

■ 研究紹介

リモートメンテナンスシステムを用いた J-PARC ニュートリノビームライン電磁ホーンの交換

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

多田 将

shotada@post.kek.jp

2014年8月11日

1 はじめに

J-PARC のニュートリノビームラインは、T2K ニュートリノ振動実験に於いて、2010年1月から2013年5月までの間に 6.7×10^{20} POT (protons on target) に相当するビームを供給し、同実験が 7.3σ の有意性で電子ニュートリノの出現を発見するにあたり [1]、中心的役割を果たした。

そのニュートリノビームラインに於いて、ニュートリノ生成の心臓部とも言えるのが、ターゲット並びに電磁ホーンであり、上記の実験期間中に、電磁ホーンは、実に 1.2×10^7 パルスものパルス電流の運転に耐え、その大役を果たした。

2013年秋から2014年春にかけて、実験の次なるステップに備え、このターゲットと電磁ホーンを、新型の2号機へと交換する作業が行われた。1世代前のK2K実験に比べ、使用するビーム強度が段違いであるため、ターゲットや電磁ホーンは残留放射線量が 100mSv/h を超え、近づくことすら不可能であるために、その交換に当たっては、専用のリモートメンテナンスシステムを駆使する必要があった。

本稿は、そのリモートメンテナンスシステムと、それを用いた実際の交換作業について記すものである。

2 装置の構成

2.1 ニュートリノビームラインの構成

J-PARC ニュートリノビームラインのうち、ニュートリノを生成する2次ビームラインを構成する主たる機器は、ディケイボリュームと一体型になった気密容器（ヘリウム容器）中に収められ、ヘリウム雰囲気下でビームを受けることとなる [2]。

ヘリウム容器は、全長 116 m 、容積 $1,540\text{ m}^3$ にも達する巨大な気密容器で、ビームラインの建屋躯体に埋め込まれており、その最上流部のみ、メンテナンス期間中には開口することができるようになっている。この部分にターゲットと電磁ホーンが収納されている。この部分の躯体はターゲットステーションと呼ばれる建屋となっており、ターゲットや電磁ホーンといったヘリウム容器内機器の運転とメイ

ンテナンスを行うための施設であり、本稿で取り扱うリモートメンテナンスの舞台である。

図1に、ターゲットステーションの平面図を示す。ヘリウム容器の最上流部は、ターゲットステーションの中央部の地下に埋め込まれており、ビーム運転中はその上方、地上部との間に、コンクリート遮蔽体を積み重ねることで、放射線を遮蔽している。

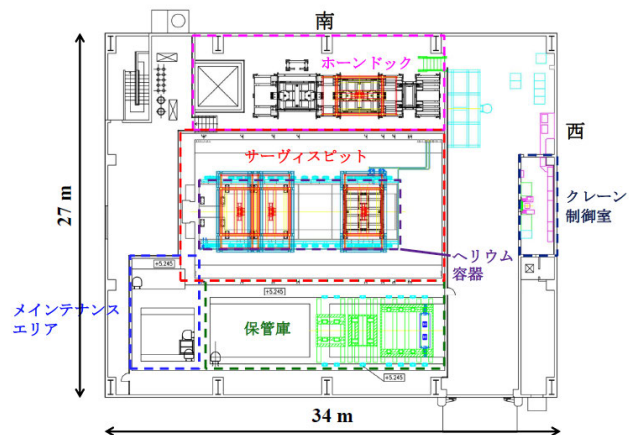


図1 ターゲットステーション平面図

ヘリウム容器が埋め込まれているエリアをサービスピットと呼ぶ。サービスピットの両側の地下エリアは遮蔽も兼ねたコンクリート壁によって仕切られており、南側のエリアには、電磁ホーンの冷却水循環システムやターゲットとヘリウム容器のヘリウムガス循環システム等が設置されている機械室がある。機械室の直上、地上階には、新品の電磁ホーンを組み立て、調整し、通電試験を行うためのエリア（ホーン調整エリア）がある。北側のエリアには、使用済みのターゲット並びに電磁ホーンを保管する保管庫と、後述する電磁ホーンの分離を行うメンテナンスエリアとがある。使用済みのターゲットと電磁ホーンを取り出し、分離し、キャスクに収納した上で保管し、新品のターゲットと電磁ホーンをビームライン上に設置する、一連の作業は、全てこのターゲットステーション内で行われる。

ヘリウム容器が気密容器であることと、その側部の放射線遮蔽を厳重に行っていること、加えてターゲットステー

ションの敷地面積が極めて小さいことから、機器のメンテナンスは全て上方からアクセスして実施される。放射化等で取り扱いが困難な重量機器は、リニアガイド等を用いて横方向に取り出すのが、その位置精度の観点からも安全性からも望ましいが、ターゲットステーションに於いては、それが不可能であったために、クレーンを用いて上方からアクセスする方法を取っている。クレーンは構造的に荷揺れを生じるものであり、それ故、この方法に於いても必要な位置精度を確保するため、これから述べる特別なリモートメンテナンスシステムを開発するに至った。

2.2 ニュートリノ生成装置

ターゲットと電磁ホーン、並びにその周辺機器を、まとめてニュートリノ生成装置と呼ぶ[3]。ニュートリノ生成装置は、ビームを直接受けるため、運転中の荷重も大きく、数年単位で交換を必要とする。

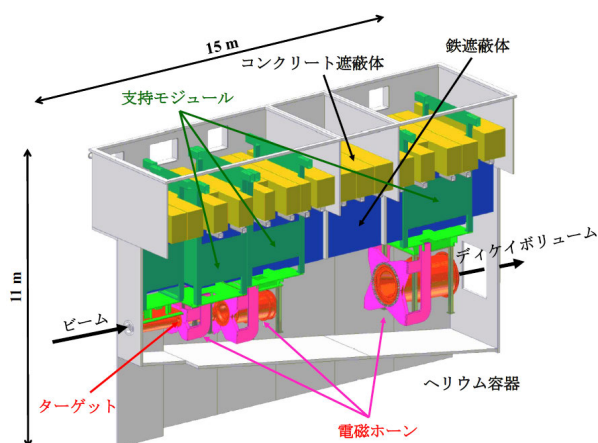


図2 ヘリウム容器中のニュートリノ生成装置の配置図

図2に、ヘリウム容器最上流部に収納された状態のニュートリノ生成装置の鳥瞰図を示す。電磁ホーンは3台直列に並べられており、それぞれ上流部より第1～第3電磁ホーンと呼ぶ。ターゲット並びに電磁ホーンから生ずる放射線を遮蔽するため、その直上には、鉄遮蔽体とコンクリート遮蔽体が設置されている。

2.2.1 ターゲット

ターゲットは、直径 26 mm、長さ 900 mm のグラファイト製の円柱である[3]。運転中の冷却用ヘリウムガスの流路を兼ねたケースに収納されており、組立後はこのケースと一体で取り扱われ、ケースごと第1電磁ホーンに固定されている。交換の際には、まず第1電磁ホーンごとヘリウム容器から取り出し、メンテナンスエリアに移動させた後、ターゲット交換装置と呼ばれる専用の装置を用いてケースごと電磁ホーンから取り外し、新品を取り付ける。また、第1電磁ホーンごと交換する場合もあり、本稿にて取り扱うのは、後者のケースである。

2.2.2 電磁ホーン

電磁ホーンは、トロイダル型の電磁石であり、アルミニウム製の二重円筒の本体に 250 ~ 320 kA の電流をパルス状に流すことにより、 π 中間子の収束を行う[3]。このパルス電流によるローレンツ力により、電磁ホーンには非常に大きなストレスがかかり、これが電磁ホーンの寿命を決めている。設計寿命は、 10^8 パルスである。電磁ホーン本体には、冷却水配管と、このパルス電流を流すためのバスバーとが接続されており、使用済みの電磁ホーンを保管する際には、これらの接続を外す必要がある。

2.2.3 支持モジュール

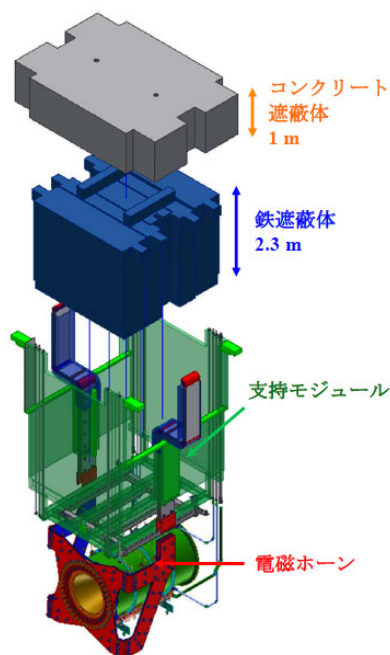


図3 電磁ホーン、支持モジュール、遮蔽体

電磁ホーンは、その交換時の取り扱いを考慮し、支持モジュールという鋼製の筐体に懸架される形で設置されている。図3に、第3電磁ホーンと支持モジュールの鳥瞰図を示す。支持モジュールが箱状になっているのは、その内部(従って電磁ホーンの直上)に、前述の鉄遮蔽体とコンクリート遮蔽体を嵌め合わせる形となっているためである。

支持モジュールの側壁には、前述のバスバーと冷却水配管が通っており、上下端部でそれぞれ継手箇所があるが、上端部は直接手作業にて着脱が行える一方、下端部、即ち電磁ホーン本体との継手箇所に於いては、作業者の被曝を抑えるため、上端部から長いシャフトを用いて着脱を行うこととなる。そのための専用の着脱装置が、支持モジュール下端部には取り付けられている。図4に着脱装置を示す。また、電磁ホーンの荷重を受けている4本のシャフトも、同様に上端からの操作にて着脱できる。

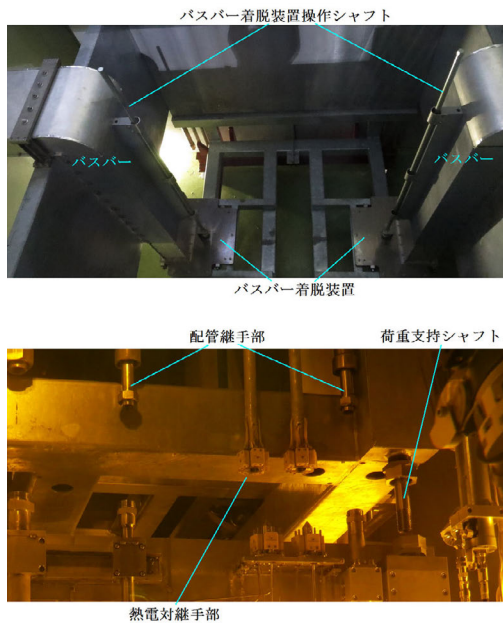


図4 支持モジュールの継手部

支持モジュールの上端部にはアームと呼ばれる箇所が4つあり、このアームの下面をヘリウム容器側の受座に接することで荷重を支える。また、アームの上面には、後述する電磁ホーン吊具に対応した、ツイストロックピン穴ブロックをボルト固定できるようになっており、電磁ホーン交換の際には、このブロックを介して支持モジュールをハンドリングする。

また、電磁ホーン交換の際には、後述するように支持モジュールが水平であることが極めて重要であるが、電磁ホーン本体も支持モジュールもビームライン前後方向に荷重対称ではないため、カウンターウェイトを取り付けることで傾きを調整することが可能になっている。

支持モジュールは、全長 2.15 m (第1) ~ 3.00 m (第3)、全幅 3.66 m であり、電磁ホーンを懸架した状態では、最大 (第3電磁ホーン時) で、全高 7.18 m、重量 18 t にもなる。

2.2.4 遮蔽体

前述のように、電磁ホーンの直上には、支持モジュール内に入れ子になるように遮蔽体が設置されている (図 3)。電磁ホーンと支持モジュールを取り出す際には、この遮蔽体を先に取り出す必要があるが、取り出した瞬間より上方に漏れる電磁ホーンからの残留放射線が急増するため、遮蔽体の移動にも、リモートハンドリングが必要とされる。このため、遮蔽体の上面には、後述の遮蔽体吊具に対応した、ツイストロックピン穴が設けられており、これを介してハンドリングする。鉄遮蔽体は 20 体あり、最大 34 t、コンクリート遮蔽体は 10 体あり、最大 20 t である。1つの電磁ホーンあたり、その直上にあり取り出す必要があるのは、コンクリート遮蔽体 1 体、鉄遮蔽体 3 体 (第1、第2電磁ホーン) 若しくは 5 体 (第3) である。

また、ビーム停止時には、これらの遮蔽体、若しくはコンクリート遮蔽体のみでも、定位置に設置してあれば、電磁ホーンからの残留放射線による被曝を十分に抑えた状態での人力作業が可能である。このため、上述のような、支持モジュールの配管並びにバスバーの着脱作業は、作業者がこのコンクリート遮蔽体上から行うこととなる。

2.3 リモートメンテナンス機器

電磁ホーン交換の際に用いるリモートメンテナンスシステムは、以下の機器から構成されている。

2.3.1 天井クレーン

ターゲットステーション内には天井クレーンが備え付けであり、重量物のリモートハンドリングは、このクレーンに下記の各種吊具を取り付けて行う。天井クレーンの仕様を表 1 に示す。精密機器を取り扱うため、速度を低く抑えている。

表1 天井クレーンの仕様

定格荷重	43 t
吊り上げ荷重	50 t
揚程	28 m
スパン	24.1 m
走行速度	10 mm/s ~ 200 mm/s
横行速度	10 mm/s ~ 200 mm/s
巻上速度	5 mm/s ~ 50 mm/s
旋回速度	0.06 deg./s ~ 0.6 deg./s
速度制御方式	手動切替 3 段 + インバーター制御
操作方式	有線遠隔操作 or 無線コントローラー操作

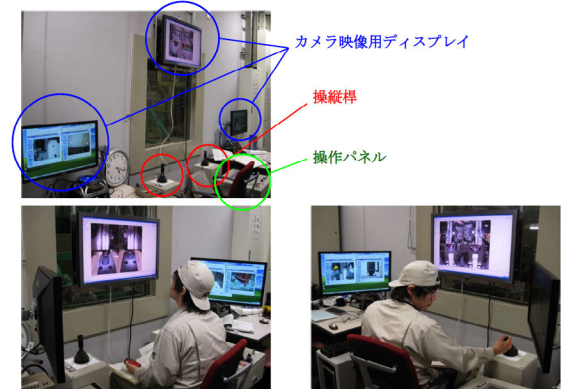


図5 クレーン制御室内の様子

この天井クレーンの特徴のひとつは、数値による位置制御が可能という点で、クレーンのあるホールから放射線的に遮蔽された制御室から、数値で表示される座標に合わせて動かすことができる。図 5 は、制御室の様子で、クレーン運転士はこの部屋から、操縦桿と操作パネルを用いて、クレーンの全操作が可能である。操作パネルには、走行・横行・巻上・旋回の現在座標、荷重、各種リミットの状態 (上限等) や、クレーンに取り付けた吊具の状態も監視することができる。手動運転モードでは、これらの数値を見ながら、運転士が操縦桿を操作して所定の座標までクレーン

を移動させる。自動運転モードでは、操作パネルに任意の座標を入力すると、クレーンが自動でそこまで移動する。また、リモートハンドリングでなく通常の荷役作業でも使用可能で、その際には、携帯式無線操縦桿をホールまで持ち出して操作を行う。

二つ目の特徴は、操作中に故障で停まってしまうよう、走行・横行・巻上・旋回の全ての動作について、電動機系を二重化してあるという点である。その系統の切り替えは、制御室内で行うことが可能である。ターゲットステーションが完成して以来、一度だけ、巻上電動機が故障したことがある（リモートハンドリング中ではなく、通常の荷役作業中）。その際は、電動機系を切り替えることで吊荷を安全に着地させることができた。

三つ目の特徴は、制御盤が制御室内に設置してある点である。天井クレーンでは、動力配線の短縮のため、制御盤はガーダー上にあるのが通例である。が、ターゲットステーションでは、放射線に弱い電子機器が誤作動を起こすことを防ぐため、制御盤を制御室内に収め、長い動力配線をホールまで延ばしてある。電子機器の方が一故障や誤作動の際にも、遮蔽された制御室内にて、その対処を行うことが可能である。

2.3.2 電磁ホーン吊具

電磁ホーンを支持モジュールごとハンドリングする際には、天井クレーンのフック部に電磁ホーン吊具を取り付けてこれを行う。図6に電磁ホーン吊具を示す。電磁ホーン吊具には、ツイストロックピンと呼ばれる電動の吊上金具が四隅に取り付けられており、相手方の支持モジュールのアーム上面に取り付けられたツイストロックピン穴ブロックに嵌め合った後、90度回転することで、つかむ（ロック）／離す（アンロック）の動作を行う。このツイストロックシステムは、海上コンテナのハンドリングで一般的に用いられている手法で、電磁ホーン吊具のツイストロックピンはJIS規格に準拠している。電磁ホーン吊具の定格荷重は20tである。

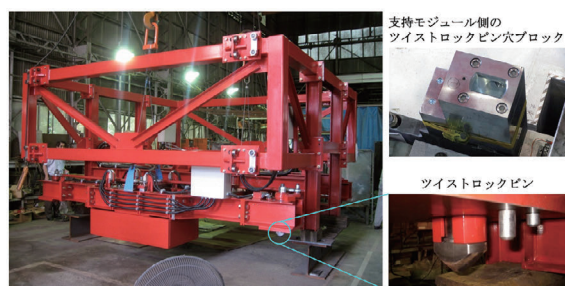


図6 電磁ホーン吊具

このツイストロックを動かす電動機も二重化されており、制御室内で切り替えることが可能である。電動機の制御用電子機器が制御室内にあることも、天井クレーンと同様で

ある。ツイストロックのロック／アンロックは、インターロックシステムにより、吊具に荷重がかかっている場合や、支持モジュールに着床していない場合には、回転ができないようになっている。また、四隅のうちの一部にしか荷重がかかっていない場合には、クレーンの上下動作ができないようになっている。

また、本吊具は天井クレーン本体よりも巨大な上、旋回もするため、不用意な位置で旋回を行うと、他の機器に衝突する恐れもある。そのため、予めプログラミングされた特定の位置では旋回や巻上の動作ができないようなインターロックも組み込まれている。インターロック信号や、ツイストロックの電動機の動力、更に後述する各種モニター機器（カメラ、傾斜計等）の動力等は、クレーンのフックブロックと配線を接続することで供給される。

2.3.3 ガイドセル

天井クレーンの位置制御はmm単位で行っているが、電源の入切による再現性や長時間の動作によるずれなど、最大1cm程度ずれることを経験的に確認している。キャリブレーションモードによる較正機能もあるが、吊荷を吊ったままの状態では（即ちリモートメンテナンス中には）この較正は危険であるため、この程度のずれは覚悟する必要がある。また、水平位置はあくまでクラブトローリの位置であり、フックブロック自体は振り子のようにになっているため、巻上位置が下がるほど、揺れによる位置の変化は大きい。

そこで、ヘリウム容器やメンテナンスエリアへ電磁ホーンを設置する際、ガイドセルと呼ぶ鉛直方向のレールを有した構造物をヘリウム容器とメンテナンスエリアに固定し、このレールに、電磁ホーン吊具の四隅に取り付けられたガイドローラーと噛み合わせることで、mmの位置精度を出している。図7は、ヘリウム容器に固定したガイドセルに、電磁ホーン吊具が噛み合っているところである。ガイドセルのレール全高は、ヘリウム容器用で6.5m、メンテナンスエリア用で4.1mである。

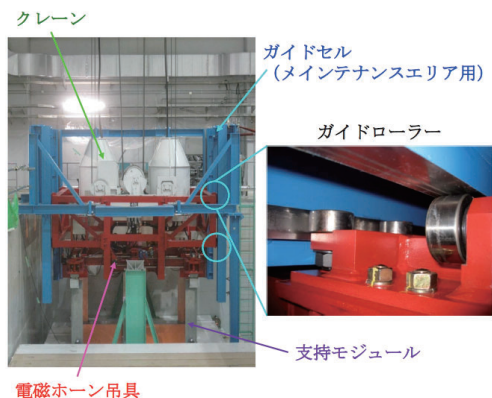


図7 ガイドローラーと嵌め合った状態の電磁ホーン吊具

¹ 天井クレーンに於いて、巻上装置を搭載し、フックブロック並びに吊荷を吊り上げる台車。吊荷位置はこの真下になる。

支持モジュールに接続された電磁ホーンは、鉛直方向に非常に長い形をしているため、少しの傾きが下端では大きな位置のずれとなる。このため、吊具の多少の水平位置のずれよりも、傾きのほうがより厳しい。そして、クレーンの構造上、吊荷の傾きや揺れは避けられない。この傾きを抑制することも、ガイドセルの重要な役割である。電磁ホーン吊具のガイドローラーの鉛直方向の取り付けピッチは1 m であり、ガイドローラーとガイドセルの間隔は片幅 1 mm である。最も長い第3電磁ホーンで、電磁ホーン吊具上端から電磁ホーン下端まで7 m であるため、何等かの原因により大きく傾いてしまった場合に於いても、傾きによる上下端の位置のずれは、ガイドセルにより10 mm 程度に抑えられる。各種機器の隙間、電磁ホーン/支持モジュールとヘリウム容器の間、電磁ホーン/支持モジュールと遮蔽体の間、隣接する支持モジュール間は、全て30 mm で設計されているため、最大この程度のずれが生じて、リモートハンドリングによる設置には問題ない（リモート設置後、遮蔽体まで置いた後に、その上から電磁ホーン的位置をビームラインに合わせて微調するので、リモート設置では、機器を衝突させさせなければよい）。

2.3.4 遮蔽体吊具

前述のように、電磁ホーン交換の際には、遮蔽体もリモートハンドリングの対象となる。遮蔽体をリモートハンドリングする際には、電磁ホーン吊具の代わりに、天井クレーンのフック部に遮蔽体吊具を取り付ける（図8）。

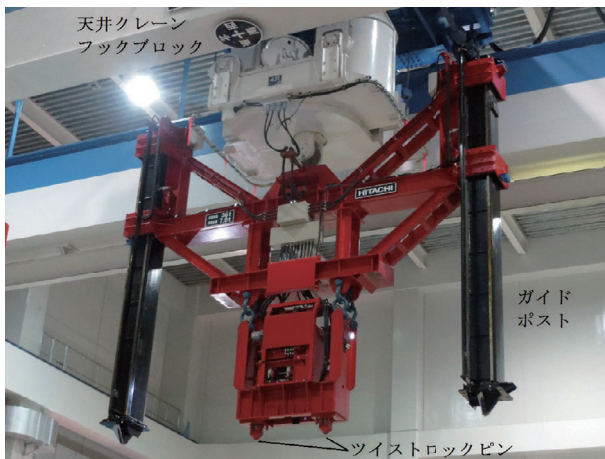


図8 遮蔽体吊具

遮蔽体吊具も、電磁ホーン吊具と同様、ハンドリングするためのツイストロックシステムと、位置精度を出すガイドを備えているが、ガイドはガイドセルのように別体式になっているのではなく、吊具本体と一体になったガイドポストと呼ぶ機構によって行う。このガイドポストの先端をヘリウム容器に取り付けられた受座に嵌め合わせた後、クレーンを上下させることで、ガイドポストに沿って吊具と遮蔽体が鉛直に上下動する。また、ツイストロックは、二

箇所にて最大34 tの鉄遮蔽体を吊り上げるため、電磁ホーン吊具（JIS規格）のものより大型のものを使用している。

ツイストロックの電動機の二重化、ロック/アンロックのインターロック、回転並びに巻上位置のインターロックも、電磁ホーン吊具と同様に組み込まれている。

2.3.5 リフトテーブル

電磁ホーンは支持モジュールに懸架され、支持モジュールのアーム部で荷重を受ける構造のため、これを分離する際には、下から電磁ホーンの荷重を受ける必要がある。使用済みの電磁ホーンを支持モジュールと分離する作業はメンテナンスエリアにて行われるため、メンテナンスエリアにこのための装置、リフトテーブルが設置されている。

メンテナンスエリアは、機器の置かれる機器室（単純にメンテナンスルームと呼んだときはここを指す）と、そこと1 m厚のコンクリートと鉛ガラスの壁で仕切られた制御室とに分かれ、機器室側にリフトテーブル本体を、制御室側に制御盤を設置し、制御室から、鉛ガラス越しの目視と機器室に多数設置されたカメラからの映像を監視しながら、リフトテーブルを操作する。また、このリフトテーブルは、後述するように、電磁ホーンをキャスクに収納する際にも使用する。リフトテーブルを上下させるアームは3基であり、それぞれのリフト量を個別に換えることで、リフトテーブル面の傾きも微調できる。

2.3.6 電磁ホーン用キャスク

電磁ホーンは、支持モジュールから分離された後、キャスクに収納され、保管庫内にて保管する。キャスクは鋼製の筐体であるが、天板と下部筐体とに分かれ、電磁ホーンは天板に懸架された状態でキャスク内に収納される。そのため、天板は電磁ホーンのハンドリング装置も兼ねている。天板下面に電磁ホーンを懸架するためのフックが4本取り付けられており、このフックを上面から操作して前後にスライドさせることで電磁ホーンの上面に設けられた懸架用バーを引っ掛け、懸架する。電磁ホーン2号機以降は、上面にツイストロックピン穴ブロックが取り付けられているため、キャスク2号機以降はフックがツイストロックピンに置き換えられる。また、天板と下部筐体とを結合させるのにも4組のツイストロックが用いられ、同様に天板上面から操作する。これらのフック及びツイストロックは手動式であり、天板上面から人間が直接操作するため、天板は遮蔽のために150 mmもの厚さがあり、更に必要に応じて25 mm厚の鋼板を6枚（天板本体と合わせ300 mm）重ねることが可能である。

2.3.7 荷重計と傾斜計

リモートメンテナンス中、正常に進行しているか、電磁ホーン等の装置に無理な力がかかっていないか、等を常時監視している必要がある。前述のように各種インターロ

クシステムは存在しているが、インターロックが作動するより前に異常を察知するのが、荷重計である。クレーンの荷重計は0.1 t単位で表示されており、クレーンは非常に低速度であるから加速度による変化もほとんどなく、ガイドレールとガイドローラーとの摩擦も小さいため、この単位の変化を常時監視することで、装置・機器間の引っ掛かりや干渉を知ることができる。荷重変化が起こった場合には、直ちに操作を停止し、元に戻らない場合には少しだけ逆動作を行い（クレーンを下げていた場合は上げる）、その変化を見ながら状況を判断する。

また、前述のように、支持モジュールと電磁ホーンが水平な状態で上下することがこの交換の鍵であるため、交換の際には支持モジュール頂部に無線式の2軸傾斜計を取り付け、その値も常時監視し、大きく変化した場合には、動作を停止する。傾斜計の分解能は0.001度で、支持モジュールに結合された電磁ホーンの全高7 mで、上下端の水平位置の差0.06 mmに相当する。

前述のリフトテーブルの上にも、荷重計が設置されている。電磁ホーン分離の際、リフトテーブルの上げ過ぎにより、リフトテーブルと支持モジュールとで電磁ホーンを押し潰す形で不要な荷重がかかるのを防ぐためである。電磁ホーンには4本の脚があり、支持モジュールから懸架されていない場合にはこの脚で荷重を受けるが、リフトテーブル上面の、この脚の直下に4台の荷重計を設置し、それぞれの値を監視することで、リフトテーブルと電磁ホーンの接触の瞬間や、過剰な荷重がかかっていないか、荷重が偏っていないか、等を監視し、適宜リフトテーブルの高さと傾きを調整する。電磁ホーンの重量は1,500～2,500 kgで、荷重計の分解能は0.1 kgである。

2.3.8 カメラ

以上の各種センサーとインターロックシステムに加えて、リモートメンテナンス中最も重要な役割を果たすのが、各部を監視するカメラである。電磁ホーン交換の際には、各種吊具やクレーンに取り付けられた無線式のカメラ16台と、ヘリウム容器やメンテナンスエリアや保管庫等に設置し機器が干渉し易い場所を監視する40台以上のカメラとで、問題がないことを監視しながら作業を行う。これらのカメラの映像は、クレーン制御室とメンテナンスエリアの制御室のディスプレイ上に表示されるが、クレーンやリフトテーブルの運転士以外に、専任でカメラ映像を監視し、運転士や作業リーダーに警告する者がその作業に就く。

3 電磁ホーン交換

3.1 交換手順

典型的な電磁ホーン交換の手順を必要な日数と共に記す。尚、本稿では、支持モジュールも新品に交換する場合を説明する。

3.1.1 サービスピット側の準備

交換する電磁ホーンの直上のコンクリート遮蔽体を移動させ、サービスピットを開口する。ヘリウム容器を真空引きし、空気を入れてから、電磁ホーン直上の蓋を開ける。ヘリウム容器内で、支持モジュール上端より先のバスバー並びに冷却水配管（鉄遮蔽体の冷却水配管も含む）を撤去する。ここまででビーム運転停止から最低2ヵ月はかかる。

ヘリウム容器にガイドセルを固定する。支持モジュールの位置を中心に測量を行って位置の微調を行うが、ここで最も重要となるのが、ガイドレールの鉛直度であり、倒れを1/1000以下に抑える。

支持モジュールヘカウンターウェイトを取り付ける。

3.1.2 メインテナンスエリア側の準備

ビーム運転時にはメンテナンスエリア上にもコンクリート遮蔽体が設置されているが、これを撤去する。機器室側に、メンテナンスエリアまで移動した電磁ホーンからの残留放射線を遮蔽するためのコンクリート遮蔽体を設置する。コンクリート遮蔽体の上に、支持モジュールの荷重を受ける支持ポストとガイドセルを設置する。当該作業に3週間ほど要する。

3.1.3 ホーン調整エリア側の準備

ホーンドック上で、新品の電磁ホーンを準備する。最終組立、調整、測量、通電試験まで行う。支持モジュールごと新品に交換する場合には、ここで支持モジュールと結合した上でこれらの作業を行うが、支持モジュールを再利用する場合には、新品の電磁ホーン単体でこれらの準備を行っておき、使用済みの支持モジュールと電磁ホーンをメンテナンスエリアまで運び、使用済み電磁ホーンのみを保管庫に保管した後、メンテナンスエリアにて新品電磁ホーンとの結合を行う。

3.1.4 リハーサル

電磁ホーン吊具を用い、空荷の状態と、新品の電磁ホーンを吊った状態とで、リハーサルを行い、各行程でのクレーンの座標を決定し、他機器や建屋設備との干渉や接近する箇所がないかを確認する。本番で方向転換や旋回する座標は、このリハーサルでの値を用いるが、ガイドに噛み合う瞬間の位置等、本番ではカメラ映像や各種センサーの値を見ながら、適宜微調を行う。また、カウンターウェイトによる傾き補正もこの時点で行う。1日から2日を要する。

3.1.5 第1日：遮蔽体の撤去

ここからリモートハンドリングとなる。人員の配置は、作業リーダー、運転士、座標値を読み上げるナビゲイター、荷重計並びに傾斜計の監視者、カメラの監視者数名、記録者である。

ヘリウム容器内のコンクリート遮蔽体と鉄遮蔽体をヘリウム容器から取り出し、コンクリート遮蔽体は地上の搬入エリアへ、鉄遮蔽体は保管庫へと仮置きする。鉄遮蔽体を撤去し終わった後には、翌日の作業のため、コンクリート遮蔽体をヘリウム容器へと戻す。1体あたりの移動時間は、空荷での移動時間も含めて、コンクリート遮蔽体で60分、鉄遮蔽体で80分かかる。第3電磁ホーンの場合は鉄遮蔽体が5体あるため、当該作業に2日間を要する。

3.1.6 第2日：カウンターバランスの最終確認

ヘリウム容器内にて、支持モジュールをごくわずかだけ持ち上げ、傾斜を確認する。ここで傾斜角が予定よりも異なる場合には、カウンターウェイトの再調整を行う。この作業は、コンクリート遮蔽体を戻しているために、作業者が現地にて直接行える。

3.1.7 第3日：使用済み電磁ホーンを取り出し

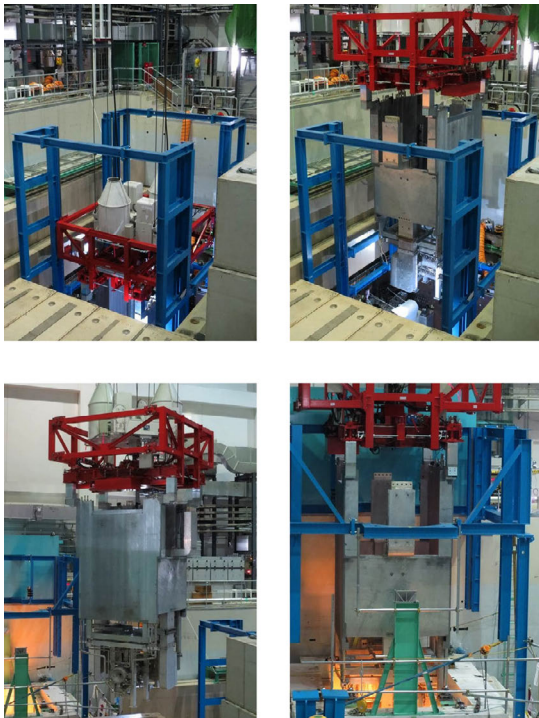


図9 使用済み電磁ホーンを取り出し

左上はヘリウム容器から支持モジュールごと使用済み電磁ホーンを取り出しているところで、右上は完全にヘリウム容器外に出したところ。左下は90度旋回しているところで、右下はメンテナンスエリアへと設置しているところ。

ヘリウム容器内のコンクリート遮蔽体を取り出し、吊具を交換した後、ヘリウム容器内の使用済み電磁ホーンを取り出し、メンテナンスエリアへ移動し、設置する(図9)。その後、吊具を交換し、ヘリウム容器とメンテナンスエ

リアの両方にそれぞれコンクリート遮蔽体を設置する。電磁ホーンの移動には吊具が空荷で移動する時間も含めて120～150分、コンクリート遮蔽体の移動にはそれぞれ60分、吊具交換には30分かかる。

3.1.8 第4日：支持モジュールとの分離

メンテナンスエリアにて、支持モジュールを分離する。これらの作業は、機器室が遮蔽体にて遮蔽されているために、支持モジュール上、制御室共に、作業者が立ち入って直接作業を行える。制御室より操作してリフトテーブルを上昇させ電磁ホーンの本体を下から支える。荷重計の変化に留意しながら、支持モジュール上の作業者が、着脱シャフトを操作して、配管とバスバーを分離し、その後、電磁ホーンと支持モジュールを分離する。制御室の作業者がリフトテーブルを降下させ、鉛ガラス越しに完全に分離されたことを確認する。

3.1.9 第5日：新品の電磁ホーンを設置



図10 電磁ホーンを設置

左上はホーンドックから電磁ホーンを取り出しているところ。ホーンドックでは水平方向に取り出す。残り3枚の画像は、ヘリウム容器に電磁ホーンを設置しているところ。電磁ホーン吊具をガイドセルに嵌め合わせた後は、各種モニターやカメラを監視しながら、鉛直方向に粛々と下ろすだけである。

ヘリウム容器内のコンクリート遮蔽体を取り出し、吊具を交換した後、ホーンドック上の新品の電磁ホーンと支持モジュールを持ち上げる。支持ポストを移動させ、ホーンドックから電磁ホーン/支持モジュールを引き出した後、ガイドセルに沿って、ヘリウム容器へと電磁ホーンを設置する(図10)。電磁ホーンの設定には吊具が空荷で移動す

る時間も含めて 120 分、コンクリート遮蔽体の移動と吊具交換の時間は前述と同様である。

3.1.10 第 6 日：遮蔽体の再設置

ヘリウム容器内の鉄遮蔽体とコンクリート遮蔽体を仮置き場からヘリウム容器へと戻し、再設置する。1 体あたりの移動時間は前述の通りで、第 3 電磁ホーンの場合に当該作業に 2 日間を要するのも同様である。

3.1.11 保管の準備

支持モジュール保管装置側の準備を行う。同時に、電磁ホーンをキャスクに収める準備も行う。キャスクは空の状態では保管庫東側に設置されているが、使用するキャスクの天板のみを外して地上に移動させておく。支持モジュール保管並びにキャスク収納のリハーサルもこのときに行う。機器の配置やリハーサルを含め、1 週間程度かかる。

3.1.12 第 7 日：支持モジュールの保管

メンテナンスエリアの使用済み支持モジュールの上にあるコンクリート遮蔽体を移動させる。吊具を交換の後、支持モジュールをメンテナンスエリアから取り出し、支持モジュール保管装置上に設置する(本稿では支持モジュールの保管については割愛する)。電磁ホーン吊具からキャスク天板へと吊具交換を行い、地上に移動させてあった天板をメンテナンスエリアの電磁ホーン上方に設置する。これで、メンテナンスエリア上は再び遮蔽される。

支持モジュールをメンテナンスエリアから取り出し保管装置に載せるまでに要する時間は 90 分、キャスク天板の設置には 30 分、コンクリート遮蔽体の移動と吊具交換の時間については前述の通り。

3.1.13 第 8 日：電磁ホーンの保管

メンテナンスエリアにて、電磁ホーンがキャスク天板直下に来るまでリフトテーブルを上昇させる。リフトテーブルの移動量だけでなく、荷重計の値の変化や、カメラ映像等を監視しながら、天板と電磁ホーンが接触しないように注意する。所定の高さまで上昇させたら、キャスク天板上の作業者が、手作業にて電磁ホーンにフックをかける。フックがかかったかどうかはカメラにて確認する。リフトテーブルを慎重に降下させ、フック全てに荷重がかかっていることをカメラ映像にて確認する。

天板に電磁ホーンが懸架された後、作業者は全員クレーン制御室に移動し、そこからのリモート操作により、電磁ホーンをメンテナンスエリアから保管庫まで移動させ、保管庫のキャスク下部筐体に天板を嵌め合わせることで、電磁ホーンをキャスクに収納する(図 11)。天板と下部筐体が嵌め合ったら、作業者は保管庫に移動し、天板と下部筐体を手動でロックし、クレーンから取り外す。メンテ

ナンスエリアから移動して保管庫内のキャスク内に収納されるまでの時間は 80 分である。

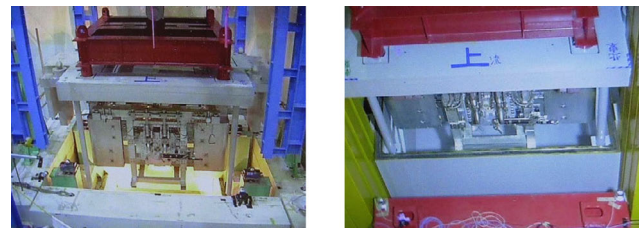


図 11 電磁ホーンの保管

左はメンテナンスエリアからキャスク天板ごと引き上げられた電磁ホーン、右は保管庫内で待ち受けるキャスク下部筐体に収納される電磁ホーン、何れもカメラ映像。天板のガイドピンが下部筐体に嵌め合わせられ、ガイドされている点に注意。

3.1.14 ビーム運転へ

以上で電磁ホーンは交換されたが、この後、ビーム運転を開始するまでには、ヘリウム容器やメンテナンスエリアに設置されたリモートメンテナンス機器(ガイドセル等)の撤去、電磁ホーン(支持モジュール上端部)の測量と位置の微調、ヘリウム容器内でのバスバー並びに冷却水配管の接続、空気中での電磁ホーンの確認通電試験、ヘリウム容器の蓋を閉めて真空引き、ヘリウムガスの充填、電磁ホーンの詳細通電試験、サーヴィスピット/保管庫/メンテナンスエリア上のコンクリート遮蔽体の再設置と気密処理等の作業が行われ、これらには 2 ヶ月以上を要する。

3.2 電磁ホーンの交換

以上で述べたリモートメンテナンスシステムを用い、2013 年 11 月から 2014 年 4 月にかけて、我々は 3 台全ての電磁ホーンの交換を行った。

3.2.1 交換のモチベーション

T2K 実験の開始から使用されていた電磁ホーンは、非常によく動作し、第 1 段階の実験の成功に大いに貢献したが、そのバスバーの冷却構造から耐えられるビーム強度が 400 kW 程度であり、また冷却構造とは別に、加速器の高繰り返し化(1 Hz 程度)に対応するためには、バスバー本体も改良する必要があった。また、電磁ホーン内の冷却水がビームによって分解されて生じる水素を水へと再結合させる循環システムを構築して冷却水システムに組み込んだが、電磁ホーン内に淀んでいて機械室内に設置された同システムまで十分に循環されないという問題があった。加えて、2013 年には、第 1 電磁ホーンにて漏水が生じるようになっていた。

T2K 実験で電子ニュートリノの出現が確定され、第 1 段階の目的が達成されたまさにその 2013 年 5 月、ハドロンビームラインでの事故により、J-PARC は長期のシャットダウンを余儀なくされた。その時点で、前述の問題を解決した新型電磁ホーンが完成していたこともあり、その機会に電磁ホーン全台の交換に踏み切った。

新型の電磁ホーンは、高繰り返し運転に対応した低インピーダンスの新型バスバー、高冷却能を持ったバスバー冷却機構、本体内部のガスを循環させるポートを持ち、来るべき大強度ビーム運転に対応した改良型である。また、支持モジュールも、その電磁ホーンに対応すべく改良が施されているが故に、交換の対象とした。

交換された新型電磁ホーンは、2014年春のビーム運転に於いて、期待された性能を発揮した上、まったくのトラブルなしで稼働を続けている。

3.2.2 交換の日程

電磁ホーンの交換は、第3、第2、第1の順番に行った。表2に、重要な作業が行われた日付を示す。

表2 電磁ホーン交換の日程

	第1ホーン	第2ホーン	第3ホーン
旧型取出	2014.3.19	2014.2.7	2013.11.26
新型設置	2014.4.4	2014.2.10	2013.11.29
キャスク保管	2014.3.26	2014.2.21	2013.12.10

第1電磁ホーンのみ、準備作業の工程上、新型設置とキャスク保管が逆になっている。

交換中には、小さなトラブルや手戻りがあったが、大きなものもなく、作業者の怪我も一切なく、交換した電磁ホーン等の如何なる機器にも損傷はなかった。このリモートメンテナンスシステムが非常に成功したシステムであることを意味している。

3.2.3 作業者の被曝量と建屋外での放射線量

電磁ホーン本体の残留放射線量は100 mSv/hを超えており、その交換作業を行ったにも関わらず、作業者の被曝量は最大でも1日10 μ Sv/h程度に抑えられた。これらの被曝は、前述の手順中、手動の工程で起こっており、クレーン制御室からの操作中では、検出限界以下であった。このことは、このリモートメンテナンスシステムが作業者の放射線安全の面に於いても非常に優れたシステムであることを意味している。

また、使用済みの電磁ホーンが取り出され、ターゲットステーション内を移動する際には、建屋外での放射線量も極めて重要である。特に放射線管理区域境界に於いては、法規制並びにJ-PARC規定の値よりも、十分に低く保たれる必要がある。事前に電磁ホーンが移動する際の建屋外の放射線量の計算を行い、多めに見積もった移動時間を掛け合わせ、建屋外の累積線量が問題ないことを確認した上で交換作業を行った。作業中には建屋外の数箇所にて瞬間値と累積値の線量測定を行い、万が一意図せぬ高い瞬間値を測定した場合には、直ちに作業を中断する体制を整えた上で、作業に臨んだ。結果、充分低い線量にて作業を完遂することができた。

3.2.4 リスクアセスメント

前述の、機器の故障、インターロックの動作、センサー値の異常、カメラで発見される異常、予期せぬ高い放射線量の検出以外にも、停電や地震等のトラブルまで含め、それらが起こり得る頻度や起こった場合の影響を検討し、万が一が起こった場合にどう対処するかを決めた上で、作業は行われた。幸いにも、前述の通り、想定したトラブルは起こらなかったが、仮に起こった場合に於いても、可能な限り安全な状態にまで持って行った上で、作業を中断できるように対策を行った。

4 まとめ

J-PARCのニュートリノビームラインに於いて、その心臓部とも言える電磁ホーンを交換するためのリモートメンテナンスシステムを開発し、これを用いて、電磁ホーン全台の交換を無事完了した。このシステムは、大重量の高放射化物を扱うリモートメンテナンスシステムとしては画期的なものであり、このシステムが期待通りに機能し、電磁ホーン交換が成功裏に実行されたことは、今後大強度化して行くJ-PARCのシステムとしてだけでなく、あらゆる高放射化物のメンテナンスシステムに応用できる技術が多く盛り込まれているという点で、極めて重要である。ここで得た知見を、今後も様々な分野で生かして行きたい。

最後に、このシステムの開発と交換作業に携わって下さった皆様、各種機器の設計と製造を請け負って下さったメーカー各社、交換作業並びに準備作業を請け負って下さった役務会社各社、放射線安全面での貴重な助言を頂いたJ-PARC放射線安全セクション、リモートメンテナンス機器の設計に多大な御協力を頂いたKEK機械工学センター、そして、この作業を成し遂げたJ-PARCニュートリノグループの皆様に、最大限の感謝の意を表明し、本稿を締め括りたいと思う。

参考文献

- [1] K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112**, 061802 (2014).
- [2] 藤井芳昭, 山田善一, 「ニュートリノ実験施設の概要」, 高エネルギーニュース, 28-2 (2009).
- [3] 市川温子, 関口哲郎, 中平武, 「T2K 実験ニュートリノ生成機器」, 高エネルギーニュース, 28-4 (2010).