

J-PARC 遅い取り出しのためのスピル制御四重極電磁石セラミックダクトのRFシールド強化

ENHANCEMENT OF RF SHIELDING FOR CERAMIC DUCTS IN SPILL CONTROL QUADRUPOLE MAGNETS FOR J-PARC SLOW EXTRACTION

富澤 正人 ^{*,A)}, 武藤 亮太郎 ^{A)}, 中村 剛 ^{A)}, 外山 毅 ^{A)}, 魚田 雅彦 ^{A)}

Masahito Tomizawa ^{*,A)}, Ryotaro Muto ^{A)}, Takeshi Nakamura ^{A)}, Takeshi Toyama ^{A)}, Masahiko Uota ^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization/J-PARC Center

Abstract

RF shield clamps have been developed to enhance RF shielding at the end portions of ceramic vacuum ducts in spill feedback quadrupole magnets. The RF shield clamps can be attached while maintaining the original RF shield structure without atmospheric exposure. The noise observed in vacuum gauge signals induced by high-intensity beams was drastically reduced by attaching the RF shield clamps. The coupling impedance predicted by CST Studio was also significantly improved with the RF shield clamps installed.

1. はじめに

J-PARC メインリングは 30 GeV に加速されたビームを、速い取り出し方法を使ってニュートリノ実験施設へ、遅い取り出し方法を使ってハドロン実験施設へ供給する。速い取り出し運転の加速サイクルは現在 1.36 秒で平均ビームパワーは 830 kW である。遅い取り出し運転の加速サイクルは 4.24 秒でビームパワーは 92 kW である [1]。速い取り出し運転のビーム強度を上げる過程で、遅い取り出しビームのスピル制御用四重極磁石付近のイオンゲージ (IG) および冷陰極ゲージ (CCG) の真空読み値にビーム起因のノイズが発生する現象が観測されていた。この原因はスピル制御四重極磁石のセラミック真空ダクトの外周に取り付けられた RF シールドのための 47 本の銅ストライプが端部で一本にまとめられており、端部での RF シールド性能が不十分であるために発生していると推測された。一本にまとめられた銅ストライプの構造はそのままに残し、クランプ状の RF シールドを新たに取り付けることにより、端部の RF シールド性能を強化することにした。この RF シールドクランプの構造、取り付け後のビーム運転における真空読み値のノイズ改善について述べる。RF シールドクランプ取り付け前後のビームカップリングインピーダンスの評価結果も示す。

2. スピルフィードバック四重極磁石セラミックダクト

Figure 1 で示されているように、遅い取り出しビームのスピルフィードバック四重極磁石は EQ1, EQ2, RQ の 3 台から構成され [2]、静電セブタムが置かれている遅い取り出し直線部上流のアーキ部に設置されている。スピルフィードバック四重極磁石は高速の磁場応答性が必要なため、全長 899 mm の真空ダクトの中心部は外径 ϕ 150 mm のセラミック円筒でできている。セラミック円筒の両端は真空締結フランジのついたチタンスリーブがロウ付けされている。セラミック円筒には、ビー

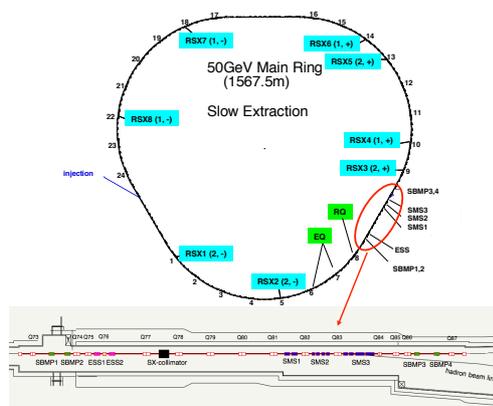


Figure 1: Spill feedback quadrupoles EQ1, EQ2 and RQ location in the MR.

ムの鏡像電流をスムーズに流すための銅ストライプが外周に取り付けられている。ストライプは厚さ 0.3 mm、幅 5 mm、長さ 784 mm で、5 mm ピッチで 47 枚が全周に取り付けられている。これらのストライプはサンユレジンテープで固定されている。ストライプの片側端部は全周に渡る銅リング構造になっている。Figure 2 で



Figure 2: End portion of the ceramic duct for the spill feedback quadrupole.

* masahito.tomizawa@kek.jp

示されているように、もう一方の端部は、直流成分をカットする 100 nF、耐電圧 1 kV のセラミックコンデンサーを介して同様に銅リングに接続されている。銅リングからチタンスリーブまでの電流パスは両端とも 1 枚の銅ストライプに集約されていることが判明した。この集約された銅ストライプは、編組線、金属テープを介して金属ワイヤーでチタンスリーブに固定されその上からカプトンテープが巻かれていた。

3. RF シールドクランプ

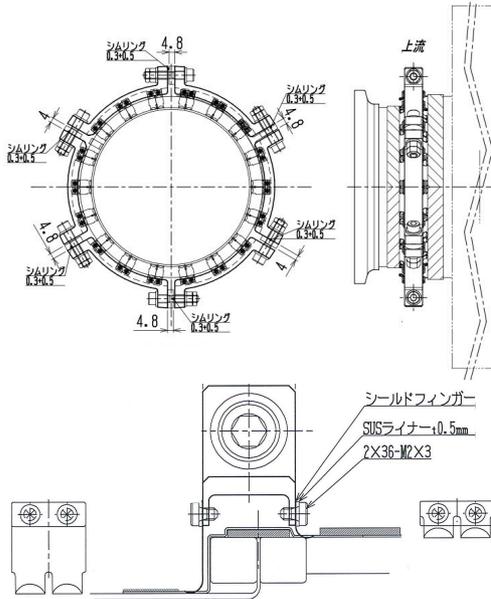


Figure 3: Structure of the RF shield clamp.

前述のように、セラミックダクト端部の銅リングからチタンスリーブまでの電流パスが 1 枚の銅ストライプに集約されている構造が真空ゲージの信号に発生するノイズの原因だと推測した。しかし既存の銅ストライプ構造そのものを変更することは難しい。従って、既存の銅ストライプ構造はそのまま残し、真空も破らずに端部の RF シールドを強化する方法を検討した。この方針のもと考案されたのが RF シールドクランプである。Figure 3 に構造が示されているように、RF シールドクランプは 6 分割され各々の銅クランプには、銅リングとチタンスリーブに接触するフィンガーコンタクトが 3 箇所ねじ止めされている。フィンガーコンタクトは銅リング側とチタンスリーブ側で長さが違う。



Figure 4: RF shield clamp temporarily attached on a dummy duct.

フィンガーコンタクトはバネ性のあるベリリウム銅で厚さは 0.12 mm のものを選択した。フォースゲージを使ったフィンガーコンタクトの押し厚測定結果から想定した 0.5 mm のたわみで、十分な約 0.19 kgf の押し圧が確保できることがわかった。セラミックダクトの端部と同じ寸法で製作したダミーダクトに RF シールドクランプを取り付け、締め付け具合のチェックを行った (Fig.4)。セラミックダクトへの取り付け前に、チタンスリーブに巻かれた保護用カプトンテープは除去しアルコールで清掃を行った。フィンガーコンタクトの押し圧が偏らないように、6 分割された銅クランプ間の隙間に微調整用のシム (銅ワッシャー) を入れて隙間が設計通りになるようにボルトを締め付けた。取り付け後は、隙間ゲージでフィンガーコンタクトがチタンスリーブと銅リングに接触していることを確認した。EQ2 の 2 箇所の RF シールドクランプが 2024 年 10 月に、EQ1 と RQ の合計 4 箇所の RF シールドクランプが 2025 年 1 月に取り付けられた。Figure 5 は RQ 用セラミックダクトの端部に取り付けられた RF シールドクランプ付近の写真である。



Figure 5: RF shielded clamp attached at the end of the ceramic duct.

4. 真空読み値への影響

Figure 5 の写真でわかるように、EQ1, EQ2, RQ の直下流には T 型の真空排気ポートがあり真空ゲージとイオンポンプが取り付けられている。またビーム通過部には壁電流を流すスリットが取り付けられている。当初真空排気ポートにはイオンゲージ (IG) と冷陰極ゲージ (CCG) が取り付けられていたが、速い取り出しビーム強度の増強につれて、ビームに起因した信号ノイズが IG, CCG 共に観測されるようになったため、2016~2017 年に IG のみが 6 m 上流に移設された [3]。Figure 6 は速い取り出し (FX) と遅い取り出し (SX) 運転のビームパワーと IG, CCG による真空の時間遷移を表す。すでに移動ずみの IG の真空の読みはノイズがなく正常値を示している。一方、A 運転期間の EQ2 近くの CCG063 に

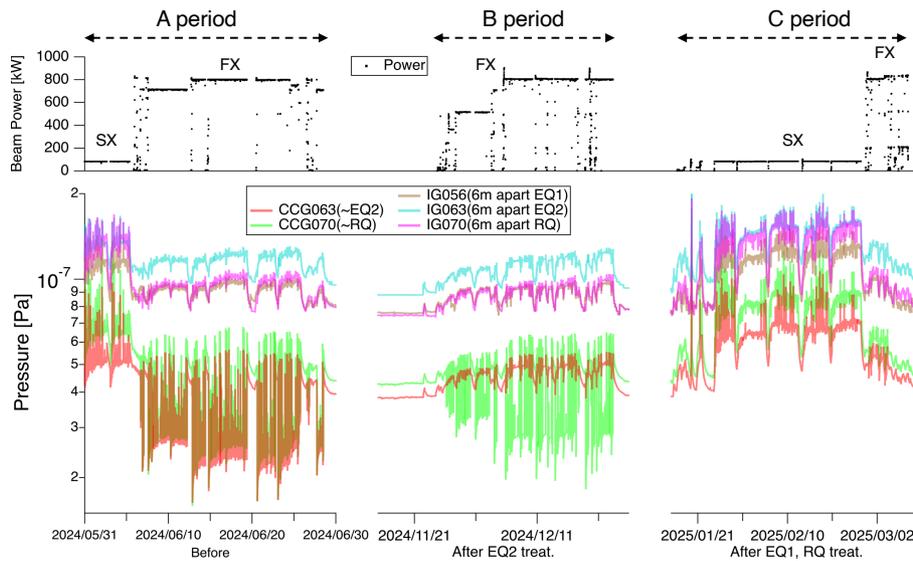


Figure 6: Trends of MR beam power, vacuum measured by the IGs and the CCGs.

はビームに起因するノイズが発生して正しい圧力を読むことができなくなっていた。このノイズは本来あり得ない真空がよくなる方向（グラフの下側）に振れている。A 運転期間と B 運転期間の間の期間で、EQ2 セラミックダクトの上流・下流端の 2 箇所、RF シールドクランプが取り付けられた。その結果、B 運転期間で EQ2 近くの CCG063 のノイズが激減し以前移動した IG と同様に正常な真空値を示している。RF シールドクランプの効果が明白になったので、B 運転期間と C 運転

期間の間の期間に残りの EQ1, RQ のセラミックダクトにも RF シールドクランプが取り付けられた (4 箇所)。C 運転期間を見ると、同様に RQ 近くの CCG070 のノイズが激減しているのがわかる。遅い取り出し運転 (SX) 時は速い取り出し運転 (FX) 時より、ビーム強度が少ないにもかかわらず、圧力が上昇している。これは遅い取り出し運転で行うデバンチ操作で発生する電子雲に起因するもので正常な圧力値を示している。

5. インピーダンスの評価

RF シールドクランプを取り付ける前の状態 (Single) と取り付け後の状態 (Segmented) の縦方向の coupling impedance Z_L を SCT Studio を使って計算した。参考と

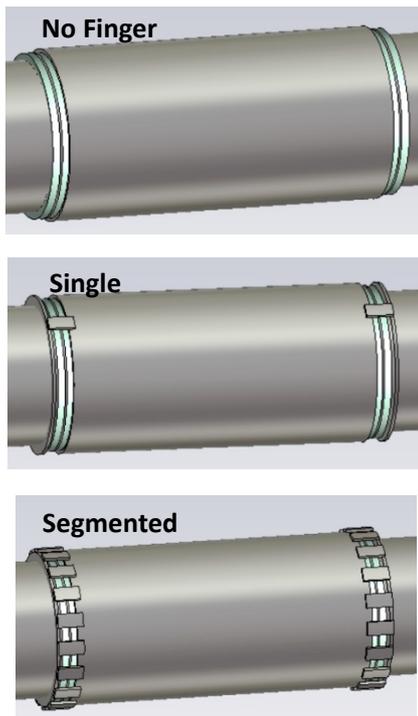


Figure 7: Three models for wake potential simulations by SCT studio.

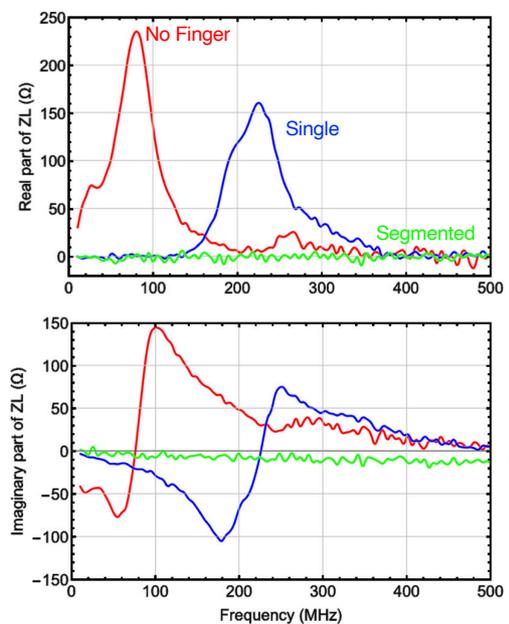


Figure 8: Predicted coupling impedances for the three models.

して、セラミックダクトとチタンスリーブの間に全く電流が流れるパスがない場合 (No finger) も計算した。Figure 7 はこれら 3 種類の SCT Studio のモデリングを示す。ビームのバンチ長は実際のバンチ長よりも短い 0.1 m (rms) を選んだ。SCT Studio においてこのビームを通過させることにより求めた wake potential から Z_L に変換しプロットしたのが Fig. 8 である。RF シールドクランプを取り付ける前の状態 (Single) の Z_L はブロードな周波数幅を持つピーク構造を持っている。 Z_L の実数部は、ピークが 225 Hz で約 160 Ω の Z_L である。RF シールドクランプを取り付けた後の状態 (Segmented) の Z_L は激減しピークは見えない。ちなみに、No finger の場合は、ブロードな周波数のピークの周波数は 80 MHz 程度、ピーク値は 235 Ω 程度である。

遅い取り出し運転では、取り出し直前にデバンチ操作を行なっている。この過程で縦方向のビーム分布に高周波構造が発生し電子雲が生成される。この電子雲によりビームの横方向不安定性が起りビームロスが発生する。この抑制が遅い取り出しビーム強度を上げるための大きな課題となっている [4]。縦方向ビーム分布の高周波構造発生させる microwave instability の閾値 [5] は

$$\left| \frac{Z_L}{n} \right| \leq \frac{2\pi\beta^2 E\sigma_\delta^2 |\eta| F}{eI} \quad (1)$$

で表される。ここで Z_L/n の n は周波数の周回周波数に対する比、 η は slippage factor, β は光速に対する速度比、 E は全エネルギー、 eI はビーム電流、 σ_δ は運動量の rms 広がり、そして F は form factor である。RF シールドクランプを取り付ける前の状態の 6 箇所分の Z_L/n の real part はピークで 0.82 Ω となる。現在の MR 最大の Z_L 源は RF 空胴の寄生共振と考えられている。RF 空胴 9 台体制時の Z_L [6] から Z_L/n の real part を求めると、300 MHz のピークで約 9.9 Ω となるので、RF シールドクランプを取り付ける前の状態では RF 空胴によるピークの約 8% 程度の大きさがあったことになる。この割合は決して無視できる値ではなく、RF シールドクランプの取り付けによる Z_L/n の低減は、デバンチ時に発生するビーム不安定性の抑制にある程度効果があった可能性がある。

6. まとめ

J-PARC MR の速い取り出し運転のビーム強度を上げる過程で、遅い取り出しのためのスビル制御四極磁石

付近のイオンゲージ (IG) および冷陰極ゲージ (CCG) の真空読み値にビーム起因のノイズが発生する現象が観測された。スビル制御四極磁石のセラミックダクトの既存の RF シールド構造はそのまま残し、真空を破らずに RF シールド性能を強化できるクランプ状の RF シールドを開発し、セラミックダクト端部に取り付けた。RF シールドクランプによりビーム起因のノイズは激減した。RF シールドクランプ取り付け前後のビームカップリングインピーダンスの評価を行ない、取り付け後のインピーダンス値は大幅に減ることが確認できた。今回の RF シールドクランプ取り付けにより、遅い取り出し運転のデバンチ操作時に発生するビーム不安定性の抑制にもある程度効果があった可能性がある。

謝辞

RF シールドクランプの取り付け試験は遅い取り出しグループメンバー、セラミックダクトのカプトンシート除去は真空グループメンバーに協力をいただきました。協力いただいた関係者には感謝申し上げます。

RF シールドクランプは株式会社マイテックで製作されました。

参考文献

- [1] Y. Sato *et al.*, “J-PARC 主リングにおける FX 830 kW, SX 90 kW の利用運転達成と今後の展望”, Proc. 22th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2025), Setagaya, Japan, Aug. 2025, FRO603, this meeting.
- [2] A. Kiyomichi *et al.*, “Beam Spill Control for the J-PARC Slow Extraction”, in Proc. IPAC2010, Kyoto, Japan, May 2010, pp. 3933-3935.
- [3] M. Uota, “Evaluation of bake-out operation when new equipment is added to J-PARC MR”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp.907-911.
- [4] M. Tomizawa *et al.*, “Longitudinal beam simulation for a high repetition cycle J-PARC slow extraction”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp.223-227.
- [5] E. Keil, W. Schnell, “Concerning Longitudinal Stability in the ISR”, CERN-ISR-TH-RF/69-48, 1969.
- [6] A. Kobayashi *et al.*, “Modeling of the impedance of RF cavities in the J-PARC main ring”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp.669-673.