

J-PARC Main Ring の入射ビームのための OTR と蛍光を用いたワイドダイナミックレンジプロファイルモニターの開発 (3)

DEVELOPMENT OF A WIDE DYNAMIC-RANGE BEAM PROFILE MONITOR USING OTR AND FLUORESCENCE FOR INJECTED BEAMS IN J-PARC MAIN RING (3)

佐々木知依^{#,A)}, 橋本義徳^{A)}, 外山 毅^{A)}, 三橋利行^{A)}, 照井真司^{A)},
中村 剛^{A)}, 酒井浩志^{B)}, 手島昌己^{A)}, 魚田雅彦^{A)}, 佐藤洋一^{A)}

Tomoi Sasaki^{#,A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Toshiyuki Mitsuhashi^{A)}, Terui Shinji^{A)},
Takeshi Nakamura^{A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Masaki Tejima^{A)}, Masahiko Uota^{A)}, Yoichi Sato^{A)}

^{A)}KEK/J-PARC

^{B)}Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

A two-dimensional beam profile monitor with a dynamic range as wide as six orders of magnitude, using OTR and fluorescent screens (unit-1), has been in operation at the injection beam transport line (3-50BT) to the main ring (MR) of J-PARC. Currently, we manufactured the unit-2 for MR, and plan to use it in combination with the unit-1 for diagnosis with different phases of the core and halo of MR injected beams. Characteristic tests for unit-2 on the test bench have shown that the longitudinal coupling impedance caused by high-frequency resonance, especially in the vacuum optical system, has Z/n value of 3.7Ω (140 MHz) in frequency range up to 1 GHz. Aiming to reduce them to about 0.5Ω or less, we have been conducting high-frequency absorption tests using SiC and ferrite. As a result of the test, the impedance was reduced from 3.7Ω to about 0.8Ω . This report mainly reports these tests.

1. はじめに

J-PARC-MR の入射ビームライン(3-50BT)で OTR と蛍光スクリーンを使用した 6 桁程度の広いダイナミックレンジを持つ 2 次元ビームプロファイルモニターの実績[1,2]と、MR 入射直後から 20 ターン程度の測定 [3] に用いる MR 用 2 号機を製作したこと、2 号機の Mirror Chamber が Z/n で 3.7Ω (140MHz) のカップリングインピーダンスを持ち、SiC による電磁波吸収で 0.6Ω 程度まで低減が期待できるシミュレーション結果など [4] を前回までの報告で示した。また、本装置の Target Chamber は、 Z/n 0.5Ω 程度以下であり低減対策は行わない。

現在は、2 号機のテストベンチでの特性試験を続けており、 Z/n を 0.5Ω 程度以下にすることを目標にインピーダンス低減試験を行っている。電磁波吸収体として SiC に加えてフェライトも今回から導入した。特に、測定光学用ミラーを内蔵する Mirror Chamber において、炭化珪素 SiC とフェライトの位置と体積、配置とインピーダンスの低減の相関に着目した試験内容となっており、現在までの試験結果を中心に以下に報告する。

2. 電磁波吸収体による カップリングインピーダンスの低減

2.1 インピーダンスの現状

インピーダンス低減対策を施していない Mirror Chamber のワイヤー法 [5, 6] による透過率の測定結

果と、測定結果から求めたインピーダンスの値を Fig.1 に示す。ピークが複数あり、140 MHz 近傍では Z/n 3.7Ω で最大で、他は 1.5Ω 以下であった。また 0.5Ω 以下のピークは、140-500 MHz の範囲に 10 本であった。このうち特に大きなピーク 3 本を

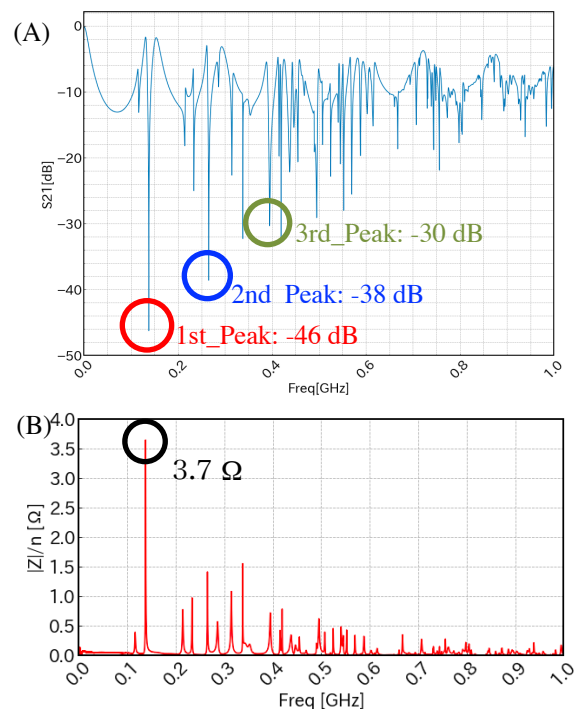


Figure 1: Results of impedance measurement of the Mirror Chamber with no absorber; (A) transmission (S_{21}), (B) analytic result of impedance.

[#]tomoi.sasaki@kek.jp

1st_Peak(140 MHz 近傍)、2nd_Peak(260 MHz 近傍)、3rd_Peak(400 MHz 近傍)と呼び、後述の実験ではこれらのピークへの電磁波吸収効果の適用に注目した。

2.2 SiC・フェライトによる電磁波吸収

CST Studio Suite によるシミュレーションでは、構造の工夫だけではインピーダンスを軽減することは困難であり、積極的にウェイクを吸収するために、KEKB や KEBK DR などで使用実績のある誘電体の SiC を候補とした[4, 7-9]。また磁性体であるフェライト[10, 11]も試験することにした。

誘電体(SiC) による単位体積あたりの電場の吸収パワー P_{SiC} は、

$$P_{SiC} = K\epsilon' \tan \delta f E^2 [W/m^3] \quad (1)$$

である。ここで比例定数 K 、比誘電率 ϵ' 、誘電損失角 $\tan \delta$ 、周波数 f 、電界強度 E であり、SiC の場合 $\tan \delta$ は

$$\tan \delta = \epsilon''/\epsilon' \quad (2)$$

である。

また、磁性体のフェライトによる単位体積あたりの吸収パワー $P_{Ferrite}$ は、

$$P_{Ferrite} = K\mu' \tan \delta f H^2 [W/m^3] \quad (3)$$

である。ここで比例定数 K 、比透磁率 μ' 、誘電損失角 $\tan \delta$ 、周波数 f 、磁界強度 H であり、フェライトの場合 $\tan \delta$ は、

$$\tan \delta = \mu''/\mu' \quad (4)$$

である。Figure 2 に SiC の誘電率およびフェライトの透磁率を示す。

使用した SiC はクアーズテック社の CERASIC-B のブロック(48×48×15 mm³)、フェライトは TDK 社の

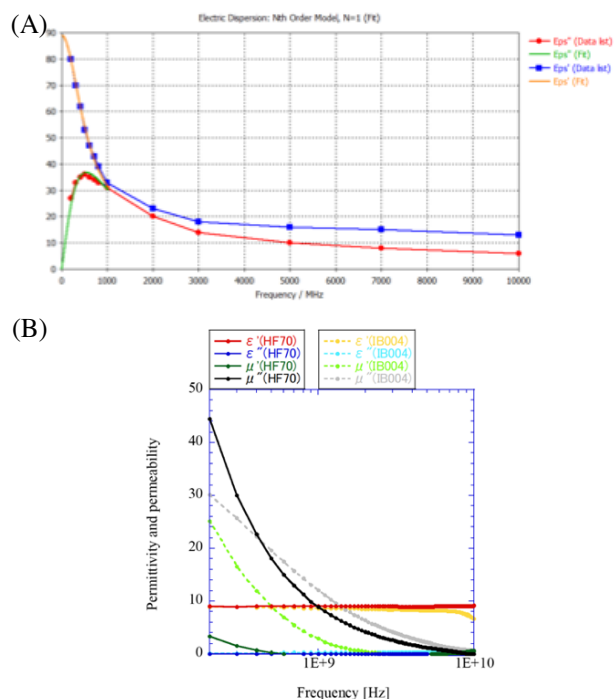


Figure 2: (A) Permittivity of the SiC (ϵ' : blue, ϵ'' : red), and (B) permeability of the ferrite (μ' : dark green, μ'' : black)[11].

HF70 のトロイダルコア (HF70RH16x28x9: 外径 16 mm、内径 9 mm、高さ 28 mm)である。

3. ワイヤー法による信号透過率の測定

3.1 Mirror Chamber の構造

Mirror Chamber (肉厚 35 mm の SUS316L 材製) には、測定光学系として直径 350 mm の大口径凹面鏡 2 枚と直径 200 mm の凸面鏡、それらを支える Mirror Unit、いずれもアルミ製、が入っている (Fig. 3)。図には、容器側面の ICF253 の真空ポート 6 枚 (両面で 12 枚) が赤色円で上書きしてある。ポート名は、上段: T(Top)、中段: M(Middle)、下段: B(Bottom) とし、上流側: 1、下流側: 2 とし、M1 なら中段上流側ポートである。また、実験では吸収体と Mirror Unit との距離を変えつつ測定するが、この距離を D と定義した (Fig. 4)。

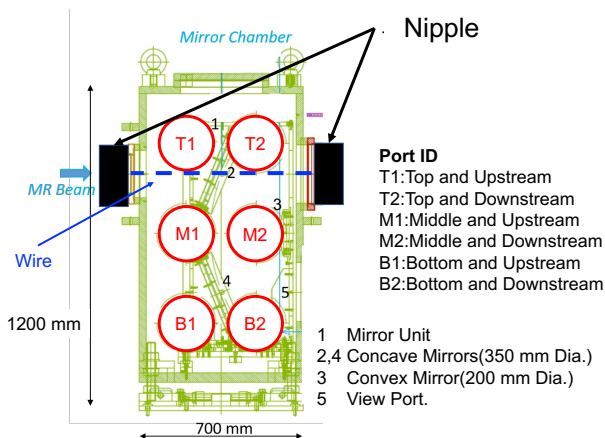


Figure 3: Side cross-sectional view of the Mirror Chamber.

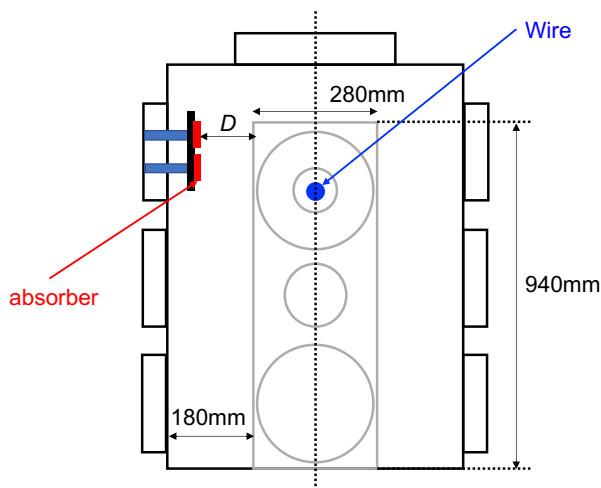


Figure 4: Cross sectional view in the longitudinal direction, and configuration for absorber test.

3.2 実験方法

実験は、ベクトルネットワークアナライザとワイヤー（放電加工用銅合金：直径 200 μm ）を用いたワイヤー法[5, 6]による測定を行った。実験パラメータは以下の4つである。

- 吸収体 (SiC or フェライト)
- 吸収体を取り付けるポート位置
- 吸収体と Mirror Unit の距離： D
- (SiCのみ)ブロックの並べ方

Figure 5 は、Mirror Chamber 側面のポートに入れる SiC (A)、(B)およびフェライトの並べ方 (C)と、それらを固定する治具の写真 (D)である。SiC は図のように4ブロックを1セットとし、トロイダルコアは、7×7 (計49個)を1セットとして配置した。SiC の1セットの体積は $13.6 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 、フェライト1セットの体積は $18.6 \times 10^5 \text{ mm}^3$ であり、フェライトの方が約 27%大きい体積であった。固定治具 (D)では、アルミ板 (300×300 mm^2) のフランジからスタッドボルト (SUS-M8)を伸ばし、アルミ板 (150×150 mm^2)をナットで固定した。スタッドボルトは 10 mm 径の真鍮パイプでカバーした。アルミ板に吸収体をボルトで固定した。このようにすることで真鍮パイプの長さで吸収体と Mirror Unit の距離 D を調整した。

試験では、より大きくインピーダンスを抑制できる条件を探索するため、簡便な方法としてワイヤーの信号透過率 $|S_{21}|$ (dB)を Fig. 1 (A)の3つのピーク位置で比較した。

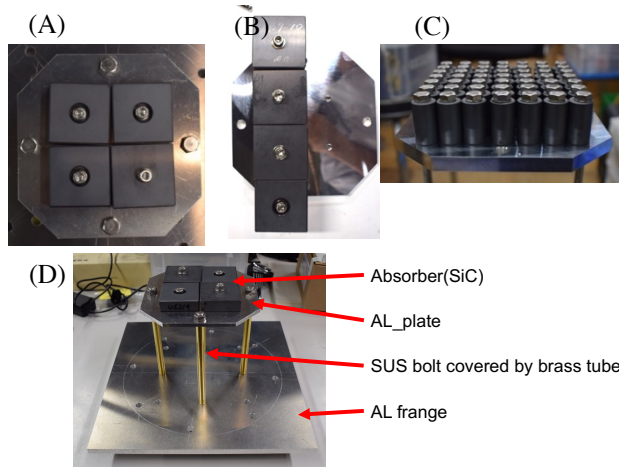


Figure 5: Absorber setup; (A)Set_SiC_1, (B)Set_SiC_2, (C)Set_Ferrite, (D)Fixing jig (example: Set_SiC_1 case).

3.3 実験結果

まず、Set_SiC_1とSet_FerriteでMirror Chamber側面の各ポートでのMirror Unit間の距離 D を変えて S_{21} の測定を行った (Fig. 6)。Set_SiC_1では、下段のポート(B1、B2)で3rd_Peakの透過率を最大で-21 dB程度まで改善できた。1st_Peakと2nd_Peakは、他のポートも含め、どの条件でも透過率に大きな違いは見られなかった。

Set_Ferriteでは、Mirror Chamber上流側のポート

(T1、M1、B1)で1st_Peakの透過率を最大で-17 dB程度まで改善できた(M1)。また、下段のポート(B1、B2)では3rd_Peakの透過率を-16 dB程度まで改善できた(B2)。

ここまでの結果では、1つのピークだけ大きく改善する条件はあったが、複数のピークを同時に改善する条件はなかった。そこで、条件を組み合わせ、1st、2nd、3rdのピークの透過率の改善を試みることにした。Figure 6からは、全てフェライトで構成する次の組み合わせが最もよさそうである。

- 条件① フェライト、Port M1、 D :40 mm
(1st_Peak 透過率改善、Fig. 6 赤色破線円)
- 条件② フェライト、Port T1、 D :100 mm
(2nd_Peak 透過率改善、Fig. 6 青色実線)
- 条件③ フェライト、Port B2、 D :40 mm
(3rd_Peak 透過率改善、Fig. 6 緑色実践円)

しかし吸収体は、SiC:1ペアポート分、フェライト:2ペアポート分しか所持しておらず、3ペアポートにフェライトを使用するこの条件では試験できなかった。そこで、条件①~③のいずれかひとつをSiCで代用できないか試験を行った。

Mirror Chamber上流側のポート (Port T1、M1、B1)は大口徑ミラーを支えるMirror Unitの背板の側面と対面している (Fig. 3)。この背板に対向するようにSiCを配置することで電磁波の吸収効果が期待された。そこでSiCを Fig. 5 (B)のように並べて (Set_SiC_2) 背板側面と対向する面積を大きくした。

Set_SiC_2、 D :47 mmでの測定結果を Fig. 7に示す。Port B1では内部のMirror Unitのベースの位置調整機構と干渉するため測定していない。Port T1では1st_Peakの透過率が-25 dB程度まで改善し、Set_SiC_1で最良であった-43 dBと比べて18 dBの改善であった。しかしフェライトの最適条件①には劣る。Port M1では1st_Peakに関しては-17 dBと条件①と同等の改善効果があった (Fig. 7に赤色円で強調した)。このとき2nd_Peakと3rd_Peakでは条件①よりも悪化しているが、1st_Peakの効果が高いため、これを①の条件の代用①'として採用することにした。条件①' Set_SiC_2、Port M1、 D :47 mm

(1st_Peak 透過率改善、Fig. 6 赤色破線円)

以上から、SiC:1ペアポート、フェライト:2ペアポートでの測定を行った。この測定の条件とこれまでの単独試験の透過率はTable 1の通りである。

Table 1: Parameters for Combination Test with SiC and Ferrite

Target Peak	Condition	Independent result $ S_{21} $ [dB]
1st	Set_SiC_2 PortM2 D :47 mm	-17.28
	Set_Ferrite	
2nd	PortT1 D :100 mm	-19.54
	Set_Ferrite	
3rd	PortB2 D :40 mm	-14.42

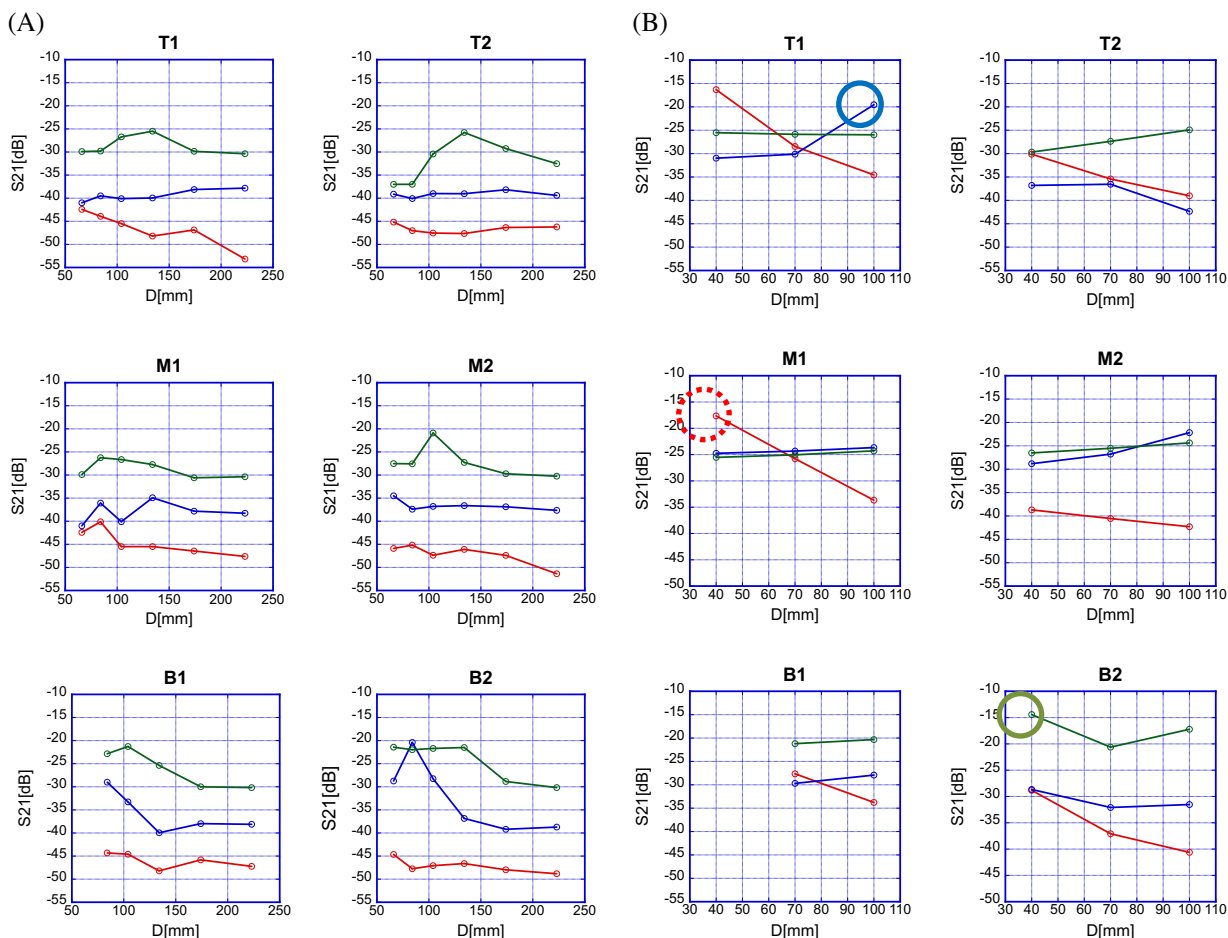


Figure 6 : Correlation between result of signal transmission measurement by wire-method and distance between electromagnetic absorber and Mirror Unit at each port, (A)with Set_SiC_1, (B) with Set_Ferrite. Red:1st_peak, Blue: 2nd_peak, Green: 3rd_peak.

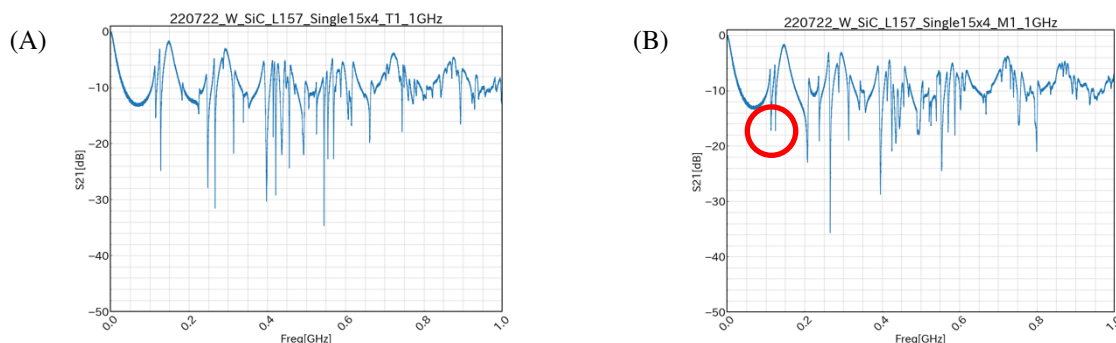


Figure 7: Results of the measurement by with Set_SiC_2,(A) PortT1: D:47 mm, and (B) PortM1: D:47 mm.

この組み合わせ実験の結果を Fig. 8 に示す。
 青実線が Table 1 の条件での組み合わせ測定、赤実線が吸収体無しの測定結果である。

1st、2nd、3rd_Peak のいずれのピークの透過率も単独での実験の結果とほとんど同程度の値に改善することができた。この他のピークでは、420 MHz 近傍には -23 dB のピークが存在し、これは吸収体無し

の場合の -32 dB より改善されているが、他のピークが大きく抑制されたことにより最も大きなピークとなった。

この測定結果から求めたインピーダンスの値(Z/n)を Fig. 9 に青実線で、吸収体無しの測定結果から求めたインピーダンス(Z/n)を赤実線で示す。それぞれインピーダンスの最大値は、 0.8Ω (Fig.9 青色実線

円)と 3.7Ω (Fig. 9 赤色実線円)であり、低減率は約 78 %と大きな効果を確認できた。心配した 420 MHz の近傍のピーク(Fig. 8)は、 0.4Ω であり、目標をクリアした。また、全体として目標の 0.5Ω 以下にはもう少しのところまでできた。

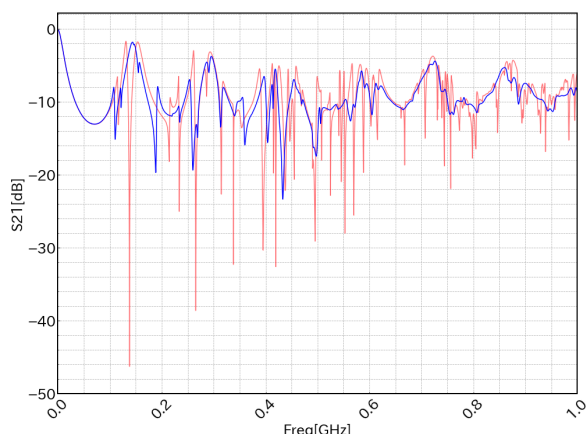


Figure 8: Result of combination measurement with conditions in Table 1.

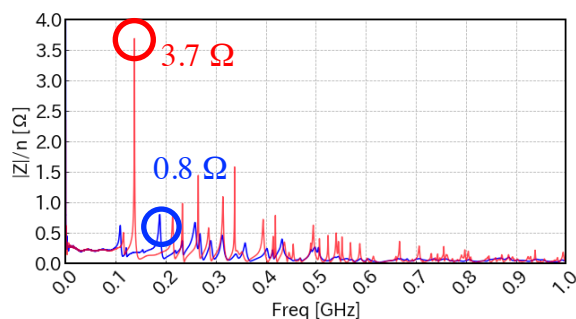


Figure 9: Impedance $|Z/n|$, blue: combination measurement of Fig.8, and red: without absorber.

4. まとめ

J-PARC MR では OTR と蛍光を用いた 2次元ビームプロファイルモニターの 2号機を開発中である。MR の周回ビームとのカップリングインピーダンス 3.7Ω を目標の 0.5Ω 以下に低減するためのベンチ試験を SiC とフェライトの電磁波吸収体で行った。Mirror Chamber の各側面ポートから内部に支持する治具に吸収体を取り付けて、Mirror Unit との距離を変えて、ワイヤーでのビーム疑似信号の透過率との相関を調べた。SiC よりフェライトの方が信号透過率を大きく改善する結果を得た。これは、フェライトが、構造物である Mirror Unit の持つ高周波の共振電流が作る磁場と結合して効率良く吸収したためと考えている。これらの各ポートの単独試験の結果を基に、3つのポートに入れる吸収体の種類と位置の条件を求め、その組み合わせ実験を行い、予想通りの透過率の改善結果を得た。その透過率から求めたインピーダンス $|Z/n|$ は、電磁波吸収体無しで 3.7Ω で

あったものを 0.8Ω まで低減することができた。目標の 0.5Ω には、もう一息のところまでできた。

謝辞

SiC に関して KEK 竹内保直氏に多大なるご協力をいただいている。また、科研費 JP16H06288 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. IBIC2013, Oxford, UK, Sep. 2013, pp338-341; <https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2013/papers/tucl2.pdf>
- [2] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. HB2014, East-Lansing, USA, Nov. 2014, pp187-191; <http://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf>
- [3] Y. Sato *et al.*, proc. PASJ2019, Kyoto, pp1125-1129; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI038.pdf
- [4] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki Online, Japan Aug.2021, pp481-485; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP024.pdf
- [5] 外山 毅, “ビームインストルメント”, OHO 2009; <http://accwww2.kek.jp/ofo/OHOTxt3.htm>
- [6] T. Toyama *et al.*, Proc. IPAC2022, Bangkok, Thailand, Jun. 2022; DOI:10.48550/arXiv.2208.09217
- [7] T. Kageyama *et al.*, proc. PASJ2011, Tsukuba; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS126.pdf
- [8] T. Abe *et al.*, proc. PASJ2012, Tsukuba; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THLR/THLR06.pdf
- [9] Y. Takeuchi *et al.*, proc. PASJ2011, Tsukuba; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS137.pdf
- [10] S. Terui *et al.*, proc. PASJ2017, Sapporo; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP1/TUP121.pdf
- [11] S. Terui *et al.*, Development of ferrite higher order mode absorber for SuperKEKB vacuum system (In preparation).