

J-PARC 主リングにおける縦方向エミッタンス増大のための加速空洞および入力カプラの電磁場設計

DESIGN OF ACCELERATING CAVITY AND INPUT COUPLER FOR LONGITUDINAL EMITTANCE BLOW-UP IN J-PARC MR

森田裕一^{#, A)}, 長谷川豪志^{A)}, 山本昌亘^{B)}, 吉井正人^{A)}

Yuichi Morita^{#, A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Masanobu Yamamoto^{B)}, Masahito Yoshii^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Complex

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

In the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), the beam instability during the slow extraction (SX) is a current issue. The improvement of the instability was observed when the longitudinal emittance blow-up was introduced. Effective schemes for the blow-up are required for the further beam upgrade. The introduction of the very high frequency (VHF) cavity with the resonance frequency of ~ 100 MHz is one possible solution. This paper reports the design of the VHF cavity and the input coupler for the longitudinal emittance blow-up.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の MR (Main Ring) では Slow Extraction (SX) と呼ばれる手法により、ハドロン実験施設へビームを供給している。SX ではフラットトップ(FT)期間において RF 電圧をゼロにしてデバンチさせ、3 次共鳴を利用してビームを取り出す。

ビーム粒子数を増やしていくと横方向のインスタビリティによると思われる損失がビーム取り出し直前と取り出し時に見られるようになった。不安定性を抑制する方法として、MR へのビーム入射時に RF 位相をずらしてダイポール振動を発生させ、縦方向のエミッタンスを増やす方法が採られている。現状では約 50kW のビームパワーによる利用運転が実現されている[1]。

更なるビームパワー増強のためには、より効率的な縦方向エミッタンスの増大が求められる。対策のひとつとして VHF (Very High Frequency) 空洞による縦方向エミッタンスの増大が挙げられる。これは CERN の PS (Proton Synchrotron)[2]や BNL の AGS (Alternating Gradient Synchrotron)[3]でも効果が確認されている方法である。

本報告では、縦方向エミッタンス増大のための加速空洞と入力カプラの電磁場設計について述べる。

2. 縦方向エミッタンスの増大

2.1 MR の RF 運転条件

MR の基本波 RF 機器の仕様を Table 1 に示す。これに加えて 2 台の 2 倍高調波空洞が存在する。SX 運転におけるビーム運動量パターンと基本波の電圧パターン(MR 一周の電圧)を Fig. 1 に示す。現状では SX 運転時は 2 倍高調波空洞を使用していない。SX パターン自体は 5.2 s であるが、ここではパターン開始から FT に至る 2.0 s までを表示している。加速終了後、ビームをデバンチするために FT では RF 電圧をゼロとしている。

Table 1: Specifications of RF Systems in MR

ビームエネルギー [GeV]	FB: 3, FT: 30
バンチ数	8
ハーモニック数	9
共振周波数 [MHz]	1.672 – 1.721
最大電圧 [kV]	60 per cavity
基本波空洞 Q 値	~ 20
基本波空洞台数	7

2.2 VHF 空洞による縦方向エミッタンスの増大

VHF 空洞の仕様を Table 2 に示す。VHF 空洞の動作

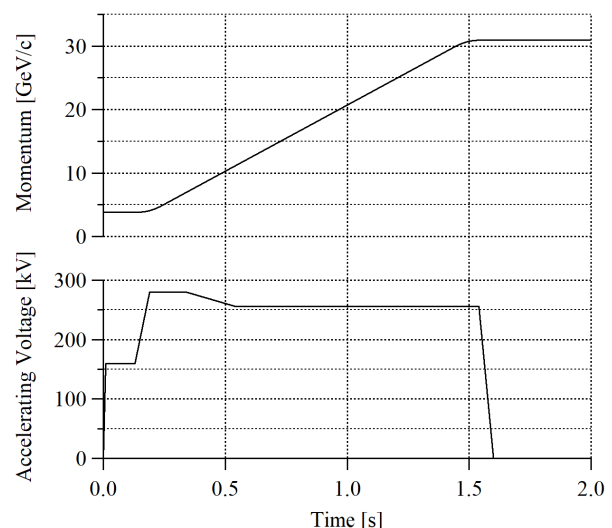


Figure 1: Momentum pattern of beam (top) and RF voltage pattern (bottom).

[#] yuichi.morita@kek.jp

Table 2: Specifications of VHF Cavity

共振周波数 [MHz]	117.95
最大電圧 [kV]	50 per cavity
Q _L 値	2400 以下
位相変調の振幅 $\Delta\phi_m$ [rad]	π
台数	2

期間としては、FB あるいは FT を考えている。FB、FT でのハーモニック数はそれぞれ 635 (117.94998 MHz)、617 (117.95015 MHz) を選ぶ。両者は近い周波数なので空洞の共振周波数を微調すれば FB でも FT でもどちらでも使用することができる。

VHF 空洞と基本波空洞を合わせた RF 電圧 V_t は以下のように書ける。

$$V_t = V_0 \sin \omega_0 t + V_b \sin(\omega_b t + \psi(t)) \quad (1)$$

ここで、 V_0 , ω_0 はそれぞれ基本波の電圧と角周波数であり、 V_b , ω_b はそれぞれ VHF の電圧と角周波数である。 $\psi(t)$ は、

$$\psi(t) = \Delta\phi_m \sin \omega_m t \quad (2)$$

と表される。ここで、 $\Delta\phi_m$, ω_m はそれぞれ位相変調の振幅、

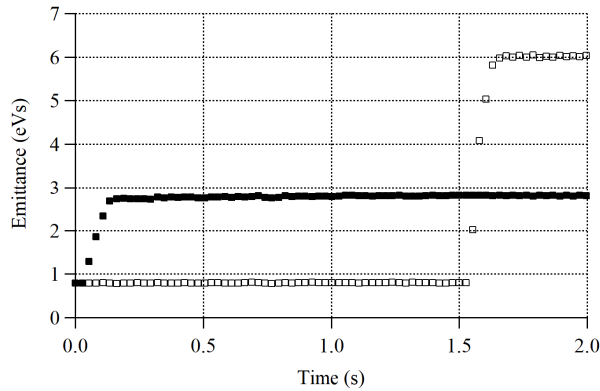


Figure 2: Longitudinal emittance as a function of time. Black and white squares represent emittance blow-ups at FB ($\omega_m/\omega_s=16$) and FT ($\omega_m/\omega_s=6$), respectively.

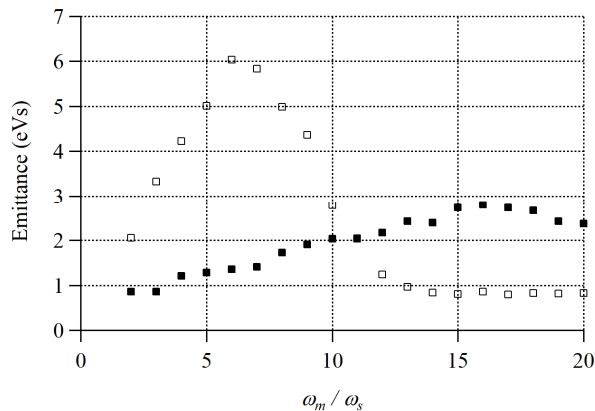


Figure 3: Longitudinal emittance at 2.0 s as a function of ω_m/ω_s . Black and white squares represent emittance blow-ups at FB and FT, respectively.

変調周波数である[4]。

VHF 空洞を動作させたときの縦方向エミッタンスの時間変化を BLoND により計算した結果を Fig. 2 に示す。VHF 空洞の電圧は 100 kV (2 台運転)、入射エミッタンスは 0.7 eVs とし、FB、FT それぞれでの動作時の ω_m/ω_s を 16、6 としたときの結果である。VHF 空洞によるエミッタンス増大の効果を見るため、ビームローディングおよび空間電荷効果は考慮していない。また、FT における基本波の電圧は 256 kV 一定としている。Figure 2 より、VHF 空洞を FB、FT の期間内それぞれにおいて 0.1 s 間動作させたときにエミッタンスが増大し、その他の期間では一定であることがわかる。

次に縦方向エミッタンスの ω_m/ω_s 依存性を Fig. 3 に示す。横軸を ω_m/ω_s として、2.0 s におけるエミッタンス値をプロットしている。最も効率の良い増大が見られるのは FB 期間の動作では $\omega_m/\omega_s=16$ 、FT 期間の動作では $\omega_m/\omega_s=6$ であった。

3. 加速空洞

3.1 構造

VHF 空洞は $\lambda/4$ 同軸共振構造である[5]。断面図を Fig. 4 に示す。

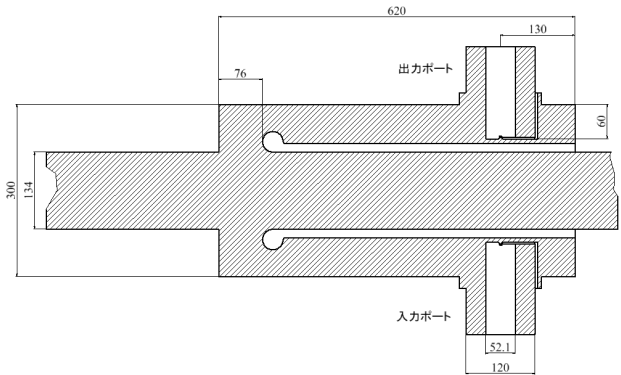


Figure 4: Cross-section of VHF cavity.

位相変調に対する Carson's rule によると加速電圧に位相変調を与えた時の実効的な周波数帯 BW は

$$BW = 2f_m(1 + \Delta\phi_m) \quad (3)$$

と表される[6]。ここで、 f_m は位相変調周波数である。よって、 $\Delta\phi_m=\pi$ とすると、空洞の周波数帯は 50 kHz 以上でなければならない。従って、Q_L 値としては 2400 以下が求められる。入力ポートは空洞内で磁場が最も強くなる端板付近に位置し、ループアンテナによって空洞と結合する。

結合パンチ不安定性を抑制するために Z/n を小さくしなければならず、Fig. 4 のように 50Ω 終端の出力ポートを付ける。ただし、3.3 節で触れるように、加速電圧が低下してしまうので、50 Ω 終端の有無を切り替えるスイッチが必要な可能性がある。

3.2 固有値計算

HFSS による固有値計算を行った。共振周波数 117.95 MHz を得るための寸法は Fig. 4 の通りである。内導体の外径は MR のビームパイプ径 134 mm に合わせ、空洞長に対しては限られたスペースに設置するために 700

mm 以下という制限を課した。

3.3 加速電圧

入力ポートから 100 kW ピークの電力を入力したときの空洞の中心軸上の電場強度を計算した結果を Fig. 5 に示す。横軸の両端は Fig. 4 のモデルの両端である。出力ポートがある場合、空洞の中心軸に沿ったライン上の電場強度は実線のようになり、加速電圧としては 30 kV しか得られない。出力ポートが無い場合は破線のようになり、60 kV の加速電圧が得られる。よって、当該モデルでは 50 Ω 終端の有無を切り替えるスイッチが必要と考えられる。更なる最適化により、出力ポートがある場合でも 50 kV 以上の加速電圧が得られるモデルを模索する。

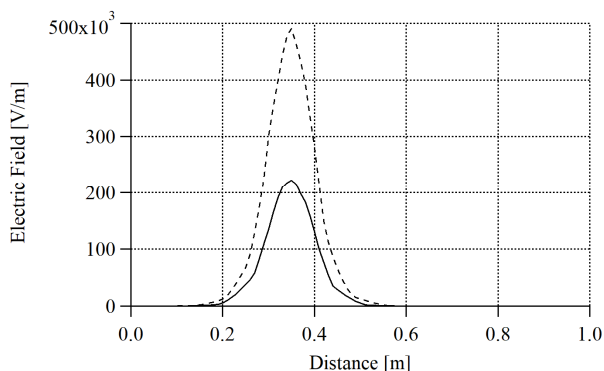


Figure 5: Simulated electric field distributions along longitudinal axis of cavity.

4. 入力カップラ

4.1 構造

入力カップラの断面図および RF 窓の仕様を Fig. 6、Table 3 に示す。2 次電子放出を抑制するために RF 窓の片面には窒化チタン膜を形成する。真空封止にはメタルシールを用いる。RF 窓の内径側、外径側それぞれにメタルシールを配置し、内導体内部の構造及び外導体外部のフランジをボルト締結する力で封止する。

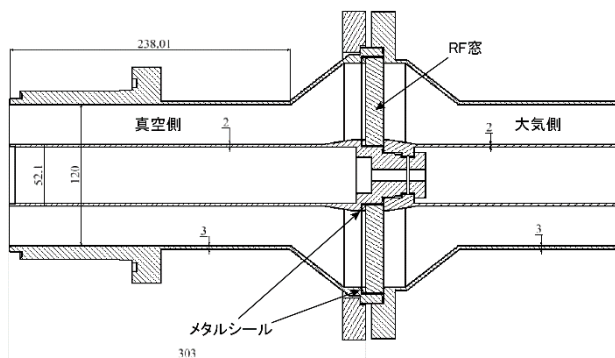


Figure 6: Cross-section of input coupler.

4.2 電磁場解析

Figure 7 は HFSS による S_{11} の計算結果である。RF 窓付近の構造の寸法を微調することにより、117.95 MHz で S_{11} が最小値を取るように調整した。実際の組込みにお

いてはループアンテナの角度を調整することでアンプ側から見た空洞とマッチングを取る。電磁場解析によると 100 kW ピークの給電をした場合のカプラ内の電場は RF 窓内径と金属が接する付近で最大値をとり、高々 1.7 MV/m 程度である。

Table 3: Specifications of RF Window [7]

内/外径 [mm]	50/200
厚み [mm]	15
材質	Al ₂ O ₃ (Kyocera/A479B)
アルミナ純度 [%]	99.8
密度 [g·cm ⁻³]	3.9
比誘電率 (1 MHz)	9.9
誘電損失 (8 GHz)	0.4×10 ⁻⁴

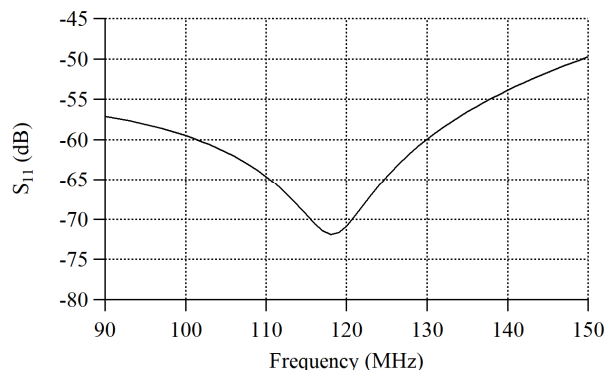


Figure 7: Simulated S_{11} of input coupler.

4.3 真空引き試験

RF 窓部分の真空封止は BNL の AGS の VHF 空洞に倣い、メタルシールを用いる。この構造は RF 窓が損傷した場合に RF 窓とメタルシールを交換するだけで済むのが利点である。

実機製作前にモックアップを組んで真空引きの試験を行う予定である。真空引きにはヘリウムリークディテクタを用い、モックアップにヘリウムを吹き付けてリークチェックする。このとき、大気側のセラミック面にひずみゲージを取り付けてひずみ量をチェックする。

RF 窓片面に大気圧 (1013 hPa) が掛かったとして Autodesk で構造解析した結果を Fig. 8 に示す。RF 窓両面の内外径をステンレスのリングで拘束したモデルである。使用した物性値は Table 4 の通りである。ここでは A479B と物性値に近い A479S の値を使用している。予想される軸方向の最大変位量は 0.29 μm であり、径方向のひずみ量は最大で 5.4×10^{-6} である。

また、当該モックアップの両端にはテーパ管が取り付けられる構造とし、ネットワークアナライザによる S_{11} 測定が可能な設計とする。

Table 4: Parameters for Structural Analysis[8]

	RF 窓	ステンレス鋼
ヤング率 [GPa]	370	193
ポアソン比	0.23	0.3

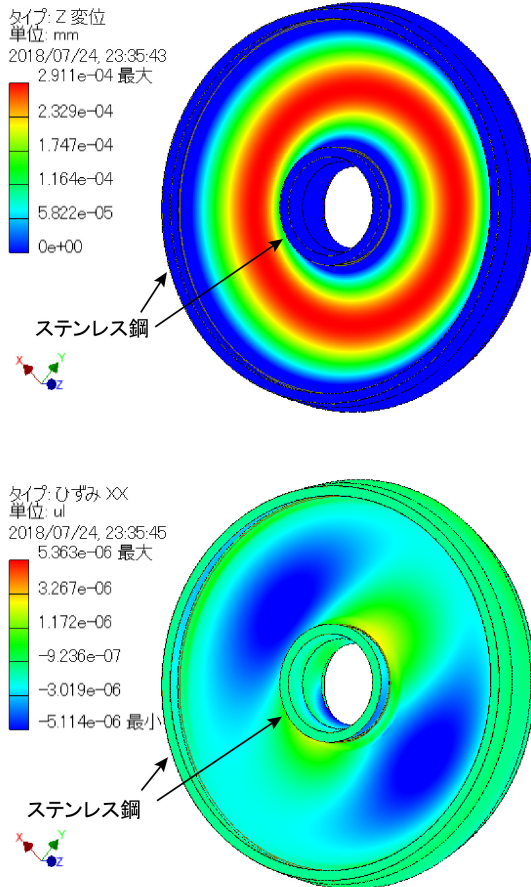


Figure 8: Simulated displacement (top) and strain (bottom) of RF window in vacuum test.

5. まとめ

J-PARC MR の SX 運転ではビーム強度増加に伴いビームの不安定性が増している。対策のひとつとして VHF 空洞による縦方向エミッタンスの増大が挙げられる。VHF 空洞を動作させた場合の縦方向エミッタンスの変化を計算し、 ω_m / ω_s に依存した増大率が得られることを確認した。117.95 MHz の共振周波数をもつ空洞モデルで加速電圧を計算し、100 kW ピークの給電時に出力ポートありのモデルで 30 kV、無しのモデルで 50 kV 以上が得られた。入力カプラに関しては、 S_{11} が最小となるように寸法を最適化した。メタルシールを用いた真空封止を計画しており、そのための真空引き試験を行う予定である。

今後は出力ポートありで 50 kV 以上の加速電圧が得

られるモデルの模索、空洞の共振周波数を微調整するためのチューナーの設計、入力カプラと空洞の熱解析、アンプの設計を進めていく。

参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, “Present Status and Future Plans of J-PARC Slow Extraction”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2013, pp. 70-74.
- [2] D. Boussard *et al.*, “The PS 200 MHz RF System Present Situation and Future Prospects”, CERN-SPS/ARF/78-6.
- [3] R. K. Reece *et al.*, “Operational Experience and Techniques for Controlled Longitudinal Phase Space Dilution in the AGS Using a High Harmonic Cavity”, Proceedings of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference, Chicago, USA, Mar. 20-23, 1989.
- [4] M. Yamamoto *et al.*, “Simulation of Phase Modulation for Longitudinal Emittance Blow-up in J-PARC MR”, JPS Conf. Proc. 8, 012015(2015).
- [5] K. Hasegawa *et al.*, “Calculations of the High Frequency Cavity Used to Make a Controlled Blow-up of the Longitudinal Emittance in J-PARC MR”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 953-955.
- [6] J. M. Brennan *et al.*, “A High Harmonic Cavity for Controlled Longitudinal Phase Space Dilution in the AGS”, Proceedings of the 1st European Particle Accelerator Conference, Rome, Italy, Jun. 7-11, 1988.
- [7] K. Ozeki, “Problems in Thermal Cycle Test of Cold Window for RIKEN QWR”, World Wide Fundamental Power Coupler meeting #2, Geneva, Switzerland, Jul. 12-13, 2016.
- [8] Characteristics of KYOCERA FINE CERAMICS; <https://global.kyocera.com/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>.