

J-PARC MR Eddy-current type septum magnet 用 ビーム結合インピーダンス対策の評価の進捗

PROGRESS OF EVALUATION OF BEAM COUPLING IMPEDANCE REDUCTION FOR THE EDDY-CURRENT TYPE SEPTUM MAGNET IN J-PARC MR

小林愛音^{*,A)}, 外山毅^{A)}, 中村剛^{A)}, 菖蒲田義博^{B)}, 石井恒次^{A)}, 富澤正人^{A)}, 竹内保直^{A)}, 佐藤洋一^{A)}
Aine Kobayashi^{*,A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)}, Shobuda Yoshihiro^{B)}, Koji Ishii^{A)},
Masahito Tomizawa^{A)}, Yasunao Takeuchi^{A)}, Yoichi Sato^{A)}

^{A)} KEK

^{B)} JAEA

Abstract

In the J-PARC main ring, density modulation due to longitudinal beam instability occurs during the debunching process of coasting beams. This leads to the generation of an electron cloud, which in turn causes transverse beam instabilities. The transverse beam instability causes beam loss and the electron cloud is assumed to cause vacuum degradation, both of which hinder the beam intensity enhancement, so it is essential to clarify the causes and countermeasures. In particular, the longitudinal impedance of several hundred MHz has been investigated as relevant, and measures to reduce the impedance of individual devices are underway. The Eddy-current type septum magnet, newly installed this year, was found to have a large impedance by simulation. Therefore, we are investigating a method to reduce the impedance by a flange loaded with SiC radio wave absorber, which can be applied to locations where there is no spatial margin to install a taper. In this report, we will discuss the characterization of SiC to be used in actual devices, impedance simulation reflecting the results of SiC evaluation, and evaluation of the effect of impedance countermeasures by impedance measurement using the wire method, and progress in evaluating the effect on the beam by beam simulation and beam study.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC は、400-GeV linac [1]、3-MeV rapid cycling synchrotron (RCS) [2]、30-GeV main ring (MR) [3] から構成され、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。MR はビーム強度を将来的に FX 運転で 1.3 MW、SX 運転で 100 kW (2021 年時点でそれぞれ 510 kW、65 kW) とするアップグレードを進めている [4]。

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。

現在既に起きている問題として、FX および SX の運転中にビーム不安定性によるビームロスが発生することがあり、抑制のための対応 (フィードバックシステム、クロマティシティーの調整、RF パラメーターの変更) はしているが予測と調整が難しい。特に SX 運転ではバンチ状のビームを高周波電圧をオフすることで連続ビームにする操作があり (debunch 過程)、数百 MHz にあるイ

ンピーダンス源の影響を受け micro bunch 構造が発生する [5]。これにより縦方向のビーム不安定性が電子雲を生じさせ横方向のビーム不安定性を引き起こしていると考えられ問題になっている。電子雲の発生は数十 MHz の micro bunch 構造に関連していることが観測されシミュレーションによる再現が行われた [6]。この問題は、今後の SX 運転の大強度化だけでなく、FX 運転で取り出しビームのピーク電流を下げるためのバンチ操作でも課題になる可能性が高く、対策が急がれている。強度増強に応じてビーム不安定性は確実に厳しくなると予想される。こうしたビーム不安定性の原因とメカニズムを理解し、ビーム不安定性の抑制を可能とすることが必要とされており、本研究はその一環である。

2. EDDY-CURRENT TYPE SEPTUM MAGNET のインピーダンス対策

Debunched beam を coasting beam の Keil-Schnell criterion [7] に当てはめ、SX 100 kW 運転での計算値および既に測定済みの MR 内のインピーダンス源の大きさを考慮すると、新しく装置をインストールする際は、縦方向インピーダンス Z_L/n の値は 0.5Ω 以下にすることを MR では目標値としている。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。

高繰り返し化に対応するために作り替えインストールされた 2 台のセプタム電磁石 (Eddy-current type septum magnet) [8] には、漏れ磁場対策のためにインナーダクトが導入されたが、ビームパイプが不連続および径が急激に変わる場所がある。その構造により目標値から外れる大きなインピーダンスを持つことがわかり、3 次元電

* aine.kobayashi@kek.jp

磁場シミュレーション CST studio suite [9] で大きさと周波数を見積もった (Fig. 1)。ビームパイプの不連続さに対しては壁電流が滑らかに流れるように金属で接続すれば良く、径が急激に変わる場所では一般的にはテーパが用いられる。しかし、テーパ形状ではメンテナンスでセプタム電磁石にアクセスする際に妨げとなってしまうことから、設置場所には制限があった。そこでフランジに収まる形状でかつビームへ影響を与えない、狭い場所に適用できる対策を考案した [10]。具体的には、セプタムに接続するビームダクトとインナーダクトの隙間に垂直に銅板を設置しビームパイプのカットオフ周波数以下を削減 (Fig. 2)、その銅板に溜まる電磁場を電波吸収体である SiC で吸収することでインピーダンスを小さくし目標値を達成した (Fig. 3)。この方法はビームの軌道へ影響ない (セプタムは周回軌道の他に、FX または abort 取り出しラインへ左右 3 つに分けるため水平方向は妨げてはならず、垂直方向に 80 mm 程度の aperture は確保する必要がある [11])。

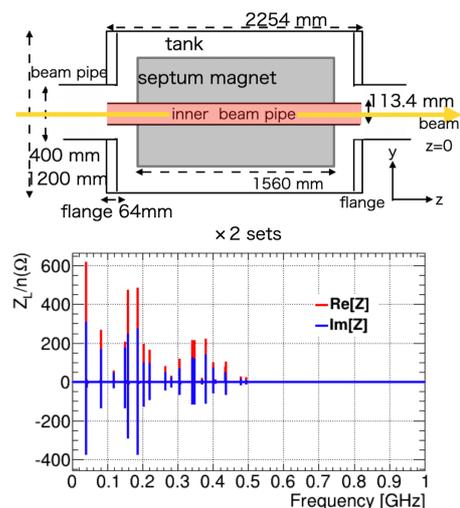


Figure 1: Estimated longitudinal impedance values for two Eddy-current type septum magnet.

3. 実機の評価

シミュレーションには竹内氏らが開発した SiC-B の値 [12] を用いて計算してきた。しかし今回入手性の問題、および製作可能な厚みの制限により別の製品 SCP01 [13] を試験した。SiC セラミックスは製品によって特に 1 GHz 以下の低周波帯域比誘電率特性が異なることは竹内氏らの先行研究によりわかっており、この SCP01 も未知であった。SiC-B の特性なら、厚みは 20 mm 程度でも目標達成できることは評価したが [10]、選定する製品の特性が合わない可能性もあるため最大限の厚み 60 mm とした。製作は株式会社トヤマ [14] に依頼した。

3.1 実機用 SiC の比誘電率測定結果

比誘電率特性は竹内氏らの KEKB/ARES 空洞グループの HP 85070B Dielectric Probe Kit を用いて行なった。

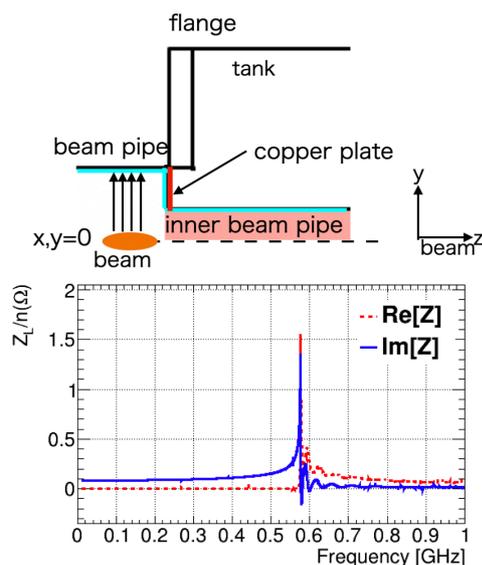


Figure 2: Estimated longitudinal impedance when a copper plate is placed on the flange to allow the mirror current to flow smoothly.

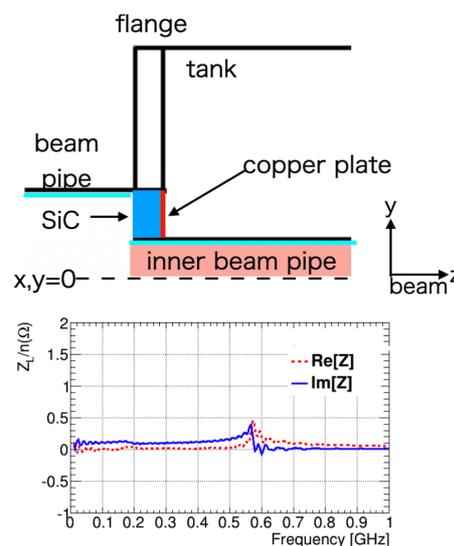


Figure 3: Estimated value of longitudinal impedance when the electromagnetic field that accumulates on the copper plate is suppressed by SiC, a radio wave absorber.

これは誘電率 $\mu = 1$ と仮定し反射係数 S_{11} を測定するものである。SiC セラミックスの材料の配合具合・製作方法により同じ製品でも比誘電率特性が異なってしまうことが竹内氏らの先行研究によりわかっており、実機用として製作した SiC およびそのサンプル (直径 45 mm、高さ 35 mm の円筒形) の両方を測定した。表面は 3 mm 削ってある。Figure 4 に測定点 (青と赤はそれぞれ実数部と虚数部、3 箇所各 3 点での平均値と標準偏差) と、Equations 3 で表される Debye 型分散特性の式 [12] でフィットした線を示す。ここで ϵ_{r0} 、 $\epsilon_{r\infty}$ はそれぞれ周波数 0 および無限大での極限值、 τ は緩和時間を表し、

いずれも Debye の特性を決める定数である。

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_{r\infty} + (\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + j\omega\tau) \quad (1)$$

$$\epsilon'_r = \epsilon_{r\infty} + (\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + \omega^2\tau^2) \quad (2)$$

$$\epsilon''_r = \omega\tau(\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) / (1 + \omega^2\tau^2) + \sigma / (\epsilon_0\omega) \quad (3)$$

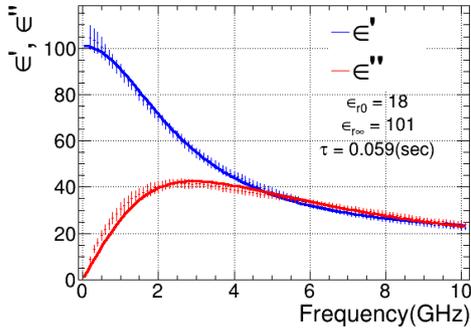


Figure 4: Measurement results of relative permittivity characteristics of SiC for actual equipment. Blue and red are real and imaginary parts, respectively. Error bars reflect three rms values for each of the three measurement points. The solid lines are the fit results.

3.2 CSTでの評価

実測した比誘電率特性を用いて CST でインピーダンス削減効果を計算すると、目標達成できることが見積もられた (Fig. 5(a))。仮に厚み d が薄かったとすると Figs. 5(b)~(d) に示すように効果が足りないことがわかった。

実機用 SiC とサンプルでは特性が異なったが、計算するといずれもこの厚さにおいてインピーダンス対策効果があった。今後追加で製作する際も特性を測定し確認する必要はある。

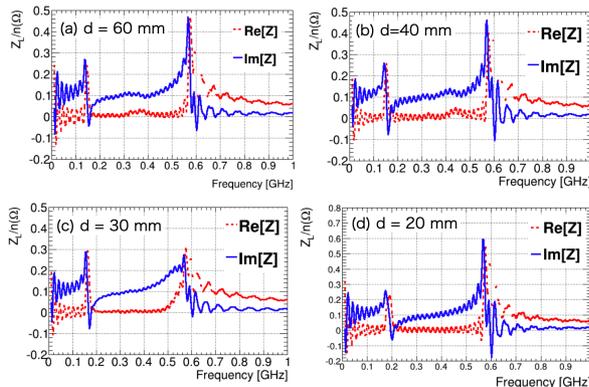


Figure 5: Longitudinal impedance calculated by CST using the measured relative permittivity characteristics of SiC for actual equipment. It can be seen that a thickness of $d = 60\text{mm}$ has the originally expected impedance reduction effect.

3.3 温度特性の評価

運転中に SiC の温度はほとんど上がらないことは計算によって評価したが [10]、万一環境の温度が変わることに備えて、サンプルで温度を制御して測定した (トンネル内は約 25 度前後に保たれている)。5 月で気温が高く、冷凍庫から取り出した直後の測定結果は結露もあり信頼できないと判断したため、使用温度周辺からホットプレートで温度を上げながら測定した結果を比較することにした。サンプルと実機用 SiC の特性は異なるものであり、同じ製品でもばらつきがあることは竹内氏らの先行研究でわかっている。扱いやすさから温度特性はサンプルを用いて調べ、そのばらつきを参考にすることにした。16 度から 46 度までの測定結果は Fig. 6 に示すものであり、ばらつきは 10% 以内で想定位範囲内であった。実機用 SiC を新たに追加で製作する際は測定による確認が必要と考えている。

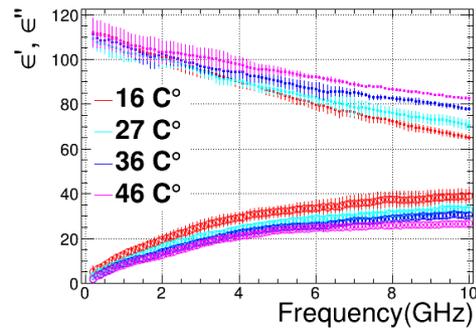


Figure 6: Measurement results of differences in dielectric constant characteristics as a function of temperature. Measurements were taken on the sample because the actual device is too large and difficult to control. The difference of the characteristics was within the expected range.

3.4 真空への影響

真空へのアウトガス量については魚田氏らの測定により問題ない程度であることが試験で評価された [15]。

3.5 ワイヤー法でのインピーダンス測定

ビームの代わりに直径 0.16 mm のワイヤーを Eddy セプタム 1 台に通し、2X-through-de-embedding の stretched wire method [16, 17] を適用し S パラメーターをスペクトラムアナライザーで測定した。

Eddy セプタムに接続するダクト径は 200 mm で、測定用ジグの大きさ (直径、長さ) に合わせるためにアルミニウムで追加のテーパー状のジグ (長さ) を作り、ガスカートとクランプで固定した。ジグ込みでインピーダンス測定物 (DUT) とし、ただし外側のジグ 2 台それぞれ半分 (合計 1 台分) は差し引くことにした (Fig. 7)。ジグをモデル化し追加した CST シミュレーションを行い比較に用いた。

Figure 8(a) はインピーダンス対策しない場合の測定とシミュレーション結果である。テーパー状のジグがない場合 (Fig. 1) に比べて全体的にインピーダンスは小さく

なる。CST シミュレーションと測定との違いは chamber 内のセプタム電磁石のモデル化によるものと考えている。電磁石の材質である珪素鋼板の透磁率の測定結果は 1 MHz までであり [18]、外挿した結果を用いているが多少変えても結果には影響しなかった。インピーダンス対策をすればほとんどのインピーダンスは取り除かれるため、ここではさらなるモデルの追求はしていない。

Figure 8(b) のように銅板の設置により想定通りパイプのカットオフ周波数以下のレゾナンスは取り除かれた。ここで高周波にジグ由来の higher order mode (HOM) が現れているのがわかる (Fig. 8(a) にも存在している)。シミュレーションにはジグを付けることで現れること、MR のビームの周波数では問題にならない周波数であることから、対策の必要はないと考えている。

さらに、Fig. 8(c) のように、SiC セラミックスブロックを半分追加すると (本来ならセプタム 1 台につき 4 個の SiC セラミックスブロックが必要であるが、今回は試験のため 2 個のみ製作し、測定では下流に設置した)、想定通りレゾナンスのピークが小さくなり、インピーダンス削減効果があることが確かめられた。

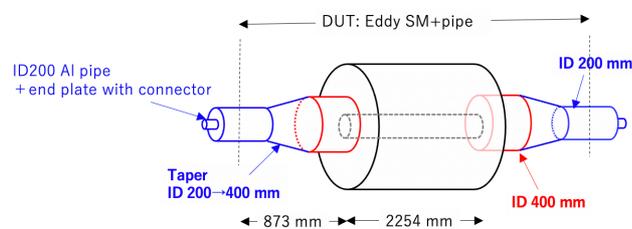


Figure 7: Setup for impedance measurement using the wire method.

4. ビームへの影響の評価

シミュレーションおよび実際のビームでの評価を進めている。セプタムのインピーダンス対策部品は今年夏にインストールした。MR のインピーダンス源としては昨年度から他に大きく変わったものではなく、6 月のビーム調整・スタディーではセプタムのインピーダンスの影響を見ることができると想定していた。

4.1 debunched beam への影響

6 月下旬に debunched beam の時間構造およびビーム不安定性の測定を行い昨年度と比較することを予定していたが今回は SX 運転設定での調整はなくなった。そのため対策前の測定はできなくなってしまったが、夏に対策部品を設置したため、冬以降の調整とスタディーで想定通りビームへ影響ないか調査する。

富澤氏のシミュレーション [19] では、60 kW 以上の debunched ビームに必要な操作では、銅板によるインピーダンス対策により時間構造の改善があることがわかった。今後測定や計算、またクロスチェックも含め他のシミュレーションコードでも調査を行い、インピーダンス源とビーム不安定性との関連や基準について明らかにしたい。

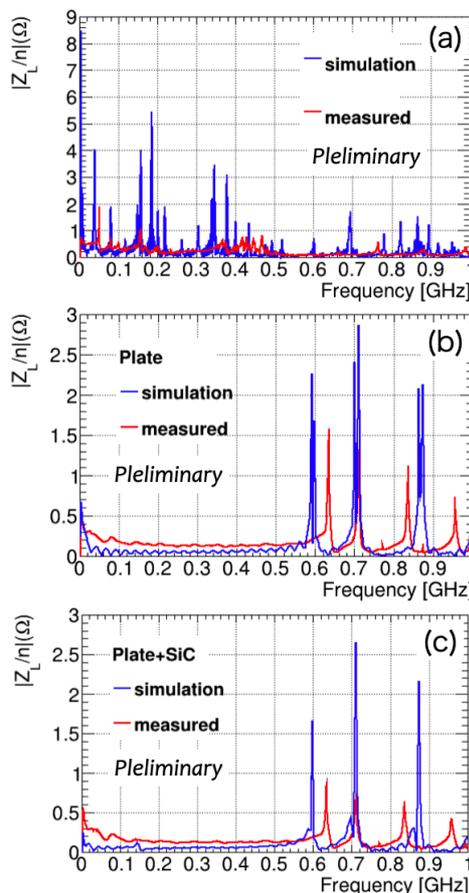


Figure 8: Comparison of measured and simulated impedance magnitude Z_L/n of an Eddy-current type septum magnet with measurement jigs. (a) Without impedance countermeasure components, (b) impedance countermeasure components, and (c) with copper plates and half SiC installed.

4.2 bunched beam への影響

MR のバンチ状のビームの周波数帯域は 30 MHz 程度までである。この帯域でのインピーダンス対策なしでのセプタム電磁石のインピーダンスの大きさは Fig. 9(a) の青線に示す通りであり、もともと Fig. 9(b) の RF 空洞のインピーダンスの大きさに比べて小さくかつ対策により 600 MHz 以下のレゾナンスは消えるので、ビームへの影響は小さいと考えられる。

5. 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り、原因はできる限り除去する必要がある。2021 年度の運転より用いられた Eddy-current type septum magnet の持つ大きなインピーダンス対策部品の製作を行い、実機の評価を進めている。

実機用 SiC の比誘電率測定を行い、インピーダンス対策として有効であることを CST シミュレーションで評価した。温度特性も想定内であり、性能に影響しないことが確認できた。ワイヤー法によるインピーダンス測

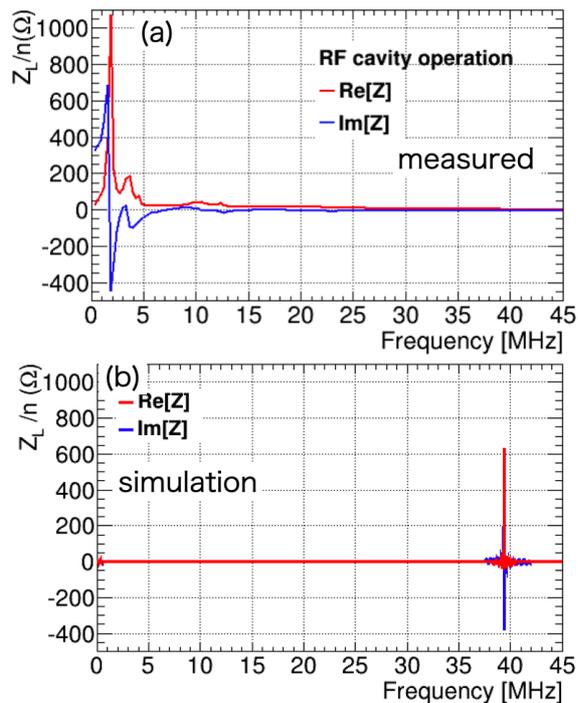


Figure 9: (a) The impedance of the Eddy-current type septum magnet without impedance countermeasure components in the low frequency band. The resonances below approximately 600 MHz are reduced by impedance measures. (b) Measured impedance of the RF cavity corresponding for operation setup at 2022 in in the low frequency band. Red line is real part and blue line is imaginary part, respectively. The frequency of the bunched beam is at most 30 MHz and it is considered unaffected by the Eddy-current type septum magnet impedance.

定を行い、インピーダンス対策が効果的であることがわかった。

ビームへの影響の評価を、実測およびシミュレーションで調べる準備を進めている。Bunched beam の周波数帯域では他のインピーダンス源および空間電荷によるインピーダンスの変化量の大きさに比べ無視できる程度である。Debunched beam にはインピーダンス対策後は影響を与えない大きさにしたが、対策前にどれくらい影響を与えるものであったかについては今後シミュレーションを用いて調べ、他のインピーダンス対策に役立てる。

FX キッカーや RF 空洞など他の装置の影響も含め、インピーダンスとビームの関連の調査や対策方法の検討を関係者と進めていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、有用なコメントをいただいた縦方向インピーダンス打ち合わせ参加者の皆様および佐藤健一郎氏と松本浩氏、また、サーモグラフカメラを貸していただいた大森千広氏、Eddy-current type septum magnet の図面や材質の情報を提供していただいた芝田達伸氏、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、ワイヤー法インピーダンス測定を手伝っていただいた三菱電機サービスシステムの花村幸篤氏と河内敏彦氏、および対策部品のセットアップをしていただいた入出射グループと株式会社 NAT の方々に感謝いたします。

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, 2012, 02B004.
- [4] S. Igarashi *et al.*, PTEP 2021, no.3, 033G01 (2021); doi:10.1093/ptep/ptab011
- [5] M. Tomizawa *et al.*, February ATAC2022.
- [6] B. Yee-Rendon *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 137–139.
- [7] E. Keil and W. Schnell, CERN Report TH-RF/69-48 (1969).
- [8] T. Shibata *et al.*, Proceedings in the 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), JPS Conf. Proc. 33, 011033 (2021).
- [9] CST studio suite - Computer Simulation Technology homepage; <https://www.cst.com/products/cstps>
- [10] A. Kobayashi *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 1031, 166515 (2022).
- [11] S. Iwata *et al.*, Proceedings of IPAC2021, Virtual edition May 24-28th 2021.
- [12] Y. Takeuchi *et al.*, Proceedings of PAC'05, Knoxville, Tennessee, USA, May 16-20 2005, pp. 1195–1197.
- [13] 日本ファインセラミックス株式会社、SCP01; <https://www.japan-fc.co.jp/products/cate01/cate0101/post-6.html>
- [14] 株式会社トヤマ, ホームページ; <https://www.toyama-en.com>
- [15] M. Uota, private communication.
- [16] F. Caspers, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-32, No. 5, October 1985.
- [17] T. Toyama *et al.*, Proceedings of IPAC2022, Bangkok, Thailand, June 12-17 2022.
- [18] Internal documents.
- [19] M. Tomizawa *et al.*, ECloud'22 and GWDVac'22 Workshops, September 2022.