

J-PARC 3GeV シンクロトロン真空システムの維持管理 SUSTAINMENT OF VACUUM SYSTEM IN J-PARC 3GeV RAPID CYCLING SYNCHROTRON

山田 逸平*, 神谷 潤一郎

Ippei Yamada*, Junichiro Kamiya

J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The vacuum system of the J-PARC 3GeV rapid cycling synchrotron (RCS) contributed to the stable 1-MW beam operation. The peculiarities in the RCS vacuum system are represented by a large-aperture and long alumina beam duct and a large-aperture low-spring-constant Ti bellows with a mesh-type rf contact. However, these components cannot be manufactured nowadays because of deteriorations of the manufacturing equipments. We have been re-developing these essential components to sustain the stable vacuum system. In manufacture of the alumina duct, the processes are improved based on the past experience in the construction period, and the new processes lead qualitatively good results, particularly in the brazing process, where all brazing planes are changed to on the horizontal. A new bellows made of titanium showed linear behavior in the shrink displacement against increase of weight and the spring constant of 33 N/mm. The spring constant of the rf contact had no linear regime, but the constant is enough lower, such as less than 15 N/mm, than the one of the bellows in the range more than 1 mm displacement or 1 kg weight.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC は 3GeV シンクロトロンにおいて、1MW のビームを出力する加速器である。このような大強度出力は大電流かつ速い繰り返しにより実現されており、それを支える真空システムにはいくつか特殊な点がある。大電流なビームでも安定かつ安全にビームを輸送するために、ビームパイプ径を太くし、空間電荷効果の緩和やビームロスがコリメータ部へ局所化するようになっている。一方で速い繰り返しや多重入射を実現するためには高周波磁場が必要であり、このような電磁石の内部では金属チャンバが使用できない。そのため、電磁石中の真空容器はアルミナセラミック製のものを開発して使用している [1, 2]。セラミックチャンバがビームラインのおよそ半周を閉めるため、ビームパイプ締結後のベアキングは困難である。このような大容積かつ大ガス放出速度な系でも安定な真空を実現するために、ターボ分子ポンプを主排気装置として使用しており、実際に安定な 1MW 運転に貢献してきた [3]。

しかし、J-PARC は建設から 15 年以上が経過しており、世代交代や情勢の変化により予備品の調達に困難となっている。現在は特に、セラミックスビームダクトおよびチタンベローズの再開発、並びに熱陰極型真空計の生産終了への対応を行っている。また、より安定かつ高度な真空システムを実現するために、排気系の見直しおよび強化 [4]、耐放射線性を考慮した残留ガス分析装置の導入 [5] を進めている。本論文ではセラミックスダクトおよびチタンベローズの再開発に関する現状を報告する。

2. 再開発：アルミナセラミックスビームダクト

先述の通り、高周波磁場中での渦電流の発生を防ぐため、ビームダクトはアルミナセラミックで製作している。求められるダクト概形は、口径 200~500 mm、長さ 1~3.5m、並びに断面形状は円形、矩形及び、レーストラック型である。このような大口径かつ長尺なセラミックスダクトは単体としての製作が困難なため、長さ方向に数分割したユニットダクトと呼んでいるものを製作し、ろう付け接合することで長尺を実現している。

セラミックスダクトの製作工程は大きく、セラミックスダクトの成形及び焼成、ろう付け用メタライズ、内面 TiN コーティング、ろう付け、並びに外表面 RF シールド製作および設置、の五工程に分けられる。この工程のうちメタライズを除く四工程に関しては、建設時のメーカまたは機器・手法を用いた製作が困難となっており、予備品の調達が不可である。一方で、セラミックスダクトは種類が多く、予備品のない種類もあるため、製作手法の再確立は急務である。以下に各工程の課題と現状の開発状況を紹介する。

2.1 セラミックスダクト素管製作

セラミックダクトの素管製作において重要な建設時と現状の違いは生産数である。建設時は大量生産であったため、ある程度の製作誤差はベアリングにより解消することができた。しかし、現在は予備品等の単品製作であるため、一つ一つをより高精度にかつ極力低コストに製作する必要がある。そのため、成形方法、焼成方法、治具、加工方法および加工タイミング、並びにダクト形状を変えて、より精度よく製作できる方法を検証中である。また、素管の状態での目視検査を徹底しており、メタライズ不良を引き起こす異物混入の透光チェック、およびリークの原因となるヒビや傷の油性インクを用いたカラーチェックにより、視認可能な傷は全て修正する

* ippei.yamada@j-parc.jp

こととしている。その後、素管の状態ではリウムリークチェックし、 $1 \times 10^{-11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 未満を合格としている。入射ベント磁石用ダクトは既に製作できており、次工程以降の検証として使用している。

2.2 TiN コーティング

アルミナセラミックは一般に二次電子放出係数が大きく、電子雲不安定性の原因となるため、放出係数の低減が必須である。建設時にはホローカソードディスチャージ法 [6] による TiN コーティングにより、放出係数を 1.5 程度に低減して導入した [7]。膜厚は 10~20 nm であり、これは二次電子放出係数の低減と、セラミックスダクト全体として見た時の抵抗性インピーダンスを下げるために、ある程度大きな電気抵抗を持つようにして壁電流を流れにくくするというバランスで決まっている。壁電流は最終工程で製作する RF シールドに流すことで低インピーダンスなダクトを実現している。しかし現在、大口径・長尺の RCS 用セラミックスダクトは大きなコーティング炉を必要とするものの、建設時に使用していた炉は経年劣化により使用できない状態である。また、建設時には均一性を担保するために真空炉内でダクトを反転させるという操作をしていたが、その際にろう付けに重要な端面がぶつかり傷が入るといった事象が生じていた。そこで、真空炉内での操作が不要な方法で、かつ実績のある TiN コーティングを実施する方法として、抵抗加熱法によるコーティングを検討している。抵抗加熱法はダクト軸上にチタンワイヤを張り、窒素雰囲気下でジュール加熱によりチタンを蒸着させる方法である。新たな手法を採用するにあたり、二次電子放出係数の実測と均一性の評価が重要である。現在は Fig. 1 に示すような、二次電子放出測定のための $\phi 19 \text{ mm}$ のアルミナサンプルにホローカソードディスチャージ法および抵抗加熱法の二種類でコーティングしたものを用意したところである。コーティング方法の違いにより色に大きな差が生じたことから、チタンと窒素の配合比の違いや酸素等の不要成分の混入が懸念される。今後、二次電子放出係数等の定量的な評価に加えて、チタンワイヤの前処理等も考慮して成膜手法の検討を行う。



Figure 1: Alumina samples with TiN by hollow cathode discharge, with TiN by ohmic heating, and without TiN coating.

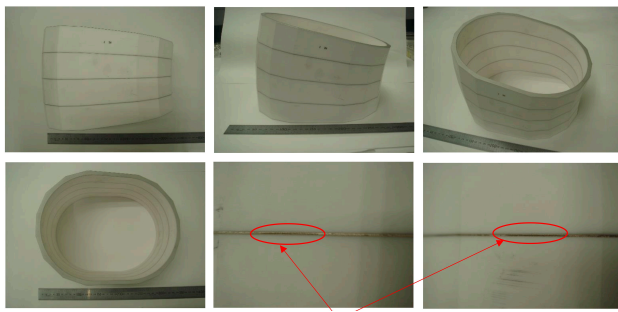
2.3 ろう付け

長尺なセラミックスダクトを製作するために、この工程にて各ユニットダクトをろう付けする。接合するユニットダクトの数はダクトの種類によるものの、2~8 個である。ろう付け作業に関して特に課題が多くなると考えているのは、偏向電磁石用の 15 度湾曲した全長 3.5 m ダクトである。建設時の偏向電磁石用ダクトは同一形状の 4 ユニットの接合する方法としていたため、ろう付け面は水平ではなかった。偏向電磁石用ダクト以外のダクトでは問題なくろう付けできたものの、偏向電磁石用ダクトはろう付け面からのスローリークが生じた。このリークはろう付け面が水平であるかどうか、という点に起因していると考えられたため、今後の製作手法ではろう付け面が全て水平になるようなダクト形状を考案した。まずは簡単な試験として、偏向電磁石用ダクトの接合面の角度を模擬した小さい模型を製作し、そのろう付け面角度の違いによるろう付け結果の比較を行った。Figure 2 に建設時の同一形状 4 ユニットの接合、および改良版のろう付け面水平型の接合の様子を示す。ヘリウムリークチェックでは両者とも $1 \times 10^{-11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ 未満であり真空リークはなかったものの、ろう付け面が斜めを向いた建設時型では、図中赤丸で示した 2 箇所においてフィレット生成不足が生じた。これは、大型なセラミックスダクトなため入熱時間が長く、ろうが溶けた状態で動き、成分が分離したことで、ろう付け不良の兆候が見られた可能性がある。今後、詳細な成分分析等を進める予定である。

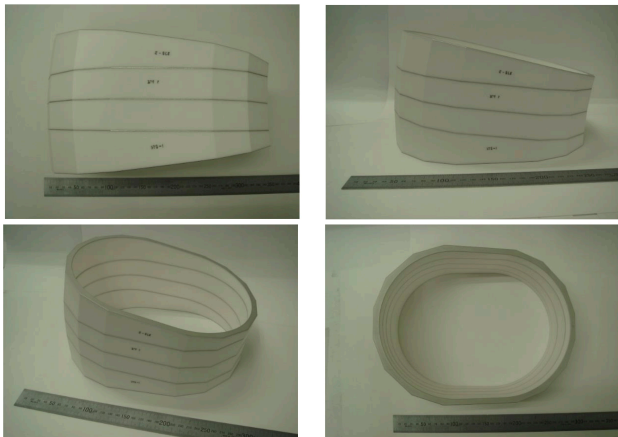
2.4 RF シールド

TiN コーティングの章で示した通り、インピーダンス低減の観点から大気側に銅の RF シールドを設けている。TiN コーティングは電気伝導率が小さいため、ビームの電磁場を TiN コーティングにより遮蔽するとインピーダンスが大きくなり、さらにビーム制御用の外部磁場も遮蔽されるため、TiN コーティングによる低インピーダンス化は不利である。RF シールドには、外部磁場とビームの電磁場の周波数の違いを利用してビームの電磁場のみ遮蔽できるように、コンデンサが接続されておりハイパスフィルタを構成している。

建設時にはメタライズ工程で RF シールドと同じ形状のストライプを設けておき、最終工程で銅電鍍により RF シールドを形成していた。しかし、偏向電磁石用ダクトは全長 3.5 m 程度と大きく、大型の電鍍浴槽を使用していたが老朽化により使用できなくなっており、RF シールドの製作が困難となっている。そこで現在は Fig. 3 に示すように、ウォータージェットにより銅板をストライプ状に加工し、ダクト素管と同じ原料のアルミナを配合した接着剤により銅ストライプをダクトに接着する方法を検証している。また、ハイパスフィルタ用のコンデンサは 100 個程度あるものの、一つずつ手作業にて半田付ける。半田付けには熱によるコンデンサのパンクが多く見られたため、コンデンサを一つ設置する度に電気容量を測定することで健全性を担保した。他にも、銅の熱伝導率が良いため半田ごてからの熱が全体に拡散してしまい、熱膨張により銅ストライプが伸びて余ってしまい波打つという課題もあった。銅ストライプはビーム誘



(a)



(b)

Figure 2: Test brazing of alumina duct for a bending magnet: (a) old type and (b) new type.

起場の遮蔽を担う要素であることから、波が残らないように放熱速度を上げる工夫により対策した。以上により完成した試作品は目視確認では非常に綺麗な仕上がりとされており、今後インピーダンス測定等により定量的に評価することを検討している。

3. 再開発：チタンベローズ

ビームラインの締結にはベローズが必須であることに加え、J-PARC RCS のビームラインは半周分がセラミックダクトであるため、セラミック保護の観点でもベローズは重要である。一般に、ベローズは製作方法が二種類あり、成形ベローズは反力が強いものの、割れやリークの心配が少なく、溶接ベローズは低反力であるものの、割れやリークが生じる可能性が懸念される。RCS では、セラミックダクトの保護の観点や管理区域内作業の時間短縮を考慮した作業性の向上のため、低反力なベローズが必要である。そこで、割れやリークに対して信頼性の高い成形ベローズを元に、極力低反力なベローズにするために、ベローズの山をプレス加工したものを開発して使用してきた。また一般に、ベローズの内面にはインピーダンス低減用の RF フィンガーが設置されるが、我々は編み込みメッシュ型の RF コンタクトを開発した。メッシュ型の利点としては、RF フィンガーのように折れる心配がなく、また接触不良が生じる心配がない点が挙げられる。しかし、現在はベローズおよび RF コンタクトの調達ができない状況であることから、これらの再



(a)



(b)

Figure 3: An rf shield made of copper which is cut by water jet. Capacitors are soldered by hand.

開発を進めている。

現在は段階的に再開発を進めている途中であり、プレス加工をしないものの、蛇腹構造のピッチを狭めて極力山数を増やした低反力ベローズと RF コンタクトの試作を進めている。ベローズのバネ定数の設計によく用いられる式として、Kellogg 社の式 [8]

$$k = \frac{2ED_mt^3}{3Nw^2\sqrt{wp/2}} \quad (1)$$

がある。ここで、 k はバネ定数、 E は弾性係数、 D_m はベローズ平均直径、 t はベローズを構成する金属の板厚、 N は山数、 w はベローズの山高さ、 p はピッチである。ベローズ長を L とすれば、ピッチと山数は $L = pN$ と表現できるため、ピッチの代わりにベローズ長 L を用いれば、バネ定数は

$$k = \frac{2ED_mt^3}{3w^2\sqrt{wNL/2}} \quad (2)$$

とかける。つまり、ベローズ長を固定して考える場合、ピッチを狭めて山数を増やすことが低反力ベローズを実

現する一つの手段である。そこで、フランジ口径 ISO250 に接続するためのベローズとして、ベローズ内径 300 mm、外径 330 mm、板厚 0.3 mm ピッチ 6 mm、山数 10 のベローズを試作した。材質に関しては、RCS の金属チャンバの標準としている低放射化材料のチタンとし、加工のしやすさから純チタン 2 種を採用した。この場合、バネ定数は 40 N/mm と見積もられる。

一方で、RF コンタクトの設計で重要な点は、インピーダンスの低減と真空排気特性である。インピーダンスを極力低減するためにはメッシュの開口率を 0 に近づければ良いが、その場合メッシュとベローズの隙間の真空排気効率が悪くなる。そのため、両者のトレードオフの関係を明らかにして設計する必要があるが、今回は第一段階として、製作技術の確認のために開口率は 25% 程度とした。

製作したベローズおよび RF コンタクトに対するバネ定数の測定として、ベローズまたは RF コンタクトに対して錘をのせていき、各錘質量に対するベローズまたは RF コンタクトの縮み量を測定した結果を Fig. 4 に示す。今回はベローズおよび RF コンタクトはそれぞれ単体として、独立にバネ定数測定を行った。横軸は錘の質量、縦軸は縮み量であり、バネ定数の計算には重力加速度を用いて質量を重量に換算した。ベローズに対する測定結果のプロットの色の違いは測定回数を表しており、プロットマーカーの違いは荷重方向と抜重方向を示している。錘質量が 25 kg 未満の領域では縮み量は質量に線形であり、最大で 7 mm 程度であった。より高重量な負荷をかけると縮み量は現象し、最大 40 kg の重量負荷をかけたところで負荷を減らしていくと、ヒステリシスな応答を示し、負荷を完全に取り除いても初期から 1 mm 程度縮んだ状態となった。次にベローズ長を初期状態に戻し、再度同様の測定を行ったところ一回目とよく一致する応答を得た。錘質量 25 kg 未満の線形領域について、線形フィットしたところ、バネ定数として 33 N/mm という結果を得た。これは Kellogg の式による設計値 (40 N/mm) と近い値であった。一方で RF コンタクトに対する測定結果は線形近似可能な領域がなかったため、その微分曲線を Fig. 5 に示す。RF コンタクトのバネ定数は 2.5~29 N/mm の範囲にあり、縮み量が増えるにつれて急激にバネ定数が減少する結果となった。ベローズと RF コンタクトを一体化した際のバネ定数は、一つの錘を二つのバネで支えることになることから、線形和であると考えられる。縮み量が 1 mm 程度以下の場合にはベローズと RF コンタクトのバネ定数がおおよそ同じ値となるため、60 N/mm 程度が予想されるが、1 mm 以上縮める場合には現状はベローズのバネ定数が支配的になると予想される。そのため、ベローズのさらなる低反力化は RF コンタクトとの一体化時にも効果的であると考えられる。過去に製作したプレス加工した成形ベローズのバネ定数は ISO250 フランジ用のもので 15 N/mm 程度であるため、今後はプレス加工を進める予定である。また、真空特性やインピーダンス特性の評価の方法の確立を目指す。

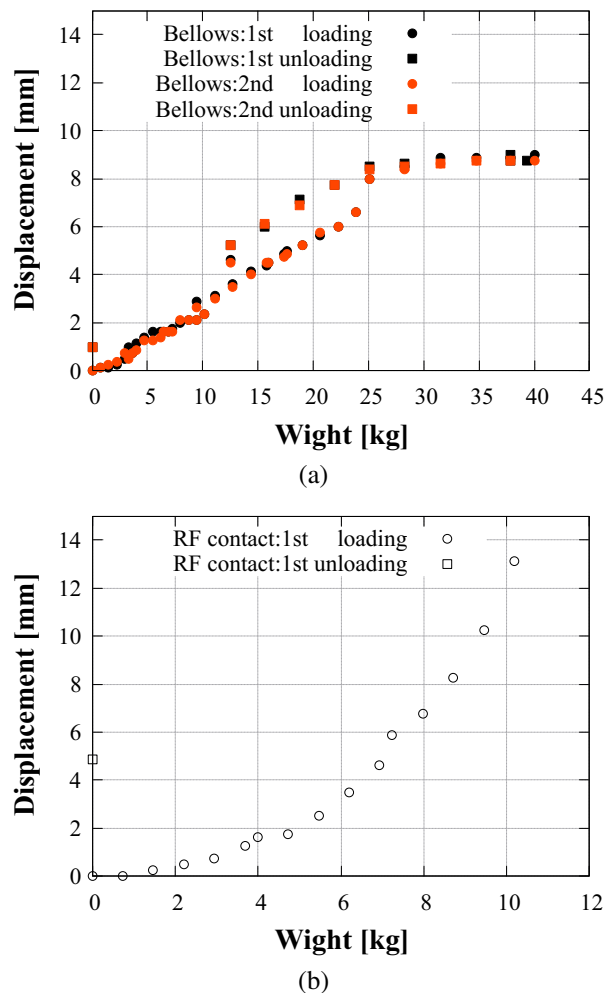


Figure 4: The shrink displacements against increase of the weight on the components: (a) bellows and (b) rf contact.

4. まとめ

J-PARC 3GeV シンクロトロン (RCS) の真空システムはアルミナセラミックダクトや低反力チタンベローズを開発し、安定な 1MW の大強度運転に貢献してきた。しかし、建設から 15 年以上が経過し、セラミックダクトやチタンベローズの調達が困難な状況となっているため、これらの再開発を進めている。セラミックダクトの製作は大きく五工程に分けることができ、そのうち四工程について再開発を進めている。いずれの工程についても建設時の経験に基づいた製作手法の改良を検証しており、定性的には良い結果が得られている。今後は定量的な評価を進めていく予定である。一方チタンベローズの製作については、第一段階としてプレス加工なしの大口径低反力チタンベローズの試作を行った。ベローズおよび RF コンタクトのバネ特性の評価を行い、現状ではベローズのバネ定数が支配的である結果を得た。プレス加工すれば現状の半分程度のバネ定数が得られると予想されるため、次の段階としてプレス加工を行う予定である。また、真空特性やインピーダンス特性の評価も実

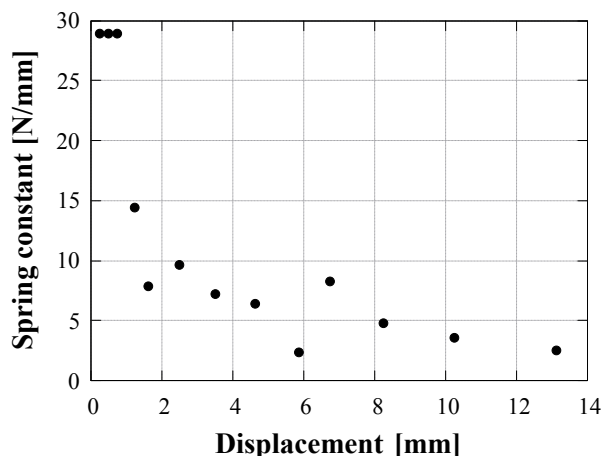


Figure 5: The derivative of Fig. 4(b), which is consistent with the spring constant of the rf contact.

施する予定である。

謝辞

セラミックダクト製作にご協力をいただきました、株式会社フェローテックマテリアルテクノロジー（セラミックダクト素管製作）、株式会社タイゴールド（TiN コーティング）、金属技研株式会社（ろう付けおよび RF シールドの製作）、株式会社 MARUWA（総合的なアドバイスおよびメタライズ）に感謝いたします。ま

た、低反力ベローズの製作に関してご協力いただきました、南国フレキ工業株式会社に感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Kinsho *et al.*, “Development of Alumina Ceramics Vacuum Chamber for J-PARC”, J. Vac. Soc. Jpn. Vol. 49, No. 12 (2006).
- [2] M. Kinsho *et al.*, “Titanium flanged alumina ceramics vacuum duct with low impedance”, Vacuum 81 (2007) 808 – 811.
- [3] J. Kamiya *et al.*, “Turbomolecular Pump as Main Pump in a High-power Proton Accelerator Vacuum System”, Vacuum and Surface Science Vol. 62, No. 8 (2019).
- [4] I. Yamada *et al.*, “RECENT STATUS OF J-PARC RCS VACUUM SYSTEM”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, WEOB7.
- [5] I. Yamada *et al.*, “Development of a mass spectrometer with a long cable”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FRP078, this meeting.
- [6] M. Sato *et al.*, “A new system of TiN coating on interior surface of cylindrical vacuum chamber by hollow cathode discharge method”, Vacuum Vol.47, No. 6 (1996) 753-756.
- [7] K. Yamamoto *et al.*, “Secondary electron emission yields from the J-PARC RCS vacuum components”, Vacuum Vol.81 (2007) 788-792.
- [8] M. W. Kellogg, “Design of Piping Systems”, Pullman Power Products (1956).