

フェライトと炭化珪素による 加速器真空容器でのビーム高周波共振への対策

○佐々木知依[#]、橋本義徳
高エネルギー加速器研究機構

概要

J-PARC メインリングにおける、ビーム入射時の周回ビームの診断のために、6桁のダイナミックレンジを持つ2次元ビーム形状モニターを開発中である。テストベンチの試験において、測定光学系を格納した真空チャンバーをビームが通過することを模擬した実験において有意な高周波共振が発生することが分かった。そして、この共振がビームから見たカップリングインピーダンスを増大させ、大強度ビームの不安定性を誘発することが懸念された。その対策として電磁波吸収体である炭化珪素 SiC とフェライトを挿入することで、共振を十分に低減する効果を確認した。これら吸収体を実機へ取り付けるための部品の構造設計を行うとともに高周波パワーで発熱する吸収体の除熱の検討を行った。現在は、除熱の評価のための実験を進めている。

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桁程度の広いダイナミックレンジを持つ2次元ビーム形状モニター[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号機はビームに対してのカップリングインピーダンスが $|Z/n|$ で最大 3.7 Ω (at 140 MHz) あり、リングを周回する大強度陽子ビームに不安定性を誘発することが懸念された。その抑制の観点から 1 Ω 以下に可能な限り小さくすることが求められた。これは、Mirror Chamber と称する真空容器内の光測定のための金属製ミラーユニットの構造が、ビームの電磁場によって高周波共振を起こすことで発生する。そこで、電磁波吸収体として電場を吸収する炭化珪素 (SiC) ブロックと磁場を吸収するフェライトコアを Mirror Chamber 内に挿入することで、 $|Z/n|$ が最も大きいところでも 0.8 Ω まで低減することに成功した[6, 7]。

しかし、これらの吸収体は高周波パワーによって発熱する。発熱を大気側に伝熱し、放熱できることの検証が次の課題となった。まず、吸収体と固定治具を簡単なモデルにして計算した。私たちの使用するフェライトの場合は、フェライトと固定治具の接触熱抵抗を小さくする必要があり、柔らかい純粋なアルミのシートを間に挟むことが有効であると考えられた。

現在は、この温度上昇についてフェライトの熱伝導率の測定や、アルミシートとの接触熱抵抗の評価などの実験を進めている。電磁波吸収体は本番では真空中で使用するため、真空容器内で熱伝導率の測定が可能な実験装置をハンドメイドで製作し、これらの評価試験を行っている。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である Mirror Chamber

(図1)は W700×D700×H1250 mm の寸法で、厚さ 30 mm の SUS316L 製の角形真空容器である。その内部に光測定のための Offner 光学系[1, 2]が格納されている。光学系は、直径 345 mm の凹面鏡 2 枚と直径 200 mm の凸面鏡 1 枚で構成され、固定のためのフレームに収められている (Mirror Unit)。また、Mirror Chamber は両側面にそれぞれ 6 箇所 ICF253 フランジのサービスポートがある。

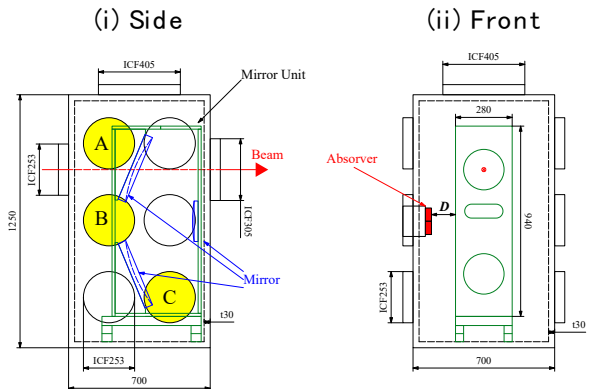


図1. Mirror Chamber の構造. (i) 側面, (ii) 正面

2.2 最適な吸収体セットとインピーダンス測定結果

2022年から2023年にかけてインピーダンスを低減する試験を行った。その結果、表1の組み合わせでフェライトと SiC を挿入することでインピーダンスを大きく低減でき、最も大きいインピーダンスのピークを 0.8 Ω (at 110 MHz) まで小さくすることに成功した[6]。図2は使用した吸収体セットで、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) がつき、その終端のアルミ板 (直径 150 mm、t10 mm) に吸収体であるフェライトまたは SiC をボルトで固定した構造になっている。Ferrite-Set (図2 (i)) は TDK 製 HF70 のトロイダルコア (組成 Ni-Zn、外径 16 mm、内径 9 mm、高さ 28 mm) を 49 個格子状に並べたものである。SiC-Set (図2 (ii)) はクアーズテック製の SERASIC-B ブロック (W65×D65×H30 mm、底面は Ra 0.8 μm に研磨) を 4 個格子状に並べたものである。

なお、表1のPort A、B、Cは図1のサービスポートA、B、Cに対応する。

表1. 挿入する吸収体セットの組み合わせ

Service Port	Absorber	D [mm]
Port A	Ferrite (49 pcs)	86
Port B	SiC (4 pcs)	28
Port C	Ferrite (49 pcs)	26

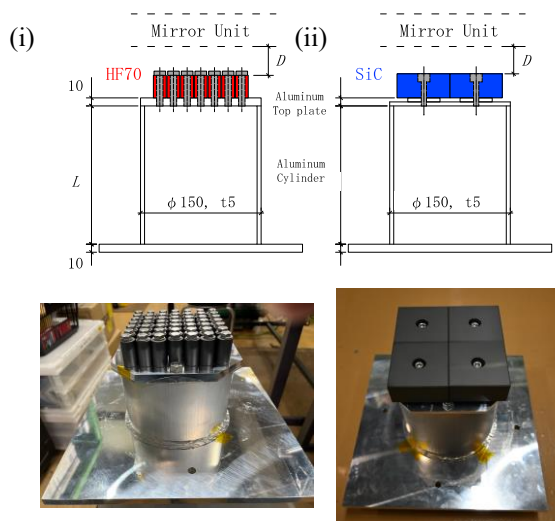


図2. 吸収体セット. (i) Ferrite-set, (ii) SiC-set

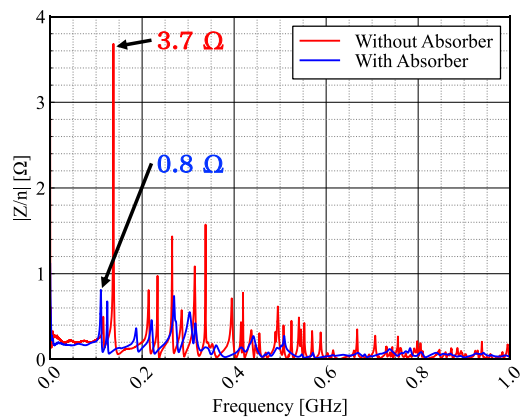


図3. 吸収体によるインピーダンスの低減

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

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。特に今回採用したフェライトのキュリー温度は100°Cであるため、それよりも低い温度に抑える必要がある。シミュレーション結果[5]からは、6ポートの吸収体全体で最大11W程度の高周波パワーが吸収されると計算されている。仮にその1/2程度に相当する5Wが一つのportの吸収体セットに入熱する場合

を想定して発熱温度を計算した(図4)。Ferrite-Setでは168°Cになり(図4(i)紫実線)、キュリー点を超えてしまう結果になった。これは、フェライトの熱伝導率が低い(1 W/(mK):カタログ値)こと、接触面が粗い(実測: Ra 21 μm)ためフェライトと治具の接触部で熱抵抗が生じてしまうことが原因だった。そこで、接触部に柔らかい純アルミニウムのシート(ビッカース硬度 Hv=19、厚み 106 μm)を挟み、熱抵抗を減ずることを考えた。その結果、キュリー点より十分低い64°Cまでフェライトの温度を下げる事ができる計算結果を得た(図4(i)赤実線)。なお、SiC-Setに関しては熱伝導率が170 W/(mK)と大きく、Ra 0.8 μm程度まで表面が研磨されていたため、接触による熱抵抗を考慮しても温度上昇は極めて小さく、問題なかった(図4(ii)) [7]。

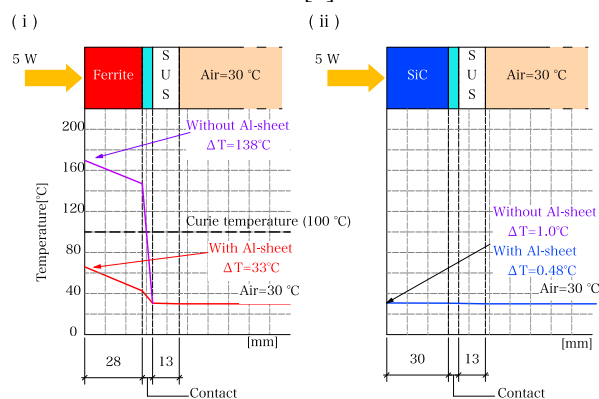


図4. 温度計算結果. (i) Ferrite-set, (ii) SiC-set

3.2 熱伝導率測定装置の構造

真空中でのアルミシートとフェライトの接触熱抵抗を詳細に評価するために、真空中で熱伝導率を測定する装置をハンドメイドで製作し、測定を進めている。



図5. 熱伝導率測定装置の外観

図5は測定装置の外観である。上下に2つのICF203ポート、横に4つのICF70ポートを持つ6方向クロス真空容器を試料室とした。横のICF70ポートは真空ポンプ(榎山工業製ルーツポンプ、Neo Dry 15G、排気速度 250 L/s)、22ピンフィードスルー、コンパクト真空計(Granville Phillips製、Seric375)に使用した。余る1つはブランクフランジで塞いだ。真空容器には、図7に示す構成の試験体を格納した。試

験体は、ヒーター（坂口電熱製セラミックヒーター、MS-3、寸法10×10mm、定格40V/40W）、熱流センサー2枚（江藤電機製、M55B、寸法50×50×0.7mm）、測定対象の試料、熱伝導シート（タイカ製、λ GEL COH-4000）、試料と熱流計を挟むためのアルミ板2枚、冷却ファン（Deep Cool Industries 製、AK400、CPUファンを流用）、データロガー（横河電機製、GP-10）、DC電源2台（ヒーター用：15V/0.4Aで使用、冷却ファン用：12V/1Aで使用）から構成されている。試験体上部のアルミ板と締め付けのためのボルトは、熱絶縁のため熱伝導率の低いガラスエポキシ（FR-4）の板を挟んで直接触れないようにした。熱流センサーM55B（図内HFM1、HFM2）は熱流に対する電圧出力（正極、陰極）、内蔵されているT型熱電対の電圧出力（正極、陰極）の計4本の配線が必要である。熱流センサー2枚で8本の配線に加えてヒーターに電圧を印加するための配線2本を、フィードスルーを通して大気側のデータロガーおよびDC電源と接続した。また、試験体下部のアルミ板がICF203アルミブランクフランジに熱伝導シートを介して接触することにより試験体上部のヒーターからの熱流を大気側に伝熱し、冷却ファンによって放熱させる構造をとった。この構造によって、熱流の定常状態を作ることができる。

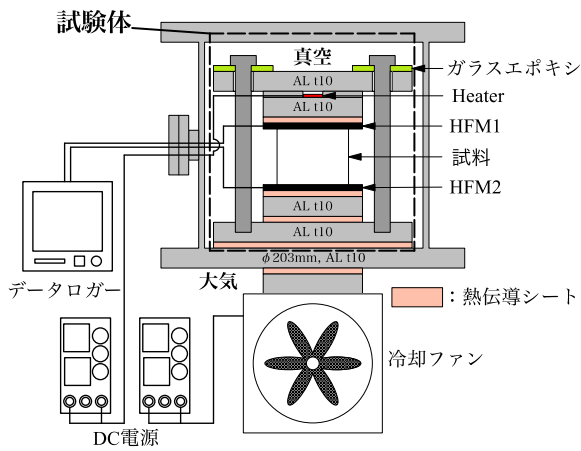


図6. セットアップの模式図

3.3 熱伝導率の計算方法

まず、通過熱量 Q [W] を求める。熱流センサーの出力電圧 V [V]、感度係数 C [mV/W/m²]、面積 S_{sensor} [m²] とすれば式(1)となる。

$$Q = \frac{V}{C} S_{sensor} \quad (1)$$

次に、熱抵抗 R [K/W] を求める。試料上部の温度（図5、HFM1の温度）を T_{High} [°C]、下部の温度（図5、HFM2の温度）を T_{Low} [°C] とすれば式(2)となる。

$$R = \frac{T_{High} - T_{Low}}{Q} \quad (2)$$

最後に熱伝導率 λ [W/(mK)] は試料の長さ L [m]、接触

面積を S_{sample} [m²] として、式(3)となる。

$$\lambda = \frac{L}{R S_{sample}} \quad (3)$$

実際の測定では、熱流が定常になるまでにおよそ2, 3時間程度待つ必要があった。

3.4 実験の条件

柔らかいアルミシートによってフェライト底面の粗さに起因する接触熱抵抗を低減できるかを評価するため、図7のように熱流計とフェライトの間にアルミシートを挟むセットアップとした。接触圧が高いほど熱抵抗が小さくなり、熱伝導率は大きくなると予想したので、2から500cNmの7パターンの締め付けトルクで測定を行った。また、解析の際には締め付けトルクを圧力 P [Pa] に換算した。換算式は式(4)を用いた。ただし、締め付けトルク T [Nm]、ねじ定数 k 、ボルトの呼び径 d [m] であり、ねじ定数 k は0.2を使用した。

$$P = \frac{T}{kdS_{sample}} \quad (4)$$

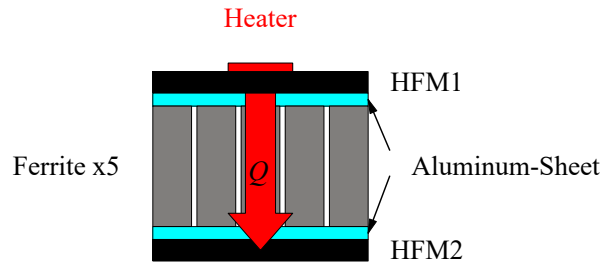


図7. 試験体のセットアップ

3.5 実験結果

測定結果を図8に示す。

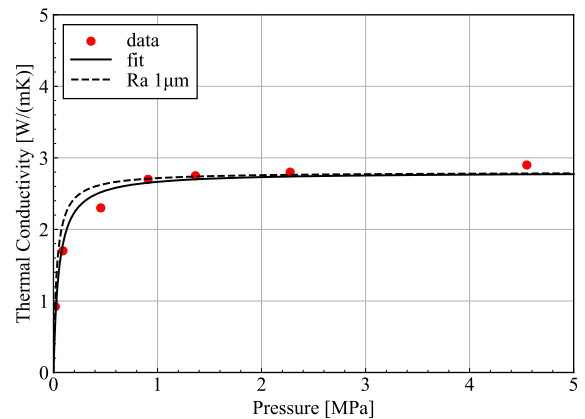


図8. フェライト5本での熱伝導率測定結果. 赤点:測定データ, 黒実線:式(10)によるフィット, 黒点線:表面粗さ1μmとしたときの式(10)の曲線

横軸が接触圧（ボルトの締め付けトルクから換算）、縦軸が熱伝導率である。接触圧が低いところでは熱伝導率が低く、接触圧を大きくしていくと急激に立ち上がり接触圧 3 MPa 以上になると、熱伝導率 2.8 W/(mK) で一定となる曲線になった。この熱伝導率 2.8 W/(mK) を使用して、フェライトコアの温度を再計算した。アルミシートありの場合で温度上昇値は 23 °C となり、このときフェライト先端温度が 53 °C（図9 赤実線）まで下がる。一方、アルミシート無しでも温度上昇値は 37 °C で、フェライト先端温度は 67 °C（図9 紫実線）に抑えられる結果となった。

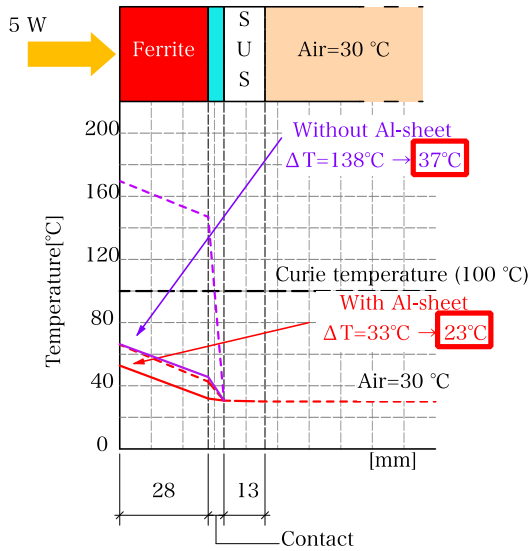


図9. Ferrite-Set の温度上昇の再計算結果

また、特徴的な曲線だったためフィッティングを試みた。上部熱流センサー（図7 “HFM1”）から下部熱流センサー（図7 “HFM2”）の間の熱抵抗 R は個々の直列接続の熱抵抗の和なので、式(5)で表すことができる。

$$R = 2R_{AL-Ferrite} + R_{Ferrite} \quad (5)$$

$R_{AL-Ferrite}$ [K/W] はアルミシートとフェライトの接触部熱抵抗、 $R_{Ferrite}$ [K/W] はフェライト単体での熱抵抗である。熱伝導率 λ_1 [W/(mK)]、表面粗さ δ_1 [μm] を持った物体 1 と熱伝導率 λ_2 [W/(mK)]、表面粗さ δ_2 [μm] を持った物体 2 の接触熱抵抗 $R_{contact}$ [K/W] は、接触圧力 P [MPa]、柔らかい方の物体のビッカース硬度を H 、接触面積を $S_{contact}$ [m²] として、式(6)で表される[8]。

$$\frac{1}{R_{contact}} = \frac{9.70 \times 10^3 P}{4 \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{H \lambda_1 + \lambda_2} S_{contact} \quad (6)$$

ここで、式(3)と式(5)から熱伝導率 λ [W/(mK)] は式(8)のように整理できる。

$$\lambda = \frac{L}{(R_{HFM} + 2R_{AL-Ferrite} + R_{Ferrite}) S_{sample}} \quad (8)$$

また、熱伝導率 λ [W/(mK)] と長さ L [m] の物体の熱抵抗 R [K/W] は式(9)で求めることができる。

$$R = \frac{L}{\lambda S_{sample}} \quad (9)$$

さらに、式(8)の接触熱抵抗 $R_{AL-Ferrite}$ [K/W] に式(6)、熱抵抗 $R_{Ferrite}$ [K/W] に式(9)を適用すると式(10)のように整理できる。式(10)をフィットする関数とし、各パラメーターを表2のように設定してフィッティングを行った。

$$\lambda = \frac{L}{2 \left(\frac{9.70 \times 10^3 P}{4 \sqrt{\delta_{AL}^2 + \delta_{Ferrite}^2}} \frac{\lambda_{AL} \lambda_{Ferrite}}{H \lambda_{AL} + \lambda_{Ferrite}} \right)^{-1} + \frac{L}{\lambda_{Ferrite}}} \quad (10)$$

表2. フィッティングのパラメーター

変数	設定
アルミシートの表面粗さ δ_{AL} [mm]	フィットの変数とした。
フェライトの表面粗さ $\delta_{Ferrite}$ [mm]	実測値 21 mm に固定。
接触圧 P [Pa]	横軸
ビッカース硬度 Hv	実測値 $Hv19$ に固定。
アルミシートの熱伝導率 λ_{AL} [W/(mK)]	データベースより 236 W/(mK) に固定。
フェライトの熱伝導率 $\lambda_{Ferrite}$ [W/(mK)]	Fig. 7 で飽和した値 2.8 W/(mK) に固定。
試料の長さ L [m]	フェライトの高さ 28 mm。

フィッティングの結果、相関係数 $R=0.99$ の良好な近似ができた（図8 黒実線）。ただ、アルミシートの表面粗さに相当する δ_{AL} の最適推定値が 53.4 μm となった。アルミシートの表面粗さの測定は行っていないが、表面の光沢から大きくとも 1 μm 以下と見積もることができる[9]。そのように考えて図7の黒点線は式(10)にアルミシートの表面粗さ 1 μm を代入した曲線もプロットした。接触圧 3 MPa 以上になると熱伝導率 2.8 W/(mK) で一定となることは2つの曲線で一致する。またいずれのカーブも良い近似となっている。

細かいことを言えば、0.45 MPa の測定点が、いずれの曲線よりも少し低い位置に来た。これは試験体の5本のフェライトの高さの寸法のばらつきによる個々のフェライトの接触圧力の違いだと考えている。今後、曲線の立ち上がり部のデータを詳細に測定することや、フェライト1本での試験を行うことで評価の精度を上げたいと考えている。

4. まとめ

J-PARC MR 用の OTR と蛍光を用いた 2 次元ビー

ムプロファイルモニターでの真空容器内の構造物が持つビームとのカップリングインピーダンスは、電磁波吸収体であるフェライトと SiC を挿入することで最大 3.7 Ω あったインピーダンスを最大 0.8 Ω まで低減した。次に電磁波吸収体での高周波による発熱の除熱の検討を行い、SiC-Set では問題なく、Ferrite-Set でのフェライトと固定ジグの接触面での熱抵抗によるキュリー温度を超える温度上昇が予想された。これは、接触面に柔らかい純粋なアルミのシートを挟むことで、接触熱抵抗を減らし、温度上昇を抑えることが見込めたため、その検証実験を進めた。電磁波吸収体の実使用環境同様に真空中で熱伝導率を測定できる装置を手作りし、フェライト 5 本+アルミシートの測定を行った。おおよそ 3 MPa 以上の接触圧で熱抵抗が十分に小さくなり熱伝導率 2.8 W/(mK) が一定になる結果を得た。この結果によりポートあたり 5 W の発熱量がある場合、問題であった Ferrite-Set の温度上昇は、138°C から 23°C に抑制される結果を得た。またこの測定装置を用いて、接触圧力を変えたときの実効的熱伝導率との相関を測定し、測定点は解析的に求めたカーブとかなり良い一致を見た。

このように、熱流センサーを用いた真空仕様の熱伝導率測定装置を製作したことで、熱伝導率はもとより接触熱抵抗の評価も得ることができた。

今後は、フェライトの温度と透磁率の相関を測り、実使用環境での実効的なインピーダンスの予測を行ってみたい。またこれらの電磁波吸収体を入れたモニター装置は、今夏に J-PARC メインリングにインストールする予定である。

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/WEP0/WEP020.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, Chiba (Nihon University), Aug. 2023, pp282-286; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TUP0/TUP08.pdf
- [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] 泉メタル株式会社, “アルミの表面程度見本” <https://www.izumi-metal.co.jp/pdf/takano-surface.pdf>