

LARGE VACUUM CHAMBER "PENTAGON" AT J-PARC HADRON TARGET STATION

Hitoshi Takahashi^{1,A)}, Keizo Agari^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Masami Iio^{B)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yoji Katoh^{A)},
Akio Kiyomichi^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Megumi Naruki^{A)}, Hiroyuki Noumi^{C)},
Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Yoshihiro Suzuki^{A)}, Minoru Takasaki^{A)},
Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}

^{A)} Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{C)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

The target station in the hadron experimental facility at J-PARC consists of a production target and a large vacuum chamber. The chamber involves a beam collimator and three secondary-beam-line magnets. This vacuum chamber system aims to remove the vacuum beam pipe from the magnet gap, because the cooling of the beam pipe is the most serious problem in the high intensity beam facility. In order to reduce the residual radiation dose during maintenance, the chamber lid and feedthroughs are 4 meter above the beam line, and radiation-shielding blocks are also stacked in the chamber. Therefore, the chamber has a large size of about 5.7 m in height and 29 m³ in volume.

J-PARCハドロンターゲットステーションにおける 大型真空箱"ペンタゴン"

1. ハドロンターゲットステーション

現在茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ハドロン実験施設^[1]には、最高で50GeV、750kWの大強度陽子ビームを二次粒子生成標的T1に当て、そこから発生するさまざまな二次ビームを用いて原子核素粒子実験がおこなわれる予定である。その生成標的T1は30%ビームロス相当の物質質量を持つため、そこで750×0.3=225kWのビームパワーが開放されるが、標的自身に落とされる熱量は高々10kW程度である。残りの200kW以上は下流のビームライン機器に分散することになる。特に、磁極よりもビーム中心近くに位置するビームパイプの冷却が、トリチウム生成の問題もあるため極めて困難である。そこで、磁石の中にビームパイプを入れるのではなく、大型の真空箱の中にコリメータや電磁石全体を入れてビームパイプをなくすことにした^[2]。

図1がハドロンターゲットステーションのレイアウトである。図左の標的から、K1.8、K1.1、及びKLという複数の二次ビームラインが伸びている。標的の直後に描かれている五角形が大型真空箱（通称"ペンタゴン"）であり、この中に第1コリメータと3台の電磁石が収納される。ビームから4m上のレベル

に「サービススペース」と呼ばれるメンテナンスエリアがあり、電気や冷却水はこのサービススペースから各機器に供給される。サービススペースの残留放射線量を十分低くするために、ビームとサービススペースとの間には鉄2mとコンクリート1mの遮蔽ブロックが置かれる。

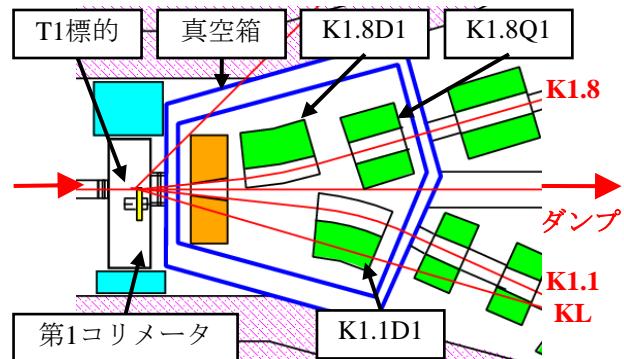


図1：ハドロンターゲットステーションのレイアウト

¹ E-mail: hitoshi.takahashi@kek.jp



図2：真空箱“PENTAGON”の設置前の入射面（左）と設置後の出射面（右）

2. 大型真空箱 “PENTAGON”

真空箱の設計においてポイントになったのは、蓋の高さをいくらにするか、であった。蓋自身の開け閉めのほか、電磁石用電力配線や冷却水配管、信号配線の脱着など、蓋に対してはオンハンドでの作業が多くなる。そのため、蓋はサービススペースの高さに置き、そこまでの遮蔽ブロックも真空の中に入れることにした。その結果真空箱は、高さ5.7m、容積29m³、本体のみの重量49tという巨大な構造物となった（図2）。ビームの高さは底面から1mである。各面の肉厚は、底面75mm、蓋55mm、5面の壁は45mm（ただし、入射面の一部は散乱粒子による発熱を抑えるため薄い）であり、入射面のフランジがアルミA6061である以外は全てSUS304で出来ている。5面の壁の内側には、放射線遮蔽のために、ビームより1m上からサービススペースの高さまで、厚さ85～105mmの鉄の厚板をボルト締結で貼り付けている。

本真空箱は、ビームライン機器の間隔の狭さや遮蔽のしやすさから、全て平面構造になっている。そこで、内部を真空中に排気した時の変形がどの程度になるか、3次元の有限要素法によりあらかじめ計算し、また実際に測定も行った。測定は、最も面積の広いK1.8側面の中心から高さ方向に1列ダイヤルゲージを並べて、変位量の分布を測定した。その結果が図3である。当初は外側にリブのない構造で計画していたが、計算よりも大きく変形が起きてしまったため、3本のリブを付け加えることにした。その結果、変位量は半分に抑えることができた。実測値と計算値とのズレは、内部構造（特にボルト締結部）のモデル化が難しかったためと思われる。

3. 内部モジュール

真空箱内には、第1コリメータ、電磁石3台、及びドリフト部遮蔽体の計5台のモジュールユニットが収納される。どのモジュールも、ビームライン機器本体は真空箱底面から2mの範囲に収まり、その上に高さ2mの鉄遮蔽体と0.8mのコンクリート遮蔽体、0.2mのアルミ遮蔽体、及び真空フランジが取り付け

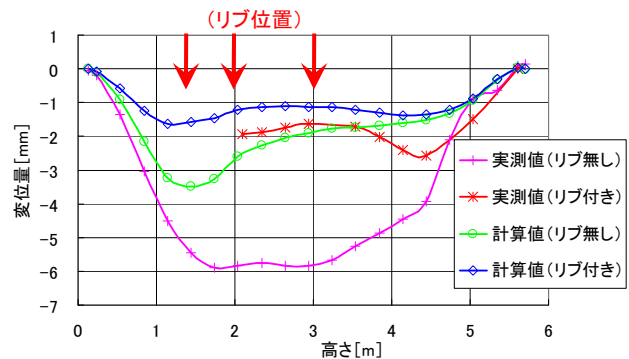


図3：K1.8側面変位量の高さ方向分布

られている。機器本体とその上部の2mの鉄遮蔽体、及び最上部の真空フランジが一体で吊り上げられる構造になっている。各モジュールは互いに独立しており、他のモジュールは動かさずに必要な1台だけ出し入れすることが可能である。メンテナンス鉄遮蔽体の上面には、ツイストロックと呼ばれる遠隔玉掛け装置^[3]に対応した嵌合穴が設けられており、クレーンの遠隔操作でモジュールの吊り上げが出来る。

3.1 第1コリメータ

第1コリメータ^[4]の主な目的は、T1標的の直下流に位置する2次ビームライン最上流電磁石を、標的からの膨大な放射線と熱から守ることである。磁石の代わりにコリメータが受け止める熱量は約50kWにもなるため、水冷が必要である。しかし、冷却水中で大量のトリチウムが生成されてしまうので、熱伝導の良い無酸素銅のブロックで本体を構成し、ビーム中心より遠い外周部を水冷する。冷却方法は、BTA(Boring and Trepanning Association)によって銅ブロックにφ18mmの深孔をあけ、そこに水を直接流して冷却する方式を採用した。銅本体は、上下2段、前後2段の計4個のブロックから成り、厚さは上流側250mm、下流側150mm、幅は上段1000mm、下段1100mm、高さはどれも485mmである。左右に二次ビームが取り出されるため、ビームの通る開口部は横に長く、入口が横214mm×縦43mm、出口が横355mm×縦67mmというテーパ型になっている。

3.2 K1.8D1電磁石

2次ビームラインK1.8の最上流電磁石であり、T1標的に最も近くに置かれる電磁石である。ギャップ80mm、磁極幅250mm、中心軌道長800mm、偏向角10°のC型偏向磁石で、定格1000A通電時の中心磁場強度は1.38Tである。2次粒子生成標的の下流という高放射線環境に晒されるため、コイルを始めあらゆる部品が無機物により作られている。

コイル導体には、中実型の無機絶縁ケーブル (Mineral Insulation Cable、MIC) を用いた。このMICには、通常使われるホロコンにあるような、水を通すための穴が開いていない。これは、ホロコンのように導体の中に水を通すと、電気と水とを分

けるためにセラミックの絶縁チューブを用いる必要がある、このセラミックチューブの機械的強度や絶縁の信頼性が磁石全体の弱点となっていたのを改善するためである。本コイルでは、電気を通す導体とは完全に独立して冷却水を通すシームレスSUSチューブを巻き、MICの層とSUSチューブの層とを交互にSUS容器の中に積み重ね、その容器内全体を半田で満たして熱伝達経路を確保する。このような間接水冷型コイルを真空中で使用する場合、半田で埋められない末端部を除熱できない問題があったが、我々は、末端構造の最適化や輻射率の向上により、真空中で十分安定に1000Aの大電流を通電することに成功した^[5]。

鉄芯は、耐放射線性と真空中でのアウトガスを考慮して無電解ニッケルメッキを行った。上流に置かれる第1コリメータで守られるとは言え、鉄芯も散乱粒子により発熱する。そのため、シームレスSUSチューブに銅板をロウ付けした冷却パネルを鉄芯に取り付けて水冷している。

3.3 K1.8Q1電磁石

K1.8D1電磁石の直後に置かれる収束電磁石である。1次陽子ビームとの干渉を避けるため、鉄芯は8の字型で、1次ビーム側には上下磁極間のスペーサもない構造になっている。ボア径φ160mm、磁極長600mm、定格1000A通電時の磁極表面磁場強度は0.72Tである。

本電磁石においても、コイルには中実型MICを用いた間接水冷型を採用した。また、鉄芯もD1と同じく、無電解ニッケルメッキを行い、冷却パネルを取り付けた。

3.4 K1.1ドリフト部遮蔽体

T1第1コリメータとK1.1D1との間の比較的長いドリフトスペースの上部を遮蔽するためのモジュールである。放射線遮蔽のための高さ2mの鉄ブロックを3本の支柱で支持する構造になっている。ビーム高さに位置する支柱は散乱粒子により発熱するため、SUSチューブを直接溶接して水冷する。この冷却水配管と、信号配線用ポートのついた真空フランジが最上部に取り付けられている。

3.5 K1.1D1電磁石 (ダミー)

2次ビームラインK1.1の最上流電磁石である。しかし、施設稼動開始時にはK1.8ビームラインのみしか建設されないため、K1.1D1設置場所の上部を遮蔽するだけのダミーモジュールを製作し、K1.1D1モジュールの代わりにインストールした。当初のビーム強度が低い時にしか使わないため水冷する必要はなく、そのため最上部の真空フランジも取り付けしていない。

実際のK1.1D1電磁石は現在製作中である。ギャップ100mm、磁極幅300mm、中心軌道長800mm、偏向角

18°のC型偏向磁石で、K1.8D1と同様に、間接水冷型MICコイルと冷却パネル付き無電解ニッケルメッキ鉄芯とで構成される。来春にダミーモジュールと交換する予定となっている。

4. まとめ

二次粒子生成標的直下流という極限的な高温・高放射線場において、特に冷却の困難なビームパイプをなくすため、大型の真空箱にビームライン機器全体を収納させる構成にした。メンテナンス時の被曝を抑えるため、鉄2mとコンクリート0.8m、アルミ0.2mの遮蔽ブロックも真空内に入れ、機器本体とその上部の鉄遮蔽体とが一体となって吊り上げられるようなモジュール構造になっている。モジュールは、第1コリメータと3台の電磁石、それにドリフト部遮蔽体を加えた計5台である。

ハドロン実験施設は、本年1月、2月に最初のビーム運転が行われ、その間、本真空箱と内部機器は非常に安定に動作し続けた。現在は最後に残ったK1.1D1モジュールを製作中であり、来春には真空箱内にインストールして全体を完成させる予定である。

謝辞

この研究は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B) No. 15740166、基盤研究(A) No. 15204024、基盤研究(B) No. 15340084、基盤研究(A) No. 17204019、及び基盤研究(A) No. 18204026の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] 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, August 2007.
- [2] H. Takahashi, et al., “Magnet Operation in Vacuum for High Radiation Environment near Production Target”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.16 No.2 (2006) pp.1346-1349.
- [3] E. Hirose, et al., “The Beam-Handling Magnet System for the J-PARC Neutrino Beam Line”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.16 No.2 (2006) pp.1342-1345.
- [4] 高橋仁他, “J-PARCハドロン実験施設におけるビームコリメータ”, 第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会報告集 (2008) pp.292-294.
- [5] H. Takahashi, et al., “Development of Indirect-Cooling Radiation-Resistant Magnets”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.18 No.2 (2008) pp.322-325.