J-PARC MR の FX セプタムと FX キッカーのインピーダンスの評価と対策

EVALUATION AND COUNTERMEASURES FOR IMPEDANCE OF FAST EXTRACTION SEPTA AND FAST EXTRACTION KICKERS AT THE J-PARC MAIN RING

小林愛音 *A)、外山毅 A)、中村剛 A)、菖蒲田義博 B)、石井恒次 A)、
Aine Kobayashi*A), Takeshi ToyamaA), Takeshi NakamuraA), Yoshihiro ShobudaB), Koji IshiiA)
A)KEK
B)JAEA

Abstract

Estimating the effect of beam coupling impedance on the components of the accelerator and countermeasures are essential to suppress the collective effect of the beam caused by it and increase the beam intensity. It is essential to reduce beam loss due to collective effects such as instability in order to increase the strength of the J-PARC main ring (MR). Of the individual devices that are thought to have large impedance, the FX septum and FX kicker were modeled by the CST simulation to estimate the impedance in the vertical and horizontal planes. For the impedance that became a particularly large value, we examined a method of attenuating the wake field in which it occurs. In this proceedings, we report the simulation process and the estimation of the effect of impedance on the beam.

1． はじめに

加速器を構成する要素のビーム結合インピーダンスの影響の見積もりと対策は、それにより引き起こされるビームの集団効果 [1–3] を抑制し、ビーム強度を上げるために不可欠である。J-PARC main ring (MR) は現在の最高強度 515 kW(2.8×10^{14}ppp, MR cycle 2.48 sec) から 750 kW(2.03×10^{14} ppp, 1.3 sec)、さらには 1.3 MW(3.33×10^{14} ppp, 1.16 sec) と大強度化する計画であり、不安定性を始めとした集団効果によるビームロスの低減は必須である。

縦・横方向もフィードバックシステム [4–6] で抑制されているが、予期せぬ不安定性が起きたり調整しきれず強度を上げられないことがあるので原因解明と対策が必要である。特に縦方向ではハドロンホールへ取り出す (Slow extraction, SX）運転での debunch 時に不安定性や electron cloud が起こる。それらを防ぐための縦方向インピーダンス Z_L の基準として過去に測定された分のインピーダンスの値と Eq. (1) で表されるインピーダンスに対する microwave の安定領域を決める Keil-Schnell criterion の値が参考にされており、MR では 0.5 Ω 以下を目標に議論している [7–9]。

$$\left|\frac{Z_L}{n}\right| < F\frac{|\eta|\beta^2 E_0}{eI_0}\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2_{\mathrm{FWHM}}. \qquad (1)$$

ここで F はビームの form factor、η は slippage factor、E_0 はビームのエネルギー、β は Lorentz factor、e は素電荷、I_0 はビーム電流、$\Delta p/p$ はビームの運動量の広がりである。左辺分母の n はビームの周回周波数（186 kHz）の整数倍を表している。計算結果を表す際は周波数を周回周波数で割った値を n としたが、周波数が 0 のときはインピーダンスが発散してしまうので、この論文では 10 kHz では割る前の値が十分小さいことを確認した上で 0 とした。

横方向の主なインピーダンス源は抵抗性壁効果と考えられており [10]、他に狭い resonance 幅を持つ個々の装置のインピーダンスが影響を与えるため、できるだけ小さくする努力がされている。

新たにインストールする装置はビームの挙動が変わる可能性もあるためインピーダンスの見積もりとできるだけ小さくする対策が必要になる。新しくインストールする FX セプタム [11] と、大きなインピーダンスを持つと考えられている装置の一つである FX キッカー [12] を CST [13] を用いた電磁場シミュレーションでモデル化し、縦および横方向のインピーダンスの見積もりを行った。特に大きな値となったインピーダンスについては、それが発生するウェイク場を減衰させる方法を検討した。FX セプタムについては、銅板および SiC をウェイク場の減衰器として追加することでインピーダンス低減を目指すように設計し、かつ発生する熱量や固定方法がが実用的かどうか調べ、製作に向けて進めている。インピーダンスの実測定は夏から秋に行う予定である。ここではシミュレーション過程およびインピーダンスのビームへの影響の見積りを報告する。

2． FX セプタム

FX セプタムはニュートリノ実験のための速い取り出し (Fast extraction, FX) 運転のためにビームを分ける役割をしている。2021 年から 2022 年始めの長期シャットダウンの間に磁場対策された新しいものに入れ替えることが予定されている。

セプタムは銅板で覆われた電磁石、ビームを通す磁場対策の鉄製シールド等から構成されており、直径約 600 mm の真空チャンバーの中に入れられている。Figure 1 は CST でモデル化したもので、実際には外側がほぼ同じ構造（内部の構造が異なる）が二つ連結して一つのセプタムである。計算速度の効率化

* aine.kobayashi@kek.jp

のためにこの図のように半分を作ることでモデル化とした。計算結果のインピーダンスの値は 2 倍した。真空チャンバーには直径 200 mm の真空ダクトが接続されている。鉄製シールドは真空ダクトの蓋まで到達する長さである。これらの構造が Fig. 2 に示されている複数の共振を作ることで大きなインピーダンスとなっており、低減する方法を考えた。

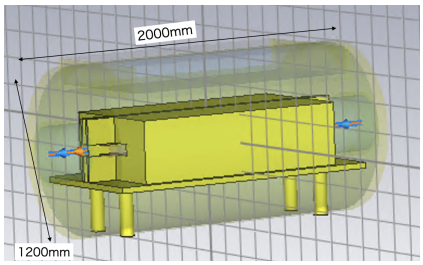

Figure 1: FX septam modeled on the CST. In reality, another one with the similar shape is connected.

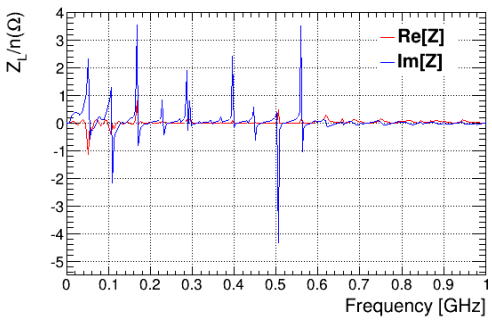

Figure 2: The longitudinal impedance of the septa calculated by the CST simulation.

2.1 インピーダンス低減策とその効果

セプタムとして働くためには水平方向を塞がないように部品を追加する必要があり、その幅は垂直方向に 80 mm である [14]。メンテナンスで加速器のラインから取り出すこともあるため干渉しないように設置する必要がある。実現が難しい案も含め複数の案を検討した結果、真空チャンバーの蓋と真空ダクトの隙間の鉄製シールドの上下の空間を塞ぐことが最も現実的な解となった。Figure 3 のように銅板で塞ぐと、真空ダクトと鉄製シールドの同軸構造が解消され真空チャンバー内の共振が見えなくなり、ダクトのカットオフ周波数以下の共振ピークはほぼなくなった（Fig. 4）。ここでダクトの半径は 200 mm で TM01 モードの周波数が 0.57 GHz であり合致した。Bunched beam のスペクトルは高くても 30 ～ 40 MHz 程度であるため、これだけでも十分効果がある。しかし SX で用いられる debunched beam ではより高い周波数帯域まで続くため、残ったインピーダンスの周波数帯域と被り、ビームに悪影響を与える可能性がある。

残ったインピーダンスの値は大きいので、さらに減らす方法を検討した。電波吸収体があればイ

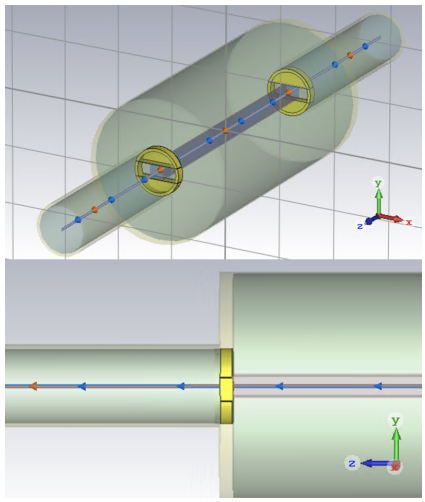

Figure 3: A Septam model in which the spaces above and below the iron shield between the vacuum chamber lid and the vacuum duct are closed with copper plates.

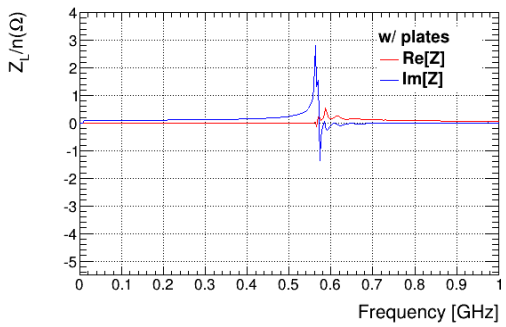

Figure 4: The longitudinal impedance of the septa with copper plates added as an impedance mitigation calculated by the CST simulation. This method had the effect of reducing resonances at frequencied below the duct cutoff frequency of 0.57 GHz.

ンピーダンスを低減することができ、KEKB で竹内氏らによって研究され用いられた SiC セラミックス（SiC-B） [15] の特性が適していることがわかった。Figure 5 のように真空チャンバーとダクトとの間に銅板を入れた手前の電波の溜まる半円形の空間に SiC を入れると縦方向インピーダンスの目標値 0.5 Ω/N 程度に低減した（Fig. 6）。費用の面から SiC は最小限にする必要があり、いくつかの直方体を試して半円形のものと同等以下にインピーダンスを低減することができた。さらに大きな一体物よりも分割したほうが費用が抑えられるので分割し固定の方法を検討した。

銅板で囲うようにすると、反射したウェイク場を吸収しきれずインピーダンスが悪化した。

ボルトの穴を開け、四隅を小さめのネジ（ϕ = 5 mm）で留める場合はインピーダンスは悪化しなかった。SiC ブロックを数個に分割したとしてネジを 12 個まで増やして計算したが結果に影響なかった。

製作上、厚みは約 40 mm 程度までとされており、

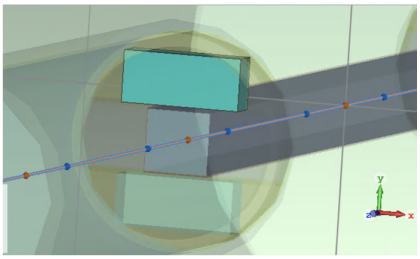

Figure 5: Figure 3 with SiC added. The shape of SiC is a rectangular parallelepiped (200 mm × 95.3 mm × 62 mm). We also considered filling all the semi-circular gaps, but it would be expensive if it became large.

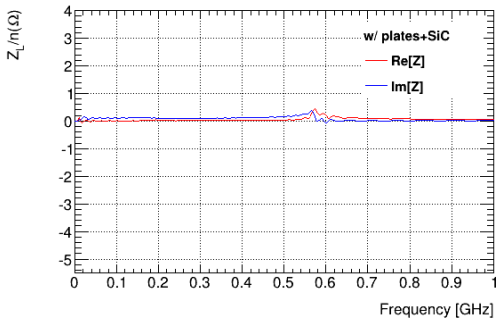

Figure 6: The longitudinal impedance of the septa with copper plates and SiC blocks added as an impedance mitigation calculated by the CST simulation. This method was effective in reducing the remaining impedance, including 0.57 GHz one.

当初 z 方向の厚みを 2 分割することを検討した。しかし SiC が 2 枚重なり僅かな隙間があると平板コンデンサのようになってしまい、電場が発生してしまうことがわかった（Fig. 7(a)）。電場が発生するとガスが発生し真空悪化等の悪影響の可能性がある。そのためウェイク場の電場の向きと平行になるように x 方向を分割することにし、このときは電場が発生しないことをシミュレーションで確認した（Fig. 7(b)）。

縦方向だけでなく、横方向についてもシミュレーションを行い、インピーダンス（水平・垂直方向それぞれの dipolar, quadrupolar 成分）が良くて 1/100 程度、悪くても 1/5 程度に低減できていることを確認した（インピーダンス対策なし Fig. 8、対策あり Fig. 9）。

2.2 発熱量の検討

実際の運転で発熱量が最大になる条件で検討した。30 GeV でバンチの長 12 m として CST でロスファクターを計算すると 7.19×10^{-8} V/pC と計算される。ここで、実際には 30 GeV 一定ではなく、MR には上流の Rapid Cycle Synchrotron (RCS) から 3 GeV のビームが入射した後、30 GeV まで加速され取り出される。最大強度の 1.3 MW の際にはバンチ数 8、ビームは 0.61 sec まであり 1.16 sec 周期である。このときは 30 GeV 一定とした計算には duty 0.4 をかけて計算

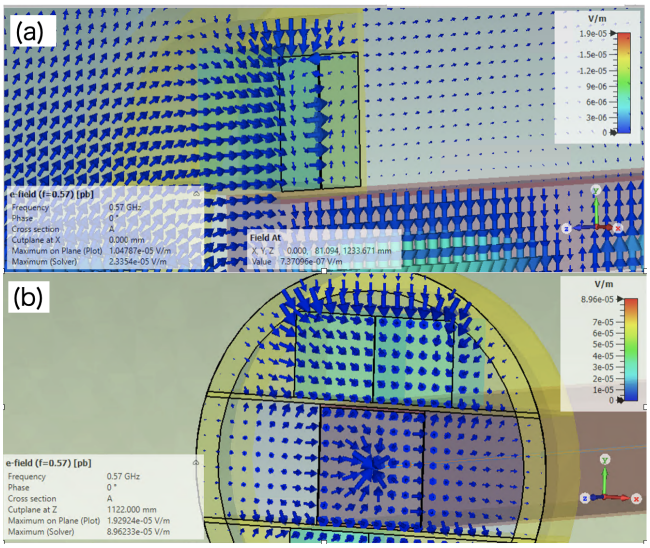

Figure 7: (a) An electric field is generated when SiC is divided in the z direction. (b) It does not occur when splitting in the x direction. The gap was calculated at 1 mm.

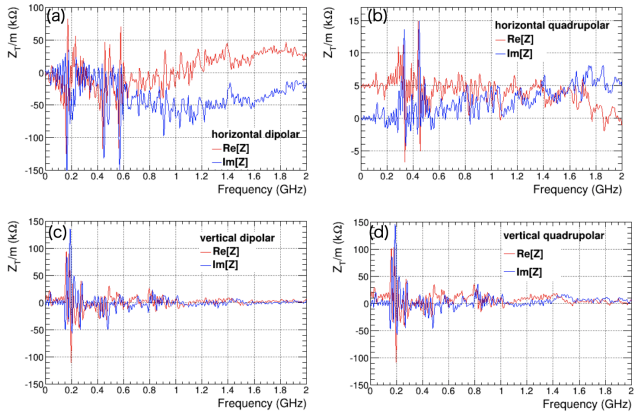

Figure 8: The transverse impedance of the septa, (a)horizontal dipolar, (b)horizontal quadrupolar, (c) vertical dipolar and (d) vertical quadrupolar.

すればよく、バンチあたりの粒子数 4.16×10^{13} ppb を用いて SiC ブロック 1 つあたりの発熱量は 0.48 W となる。SiC は熱伝導が良く（170 W/(mK) 程度）、銅板と接していれば真空中であっても温度上昇はほとんど気にならない程度であり、また大きさからもろう付けは向いていないためねじ止めする方法に決まった。

3. FX キッカー

FX キッカーは FX 運転のためにビームを取り出す役割をしている。セプタムと同様に CST でシミュレーションを行った。実測定は以前行われているが 100 MHz までだったため [16]、この夏により高周波の測定を予定している。

キッカーにビームが通って発生するウェイク場を打ち消すようにワイヤーを巻く方法を試した。

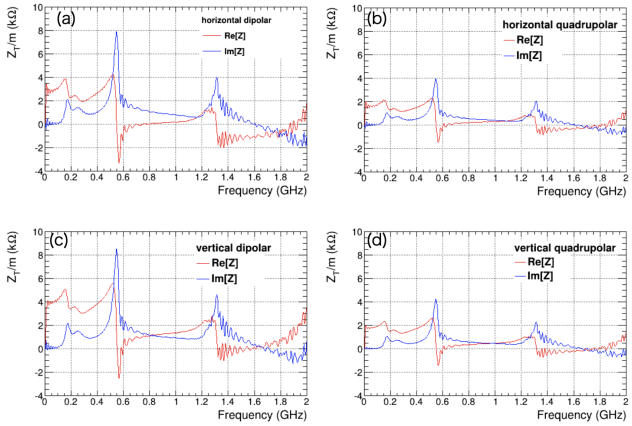

Figure 9: The transverse impedance of the septa with plates and SiC blocks, (a)horizontal dipolar, (b)horizontal quadrupolar, (c) vertical dipolar and (d) vertical quadrupolar.

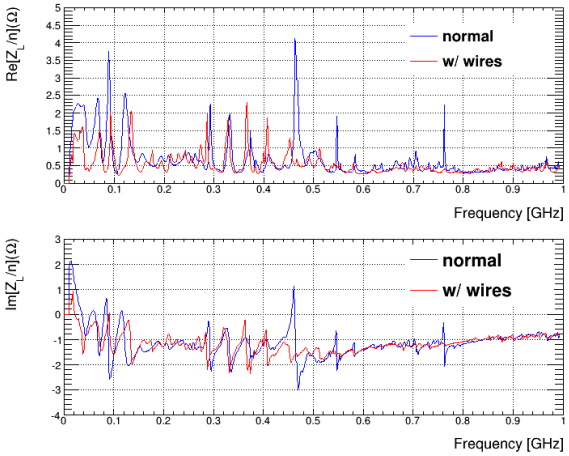

Figure 11: Impedance calculation results for 5 kickers (blue line). When the wire is wound (red line), the impedance decreases.

Figure 10 のようにモデルを作り、2 本のワイヤーをコイルに縦に巻くと Fig. 11 の赤線のようにインピーダンスが低減した。キッカーは 5 台あるので、1 台で計算した結果を 5 倍した。

しかし実際にはワイヤーを巻くこと、巻いた状態でキッカーとして働かせることは難しいと考えられる。セプタムと同様 SiC を付ける方法や RCS で行われている方法 [17] も参考にしながら可能な方法を検討したい。

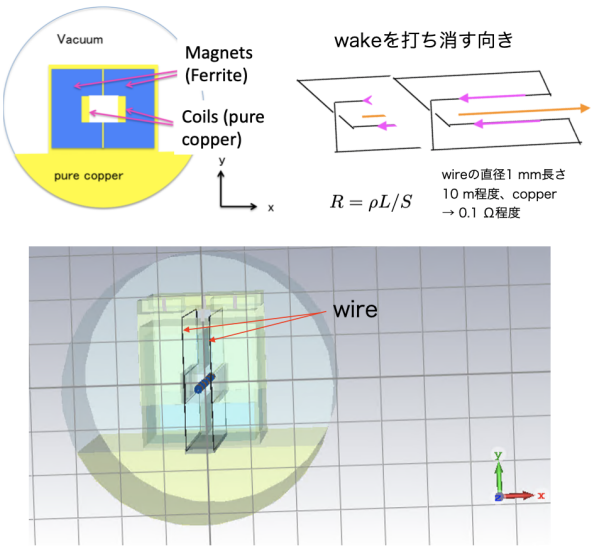

Figure 10: Cross section of the kicker model. When the wire is wound vertically in a direction that cancels the wake field.

4. まとめと今後

大強度運転に向けてインピーダンスの影響の見積もりと対策は必要不可欠である。個々の大きなインピーダンス源のうち、FX セプタムと FX キッカーについてモデル化を行ない対策を検討した。これらは運転に必要で既に入っているものであるが（セプタムは 2022 年からは磁場対策された新しい構造のものと入れ替える）、今後さらなる大強度運転のためにはインピーダンスとそれによる影響を見積もる必要がある。

CST を用いたシミュレーションにより、セプタムが入っている真空チャンバーとダクトの隙間に銅板を入れることで、ダクトのカットオフ以下（0.57 GHz）の周波数の縦方向インピーダンスを減らすことができるとわかった。さらに誘電率の良い SiC を銅板に付けることで電磁波を吸収し、残ったインピーダンスを基準以下にすることができる。横方向インピーダンスもできるだけ小さくするという指標に合う対策となった。発生する熱量は問題なく、固定方法もインピーダンスに悪影響のない方法が見つかった。

実測定は今年の秋以降に予定されている。セプタム自体のインピーダンス測定と、銅板および SiC の効果は実測して調べたいと考えている。SiC は他の候補も含め誘電率の測定・比較を行いたいと希望していたが、費用だけでなく納期の問題も出てきた。銅板だけを追加したものをまず製作することが現実的である。残った 0.57 GHz のインピーダンスがどれくらいビームに影響を与えるかを検討する必要がある。

キッカーもモデル化し、インピーダンス削減方法を検討した。これも実測定を行なって必要に応じ実用的なインピーダンス削減方法を検討する。

いずれもインピーダンスによるビームへの影響を計算およびシミュレーションによって調査する予定である。

謝辞

SiC の製作について情報をくださった竹内保直氏、セプタムの構造について教えてくださった芝田達伸氏、SX のビームスペクトルの測定をしてくださっ

た杉山泰之氏、計算環境を整えるのを助けていただいた岡田雅之氏、助言をいただいた佐藤健一郎氏と魚田雅彦氏、および議論に参加していただいた関係者の皆様に感謝します。本研究は JSPS 科研費 JP18H05537 の助成を得たものです。

参考文献

[1] A. Kobayashi *et al*., 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1350 012114.
[2] A. Kobayashi *et al*., Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, pp. 223-227.
[3] A. Kobayashi *et al*., Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Japan, Sep.2 - 4, pp. 684-688.
[4] Y. Sugiyama *et al*., Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan.
[5] T. Toyama *et al*., Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5 - 7, pp. 722-724.
[6] T. Toyama *et al*., Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31 - Aug. 3, 2019, pp. 1130-1133.
[7] L. J. Laslett, V. K. Neil, and A. M. Sessler, Rev. Sci. Instr. 32, 276 (1961).
[8] E. Keil and W. Schnell, CERN Report TH-RF/69-48 (1969).
[9] Discussion in longitudinal instability meetings, M. Tomizawa, Feb. 2021, internal documents.
[10] Y. H. Chin, Proceedings of HB2008, Nashville, Aug 2008, WGA01, p.40.
[11] T. Shibata, Proceedings in the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), JPS Conf. Proc. **33**, 011033 (2021).
[12] T. Sugimoto *et al*., Proceedings of DIPAC2011. Hamburg, Germany, May 2011, paper TUPD74, pp. 482-484.
[13] CST - Computer Simulation Technology homepage;`https://www.cst.com/products/cstps`.
[14] S. Iwata *et al*., Proceedings of IPAC2021, Virtual edition May 24-28th 2021.
[15] Y. Takeuchi and T. Kageyama, Proceedings of The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, Nov. 2003.
[16] T. Toyama *et al*., Proceedings of HB2006, Tsukuba, Japan, pp140-142, 2006.
[17] Y. Shobuda *et al*., Phys. Rev. Accel. Beams **21**, 061003 (2018).