

J-PARC メインリングにおける RF 加速空洞のインピーダンスのモデル化 MODELING OF THE IMPEDANCE OF RF CAVITIES IN THE J-PARC MAIN RING

小林愛音 ^{*A)}, 田村文彦 ^{B)}, 吉井正人 ^{A)}, 外山毅 ^{A)}, 長谷川豪志 ^{A)}

Aine Kobayashi ^{*A)}, Fumihiko Tamura ^{B)}, Masahito Yoshii ^{A)}, Takeshi Toyama ^{A)}, Katsushi Hasegawa ^{A)}
^{A)} KEK, ^{B)} JAEA

Abstract

The high intensity proton beam at the J-PARC MR is undergoing an intensity upgrade. In the debunching process for the slow extraction, which is the process of making a coasting beam, micro-bunching structures are generated and transverse beam instabilities are induced by electron clouds, which is a problem. Since beam loss is a problem that limits the beam intensity and radiates the devices. Therefore, it is essential to identify the causes and take countermeasures. The relationship between the large impedance of the RF accelerating cavity and the microbunching structure has been studied. An understanding of the origin of the major impedance resonance by simulation, comparison with measurements, and evaluation is reported.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC は、400-MeV linac [1]、3-GeV rapid cycling synchrotron (RCS) [2]、30-GeV main ring (MR) [3] から構成される。MR は速い取り出し (FX) 運転でニュートリノ実験施設へ、遅い取り出し (SX) 運転でハドロン実験施設へビームを供給している。今年 FX 運転で 750 kW 運転を達成した。今後は利用運転に向けた調整、さらに 1.3 MW に向けたアップグレードを進めていく [4]。SX 運転ではこれまで 67 kW 運転を達成し、今後 100 kW 以上の運転を目指す。

大強度ハドロン加速器である MR では、放射化が問題になりビームロスによりビーム強度が制限される。現在 MR で許容できるビームロス量は、メンテナンスを基準にした残留線量で場所毎に基準値が決められ、その値を超えないようにビーム強度を制限している。1.3 MW を目指したアップグレードはバンチあたりの粒子数が増えるだけでなく繰り返し周期も上げて行うため、その分ロス量は削減しなくてはならない。加速空洞の追加や取り出し機器などハードウェアのアップグレードによりビーム強度の増強準備を進めているが、その影響でビーム不安定性が起こらないよう対策を考慮しておく必要がある。

SX 運転のデバンチ過程 (バンチ状のビームを加速高周波電圧をオフすることで連続ビームにする操作) では、ビーム周波数帯域が数百 MHz にあるインピーダンス源の影響を受ける。これによりマイクロバンチ構造が発生し [5]、電子雲と横方向ビーム不安定性が誘発されていることが問題になっている。ハドロン加速器である MR におけるビームロスは機器の損傷や放射化を引き起こしビーム強度増強の妨げとなるため原因解明と対策が必須である。

主要インピーダンス源である RF 加速空洞の調査を行った [6]。ビーム操作による対処の試み [7] や新しくインストールする別の装置への対策 [8] の検討が進められてきた。しかしビーム操作による対処は限界があることと、RF 加速空洞のインピーダンスの低減はできていない。今後強度を上げていくとさらに厳しい条件になる

ため、現象を深く理解し、インピーダンスを削減する方法を模索する必要がある。今回、RF 加速空洞のシミュレーションによるインピーダンスの主要なレゾナンスの由来の理解と測定との比較、および評価を報告する。

2. RF 加速空洞のインピーダンス

MR シンクロトロンでは、加速空洞 (基本波) 7 台、および空間電荷効果を低減するための 2 次高調波空洞 2 台の体制を取っている。2022 年度からスタートした高繰り返し運転では、加速空洞 (基本波) 8 台と 2 次高調波空洞 2 台でビーム運転を開始した。今後更なる高繰り返し化のため、加速空洞 (基本波) を 11 台まで増強する計画である [4]。MR で使用する加速空洞は高い加速電場勾配を実現するために、金属磁性体が使用されている。構造的には、加速ギャップが 4 つまたは 5 つある空洞が加速器リングに据え付けてられているが、5 ギャップ空洞は一つのギャップを機械的にショートし、基本的に全ての空洞を 4 ギャップ空洞としてビーム運転に使用している。Figure 1 は、測定結果をベースに見積もったリング一周の縦方向のインピーダンスを示す。この測定から加速空洞のインピーダンスがリングの縦方向インピーダンスへの寄与が大きいと考えられている。

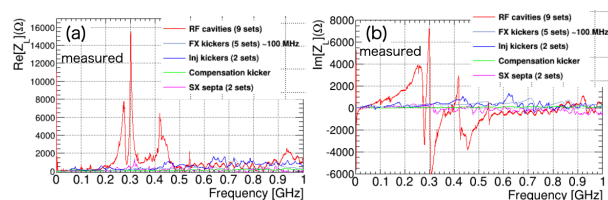


Figure 1: (a) Real and (b) imaginary parts of the current measured major longitudinal impedances.

3. RF 加速空洞のシミュレーションモデル

測定結果の理解と今後の対策の検討に向けてシミュレーションモデルを構築した。シミュレーション計算自体は 3 次元電磁場計算ソフト CST studio wake solver [9] を用いた。

* aine.kobayashi@kek.jp

3.1 実物との大きな違い

ブスパーやアンプは省略した。実測定にてそれらがつながっているかどうかは、レゾナンスの大きさに影響はあるが周波数は変わらないことがわかっている。今回の目的には関係ない。

3.2 コンデンサーなしの状態

RF 空洞にコンデンサーを設置することで、RF 基本波および二倍高調波の周波数を設定している。コンデンサーがないときは、Fig. 2 に示すように 100 MHz 以下の低周波にインピーダンスを持つ。実際には加速周波数 1.7 MHz 周辺のウェイク場はビームローディング補償により打ち消される [7]。

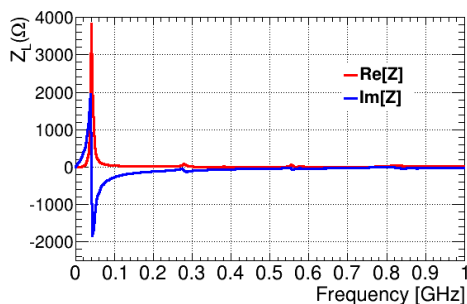


Figure 2: Simulation results of the longitudinal impedance of the RF-cavity without capacitor.

3.3 コンデンサーのモデル

実際のコンデンサーは中の構造が複雑であり、それをシミュレーションで再現することは本研究の目的ではない。円筒形の形状だけ模擬し、静電容量が例えば 370 pF になるように誘電率を設定してモデル化した。

3.4 モデルの全体像

4 ギャップ空洞のモデルの全体像を Fig. 3 に示した。(a)4 ギャップ空洞の外観の全体像、ブスパーのための

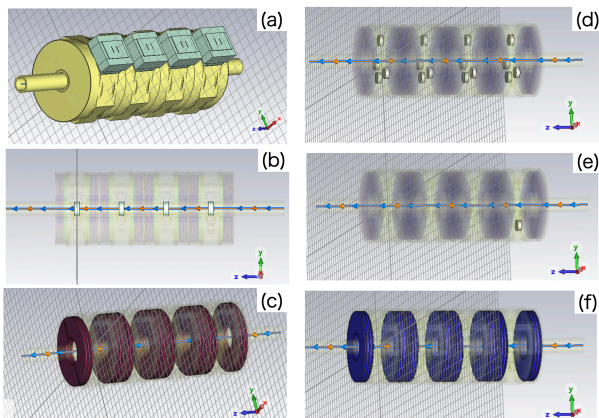


Figure 3: (a) The model appearance, (b) acceleration gaps, (c) cut-cores, (d)(e) capacitor arrangements for the fundamental and (f) water tanks.

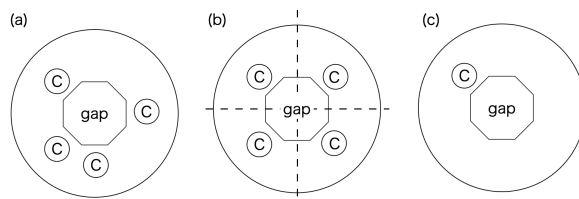


Figure 4: Placement of capacitor c when viewed from the beam.(a) Fundamental, (b) symmetrical installation with the same number of capacitors and (c) second harmonics.

フィーダーカバーの箱が付いている。(b) 加速ギャップ、これで加速する。セラミック製スリーブであり、各ギャップの中心にある。(c)1 ギャップにそれぞれ両側 3 枚ずつのカットコアが入っている。(d) 基本波のコンデンサーは基本的には 1 ギャップあたり 4 個、白い円筒は誘電体の部分。(e) 基本波のときは 4 ギャップ目の一つ別の静電容量のコンデンサーが付く。(f) コアは水タンクに入っている。

3.5 基本波のセットアップ

Figure 4(a) に示すようにコンデンサーは 1 ギャップあたり 4 個、4 ギャップ目だけさらに追加で 1 個別の静電容量のものが付く。この条件でのインピーダンスは Fig. 5 に示す通りである。

3.6 シングルギャップと 4 ギャップの違い

コンデンサーが 4 つ付いている 1 つのギャップだけで計算し 4 倍すると Fig. 6 のようになり、Fig. 5 とほぼ同等であった。したがって、時間短縮のためにはシングルギャップのモデルを使えば良いことがわかった。完全一致ではないのはコンデンサーが一つ余分につくかどうかと考えている。必要に応じて 4 ギャップモデルで計算する。

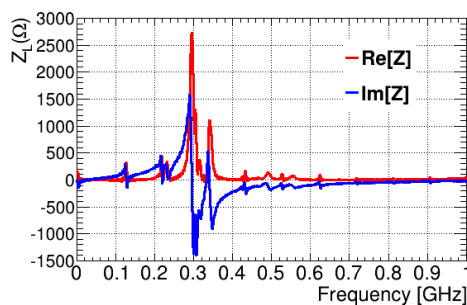


Figure 5: Simulation results with the 4-gap fundamental model. The red line represents the real part and the blue line the imaginary part.

3.7 コンデンサーの配置による違い

さらに時短を考えると、ちょうどコンデンサーは 4 つあるので、1/4 だけ計算すれば済むよう Fig. 4(b) のように回転対称的にコンデンサーを配置したくなる。しかし、Fig. 7 に示すように、通常の配置 Fig. 4(a) に比べ、(b) の対称な配置ではウェイクポテンシャルの減衰が余

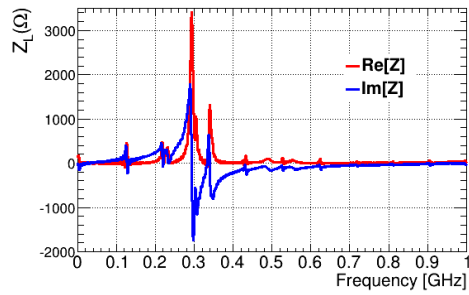


Figure 6: Simulation results with the single-gap fundamental model. The red line represents the real part and the blue line the imaginary part. This is normalised to 4-gap.

分に時間を要することがわかった。対称にすることで共振の効果が大きくなったためと考えられる。このことから、計算の時短にはならないこと、コンデンサーの数は同じでも配置の仕方によりインピーダンスの大きさに影響があることがわかった。

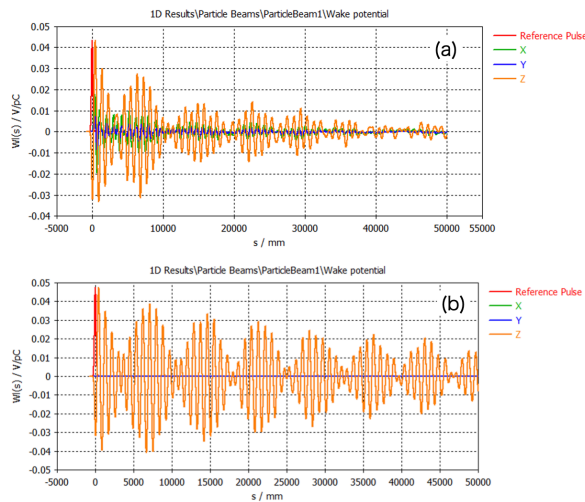


Figure 7: Difference in wake potential attenuation when the capacitor arrangement is (a) asymmetric and (b) symmetric.

3.8 カットコアの特性

カットコアはFT3Mのリボン厚 $18 \mu\text{m}$ をモデル化した。今回はカットコアの実測値 [10] から外挿した値を用いた (コアの厚さは異なるが、特性については例えば [11] に載っている)。カットコアの有無による計算結果の違いは Fig. 8 に示すように主要なレゾナンス付近にも少なからず影響があるが、レゾナンス自体の有無には関わらないことがわかる。

3.9 二倍高調波のセットアップ

コンデンサーは4ギャップのうち2ギャップにそれぞれ1個ずつしか付いていない。Figure 4(c) がコンデンサーの付いているギャップの例である。インピーダンスの計算結果は Fig. 9 のようになる。

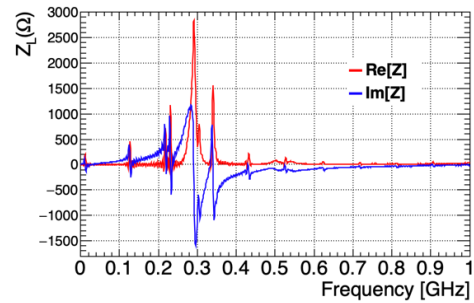


Figure 8: Simulation results for the model without cut-cores.

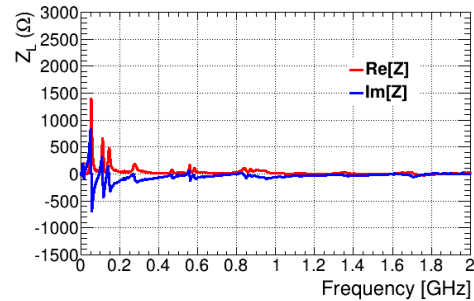


Figure 9: Impedance calculation results for the 4-gap 2nd harmonics model.

3.10 電磁場分布

CST で計算した電磁場分布は Fig. 10 のようになった。空洞の中での分布することがわかる。なお、計算条件のバックグラウンドは空気である。

3.11 レゾナンスの周波数

モード解析をすると、mode 1 = 120 MHz、mode 2 = 300 MHz、mode 3 = 305 MHz、mode 4 = 380 MHz という計算結果が得られた。

4. 測定との比較

インピーダンスのワイヤー法測定については論文 [6] を参照。3 節のモデルでビームの代わりにワイヤーを通し、S パラメーターを計算した。計算結果を測定と同様の式 Lumped element formula [12] でインピーダンスに変換した。Figure 11 が計算結果である。インピーダンスの大きさが測定やビームのシミュレーション (Fig. 5) に比べても 1/3 程度に小さくなってしまった。原因については今後検討する。

5. ダンピング回路方法との比較

インピーダンス低減案として田村氏が考案したアナログコンデンサーとコイルでレゾナンスを打ち消す方法 [6], [13] を CST によるシミュレーションでも行なった。結果は Fig. 12 に示すように、Fig. 5 に比べて小さくなったことがわかる。Figure 13 は実測値である。ただこの方法だけではインピーダンスの大きさの削減は MR での目標値 $|Z_L/n| < 0.5 \Omega$ の倍程度とまだ大きく不十

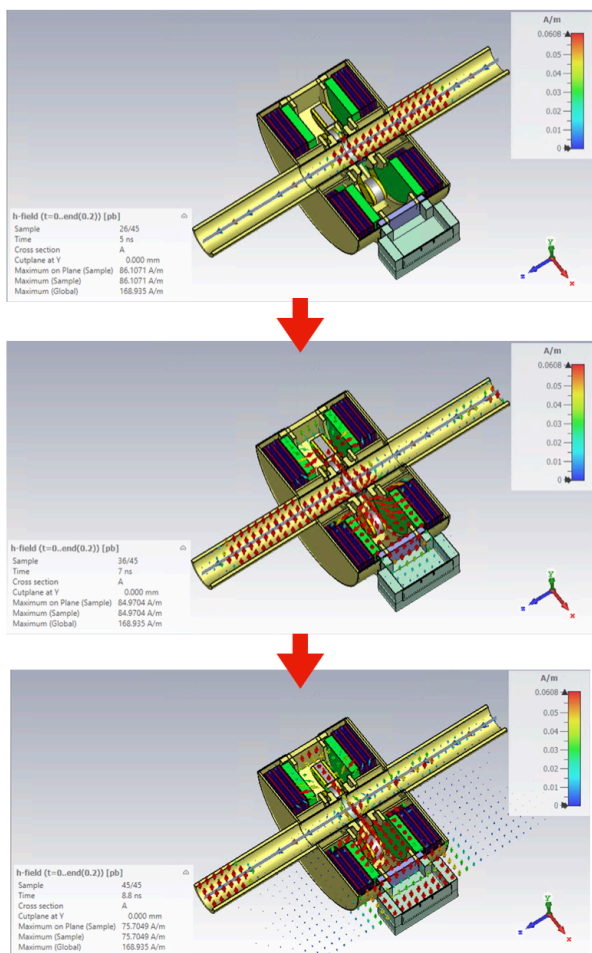


Figure 10: A view of the changes in the magnetic field distribution calculated by CST.

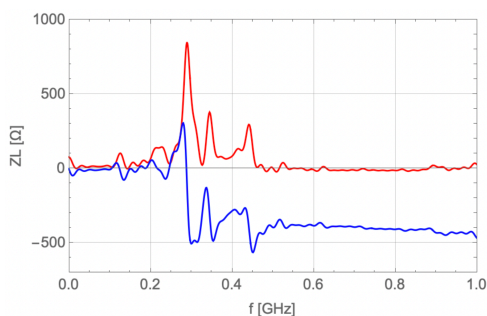


Figure 11: Calculation results from the simulation of the reflection coefficients of the stretched wire model, converted to impedance.

分である [14, 15]。ここでここで n は周波数 f を周回周波数 f_{rev} で割った値である。さらに実際にビーム運転中に適用することは難しいことから別の方法の考案が必要である。今後もビームのシミュレーションとも比較しながらインピーダンス低減方法の検討を進めていく。

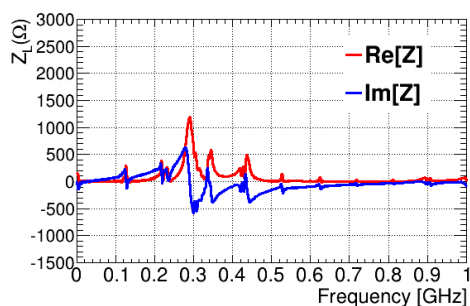


Figure 12: Impedance calculation results with the damping circuit applied to the model.

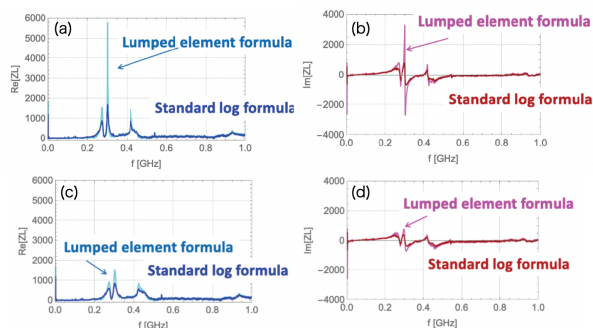


Figure 13: (a) Real and (b) imaginary parts of the measurement results [6]. The difference in line color is the difference in the derived equation. (c) Real part and (d) Imaginary part after using the damper [6].

6. まとめと今後の展望

J-PARC MR のビーム増強において、ビーム不安定性の対策は必須である。インピーダンス低減方法の考案およびビームの振る舞いの理解に役立てるためにモデルを構築した。レゾナンスへ影響する構成物、モードの理解ができた。別のインピーダンス源の調査やインピーダンスのビームへの影響の理解も続けていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、コメントをいただいた菖蒲田義博氏、中村剛氏、大森千広氏をはじめとする縦方向インピーダンス打ち合わせ参加者の皆様、そして CST シミュレーション環境を整えてくださった岡田雅之氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Ikegami *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2012, Issue 1, 1 January 2012, 02B002.
- [2] H. Hotchi *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2012, Issue 1, 1 January 2012, 02B003.
- [3] T. Koseki *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2012, Issue 1, 1 January 2012, 02B004.
- [4] S. Igarashi *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2021, Issue 3, 15 February 2021, 033G01.

- [5] M. Tomizawa *et al.*, ECloud'22 and GWDVac'22 Workshops, September 2022.
- [6] T. Toyama *et al.*, arXiv:2208.09217v1 [physics.acc-ph] 19 Aug 2022.
- [7] F. Tamura *et al.*, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Japan, Oct. 18 - Oct. 21, 2022, pp. 175-178.
- [8] A. Kobayashi *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 1031, 166515 (2022).
- [9] CST studio suite - Computer Simulation Technology homepage; <https://www.cst.com/products/cstps>
- [10] Internal document.
- [11] M. Nomura *et al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3 - Aug. 5, 2013, pp. 217-220.
- [12] E. Jensen, CERN-PS-RF-NOTE-2000-001.
- [13] F. Tamura, internal documents.
- [14] E. Keil and W. Schnell, CERN Report TH-RF/69-48 (1969).
- [15] Discussion in longitudinal instability meetings, M. Tomizawa, Feb. 2021, internal documents.