

SuperKEKB 用 HOM アブソーバーの検討

DESIGN STUDY OF HOM ABSORBERS FOR SUPERKEKB

照井真司^{#A)}, 末次祐介^{A)}, 石橋拓弥^{A)}, 久松広美^{A)}, 石崎博之^{B)}
Shinji Terui^{#A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Hiromi Hisamatsu^{A)}
Hiroyuki Ishizaki^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Metal Technology Co.,Ltd

27-1-13-2 Harmony Tower, Honmachi, Nakano, Tokyo, 164-8721

Abstract

The intense higher order modes (HOM) are likely to be excited at various vacuum components owing to the short bunches and the high bunch currents as in the case of SuperKEKB. Since the intense HOM leads to the extra heating of vacuum components and might make the circulating beams unstable, the HOM absorbers are indispensable. We have just started the design study on a HOM absorber which is applicable to the antechamber-type beam pipes used in the SuperKEKB keeping the beam collimators in mind. The promising materials of HOM absorber are ferrite or SiC. The structure is optimized through the simulations about the beam impedance and the HOM absorbing properties. The secure joint of the absorber material to the base metal (copper) is found to be a key issue, especially for ferrite, and the joint tests using brazing, HIP and SPS methods are tried.

1. 初めに

KEKB のアップグレード計画は SuperKEKB 計画と呼ばれ、目標とされるルミノシティは KEBK の約 40 倍 ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) である。この高いルミノシティを実現させるために、SuperKEKB は、4.0 GeV 3.6A の陽電子ビームと 7.0 GeV 2.6A の電子ビームを蓄積させ、衝突点垂直ベータ関数を約 1/20 にすることを目標としている。

SuperKEKB のバンチ長は約 6 mm と短く、その結果、様々な真空機器では通過するバンチによって高次高周波が励起されやすい。例えば、素粒子検出器 (BELLE II) のバックグラウンドを低減するために設置されるコリメータでは、ビームの軌道から数〜十数 mm の位置まで、金属製ブロックを水平、あるいは垂直方向から近づける。そのため他の機器に比べて強い HOM が励起され、コリメータ本体や近傍の真空機器の発熱、ビーム不安定性等を誘発する可能性がある。SuperKEKB では各種真空機器で発生する HOM への対策がこれまでに重要な課題となっている。対策としては、機器を HOM が発生し難い構造にすることはもちろんであるが、機器の近傍に HOM を吸収する装置を設置するのも有効である。

我々は、コリメータ用を念頭に、コンパクトで効率が良く、また、アンテチェンバー型という特殊なビームパイプ構造に対応できる HOM 吸収装置 (アブソーバー) の検討を始めている。今回は、HOM 吸収体として従来用いられてきた SiC (炭化ケイ素) やフェライトをのろう付けや HIP (Hot Isostatic Pressing) による接合試験、シミュレータによる吸収

装置構造の最適化等の結果を報告する。

2. 材質と構造

まず KEBK で使用されていた、また SuperKEKB にて RF 空洞近くで使用する予定の HOM アブソーバーについて紹介する。

Table 1 に示すように、KEBK では HOM 吸収体として SiC とフェライトが使用されてきた。SiC では、砲弾型、タイル型、円筒型がある。タイル型と円筒型はろう付けでチェンバー内壁に付けられている。

Table 1: Comparison of SiC and Ferrite Used in the KEBK as Materials of HOM Absorber

	仕様場所	吸収特性	構造
SiC	アレス空洞 (KEKB)	磁場	砲弾型 (TE モードのみ)、円筒型、タイル型
フェライト	超伝導空洞 (KEKB)	電場・磁場	円筒型

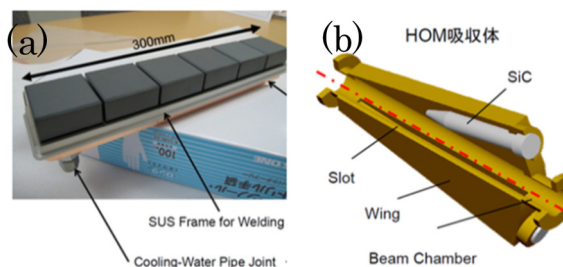


Figure 1 : Examples of (a) tile type[1] and (b) cannonball type[2] SiC blocks used in the KEBK.

[#] sterui@mail.kek.jp

Figure 1 の左側にタイル型の写真を、右側に砲弾型のイメージ図を示す。フェライトは、KEKB では円筒型のみである。

ビームから直接見える円筒型の HOM アブソーバーは、TM および TE モード両方の吸収に適しているが、ロスファクターの問題や HOM アブソーバー自体の発熱の問題があり、空洞区間のチェンバー径が大きい場所や、電流が低いダンピングリングで使用予定である。一方、砲弾型のは、構造が工夫されていて、ビームから直接見えず、ビームに悪影響を与えにくいという利点があるが、主に TE モードしかとることができない、構造的にスペースが大きく必要という欠点がある。

Figure 2 に、我々が念頭に置いている SuperKEKB で使用する水平方向コリメータの構造図を示す。可視性のため図中で可動ヘッド部分を茶色、チェンバー部分を灰色で描画している。チェンバーとヘッドの材料は主に銅である。ヘッド部が水平方向に可動できるようになっていて、その位置により、異なるモードの HOM が励起される。ここでは、主に TE モードに注目する。また、コリメータチェンバーの断面形状は SuperKEKB の標準的なアンテチェンバー付きビームパイプと同一になっている。ヘッドはアンテチェンバー部から挿入され、インピーダンスの低減に役立っている。今回開発しようとしているコリメータ用 HOM アブソーバーもアンテチェンバー付きの断面を持つ。したがって、形状的に円筒型は使用できない。ビームチャンネル径も小さいので損失も大きい。

Figure 3 に検討中の HOM アブソーバーの 3/4 モデルを示す。茶色の部分は銅、黒の部分は HOM 吸収体である。Figure 4 は HOM 吸収体だけの構造である。フェライトの大きさは、25 mm×14 mm×5 mm で、1 周に 14 個、4 列設置する。チェンバー内面にスリットを設け、その裏にある HOM 吸収体がビームからほとんど見えないようにして、ロスファクターが増えないようにした。ちなみに、この構造は SLAC の PEP-II で使用されたものからヒントを得た[4]。スリットの幅は 4 mm である。

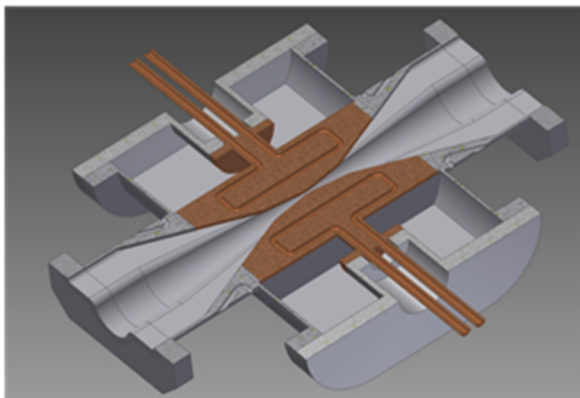


Figure 2 : Schematic drawings of a newly-designed horizontal-type beam collimator for the SuperKEKB[3].

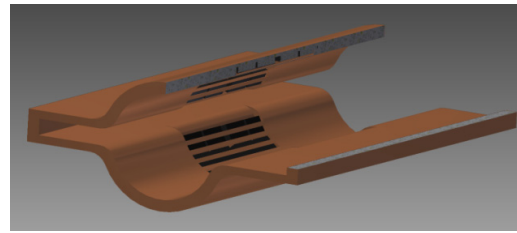


Figure 3: Schematic drawing of a chamber with HOM absorbers designed for a beam pipe with antechamber. SiC or ferrite tiles are located behind the narrow and long slots around the beam channel.

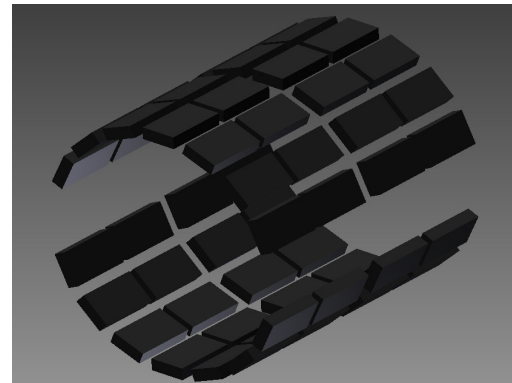


Figure 4: Configuration of SiC or ferrite tiles for the chamber in Figure 3, which will be bonded to water-cooled copper block behind them.

3. ロスファクターと S パラメータ

Figure 3 の構造を持つ HOM アブソーバについて、吸収体がフェライトと SiC の時のロスファクターと S パラメータを評価した。ロスファクターと S パラメータの計算には CST 社の Particle Studio と Microwave Studio を用いた。SiC には、コバレントマテリアル社製の CERASIC-B を、フェライトには TDK 社製の IB004 の誘電率・透磁率の値を用いた。Figure 5(a)に吸収体がフェライトの場合の、Figure 5(b)に SiC の場合のモデルを示す。フェライトをエメラルドグリーンで、SiC を黒で、真空部分を青で示す。フェライトと SiC の幅×長さは共に、16 mm × 200 mm である。フェライトの厚みは、5 mm で、SiC の厚さは 25 mm とした。これは、フェライトは電場・磁場の両方で HOM を吸収できるが、SiC は電場のみで吸収するために体積が大きくなければいけないからである。フェライトは、厚みが薄いので、アンテチェンバー部にも置くことができるので、モデルにも反映した。

このモデルでスリットの幅を、4、5、6 mm と変化させた時のロスファクターの値を Figure 6 に示す。スリットの幅が大きいとロスファクターが大きくなっていくのがわかる。

スリットの幅を 4 mm として、Figure 3 で示したフェライトモデルでのビーム進行方向のウェークポテンシャルを Figure 7(a)に、インピーダンスを Figure 7(b)に示す。ウェークポテンシャルからは、

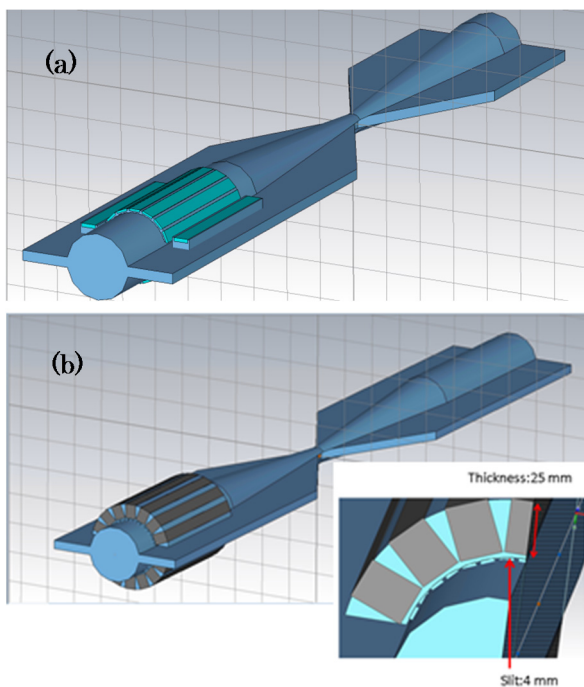


Figure 5: Simulation model of a collimator combined with HOM absorber with (a) ferrite tiles and (b) SiC tiles.

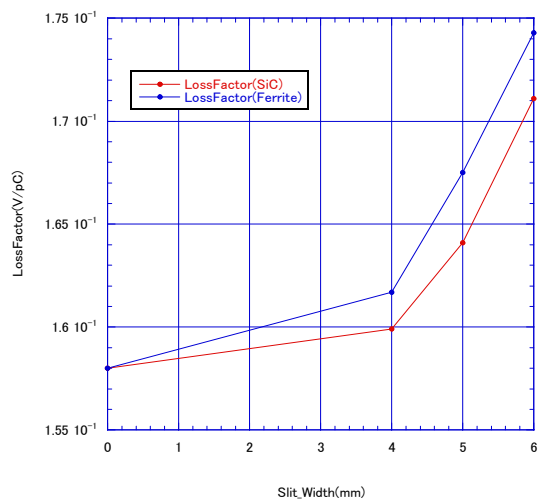


Figure 6: Loss factors of a collimator combined with HOM absorber with SiC or ferrite tiles.

捕捉モードは確認されなかった。インピーダンスからは、小さな捕捉モードが確認されるが、この程度であれば HOM アブソーバーで吸収され、ビーム不安定性を増大するようなことにはならないと考えられる。

Figure 8(a)~(c)に、ビームパイプ内に励起された 3 種類のモードに対する、フェライトモデルと SiC モデルでの S21 を示す (TE モードのときは E-field、TM モードのときは H-field を示している)。図中に示されているカットオフ周波数は、φ90 のアンテナチャンバーでの値である。Figure 8(a)は、アンテナ

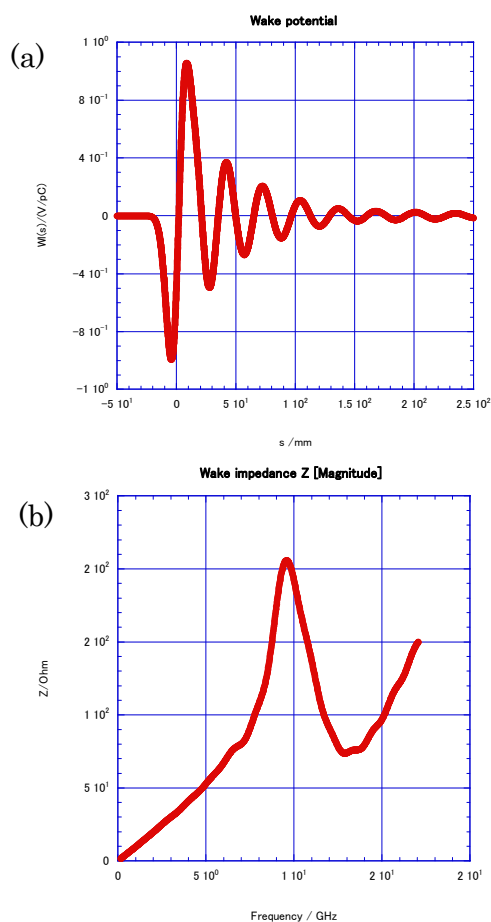


Figure 7: (a) Longitudinal wake potential and (b) longitudinal impedance of a collimator combined with HOM absorber with ferrite tiles.

チャンバー部に電場が集中する低次のモードであり、アンテナチャンバー部にはフェライトモデルのみ吸収体があるので、SiC モデルとの差が歴然と出ている。Figure 8(b)は、φ90 のビームチャンネル部に電場が集中する TE01 モードである。この場合でも、フェライトモデルのほうが高周波領域の吸収が良いことがわかる。Figure 8(c)は TM01 モードであり、フェライトおよび SiC ともに高周波をほとんど吸収しない。S パラメータの比較結果から、SiC モデルよりもフェライトモデルが優れていることがわかる。

4. フェライトの接合試験

前章の S パラメータの比較では、フェライトモデルが優位であるという結論になった。しかし、実際の加速器で使用する際には、この簡単な比較だけでは決められない。まず、SiC はガス放出率が低い。また、SiC は熱伝導率も良く、冷却しやすい[5]。一方、フェライトでは、熱負荷の影響からクラックが入り、フィールドエミッションの原因になる可能性がある。そして、フェライトを使用する場合の最大の問題は、ベース金属(すなわちチャンバー材料である銅)との接合である。現在のところ、短バンチ、大電流加速器で使用予定の大きさの板状のフェライト

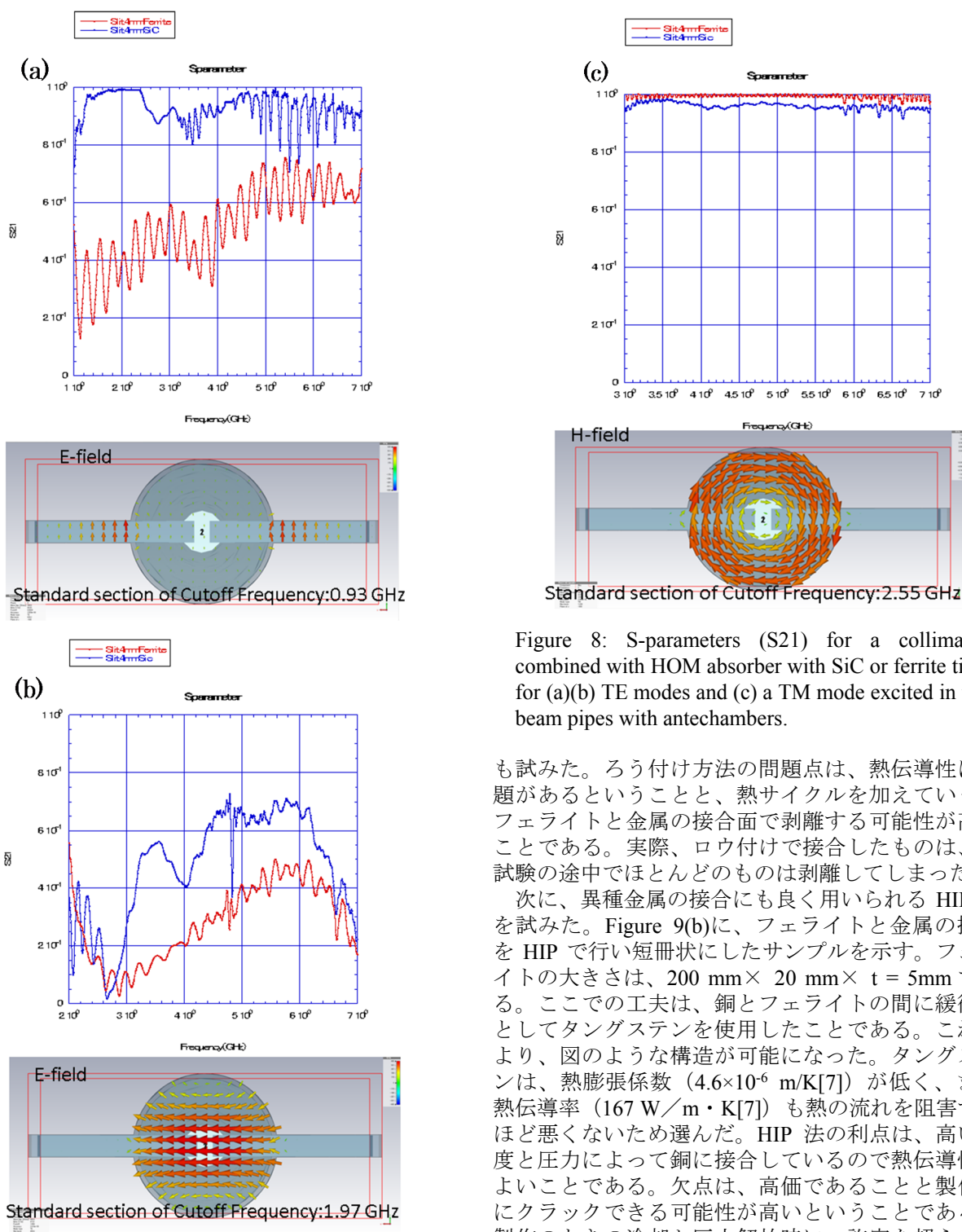


Figure 8: S-parameters (S21) for a collimator combined with HOM absorber with SiC or ferrite tiles for (a)(b) TE modes and (c) a TM mode excited in the beam pipes with antechambers.

も試みた。ろう付け方法の問題点は、熱伝導性に問題があるということと、熱サイクルを加えていくとフェライトと金属の接合面で剥離する可能性が高いことである。実際、ろう付けで接合したものは、熱試験の途中でほとんどのものは剥離してしまった。

次に、異種金属の接合にも良く用いられる HIP 法を試みた。Figure 9(b)に、フェライトと金属の接合を HIP で行い短冊状にしたサンプルを示す。フェライトの大きさは、 $200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times t = 5 \text{ mm}$ である。ここでの工夫は、銅とフェライトの間に緩衝材としてタングステンを使用したことである。これにより、図のような構造が可能になった。タングステンは、熱膨張係数 ($4.6 \times 10^{-6} \text{ m/K}$ [7]) が低く、また、熱伝導率 ($167 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ [7]) も熱の流れを阻害するほど悪くないため選んだ。HIP 法の利点は、高い温度と圧力によって銅に接合しているため熱伝導性がよいことである。欠点は、高価であることと製作時にクラックできる可能性が高いということである。製作のときの冷却か圧力解放時に、許容を超える応力がかかるためと推測される。

次に、SPS (Spark Plasma Sintering) 法を使った接合について試してみた。フェライトの大きさは $\phi 30 \text{ mm} \times t = 5 \text{ mm}$ である。Figure 10 (a)は、緩衝材として厚み 1 mm のタングステンを使用したものである。Figure 10(b)は、緩衝材として厚み 6 mm の銅タングステンを使用したものである。この厚みは、解析ソフト ANSYS で、計算してできるだけフェライトにかかる最大主応力が大きくならないように選んでも

と金属との接合には、成功例が少ない。そこで、フェライトと銅とを確実に接合する方法を検討した。

最初に、コーネル大学で行われているようなろう付けを試みた [6]。Figure 9(a)は、フェライトを銅にろう付けしたサンプルである。フェライトと銅の間にニオブ箔を入れることで、ろう材の凝縮を防いで、銀ろう付けを可能にした。また、SiC の接合で実績のある、ベース金属に多数のスリットを入れる方法

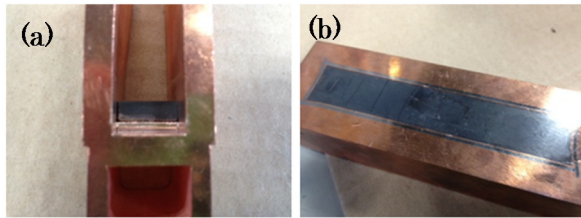


Figure 9 : Sample pieces for testing the joint between ferrite and copper block using (a) brazing and (b) HIP.

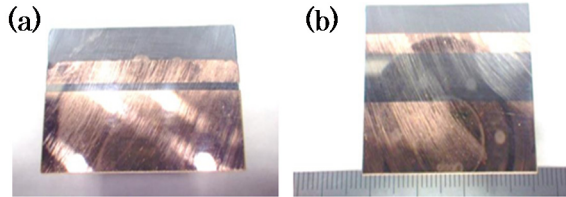


Figure 10 : Cut samples for testing the joint between ferrite and copper block by using SPS method, where (a) tungsten and (b) copper-tungsten ally are used as a buffer material to mitigate the thermal expansion.

のである。また、Figure 11 は、フェライトと銅の粉末を混ぜてグラデーションを付けるという、新しい発想に基づくものである。フェライト 100 %のものの厚さが 5 mm で、フェライトと銅の比が 80 % : 20 %、60 % : 40 %、40 % : 60 %、20 % : 80 %の層をそれぞれ厚さ 1 mm つくり、銅 100 %のものに接合した。このグラデーションの方法の利点は、熱膨張からなる応力の緩和ができることと、接合境界面が明確になっていないので剥離の危険性が少ないと考えられることである。SPS でのフェライトの焼結体の密度は、 5.006 g/cm^3 であり、この値は HIP[8]での焼結体とあまり変わらなかった。

ここで述べた 3 種類の接合方法の内、現実には加速器のなかで使える可能性があるのは、現在のところ HIP と SPS である。今後さらに検討を進める予定である。

5. 結論と今後の展望

- 1) SuperKEKB のコリメータ付近で使用できる HOM アブソーバーの構造を提案した。シミュレーションを通して最適化を行った。HOM 吸収の観点からは、薄くても吸収効率の高いフェライトが SiC よりも優位であった。
- 2) フェライトを用いる際に問題となる、フェライトと金属の接合試験を行った。タイル状のフェライトの接合には、HIP と SPS が有望であることがわかった。

今後、フェライトと金属の HIP 法による接合については、クラックが入らないような緩衝材を引き続き探す。SPS 法による接合については、焼結されたフェライトの誘電率・透磁率、ガス放出、2次電子放出の測定、接合体の熱負荷試験、実寸サイズでの

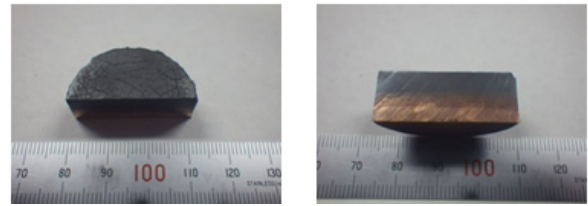


Figure 11 : Cut samples for testing the joint between ferrite and copper block by using SPS method, where the ratio of ferrite and copper is changed gradually.

接合試験を予定している。

最後になりましたが、HOM アブソーバーについていろいろと相談にのっていただいた、KEKB RF グループの森田氏、阿部氏、竹内氏、影山氏、古屋氏、KEKB モニターグループの飛山氏、福間氏に感謝します。

参考文献

- [1] T.Abe, "Cavity for Damping Ring", The 17th KEKB Accelerator Review Committee (2012).
- [2] Y. Suetsugu, et al. "DEVELOPMENT OF WINGED HOM DAMPER FOR MOVABLE MASK IN KEKB", Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference.
- [3] T.Ishibashi, et al. "DESIGN OF COLLIMATOR FOR SUPERKEKB POSITRON RING", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting (2013).
- [4] Stephen Weathersby, et al. "A NEW HOM WATER COOLED ABSORBER FOR THE PEP-II B-FACTORY LOW ENERGY RING", Proceedings of EPAC 2006.
- [5] T.Takeuchi "炭化珪素セラミックの高周波誘電特性".
- [6] H. Hahn, et al. "R-SQUARE IMPEDANCE OF ERL FERRITE HOM ABSORBER", Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity.
- [7] <http://www.nittan.co.jp/products/tungstentokusei.html>
- [8] Tsuyoshi Tajima "Development of Higher-order-mode (HOM) Absorbers for KEKB Superconducting Cavities".