## J-PARC ハドロン実験施設における耐放射線電磁石システム

### ○広瀬恵理奈

### 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

### 概要

J-PARCでは、平成21年1月にハドロン実験ホールに遅い取り出しビームが導かれた。ここでは、ハドロ ン実験ホールターゲット近辺に実際置かれ運転している耐放射線電磁石のリモートハンドリングについて報 告する。高放射線環境であるため、ビームライントンネルにある電磁石に対して、3mの遮蔽を積み、その 上で人間が近寄ってメンテナンスを行う。電磁石の冷却水や電力を3mの遮蔽上へ取り出す方法や、万が一 電磁石が壊れたときに電磁石を交換するための、電力・冷却水・信号の速着脱方式、電磁石本体の遠隔着脱・ 設置方式について報告する。

1 イントロダクション

#### 1.1 ハドロン実験施設

大強度陽子加速器 J-PARC の建設は、大部分2008年末までに完了し、2009年1月には、30Ge Vの陽子ビームが取り出され、ハドロン実験施設のビームダンプまで導かれた。2月には、生成標的をビー ムラインに挿入し、2次粒子を実験エリアまで輸送することに成功した。ハドロン実験施設の概要を次に述 べる。図1のように、50GeVシンクロトロンから取り出された遅い取り出しビームはスイッチヤード(S Y)を経てハドロン実験ホールに輸送される。図2にハドロン実験ホールの平面図を示すが、一次ビームは、 図面の左側のSYからやってきて、右側のビームダンプへと導かれる。T1で示される場所に30%ロスの 2次粒子生成標的がある。T1から、K1.8やK1.1、KLなどの2次ビームラインに2次粒子が導か れ、実験が行われる。このような大強度の施設では、電磁石は非常に高い放射線にさらされる。SYでのビ ーム停止時に比較的アクセス可能な電磁石システムについては、[4]に説明されている。ターゲット近辺の電 磁石は、SYよりさらに深刻な高放射線環境におかれる。本件では、図2のオレンジハッチ内で示される一 次ビームラインでの電磁石システムについて報告する。

1.2 ハドロン実験ホールのメンテナンス

ターゲット近辺の非常に高い放射線レベル内に設置される機器は、人が近づくことは不可能であり、故障 した場合、現場での修理はとてもできない。そのようなところに設置する機器は、高放射線下でも壊れにく いものにし、そして、万が一壊れたとしても遠隔からすばやく交換できるようなシステムにしなければなら ない。そこで我々は、次のように1次ビームラインを設計した。断面を図3に示す。非常に高い放射線環境 なので、一次ビームの通る電磁石は遮蔽体の底にあり、周りには分厚い既設のコンクリートに囲まれる。ビ ームライントンネル内の電磁石は完全無機で製作した。ビームライン上部は、可動鉄ブロック2m、可動コ ンクリート1mを積み、その上に人が近寄ってメンテナンスができるサービススペースを設けた。サービス スペースでは、電磁石の状態の確認や、配管水漏れなど軽故障の修理ができるようにした。また、コイルの 故障などの重故障の場合、冷却水、電力、信号をすばやく着脱し、電磁石を交換できるシステムを作った。 さらにビーム運転時にはその上にコンクリートシールドを積んだ。サービススペースまでの電力の導入は、 シールドを貫通して電力を供給するシールド貫通水冷バスダクトを用いて行った[5]。



Elevation: 2.9m/80m

図1. ハドロン実験施設



図2. ハドロン実験ホールの平面図



図3. ハドロン実験ホールの断面図

## 2 電磁石設計

1に述べたようなメンテナンス方針に即して、我々は以下のようにフルリモートの電磁石を設計した。我々の電磁石は、図4のような電磁石である。特徴としては、

口径:100-200mm

- 長さ:1000-3000mm
- 重量:20-40トン
- 電流:~3000A
- 電圧:~200V

大型、大電流であることが挙げられる。トンネルに置かれる部分は放射線で壊れないように完全に無機の電磁石であり、電磁石のコイル部分は、長年我がグループが開発してきた直接水冷 Mineral Insulation Cable(MIC)を用いたコイルを採用した[6]。図4に 3000A 用の MIC コイルの断面図が示してあるが、絶縁にMgOを用いている。コイルの無機化には成功しているので、これをどのように実装するか、また万が一壊れたときにすばやく交換できるシステムにすることが課題であった。

電磁石マニフォールド、及び電気端子はサービススペースに置き、サービススペースで、電気・冷却水・信 号をクイック着脱する。そのため、端末を約3.5m垂直上方に延ばす。電磁石端末の集合体を3.5m上 方に延ばす方法として、我々は電磁石チムニーという方法を採用した。本節では電磁石チムニーの詳細を述 べる。

# ー次ビームラインの典型的な4極MIC磁石



3000A級直接水冷MIC

図4. 一次ビームラインの典型的な4極電磁石

2.1 電磁石本体-サービススペースまでの配管配線リード(電磁石チムニー)

上述した通り、電磁石マニフォールドをサービススペースに置くので、1台につき約20水路40本の水路、及び電力導入端子を、電磁石からサービススペースまで3.5m延長する必要がある。電磁石からサービススペースまでの水路と電気導入行き帰りの集合体を、断面が長方形の箱に収め、隙間をコンクリートで埋めたものを煙突のように電磁石に立てる方法とし、これをチムニーと呼ぶことにした。まず、図5①のように水路用、電極用、信号用のステンレスチューブを実装した、約1600mm×約200mm×約3.5mで、厚さ12mmの鉄箱構造のチムニー箱を作った。次に、放射線遮蔽上高さ方向(約3.5mの方向)に隙間を作らないように、チムニー箱を立てて(図5②)上部から無収縮モルタルを流し固めた(図5③)。次に、電磁石の水路は、対地絶縁を施す必要があるので、チムニー箱に実装してある水路用のステンレスチュ ーブにクリアランスが1mmの円柱セラミックチューブを通し、その内側にさらにクリアランスが1mmのステンレスチューブを通し、三重管構造を作った(図5④)。この最も内側のステンレスチューブが電磁石につながる水路となる。電極は、もともと絶縁されている MICを±の2本を四角パイプ内(図5①)に通した。信号線も同じく、もともとセラミックヤーンで絶縁されている耐熱電線を通した(図5①)。チムニー箱の断面が横長の長方形なのは、周りの遮蔽体を積むときに便利なのと、磁石の背中を開けることで、吊り具の設置を可能にするためである。四極磁石のチムニーは、水路数が多く、端末を1つにまとめることが難しく、両側に2本のチムニーとした(図6④)。



図 5. 電磁石チムニーの作り方

2.2 電磁石本体 (ビームライントンネル部)

1. で出来上がったチムニー箱を電磁石の背中に立てて組み立てた(図6③)。チムニーのステンレスチュ ーブと電磁石端末を次の方法でつないだ(図6②)。コイルの銅からステンレスチューブへの変換は、銅-S US変換継手を用いた。銅-SUS変換継手はt2mmのステンレスチューブと銅ブロックに対してTIG 溶接にて突合せ溶接を行い、銅-SUSの溶け込みが0.8mm以上のものを採用した。銅-SUS変換継 手の銅とコイルは銅ろう付けを行い、銅-SUS変換継手のSUSとチムニー箱のSUSチューブは、現場 にて自動溶接機を用いて、突合せ溶接を行った。このようにトンネル内部には、継手などを置かず、全て溶 接・ろう付けにて製作した。コイルの水路、ブスバーなどは全て樹脂を使わず、碍子でサポートし、対地絶 縁を施した。コイルの水路のアウト側には、セラミックのバイメタル温度スイッチ(85℃で切れて電源を 落とす)を置き、信号線はチムニー箱に通したセラミックヤーンの耐熱電線にて取り回した。電磁石の背に は、後に述べる遠隔自動吊り具のためのスミ金具を置いた。チムニー上部には、水路の絶縁のためのセラミ ック絶縁管と電磁石マニホールド、電極、信号線を置いた(図6①)。図6の④、⑤のように、ダイポール、 Q磁石のチムニー化を完成させた。次の章からは、このチムニー電磁石のクイックシステムについて詳述す る。



図 6. 電磁石チムニートンネル部と全景

## 3 吊り具

非常に高い放射線環境のため、トンネル部に置かれる磁石は、玉掛けに行くことができない。そこで、我々 は、遠隔から自動で玉掛けできる装置を開発している[2,4]ので、これをチムニーに応用した。この自動玉掛 け装置ツイストロックは、図7のように、クレーンフックにかけ、電磁石の背中に装備した長穴のスミ金具 の穴に、ツイストロックで示されるきのこの頭のような形の吊り具が入り、遠隔操作盤から、電動でツイス トロックを回すことで、自動的に玉掛けできる装置である。この玉掛け装置に下向きポールを装備し、楔穴 めがけて上方から下ろしていくと、ツイストロックがスミ金具に入る仕掛けである。ツイストロックが無事 スミ金具に入ると、インターロックスイッチが押され、ツイストロックは回転可能となる。予め計算した重 心ポイントにスミ金具を設置し、5m上方から、ツイストロックを下ろし、双極約20トン、四極電磁石約 40トン共に遠隔から吊り上げることに成功した。



### 図7. 自動玉掛け装置

4 アラインメント

ビームを正確に輸送するためには、電磁石の高さ、位置を0.1mmの精度でアラインメントする必要が ある。ハドロン実験施設特有の事情として、将来ビームラインを増設していく可能性が高いため、将来の拡 張性を考え、ビームが出た後、非常に高い放射線環境であったとしても、電磁石を遠隔から精度よくアライ ンメントできる必要がある。そこで、我々は、ビーム軸にピボットと呼ばれる位置決めピンを500mmピ ッチで設置し、それを将来に渡り設置基準とするアラインメント方式を採用した。図8①のように、長さ3 200mm(z方向)×幅2000mm(x方向)×厚み30mmの鉄板に、幅中心にピボットと呼ばれる 位置決めピン(図8②)を500mmピッチで実装した敷板を準備した。敷板には、電磁石の設置中心にの ぞき穴を設けた。この敷板をハドロン実験施設の一次ビームラインを網羅するため、32枚設置した。

ビーム軸の電磁石中心にマーカーが打ってあるのでそれを基準にアラインメントを行う。

ビーム軸のラインを引き、左右ビーム軸±700mmにもラインを引く。これに対して敷板にもケガキを入れ、両者をセオドライトで合わせる。

電磁石中心のマーカーからビーム軸に垂直にケガキ線をひき、敷板の電磁石マーカーのケガキとセオドライ トで合わせる。

高さ方向は、レベルを用いて、スペーサー等により、ビーム高さ-1050mmの高さに調節する。

アラインメントが完了したら、アンカーで固定した。さらに、ピボット勘合時に、敷板が前後左右に動かな いように、図8③のようなストッパーで、4隅を固定した。 このピボットを永久基準として、電磁石やモニターなどを設置することにした。ピボットに対して、相手の 電磁石には、φ50の穴と、φ50の長穴を500mmの倍数の距離で設ける。両者の勘合で、設置精度0. 1mmを達成する。一方を長穴としたのは、季節の温度変化により、敷板そのものが伸びる、あるいは敷板 2枚にまたがって設置する場合、躯体の伸び縮みがあった場合でも、精度よく勘合できるようにするためで ある。これで、図8③のピボット許容±7mmの範囲に電磁石を落とし込めば、0.1mmの設置精度が保 証された。次に、±7mmの範囲に電磁石を誘導するガイドが必要である。図3の実験ホール断面図で判る ように、人間が近づけるのは、電磁石の位置から最低10m離れたところである。10m離れた位置でクレ ーンのみで誘導できるのは、目標に対して±5 cm程度である。また、隣接する真空ダクトとのクリアラン スは、±3 cmである。よって、我々は、±7 cmの許容範囲から、±7mmまでをガイドする、当て板ガ イドを採用した(図8④、④')。ビームライントンネル壁面を利用し、電磁石の4隅に、高さ3mの鉄チャ ンネルを、電磁石設置位置の±2 cmになるように設置した。鉄チャンネルの一番上には、5 cmを許容す る楔を設け(図8⑤)、クレーン操作の許容範囲とし、かつビームライントンネルに入ってから隣の真空ダク トに当たらないようにした。鉄チャンネルの一番下には、±2 cmから±7mmまでをガイドする楔(図8 ⑥)を設置した。実際に10mの高さからクレーン操作を行い、本アラインメントガイドにより、遠隔から 電磁石をピボット勘合することができ、最終的に0.1mmの精度で設置と取り外しに成功した。



図8. アラインメントガイド

5 冷却水、電力クイックコネクタ

サービススペースには、ビーム停止後シールドを開ければ人が近寄ってメンテナンスを行うことができる。

ここには、冷却水とコイルとを電気的に絶縁するセラミック絶縁チューブ、継手、電力導入端子を置き、 軽故障時の修理を行うことができる。また、重故障時、電磁石をすばやく取り外すときのため、冷却水、 電気、信号は、1回路1動作のクイックコネクタで着脱できるものとした。この章では冷却水、電力のク イックコネクタについて述べる。

5.1 冷却水

我々の冷却水の仕様は、以下である。

- ▶ 常用圧力: 2MPa(最高圧力 3Mpa)
- ▶ 常用温度: 20-70度(最高温度 100 度)
- ▶ 純水
- シール材はメタル

我々は次に述べるメタルシールレバーカプラを用いたクイックコネクタを開発し、実装した。メタルシー ルレバーカプラの詳細は、[3,4]に説明されている。図9にあるように、レバーカプラに山形の溝をつけ、シ ール材を750℃で焼鈍した銅のリングとし、レバーで締めて銅を0.2mm食い込ませてシールするもの である。このレバーカプラをステンレスのフレキシブルチューブに溶接し、電磁石とサービススペースをつ ないだ。サービススペース内にあるゲートバルブ、あるいはボールバルブで止水し、磁石とサービススペー スの両方についている水抜き弁から、フレキシブルチューブ内の水を抜いてから、メタルシールレバーカプ ラを取り外す。サービススペースには、無機化したストレーナ、目視点検用温度計、圧力計、0.1Mpa 以下で切れて電源を落とす差圧スイッチを電磁石毎に置いた。差圧スイッチとトンネル内の磁石につけた8 0度で切れる温度スイッチは、トンネル外の電源につなぎ、トンネル外で電磁石の異常を知り、電源を停止 するインターロックとした。



図 9. 冷却水コネクタ

5.2 電力

電力の仕様は以下である。

- ▶ 最大直流電流3000A
- ▶ 最大電圧200V
- ▶ 絶縁材は無機

我々は、図10のように、サービススペースとシールド外をつなぐシールド貫通バスダクト[5]と、電磁 石間を12mm×125mmの断面積の銅バスバーを電磁石の数だけ並べた。バスバーの絶縁は碍子とした。サ ービススペースの銅バスバーと、電磁石の接続には、3000A級イソギンチャク型コネクタで接続した。 イソギンチャク型コネクタは、[1]に詳述している。電磁石、サービススペース側には、70φの円柱があ り、図10右に拡大してある写真のように、上から、両端にスプリングのついた接触子が被さる形である。 丸型のコネクタは、円形方向に対して許容があるので、斜めの方向に接続するときには非常に有利である。 このコネクタの温度上昇は、ΔT=43度@3000Aである。



図 10. 電力コネクタ

## 6 まとめ

J-PARCハドロン実験施設の耐放射線電磁石チムニー及び、遠隔吊り具システム、電力・冷却水のクイックコ ネクタ他は、重大な技術的問題もなく、完成させることができた。本チムニー電磁石は、一次ビームライン で、6台、K1.8の2次ビームライン上流に7台実装され、良好に運転することができた。図11は、チ ムニー電磁石部分に鉄シールドが積載され、最後のコンクリートシールドが閉められる直前の写真である。 2009年の1月に50GeV陽子シンクロトロンからハドロンビームラインビームダンプまで輸送され、 2月にはターゲットが挿入され、2次粒子を実験エリアまで輸送することができた。今までのビーム運転で、 この電磁石システムで重大な問題は起きていない。



図 11. 一次ビームライン電磁石が完成し、シールドがほとんど閉まりつつあるハドロン実験ホール

## 参考文献

- [1] 田中万博 他, "KEK-JAERI Joint Project 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中間報告書", KEK Internal 2002-8 (2002) 1-196
- [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) 1-253
- [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) 1-301
- [4] E. Hirose et al., "Beam-Handling Magnet System for the J-PARC neutrino Beam Line", IEEE Transactions. on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2, pp. 1342-1345, June 2006.
- [5] E. Hirose et al., "Shield Penetrating Water Cooled Bus Ducts for Radiation Resistant Magnets", IEEE Transactions. on Applied Superconductivity, Vol. 18, No.2, pp. 1439-1442, 2008
- [6] K. H. Tanaka et al., "Development of radiation-resistant magnets for the J-PARC", IEEE Transactions. On Applied Superconductivity, Vol. 16, No.2, pp. 172-175, June 2006, and other references are there in.