) クレーンに遮蔽体ハンドリング装置を取り付け、メンテナンスエリア用コンクリート遮蔽体をメンテナンスエリアから地上へと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。

14) クレーンに電磁ホーンハンドリング装置を取り付け、支持モジュールだけをメンテナンスエリアからヘリウム容器へと移動させる。

15) クレーンに電磁ホーン用キャスクハンドリング装置を取り付け、電磁ホーンキャスク(3.6)の天板だけを吊って、メンテナンスエリアの電磁ホーン上方に設置する。ハンドリング装置は外さない。キャスク下部筐体は保管庫に置いたままにする。キャスク天板は追加遮蔽板付きだと 300 mm の厚み(鋼板)なので、これがあるとその下方に電磁ホーンがあっても天板上で人間が作業出来る。

16) リフトテーブルを上昇させ、キャスク天板に電磁ホーンを結合させる。この結合は、キャスク天板の上から操作する4箇所ツイストロックによって行う。ピンは下側(電磁ホーン側)にあり、電磁ホーンの上面には、このためのツイストロックの穴がついている。

17) 電磁ホーン用キャスク天板を、電磁ホーンを吊ったまま、メンテナンスエリアから保管庫へと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。保管庫で待っている

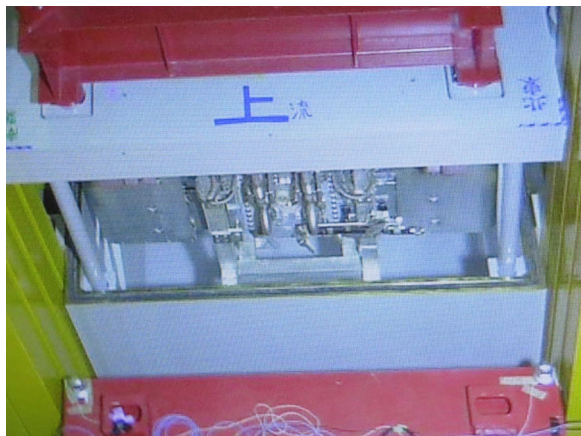


Fig. 29 電磁ホーンのカスケへの収納

キャスク下部筐体の上に天板を置くと、電磁ホーンはキャスクの中に収納された状態となる。Fig.29 に、キャスク天板に吊られた電磁ホーンが、キャスク内に収納される様子を示す。「上」と書いてある厚い灰色の鋼板がキャスク天板で、それに吊られているのが電磁ホーン、その下の灰色の箱状のものがキャスク下部筐体である。天板から下に伸びている2本の円柱は、天板と下部筐体が正しく噛み合うためのガイドである。

18) 保管庫に作業員が入り、キャスク天板と下部筐体をロックする。このためのツイストロックがキャスクにはついており、キャスク天板の上から操作出来る。その後、電磁ホーン用キャスクハンドリング装置をクレーンから外す。

19) メンテナンスエリアのリフトテーブルの上に、新品の電磁ホーンを設置する。これは新品なので作業員が直接作業を行える。

20) クレーンに電磁ホーンハンドリング装置を取り付け、ヘリウム容器内の支持モジュールを取り出し、メンテナンスエリアへと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。

21) クレーンに遮蔽体ハンドリング装置を取り付け、メンテナンスエリア用コンクリート遮蔽体を地上からメンテナンスエリアの電磁ホーン上方に移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。

22) リフトテーブルを上昇させ、電磁ホーンを支持モジュールとの結合位置まで上げる。メンテナンスエリアにて、電磁ホーン上方のコンクリート遮蔽体の上に立ち、電磁ホーンと支持モジュールを結合する荷重シャフトを支持モジュール頂部から回し、電磁ホーンを支持モジュールに結合する。リフトテーブルを下降させ、電磁ホーンの荷重が支持モジュール側へと移ったことを確認する。シャフトを回すことで、バスター、配管、温度センサーを結合する。

23) 電気試験、配管の気密試験等を行い、電磁ホーンと支持モジュールの間の各種結合が問題ないことを確認する。

24) クレーンに遮蔽体ハンドリング装置を取り付け、メンテナンスエリア用コンクリート遮蔽体をメンテナンスエリアから地上へと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。

25) クレーンに電磁ホーンハンドリング装置を取り付け、電磁ホーンと支持モジュールをメンテナンスエリアからヘリウム容器へと移動させ、ビームラインに設置する。Fig.30 に、ヘリウム容器（ビームライン）に設置される電磁ホーンを示す。青い構造物はヘリウム容器用ガイドセルである。電磁ホーンハンドリング装置（赤）と噛み合っていることが判る。

26) クレーンに遮蔽体ハンドリング装置を取り付け、ヘリウム容器内鉄遮蔽体を保管西側の鉄遮蔽体仮置架台から取り出し、ヘリウム容器へと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退避する。

27) 引き続き、ヘリウム容器内コンクリート遮蔽体を地上からヘリウム容器へと移動させる。この移動時は、全ての作業員はクレーン制御室に退

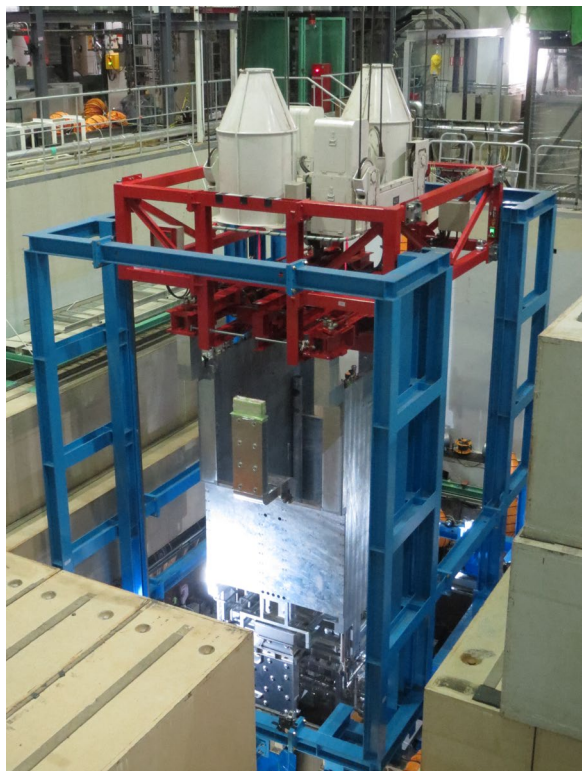


Fig. 30 ヘリウム容器に設置される電磁ホーン

避する。

28) ヘリウム容器用ガイドセル、並びにテフロンシートを撤去する。

29) ヘリウム容器内にて電磁ホーンの測量を行う。基準点は支持モジュール頂部なので、コンクリート遮蔽体の上に露出している。支持モジュールのアームが載っているレヴェリングブロックを調整して、電磁ホーン的位置を 0.1 mm の精度で規定座標に合わせる。その後、アーム上面からツイストロック穴ブロックを取り外し、その上面をヘリウム容器に固定する。

30) 支持モジュール上方のバスバーと各種配管を元の通りに結合する。その後、気密試験を行う。気密試験が合格すれば冷却水配管は通水試験を行い、漏れがないことを確認する。

31) ヘリウム容器の蓋が開いた状態で電磁ホーンの通電試験を行い、問題がないことを確認する。

32) ヘリウム容器の蓋を閉め、ヘリウム容器／ディケイヴォリュームを真空引きし、リーク試験を行う。それに合格すれば、ヘリウムを充填する。

33) ヘリウム雰囲気、電磁ホーンの通電試験を行い、問題がないことを確認する。

これらの作業は時間をかけて慎重に行うため、例えば電磁ホーンをヘリウム容器から取り出してメンテナンスエリアに移動させる、などの遠隔操作での移動作業は、その一仕事で一日かかる。配管を外したり元に戻したりする作業や、ヘリウム容器内のコンクリート遮蔽体を移動させたり元に戻したり、その気密処理を行ったりする作業、更には各種準備作業を含めると、電磁ホーンの交換は、半年はかかる大作業である。

尚、交換した電磁ホーンの残留放射線量は、最大の部分（第1電磁ホーン2号機下流側、ターゲット付）で、300 mm 離れて 600 mSv/h だった。

11.2. ターゲット交換システム

ターゲットはこれまで2度交換しているが、何れも、第1電磁ホーンごとと交換している。この場合、電磁ホーンの交換作業に同じで、新品のターゲットも、新品の電磁ホーンに、人間の手で直接

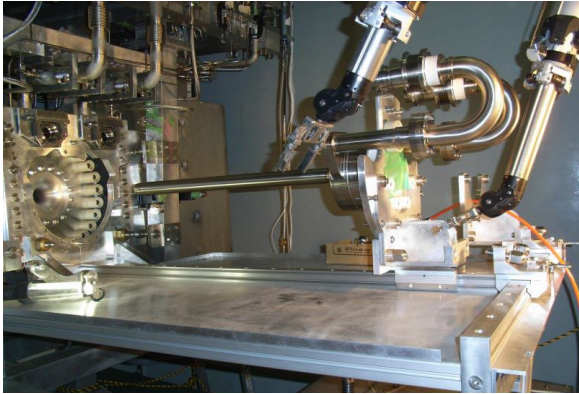


Fig. 31 ターゲット交換装置

取り付けられる。しかし、ターゲットだけ壊れることも有り得るので、第1電磁ホーンから、ターゲットだけを交換するシステムを開発した。その核となるターゲット交換装置は、RALが開発した。このターゲット交換装置は、新品のターゲットを載せた状態で電磁ホーンにドッキングさせ、使用済みのターゲットを電磁ホーンから取り外し、新品のターゲットを電磁ホーンに挿入して固定するものである。ターゲット交換装置は2基のエアジャッキで高さや傾きを調整出来るが、電磁ホーンへのドッキングや、エアジャッキ部分以外のターゲット交換装置の各種操作はマニピュレーターで行う。また、各種ボルトの締結や取り外しは、マニピュレーターで持ったエア工具にて行う。Fig.31はターゲット交換装置の写真である。銀色のテーブルのようなものがターゲット交換装置で、上にターゲットが載っている。左奥には第1電磁ホーンが見える。ターゲット交換装置は電磁ホーンとドッキングした状態である。また、2本のマニピュレーターも写っている。

ターゲット交換の手順は以下の通りである。

1) メンテナンスエリアのリフトテーブルの上に、ターゲット用キャスクとターゲット交換装置を設置する。両者とも、専用の子リフトの上に乗せ、独立して高さを調整出来るようにしておく。ターゲット交換装置には新品のターゲットを載せておく。また、交換作業で使用するエア工具などの各種工具もホットエリアに入れておく。

2) 11.1で示した手順で、電磁ホーンを支持モデルごとメンテナンスエリアに持ってくる。

規定の位置に設置すると、電磁ホーンの手前にターゲット交換装置とその上の新品のターゲット、電磁ホーンの下にターゲット用キャスク、という配置になる。

3) ターゲット交換装置のエアジャッキと子リフトを調整し、同装置を電磁ホーンに接触させ、専用の結合ボルトで定位置にドッキングさせる。ボルトは専用のエア工具で締結する。

4) ターゲット交換装置の上面には、ビーム軸方向に動くリニアガイドと、それに垂直方向に動くリニアガイドとがあり、それらが交差している。そのリニアガイドの上に、2つのターゲット台があり、片方は空で、片方には新品のターゲットが載っている。空のターゲット台を、ビーム軸方向のリニアガイド上をマニピュレーターを使って走らせ、使用済みターゲットと接触させ、結合ボルトで定位置にドッキングさせる。ボルトはエア工具で締結する。

5) ターゲットと電磁ホーンを結合しているボルトをエア工具で緩める。また、ターゲット冷却用ヘリウム配管のフランジは、チェインクランプによって固定されているので、これも緩める。こうすることで、ターゲットは交換装置のターゲット台だけに固定された状態となる。

6) 使用済みターゲットが固定されたターゲット台を、ビーム軸方向のリニアガイド上をマニピュレーターを使って走らせ、手前の、横方向のリニアガイドのところまで持ってくる。

7) 使用済みターゲットが固定されたターゲット台を、横方向のリニアガイド上をマニピュレーターを使って走らせ、正面から避ける。

8) 新品のターゲットが固定されたターゲット台を、横方向のリニアガイド上をマニピュレーターを使って走らせ、ビーム軸方向のリニアガイドとの交差点まで持ってくる。そのまま、ビーム軸方向のリニアガイドをマニピュレーターを使って走らせ、ターゲットを電磁ホーンに挿入する。それから結合ボルトでターゲットを電磁ホーンに締結する。また、ターゲット冷却用ヘリウム配管のフランジもチェインクランプを締めること

で結合する。ボルトやチェインクランプはエア工具で締結する。

9) ターゲットとターゲット台を固定しているボルトを緩める。こうすることで、ターゲットは電磁ホーンだけに固定された状態となる。

10) ターゲット交換装置と電磁ホーンを切り離す。

11) ターゲットの気密試験を行う。これに合格したら、電磁ホーンごと、11.1 で示した手順でメンテナンスエリアからヘリウム容器へと移動し、設置する。

12) メンテナンスエリアにて、ターゲット用キャスクの子リフトを上昇させ、ターゲット交換装置と同じ高さにする。

13) ターゲット交換装置のエアジャッキと子リフトを調整し、同装置をキャスクに接触させ、専用の結合ボルトで定位置にドッキングさせる。ボルトは専用のエア工具で締結する。

14) 使用済みターゲットが固定されたターゲット台を、横方向のリニアガイド上とビーム軸方向のリニアガイド上をマニピュレーターを使って走らせ、キャスクの中にターゲットを挿入する。その後、ボルトで締結する。キャスクは、電磁ホーンのターゲット固定部分と同じ構造をしており、電磁ホーンに挿入・固定するのと同様に行える。

15) ターゲットとターゲット台を固定しているボルトを緩める。こうすることで、ターゲットはキャスクだけに固定された状態となる。

16) ターゲット交換装置とキャスクを切り離す。

17) キャスクの蓋をマニピュレーターで閉じ(観音開きになっている)、ボルトで固定する。ボルトは専用のエア工具で締結する。

18) キャスクを保管庫に移動する。

ターゲット交換試験は、これまでにターゲットと電磁ホーンのモックアップを使用して、部分的には行ってきた。今後は、総合リハーサルや、習熟訓練を行い、実際のターゲット交換に備える。

11.3. ビーム窓交換システム

6.で述べたビーム窓も、常時ビームを浴びているために高放射化物であり、リモートハンドリングの対象機器である。ビーム窓は、これまでに、2017年に一度だけ交換した。

ビーム窓は、ビームライン側とヘリウム容器側の両方で気密を取る必要があるため、その両面にピローシールフランジを備えた構造となっている (Fig.32)。ピローシールフランジは、ステンレス製の、二重円状の突起を持つ鏡面を、相手側のステンレス製鏡面フランジに接触させて気密を取る、メタルタッチ式のフランジである。二重円状の突起を持つ鏡面フランジ側は、ベローズによって伸縮するようになっている。ベローズ内側に窒素などの気体で圧力をかけると、ベローズが伸びて、相手側の鏡面フランジに押し付けられる。逆にその気体を抜き、真空引きすると、ベローズが縮んで、相手フランジとの間に隙間が出来て、これを取り出すことが出来る、という構造である。二重円状の突起の間は、真空引き出来る吸気口が設けられており、ピローシール稼働中はこの部分を排気して中程度の真空とすることで、最も内側を高真空に保つことが出来る。ビーム窓はこのピローシールと一体になっているので、簡単に言うと、ピローを縮めて使用済みビーム窓を取り出し、新品のビーム窓を入れてピローを伸ばしてやればよい。

問題は、このビーム窓の位置である。サーヴィ



Fig. 32 ビーム窓

スピットの床面から 4 m 下にあるだけでなく、そこからビーム窓を取り出す隙間は、200 ~ 300 mm しかない。ピローシールは鏡面の表面が命なので、一切接触させることなく、この隙間を上下させる必要がある。また、サーヴィスピットの床面も、このヘリウム容器上流の部分は狭いので、クレーンのフック部が入って行かない。

そのような条件でもビーム窓を取り出し／再

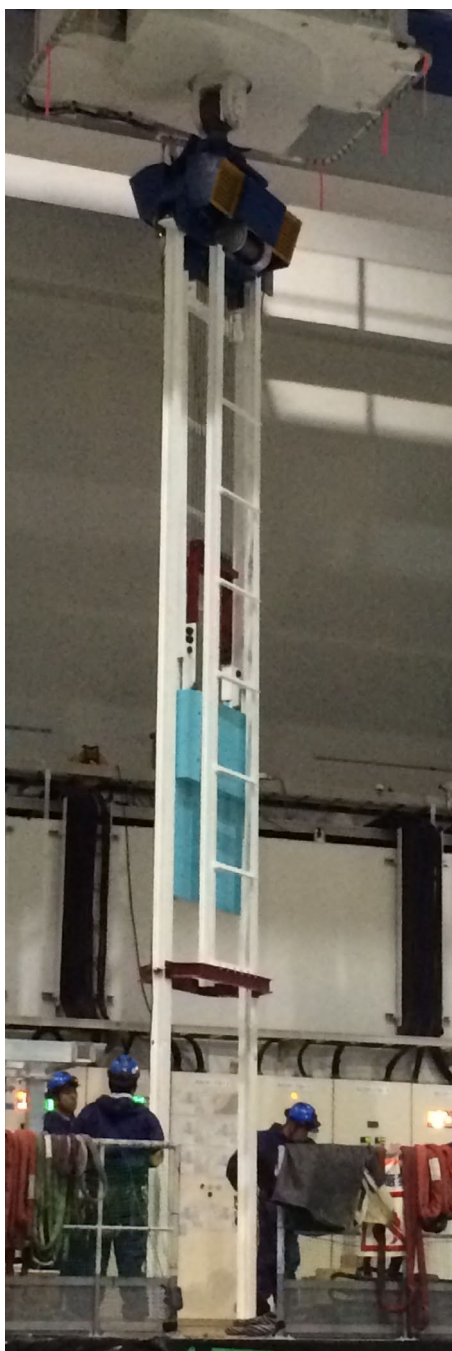


Fig. 33 ビーム窓ハンドリング装置

設置出来る、ビーム窓ハンドリング装置を開発した。Fig.33 がその姿だが、全高 7.5 m にも及び、かつ薄い。左右の白い柱はガイドだが、内外両面がガイドとして機能する。外側は、建屋側に設置するガイドピンにこの装置が正しく着地するためのガイドで、内側は、ハンドリングポイントが真っ直ぐに上下するためのガイドである。ハンドリングポイントは、判り難いが、写真の赤い部分で、その直下に水色の遮蔽体を吊っている。ハンドリングポイントは、遮蔽体とビーム窓を吊った状態で、ハンドリング装置に内蔵されたウィンチで上下する。ビーム窓は、この遮蔽体の頂部に懸架されたシャフトで吊られる形で、遮蔽体ごと上下する。シャフトを回転させると、ビーム窓をロック／アンロック出来る。

また、ピローシールの相手側のミラーフランジに埃が附着すると、その気密性能が落ちるので、使用済みビーム窓を取り出した後に汚れている場合には、新品を入れる前に洗浄する必要がある。そのため、フランジの状態を観察する薄型カメラシステムと、アルコールを噴射して洗浄する洗浄装置を開発した。

ビーム窓交換手順を以下に述べる。

- 1) 一次ビームライン側を大気圧にする。
- 2) メンテナンスエリアに、ビーム窓上方遮蔽体（後述）の仮置架台と、ビーム窓ハンドリング装置のガイドピンを設置する。また、ガイドピン直下のリフトテーブル上にビーム窓用キャスクを設置する。
- 3) ビーム窓の上方のサーヴィスピットに、ハンドリング装置が噛み合うガイドピンを設置する。ピンと言っても、高さは 1 m ある。
- 4) ピローシール以外の配管（冷却用ヘリウム配管）を外す。これらの配管は、ビーム窓から 4 m 上方まで延びており、サーヴィスピット床面で取り外すことが出来る。ビーム窓直上でも Swagelok となっているので取り外すことは出来る。
- 5) クレーンにビーム窓ハンドリング装置を取り付け、ビーム窓上方のガイドピンにドッキングさせる。

6) ビーム窓上方には、高さ 4 m の遮蔽体（鋼製の外枠にコンクリートを充填したもの）が設置されている。この遮蔽体をハンドリングポイントに固定する。

7) ハンドリング装置のウィンチを上限まで巻き上げ、ビーム窓上方遮蔽体を持ち上げる。

8) 作業員はサービスピットから退避し、ターゲットステーション内の、この位置から少し離れた場所から、クレーンを操作してビーム窓上方遮蔽体をメンテナンスエリアに移動させ、2)でそこに設置した仮置架台に遮蔽体を置く。遮蔽体とハンドリングポイントを切り離す（遮蔽体上部はそれほど放射化していないので、手作業可能）。

9) ハンドリング装置のハンドリングポイントに、交換作業用の遮蔽体（Fig.33 の青い遮蔽体）とそれに懸架されたリモートシャフトを取り付ける。

10) ハンドリング装置をビーム窓上方のガイドピンにドッキングさせる。

11) 遮蔽体の上面がサービスピット床面近くになるまで、ハンドリング装置のウィンチを巻き下げる。

12) 作業員がビーム窓上方のサービスピットに移動する。この状態では遮蔽体があるために放射線量は低い。遮蔽体の横からカメラを降ろし、ビーム窓上部を観察する。その状態で、更にウィンチを、リモートシャフト下端がビーム窓上部のハンドリングポイントに接触するまで巻き下げる。

13) リモートシャフトを回転させ、リモートシャフトをロックさせる。カメラでロックしたことを確認する。

14) ピローの圧力を抜き、更に真空引きをして、ピローを縮める。その状態で配管上部のヴァルヴを閉じ、真空を保持する。ヴァルヴより真空ポンプ側の配管を取り外す。

15) カメラ映像を観ながら、ビーム窓が地切りする程度までハンドリング装置のウィンチを巻き上げる。

16) 作業員はサービスピットから退避し、ターゲットステーション内の、この位置から少し離

れた場所から、カメラ映像を観ながら、ウィンチを上限まで巻き上げる。

17) クレーンを操作してビーム窓をメンテナンスエリアまで移動させる。何処まで近づいてよいかは、空間放射線量を測定しながら決める。メンテナンスエリアのガイドピンにハンドリング装置を着地させる。

18) メンテナンスエリアのコールドエリアに作業員が入り、鉛ガラス窓とカメラ映像を観ながら、ハンドリング装置のウィンチを、ビーム窓がキャスクに収納されるまで巻き下げる。キャス



Fig. 34 新品のビーム窓設置の様子

クは上方が開放された蓋なしである。

19) ビーム窓上部の接合部で、マニピュレーターと工具を用いて、配管を取り外す。その後、リモートシャフトを回転させてビーム窓をアンロックする。ハンドリング装置は地上に持っていく。

20) 薄型カメラシステムを降ろして、ピローの相手側の鏡面フランジを観察する。必要であれば、洗浄装置を降ろして、フランジを洗浄する。2017年の交換時には、汚れが見られなかったため、洗浄は行わなかった。

21) ハンドリング装置に懸架されたリモートシャフトの下端に新品のビーム窓を取り付ける。新品のビーム窓には、新品の配管が取り付けられている。このとき、ピローは、真空引きの上、配管上端のヴァルヴを封止することで、縮めた状態を維持しておく。

22) クレーンを操作して新品のビーム窓をサービスピットまで移動させ、クレーンとハンド

リング装置のウィンチを用いてビーム窓を定位置まで降ろす。新品のビーム窓なので、作業員は近くで見ながら作業出来る。Fig.34に、新品のビーム窓を設置する様子を示す。下がビームラインのカメラ映像である。

23) ピローシールの配管を接続し、窒素で規定値まで圧力をかけることで、ピローを伸ばし、フランジ面を接触させる。Fig.35に、ピローの伸縮の様子を示す。上が縮んだ状態、下が伸ばした状態である。

24) 一次ビームライン側を真空引きし、リーク試験を行う。これに合格したら、交換は完了である。

25) ビーム窓をキャスクごとメンテナンスエリアから取り出し、保管庫に収納する。

12. おわりに

以上、ターゲットステーションの二次ビームラインについて概観してきた。本稿で紹介したものは、電磁ホーンを除き、とても地味な「インフラ」で、華やかな検出器とは対照的である。多くの物理学者には見向きもされないものである。しかし、こういった泥臭いインフラがなければ、ビーム運転など出来ず、実験も出来ないことを、少しは御理解頂けると幸いである。

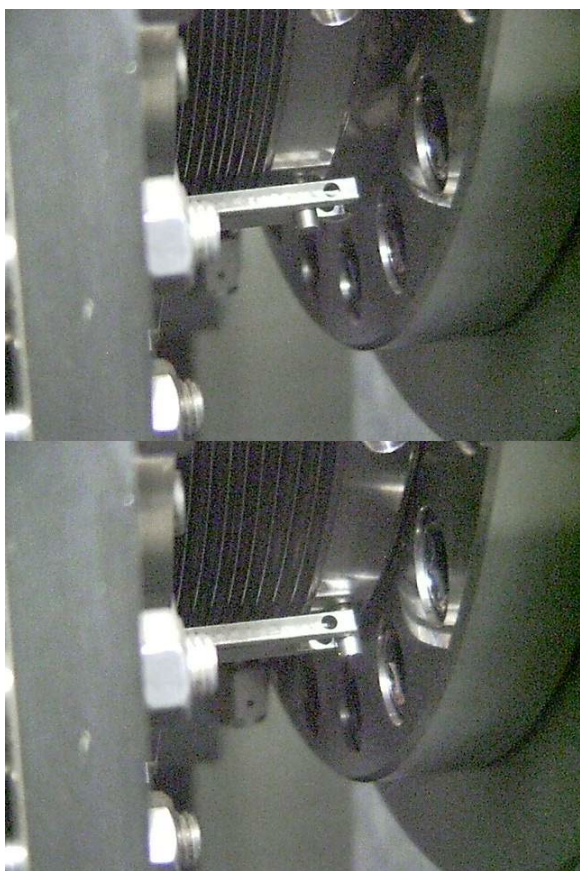


Fig. 35 ピローの伸縮の様子