

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400310

研究課題名(和文) 超耐放射線電磁石を用いた多目的高運動量ビームラインの設計

研究課題名(英文) Design of a multi-purpose high-momentum beam line using radiation-resistant magnets

研究代表者

高橋 仁 (Takahashi, Hitoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：60353372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：1次陽子ビームと2次粒子ビームの両方を切り替えて提供することのできる新しい高運動量ビームラインを実現するため、そのビーム分岐部について詳細な設計、検討を行った。特に、分岐部は高い放射線環境に晒されることから、機器の交換やメンテナンスを行う際の作業者の被曝量を低減させることに主眼を置き、遠隔からの機器の出し入れや、配線、配管、真空の迅速な脱着を行うのに必要な技術開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to realize a new high-momentum beam line which can serve a wide variety of beams, including primary protons and secondary particles, we designed the beam-splitting section of the beam line in detail. Since the beam-splitting section is expected to be under high radiation environment, we focused on reducing the radiation exposure during exchange and maintenance work of the beam-line components. We developed remote handling technique, such as installing/uninstalling of the components remotely and connecting/disconnecting water pipes, power cables and vacuum pipes quickly.

研究分野：実験核物理

キーワード：ビームライン 耐放射線電磁石 リモートハンドリング

### 1. 研究開始当初の背景

J-PARC ハドロン実験施設において、「high-p ビームライン」と呼ばれる、既存の1次ビームラインの途中(SM)から分岐する新しい1次ビームラインの建設が計画されている。このhigh-p ビームラインは、1次陽子ビームを分岐して既存ビームラインと同時に運転する使い方以外に、 $\mu e$  転換探索実験(COMET 実験)のエリアへは分岐せずに全ての1次陽子ビームを輸送する使い方もある他、将来は分岐点SMに2次粒子生成標的を置いて、既存のビームラインよりも高運動量の2次ビームを提供することも計画されている。これらのビームを取り出すには、それぞれに専用の電磁石をSMに設置する必要がある。これらの電磁石に必要な耐放射線性コイルは、研究代表者が過去に行った研究開発によって製造技術が確立されている。しかしながら、このような多くの機能を実験のプログラムに合わせて切り替えながら運転するには、その電磁石の交換にかかる人的、時間的コストが問題となっていた。

### 2. 研究の目的

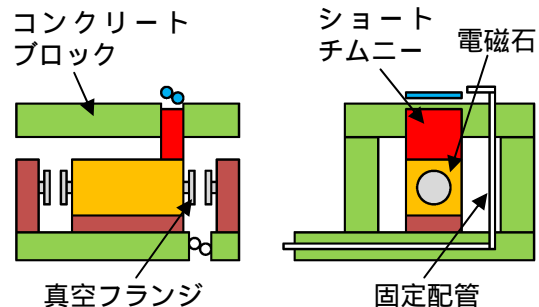
本研究の目的は、多様なビームを提供できるビームラインを実現するため、機器の切り替えコストを最小限に抑えるための技術開発を行い、実際のビーム分岐部の詳細な設計を行うことである。

ビームライン分岐部SMは、2次ビーム取出し時には最大15kWロスの生成標的が置かれる他、1次陽子ビームを分岐する際にも分岐用電磁石はその構造上必ずビームの一部が磁極に当たって散乱されるため、周囲の残留放射線量は数十 mSv/h のレベルになると見積もられている。従って、電磁石の切り替えやメンテナンスは極力遠隔で行うことが必須となる。研究代表者らのグループでは、過去の研究開発において、ハドロン実験ホール内の1次ビームライン室を模したモックアップを建設し、電磁石のリモートメンテナンス等の技術開発を行った。実験ホールでは、ビームレベルから4m上の高さまで放射線遮蔽ブロックを積み、その上のメンテナンススペースから電磁石まで電力と水を供給する「チムニー」システムを構築した。しかし、実験ホールとビームライン分岐部SMとの最大の違いは、天井の高さ(天井クレーンの揚程)である。低いクレーン揚程でいかにリモートメンテナンスを実現するか?この最大の問題を克服することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

実際の配線、配管、真空接続、電磁石の出し入れといったメンテナンスの作業性を検証するためには、対象物のサイズ、重量が実機と同じものでなければ意味がない。そのため、ビームライン分岐部SMのトンネル構造を模したモックアップ(下図)を高

エネルギー加速器研究機構北カウンターホール内に建設し、電磁石のリモートメンテナンス等の試験を行った。モックアップの建設には、過去の実験ホールモックアップで使用したチムニー電磁石試作機を改造し、ホールよりも天井の低いトンネルに合わせてチムニーを短くして使用した他、遮蔽ブロック、遠隔玉掛装置、大電流用クイックコネクタ、冷却水クイックカプラ、冷却水・電源設備等、これまでの研究で試作、使用してきた既存品を極力再利用した。このモックアップにおいて、あるいは一部可能なところは実際のトンネル内において、電磁石や付随する機器の出し入れ方法、配線・配管方法等について検証するとともに、それらを実現するために必要なデバイスの設計開発を行った。特に、壁際に位置する本流側の電磁石と、後積み遮蔽ブロックに隣接する分流側の電磁石とでは配線・配管経路が異なるため、それぞれ別々に検討した。



分岐部モックアップの模式図と写真。写真は天井のコンクリートブロックを積んでいない状態のもの。

### 4. 研究成果

#### (1) 電磁石

北カウンターホール内に建設した分岐部モックアップにおいて、電磁石のリモートメンテナンス等の試験を行った。配管・配線経路を何回か作り直しながら、その作業性や周囲との干渉等を検証した結果、本流側と分流

側の両方について、SM 専用のショートチムニー型電磁石やその配線・配管方法の仕様を決定することができた。特に分流側については、メンテナンス時の電磁石の移動のために隣接する後積み遮蔽ブロックを移動可能なようにする必要があるため、このブロック上に設置される配線・配管を短時間に撤去し再現性良く復旧できるような構造を開発した。具体的には、後積みブロックに配管とブスバーを固定して全て一緒に移動できるようにした上で、そのブロックを再現性良く設置できるように位置決めピンを床に設置した。また、ブロック上の配管、ブスバーと電磁石本体との間だけでなく、床の固定配管、ケーブルとの間にも即脱着コネクタを採用した。

本流側、分流側の両方に共通するデバイスとして、電力コネクタの改良を行った。電力コネクタとしては 2000A 程度までに対応する即脱着式のものがすでに開発されていたが、将来 SM に生成標的を配置した時に NOx 等の腐食性雰囲気晒されることを考慮して、耐食性を高めたコネクタを試作した。

SM 部の電磁石本体の出し入れを遠隔で行うため、同モックアップにおいて既存の遠隔玉掛装置を用いて実際に電磁石の吊り上げ試験を行った。その結果、これまでの電磁石のように真上に吊り上げるのではなく、一度真横にスライドさせてから上に吊り上げることで、隣接する機器との接触を避けながら遠隔操作で吊り上げられることが分かった。これにより、SM における電磁石の架台の仕様を決定することができた。

## (2)真空機器

遠隔から電磁石の出し入れをする際、真空ダクトの着脱が問題となる。遠隔脱着が可能な真空接続機器として、ピローシール(圧縮空気でステンレスのフィルムを膨らませて対向フランジと接触させることで真空封止し、取り外す時は逆に真空に引いて縮めるもの)が実用化されているが、トンネル内のスロープ上に位置する SM で使用するには、フランジの向きが鉛直でないために出し入れの際に必要なクリアランスを大きくする必要があり、そのために、たわみが小さくて伸縮幅の大きいベローズを試作し、試験を行った。これにより、必要なクリアランスを確保できる大伸縮型ピローシールを製作する技術的な目途が立った。

一方、実際の機器配置の設計検討が進んだ結果、一部の箇所、ダクトの構造と空間的な制約によりピローシールの適用が困難であるため、直接人の手で真空接続をせざるを得ないことが分かった。そこで、メンテナンス時の被曝をなるべく低減させるために、より短時間に真空接続が可能となるような当該箇所専用の治具を開発し、実際に接続試験を行った。

## (3)遮蔽体

磁石と隣接する遮蔽ブロックについて、磁石のメンテナンスと両立するように寸法形状や積載方法を設計し、実際にビームライントンネル内で積載試験を行った。当初は、電磁石のチムニー部と遮蔽ブロックとの隙間が狭すぎて人が長時間間近で作業する必要があり被曝量が増大する危険があったが、ガイド治具を取り付けることでそれを解決できた。

以上の研究開発により、ビームライン分岐部 SM におけるビームライン機器の交換・メンテナンスシナリオをほぼ確立することができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

H. Takahashi(1 番目), E. Hirose(3 番目), R. Muto(7 番目), H. Watanabe(17 番目)他 17 名, "Development of Large-Current Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol.26, No.4, pp.4001204-1 - 4, doi: 10.1109/TASC.2016.2516591 (2016 年、査読有)

R. Muto(1 番目), E. Hirose(5 番目), H. Takahashi(16 番目), H. Watanabe(19 番目)他 16 名, "Development of Lambertson Magnet and Septum Magnets for Splitting 30-GeV Proton Beam in Hadron Experimental Facility at J-PARC", IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol.26, No.4, pp.0603904-1 - 4, doi: 10.1109/TASC.2016.2536560 (2016 年、査読有)

[学会発表](計3件)

E. Hirose(1 番目), H. Takahashi(2 番目), R. Muto(8 番目), H. Watanabe(11 番目)他 10 名, "A Remote Handling Magnet System in a branch region of a new primary beam line at the J-PARC Hadron Facility", 24th International Conference on Magnet Technology, 2015 年 10 月, ソウル(韓国)

H. Takahashi(1 番目), E. Hirose(3 番目), R. Muto(7 番目), H. Watanabe(17 番目)他 17 名, "Development of Large-Current Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnets", 24th International Conference on Magnet Technology, 2015 年 10 月, ソウル(韓国)

R. Muto(1 番目), E. Hirose(5 番目), H. Takahashi(16 番目), H. Watanabe(19 番目)他 16 名, "Development of Lambertson Magnet and Septum Magnets for Splitting 30-GeV Proton Beam in Hadron Experimental

Facility at J-PARC ”, 24th International  
Conference on Magnet Technology, 2015 年  
10 月, ソウル(韓国)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

高橋 仁 (TAKAHASHI, Hitoshi)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・准教授  
研究者番号：6 0 3 5 3 3 7 2

### (2)研究分担者

広瀬 恵理奈 (HIROSE, Erina)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・技師  
研究者番号：9 0 3 9 1 7 6 3

### (3)連携研究者

武藤 亮太郎 (MUTO, Ryotaro)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・助教  
研究者番号：5 0 3 9 2 1 4 7

渡邊 丈晃 (WATANABE, Hiroaki)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・准教授  
研究者番号：0 0 4 1 5 0 4 3