

## 話 題

## J-PARC ハドロンビームラインにおける 耐放射線機器とそのメンテナンス

高橋 仁<sup>\*1</sup>・上利 恵三<sup>\*1</sup>・飯尾 雅実<sup>\*1</sup>・家入 正治<sup>\*1</sup>・加藤 洋二<sup>\*1</sup>  
里 嘉典<sup>\*1</sup>・澤田 真也<sup>\*1</sup>・白壁 義久<sup>\*1</sup>・鈴木 善尋<sup>\*1</sup>・高崎 稔<sup>\*1</sup>  
田中 万博<sup>\*1</sup>・豊田 晃久<sup>\*1</sup>・成木 恵<sup>\*1</sup>・野海 博之<sup>\*2</sup>・広瀬 恵理奈<sup>\*1</sup>  
皆川 道文<sup>\*1</sup>・武藤 亮太郎<sup>\*1</sup>・山野井 豊<sup>\*1</sup>・渡邊 丈晃<sup>\*1</sup>

### Radiation-Resistant Equipments for J-PARC Hadron Beam Line

Hitoshi TAKAHASHI<sup>\*1</sup>, Keizo AGARI<sup>\*1</sup>, Masami IIO<sup>\*1</sup>, Masaharu IEIRI<sup>\*1</sup>, Yoji KATOH<sup>\*1</sup>  
Yoshinori SATO<sup>\*1</sup>, Shin'ya SAWADA<sup>\*1</sup>, Yoshihisa SHIRAKABE<sup>\*1</sup>, Yoshihiro SUZUKI<sup>\*1</sup>, Minoru TAKASAKI<sup>\*1</sup>  
Kazuhiro TANAKA<sup>\*1</sup>, Akihisa TOYODA<sup>\*1</sup>, Megumi NARUKI<sup>\*1</sup>, Hiroyuki NOUMI<sup>\*2</sup>, Erina HIROSE<sup>\*1</sup>  
Michifumi MINAKAWA<sup>\*1</sup>, Ryotaro MUTO<sup>\*1</sup>, Yutaka YAMANOI<sup>\*1</sup> and Hiroaki WATANABE<sup>\*1</sup>

#### Abstract

The hadron experimental facility has been constructed as one of two experimental facilities at the J-PARC Main Ring. It utilizes a high-intensity proton beam with a power of 750 kW in maximum and provides various secondary beams for nuclear and particle physics experiments. In order to handle the high-power proton beam, the maintenance scheme must be carefully considered in the designs of the facility and its components. In this paper, the maintenance scenarios in the facility are described and beam-line equipments with sufficient radiation hardness we developed are briefly introduced.

### 1. はじめに

ハドロン実験施設は、大強度陽子加速器 J-PARC の主リングにある 2 つの実験施設の内の 1 つであり、最大 750 kW の大強度陽子ビームから生み出される種々の中間子や反陽子といった 2 次粒子を主に用いて素粒子・原子核物理分野の実験が行われる大学共同利用施設である。図 1 にその全体レイアウトを示す。3 次共鳴を用いた遅いビーム取出し手法により主リングから取り出された 1 次陽子ビームは、長さ約 200 m の「スイッチヤード」と呼ばれるビーム輸送区間を通過して実験ホールへと導かれる。実験ホールは幅 60 m × 長さ 56 m の広さを持ち、中心に 1 次ビームラインからの放射線を遮蔽する高さ 10 m の巨大なコンクリートの山脈がそびえ立つ。この山脈の内側

に 2 次粒子生成標的 (T1) が置かれ、そこで発生した 2 次ビームが外側の各実験エリアに供される。

施設建設に向けた R&D は以前より続けられてきたが、ハドロンビームラインの建設が本格的に始まったのは、2004 年末に K2K 実験が終了してからである。これは、ハドロン 1 次ビームライン電磁石の多くが KEK 12 GeV PS のニュートリノビームラインで使われていた物を整備した再利用品であるためであった。2006 年 3 月にスイッチヤードのトンネルが完成し、そこからそれらの電磁石の設置がスタートした。実験ホール建屋の建築が完了したのが 2007 年 7 月、そこからわずか 1 年と半年の間に、ホール内の 1 次ビームラインと 2 次ビームライン 1 本 (K1.8BR)、そして鉄 2000 トン、コンクリート 5000 トン (ビームダン

\*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: hitoshi.takahashi@kek.jp)

\*2 大阪大学核物理研究センター Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

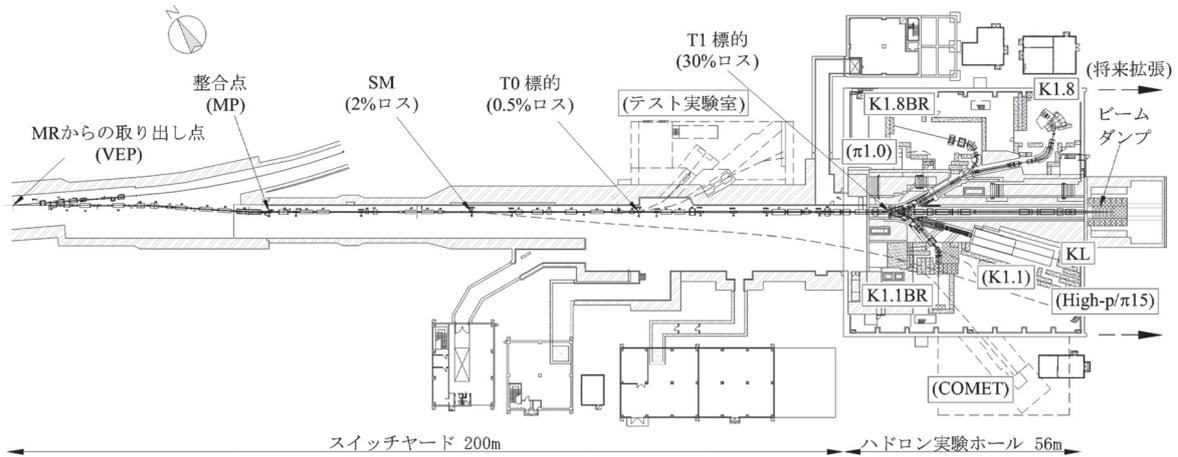


図1 ハドロン実験施設のレイアウト. かつ書きのビームラインは現在建設中, もしくは計画中のものであることを示す.

プの分まで入れるとさらにその倍)にも及ぶ膨大な量の遮蔽体の設置を完了させた.

2009年1月27日, その前月にすでに30 GeVまでの加速に成功していたJ-PARC主リングはこの日, ハドロン実験施設への遅いビーム取出しの調整を開始した. そして午後7時35分, 終端ビームダンプの入口に備え付けられていたスクリーンモニターの発光が確認された. ハドロン実験施設に初めてビームが取り出された瞬間である. 続く2009年2月10日には, 生成標的をビームライン上に初めて挿入, 2次ビームの生成と実験エリアへの輸送に成功した.

その後も2次ビームラインの建設は続けられ, 現在のところ, 荷電2次ビームラインが3本(K1.8, K1.8BR, K1.1BR)と中性2次ビームライン1本(KL)が完成してユーザー利用が行われている. それに加えて, もう2本の荷電2次ビームライン(K1.1,  $\pi 1.0$ )が来年度完成を目指して建設中である他, 新しい1次ビームライン(High-p, COMET)の建設もまさに始まろうとしているところである.

1次ビームライン並びに各2次ビームラインのビーム光学や機器については, 計3部の中間報告書<sup>1,2,3)</sup>や, 最近出版された論文<sup>4,5)</sup>で詳しく述べられている. 限られた紙面で全てを述べることは不可能なので, ここでは, 特に大強度ビームを扱うに当たって障壁となる放射線の問題に焦点を絞り, ハドロン実験施設におけるメンテナンスの考え方や, 我々が開発した耐放射線機器の代表例を

いくつか紹介したい.

## 2. メンテナンスシナリオ

ハドロン実験施設の設計・建設において常に念頭に置かれてきたのは, 「メンテナンス・ファースト」の考え方である. ビームロスを限りなく0に近づけることを理想とする加速器と, 意図的にビームを標的にぶつけて(=ビームをロスさせて)二次ビームを発生させるハドロン実験施設とでは, ビームライン機器や施設設備に要求する機能の優先順位が自ずと異なってくる. 設計強度である750 kW (50 GeV-15  $\mu$ A)のフルビームが1年間照射された標的の表面残留放射線量は, 半年の冷却期間をおいた後でさえも100 Sv/hを優に超える. 数分間浴びただけで人が死に至るような, このすさまじい放射線レベルを相手に, 現実的な人的・時間的なコストで対処できることが, まず何よりも求められるのである. このことは, ハドロン施設建設のために我々がまとめた最初の中間報告書<sup>1)</sup>の目次を見れば良く分かる. 「第1章 全体デザイン」で施設の概略が簡単に述べられた後に多くのページを割いて続くのは, 「第2章 メンテナンスシナリオ」と「第3章 クイックディスコネクト」である. 対して同じ年に発行されたJ-PARC加速器の技術設計報告書<sup>6)</sup>では, Linac, RCS, MRの各加速器のメンテナンスシナリオについて, それぞれ4.1.3節, 4.2.3節, 4.3.3節で1~2ページだけ述べられているだけであるから, 我々の施設の「特異性」が理解できよう.

ハドロン実験施設のメンテナンスシナリオは、その場所と方法において大きく2つに分かれる。一つは、メインの生成標的（最大750 kW × 30% = 225 kW ロス）が置かれる実験ホールである。ここでは、揚程の長い天井クレーンを主な武器に、機器の上方に遮蔽体を挟んで作業エリアを配置した「縦のメンテナンス」が行われる。もう一つは、加速器リングと実験ホールとを結ぶスイッチヤードで、近い将来途中に最大15 kW ロスの生成標的が置かれる計画である。このスイッチヤードでは、天井クレーンが大きな武器であることに変わりはないが、トンネルの天井が低く揚程が短いため、機器の側面から遮蔽体を挟んで作業を行う「横のメンテナンス」が主となる。

## 2.1 実験ホール

実験ホールの中央を通る1次ビームラインは、左右を分厚い躯体コンクリート遮蔽の山で覆われていて、さらに遮蔽能力を上げるため、その躯体コンクリートの中には鉄ブロックが埋め込まれている。この1次ビームラインの上に鉄2mとコンクリート1mの遮蔽ブロックが積み重ねられ、その上に「サービススペース」と呼ばれるメンテナンス作業エリアが確保されている。サービススペースの上にはさらにコンクリートブロックが3～5m程度積まれる。電磁石などビームライン機器への冷却水や電気はこのサービススペースから供給され、メンテナンス作業が行われるのは基本的に全てこのサービススペース上である。ビームラインからサービススペースまで4mの高度差があるため、電磁石などはその上部に煙突のように配管・配線を立て（これを「チムニー」と呼ぶ）、サービススペース上の固定配管、固定配線と接続される（図2）。チムニーには、電磁石のように機器本体に直接固定されて本体と共に吊り上げられる固定型と、第2コリメータのように遠隔で本体との間の配管を脱着して独立に吊り上げられる分離型の2種類があり、機器本体とチムニーのサイズのバランスからより適している方を選んで使っている。

万が一ビームライン機器本体に故障が発生した場合は、サービススペースからの遠隔操作で当該機器の交換を行うことになる。真空の脱着は、すでにPS北カウンターホールの時代から使用実績のある「ピローシール」（詳細は後述）により完

全に遠隔で行うことが可能であり、水や電気の脱着はチムニーのおかげでサービススペース上で行えるので、あと必要なのは、遠隔から自動で玉掛けできる装置と、遠隔から位置出しするためのガイド機構である。そのために我々は、ハンマーヘッドを90°回転させることによりロックする遠隔玉掛け装置「ツイストロック」を開発した（図3）。ツイストロックには、最大40トンまで吊り上げられる4点吊り型と最大25トンまでの2点吊り型の2種類があって、適時使い分けている。位置出し機構としては、躯体遮蔽の壁に固定したガイドレールで段階的に数mm以内に寄せられた後、最終的に床に固定されたテーパピンにより0.1mmの精度で位置決めがなされる。このような遠隔吊り上げ・位置出し作業を行うために、各機器の設計、製作では重心バランスに細心の注意を払う必要がある。実際にチムニー電磁石をツイストロックを使って遠隔で吊り上げた時の写真を図4に示す。この作業を行った時点ではまだビーム強度が低く電磁石の残留放射能も最大1mSv/h程度であったためそのまま吊り上げられ

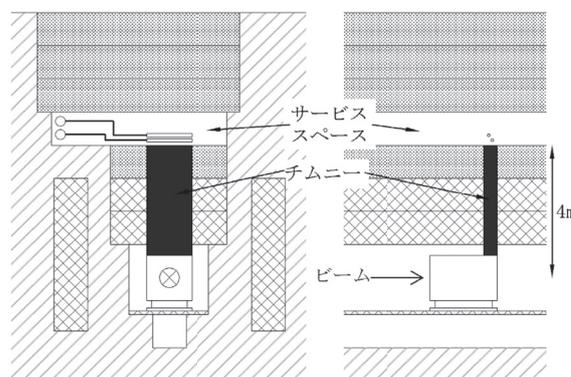


図2 ハドロン実験ホールの遮蔽構造

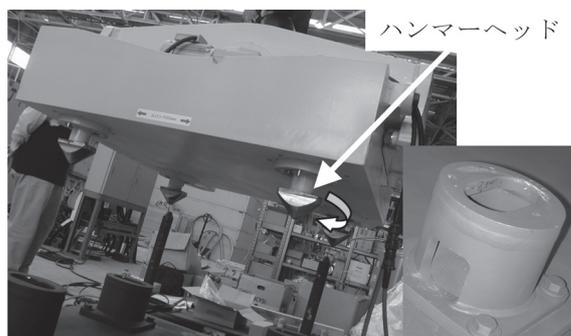


図3 4点吊り型ツイストロックとそのハンマーヘッドが勘合する装置側吊り金具の写真

ているが、これからビーム強度が上がり放射化レベルが高くなった場合には、簡易的なキャスクのような追加の遮蔽を施すことが必要となる。

## 2.2 スイッチヤード

天井の低いスイッチヤードでは、実験ホールと違って全て遠隔でメンテナンスするのは難しく、基本的にはオン・ハンドの作業となる。図5に示した模式図のように、主配管やケーブルラックはビームラインとは反対の通路側の壁に配置し、そこから床の下のピットを通して各機器まで水・電気を供給する。高い残留放射能が想定される機器の場合は、通路との間に遮蔽ブロックを置いて、待機・通行時に余計な放射線を浴びないようにし、必要なときのみピット内の固定配線・配管と機器との間の脱着作業を人の手で行う。そこで被曝量

低減のための鍵となるのは、水や電気の脱着を迅速に行うためのコネクタである。我々は、水用にフルメタルのレバーカプラ、電気用に定格 3000 A のナイフスイッチを開発した。レバーカプラは直径 2 インチのサイズを持ち、750°C でアニールした 2 mm 厚の銅ガasket を用いて封止するもので、5 MPa の耐水圧を誇る。ナイフスイッチは、銅ベリリウム合金製のスプリングコンタクトを採用し、長さ 300 ~ 400 mm という大きさながら片手でも余裕で抜き差しできる。機器の吊り上げは、前述したツイストロックを用いて遠隔で行い、位置出しには、床に固定されたガイド当て板とテーパーピンを用いる。

## 3. 耐放射線機器

大強度ビームをハンドルするために、あらゆるビームライン機器に高い耐放射線性が要求される。また、単に放射線に晒されても壊れにくいことばかりでなく、万が一壊れても短時間に直したり交換できるような構造が必要である。一方、余計なビームロスを起こさないための機器開発も行われてきており、例えばビームモニターがそれにあたる。以下に、代表的な機器を簡単に紹介する。

### 3.1 T1 標的

2 次粒子生成標的 T1 の物質量は 30% ビームロスに相当する。すなわち、 $750 \text{ kW} \times 0.3 = 225 \text{ kW}$  もの膨大なパワーがここで解放されるわけであるが、その内標的本体への熱負荷は 15 kW 程度である。この熱を取り除くため、我々は、標的を円盤状にして回転させ、その下側 1/4 を直接水に沈めて冷やす、直接水冷回転標的を開発した。標的の材質としては、2 次ビームの高品質化のためにはなるべく密度を高くして長さを短くした方が有利なのだが、ビームによる発熱密度は低くした方が除熱の点では有利であるため、耐食性も考慮して低炭素ニッケル (NW2201) を採用した。円盤の直径は 360 mm で、内側まで冷えるよう、円盤は合計 54 mm の厚みを 5 枚に分割、間に 3 mm の隙間を開けて配置した。標的は下流側ほど 2 次粒子による熱負荷が加わって発熱密度が大きくなるため、各円盤の発熱量が均等になるように下流側ほど薄くなるようにした (上流側から 21.7, 11.2, 8.3, 6.9, 5.9 mm)。モンテカルロシミュレーション (MARS<sup>7)</sup>) と有限要素計算による評

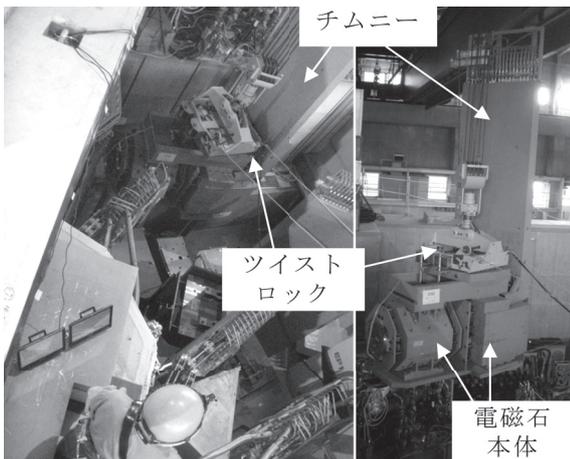


図4 チムニー電磁石を吊り上げた時の写真

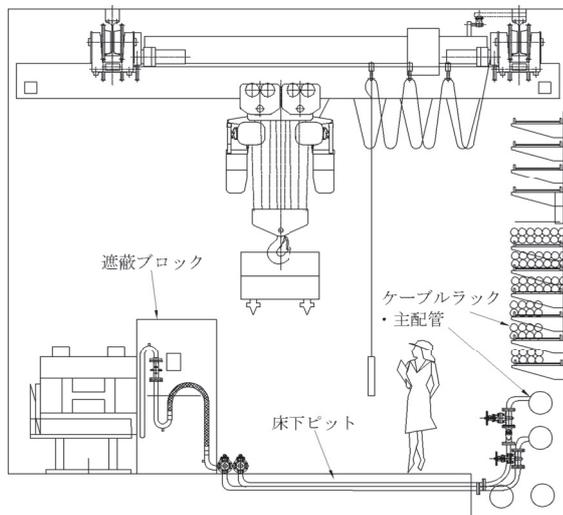


図5 スイッチヤードの機器配置

価では、750 kW のフルビーム照射時に、水温 40°C に対してニッケル円盤の最大温度は 80°C 以下に抑えられる。

T1 標的装置の全体図を **図 6** に示す。円盤を回転させるモーターは、円盤より 4 m 上方のサービススペースに置かれ、そこから遮蔽ブロックを貫通するシャフトによって回転トルクが伝えられる。冷却水は、標的装置専用の閉じた循環系になっており、そのポンプ類もサービススペース上に置かれている。ビームライン上の冷却水タンクの水は、一旦周辺コンクリート躯体の中に設置されたリザーバータンクへと流れる。そこからサービススペースの高さまでポンプで吸い上げられ、イオン交換樹脂塔と熱交換機を通った後、再び標的の水タンクへ落とされる。前述のように、ビーム照射後の生成標的は著しく放射化しているため、その輸送には「キャスク」と呼ばれる特別な放射線遮蔽容器が必要となる。従って、標的装置のサイズはなるべく小さい方が望ましい。そのために、T1 標的装置は、①駆動モーター、シャフトと遮蔽ブロック、②回転円盤本体、③冷却水タンクの 3 つのパーツに遠隔操作で分離できるように設計されている。

ニッケル円盤標的は、750 kW の大強度ビームに対応できるように設計、開発されたものであるが、ビーム強度が弱いコミショニング初期段階では、より高い密度の物質を用いてビームロス量を増やすことにより、2次ビームの収量を増大さ

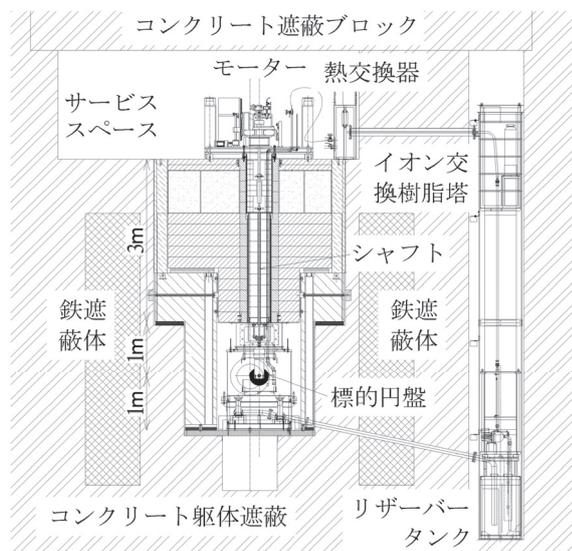


図 6 T1 標的装置の全体図

せることができる。そこで現在は、冷却水配管を埋め込んだ銅ブロックに、約 50% ロスに相当するプラチナもしくは金の棒状の標的を接合した固定間接水冷標的を、ニッケル円盤の代わりに使用している。

### 3.2 大型真空箱

前節で述べたように、T1 標的で解放される最大 225 kW のビームパワーのうち、標的本体に熱として落とされるのは 15 kW 程度であり、残りの 200 kW 以上はビームラインの下流へと分散される。この熱と放射線から機器を守るために標的直下流にはビームコリメータが置かれるが、それでもなお、真空ビームダクトは、電磁石の磁極よりもビームに近いために、大量のトリチウムを生成することなしには十分に冷却することが難しい。また、真空フランジの熱変形対策も難問である。そこで我々は、発想を転換して、磁石の中に真空ダクトを入れるのではなく、大型の真空箱の中に磁石を丸ごと入れてしまう構造を採用した。

この方式でポイントとなるのは、大型真空箱の蓋の位置である。蓋では、電力や水の脱着、真空のシールなど、人の手による作業が多い。メンテナンス時の作業員の被曝を最小限度に抑えるために、我々は蓋をビーム高さから 4 m 上のサービススペースに位置させ、鉄 2 m + コンクリート 1 m の遮蔽ブロックも真空箱の中に入れることにした。その結果、真空箱は高さ 5.7 m、容積 29 m<sup>3</sup>、本体のみの重量 49 t という巨大な構造物となった (**図 7**)。この真空箱にはコリメータ 1 台と 2 次ビームライン最上流部の電磁石計 3 台が収納される。各コリメータ / 電磁石は、機器本体と架台、上部鉄遮蔽体が一体となってクレーンで吊り上げられるプラグイン・モジュール構造になっている。

### 3.3 電磁石

高放射線下でも安定して運転できるように、我々は 2 種類の耐放射線電磁石を開発してきた。まず一つは通常使われるエポキシ樹脂よりも耐放射線性の高いポリイミド樹脂をコイル絶縁材として使用したポリイミド絶縁電磁石である。この電磁石は吸収線量 10<sup>8</sup> Gy 以上までの耐放射線性を有し、エポキシ絶縁電磁石の約 10 倍の寿命を持つ。スイッチャードのほとんどや、実験ホール内 2 次ビームラインの中流部では、このポリイミド絶縁電磁石が使われている。それよりも高い放射線レ

ベルが想定される，スイッチヤード最上流部，実験ホール内の1次ビームライン全てと，2次ビームラインの上流部などには，さらに耐放射線性の高い無機絶縁電磁石が置かれている．これは無機絶縁ケーブル（Mineral Insulation Cable, MIC）を用いた電磁石で，我々は，最大50 GeVの大強度ビームをハンドルするのに十分な大きさを持つ電磁石を製造するために，これまでよりも大きな導体断面積を持つMICを開発，さらにあらゆる磁石のパーツから有機物を排除した完全無機絶縁電磁石を完成させた．

第2節メンテナンスシナリオにおいて述べたように，実験ホール内の1次ビームラインとその近傍では，電磁石本体の上部にチムニーを設け，ビームよりも4 m上方から水や電気を供給する特殊な構造を採用している．このチムニー電磁石の構造にはいくつかのバリエーションがあり，電磁石1台につき1本のチムニーが立つ物，1次ビームラインの大型四極電磁石のように1台に2本チムニーが立っている物の他，2次ビームラインの比較的小型の電磁石のように複数台の電磁石で1本のチムニーを共有する形の物もある．**図4**の写真で吊り上げられているのが，共通チムニー型電磁石である．

MICには**図8**にあるように，導体の中心に冷

却水の流れる穴の開いた中空タイプと，穴の開いていない中実タイプの2種類がある．ハドロンビームラインで使われるMIC電磁石のほとんどは中空タイプを用いた物であるが，しかし，この中空MICを使ったコイルでは，導体の中を流れる冷却水を電気回路から分離するためにセラミック絶縁チューブが必要となる．このセラミックチューブは，強度的に弱く水漏れのリスクが比較的高い上，内部に腐食物が堆積して絶縁性能が悪くなる危険性もあり，MICコイルの最大の弱点となっていた．そこで我々がとった対策は2つある．一つはそのセラミックチューブが壊れてもすぐに交換できるようにすること，すなわち，チムニー電磁石においてセラミックチューブは電磁石本体の近傍ではなくチムニーの上に配置してサービススペース内で交換作業ができるようにしたことである．もう一つは，そもそもセラミックチューブが不要なコイル，つまり中実型MICを用いた間接水冷型コイルの開発である．中実型MICコイルでは，導体内に直接水を流して冷却することができないため，**図9**のように，水配管の層とMICの層を交互にSUSケース内に積み，最後にケース内を半田で充填することにより，導体から水への熱伝達を行う．この構造のおかげで，電気回路と冷却水路がはじめから完全に分離されるので，中空MICコイルの弱点だったセラミック絶縁チューブが不要となり，最高の耐久性が実現される．しかしながら，直接水冷の中空型に比べ除熱効率が悪いいため，特に半田充填ケースから剥き

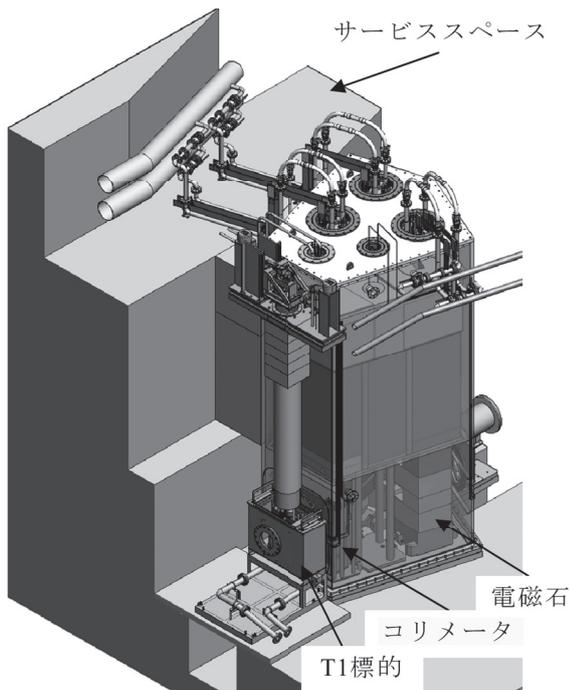


図7 T1標的と大型真空箱

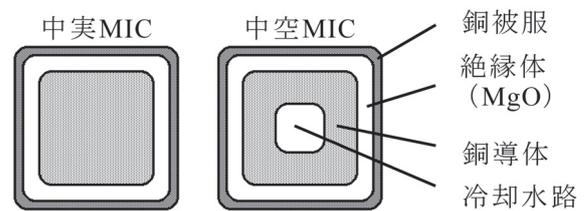


図8 MICの断面図

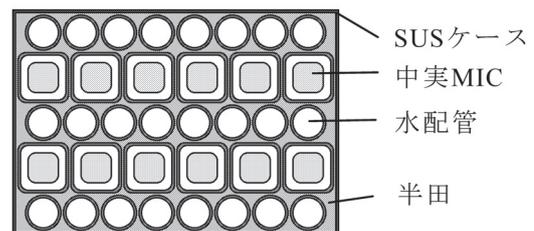


図9 間接水冷型MICコイルの断面図

出しになるコイル末端部が高温になってしまう問題があった。我々は、そのコイル末端部の構造を見直したり、コロイド黒鉛を塗布して輻射率を向上させたりした結果、真空中においても DC1000 A まで十分安定に動作できる間接水冷型 MIC コイルの開発に成功した。生成標的直下流という最も過酷な放射線環境下に置かれる 2 次ビームライン最上流電磁石に、この技術が使われている。これらの電磁石は、前述の大型真空箱内に収納されているが、間接水冷型コイルは、真空への冷却水導入部からコイル中まで全て 1 本の継ぎ目なし SUS チューブで製作することが可能になるので、真空中での水漏れの危険性を極限的に小さくできる点でも大きなメリットとなった。

### 3.4 ビームダンプ

1 次ビームラインの終端となるビームダンプは、実験ホールの外側に突き出た形のダンプ室内に設置されている。750 kW のフルビームを 1 か所で受け止めてしまうと発熱密度が高すぎて冷却が間に合わなくなるため、中心にコーン状の穴を開けた上でビームを広げて入射させることによって、発熱をビーム軸方向に一様に分散させるように設計されている。トリチウムの生成とコア表面の残留放射能を抑えるために、ダンプのコアを熱伝導の良い無酸素銅の大型ブロックで作り、その外側を水冷する。銅コアは、横 2 m × 縦 1 m × 厚さ 250 mm の無酸素銅厚板を奥行き方向に 20 枚、縦に 2 段重ねた作りになっていて、合計重量 200 トン、外形寸法 2 m × 2 m × 5 m という巨大な銅の塊である。その銅コアの周りを、放射線遮蔽のため、2700 トンの鉄と 5400 トンのコンクリートで囲んでいる。実験ホールと同様、銅コアの上部には鉄とコンクリートの遮蔽ブロックをはさんでサービススペースが設けられており、通常のメンテナンスはそこで行われるような構造になっている。図 10 は、ビームダンプ建設途中、下段の銅コアが並べられた状態の写真で、中心にコーン状の穴が開けられているのが良く分かる。

冷却方法としては、BTA (Boring & Trepanning Association) 加工と呼ばれる深穴加工により各銅厚板に直接水路となる穴を開け、そこに銅-SUS 継手を介して SUS チューブを溶接している。発生する温度上昇と熱応力は、T1 標的の場合と同じ MARS コードと有限要素計算により評価し

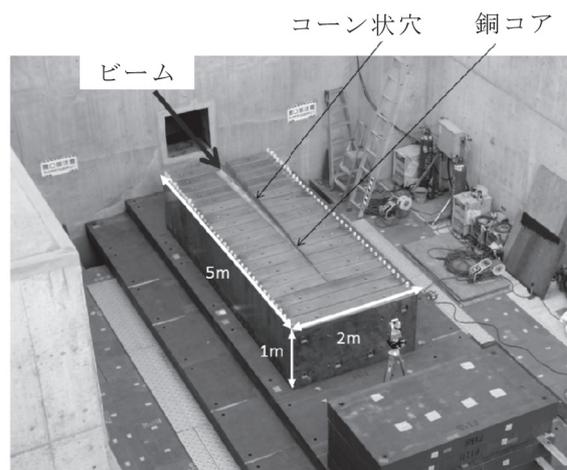


図 10 建設中のビームダンプの写真

た。中心部に発生する熱応力を逃がすため、コーン穴から放射状にスリットを切り込むことによって、最大応力は高温での無酸素銅の許容応力より低い 21.2 MPa に抑えられる。各銅厚板のコーン穴の近傍と外側表面とに熱電対が取り付けられており、銅コアの温度をモニターする他、この温度分布の測定によってビームプロファイルモニターとしても使われている。

このビームダンプは、銅コアの下にレールが敷かれており、将来実験ホールを拡張する際に遠隔で下流に移動できるような構造になっている。本体のベースプレートとレールとの間に空間が設けてあり、ここにスライドジャッキを挿入してコア部を持ち上げ、牽引式ジャッキを用いてそれを移動させる。この移設作業は、1 日の労働時間で十分おつりがくる程度の時間で完了する見込みである。

### 3.5 ピローシール

高放射線場に晒される実験ホールの 1 次ビームライン近傍では、完全に遠隔で脱着できる真空接続機器が必要である。我々はそのような機器としてピローシールを採用した。ピローシールは、うすいステンレスのダイヤフラムリングを圧縮空気膨らませて対向フランジに密着させることにより真空封止するものである。これは、もともと PSI (Paul Scherrer Institute) で開発され、KEK 12 GeV PS の北カウンターホールで使用実績があった物を、ハドロン実験ホール用に最適化した物である。ダイヤフラムと対向フランジの表面に鏡面仕上げを施し、ダイヤフラムリングを二重に

してその間を中間排気することにより、ヘリウムリークレート  $10^{-10}$  Pa・m<sup>3</sup>/s 以下を達成している。ダイヤフラムを二重ベローズに溶接して、内部に圧縮空気を送ったり逆に排気したりして伸縮させることにより、完全に遠隔で脱着が可能である。ベローズの両面にダイヤフラムが溶接され単独で出し入れされる「両面型」と、片面だけにダイヤフラムが溶接され、もう片面は真空ダクトに接続固定されて電磁石等の機器と一緒に出し入れされる「片面型」の2種類がある。大きさは、開口の直径300 mmと500 mmの2種類を使用している。図11が両面型ピローシールの写真と断面の模式図である。

### 3.6 ビームプロファイルモニター

大強度ビームのモニターにおいては、無駄な放射線の発生や機器の損傷を防ぐために、ビームロスを極力抑えることが非常に重要である。もちろんモニター自身の耐放射線性も高くなくてはならない。さらに、理想的な遅い取出しビームは直流であり、加速器で一般的な、バンチビームからの誘導電流を利用するモニターは適用できない。このような非常に難しい要求に対して、我々はビームプロファイルモニターとして2つの解を開発した。すなわち、RGIPM (Residual Gas Ionization Profile Monitor) と OTR (Optical Transition Radiation) モニターである。

RGIPM は、真空ダクト内の残留ガスがビームによってイオン化されて出来たイオン又は電子を静電場をかけて電極に集めてその電荷分布を測定するものである。同様のプロファイルモニターはこれまでも加速器リングで広く使われてきたが、それらは電極の手前で MCP (Micro Channel Plate) などの信号増幅器を用いており、高放射線場で使用するには故障のリスクが大きかった。そこで我々は、1 Pa 程度の低真空にすることによりリングの高真空の場合に比べて約6桁もイオン・電子対の数を増やし、シグナルを増幅せずに電極だけで信号を読み取る、新しいプロファイルモニターを開発した。低真空の中で電子をドリフトさせる場合、単に電場をかけただけではドリフト中に電子が多重散乱によって拡散してしまって正しくビームプロファイルが測定できない。そこで電場と同じ方向に磁場をかけ、電子をその磁場のまわりに巻きつけながらドリフトさせることに

よって、十分な精度で測定できるようになった。典型的な位置分解能は、中心磁場200～400 Gauss, 電場約1 kV/m をかけて、約1 mm である。磁場を作るにはフェライトの永久磁石を使っている。図12がRGIPMの写真である。このRGIPMは、メンテナンスコストのかかる信号増幅器を用いず、全くビームを遮ることなしにプロファイルを測定できる点で、大強度ビームの測定に最適なモニターである。スイッチャード上流の高真空区間を除き、ハドロン1次ビームラインには全部で14台のRGIPMが設置されている。

OTR モニターは、RGIPM を適用できない高真空区間でビームプロファイルを測定するために開発された。OTR は表面現象であり光量は物質の反射率のみに依存するため、発行体の物質量を極限まで減らしビームロスを最小限に抑えることが可能である。このOTR光を利用したプロファイルモニターを大強度ビームに対して適用できるように、ビームによる放射線損傷やチェレンコフ光に

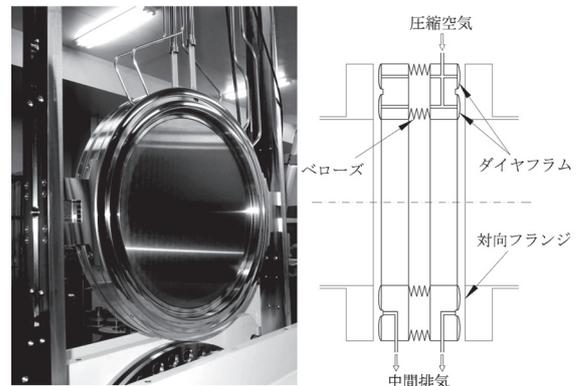


図11 両面型ピローシールの写真と断面の模式図。写真のピローシールは内径が500 mmで、ベリリウム製の真空膜が内蔵されたタイプである。

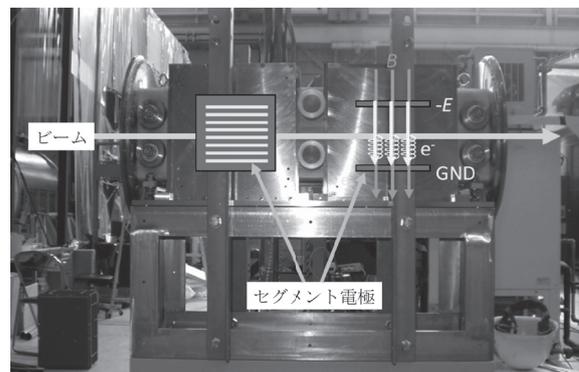


図12 RGIPM の写真

よるノイズを減らすため光学レンズやイメージ増幅管 (Image Intensifier Tube, IIT), カメラ等はビームラインからなるべく遠ざけると共に, OTR 光の広がり (30 GeV 陽子で約  $1.8^\circ$ ) を十分カバーする立体角を持つような光学系を開発した. 最初に開発したのはニュートン型光学系を利用したもので, スイッチヤード上流部の高真空区間に 2 台設置している (図 13 中の OTR1 と OTR2). しかしこの光学系には多くのレンズが使われておりメンテナンス性が悪いため, 新たにグレゴリアン型の光学系を開発した. 新しい光学系では IIT に入る前の光学レンズが不要になり, 耐放射線性やメンテナンス性が向上された. この光学系を用いた OTR モニターは 1 台設置されている (図 13 中の OTR3).

なお, 最初にビーム取出しの成功を確認したスクリーンモニターは非常に弱いビーム強度でも観測できるように特別に設置していた物であり, 現在では全て OTR と RGIPM に置き換えられている.

#### 4. 終わりに

以上, かなり駆け足ではあったが, J-PARC ハドロン実験施設におけるメンテナンスの考え方や耐放射線機器の代表例を紹介した. 特に個々の装置の説明では言葉足らずのところが多々あったと思うが, そこは適時, 最近の論文<sup>4)</sup> とその中の参考文献を参照して頂きたい.

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では J-PARC も被害を免れなかった. ハドロン実験施設では, 幸いにも建屋やビームライン機器にはそれほど大きな損傷はなかったが, 各機器や遮蔽体のアラインメントが狂ったり, 建屋同士の相互位置がずれたりした. そのため, 合計 100 台近くにのぼる電磁石のほとんどを一度取り払い, ビームラインの線を引き直した後に再設置した. スイッチヤードと実験ホール間に生じた段差は, スイッチヤード途中のスロープ出入り口に設置される縦偏向電磁石の位置を前後にずらすことで補

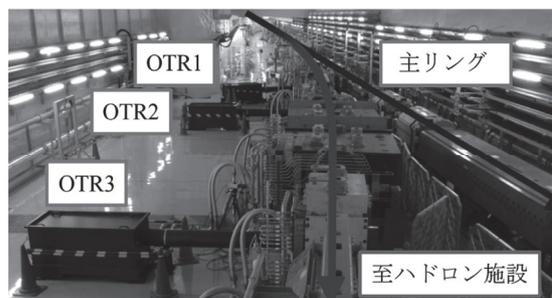


図 13 OTR モニターの写真

償した. 2 シフト交代で作業に取り組んだ結果, 震災から 10 ヶ月で, テスト実験用の K1.1BR ビームラインを除く全ての 1 次, 2 次ビームラインの復旧を果たし, 2012 年 1 月 28 日に震災後初めてのビームがハドロン実験施設へ取り出された. ユーザーの物理実験もそれからすぐに再開され, ビーム, 検出器ともに震災前と同等のパフォーマンスが得られていることが確認された. 同年 4 月には最後の K1.1BR ビームラインの復旧も完了, これから多くの実験成果が生まれるものと期待される.

#### 参考文献

- 1) 田中万博, 他, “大強度陽子加速器原子核素粒子実験施設ハドロンビームラインサブグループ中間報告書”, KEK-Internal 2002-8, (2002).
- 2) 田中万博, 他, “J-PARC 大強度陽子加速器施設原子核素粒子実験施設建設グループハドロンビームラインサブグループ第 2 次中間報告書”, KEK-Internal 2004-3, (2004).
- 3) 田中万博, 他, “J-PARC 原子核素粒子実験施設技術設計報告書ハドロンビームラインサブグループ第 3 次中間報告書”, KEK-Internal 2007-1, (2007).
- 4) K. Agari, et al., “Primary proton beam line at the J-PARC hadron experimental facility”, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B008. doi: 10.1093/ptep/pts034.
- 5) K. Agari, et al., “Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall”, Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B009. doi:10.1093/ptep/pts038.
- 6) Y. Yamazaki (eds.), “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK Report 2002-13 (2002).
- 7) N.V. Mokhov, the MARS Monte Carlo simulation code, <http://www-ap.fnal.gov/MARS/>.