

低反力ベローズを有する大口徑セラミックスビームパイプの開発

LARGE APERTURE ALUMINA CERAMICS BEAM PIPE WITH LOW SPRING CONSTANT BELLOWS

神谷潤一郎^{#, A)}, 金正 倫計^{A)}, 阿部 和彦^{B)}, 比嘉 究作^{C)}, 小泉 歐兒^{D)}

Junichiro Kamiya^{#, A)}, Michikazu Kinsho^{A)}, Kazuhiko Abe^{B)}, Kyusaku Higa^{C)}, Oji Koizumi^{D)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency, J-PARC

^{B)} Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd.

^{C)} Mitsubishi Heavy Industries Mechatronics Systems, Ltd.

^{D)} Sun-tech, Ltd.

Abstract

The 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) in J-PARC aims to generate one of the highest power protons in the world, whose design extraction beam power is 1 MW. Beam pipes of alumina ceramics are used to prevent the induced current, which is caused by the rapid change of the magnetic field. In the beam injection section, ceramics beam pipes for a quadrupole magnet and a horizontal shift bump magnet are connected without bellows due to the very limited space. To improve maintainability, the ceramics beam pipes for the quadrupole magnet were newly designed. The end shape of ceramics unit duct was revised and 30 mm length are ensured to insert the bellows. The large aperture titanium bellows with low spring constant was successfully developed by performing several forming and heat treatment. Verification test for brazing of newly designed unit ducts and titanium sleeve was performed to examine the effect of the unique cross-sectional shape, racket shape fitting into 500 mm due to accept the injection beam and circulating beam passing through the injection quadrupole magnet. Good wettability was obtained by the vacuum improvement during the brazing. Deformation by the atomic pressure was within the elastic displacement.

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン(3GeV Rapid Cycling Synchrotron : RCS)は、 8.3×10^{13} の陽子を繰り返し周期 25 Hz で取り出すことで、ビーム強度 1 MW を出力する加速器である。25 Hz という早い繰り返しの磁場の変化による金属材料の発熱を防ぐために、電磁石に設置されるビームパイプの材料にはアルミナセラミックスを用いている[1, 2, 3]。RCS のビームパイプは、大強度陽子ビームをロスなく周回させるために、大きな開口を有することが特徴である。特に Figure 1 に示すビーム入射部は、リニアックからの入射ビームと RCS の周回ビームを受け入れるために開口系は直径 500mm にもなる。ただし、ダクトの開口形状は電磁石に合わせて矩形やラケット型形状等、いくつかの種類がある[2]。入射部における懸案事項は、装置が密集しているため、保守作業を円滑にするうえで理想的な箇所にベローズが配置できていないことであった。具体的には Figure 1 A 部に記したように、四極電磁石用と水平シフトバンプ電磁石用のセラミックスビームパイプどうしがフランジを介して接続されている。我々は RCS の建設を通じて、大口徑の各種形状のアルミナセラミックスビームパイプ、および大口徑のチタン製低反力ベローズの製作についての知見を得た。今回それらを融合させ、アルミナセラミックスの形状を改良して長手方向に空間を作り、そこへベローズを挿入するという新しい構造のアルミナセラミックスビームパイプの製作を行うこととした。シフトバンプ電磁石用セラミックスビームパイプについては、フランジ温度がコイルからの漏洩磁場による発熱で、現

状で 120 °C にもなっていることから、これ以上短くするのは望ましくない。そこで、四極電磁石用セラミックスビームパイプに対して、ベローズを有する構造を適用することとした。本報告では、保守性を向上させるためにベローズを有する構造へ改良した四極電磁石用大口徑アルミナセラミックスビームパイプの開発について、設計思想、課題、および各コンポーネントの検証について現状を述べる。

2. ベローズを有する四極電磁石用大口徑セラミックスビームパイプの設計

Figure 2 に現行および新たに設計した四極電磁石用セラミックスビームパイプを示す。RCS のセラミックスビームパイプは複数個のアルミナセラミックス製ユニットダクトとチタン製スリーブをロウ付け後、スリーブにチタン製フランジを溶接する。一般的にアルミナセラミックとの接合には用いるコバルトは強磁性体であることから、電磁石用ビームパイプとしては使用できない。そのため、熱膨張率がセラミックスに近い金属であるチタンを用いている。また、チタンは低放射化材料であるという利点もある。今回もその構造は踏襲した。改良点は、先に述べたことも含め、以下の二点である。

- 端部ユニットダクトの形状変更により確保した空間へのベローズの挿入
 - ユニットダクトの長さ拡大によるロウ付け個所の低減
- 一つ目の改良点の目的は先に述べたように、保守時におけるビームパイプの取り外し、取り付けの作業性を向上することである。二つ目の改良点の目的は、ユニットダクトのロウ付け時の接合不良の可能性を、極力低減する

[#] junichiro.kamiya@j-parc.jp

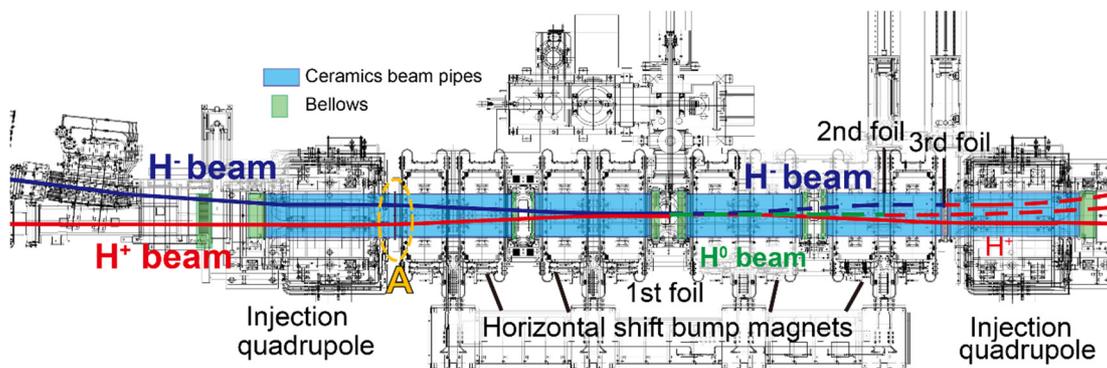


Figure 1: Equipment layout of the beam injection area in J-PARC RCS.

ためである。これまで多種のセラミックスビームパイプの製作において、ロウ付け接合個所のリークやロウ付け付近の破損がいくつか発生した経験から、ロウ付け箇所を極力減らす方針とした。

必要がある。また、新形状のユニットダクトどうしおよびチタンスリーブのロウ付けも開発・検証項目の一つである。さらに、今回用いるセラミックス材料は、RCS 建設時期で用いたいくつかの種類セラミックスとはメーカーが異なるものであるので真空特性について検証する必要がある。次節ではこれらのコンポーネントの開発と検証について述べる。

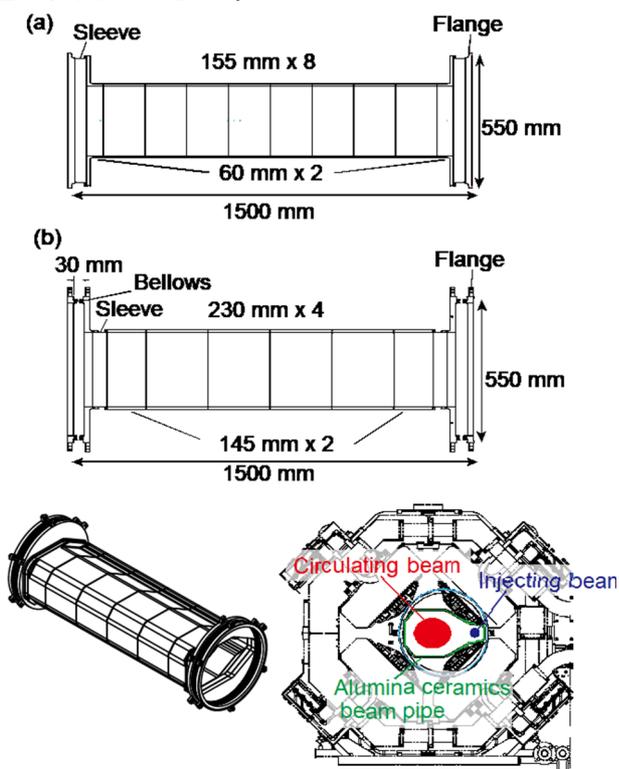


Figure 2: Configuration of the (a) existent and (b) newly designed alumina ceramics beam pipes for the injection quadrupole magnet. Position relation to the magnet is also shown.

この改良に伴い、いくつかの開発・検証項目が発生する。まずは新形状のユニットダクトの製作可能性である。これについては、セラミックスメーカーの多大な御尽力の結果、寸法精度が非常に良いものが製作できた。従来は、ペアリングと呼ばれるユニットダクトどうしの寸法差による接合部の段差を低減するために、並び順を決定する作業が必要であったが、その作業を省略することができる精度(±0.1 mm 未満)での仕上がりがであった。次に、ベローズの開発である。ユニットダクトの形状変更により確保した、短い空間に収まる大口径のベローズを製作する



Figure 3: Large aperture titanium bellows with low spring constant.

3. 各コンポーネントの開発・検証

3.1 ベローズの開発

Figure 2 に示したように 30 mm という非常に短い空間に入る、20 mm 程度の伸縮量を持つ内径 495 mm のベローズが必要である。ベローズの材質は低放射化材であるチタンを用いる。短いベローズ長で低反力と伸縮量が必要な場合、一般的には溶接ベローズを用いる。しかし溶接ベローズは溶接部が脆弱であるという問題がある。そのため RCS では液圧もしくは機械成型でバネ定数の小さいベローズを開発した[4]。今回もその知見を基に、成型と熱処理を複数回行うことで、30 mm のベローズ長に 10 山のベローズを成型することに成功した。Figure 3 にベローズの写真を、Figure 4 に反力の実測結果を示す。

大口径ながらも 100 N/mm 程度と、人力で伸縮が十分可能なほど柔らかいベローズが実現できた。

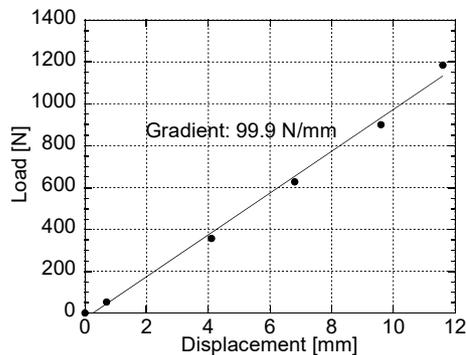


Figure 4: Measurement results of spring constant of the titanium bellows.

3.2 ロウ付けおよび接合後の構造の検証

ロウ付けは複雑な形状のユニットダクト間およびユニットダクトとチタンスリーブ間の接合である。健全な接合が可能か、および接合した製品を真空排気した際に変形等の問題が起きないかの検証が必要と考えた。そこで、ユニットダクト 2 台とチタンスリーブを用いた接合試験、およびロウ付け後の試作品の排気試験を行った。しかし一回目のロウ付け接合試験において、ロウ材の濡れ性が悪いという問題が発生した。そのロウ付け条件で熱処理したチタンサンプルのオージェ電子分光法 (Auger Electron Spectroscopy: AES) による深さ方向の成分分析結果を Figure 5 (a) に示す。表面層から 500 nm まで炭化成分があり、酸化成分においては数 μm 以上ある。この変化した表面層がロウ材の濡れを妨げていたのである。原因を調査したところ、温度測定に用いていた熱電対の編組線被服からの多量の放出ガスが炭化、酸化に寄与していたことが分かった。そこで、熱電対に放出ガスが少ないステンレス製シース型を用い、チタンゲッター材を熱処理時に加熱炉のユニットダクト周辺へ入れることで、雰囲気ガスを低減する改善を行った。その場合のロウ付け条件で熱処理したチタンサンプルの AES の結果を Figure 5 (b) に示す。ロウ付け時の雰囲気ガスを低減することで、酸化被膜は 10 nm 程度、炭化層は 5 nm 程度まで低下したことがわかる。この真空改善によりロウ材の濡れ性は健全となった。

Figure 6 にユニットダクト 2 個とチタンスリーブのロウ付けを行った試作品の写真を示す。ヘリウムリーク試験の結果、リークディテクター検出感度の下限値である $10^{-11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 未満のリーク量であった。Figure 7 に真空排気した際の各点における変位量測定、セットアップおよび測定結果を示す。チタンスリーブ先端部は実際のビームパイプではフランジが溶接される。本測定では、はめ合い治具を用いて先端が大気圧により変形しないようにした。当然のことながら長辺の変位量は大きいですが、チタンスリーブ、ユニットダクトとも変位量は最大でも 0.6 mm 未満であった。繰り返しの真空排気においても変位量は再現し、弾性変位の範囲内であることが確認できた。

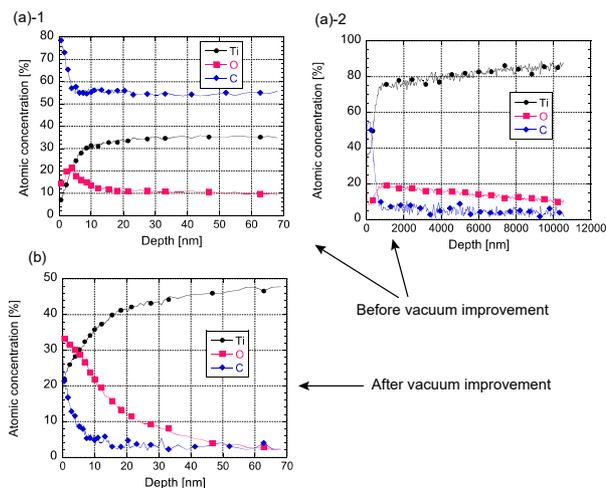


Figure 5: AES depth profile on Ti surface after treatment of brazing condition (a) without and (b) with vacuum improvement.

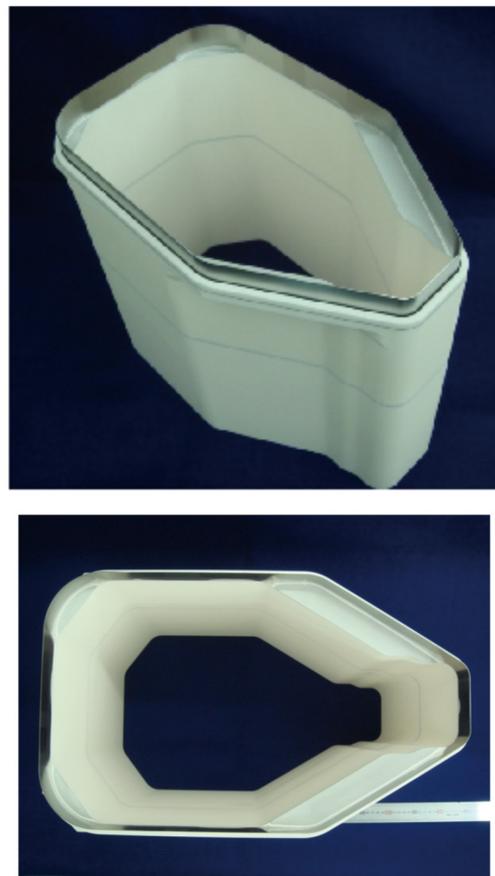


Figure 6: Trial product of ceramics unit ducts and titanium sleeve for the injection quadrupole magnet.

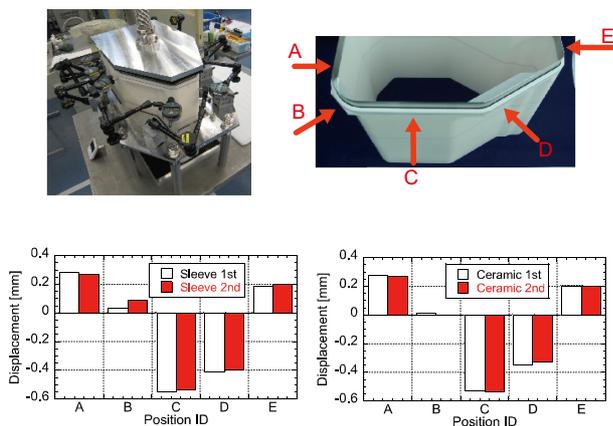


Figure 7: Measurement setup and measured results of displacement of new design ceramics unit ducts and titanium sleeve due to the atomic pressure.

3.3 材料の真空特性

今回用いたセラミックス材料について、ユニットダクトと同条件で焼成、研磨したサンプルを用いて放出ガス速度の測定を行った。結果を Figure 8 に示す。比較のため既存のビームパイプで用いているセラミックスの測定結果も併せて示す。実際のビームパイプでは、ユニットダクト内側に二次電子放出を低減するために TiN を 100~150 nm コーティングする。同条件でコーティングしたサンプルについての放出ガス速度も示す。大気圧から 100 時間程度の排気により、アルミナセラミックスは 10^{-8} Pa m³/s m² 台前半、TiN コーティングしたものは 10^{-9} Pa m³/s m² 台の単位面積当たりの放出ガス速度という結果である。これは、一般的な超高真空材料と同レベルの放出ガス速度である。

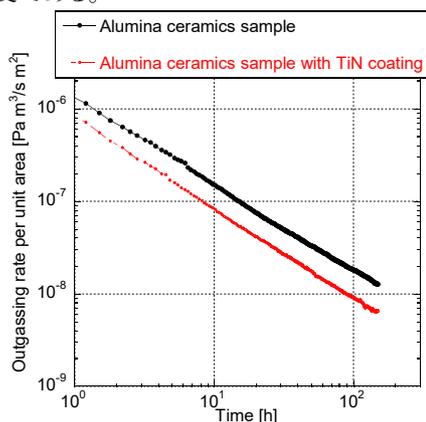


Figure 8: Measured outgassing rate per unit area of alumina ceramics. The measurement result of alumina ceramics with TiN coating is also shown.

4. まとめ

J-PARC 3GeV シンクロトロンにおいて、ビーム入射部の保守性を向上させるため、ベローズを有する四極電磁石用アルミナセラミックスビームパイプを

開発した。端部ユニットダクトの形状変更により確保した空間へベローズを挿入するとともに、ユニットダクト長を拡大することでロウ付け個所が少ない構造を設計した。長さ 30 mm という制限のもと、低反力の大口径チタン製成形ベローズの開発に成功した。また、複雑な形状の影響を評価するために、実機と同形状のユニットダクトとチタンスリーブを用いた接合試験および真空排気試験を行った。ロウ付け時の真空環境を改善することで、ロウ材が十分に濡れ、リークがない接合を達成できた。また接合品の真空排気による変位も問題ないことを実証した。近日中にユニットダクト 6 台とチタンスリーブ 2 台のロウ付けおよびベローズの溶接を行い、実機の製作を完了する予定である。

謝辞

本開発におけるセラミックスユニットダクトの製作にあたっては藤岡様、西様、大野様をはじめとする(株)フェローテックセラミックスの方々の高い技術力に支えられました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Saito, M. Kinsho, and Z. Kabeya, Production process of alumina-ceramic vacuum chambers for J-PARC, *Journal of Physics: Conference Series* **100** (2008) 092020.
- [2] M. Kinsho, Y. Saito, Z. Kabeya, and N. Ogiwara, Titanium flanged alumina ceramics vacuum duct with low impedance, *Vacuum* **81** (2007) 808.
- [3] Z. Kabeya, M. Kinsho, and Y. Saito, Production of ceramics duct for the J-PARC, *Journal of the Vacuum Society of Japan* **49** (2006) 343.
- [4] N. Ogiwara, in *Proc. IPAC'11*, 2011, pp. 971-975.