

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(5)

DEVELOPMENT OF A WIDE DYNAMIC-RANGE BEAM PROFILE MONITOR USING OTR AND FLUORESCENCE FOR INJECTED BEAMS IN J-PARC MAIN RING (5)

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)}, Shinji Terui^{A)},
Nakamura Takeshi^{A)}, Hiroshi Sakai^{B)}, Masaki Tejima^{A)}, Masahiko Uota^{A)}, Yoichi Sato^{A)}

^{A)} KEK, ^{B)} Kanto Information Service Co., Ltd.

Abstract

We are developing a second monitor using an OTR and a fluorescent screen for the injection beam of the J-PARC Main Ring (MR). In order to suppress its coupling impedance with the circulating beam causing beam instability, we have been testing the insertion of electromagnetic-wave absorbers made of ferrite and silicon carbide (SiC) into the vacuum chamber. At present, a cylinder for absorber insertion has been completed, and impedance measurements for the actual device has been performed. In addition, we have been measuring the high-frequency characteristics and temperature dependence of the absorber, as well as the thermal conductivity characteristics. This paper describes the current status of these studies.

1. はじめに

J-PARC-Main Ring(MR)の入射ビームライン(3-50BT)では OTR と蛍光を用いた 6 桁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]が運用させている。それをベースに、MR の入射直後のビームプロファイル測定に用いる 2 号機を製作した[3-5]。2 号機では、ビームとのカップリングインピーダンスが $|Z/m|$ で 3.7Ω のピーク (138 MHz 近傍)があることがわかり、MR の大強度周回陽子ビームに対する不安定性抑制の観点から、この値を 1Ω 程度以下に減じることが課題となった。これは、光学系を収めた真空容器 (Mirror Chamber) 内の構造のビームによる高周波共振である。そこで、電磁波吸収体として、電場を吸収する炭化珪素 (SiC) と磁場を吸収するフェライトコアを Mirror Chamber に挿入することで $|Z/m|$ を 0.8Ω (110 MHz 近傍)まで低減することに試験的に成功した[6]。今年度は、実機にこれらの吸収体を取り付けるための固定シリンダを製作し、インピーダンスを評価した。

また、吸収体の発熱についての検討を行ってきた[7]。実験的に評価を行うために真空中で伝熱特性を試験する装置を製作した。さらに SiC の誘電率およびフェライトコアの透磁率の温度特性の測定を行い、それらの温度が上昇した場合の吸収特性の変化も測定した。

2. 電磁波吸収体取付けシリンダの製作とカップリングインピーダンス

Mirror Chamber のインピーダンス低減は、フェライトと SiC をチャンバーの側面ポートに挿入することでなされる[6, 7]。今回、実機用の吸収体の固定シリンダを製作し、実機としてのインピーダンスの測定[6]と評価を行った。

吸収体の取り付けポートと内部の Mirror Unit と吸収体との距離はこれまで通りである。Figure 1 のポート A と C には、1 ポートあたり 49 個のフェライトコア (TDK 社、HF70、寸法: OD 16 × ID 9 × H 28 mm) を挿入した。ポート B には 1 ポートあたり 4 個の SiC ブロック (クアーズテック社、SERASIC-B、寸法: L 65 × W 65 × H 30 mm) を挿入した。その結果 Mirror Chamber のインピーダンスは、Fig. 2 となった。これまで、インピーダンス $|Z/m|$ は最大 0.8Ω であったが、 1.2Ω (at 112 MHz) となった。わずかに大きい理由はいくつか考えられる。今回の測定では Mirror Chamber 内のミラーユニットの再アライメントを行い最大 2 mm の変位があったこと、吸収体の固定シリンダの外径が試験シリンダに比べて 15 mm 大きくなったことなどである。このような違いはこれまでのインピーダンス低減試験でも吸収体固定具の形状などのわずかな違いなどにより生じていた。Figure 3 にこれまでの吸収体取付け具とその特徴をまとめ、それらによる測定結果での 100 ~

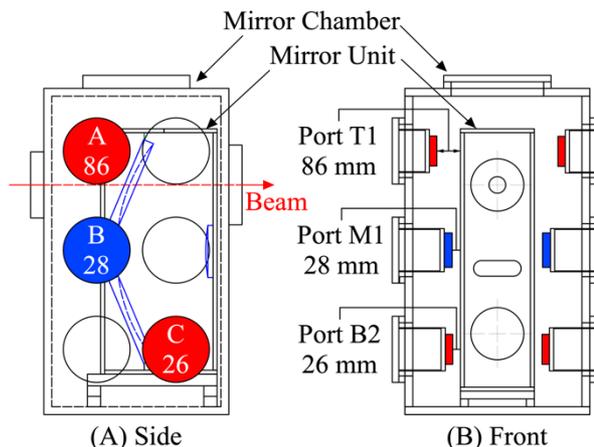


Figure 1: Placement and distance of absorbers in mirror chamber (A: Side view, B: Front view).

[#] tomoi.sasaki@kek.jp

200 MHz の顕著なインピーダンスピークの差異をリストした (Table 1)。

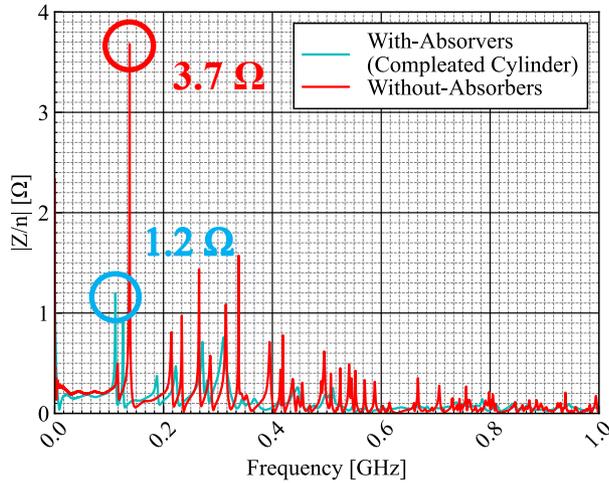


Figure 2: Coupling impedance measurement. of mirror chamber (red: without absorber, blue: with absorber).

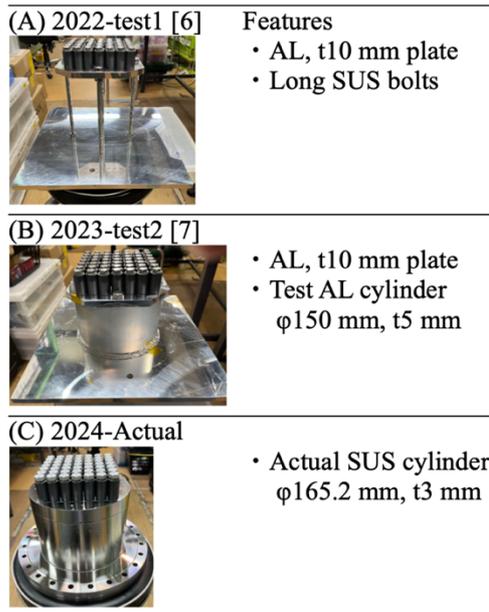


Figure 3: History of mounting method (A: Test-1 in 2022, B: Test-2 in 2023, C: Actual-cylinder in 2024).

Table 1: Typical Impedance Peaks in 100-200 MHz (Red: Maximum Value without Absorbers, Broad: Maximum Value for Previous Test, Blue: Maximum Value with Actual Cylinder and Absorbers)

Mounting method	Freq 1 [MHz]	$ Z_i/nl $ [Ω] (at Freq 1)	Freq 2 [MHz]	$ Z_i/nl $ [Ω] (at Freq 2)
Without absorber	116	0.48	138	3.7
2022-test1[6]	110	0.60	188	0.8
2023-test2[7]	110	0.81	124	0.68
2024-Actual	112	1.2	125	0.95

3. 真空中での伝熱特性の測定

フェライトと SiC は真空中で使うために、それらの発熱と除熱を検討してきた[7]。これまでは計算による見積もりであった。特に吸収体と取付けシリンダの接触部の熱抵抗がポイントであり、柔らかい純アルミニウムシートを挟むことで伝熱効率が改善されると考えてきた。そのような接触熱抵抗を測定する装置を作成し実験した[8]。

装置のレイアウトを Fig. 4 に示す。真空槽(ID 150×H 260 mm)内でサンプルに圧力をかけて熱流量と温度を測定するシステムである。サンプルの上下面には固定用アルミ板(100×100 mm, t10 mm)があり、4本のM8のSUSボルトにより板間に挟んだサンプルに荷重をかける。このSUSボルトと上面アルミ板との間は、t 5 mm のガラスエポキシ板で熱絶縁を取った。サンプルの上面のアルミ板間には、セラミックヒーター(坂口電熱製、MS-3、40 W、10×10 mm)をセットした。測定子は、サンプルの上下面に薄板の熱流センサー(江藤電機、M55B、50×50 mm、t0.7 mm)を付けた。また必要に応じて、サンプルの側面などに白金抵抗測温体 Pt 100 を取り付ける。チェンバーの大气側底面には、CPU 用冷却ファンを取り付けてあり、熱流は上部のヒーターから底面に向かって流れる。容器はスクロールポンプ(アネスト岩田、ISP-250B、排気速度 250 L/s)で排気し、測定時の圧力は 10 Pa 程度である。

この装置で界面の温度差と熱流束を測定することで、吸収体と固定シリンダ間の接触熱抵抗を求め、それによる温度上昇を評価した。まず、アルミシートと SiC ブロックの接触熱抵抗を測定した。Figure 5(A)は SiC とアルミシートの接触熱抵抗測定の模式図である。上から下に向かって熱流 Q [W]において、SiC ブロックの上下それぞれにアルミシートと熱流センサー(HFM)を配置した。SiC ブロックの上部側面には Pt 100 を貼った。HFM は T 型熱電対が内蔵され温度も測定する。接触圧は Fig. 5(A), (B)ともに 3 MPa である。熱流が 4.8 W の時、HFM と SiC ブロック上部の Pt100 の温度はそれぞれ 40.5 °C と 33.2 °C であった。HFM から SiC ブロックまでの熱抵抗 R [K/W]は Eq. (1)で表され、その内訳は Eq. (2)となる。

$$R = \Delta T / Q \quad (1)$$

$$R = R_{HFM-AL} + R_{AL} + R_{AL-SiC} \quad (2)$$

ここで、 R_{AL-SiC} が求めたいアルミシートと SiC ブロックの接触熱抵抗、 R_{HFM-AL} は HFM とアルミシートの接触熱抵抗、 R_{AL} [K/W]はアルミシートの熱抵抗である。 R_{AL} は、純粋なアルミニウムの熱伝導率 236 W/(m K)と寸法 (50×50 mm、厚み 106 μm)から 2×10^{-4} K/W である。また、全体の熱抵抗 R は Eq. (1)から 1.52 K/W である。目的

の R_{AL-SiC} を求めるには R_{HFM-AL} の値が必要となり別途実験で求めた (Fig. 5(B))。この場合、合計の熱抵抗 R は個々の熱抵抗の和として Eq. (3)で表せる。

$$R = 2R_{HFM-AL} + R_{AL} \quad (3)$$

実験の結果、上部 HFM の温度 38.1 °C、熱流 4.6 W であった。下部熱流センサーの出力は温度 34.5 °C、熱流 4.3 W であった。これらの数値から Eq (1)の温度差 ΔT を 3.6 °C、熱流 Q は下部熱流センサーの 4.3 W とすれば、上下熱流センサー間の熱抵抗の合計は 0.84 K/W になる。よって、Eq. (3)から R_{HFM-AL} は 0.42 K/W である。さらに、Eq. (2)から R_{AL-SiC} は 1.1 K/W であった。

SiC の場合と同様に測定し、フェライトコアとアルミシート間の接触熱抵抗 $R_{AL-Ferrite}$ は 0.56 K/W であった。

Mirror Chamber では挿入する電磁波吸収体トータルでの吸収電力は、MR のデザインビーム強度では、5 W 程度と計算で見積もられており[9]、仮にその 5 W 全てが 1 ポートの 4 個の SiC ブロック (Fig. 1(B))、または 49 本のフェライト (Fig. 1(A, C)) に吸収された場合の温度上昇を Fig. 6 に示す。この温度計算には固定シリンダ (ステンレス製) からアルミシート間の熱抵抗 R_{AL-SUS} も必要だったため、Fig. 5(A)と同様の方法で測定し、その値は 1.38 K/W であった。1 ポート 5 W 発熱時の電磁波吸収体の温度上昇は SiC が 13 °C (Fig. 6(A)青実線)、フェライトが 16 °C (Fig. 6(B)赤実線)となった。昨年度の計算による見積り値の報告[7]よりも SiC は約 13 °C 高く、フェライトは約 18 °C 低くなった。いずれの吸収体の温度上昇もこの実験によって十分に小さく抑えることができることがわかった。SiC での温度上昇が大きくなった原因は、ほぼゼロの計算結果であった R_{AL-SiC} 及び R_{AL-SUS} が、実測ではそれぞれ 1.1 K/W と 1.38 K/W あったことである。フェライトでの温度上昇が小さくなった原因は、昨年度はフェライトの熱伝導率を 1 W/(m K)として計算していたが実測により 3.5 W/(m K)[10]とわかったためである。今回測定した R_{AL-SiC} 、 $R_{AL-Ferrite}$ 、 R_{AL-SUS} は接触圧 3 MPa でしたか実験を行っていない。接触圧はボルトの締め付け

ルクと接触面積から計算した値である。接触圧をより大きくすれば接触熱抵抗はより小さくなる可能性があるため、今後、より大きな接触圧での実験を行ってみたい。

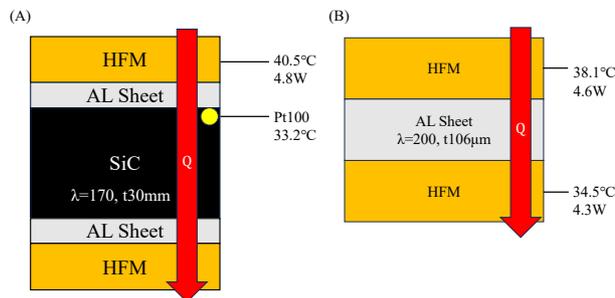


Figure 5: Contact thermal resistance measurement. (A): SiC to aluminum, (B): Heat flow sensor to aluminum.

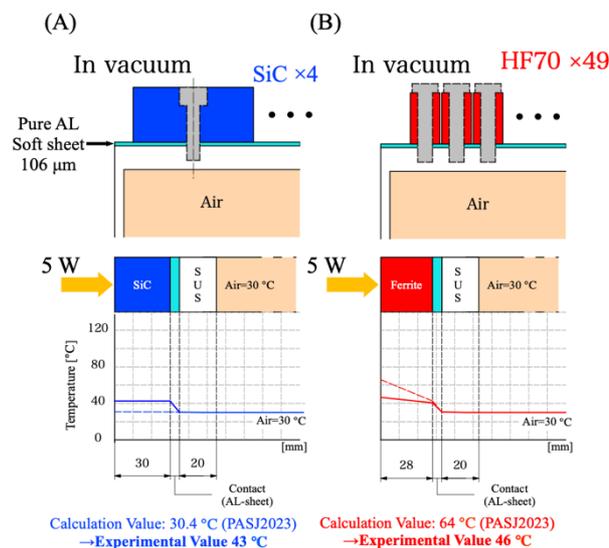


Figure 6: Temperature estimate based on experimental values (A: SiC, B: Ferrite).

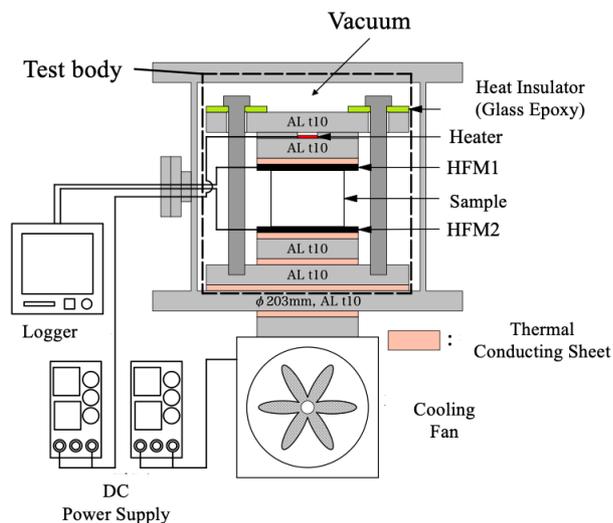


Figure 4: Thermal conductivity measurement system (in vacuum) [8].

4. 電磁波吸収体の温度特性の測定

4.1. SiC の比誘電率の温度特性

1 ポート 5 W の発熱時の SiC ブロックの温度上昇は 13 °C 程度と見積もったが、想定外に温度が上昇した際にも電磁波吸収体として機能することを確認するため、加熱しながらの比誘電率測定を行った。SiC に関しては、ベクトルネットワークアナライザに誘電体測定用プローブを接続し、SiC 表面の反射特性から比誘電率を算出する方法での測定を行った。25 ~ 83 °C までの測定結果を Fig. 7 に示す。複素誘電率の実部 ϵ_r' と、虚部 ϵ_r'' は、カーブの形状は変わらず、温度の上昇とともに周波数が高い方へおよそ 700 MHz シフトした。次に、測定で得た複素誘電率のカーブを、Debye 型誘電分散モデル[11]でフィッティングした。複素誘電率の定義は Eq. (4)で、目的関数は Eq. (5)である。ここで、複素誘電率 ϵ_r^* とその実部 ϵ_r' 、虚部 ϵ_r'' および緩和時間 τ である。また、 ϵ_s と ϵ_∞ はそれぞれ $\omega \rightarrow 0$ と $\omega \rightarrow \infty$ における、 ϵ_r' の極限值である。このフィ

ッティングによりそれぞれの測定データの τ , ϵ_r' , ϵ_r'' を算出することができる。

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (4)$$

$$\epsilon_r^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (5)$$

また、吸収体なしの Mirror Chamber での顕著なインピーダンスピーク[6]である、140 MHz、260 MHz、400 MHzでの $\tan \delta (\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r')$ を計算し、室温 25 °Cでの値で規格化したものが Fig. 8 である。140 MHz では 25 °Cから 83 °C への温度上昇で約 30 % 低下するが、260 MHz では 20 %、400 MHz では約 50 % 大きくなった。140 MHz での $\tan \delta$ のみ 30 %程度低下した。

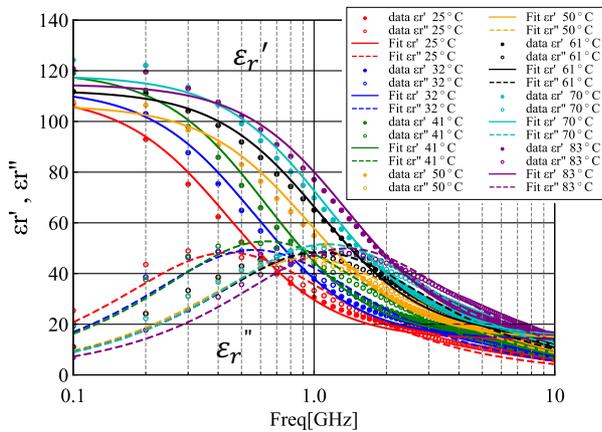


Figure 7: Permittivity of SiC at 25 °C to 83 °C.

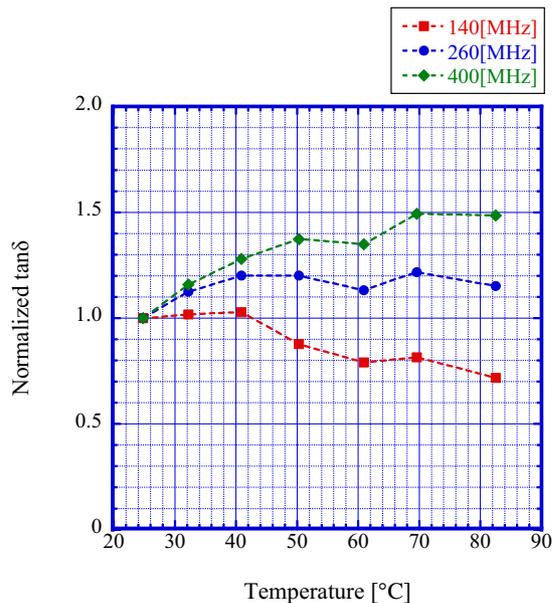


Figure 8: Normalized $\tan \delta$ of SiC by value of 25 °C (red: 140 MHz, blue: 260 MHz, green: 400 MHz).

4.2 フェライトコアの比透磁率の温度特性

1 ポートで 5 W 発熱時のフェライトコアの温度上昇は

16 °Cの実験結果を得たが、予期せずこれを超えてしまう温度上昇があっても電磁場を吸収できるかを調べるために比透磁率の温度特性を測定した。測定はベクトルネットワークアナライザで伝送・反射の特性から複素透磁率を算出する Nicolson-Rose-Weir 法[10, 12]で測定した。ただし、室温の測定とは異なりサンプルホルダを 100 °C程度までヒートアップさせるため、Fig. 9 に示すキットのための簡易恒温槽を製作した。恒温槽はアルミケース(寸法 110×160×65 mm)の内側に断熱材を貼付し、さらに内部に小アルミケース(寸法 65×100×50 mm)を格納する 2重構造とした。小アルミケースの底面は熱伝導両面テープで大アルミケースに固定した。大アルミケースの底外面には温度調節用に小型の冷却ファンを取り付けた。サンプルホルダは小アルミケース内に格納した。また、同軸ケーブルとヒーター、K 型熱電対の配線を通すために両アルミケースには直径 24 mm の貫通穴を開けた。ヒートアップのためのヒーター(定格 12 V、12 W)は大きさ 93×10 mm の細長いシート状で片面は粘着シートになっている。サンプルホルダへの糊の付着を懸念して、サンプルホルダにアルミ фоль 1 枚を巻き、その上にヒーターを巻きつけた。Figure 10 は 25 °C(室温)から 104 °Cまでの複素透磁率の測定結果である。温度上昇に伴って μ_r' , μ_r'' ともに小さくなるのがわかる。さらに、顕著な

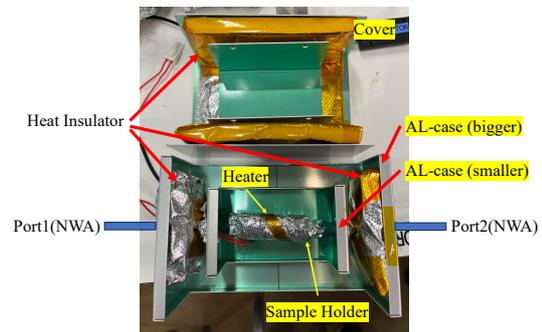


Figure 9: Constant temperature chamber.

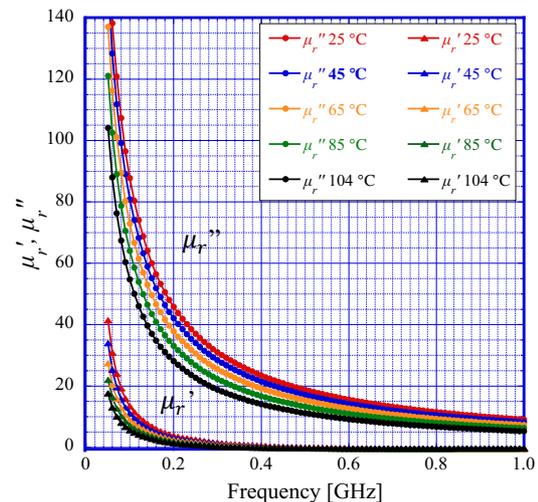


Figure 10: Ferrite permeability measured at 25 °C to 104 °C (plot in circles: μ_r'' , plot in triangles: μ_r').

Mirror Chamber のインピーダンスピークの[6]140 MHz、260 MHz での $\tan \delta$ ($\tan \delta = \mu_r'' / \mu_r'$) を室温 25°C での値で規格化したものが Fig. 10 である。400 MHz の値も計算したかったが、測定方法の誤差の問題で μ_r' が 0 より小さくなってしまったため $\tan \delta$ の値を出せなかった。140 MHz (Fig. 11 赤線)、260 MHz (Fig. 11 青線) のいずれも温度上昇に伴って $\tan \delta$ は大きくなった。140 MHz では 50%、260 MHz では 100% 程度上昇した。

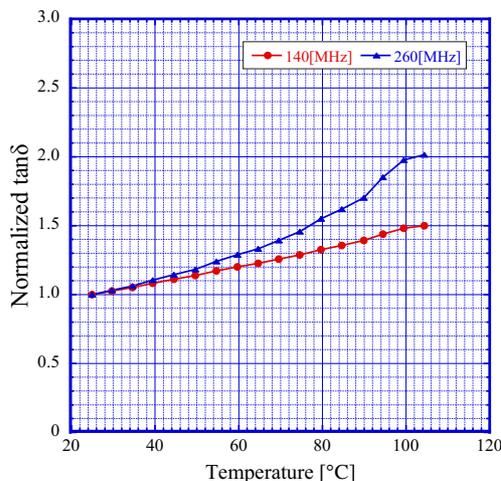


Figure 11: Normalized $\tan \delta$ of ferrite by value of 25 °C (red: 140 MHz, blue: 260 MHz).

4.3. 同軸管を用いたフェライトによる電磁場吸収の温度特性の測定

フェライトの温度が上昇した際の電磁波の吸収効果の実験的な検証実験として 22D の同軸管の中にフェライトコア 2 個を挿入し、ネットワークアナライザで透過率を測定する実験を行なった (Fig. 12)。実用的な値として信号透過率 S21 (Fig. 13) で比較した。



Figure 12: Ferrite absorption test setup.

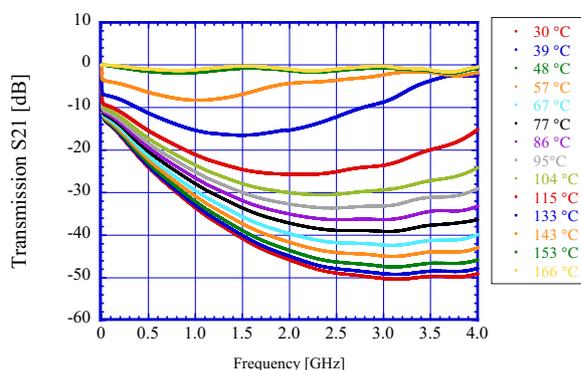


Figure 13: S21 measurement result (30-166°C).

実験の結果、温度上昇に伴って信号透過率も上がり最終的に 153 °C 程度で 0 dB になり磁性体としての効果

が無くなった。この結果からフェライトコアは 100 °C を超えても電磁波吸収体として機能することがわかった。吸収体なしの Mirror Chamber での顕著なインピーダンスピーク[6]の 140 MHz、260 MHz、400 MHz での信号透過率を温度 30°C の時の値で規格化すると (Fig. 14)、3 節で見積もった 1 ポート 5 W の発熱時のフェライトの温度 46 °C ではほぼ吸収効率が低下せず、仮に 30 °C から 100 °C まで温度上昇しても、電磁波吸収効率は 20 ~ 30% 程度しか低下しないことがわかった。

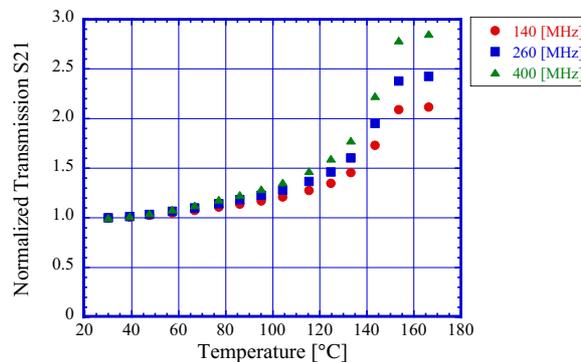


Figure 14: Normalized S21 by value of 30 °C (red: 140 MHz, blue: 260 MHz, green: 400 MHz).

5. まとめ

これまでの電磁波吸収体 (SiC およびフェライトコア) によるインピーダンス低減試験の結果[6, 7]から、実機仕様の吸収体固定シリンダを製作した。製作した実機仕様の固定シリンダを使用してインピーダンス測定を行い、最終的な結果は最大 1.2 Ω (at 112 MHz) であった。また、これまでに電磁波吸収体の温度上昇について計算で見積もったが、今回は実験によって接触熱抵抗を求めた。1 ポート 5 W の発熱時の温度上昇は SiC で 13 °C、フェライトで 16 °C の見積りを得た。さらに、SiC の誘電率とフェライトの透磁率の温度特性を測定し、温度上昇があっても電磁波吸収体として機能することを確認した。フェライトに関してはさらに、同軸管にフェライトコア 2 個を挿入した電磁波透過率の温度特性を測定する試験を行い、実験的な検証をした。これまでは、ビーム不安定性抑制の観点から大きなインピーダンスのピークを狙って対策を進めてきた。今後はインストールに向けての最終段階にあたり、実際の MR のビームの周波数成分である 50 MHz 付近までの領域のインピーダンスの実部を詳細に評価する必要があると考えている。

謝辞

Super KEKB の竹内保直氏には、SiC の誘電率測定およびフェライトの透磁率測定において、測定・解析方法に関して指導・助言をいただきました。

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, pp. 338-341.
<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, pp. 187-191.
<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, pp. 1125-1129.
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, pp. 481-485.
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, pp. 263-267.
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, pp. 560-564.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEPO/WEPO20.pdf
- [7] 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 (4)”, Proc. PASJ2023, Hunabashi (Nihon University), Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp. 282-286.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TUP0/TUP08.pdf
- [8] T. Sasaki *et al.*, “フェライトと炭化ケイ素による加速器真空容器でのビーム高周波共振への対策”, Proc. 令和5年度 KEK 技術研究会, Tsukuba, Mar. 2024, pp. 70-74.
<https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2023/2325/2325004.pdf>
- [9] Y. Hashimoto *et al.*, “Development of A profile Monitor Using OTR And Fluorescence For Injected Beams In J-PARC Main Ring(2)”, Proc. PASJ2021, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 2021, pp. 481-485.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP024.pdf
- [10] S. Terui *et al.*, “Development of ferrite higher order mode absorber for SuperKEKB vacuum system”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 1053, Aug. 2023.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900223003613>
- [11] Y. Takeuchi, “高周波窓などを例としたマイクロ波回路の設計”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’17, Sep. 2017.
- [12] A. M. Nicolson, G. F. Ross, “Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques”, IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement, IM19-4, Nov. 1970.