

J-PARC MR ビームのエミッタンス制御のための 50-80MHz 空洞 50-80MHz RF CAVITY FOR EMITTANCE CONTROL OF J-PARC MR BEAM

大森千広

Chihiro Ohmori *
J-PARC/KEK

Abstract

a J-PARC Main Ring delivers 800 kW proton beam to T2K long-baseline neutrino experiment after the upgrade of the MR including RF systems and magnet power supplies. It also supplies 80 kW by the slow extraction to Hadron Experimental Hall. Future Hyper-K experiment requires 1.3 MW beam power. Because of high flux density of neutrino beam at the near detector, pile up of events is a concern and reduction of peak beam intensity is desired. Higher harmonic RF systems are used to enlarge the longitudinal emittance in other proton accelerators. In this paper, a new wideband VHF cavity technology is described. Based on the impedance measurement of a test cavity, longitudinal beam simulation was performed using the code, BlonD. Simulation results show the controllable emittance growth during the beam acceleration. This technique is also applicable to dilute the phase space area during the injection to reduce the micro structure of the beam caused by the filamentation by a large phase offset at the injection.

1. はじめに

J-PARC MR は 2024 年 6 月に 800 kW の定常運転を実現し、ハイパーカミオカンデ実験に向け 1.3 MW のビームパワーを目指している [1]。また、遅い取り出しでも 80 kW をハドロン実験ホールに供給し、今後のターゲット開発にともない更なるビーム強度増強を予定している。ハイパーカミオカンデ実験では J-PARC の近くにも検出器が置かれる予定である [2]。MR のビームパルスの幅は狭く、粒子数も 3.2×10^{14} となるため、この検出器でのイベントのバイルアップが懸念されている。これを減らすためにはビームパルスの幅を広げ、ピーク強度を下げる必要がある。このための手法として、CERN や BNL では高調波を用いたエミッタンスの制御 [3-7] が行われている。ここで CERN PS と BNL AGS はそれぞれ 200 MHz, 93 MHz の狭帯域空洞であるのに対し、CERN PSB では広帯域の金属磁性体空洞を加速周波、2 次高調波、高調波の異なる周波数を同時出力できるため、加速中も使用することができる [7,8]。一方 J-PARC では BNL 型の狭帯域の空洞を用いたエミッタンス増大の検討がなされてきた [9,10]。

また、遅い取り出しにおいても取り出し直前にビームをデバンチする際にビームが不安定になりビーム損失を招くことがある。これはビームの持つマイクロ構造により発生する電子雲によるものと考えられている。こうしたビーム不安定性を防ぐため、マイクロ構造の一因となる機器を特定し、対策が実施されている。遅い取り出しでは MR 入射時に位相各にして 60 度程度のオフセットを付けており、RCS から入射されたビームのエミッタンスを広げている。この際に生じるフィラメンテーション構造は加速中も消えることはなく、マイクロ構造の一因と考えられている。こうした構造を減少させるためには高調波空洞は有効であると考えられる。

CERN PS では MR と同様に縦方向の結合バンチ不

安定性が観測され、LHC 高輝度化の障害となっていた [11-14]。この不安定性は J-PARC が協力した広帯域空洞を用いたダンパー空洞によりダイポール振動モードを抑え、さらに 4 倍高調波にあたる 40 MHz 空洞により四極振動モードを抑えることにより必要とされる要求性能を満たすことができた [15]。この 40 MHz 空洞は空芯の狭帯域の空洞であり、加速の後半に使用されている。この対策の過程で更に帯域の広い空洞が必要ではないかと考え、CERN の M. Paoluzzi 氏により金属磁性体空洞と外部共振回路を用いた案が提案された。空芯の狭帯域の空洞の成功により、広帯域の 40 MHz 空洞は CERN では実用化されることはなかったが、J-PARC ではこの広帯域 VHF 試験空洞の改良を行い、空洞測定に基づいて MR に使用できる空洞設計を行った。この空洞設計に基づき、広帯域 VHF 空洞を用いたエミッタンス制御についてシミュレーションコード計算を行った。広帯域型の空洞を使う利点は加速中にエミッタンス制御ができるため、加速周期に影響しないことである。

2. 空洞設計

Figure 1 に広帯域 VHF 空洞の概念図を示す。空洞の基本パラメータを Table 1 にしめす。

Table 1: VHF Cavity Parameters

Length	400 mm/cell
Width	400 mm
Core	Magnetic alloy core
Number of Cores	6
Outer diameter of Core	330 mm
Number of Stub	1
Diameter of Stub	150 mm
Gap voltage	7 kV
Final stage amplifier	Tube amplifier
Tube	Tetrode, 20 kW or larger

* chihiro.ohmori@kek.jp

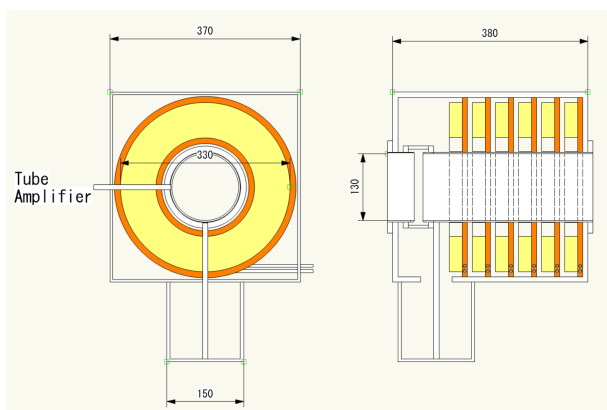


Figure 1: Wideband VHF cavity.

金属磁性体コア 6 枚は絶縁シートを介して冷却銅板に固定され間接的に冷却される。この方式は CERN の PSB および PS のダンパー空洞などで使用されており、コア 1 枚当たり 500 W の発熱を容易に冷却できる。コアのサイズは量産実績のある同じく CERN の物と同じ外径 330 mm とした [7, 15]。この空洞の下部には同軸構造を持つ外部共振回路 (Stub) が接続され、外部インダクターとして機能し共振周波数を VHF 帯にする役割を担っている。ビーム電流の低周波成分はこの Stub を通る構造となっている。Stub 自体のインダクタンスは小さく、低周波領域でのインピーダンスも小さくなる。この空洞の横には四極管を用いた真空管増幅器が直結され高調波電圧およびビーム負荷補正電流を供給する。四極管は直径約 12 cm (2 kW) または 24 cm (100 kW) の中型の物であり、増幅器全体を 40cm 幅程度にすることにより、MR リングのアーク部の短い直線部に空洞システムを接地した際に通路に大きくはみ出すことを避けることができる。

3. 試験空洞でのインピーダンス測定

Figure 2 に試験空洞の写真を示す。ネットワークアナライザを用いた空洞インピーダンス測定の結果を Fig. 3 にしめす。測定は Stub の外径、長さ等を変えて行われた。上図の 40 MHz は CERN で検討されていた周波数、下図の 65 MHz は本研究で目標としている周波数の一つで周回周波数の 340 倍 ($H=340$) に相当する。空洞単体での Q 値は 16.7 で、バンド幅は 3.9 MHz である。MR の加速中の周波数変化は 3% にすぎないので、この空洞は加速サイクル全体をカバーできていることが分かる。ただし、バンド幅が広すぎることはビームによって誘起される電圧が大きくなることを意味するため、加速ギャップに接続する真空コンデンサを増やすと同時に Stub のインダクタンスを減らすことで Q 値を 25~30 程度に増やすことが望ましい。

4. BLOND を用いたシミュレーション計算

BlonD は CERN が開発したシンクロトロンにおける縦方向のシミュレーションコードである。本計算では加速の後半に $h_N=342$ の高調波 14 kV を加え、それをシンクロトロン振動の数倍の周期で位相を $0\sim 2\pi$ 変化させることで、高周波バケツ内である振幅をもって振動し

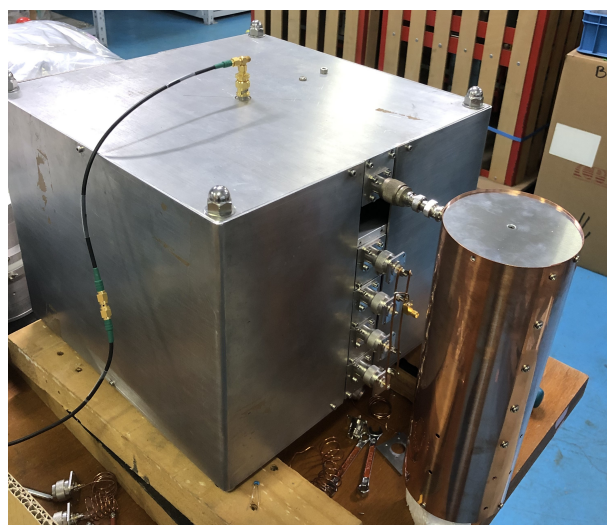


Figure 2: Wideband VHF test cavity.

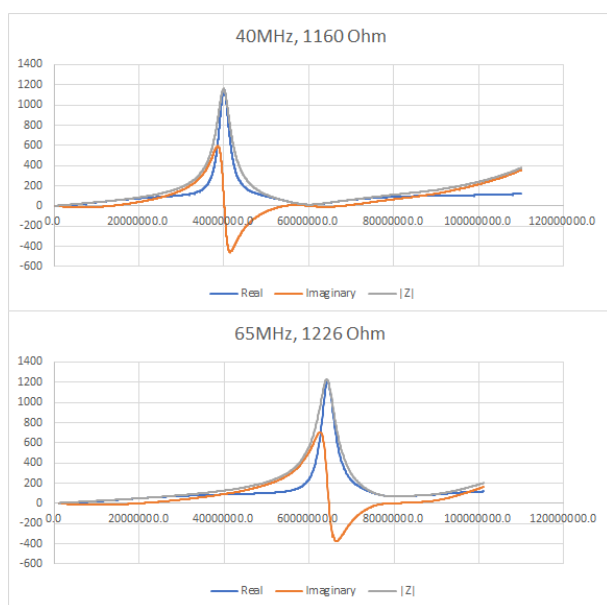


Figure 3: Impedance measurements of Wideband VHF test cavity. Upper : Stub was tuned to resonate at 40 MHz, Lower : 65 MHz.

ている粒子の振幅を変化させている。Figure 4 左図に高調波を印加しているのは本計算では加速後半の 0.32 秒から 0.18 秒間であり、磁場が線形的に変化している範囲である。印加している高調波電圧、 V_N はわずか 14 kV に過ぎず、加速後半の加速電圧 400 kV に比較して小さいが 38 倍の高調波であり、Fig. 4 右図のようにがビームの存在する範囲で位相変調を受けることが分かる。高調波空洞により十分な位相変調が実現できるかは、電圧の合計値 (Equation 1) とその時間微分 (Equation 2) から求められる。ここで h_{RF} と h_N は MR の RF 基本波と高調波のハーモニック数である。ビームが存在する範囲で時間微分が正負両方の値を取る場合効果的な位相変調となる。このため N は大きい方が望ましく、本計算では試験空洞測定から $h_N=342$ (65 MHz) を選択

している。BlonD での計算の都合から基本波 ($h_{RF}=9$) の 38 倍に相当するが、高調波空洞の周波数は周回数は数の整数倍であれば、基本波周波数の整数倍である必要はない。高調波電圧の位相は Equation 3 の $\psi(t)$ の項により振動する。ここで振動の振幅は高調波の位相にして $\pm\pi$ であり、周期はこの計算ではシンクロトロン振動の 3 倍を選んだ。Figure 5 に計算結果を示す。左が VHF なし、右が VHF14 kV ありの図である。上図は加速後半のバンチ形状の時間変化を示しており、VHF なしではバンチが細くピーク強度が増加していることが分かる。左右を比較すると、VHF があるとバンチのピーク強度増加が抑えられていることが分かる。下図を用いて VHF 印加時間 180 ms の前後での比較しても同様に VHF の効果が見えている。Figure 5 左図ではバンチ形状は加速開始後 0.32 秒後の赤色から 0.5 秒後の青色へと狭くなり、ピーク強度も増えている。それに対し、右図ではバンチ幅は 180 ms の間変化せず、ピーク強度の増加も抑えられていることが分かる。

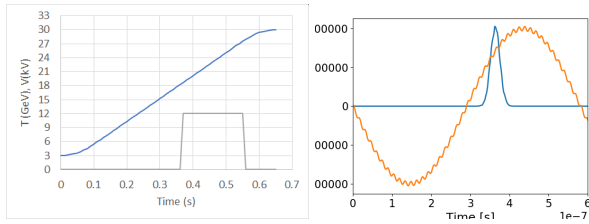


Figure 4: Left: VHF RF voltage during acceleration, Right: Total RF voltage and beam bunch.

$$V = V_9 \sin(h_{RF}\omega_0 t + \phi_s) + V_N \sin(h_N\omega_0 t + \psi(t)) \quad (1)$$

$$V' = h_{RF}\omega_0 V_9 \sin((h_{RF}\omega_0 t + \phi_s) + h_N\omega_0 V_N \sin(h_N\omega_0 t + \psi(t)) \quad (2)$$

$$\psi(t) = \Delta\phi_{mod} \sin 2\pi k f_s t \quad (3)$$

上記の計算では VHF 電圧を 14 kV について計算を行った。これは Fig. 1 の空洞を 2 台使用した場合の電圧である。空洞の台数を増やすまたは VHF の印加時間を伸ばすことにより、エミッタンス増加の量は制御可能である。VHF 空洞を 5 または 6 台とし、電圧を 40 kV にした場合のバンチ波形の変化等を Fig. 6 に示す。Figure 5 にくらべバンチのピーク値が約半分程度になったことが分かる。なお、位相振動の早さはシンクロトロン振動 (f_s) の 4 倍とした。

5. 駆動方式

VHF 空洞の駆動方式として半導体増幅器および真空管増幅器の両者について検討した。半導体増幅器については寿命が長いなどの利点があるが、本空洞に必要な大出力のものは価格が高くなるなどの問題があり、真空管増幅器による駆動を検討している。VHF 帯の真空管増幅器はすでにサイクロトロンなどで多数作られており、技術的に大きな困難はない。また、最終段部分を

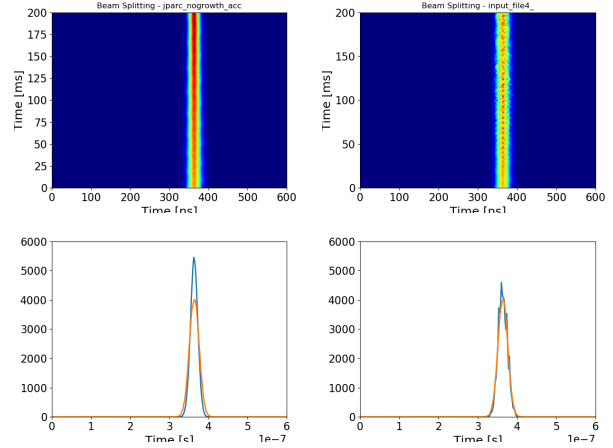


Figure 5: Top Left: Waterfall plot of beam bunch during acceleration without VHF RF, Top Right: With VHF voltage., Bottom Left: Beam bunch without VHF RF at 0.32 sec and at 0.5 sec, Bottom Right: With VHF voltage. Red and blue lines are before and after the period to apply the VRF voltage.

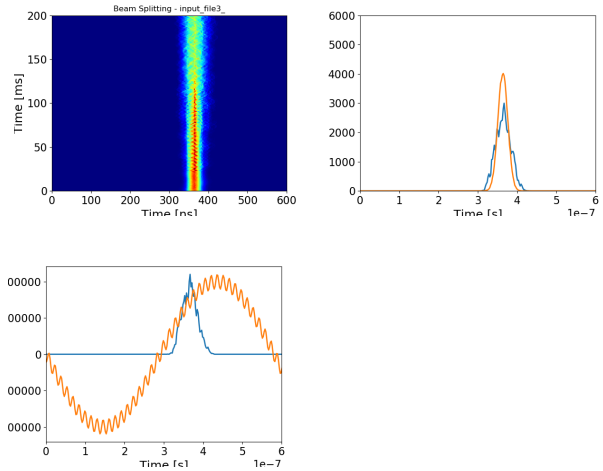


Figure 6: Top Left: Waterfall plot of beam bunch during acceleration with 40 kV VHF RF, Right: Beam bunch at 0.32 sec and at 0.5 sec. Red and blue lines are before and after the period to apply the VRF voltage. Bottom Left: Total RF voltage (Red line) and beam bunch (Blue line).

トンネル内に設置できるため地上部から地下への大掛かりな高周波伝送線路工事は不要である。使用する真空管は陽極損失 20 kW 程度の小型のものから、使用経験のある 100 kW の物が考えられる。筐体の大きさは小型のサイクロトロン用のもの実績から縦 600 mm x 横 750 mm x 高さ 1.65 m 程度の大きさとなる。これにより、トンネル内のアーク部に接地した場合も通路へのはみ出しは最小限であり、設置場所の選択の自由度が広がる。Figure 7 にアーク部に接地した場合のトンネル内の位置関係を示す。

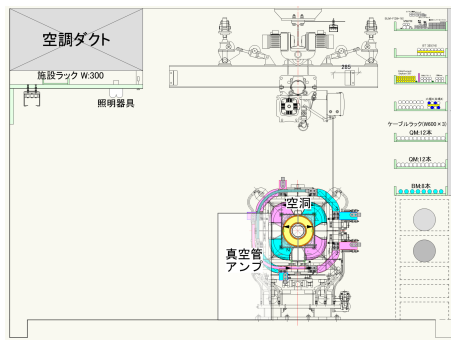


Figure 7: VHF Cavity and tube amplifier in the arc section of the MR tunnel.

6. 遅い取り出しへの応用

VHF 電圧をビームの位相オフセット入射時に加えることでビーム分布をなめらかにし、フィラメンテーションによるピーク構造を軽減できることはすでにBNLのAGSにおいて実証されている。今後、MRの条件で60度程度の位相オフセットがある場合のシミュレーション計算を実施する予定である。また、早い取り出し運転と同様に加速中もVHFを加えることでより滑らかなビーム分布を形成することは、高強度での遅い取り出し時に問題となるマイクロ構造出現によるビーム損失を回避することにつながる可能性もある。入射時の基本波電圧は180 kV程度でビームが大きな位相角を持つ位置にも存在しているため、早い取り出し運転時に加速後半で影響を見るために必要な14 kV程度よりも低い電圧で効果を見ることができると考えられる。

7. まとめ

広帯域VHF帯の空洞によるエミッタンス制御について検討を行った。金属磁性体空洞と外部共振器を組み合わせた広帯域VHF空洞は加速中に使用できるため、高繰り返しを妨げることがない。バンチのピーク値を半分程度にするには40 kVのVHF電圧が必要となるが、14 kV程度の低い電圧でもある程度エミッタンス増加の効果が期待できる。ピーク電流を下げることはハイパーカミオカンデ実験にも役立つと同時にハドロン実験のためのビーム増強にも役立つことが期待できる。

謝辞

Stub型の外部共振回路のアイデアを提供していただいた長年の共同研究者CERNのM. Paoluzzi氏に感謝します。BlonDを使った計算や試験空洞の測定ではJ-PARC RFグループに協力をいただきました。

参考文献

[1] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2021, 033G01 (2021). doi:10.1093/ptep/ptab011

[2] M. Tomizawa *et al.*, “Tracking error analysis on the power supply currents of J-PARC main ring main magnets”, in *Proc. IPAC'24*, Nashville, TN, May 2024, pp. 1665-1668. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-TUPS14

[3] D. Boussard, “The PS 200 MHz RF System Present Situation and Future Prospects”, CEKN-SPS/XRF/78-6.

[4] R.K. Reece *et al.*, “Operational Experience and Techniques for Controlled Longitudinal Phase Space Dilution in the AGS Using a High Harmonic Cavity”, in *Proc. of PAC 1989*, Chicago, March 1989, pp. 1934.

[5] J. M. Brennan *et al.*, “A High Harmonic Cavity for Controlled Longitudinal Phase Space Dilution in the AGS”, in *Proc. of EPAC1988*, Roma, June 1988, pp. 1006-1008.

[6] H. Damerou *et al.*, “Controlled Longitudinal Emittance Blow-up in the CERN PS”, in *Proc. of PAC07*, Albuquerque, June 2007, pp. 4186-4188.

[7] M.M. Paoluzzi *et al.*, “The New 1-18 MHz Wideband RF System for the CERN PS Booster”, in *Proc. IPAC'19*, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 3063-3065, doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPRB107

[8] S.C.P. Albright, F. Antoniou, F. Asvesta, H. Bartosik, C. Bracco, and E. Renner, “New Longitudinal Beam Production Methods in the CERN Proton Synchrotron Booster”, in *Proc. IPAC'21*, Campinas, SP, Brazil, May 2021, pp. 4130-4133. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB183

[9] M. Yamamoto *et al.*, “Simulation of Controlled Longitudinal Emittance Blow-up in J-PARC MR”, *Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 515-519.

[10] Y. Morita *et al.*, “Design of VHF System in J-PARC Main Ring”, *JPS Conf. Proc.* 33, 011032 (2021). doi:110.7566/jpscp.33.011032

[11] F. Tamura, K. Hara, K. Hasegawa, R. Miyakoshi, M. Nomura, C. Ohmori *et al.*, “RF Systems of J-PARC Proton Synchrotrons for High-Intensity Longitudinal Beam Optimization and Handling”, in *Proc. 68th Adv. Beam Dyn. Workshop High-Intensity High-Brightness Hadron Beams (HB'23)*, Geneva, Switzerland, Oct. 2023, pp. 305-311. doi:10.18429/JACoW-HB2023-WEC4I1

[12] Y. Sugiyama *et al.*, “Analysis of longitudinal beam oscillation in J-PARC MR Beam longitudinal dynamics simulation for high-power upgrade of J-PARC MR”, *Proc. 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2017)*, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 1072 - 1076.

[13] H. Damerou, A. Lasheen, and E.N. Shaposhnikova, “Higher-Harmonic RF System for Landau Damping in the CERN PS”, in *Proc. IPAC'18*, Vancouver, BC, Canada, Apr. 4, pp. 728-731, doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-TUPAF026

[14] H. Damerou, V.D. Desquiens, A. Huschauer, A. Jibar, A. Lasheen, B. Mikulec *et al.*, “Improved Longitudinal Performance of the LHC Beam in the CERN PS”, in *Proc. IPAC'22*, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 2165-2168. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEP0TK046

[15] C. Ohmori and M.M. Paoluzzi, “Magnetic Alloy Loaded Cavities in J-PARC and CERN”, in *Proc. 68th Adv. Beam Dyn. Workshop High-Intensity High-Brightness Hadron Beams (HB'23)*, Geneva, Switzerland, Oct. 2023, pp. 316-320. doi:10.18429/JACoW-HB2023-WEC4C1