

RCS ビーム入射部における低放射化・保守性向上のための真空容器のアップグレード

UPGRADE OF VACUUM CHAMBER AT RCS BEAM INJECTION AREA AIMED AT LOWER RADIATION AND MAINTAINABILITY INCREASE

神谷潤一郎^{#, A)}, 山本風海^{A)}, 柳橋亨^{B)}, 佐藤篤^{B)}, 三木信晴^{B)}

Junichiro Kamiya^{#, A)}, Kazami Yamamoto^{A)}, Toru Yanagibashi^{B)}, Atsushi Sato^{B)}, Nobuharu Miki^{B)}

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

^{B)} Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

Abstract

Surround of the beam injection point in the J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron is the area where the residual radioactive dose is higher than other areas due to the beam scattering by the charge stripping foil. However, there is very little space to install radiation shields around the vacuum chamber in the beam injection point. Furthermore, the vacuum leak has often occurred due to the heat expansion of the chamber flange due to the induced current by the nearby pulse magnet. To solve such problems for minimizing the radiation exposure of maintenance workers, the vacuum chamber in the beam injection point was newly designed. The space for the radiation shields was created by lengthening and the changing the cross-sectional shape. The titanium alloy with high mechanical strength was used for the flange material so that the flange was able to be fastened with higher tightening torque.

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron: RCS)のビーム入射部では、リニアックからの H⁺イオンを陽子へ荷電変換するための炭素薄膜とビームの衝突による原子核散乱のため、真空容器や電磁石等の機器が放射化し、残留放射線量が優位に高くなっている。加えて入射部では、パルス電磁石であるシフトバンプ電磁石の通電・非通電の繰り返しによりフランジ締結部で真空リークが発生し、真空シール交換等の保守作業が必要になる事象が発生している。今後 1MW のビーム出力の定常的な運転をしていくうえで、上記二つの課題の解決は、保守時の被ばくを低減するという観点で必須である。

2. 各課題解決への方針

第一の残留線量に関する課題について述べる。Figure 1 に物質生命科学実験施設へ約 500 kW のビーム出力で数週間定常運転した後、5 時間程度たった後の残留線量を示す。入射点である荷電変換膜の直下流では、9 mSv/h という高い残留放射線量となっている。この高い残留線量はエネルギー 400 MeV の陽子と厚さ 1 μm の荷電変換膜を構成する炭素の原子核との衝突による散乱粒子が原因である。当然、前方への散乱の断面積が大きいため、入射点の真空容器は荷電変換膜の下流側の残留線量が高い。残留線量に寄与する二次粒子は、PHITS による計算結果および MARS を用いた計算により 100~300 MeV の陽子と 50~400MeV の中性子であることがわかっている[1, 2]。作業エリアの残留線量を低減するには遮蔽体を設置することが基本である。現状のビーム入射点近傍の機器構成図を Fig. 2 に示す。

荷電変換膜は低放射化材料である純チタン JIS 2 種(以降、純チタン 2 種)製真空容器に挿入されている。真空容器はフランジ面間の長さが 390 mm であり、両端のベローズ部を除いた真空容器胴部は 200 mm である。この真空容器は Fig. 2 の写真に示すように荷電変換膜挿入用、マルチワイヤービームプロファイルモニター (MWPM)用、エレクトロンキャッチャー用、荷電変換膜観測用といった各種ポートを有する複雑な構造である。そのため周辺の残留放射線量を低減するための遮蔽体を常設もしくは作業時に設置する空間がない。そこで、上下流のシフトバンプ電磁石のビーム軸方向の長さを短くすることと入射点の真空容器の断面形状を改良することで、遮蔽体を設置できる空間を確保する方針とした。

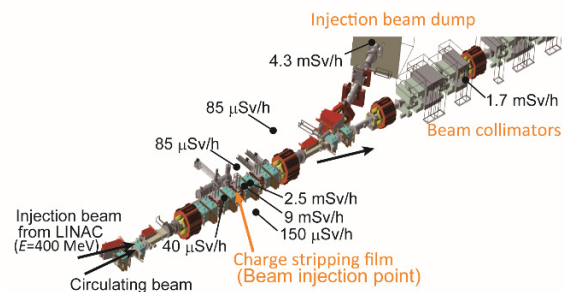


Figure 1: Typical residual radiation distribution at the beam injection area in the RCS about 5 hours after the beam operation with 500 kW beam power.

第二の真空リークに関する課題について述べる。シフトバンプ電磁石の漏洩磁場が引き起こす誘導電流の影響として、Fig. 3 に通電・非通電時のビームラインの圧力変化を示す[3]。通電時にフランジの温度を測定したところ 100°Cを超えている部分があったことから、通電・非通電時のフランジの熱膨張の差からリークが発生していると

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

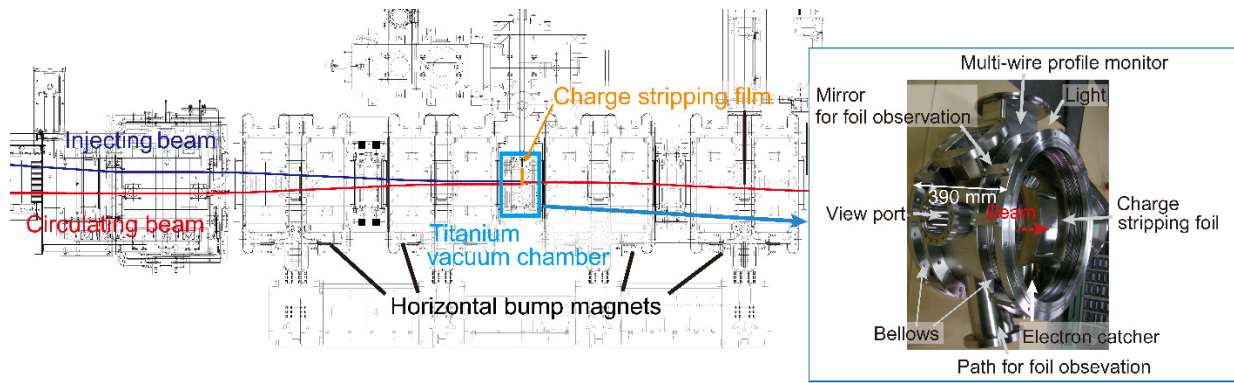


Figure 2: Configuration diagram around the beam injection point in the RCS and the present vacuum chamber at the beam injection point. The photo of the present vacuum chamber in the beam injection point is also shown.

想定される。実際にリーク試験を行った結果、入射点の真空容器のフランジ締結部にて 10^{-8} Pa m³/s 台のリークを検出した。シール材に使用している Technetics Group 社製 DELTA[®]シールは Fig. 4 の概念図のような荷重-圧縮曲線を示す。この圧縮曲線においてシールに対する線荷重を上げていくと、すなわちフランジ締結用クランプの締め付けトルク値を増していくと A 点でリークは止まる。理想的な作動点は B 点である。なぜなら B 点からシールに対する線荷重が低下した場合でも C 点までは有効な弾性復元の範囲内でありリークは発生しないからである。一方 A 点から B 点までの間のフランジ締め付け状態であると、何らかの原因でクランプの締め付けが緩んで線荷重が低下した場合、有効な弾性復元の範囲がないためリークが発生する可能性がある。本課題については、現状の締め付けトルクが荷重-圧縮曲線のどの位置にあるのかを調査するところから出発し、対策方針を決めることとした。

以上のように RCS のビーム入射点周辺における放射線遮蔽体設置による低放射化と、真空リーク対策によるシール交換作業の撲滅をするうえで、入射点の真空容器の改良は必須である。本報告では入射点真空容器について、遮蔽体設置が可能な構造への改良と真空リークをなくすための方法の 2 つの観点から述べる。

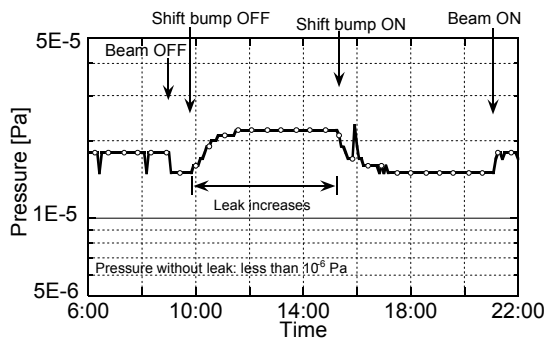


Figure 3: Change of the beam line pressure in the beam injection area during the excitation of the shift bump magnets.

3. 遮蔽体設置可能な真空容器の構造改良

3.1 真空容器の基本設計

残留放射線量の高い入射点の真空容器の回りに遮蔽体を設置できる空間を確保するために、真空容器胴部を長くし、真空容器の断面を円から矩形にする。Figure 5 に改良後の入射点真空容器の図を示す。胴部の長さを 201 mm から 547 mm へ、断面形状を直径 512 mm の円から 293mm×479mm の矩形へ変更することで、真空容器回りの空間を大きく確保することが可能となった。数値はいずれも容器外形寸法である。

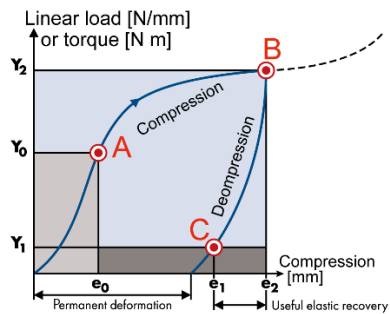


Figure 4: Typical load deflection curve of DELTA[®] seal [4].

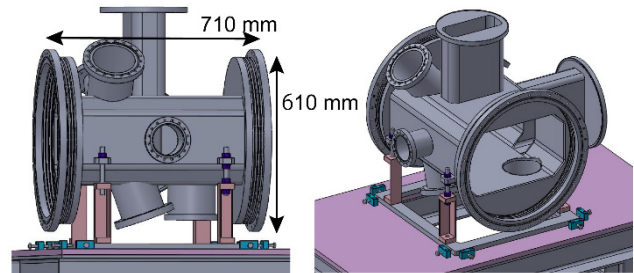


Figure 5: Newly-designed titanium vacuum chamber at the beam injection point.

3.2 変位・応力の検証

容器が長く、矩形となった設計に対し検証すべきは大気圧による変位および応力である。まずポートがないシンプルな形状での検証を行った。有限要素法による計算で変位が 1.5 mm を超えない真空容器壁の厚みを検討し、変異による応力が材料である純チタン 2 種の耐力の範囲内であることを確認した。結果を Fig. 6 に示す。この結果から 9mm の厚みとすれば最大変位量が約 1.3 mm に収まり、ミーゼス応力は約 95 MPa と純チタン 2 種の耐力である 215 MPa より十分に小さい。計算結果の信頼性を確かめるために、同形状の真空容器を製作し真空排気した際の変位を測定した。Figure 7 に示したように計算結果は実測とよく一致しており信頼できることが分かった。そこで、多数のポートが付いた形状である実機についても大気圧による変位および応力を計算し、Fig.

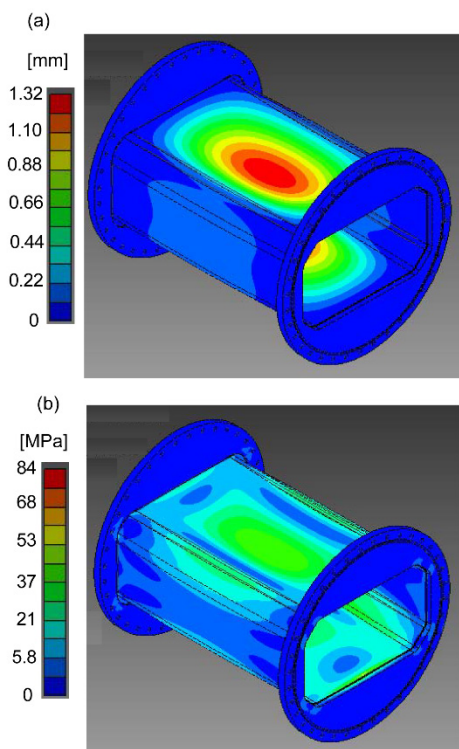


Figure 6: FEM results for the R&D vacuum chamber against the atmospheric pressure. (a) Displacement. (b) Von Mises stresses.

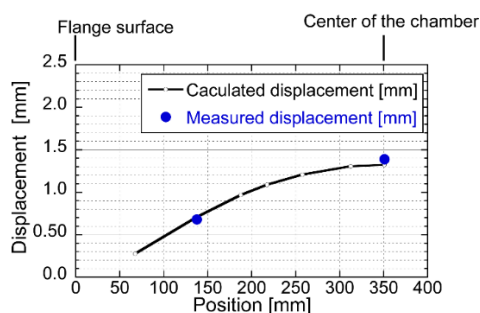


Figure 7: Comparison of the calculated displacement by the atmospheric pressure with the measured one.

8 に示すように変位、応力ともに問題がないことを確認した。

他の検証事項はチタン製真空容器のシフトバンプからの漏洩磁場による発熱である。バンプ電磁石から真空容器中心までの距離が増すことで、漏洩磁場の絶対値は減る。一方で真空容器胴部を円形から矩形にすることで、真空容器壁の位置が中心平面上に近づくため、漏れ磁場の鉛直成分の割合は増える。解析的な計算の結果、構造変更によりダクト胴部の発熱は 11.7 W から 74.1 W へ増加することが分かった。これによる温度上昇はおおよそ 60°C 程度であるため問題にはならないと考えている。今後、有限要素法を用いて詳細な温度上昇とそれによる変位、応力を検証していく予定である。

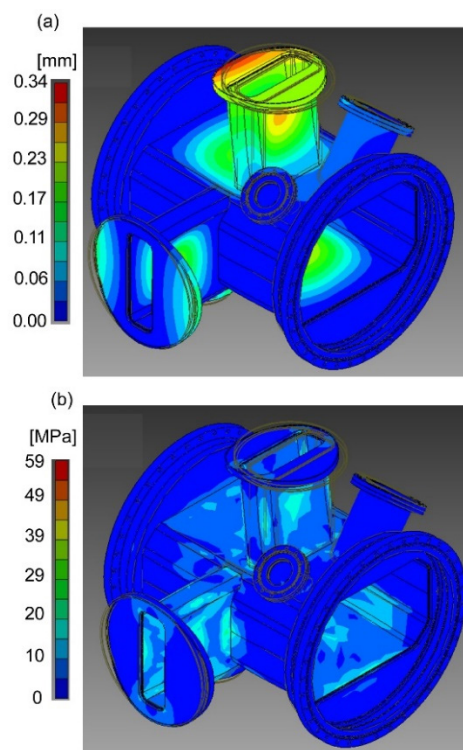


Figure 8: FEM results for the newly-designed vacuum chamber against the atmospheric pressure. (a) Displacement. (b) Von Mises stresses.

4. 真空リーク対策

4.1 クランプ締め付け試験によるリーク原因の特定

入射点の真空容器に用いている ISO500 規格の DELTA®シールについて、クランプの締め付けトルクを増していった圧縮量を測定した結果を Fig. 9 に示す。横軸をフランジのシール面間距離を取っているのでトルク値を増していくと左上方向へ向かう(Fig. 4 とは X 軸の向きが逆である)。真空容器を据え付けた際は、低いトルク値で締め付けてリークがなくなった 15-20 N m 程度で完了としている。しかし Fig. 9 からそのトルク値は理想的な

作動点に対して小さすぎる事がわかる。繰り返しの熱膨張によりトルク値が低下し、有効な弾性復元の範囲がないためリークが発生したと推測される。図より理想的な作動点を得るトルク値は 40 N m 以上である。しかし、現状フランジ材に用いている純チタン 2 種は高度が劣るため高トルクで締め付けた際に、シールやクランプによりフランジに機能に支障をきたす傷がつくという不具合が発生した。

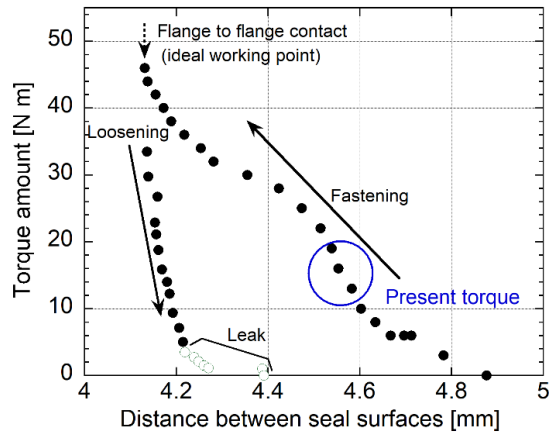


Figure 9: Measured typical load deflection curve of the metal seal.

4.2 高い締め付けトルクへの対策[5]

前述の問題を解決するために、フランジ材料を現在の純チタン JIS 2 種から高強度材料であるチタン合金 JIS60 種(Ti-6%Al-4%V、以降 64 チタン)に変更することで、高トルクでの締め付けにも耐えうるようにする抜本方針を取ることにした。耐力は純チタン 2 種が 216 MPa 以上、64 チタンで 921 MPa である。課題はフランジ材の 64 チタンと容器胴部の純チタン 2 種の溶接性、64 チタンの残留放射線特性等であった。溶接性については、純チタン 2 種と 64 チタンを溶接したサンプルで引張試験を行い、接合部での破損は全くないことを確認した。残留放射線特性については 400 MeV 陽子ビームでサンプルを照射しその後の残留線量を測定した。結果を Fig.10 に示す。64 チタンは純チタンと変わらない程度にステンレス鋼と比べて低放射化材料であることが確認できた。

64 チタンをフランジに用いるもう一つの利点は、高い電気抵抗率である。室温で純チタンの電気抵抗率が $0.55 \mu\Omega \text{ m}$ であるのに対し 64 チタンは $1.71 \mu\Omega \text{ m}$ である。これによりパルス磁場によるフランジの発熱量が 30%程度にまで低減できるので、熱膨張も抑えられリークが発生しにくいことが期待される。

5. まとめ

RCS ビーム入射部における保守時の被ばく低減のため、遮蔽体設置できる空間確保とリークの撲滅という二つの観点で入射点真空容器の改良を進めている。空間確保のために真空容器形状を大幅に変えるため、大気圧に耐えうる構造を計算および実測をもとに決定した。リーク撲滅のためにフランジに高強度チタン合金を用い

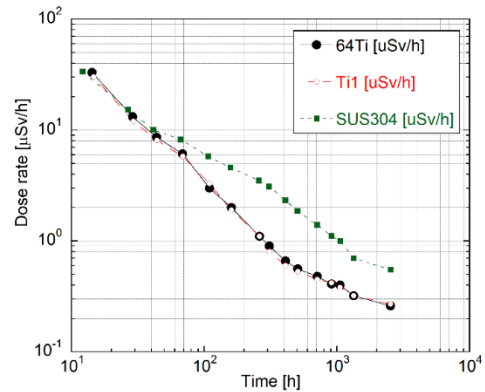


Figure 10: Chronological change in the residual dose rate of each material after bombardment with 400MeV protons.

るという方針を取り、純チタンとの接合性、チタン合金の低放射化特性を実測し問題のない結果を得た。

謝辞

チタン製真空容器の設計および強度検討において、三菱重工機械システムズの比嘉氏に多大なご協力をいただいた。また RCS の入射部タスクフォースメンバーとは本件に関する大変有意義な議論を行った。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- [1] E. Yamakawa *et al.*, “Measurements and PHITS Monte Carlo Estimations of Residual Activities Induced by the 181 MeV Proton Beam in the Injection Area at J-PARC RCS Ring”, JPS Conf. Proc., vol 8, Sep. 2015, p. 012017.
- [2] K. Yamamoto *et al.*, “Activation in injection area of J-PARC 3-GeV rapid cycling synchrotron and its countermeasures”, to be published as Proceedings of ANS RPSD 2018, US, Aug. 2018.
- [3] J. Kamiya *et al.*, “Improvements of vacuum system in J-PARC 3 GeV synchrotron”, Journal of Physics: Conf. Series 874 (2017) 012099.
- [4] <https://technetics.com/bin/Helicoflex.pdf>
- [5] J. Kamiya *et al.*, “Titanium alloy as a potential low radioactivation vacuum material”, J. Vac. Sci. Technol. A 33 (2015) 031605.