

J-PARC ハドロン実験ホールのためのシールド貫通信号線ダクトの開発 DEVELOPMENT OF A SHIELD PENETRATION SIGNAL CABLE DUCTS FOR J-PARC HADRON EXPERIMENTAL HALL

広瀬恵理奈^{#,A)}, 青木和也^{A)}, 上利恵三^{A)}, 家入正治^{A)}, 岩崎るり^{A)}, 加藤洋二^{A)},
皆川道文^{A)}, 高橋仁^{A)}, 渡辺丈晃^{A)}
Erina Hirose^{#,A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Keizo Agari^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Ruri Iwasaki^{A)}, Yohji Katou^{A)},
Michifumi Minakawa^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}
^{A)} KEK

Abstract

Since the radiation level around the target becomes very high, the primary beam line tunnel needs to be surrounded by 2m-5m thick concrete shields in the J-PARC Hadron experimental hall. This structure, however, brought us a problem of installing electric power lines and signal cables to the magnets and the components in the beam line tunnel. As a solution to this problem, we have developed a signal cable duct filled by epoxy resin. Those signal cable ducts were embedded in a concrete block. We report the method of fabrication of the signal cable bus ducts, the airtightness test, and the installation of these components in the Hadron experimental hall.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設は、2009年1月にビームを受け入れてから、翌月に生成標的を入れ2次ビームを用いて実験を始めた。その後、図1のように、K1.8BR, K1.8, KL, K1.1BRの4本のビームラインが完成し、2次ビームを用いた実験が行われている。

大強度ビームを取り扱うハドロン実験ホールの一次ビームラインの電磁石は、強い放射線場において運転される。そのため、ハドロン実験ホールの一次ビームライン室の断面は、図2のようになっている。電磁石等の機器の置かれるビームライン室は、打ち込み遮蔽体の底にあり、上部に3mのシールドを積み、その上に機器をメンテナンスするためのサービススペースがある。このサービススペースで、冷却水・電力・信号を母線と結合する。ここで、サービススペースに母線である冷却水・電力線・信号線をどのように送り込むかというのは次の点で従来から課題である。

- 一次ビームライン室であるサービススペースと、遮蔽体の外側の実験室にある電源までをつながなければならないが、放射化した空気を遮蔽体の外側である実験室に出さないため、気密性が必要である。
- 放射線遮蔽する必要がある。
- 主に電力線のオーム発熱を除去しなければならない。
- 耐放射線性を有する絶縁材を使用する必要がある。
- 最短距離でコストを抑える必要がある。

ハドロンホール・一次ビームライン室平面図

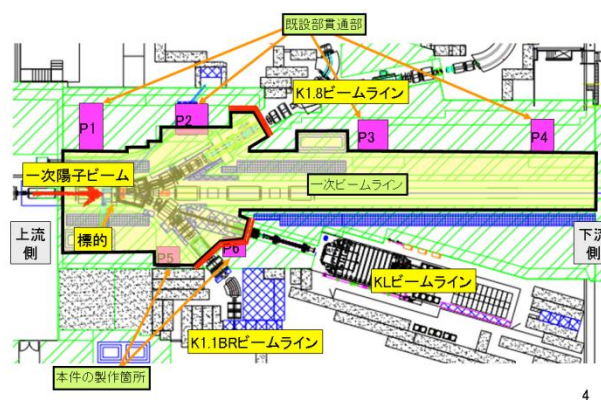


Figure 1: The floor plan of J-PARC Hadron experimental Hall.

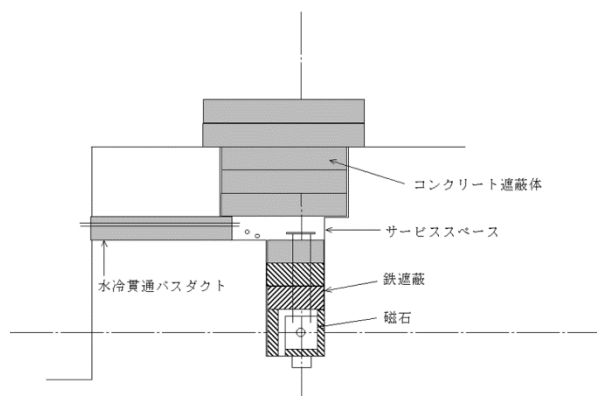


Figure 2: The cross section of the primary beam line at J-PARC Hadron experimental Hall.

[#] erina@post.kek.jp

ハドロン実験施設では、これを解決するため、電力線については、十分に絶縁された水冷バスダクトをコンクリートシールドに埋め込むという方法を採用した[1]。これは、上記課題をクリアしており、図2断面図に「水冷貫通バスダクト」と記載されているように、図1に示されるP1, P2, P3, P4の打ちこみ遮蔽体に既に埋め込まれている。これらは、ビーム受け入れ当初から運転されており、気密性も良好である。本件では、新たに、図1のK1.1BRビームライン用(P5)と、KLビームライン用(P6)のダクトを製作した。P5, P6は、電力バスダクトに加え、新たに信号線でも、同様の方法を用いることにより、単純かつ気密を確保できる信号線ダクトを製作したので、報告する。

2. 貫通ダクトの仕様

P5, P6の貫通ダクトに必要なケーブル、配管類の仕様は以下の通りである。

仕様

P5 コンクリート遮蔽長さ 1.9m

- K1.1ビームライン用信号線（インターロック用、スクロールポンプ用など）
0.75sq: 200本、3.5sq: 20本

P6用 コンクリート遮蔽長さ 2.7m

- KLビームラインD1電磁石(KLD1)用電力水冷バスダクト（+、-、予備：合計3本）
電流：2500A 電圧：130V
断面 54mm × 13mm × φ8（水冷穴）× 2本
- KLD1用冷却水配管 50A 2本
- 真空排気管 1本
- KLビームライン用信号線（インターロック用、ビームプラグ用、スクロールポンプ用など）
0.75sq: 200本、2.0sq: 20本

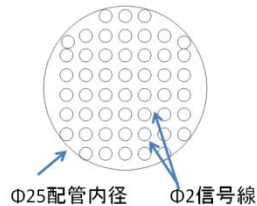
3. 信号線ダクト

この章では、新たなシールド貫通信号線ダクトの製作方法、及び気密テストについて述べる。信号線ダクトはできるだけ多くの本数を限られたスペース内に納めるため、1インチ配管1本につき、信号線50本を入れることを目標とした。図3に1インチ配管に、被覆を含めた信号線の直径約2mmを50本均等に入れた模式図を示すが、細かい隙間が多いことが分かる。気密をとるためには、流動性が高く、狭い隙間にも浸透する充填剤を選ぶことが必須である。充填剤については、電磁石コイルに使われ、浸透性が高く、絶縁性能、耐放射線性に関してもよく知られている、エポキシ樹脂を採用した。その中で、流動性の高い、ユニキャスト#1341を使用した。信号線被覆については、セラミック編組被覆線（図3右）を採用した。セラミック編組被覆線は、エポキシ樹脂の硬化温度に耐えられる耐熱性を持つ。編組であることから、被覆・内部銅線間にもエポキシ樹脂が

浸透すると期待される。また、絶縁性能も高く、放射線にも強い。

次から、本数が少ないところからサンプルを作り、エポキシ樹脂の浸透性や、気密性能を調べたことを報告する。

1インチ管に約2mmの直径の信号線を50本入れた場合の断面模式図



セラミック編組線



Figure 3: Left: The image of 50 signal cables in a 1 inch SUS pipe. Right: Ceramic felt wires.

3.1 サンプルテスト1

まず始めに、通常の電磁石コイルのエポキシ樹脂硬化方法と同じ方法、つまり乾燥炉に入れて80°C 4時間（真空含浸）+ 110°C 5時間の2段階硬化で、φ12mmの銅管を使用し、1本、7本の信号線を入れたサンプルを製作した。製作したものについて、端末の一方を加圧してみたが、全く圧力を保持できなかったため、サンプルを切断し、漏れ箇所を浸透探傷検査（カラーチェック）で調べた（図4参照）。これは、亀裂が入っている部分が赤色に染まるが、銅管とエポキシ樹脂との間、樹脂の割れ部分、信号線の周りで見られた。温度が均等に伝わっておらず、温度差で割れが生じている、エポキシ樹脂が狭い隙間に入らないまま硬化してしまっていることが分かった。

トライ1 真空中に引きながらセミキュア+キュア（熱硬化）
（φ12mm銅管にセラミック被覆線1本と7本）



Figure 4: The penetrant inspection of the 1 signal cable(Left) and 7 signal cables in a φ12mm copper pipe.

3.2 サンプルテスト 2

次のサンプルは、配管をφ12mmの銅管からφ15mmのSUS管に変更し、10本の信号線を入れたものを製作した。サンプルテスト1で、炉を温めるだけでは信号線ダクト全体の樹脂の温度が均一にならないということが分かった。そこで、図5のように、サンプルの周りに60-80°Cの温水を流す銅管を這わせ、アルミホイルを巻きつけることで積極的に温度を均一化することにした。その状態で乾燥炉に入れ80°C 4時間(真空含浸)+110°C 5時間の2段階硬化を行った。製作したサンプルについて、一方を加圧したが、やはり全く圧力が保持できなかった。切断して漏れ箇所を調査したところ、SUS管とエポキシ樹脂との間に、明らかな隙間が見えて、漏れがあることが分かった。ただし、そこをシリコンで塞ぐと圧力を保持した。今回は、温度を均一化することが出来、エポキシ樹脂が、信号線の周りによく浸透していることが分かった。



Figure 5: Left: A warm up equipment of SUS pipe by hot water. Right: The sample of 10 signal cables in a φ 15 SUS pipe.

3.3 サンプルテスト 3

次のサンプルは、1インチのSUS配管にほぼ実機に近い本数である40本の信号線を入れたものを製作した。管とエポキシ樹脂との間に隙間ができないように、硬化時に空気をよく抜くための空気抜き穴を増やした。気密試験を行ったところ、端末の一方を加圧したが、やはりまた圧力を保持できなかった。図6のように、断面切断を行い、漏れ箇所を探したところ、サンプル2と同様、管とエポキシ樹脂との間であった。ただ、実機に近い40本の本数であっても、サンプルテスト2と同様、線と線の間は、RTVゴムの塗布により、シールすることにより、圧力が保持できることを確認した。

トライ3 空気抜き穴を増やす 温水+セミキュア+本キュア 1インチ管40本



やはり管とエポキシの間で空気が漏れる。管とエポキシの間の隙間をシリコンを塗って気密試験を行うと、圧力を保持する。

Figure 6: The sample of 40 signal cables in a 1 inch SUS pipe.

3.4 実機製作とその気密試験

サンプルテスト3の方法で、1インチSUS管に50本の信号線を入れた信号線ダクトをP5に5本、P6に各5本製作した。図7にP5の実機を示す。

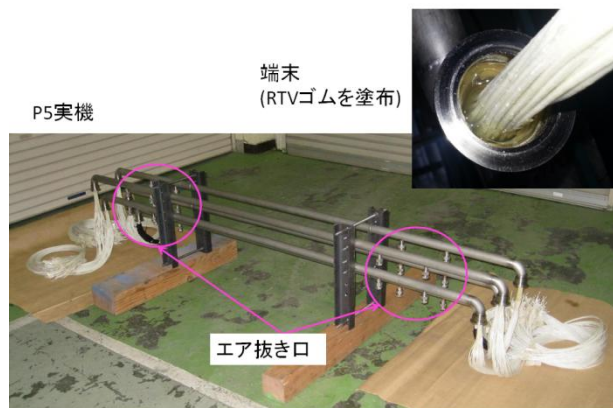


Figure 7: P5 signal cable ducts.

これら全ての信号線貫通ダクトについて、気密試験を行った。気密試験については、信号線ダクトの一方に、信号線が全て入るような配管を用意し、配管内をヘリウムで加圧し、その圧力変化を測定する方法(加圧法と呼ぶ)を用いた。ヘリウムの加圧圧力は、1kPa程度とした。セットアップを図8に示す。200kW運転時に、一次ビームライン室にて発生する気中の放射線核種が、施工箇所を通過したと仮定して、この通過量がホール内の実験エリアに拡散する場合にも、排気中濃度限度の10分の1を超えないことを要求し、

- ① $5 \times 10^{-2} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ 以下 (固定施工長 1m 辺り)

とした。P5, P6の全10本の信号線貫通ダクトについて

て気密検査を行った結果、全てにおいて、基準値を満たしていた。

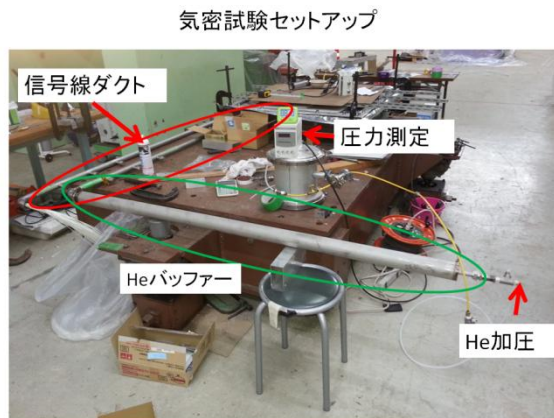


Figure 8: Set up of airtight test.

鉄筋組立(P5)



コンクリート打設後(P6)



Figure 10: Pictures of the cable ducts before (Left, P5) and after (Right, P6) being embedded in concrete blocks.

3. コンクリート打設

信号線ダクトについては、気密を確保することができたので、各信号線ダクトを既存の打ち込みコンクリートに埋めるため、コンクリートブロックとして成形した。P5 の場合は、気密試験をクリアした信号線ダクトを図7のようにチャンネルで組み立てた。また、P6 の場合は、図9のように、信号線ダクトを、真空排気管、冷却水配管、電力バスダクトと共に、チャンネルに組み付けた。その後、P5 の場合は、図10 左のように、周りに鉄筋を組み、図10 右のようにコンクリートブロックとして成形した。

これらのコンクリートブロックを設置場所に10mm の高さで設置、アンカー打設を行い、ブロックを固定した。そして、周囲を養生して、隙間10mm に流動性の高い無収縮モルタルを流し込み、硬化させた。モルタルが充填されたことが分かるように何か所かにモルタルが流れてくるポケットを設けて確認した。



Figure 9: P6 utility duct (signal cable ducts, electric power bus ducts, water pipes, a vacuum pipe).

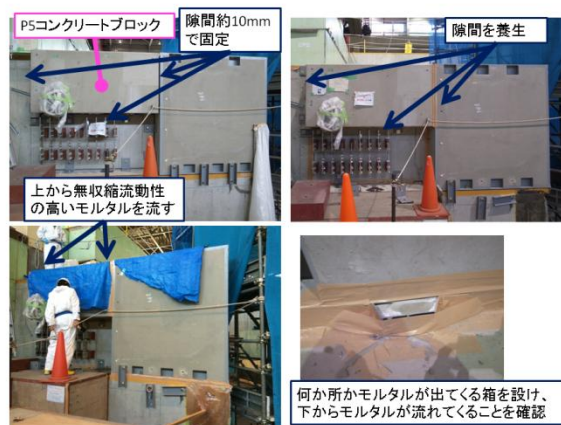


Figure 11: Pour mortar into the gaps between the P5 concrete block and the concrete walls surrounding the P5 block.

このように周囲のコンクリートブロック同士の隙間をモルタルで充填した後、気密試験を行った。コンクリートの場合は、前述した信号貫通ダクトのような気密試験方法はできないため、スニファー法を行った。スニファー法とは、図12のように、一次ビームライン側にヘリウムをある程度充填できるような空間を作り、その空間にヘリウムを流し込む。そして、実験室側において、ヘリウムリークディテクタのスニファーヘッドを用いて測定する方法である。これらの施工箇所について、測定を行ったところ、前述した①の基準値をクリアしていることが分かった。

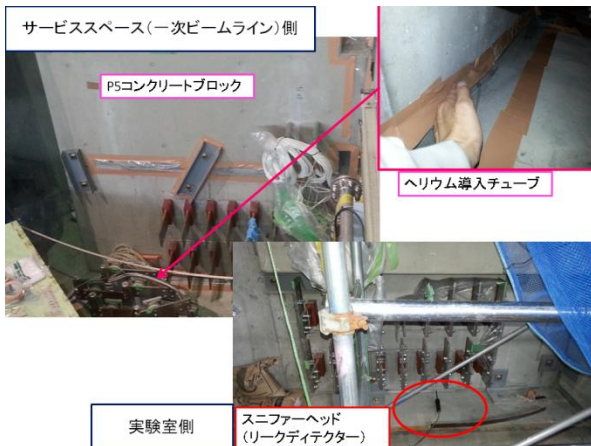


Figure 12: Set up of airtight test.

4. まとめ

1次ビームライントンネルと実験室をつなぐ電力、信号線を通す方法として、シールド貫通信号線ダクトを製作した。本数の多い信号線に対して、信号線間の隙間を塞ぎながらシールドを貫通させる方法として、セラミック編組線 50 本を 1 インチ配管に入れて、内部をエポキシで充填させることができた。管とエポキシ樹脂との隙間については、シリコンを塗布した。これについて気密試験を行ったところ、基準値をクリアすることができた。

このようにして完成した信号線貫通ダクトと、冷却水配管、電力バスダクト等をまとめてコンクリートブロックに成形した。コンクリートブロックを、一次ビームラインの壁に、一体化するため、隙間を流動性の高いモルタルで充填した。モルタル充填部についても気密試験を行い、基準値をクリアした。

今後のシールド貫通信号線ダクトの検討課題としては、配管とエポキシ樹脂との隙間をシリコンなしで埋め、さらに耐放射線性を上げることなどが考えられる。

参考文献

- [1] E. Hirose et al., "Shield Penetrating Water Cooled Bus Ducts for Radiation Resistant Magnets at J-PARC", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 1439-1442, 2008.