

ニュートリノ実験施設の概要

KEK 素粒子原子核研究所

藤井 芳昭 山田 善一

yoshiaki.fujii@kek.jp

yoshikazu.yamada@kek.jp

2009年8月21日

5年の長きにわたる建設期間を終え、ニュートリノ実験施設は2009年4月にビーム運転を開始した。本稿ではこのニュートリノ実験施設の一次ビームライン(陽子輸送系)および二次ビームライン(ニュートリノ生成系)について、その概要を紹介する。

1. 一次ビームライン

一次ビームラインの役割は、加速器から取り出したビームを神岡方向に曲げ、ターゲットに適切な位置、角度、大きさをビームを当てることである。この目的を達するため、一次ビームラインは以下のような機器から構成される。

- (1) ビームを神岡方向に80度曲げる超伝導電磁石、
- (2) ビームパラメータを調整する(前段部)、あるいはビームを正しくターゲットングする(最終収束部)ための常伝導電磁石、
- (3) 常伝導電磁石、超伝導電磁石の電源、
- (4) ビームの位置、形状、強度、ロスを測る各種ビームモニタ群、
- (5) ビームを輸送するビームダクトとその真空系、
- (6) ビームロスを局在化させるためのコリメータや下流保護のためのビームプラグ、

等々。これらの機器が神岡方向に80度の急カーブを描く全長250mの地下トンネル内に設置されている。

このうち超伝導電磁石については別記事で解説するので、ここでは常伝導電磁石、ビームモニタ、真空システムについて、4、5月に行なわれたビームコミッショニング時の結果もまじえてその概要を説明する。

1.1 取り出しビームと機器の耐放射線性

50 GeV リングを周回するビームは、加速(現在は30 GeVまで)の後にキッカー電磁石、セプタム電磁石によりリングの内側に蹴り出され、ニュートリノ側の一次ビームライン

に飛び込んでくる。このビームの設計強度は 3.4×10^{14} proton/パルスと強力である。ビームロスを最小化すべく細心のビーム調整を行うが、それでもなお相当のビームロス、ひいては機器の放射化を覚悟した機器設計をする必要がある。ただ実際のビームロスの量やそれによる放射化の程度はビームを出して見なければ分からないところがあり、ビーム運転の経験を積み重ねながら放射化対策を増強して行く部分も多い。

1.2 常伝導電磁石

常伝導電磁石は、加速器から取り出したビームを超伝導アークに渡す前段部と超伝導アークから出たビームをターゲットに導く最終収束部に設置されている。各々の概観を図1と図2に示す。

常伝導電磁石においては耐放射線性や放射線環境での作業性に重点を置いた設計がなされているが、前段部上流の4台についてはコイルに図3に示すような無機絶縁型コイルを用い、耐放射線性を特に考慮した設計になっている。この常伝導電磁石はハドロングループの電磁石チームにより設計・製作がなされたもので、ハドロンビームラインの電磁石と共通の仕様となっている。



図1 前段部の常伝導電磁石概観



図2 最終収束部の常伝導電磁石概観

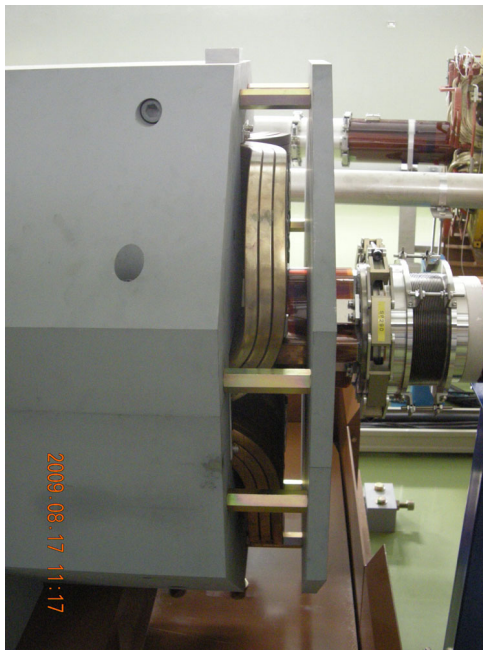


図3 無機絶縁型コイル

放射線環境下での作業被曝の低減のため、以下のような対策が取られている。

- 吊り具として遠隔操作可能なツイストロック吊り具を開発するとともに当て板とロックピンによる位置決め機構を採用し、作業者が離れた位置から磁石の吊り上げや設置を行なえるようにした(図4)。
- 冷却水パイプの接続や電力線の接続については、シングルアクションのクイックコネクタ機構を採用し、直手作業の時間を極力短く出来るようにした(図5)。



図4 ツイストロックでの吊り上げ



図5 電力接続のナイフスイッチと冷却水のクイックコネクタ

磁石の製作は順調に進み、2007年7月にはニュートリノ機器の先陣を切って、トンネル内に電磁石の設置を開始した。その後2008年3月にはすべての磁石の設置を完了し、配管、配線などの作業ののち通水試験、通電試験を経て、2009年4月にビームコミッショニングを迎えた。

ビームコミッショニングにおいては、短期間ではあったが磁石が(電源が)トリップすることもなく、ビーム軌道も安定しており、所定の性能を示すことが出来た。

1.3 ビームモニタ

ビームロスを最小限に抑えるための要がビームモニタである。ビームモニタは東大とKEKが共同で担当している。

ビームラインには以下の4種類のビームモニタが設置されている。

a) ビーム位置モニタ(ESM)

図6に示すような静電ピックアップ型のビーム位置モニタが常伝導部、超伝導部合わせて21台設置されている。ビームが電極に誘起する電荷の非対称からビームの位置を求め

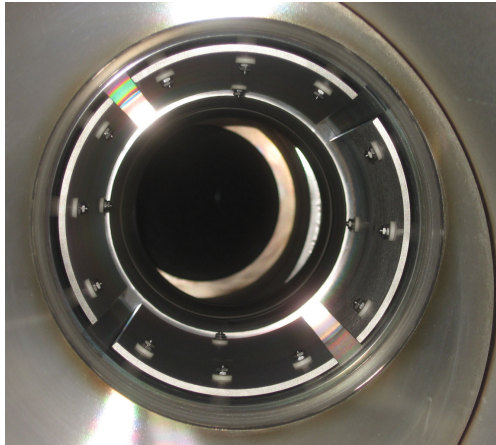


図6 ESMの内部電極構造

る測定器で、要求位置測定精度は0.5mmである。ビームコミッショニング時の測定ではまだバックグラウンドの理解が解決していないためRMS \sim 0.6mmの精度に留まっているが、秋からのコミッショニングでは要求性能を達成できる見込みである。

b) ビーム形状モニタ(SSEM)

薄いチタン膜からの二次電子放出を利用したビーム形状モニタが常伝導部 超伝導部合わせて19台設置されている。図7のようにチタン膜はストリップ状に分割されており、水平方向のストリップと鉛直方向のストリップを組み合わせてビームの形状を測定する。膜は 10^{-5} 相互作用長の厚みによりビームロスが発生させるため、ビーム強度が上がった暁には、必要な時だけビームライン上に挿入してビーム形状を測定し、通常はビームラインから退避させておく。この退避メカニズムを超伝導部の極低温環境下で動作させるために並々ならぬ努力が払われたが、これについては別稿で紹介したい。

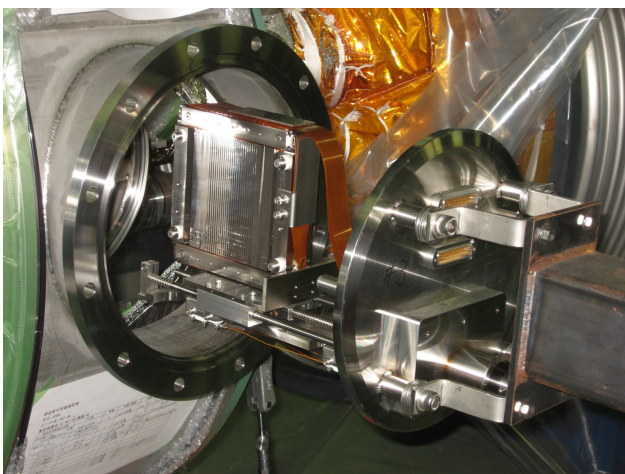


図7 SSEMとそのストリップ電極

要求精度はビーム位置に対して0.5mm, ビーム幅に対して0.7mmである。ビームコミッショニング時の測定では0.2mm程度の精度が得られているが、大強度運転時にはビームサイズが異なるため、この精度がそのまま達成できるわけではない。

c) ビーム強度モニタ(CT)

CT(Current Transformer)を用いたビーム電流モニタが各セクションの境界などに5台設置されている。図8にその外形を示す。短パルスビームに対してビームコミッショニング時の微弱な電流から強力な設計電流まで精度よく測るため、広い周波数帯域にわたり比透磁率が高かつ飽和磁束密度の大きなファインメットをコアとして採用している。ビームコミッショニングにおいては電流測定精度として約1.6% (5台間の相対精度)を達成した。

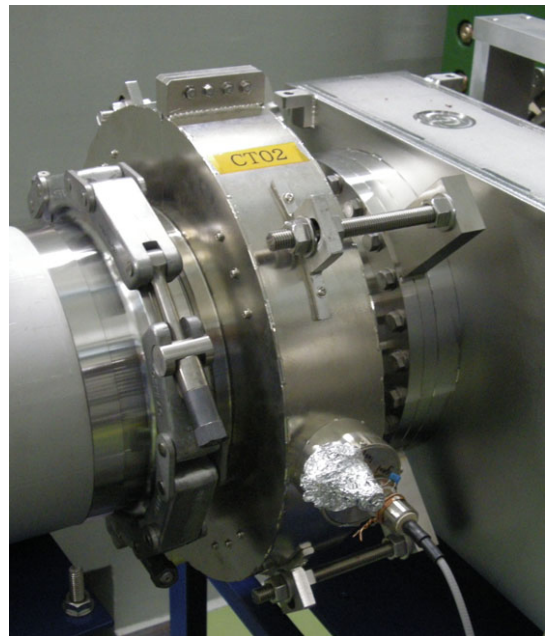


図8 CTの外観

d) ビームロスモニタ(BLM)

ビーム調整を行う上で、ビームロスを測定することは極めて重要である。このため各磁石の近傍には図9のようなガスチェンバーを用いたビームロスモニタが設置されている。モニタは事前のテストで通過粒子数と出力信号が較正されており、ビームロスがどの場所で起きているかを判別することができる。ただしロスモニタの通過粒子数からビームロスの絶対値を算出するためには別な情報が必要である。

ビームコミッショニングにおいては、上記SSEMの出し入れ時のビームロスの測定から16mWのビームロスまで感度があることが示された。



図9 BLMの外観と設置位置

ビームモニタにおいてはモニタ本体近傍のケーブルは耐放射線性に優れたポリイミド系のケーブルを用いている。またフィードスルー類はすべてセラミックを用いている。

1.4 真空系

ニュートリノ二次ビームラインにおいては超伝導部が低真空を嫌うため、全体が加速器と同程度の高真空に保たれている。排気系はイオンポンプを用いたオーソドックスな構成であるが、フランジ締結部については放射線環境下での作業性を考慮した設計がなされている。このメカニズムについては独自の設計ではなく、50 GeV 加速器のセミリモートシステムをほぼそのまま採用した。またダクトのアーチャーを最大限に確保するため、収束電磁石内には「花形ダクト」と呼ばれる磁極面に沿った壁面を持つダクトが使われているが、こちらはハドロンビームライン用のダクトの設計を応用させていただいた。また最上流部の2台のステアリング磁石のダクトは放射化を考慮してチタンで作られている。

「セミリモート」とは人が1~2m離れたところから自分の目、自分の手で(ただし長尺器具を用いて)操作する、という意味で、図10のような機構によりフランジの締結・切り離しやフランジの前進・後退が1~2m離れたところからボルトを回すことのみによって行えるようになっている。現時点においてはこのセミリモート機構が装備されたフランジは一部だけで 操作性の習熟を行っている段階である。今後ビーム強度が上がるのにあわせて装備場所を増やしていく計画である。

2. 二次ビームライン

二次ビームラインは、(1)陽子を衝突させて π 中間子を発生させるための標的、(2)発生した π 中間子をビーム進行方向に収束させるための電磁ホーン、(3)標的や電磁ホーンを設置するターゲットステーションおよびヘリウム容器、(4)

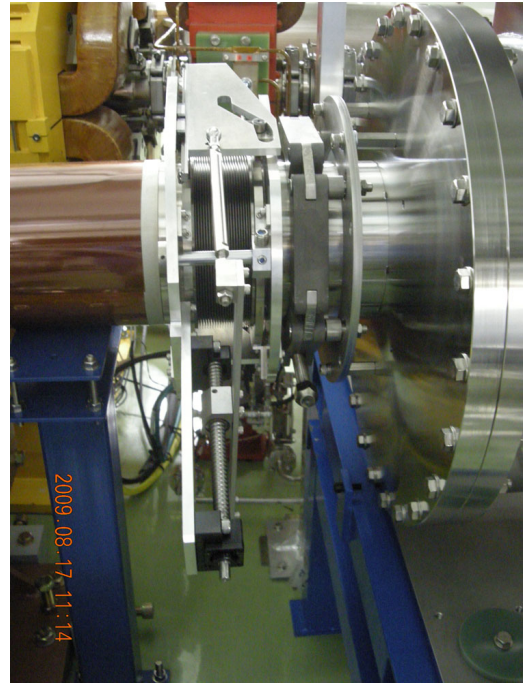


図10 セミリモートチェーンクランプと
セミリモートフランジ駆動機構

π 中間子が飛行中にニュートリノとミュー粒子に崩壊するディケイボリューム、(5)陽子や中間子やミュー粒子を吸収するためのビームダンプ、(6)ビームダンプを突き抜けてくるミュー粒子をモニターするミューオンモニター、などからなる。図11に二次ビームラインの全体図を、図12にターゲットステーション内に設置され、電磁ホーンなどが中に設置されているヘリウム容器の内部を示す。われわれは、KEKの施設部に協力していただき、この二次ビームラインの装置や建物や設備の基本設計を2001年頃に開始し、2003年秋頃終了した。その後、詳細な実施設計および実際の建設へと進んだ。随所で、経験不足からくる種々の困難に遭遇したが、何とか2009年春のファーストビーム直前にほぼ完成させることができた。

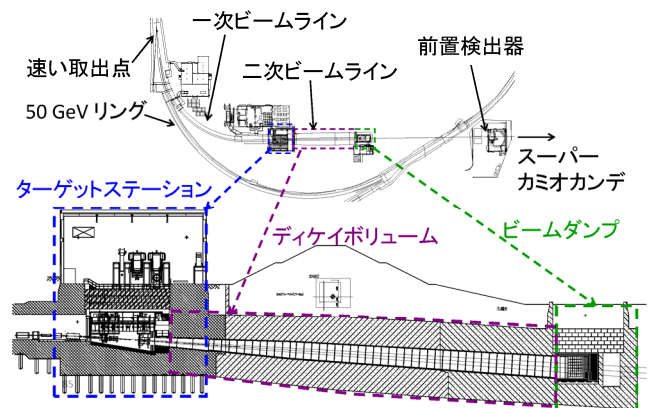


図11 二次ビームライン

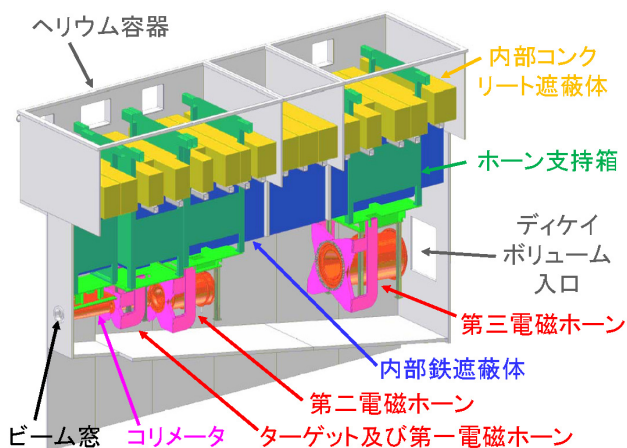


図 12 ヘリウム容器内部

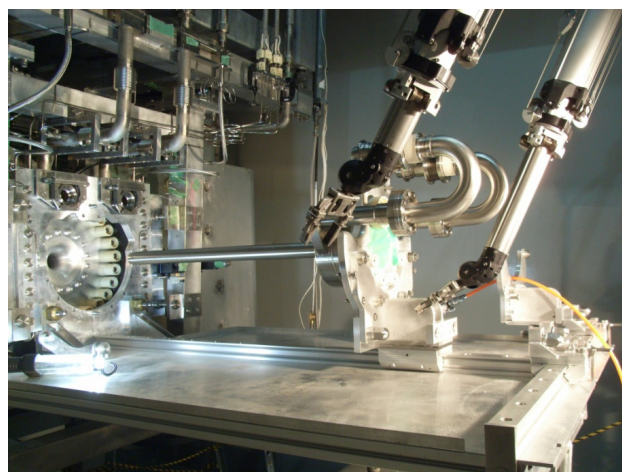


図 14 マニピュレータで引き出される標的

2.1 標的

一次ビームラインから入射される 3×10^{14} 個 (750kW時) の陽子が衝突する標的は、直径 26mm、長さ 900mm のグラファイト製の棒で、後述する第一電磁ホーンの内側に設置されている。図 13 に、標的と第一ホーンの断面図を示す。

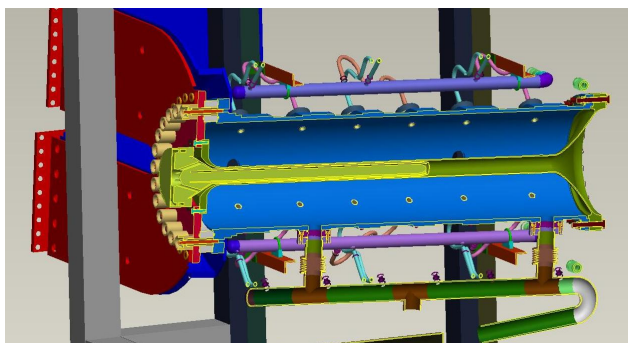


図 13 第一電磁ホーンと標的

図の左側より陽子ビームが入射する。標的に密度の大きい物質を使用すると、冷却しきれず溶けてしまうので、中程度の密度を持つグラファイトを採用し、周囲を高速 (250m/s) のヘリウムガス (1.6 気圧) で冷却している。それでも 750kW の陽子ビームが衝突すると、中心温度は 700°C に達する。ヘリウムガスを流すために、標的はチタン製の容器の中に納められている。標的は、2007 年 12 月に製造され、2008 年 11 月に第一電磁ホーンの内側に設置された。750kW のビームを 1 年間照射すると、標的は半年後でも数 Sv/h という、人間が近づけないレベルまで放射化しているので、標的が破損した際には、遠隔操作で第一電磁ホーンから引き抜き、新しい標的を挿入する必要がある。そのため、図 14 に示すようなマニピュレータと鉛ガラス窓が、カナダグループにより 2008 年 11 月にターゲットステーションのメンテナンスエリアに設置された。標的の直前には、図 15 に示す OTR (Optical Transition Radiation) 検出器と呼ばれるビームプロファイルモニターがカナダグループによ

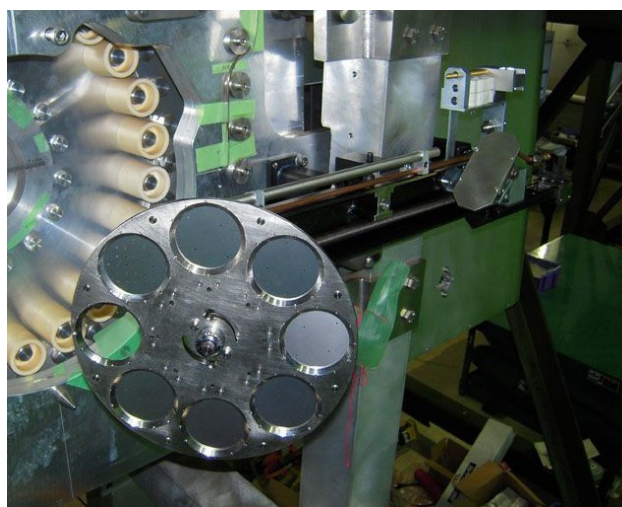


図 15 OTR 検出器

り設置され、ビームが標的の中心に正しく衝突しているかをモニターする。OTR 検出器の上流側には、図 16 に示す、パッフルと呼ばれるコリメータが置かれており、標的の中心からそれたビームを吸収し、電磁ホーンを保護する役割を担っている。パッフルは、幅 0.3m、高さ 0.4m、長さ 1.7m のグラファイトブロックで、中心にビームが通る直径 30mm

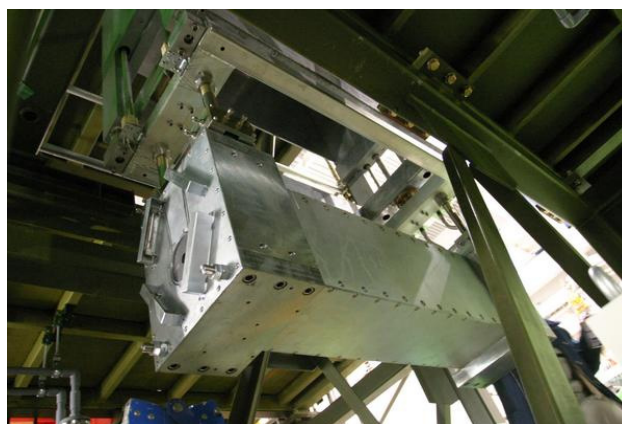


図 16 パッフル(コリメータ)

の貫通穴が空いていて、中に埋め込まれた冷却水配管で水冷されている。2008年英国RAL研究所で製造され、2009年1月にヘリウム容器の中に設置された。

2.2 電磁ホーン

標的で発生した π 中間子をディケイボリュームの方向に収束させるため、第一、第二、第三の3台の電磁ホーンが、ターゲットステーションに置かれたヘリウム容器の中に設置されている。電磁ホーンは、アルミ製の二重円筒のトロイダル磁石で、320kAのパルス電流(パルス幅は数ms)を内筒から外筒に流して、最大2テスラ程度の円周方向の磁場を発生させ、標的で発生した π 中間子をビーム軸方向に収束させる。その大きさは、たとえば第一電磁ホーンでは、内筒外径54mm、外筒外径380mm、長さ1495mmである。図17に第一電磁ホーン本体を下流側から見た写真を示す。



図17 第一電磁ホーン本体

パルス電流によるジュール熱およびビームによる熱を吸収するため、外筒内面から内筒に向けて、水をスプレーすることで冷却を行う。図18に示すように、電磁ホーンは鋼製の支持箱の下部にぶら下がるように固定されており、その支持箱の上端が、後述する鋼製ヘリウム容器の中段部で支えられている。電磁ホーンも高度に放射化するため、破損した場合は、遠隔操作で支持箱と分離できるように工夫されている。ヘリウム容器に電磁ホーンを設置した後、支持箱内部に、2.2m厚の鉄遮蔽体と1.0m厚のコンクリート遮蔽体(図19)を設置するが、それらは電磁ホーンと独立にヘリウム容器中段部で支持されている。電磁ホーンは、第一ホーンが2008年3月に日本で、第二ホーンが2008年7月にアメリカで、第三ホーンが2007年3月に日本で完成し、2008年夏にターゲットステーション1階の調整架台の上で支持箱と合体された。第一ホーンは、標的を内部に設置した後、2009年1月にヘリウム容器内部に設置され、4月からのファーストビームによる調整運転が行われた。また第二ホーンと第三ホーンは2009年6月と8月にヘリウム容器に設置された。



図18 第一電磁ホーンと支持箱

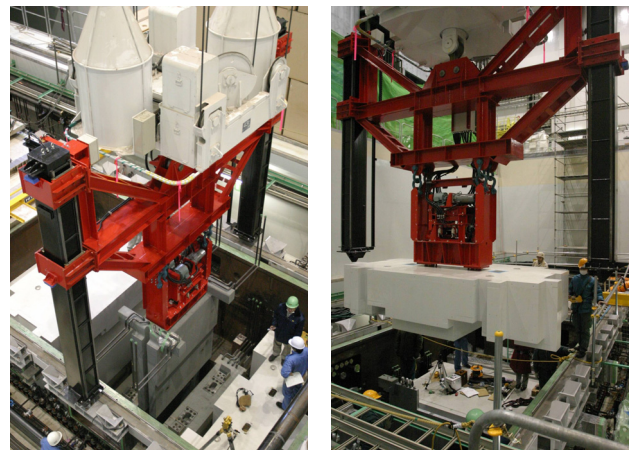


図19 内部鉄遮蔽体(左)と内部コンクリート遮蔽体(右)

2.3 ターゲットステーション

標的や3台の電磁ホーンは、ターゲットステーション棟に設置されたヘリウム容器の中に設置されている。ヘリウム容器は、幅4m、高さ11m、長さ15mの巨大な鋼製容器(壁厚10cm)で、後述するディケイボリュームと一体で1500m³の体積を持ち、トリチウムやNO_xの発生を抑えるため、1気圧・常温のヘリウムガスが充填される。ヘリウムガスの純度を保つために、真空が保持できる構造になっており、50Pa程度まで真空に引くことができる。その中段部で電磁ホーン支持箱上部を支持しているが、ビームによる容器の熱変形を最小限に抑えるため、容器側部や底部には、プレートコイルと呼ばれる水冷用チャンネルが溶接されており、壁面は30°Cの水で冷却されている。図20に建設中のヘリウ

ム容器の写真を，図 21 に真空試験中のヘリウム容器の写真を，図 22 にヘリウム容器のビーム入り口部分に設置されたチタン合金製のビーム窓の写真を示す。標的で発生する放射線を吸収するために，ヘリウム容器の内外に膨大な量の鉄とコンクリートの遮蔽体が設置されている。内部の遮蔽体は図 19 に示すように，ホーンなどのメンテナンス時に遠隔操作で取り外しができるようになっている。ヘリウム容器外部の側部には2m厚，底部には0.4m厚の鉄遮蔽体が設置され，空冷されている。ヘリウム容器上部の外側には，図 23 に示すように，厚さ1.5mのコンクリート遮蔽体が三層積み重ねられている。ターゲットステーション棟には，40トンの天井クレーンが装備されている。放射化物の移動



図 20 建設中のヘリウム容器



図 21 真空試験中のヘリウム容器



図 22 ビーム窓



図 23 上部コンクリート遮蔽体と第三ホーン

に備えて，モーターは二重システムになっており，また数値入力で遠隔操作できるようになっている。ターゲットステーションのヘリウム容器南側の地下機械室には，ヘリウム容器や標的，ビーム窓用のヘリウムコンプレッサーや，電磁ホーンやヘリウム容器，ディケイボリューム用の冷却水装置が収納されている。また，ヘリウム容器北側には，故障したホーンなどを収納しておく放射化物保管庫があり，その上流部は，放射化したホーンと支持箱を分離したり，

標的をマニピュレータを使って引き抜いたりするメンテナンスエリアになっている。地上部の南側には、新規の電磁ホーン本体と支持箱を結合させるためのホーン調整架台が設置され、ホーンの試運転なども行われる。ターゲットステーションは、建物の土木工事が2006年9月より始まったが、地下部の掘削後、地下水が止まらない、という困難に直面した。熊谷組JVと施設部その他の皆さんの奮闘により、何とか地下水を抑え込み、2007年7月には地下部を完成することができた。ヘリウム容器の現地設置工事は、建物地上部の建設前の2007年7月から始まった。2007年8月、それぞれ大分と岡山の工場で製造されたヘリウム容器の下部と上部は、船で常陸那珂港へ輸送され、そこから巨大な特殊車両を使ってターゲットステーションへ搬入されたが、その様子は、当日のNHK茨城のニュースで放映された。そして2007年11月の真空試験を無事終えて、容器として完成した。建物完成後の2008年7月より、ヘリウム容器内部の機器や遮蔽体の設置工事が始まったが、工期が逼迫したため、一機しかないクレーンをいくつもの会社で使用しなければならず、その調整は困難を極めた。ファーストビーム直前の2009年2月の真空試験では、真空が思ったように引けずに難航したが、ディケイボリュームとビームダンプの接続部分でのリークをようやく突き止め、何とか容器として完成させることができた。冷却水の試運転が3月末に終了し、二次ビームラインとして、ぎりぎり4月のファーストビームに間に合わせることができた。2009年夏には、未設置であった第二ホーンと第三ホーンの設置を行い、秋からの本格的ビーム運転の準備を行っている。

2.4 ディケイボリューム

ディケイボリュームは、長さ約110mの、上流端部で幅1.4m×高さ1.7m、終端部で幅3.0m×高さ5.0mの断面を持つ鋼製トンネル(鉄板厚さ16mm)で、標的で発生した π 中間子が入射中に、ミュー粒子とニュートリノに崩壊する。上流側はターゲットステーションのヘリウム容器と接続され、1気圧常温のヘリウムガスが充填される。下流端部の内部には、後述するビームダンプが設置されている。鋼製トンネルの周囲は、6m厚の鉄筋コンクリート製の躯体で囲まれており、放射線を遮蔽して、周りの地下水の放射化を防いでいる。鉄板の内面には、ビーム方向に、40本のプレートコイルと呼ばれる冷却水用チャンネルが溶接されており、コンクリートのビームによる温度上昇を100°C程度に抑える役割を担っている。冷却水は、上流三分の二はターゲットステーション機械室から、下流三分の一は、下流にある第三設備棟機械室から供給される。図24に建設中の鋼製トンネルの写真を、図25にトンネル内部の写真を示す。ディケイボリューム中流部は、その上部に物質生命実験施設へのビームラインが建設されることから、

ニュートリノ実験施設で最初となる2004年春に土木工事が着工された。2005年1月より鋼製トンネルの設置を開始し、2005年秋いったん容器として完成したが、最初の真空試験でリークがあることが判明し、端部の蓋に人が入れる穴を開けて、内部をチェックしたところ、溶接不良箇所があることが判明し、修理を行った、という一幕もあった。2005年12月には何とか無事真空試験を終了した。ちなみにこの中流部は、建設期間や保管期間が長かったため、地下水の汲みあげポンプが故障や停電で停止して、トンネル内部が水没する、という事態にも3回ほど遭遇している。上流部は、ターゲットステーションと同時に建設され、2007年秋に完成した。下流部は、ビームダンプと同時に建設され、2009年3月に完成した。



図24 建設中のディケイボリューム鋼製トンネル

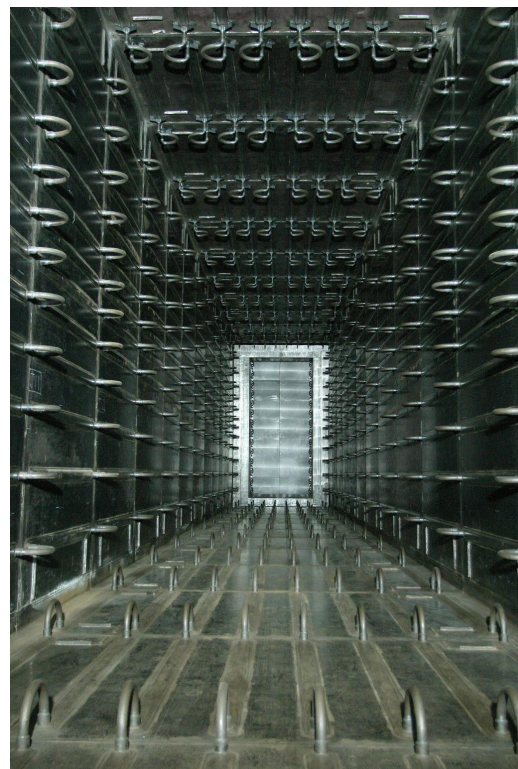


図25 ディケイボリューム内部とビームダンプ

2.5 ビームダンプ

ビームダンプは、ディケイボリウム終端部に位置し、標的に反応しなかった約20%の陽子、ディケイボリウムで崩壊しなかった π 中間子、低運動量のミュオン粒子などを吸収する。まず、図26に写真を示す、幅1.9m、高さ4.7m、長さ3.2m、重さ75トンのグラファイトコアが上流側に置かれる。グラファイトコアは、ビーム方向に7個、水平方向に2個、高さ方向に7個の、計98個のグラファイトブロックを積み重ねて組み立てられている。コアの両端部には、14個のアルミ製の冷却モジュールがボルト結合されており、アルミ中に鑄込まれた鋼管に水を流すことで、グラファイトブロックを両側面から冷却する。それでも750kWビーム運転時、グラファイトコア中心部の温度は150°Cに達する。



図26 ビームダンプのグラファイトコア

グラファイトコアの下流で、ヘリウム容器内部の終端部には、水冷式の厚さ0.5mの鉄遮蔽体が置かれている。さらに下流のヘリウム容器外部には、厚さ2mの空冷式鉄遮蔽体が置かれ、その下流には、厚さ1mのコンクリート躯体が設置されている。その下流に後述するミュオンモニターが設置され、その下流は厚さ3mの鉄筋コンクリート躯体で終わっている。それより下流に貫通するのはニュートリノのみである。ビームダンプ部は、土木工事は2007年6月に始まり、2008年7月に終了し、ヘリウム容器設置工事が始まった。また2007年にグラファイトコアの製造を始めたが、当初、アルミ冷却モジュールに鉄の水冷管を鑄込んだ際に、冷えた後で冷却モジュールが反ってしまう、という事態に遭遇した。数回のR&Dでその反りを克服する方法を見つけ、2007年11月よりJ-PARCのLINAC棟側室でグ

ラファイトコアの組み立てを開始した。2008年10月、完成したグラファイトコアを特殊車両で輸送し、ビームダンプ部ヘリウム容器内部に設置した。その後、ヘリウム容器上部が2009年2月に完成し、その上部に6m厚のコンクリート躯体を建設し、2009年3月にビームダンプとして完成した。

2.6 ミュオンモニター

ミュオンモニターは、ビームダンプ下流の1mのコンクリート躯体の下流のミュオンピットに置かれ、貫通してくる高運動量のミュオン粒子のプロファイルを観測することで、間接的にニュートリノビームの中心を観測する。図27に示すように、上流側(写真右側)にシリコン検出器、下流側(写真左側)にイオンチェンバーが置かれており、それぞれ水平方向に7個ずつ、垂直方向に7個ずつの合計49個のアレイになっており、ミュオン粒子のプロファイルを計測する。ミュオンモニターは、2007年に検出器の製造を開始し、ミュオンピットの土木工事とビームダンプの冷却水配管工事が終了した2009年2月にミュオンピットに設置され、4月よりのファーストビームにおけるミュオン粒子のプロファイルの観測に成功した。



図27 ミュオンモニター

3. さいごに

ニュートリノ実験施設に設置する機器の設計、製作、設置にあたっては、施設部をはじめハドロン実験施設、加速器グループなど色々な方々にご支援ご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。