

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(4)

DEVELOPMENT OF A WIDE DYNAMIC-RANGE BEAM PROFILE MONITOR USING OTR AND FLUORESCENCE FOR INJECTED BEAMS IN J-PARC MAIN RING (4)

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

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

Abstract

In the previous paper, impedance countermeasures were required to install the second monitor using OTR and fluorescence in the J-PARC Main Ring. In order to overcome this problem, by using ferrite and SiC as high-frequency absorbers, we have experimentally succeeded in reducing the impedance $|Z/n|$ from 3.7Ω to 0.8Ω . In this paper, based on this result, we report on the impedance test for actual setup with these absorbers and the structure for releasing absorbed heat to chamber outside.

1. はじめに

J-PARC-Main Ring (MR)の入射ビームライン(3-50BT)での OTR と蛍光を用いた 6 桁程度の高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[1, 2]をベースに、MR において入射直後の測定に用いる 2 号機を製作した[3-5]。2 号機では、ビームに対して $|Z/n|$ で 3.7Ω (at 140 MHz) のカップリングインピーダンスを持ち、リングの大強度周回陽子ビームに対しての不安定性抑制の点から、この値を 1Ω 以下にできるだけ小さくすることが課題となった。これは、Mirror Chamber と称する真空容器内の光測定のための金属ミラーのユニットの構造が、ビームの電磁場で高周波共振を起こすことで発生する。そこで、試験的に電磁波吸収体として電場を吸収する炭化珪素(SiC)ブロックと磁場を吸収するフェライトコアを用いることで、 $|Z/n|$ を 0.8Ω まで低減することに成功した[6]。しかしこの試験は、Mirror Chamber の側面ポートから、長尺のステンレス製のスタッドボルトの先端に付けた吸収体を、内部の構造に近づけたり遠ざけたりするだけの簡素な仮組みでの試験であった。実機にこれらの吸収体を組み込むためには、吸収体による発熱を冷却する効果を考慮して、側面ポートからシリンダを内部に延ばし、その先端に内蓋を溶接し、内蓋の真空側表面にフェライトまたは SiC を取り付ける構造を取る。また、真空内に置かれたこれらの吸収体における高周波パワーによる発熱を大気側に伝熱し、放熱する構造とする必要がある。

実機相当のこのような構造を用いて吸収体を組み込む場合でも、 $|Z/n|$ を 0.8Ω 以下に低減できることを確認し、吸収体からの除熱の検討を行っている。本報告ではこれらの現状を報告する。

2. カップリングインピーダンスについて

2.1 Mirror Chamber の構造

インピーダンス低減の対象となっている Mirror Chamber (Fig. 1)は、 $W700 \times D700 \times H1250 \text{ mm}^3$ のサイズで、SUS316L (t30 mm) で作られた角形真空容器である。その内部に光計測用の大きな Offner 光学系が収められている。光学系は、直径 345 mm の凹面鏡 2 枚、直径 200 mm の凸面鏡 1 枚で構成された同心球面のリレー光学系であり、これらの鏡を支えるフレームに収められた構造になっている (Mirror Unit)。また、Mirror Chamber は、両側面にそれぞれ 6 か所の ICF253 フランジのついたサービスポートを持つ。

2.2 前回の試験用吸収体セットと $|Z/n|$

前回の試験時の試験用吸収体セットは、側面のサービスポートのフランジ板から、長尺のステンレス製のスタッドボルトを立て、その先端のアルミ板に吸収体を固定した簡便なものであった(Fig. 2 (i))。Mirror Chamber の 6 か

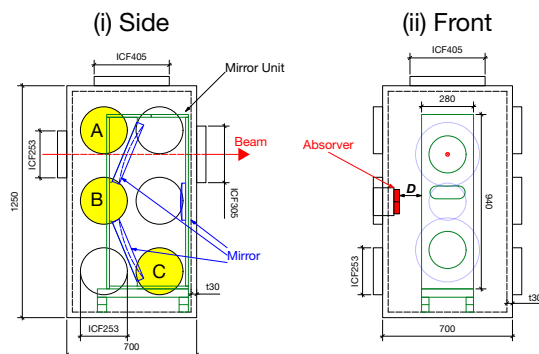


Figure 1: Perspective views of Mirror Chamber structure, (i) Side, and (ii) Front.

[#] tomoi.sasaki@kek.jp

所のサービスポートに吸収体としてフェライトまたは SiC を挿入し(対面するポートはペアとして、どちらのポートにも同じ吸収体マテリアルを同じ位置にセット)、内部の Mirror Unit と吸収体の距離 D (Fig. 1(ii))を変えて、インピーダンス低減の効果を調べた[6]。その結果、インピーダンスを大きく低減できる 3 組のサービスポート (Fig. 1:Port A, B, C)が分かり、吸収体表面と Mirror Unit との距離 D の最適値を得た(Table 1)。その時の $|Z/n|$ は、 0.8Ω (at 188 MHz)以下であった(Fig. 2 (ii))。尚、 D の値が、参考文献[6]とやや異なるのは Mirror Unit 側の測定基準点を変えたためである。

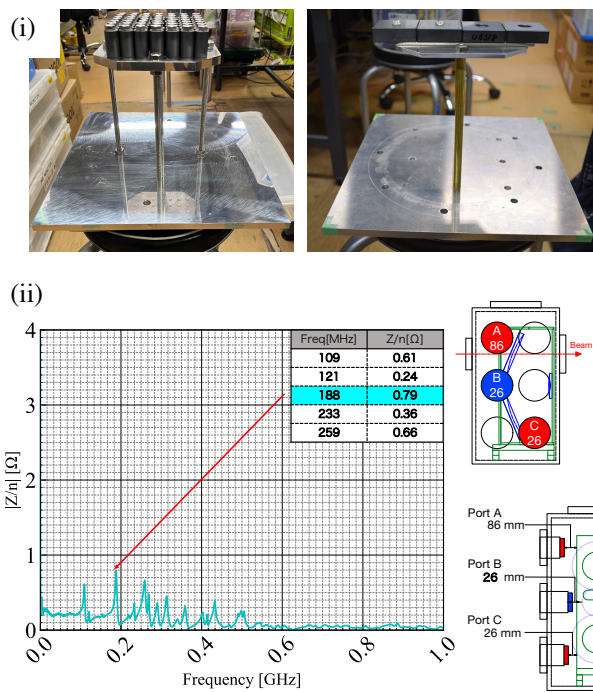


Figure 2: Previous impedance test., (i) absorber-set with simplified structure (left: Ferrite-Set, right: SiC-Set), and (ii) the best impedance measurement result.

Table 1: Parameters of Previous Best Results

Service Port	Absorber	D [mm]
Port A	Ferrite (49 pcs)	86
Port B	SiC (4 pcs)	26
Port C	Ferrite (49 pcs)	26

2.3 実機相当の試験用吸収体セット

Figure 3 に実機相当の試験用の吸収体セットの構造を示す。アルミ製フランジ板(t10 mm)に、アルミ製シリンダ(直径 150 mm, t5 mm)が付き、その終端のアルミ板(t10 mm)に吸収体であるフェライトまたは SiC をボルトで固定する。このようにシリンダで構成することで、前回のセット(Fig. 2 (i))での吸収体とフランジ間の長尺ボルトの持つインピーダンスが見えなくなり、また電磁場が吸収体裏面に回り込まないようにした。

Ferrite-Set は、TDK 社製 HF70 のトロイダルコア(組成

Ni-Zn、外径 16 mm、内径 9mm 高さ 28 mm)を 49 個格子状に並べた。SiC-Set は、クアーズテック社製の SERASIC-B ブロック(W65×D65×H30 mm³、底面は Ra 0.8 [μm]に研磨)を 4 個格子状に並べた。

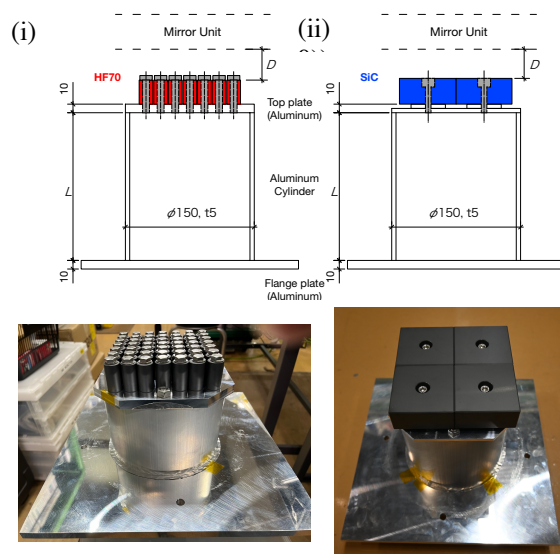


Figure 3: Absorber-set equivalent to actual equipment, (i) Ferrite-Set, (ii) SiC-Set.

2.4 測定結果

Port A, B, C の 3 ペアポートに吸収体を挿入して試験した結果を Fig. 4 に示す。最も大きく $|Z/n|$ を低減できた条件がセット 1 (Fig. 4 (i))で Port A に Ferrite-Set ($D86$ mm)、Port B に Ferrite-Set ($D10$ mm)、Port C に Ferrite-Set ($D26$ mm)を挿入したセットである。セット 1 の結果では $|Z/n|$ が最大で 0.66Ω (at 104 MHz)であった。この結果は、前回のベスト(Fig. 2(ii))である最大 0.8Ω よりも $|Z/n|$ を小さくすることができた。しかし、セット 1 では Port B のフェライトから Mirror Unit までの距離 D が 10 mm であるが、フェライトの固定に用いたボルト頭が 6 mm 程度飛び出しており、ボルト頭と Mirror Unit の距離が 4 mm 程度になっていた。Mirror Unit には、ビーム通過時の大きな誘導電流が流れるために、ボルト頭と Mirror Unit 間での放電が危惧された。

そこで、Port B フェライトの距離 D だけを 30 mm に広げたセット 2 を試験した。セット 2 の結果では $|Z/n|$ が最大 0.73Ω (at 110 MHz)であり、セット 1 より微増したものの、同様に 0.8Ω を下回った。

これまではフェライトだけのセットであったが、前回同様に Port B を SiC に変更したセット 3 (Fig. 4 (iii))の試験も行った。Port B が $D28$ mm とセット 2 より 2 mm 小さくなっているのは SiC の厚みがフェライトより 2 mm 大きいためである。 $|Z/n|$ は最大で 0.81Ω (at 110 MHz)と前回とほぼ同じ値となった。

これらの結果から Port A と Port C には Ferrite-Set を使い、Port B には Ferrite-Set/SiC-Set のいずれの使用でもよい、との組合せとなる。このことは前回の結果と一致する[6]。また、吸収体のサポートをシリンダに変更しても、 $|Z/n|$ を 0.8Ω 程度以下に低減することが可能であることが

わかった。

各セットの最大の $|Z/n|$ となる周波数を見たときに、前回は 188 MHz (Fig. 2 (ii))であったが、今回のいずれのセットも、110 MHz 近辺となった。188 MHz 近辺の $|Z/n|$ は、前回 0.79 Ω であったが、今回のセットでは、0.39 Ω 以下と半減したこと。一方で 110 [MHz]近辺の $|Z/n|$ は、前回 0.61 Ω であったものが、0.66~0.81 Ω に少し大きくなっている。これが、吸収体サポートの構造の違いによるものと考えられる。

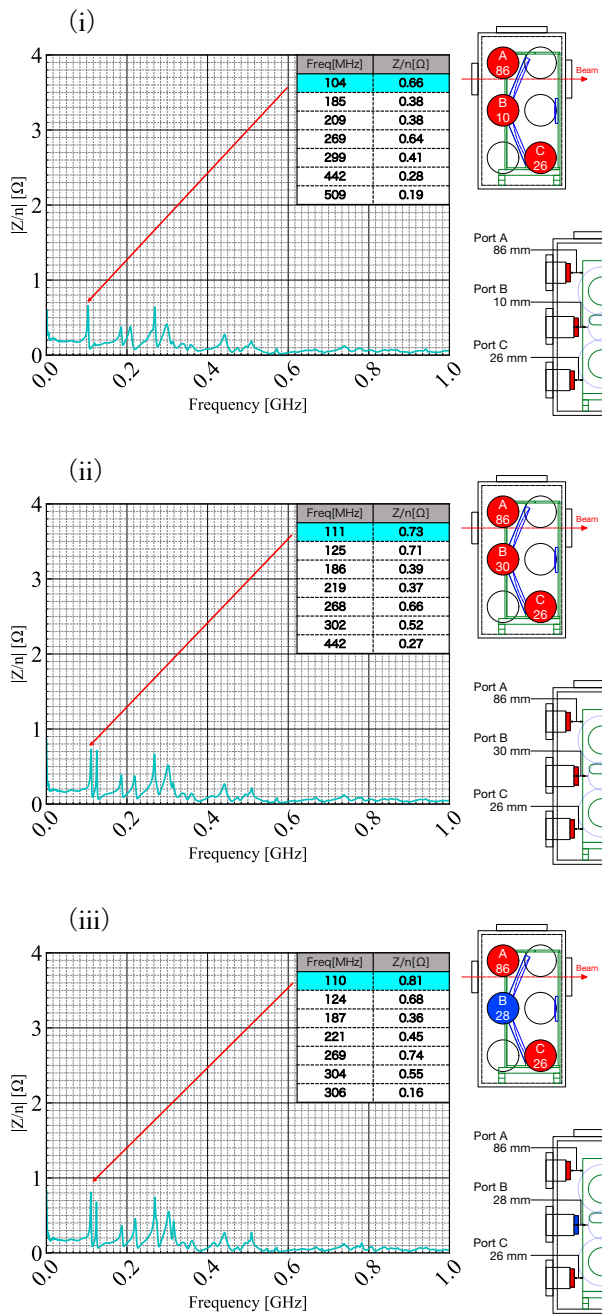


Figure 4: Impedance test results with three types of absorber-set combination. (i): Set1, (ii): Set2, (iii): Set3.

3. 吸収体の除熱の検討

3.1 吸収体発熱時の各部の温度計算モデル

真空中に置かれた吸収体は高周波パワーによって発熱するため、その熱を大気側へ放熱する必要がある。特に、使用したフェライトのキュリー温度は 100°C であるためそれ以下の温度に抑える必要がある。Fig. 5 のモデルを考え、真空中 (断熱) の吸収体が発熱した際の温度計算をした。モデルは 2.3 節で説明した試験用吸収体セットを元に 1 ポート (フェライト: 1 ポートあたり 49 個、SiC: 1 ポートあたり 4 個) に Mirror Unit 側の端面から 5 W が入熱し (本来は吸収体の中で発熱する) 底面の固定板 (SUS) の大気側 (30°C に固定) に放熱するとした。吸収体全体での発熱量は、文献[4]で MR の大強度化のデザイン値である 1.3 MW 運転時に 11 W になると見積もられている。吸収体は 6 ポートあるが、そのうちの 1 ポートで見積値の約半分の 5 W が発熱するモデルである。

モデルでの計算は次のように行った。まず吸収体内や固定板の中での伝熱は、熱流束一定として、物質の両端面の温度差 $\Delta\theta$ を、フーリエの法則 (Eq. 1) を使って、Eq. 2 として求めることができる[7]。

$$q = \frac{dQ}{dA} = -\lambda \frac{d\theta}{dl} \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \frac{Q l}{A \lambda} \quad (2)$$

ここで熱流束 q [W m⁻²]、熱量 Q [W]、断面積 A [m²]、熱伝導率 λ [W m⁻¹ K⁻¹]、板厚 l [m] である。

次に、吸収体と接している物質の接触部は微視的に見るとそれぞれの表面の粗面粗さにより凹凸が存在しているため、実接触面積は小さくなり、熱抵抗が生じる。温度計算にはこの接触による熱抵抗も考慮した。真空中で物体 1 と物体 2 が接触しているときの接触熱抵抗 R [m² K W⁻¹] は Eq. 3 で求めることができ[8]、 R を用いた接触部の温度差 $\Delta\theta$ は Eq. 4 で求めることができる。

$$\frac{1}{R} = \frac{9.70 \times 10^3}{\sqrt[4]{Ry_1^2 + Ry_2^2}} \frac{P}{H} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (3)$$

$$\Delta\theta = \frac{QR}{A} \quad (4)$$

ここで、接触物体の表面粗さ (最大高さ) Ry_1 および Ry_2 、接触圧力 P [MPa]、柔らかい方の物体の硬さ H (ブリネル硬度 H_B またはビッカース硬度 H_V)、接触物体の熱伝導率 λ_1 および λ_2 [W m⁻¹ K⁻¹] である。計算に使用した各モデルの物性値は Table 2 に示す。

Figure 6 に温度計算の結果を示す。Ferrite-Set の結果 (Fig. 6 (i) 紫実線) ではフェライト先端の温度が 168°C まで上昇し、キュリー温度を超えた。そこで、接触熱抵抗を小さくするために硬度の小さいアルミシートをフェライトと固定板の接触面に挟むことを考えた。アルミシートを選定した理由については 3. 2 節で述べる。アルミシートを

挟んだ場合の計算結果 (Fig. 6(ii) 赤実線) ではフェライト先端の温度をキュリー温度 (100°C) より十分低い 64°Cまで下げることができた。

SiC の計算結果はアルミシート無しで先端の温度が 31°C、アルミシートを挟んだ場合で 30.4°Cであり、除熱の問題はないと考えられる。

フェライトと比較して SiC の先端温度が低いのは熱伝導率 λ がフェライトの $1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ に対して SiC は $170 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ と大きいことに加え、接触部の表面粗さ R_y がフェライト $21 \mu\text{m}$ に対して SiC $0.8 \mu\text{m}$ であるため接触部の熱抵抗が SiC の方がかなり小さくなるためである。

Table 2: Physical Properties on Thermal Calculation

Material	t [mm]	λ [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	R_y [μm]	H_v
Ferrite	28	1	21	550
SiC	30	170	0.8	2300
SUS plate	13	16	1	187
Pure aluminum	0.106	236	1	19

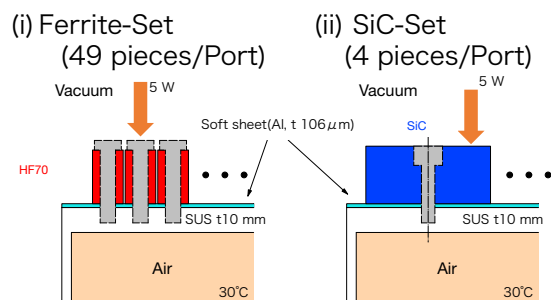


Figure 5: Models for thermal calculation, (i) Ferrite-Set, (ii) SiC-Set.

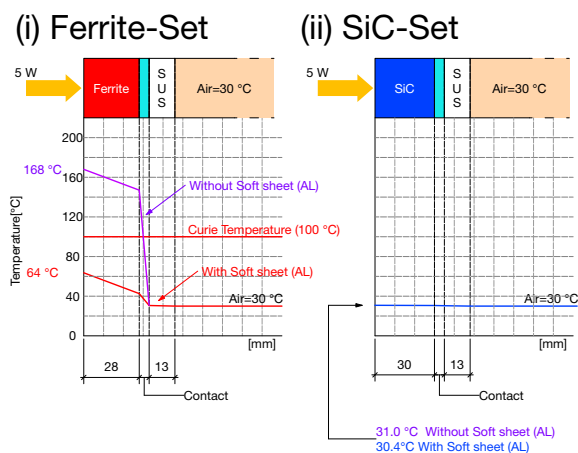


Figure 6: Results of thermal calculation, (i) Ferrite-Set, (ii) SiC-Set.

3.2 アルミシートの選定

3.1 節のモデル計算で使った吸収体と固定板の間に挟むアルミシートは、いくつかの熱伝導率の高いマテリアルのビッカース硬度 H_v を実測して選定した。使用した測

定器は KEK 機械工学センター所有のマイクロビッカース試験機 (ミツトヨ社: HM103) である。インジウム、純粋なアルミのシートと A1050 アルミシムの測定を実施した。測定結果を Table. 3 に示す。最も硬度が小さい試料はインジウム (H_v 0.9) で、その次が純粋なアルミシート (H_v 19) であった。A1050 アルミシムは H_v 49 であった。接触熱抵抗を小さくするために利用するソフトシートとして、最も硬度が小さいインジウムを利用したいところであったが、インジウムの低い融点 156°C は、このような真空中の発熱箇所には適さないと判断した。インジウムの次にソフトな H_v 19 である純粋なアルミのシート (融点 660°C、昭和電工 IN99-O) を採用した。

Table 3: Vickers Hardness Measurement Results

Test piece	Hardness (Hv)
Indium t100 μm	0.9
Pure Aluminum IN99-O t106 μm	19
A1050 Shim plate t0.1 mm	49

4. 排気曲線とガス放出速度

Mirror Chamber (ただし、内部の Mirror Unit 無し) と、本モニターのもう一つの構成要素である Target Chamber [3-5] のそれぞれの排気曲線を Fig. 7 に示す。真空ポンプ (排気速度 270 L s^{-1}) を用いた場合、1000 時間 (約 40 日) 程度で MR へのインストールが許容できる圧力である $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 程度に到達できる見込みとなることがわかった。ガス放出量 Q [$\text{Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$] は、排気速度 S [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$] と圧力 P [Pa] から、

$$Q = SP \quad (5)$$

である。Equation 5 から 1000 時間排気後の Mirror Chamber のガス放出量は、 $4.1 \times 10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ と見積もることができる。

次に、フェライトと SiC のガス放出速度の測定結果を Fig. 8 に示す。これらのサンプルは、未処理 (洗浄・脱脂などの処理をしない) のフェライトコアと、アセトンでの脱脂とベーキング (150°C, 24 時間) をしたフェライトコア、アルコール洗浄した SiC である。ガス放出速度の測定は、コンダクタンス変調法 [9] で測定した。Figure 8 から、未処理のフェライトと SiC の 1000 時間時点でのガス放出速度は、それぞれ、 $2.3 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$ と $6.3 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$ であると予測できる。2.4 節のセット 3 に使用した吸収体、フェライト 2 ペアポートと SiC1 ペアポート、の表面積を乗じてそれぞれのガス放出量を求めて合算すると、排気後 1000 時間でのガス放出量は $2.9 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$ となる。すなわちセット 3 を想定する場合の吸収体からのガス放出量は、Mirror Chamber のそれと比較して 1000 分の 1 以下であり、十分に小さいことがわかる。

また、ベーキング (150°C, 24 時間) を施したフェライトを大気中に一定の時間暴露した場合のガス放出速度の測定も行った。ベーキング処理直後に測定したフェライトの 45 時間後のガス放出速度は、 $3.0 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^2$ であり、674 時間 (約 1 ヶ月) 大気暴露したフェライトでは、

$2.5 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ であった。これらから、ベーキングによりガス放出速度を約 70%低減することができ、さらにはベーキング処理したものは約 1 ヶ月大気暴露してもその効果が残ることがわかった。

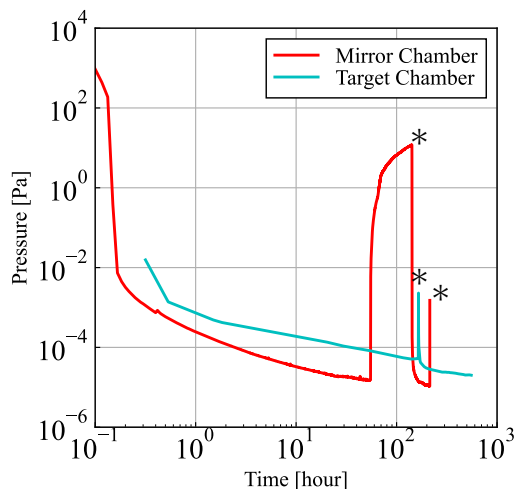


Figure 7 Pumping curve of each chamber, * means pumping stop.

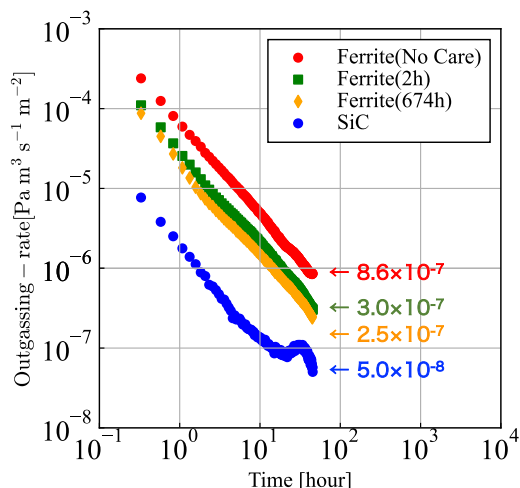


Figure 8: Outgassing-rate of Ferrite and SiC.

5. まとめ

これまでに、OTR と蛍光を利用した 2 次元ビームプロファイルモニターの MR 用の 2 号機の持つインピーダンス $|\mathbf{Z}|/n\Omega$ を、フェライトと SiC の高周波吸収体を用いることで 0.8Ω 以下に低減することに成功していたが、吸収体の導入を仮組みしたもので、実機に導入する場合とは異なる構造であった。これを実機に近いシリンダ形状の吸収体セットに変更して改めてインピーダンス低減試験を実施した。その結果、実機相当の吸収体セットでもビームから見たインピーダンス $|\mathbf{Z}|/n\Omega$ を 0.8Ω 以下に低減できることを確認した。

また、実機に導入する場合、吸収体は高周波パワーを受けて発熱するため除熱の検討も行った。計算[4]より

見込まれる 2 倍以上の 5 W を想定し、吸収体はサポートにボルト固定する場合には、吸収体とサポートの熱接触が問題となる。この接触面に柔らかな純アルミシート (HV 19, $t_{106} \mu\text{m}$) を挟むことで、フェライトでの温度上昇は 34°C 程度の許容可能範囲と見積もることができた。また、SiC は熱伝導率が高く ($170 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、接触部が研磨されている ($R_a 0.8 \mu\text{m}$) ため温度上昇が 1°C 以下になると見込まれた。今後は、熱流計法を用いて、実際のマテリアルを使用した温度上昇を実測する試験を行うことで、この接触部の熱抵抗値の信頼性を確認する予定である。その後に J-PARC MR へのインストールに進みたい。

謝辞

ビッカース硬度測定に関して KEK 機械工学センター 高富俊和 前任技師と阿部慶子 技師に、ガス放出速度の測定と排気曲線の取得に関して J-PARC MR 真空グループの佐藤吉博 専門技師に、SiC 全般に関して 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.*, “A Development of High Sensitive Beam Profile Monitor Using Multi-Screen”, Proc. IBIC2013, Oxford, UK, Sep. 2013, pp338-341; <https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2013/papers/tucl2.pdf>
- [2] Y. Hashimoto *et al.*, Proc. “Two-Dimensional And Wide Dynamic Range Profile Monitor Using OTR /Fluorescence Screens For Diagnosing Beam Halo of Intense Proton Beams”, HB2014, East-Lansing, USA, Nov. 2014, pp187-191; <http://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf>
- [3] Y. Sato *et al.*, “Installation Plan of New 2D-Beam-Profile-Monitor by OTR And Fluorescence At The J-PARC Main Ring”, Proc. PASJ2019, Kyoto, pp1125-1129; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI038.pdf
- [4] Y. Hashimoto *et al.*, “Development of A Wide Dynamic-Range Beam Profile Monitor Using OTR And Fluorescence For Injected Beams In J-PARC Main Ring (2)”, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki Online, Japan Aug.2021, pp481-485; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP024.pdf
- [5] Y. Hashimoto *et al.*, “Development of A Profile Monitor Using OTR And Fluorescence For Injected Beams In J-PARC Main Ring”, Proc. IBIC2021, Pohang, Rep of Korea, Sep. 2021, pp263-267; doi:10.18429/JACoW-IBIC2021-TUPP24
- [6] T. Sasaki *et al.*, “Development of A Wide Dynamic-Range Beam Profile Monitor Using OTR And Fluorescence For Injected Beams In J-PARC Main Ring (3)”, Proc. PASJ2022, Online (Kyushu University), Oct. 2022, pp560-564; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEPO/WEPO20.pdf
- [7] N. Isshiki, N. Kitayama, “伝熱工学 新装第 2 版”, 森北出版, 2018, pp9-13, ISBN: 978-4-627-61074-3.
- [8] The Japan Society of Mechanical Engineers, “伝熱工学資料 改訂第 4 版”, 1986, pp30-31, ISBN: 4-88898-041-1.
- [9] M. Minato, Y. Itoh, “Measurement of Outgassing Rate by Conductance Modulation Method -Outgassing from Small Plate Sample-”, Shinku 37, 1994, pp113-115; doi:/10.3131/jvsj.37.113