

## SuperKEKB のための HOM 吸収体の開発

### DEVELOPMENT OF HOM ABSORBERS FOR SuperKEKB

照井真司<sup>1</sup>, 石橋拓弥<sup>1</sup>, 末次祐介<sup>#1</sup>, 竹内保直<sup>1</sup>, 渡邊謙<sup>1</sup>, 石崎博之<sup>2</sup>, 木村惇郎<sup>2</sup>, 澤島孝博<sup>2</sup>  
Terui Shinji<sup>1</sup>, Takuya Ishibashi<sup>1</sup>, Yusuke Suetsugu<sup>#1</sup>, Yasunao Takeuchi<sup>1</sup>, Ken Watanabe<sup>1</sup>, Hiroyuki Ishizaki<sup>2</sup>,  
Atsuro Kimura<sup>2</sup>, Takahiro Sawahata<sup>2</sup>

<sup>1</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
Metal Technology Co. Ltd. (MTC)

#### Abstract

Higher-order modes (HOM) absorbers are indispensable components for recent high-power accelerators to prevent beam instabilities or overheating of vacuum components. Ferrite has been found to be an excellent HOM absorber material because of its higher HOM absorbing efficiency. However, the difficulty in bonding to metals has been limiting the application to a reliable HOM absorber. We have been developing a fabrication method of ferrite-copper blocks using the spark plasma sintering (SPS) technique. Some key properties of the ferrite block, such as the RF absorbing property, and the gas desorption rate, are reported. The first test result using a high-power microwave source is also presented. Conceptual design and simulation study of HOM absorber chambers have just started.

#### 1. はじめに

SuperKEKB は、KEK つくばキャンパスにある非対称エネルギー電子-陽電子衝突型加速器である[1]。SuperKEKB では、バンチ長が約 6 mm と短く、かつ、バンチ電荷が 10 nC 以上と大きい。その結果、リングに設置された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(Higher Order Modes, HOM)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ビームコリメータでは、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[2]。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[3-5]。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ない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[5, 6]。

我々は、高周波の吸収効率の良いフェライトを HOM 吸収体とした、SuperKEKB 用 HOM 吸収チャンバーの開発を続けている[7-10]。ここでは、昨年報告したスパー

クプラズマ焼結(Spark Plasma Sintering, SPS)で製作したフェライト-銅ブロックの特性の続報として、SPS による製作方法の改良、ベーキング後のガス放出率測定、表面からの 2 次電子放出率測定、ハイパワー高周波源を使った高周波特性確認試験の結果等を紹介する。

#### 2. SPS によるフェライト-銅ブロックの製作

SPS ではフェライト粉が高温・高圧力の下で、焼結と同時に銅ブロックに接合される。SPS セットアップの概略と SPS で製作されたフェライト-銅ブロックの例を Fig. 1 に示す。SPS 時の圧力は約 10 MPa、温度は約 900°C である。約 5 Pa の真空装置内で処理される。直径 50 mm までの円筒形のフェライト-銅ブロックの製作に成功している。低パワーの RF 源を用いた吸収特性の測定では期待通りの結果が得られている[8, 9]。しかし、量産を行うには未だ不安定な要素があった。例えば、同じ条件での SPS にも関わらず、フェライト-銅ブロックを銅基盤にろう付けする際、フェライト表面にクラックが入ったり、あるいは、フェライトと銅が剥離したりするブロックがあった。

そこで、生産性を上げるために SPS 工程の見直しを行った。まず、SPS 時の昇温、降温速度を遅くした。遅くすることで、温度がより均等になり、また、フェライトからのガス抜きが進む。次に、焼結に用いるグラファイト製の型や治具に傷や変形の無いものを使用するようにした。繰り返し使用しているうちに、摩耗したり、放電で一部破損したりすることがわかったためである。Figure 2 に長期間使用していたグラファイト製の型の例を示す。内部が変色し、また、傷が入っているのがわかる。これらの改善により、クラック等について歩留まりはかなり向上した。この他、SPS 前にフェライト粉を窒素雰囲気中でベーキングすることで SPS 中のガス放出を低減できることもわかった。

#### 3. ベーキング後のガス放出率

以前ベーキング前のフェライトからのガス放出率を測定し、排気開始約 100 時間後に約  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  であることを報告した[9]。今回、200°C で 24 時間ベーキン

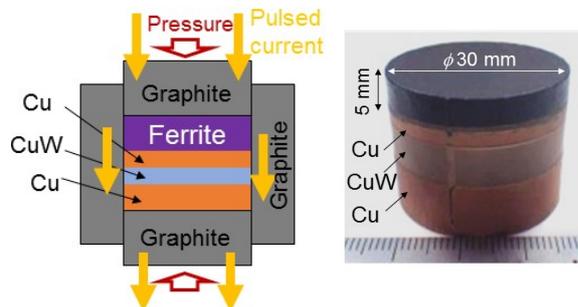


Figure 1: Schematic of SPS setup and a typical ferrite-copper block with a diameter of 30 mm.

# yusuke.suetsugu@kek.jp

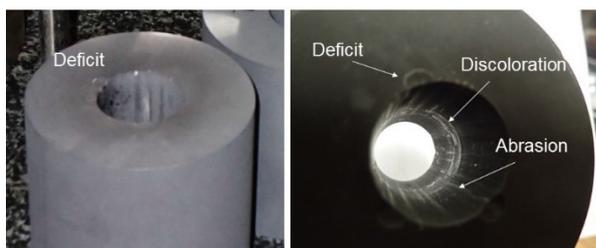


Figure 2: Worn-out graphite die for the SPS.

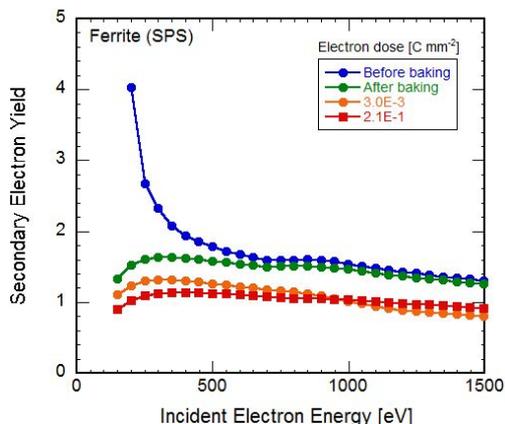


Figure 3: SEY from the ferrite surface as a function of the primary electron energy for different electron doses.

げた後のガス放出率を測定した。測定には直径 40 mm の SPS で製作したフェライト-銅ブロック 2 個を使用した。フェライト部の厚みは 5 mm である。銅からのガス放出を無視して、ガス放出率は  $1 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  と、ベーキングしない場合の約 1/10 となった。ベーキング後もフェライトやフェライトと銅との接合部に異常は生じなかった。実機ではベーキング作業は不可欠となる。

#### 4. フェライト表面からの二次電子放出率

フェライトがビームチャンネル部近傍に配置される場合を考え、陽子、陽電子リングで観測される電子雲不安定性[11]への影響を調べるために、フェライト表面からの二次電子放出率を測定した。Figure 3 に、入射電子エネルギーに対する二次電子放出率(SEY)の測定結果を示す。電子ビーム(250 eV)の照射時間(電子積分量=電子ドーズ)を変えてプロットしている。電子ビーム照射部は直径 5 mm の円形で、表面に垂直に照射された。エージングが進んだ後、最大 SEY は約 1.4 と、ビームパイプに使用されている窒化チタン(TiN)コーティング膜のそれより約 1.5 高い[12]。ビームと直面するような位置にフェライトを配置するのは避けた方が良さそうである。

#### 5. フェライト表面から電子衝撃脱離

前章と同様、フェライトがビームチャンネル表面近傍に配置される場合を考え、フェライト表面からの電子衝撃によるガス放出率を測定した。放射光が照射された場合の光刺激脱離プロセスも、その多くは電子衝撃脱離であるため、放射光照射によるガス放出を模擬したものとなる。また、上述した電子雲不安定性の原因となる電子増倍

時のガス放出特性にも関連する。

電子照射を続けている間の、電子ドーズに対するガス流量の変化を Fig. 4 に示す。主な残留気体は、水素( $m/z = 2$ )、水 ( $m/z = 18$ )、一酸化炭素( $m/z = 28$ )、二酸化炭素( $m/z = 44$ ) である。光刺激脱離で通常観測される気体成分となっている[13]。電子ドーズとともにガス放出量は単調に下がっているが、水素に対してその減少率が小さい。定量的なガス放出率の評価も含め、さらに調査が必要である。

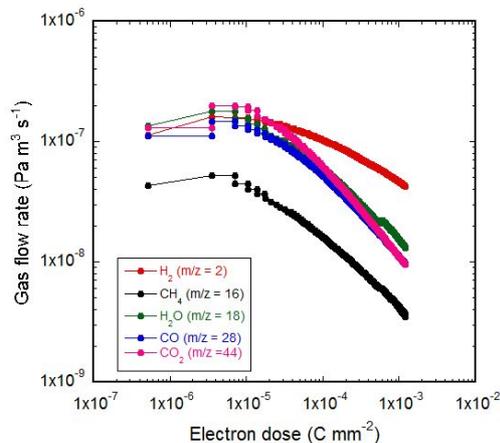


Figure 4: Gas flow rates of main gases during the electron bombardment as a function of electron dose (integrated charge density).

#### 6. ハイパワーマイクロ波源を使った高周波特性確認試験

低パワーマイクロ波源を使った試験に続き、CW ハイ

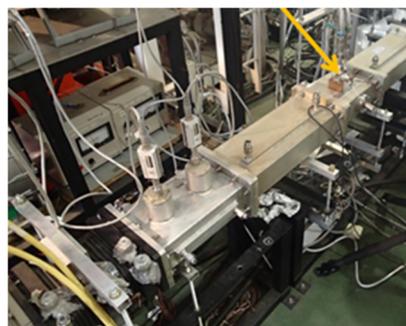
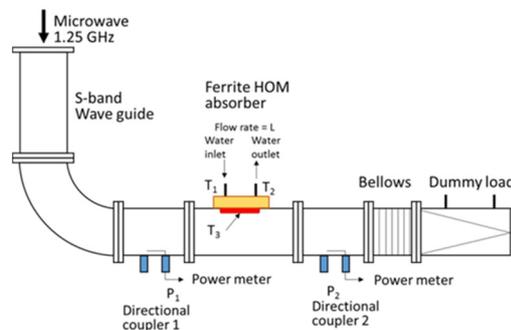


Figure 5: Schematic diagram and the photograph of the setup for high-power RF test.

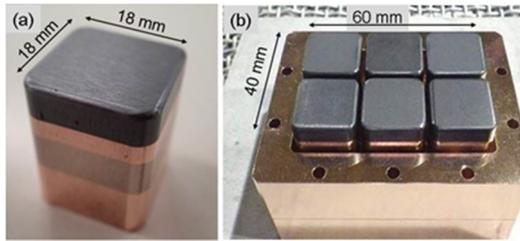


Figure 6: (a) A square ferrite-copper block machined from the cylindrical block in Fig. 1, and (b) the assembly of six ferrite-copper blocks brazed to a copper block with cooling channel (ferrite unit).

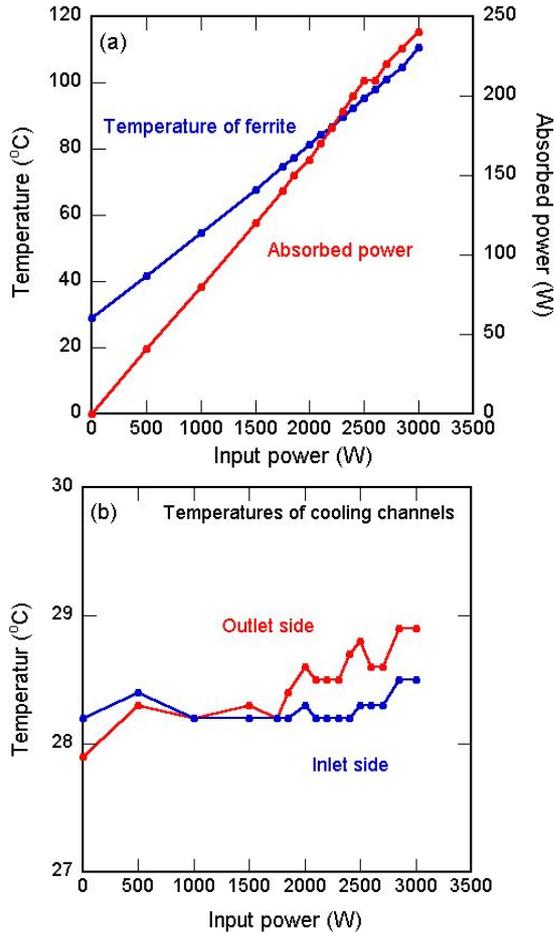


Figure 7: (a) The absorbed power and the temperature of the ferrite surface and (b) the temperatures at the inlet and outlet cooling water pipes as a function of the input RF power.

パワーマイクロ波源を使った RF 特性確認試験を行った。試験装置概略を Fig. 5 に示す。CW マイクロ波源の周波数は 1.25 GHz、出力は 2~3 kW である。試験は大気中で行われた。Figure 6 に示すような、18 mm × 18 mm 角のフェライト-銅ブロック 6 個がろう付されたフェライトユニットを導波管の E 面に取り付けた。フェライトブロックへ吸収されたパワーは、入力パワーと導波管回路終端にあるダミーロードでの吸収パワーとの差から見積もった。フェライトユニットは背後から水で冷却された。冷却水路の入口、出口温度も常時測定した。冷却水流用は約 3 L



Figure 8: Ferrite-copper block exfoliated at the contact layer between the ferrite and the copper base during the high-power RF test.

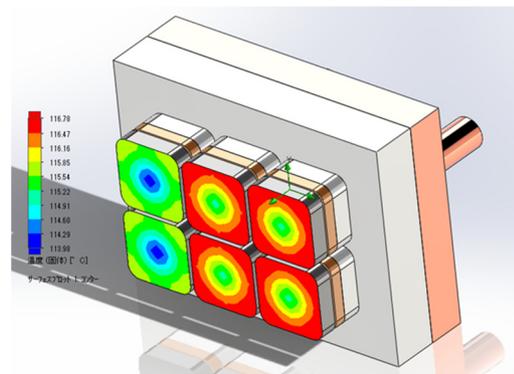


Figure 9: Thermal analysis of ferrite-copper blocks for different contact areas between the ferrite and the copper base. The ferrite blocks at left hand side have a large contact area.

min<sup>-1</sup>である。フェライトは、導波管内面から 1 mm 飛び出る位置に固定された。フェライトの表面温度は、導波管側面に開けた穴を通して放射温度計により測定した。試験中のフェライトの割れ等を検知するために、アコースティックエミッション (AE) センサーも導波管に取り付けた。

2016 年後半に行った 1 回目測定時の、吸収パワー、フェライト表面温度、冷却水路入口/出口の温度を Fig. 7 (a), (b) に示す[9]。上下の E 面に取り付けた 2 個のフェライトユニットで約 250W のパワーを吸収している。ユニットの冷却水の入口出口温度の差約 0.5°C から見積もられた吸収パワーは約 100W である。結局、フェライトブロック 1 個あたり約 20W が吸収されたことになる。フェライトブロックが HOM 吸収体として働いていることが分かった。フェライト表面の温度は約 110°C となった。これは想定よりも高く、冷却水能力を上げる必要が指摘された。

2017 年に行った 2 回目の試験でも、約 2 kW の入力に対して約 300 W の吸収を確認した。しかし、その際、6 個のフェライト-銅ブロックの内 1 個でフェライト-銅接合面が剥離した (Fig. 8)。剥離した面を観察すると、接合面の一部でのみフェライトと銅がしっかりと接合していたことが分かった。また、1 回目の試験で問題となった温度上昇を緩和するために、ユニット背面の冷却水路にフィンを設置するなど改良を施したが、その効果も明確には出な

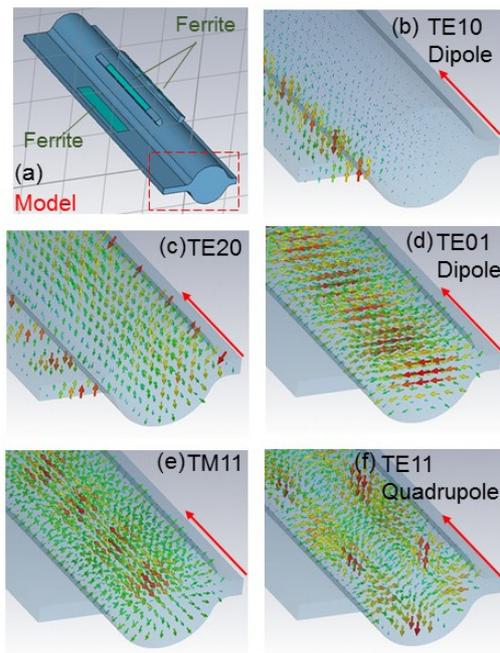


Figure 10: (a) Test model for the simulation, and (b)–(f) calculated propagation modes, where the arrows in the model pipe indicate the directions and intensities of electric fields.

かった。

今回のハイパワーRF 試験の結果から、フェライトの高周波吸収特性は確認できたものの、フェライト-銅の接合面の信頼性が改めて問われることになった。SPS プロセスの見直しで、フェライト部分のクラックや製作初期の剥離はなくなった。しかし、外観だけではフェライトと銅がどの程度接合されているかが明確には分からない。例えば、Fig. 9 は、フェライトと銅基盤との間の接触面積を変え、フェライト表面の温度を解析した例で、フェライト温度を下げるためには接触面積を増やすことが重要であることが分かった。もちろん強度的にも広い接触面積は必要である。超音波探傷や接合面間の熱伝導測定等を通して、接合具合を予め確認できる手法の確立が必要である。また、SPS 時の接合面について、これまではアマルファ処理(一種のケミカルエッチング)と呼ばれる方法で面を粗くして接着性を高めていたが、別の手法の検討も進めることにした。

## 7. HOM 吸収チャンバーの概念設計

フェライト-銅ブロックの開発と平行して、フェライトを HOM 吸収体とした HOM 吸収チャンバーの概念構造の検討を始めた。HOM 吸収チャンバーを検討するにあたり以下の条件を考えた。

- (1) 超高真空対応であること。
- (2) 最大吸収パワーとしては 1 kW を目標とする。
- (3) SuperKEKB のビームパイプに適合するため、ビームパイプと同じ断面であること。すなわち、水平面両側にアンテナチャンバーを持つ断面である。
- (4) 想定する HOM 源としては、ビームコリメータを考える。励起される HOM のモードは主に 2 極、4 極の TE

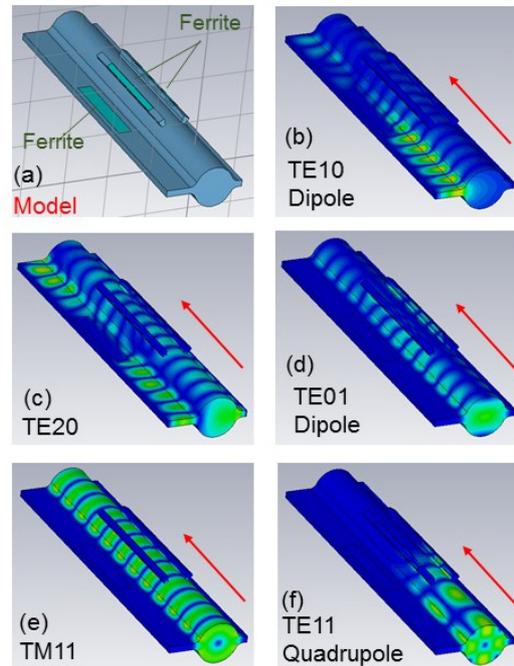


Figure 11: (a) Test model for the simulation, and (b)–(f) calculated electric-field intensities on the surface for the propagation modes shown in Fig. 10 (b)–(f).

モードであるため[5, 14]、それらのモードの吸収を第一とするが、TM モードもできるだけ吸収したい。

- (5) HOM 吸収チャンバー自体のロスファクターは、ビームコリメータと同等あるいはそれ以下にする。

Figure 10(a)に Microwave Studio(AET Inc.)で RF 特性を評価するために作成した HOM 吸収チャンバーのモデルを示す。断面は SuperKEKB の典型的なビームパイプと同じく、ビームチャンネルの直径 90 mm、アンテナチャンバーの奥行は 65 mm と 26 mm、高さは 14 mm である [15]。モデルの長さは 1200 mm である。一番低いカットオフ周波数を持つ TE10 モード(2 極モード)を吸収するためにはアンテナチャンバー内に HOM 吸収体を置く必要がある。モデルでは奥行 65 mm のアンテナチャンバー内に置いている。そして、4 極等高次の TE モードを吸収するには、ビームチャンネル部にビーム方向に長いスリットを何か所か開けることになる [14, 16]。このモデルでは、ビーム軸を中心として周方向に 60° 間隔でスロットを設けている。各スロットの幅は 10 mm、長さは 200 mm で、その奥にフェライトブロックを置いている。Figure 10(b)–(f)は、計算した伝搬モードで、それぞれ TE10 モード(2 極)、TE20 モード、TE01 モード(2 極)、TM11 モード、そして TE11 モード(4 極)である。

Figure 11(b)–(f)は、モデル入口(図中右下)から赤矢印方向に Fig. 10(b)–(f)のモードをそれぞれ伝搬させた時の、表面の電界強度分布である。周波数は 3.5 GHz である。色が明るい方が強度は強い。この図からわかるように、TE モード(a)–(d), (f)については吸収されているが、TM モード(e)は吸収されない。なお、シミュレーションでは、フェライトの複素誘電率、複素透磁率の測定結果 (Fig. 12)を基に、誘電分散、磁気分散ともに第一次のデバイズモデルを用い、誘電分散では  $\epsilon_s = 18$ 、 $\epsilon_\infty = 11$ 、平均

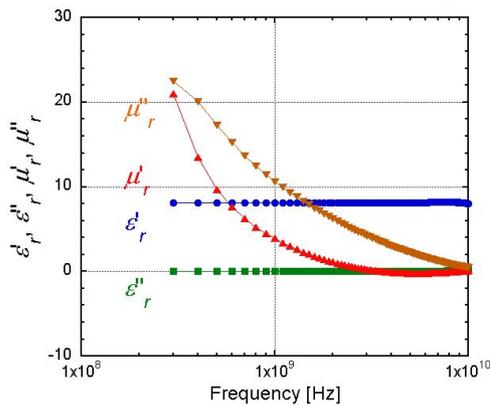


Figure 12: Measured complex dielectric constant and permeability of the ferrite block made by SPS.

緩和時間  $\tau = (2\pi \times 8 \times 10^7)^{-1}$  s、磁気分散では  $\mu_s = 38$ 、 $\mu_\infty = 1.0$ 、平均緩和時間  $\tau = (2\pi \times 2.3 \times 10^8)^{-1}$  s とした。

ロスファクターは、同じモデルを用いて、Particle Studio(AET Inc.) を用いて計算した。パンチ長 6 mm の時、ロスファクターは  $2.42 \text{ V nC}^{-1}$  と、コリメータの約 1/4 である [2]。スロット幅を 14 mm としても吸収効率はほぼ同じだが、ロスファクターが  $4.95 \text{ V nC}^{-1}$  と大きくなる。また、スロットを、周方向に  $45^\circ$  間隔で並べても、おなじく、ロスファクターが  $4.41 \text{ V nC}^{-1}$  に増えるのみである。逆に、スロットを真上、真下のみに置いた場合 ( $90^\circ$  間隔) では、ロスファクターは小さいが 4 極モードの吸収が悪くなった。

TM モードについてもいくつかのモデルで計算したが、ビームと付随するモードと同じ磁場となるため、ロスファクターを大きくせずに吸収効率を上げるのは基本的に難しい。今後さらに詳しい検討を要する。

## 8. まとめ

フェライトを吸収体とした HOM 吸収チェンバーの開発を続けている。フェライトと銅を接合したフェライトブロックの製作には SPS が最も有力で、焼結されたフェライトは所定の RF 特性を持っていることが分かった。ガス放出率はベーキング後大きく低減した。表面からの二次電子放出率は、エージング後、通常の金属と同程度となった。ハイパワーの CW マイクロ波源を用いた試験では、フェライトの HOM 吸収特性は確認できたが、フェライトと銅の接合性が不十分であることがわかった。外観だけでは接合具合はわからないため、その検査方法を今後確立する必要がある。SPS 時の接合面の処理について再検討も始めている。HOM 吸収チェンバーについては、概念設計を始めたばかりであるが、TE モードに関しては従来型のビーム方向にスロットのある形状がやはり有望である。今後は、SPS によるフェライト-銅ブロックの信頼性をさらに高め、再度ハイパワーマイクロ波源を用いた試験を行う。可能であれば真空中での試験も行う予定である。また、HOM 吸収チェンバーの具体的設計を進めていく。

## 謝辞

HOM 吸収体に関して多くの助言、協力を頂いた KEKB 加速器グループ皆様、特に高周波空洞グループの皆様に深謝致します。

## 参考文献

- [1] H. Koiso, "Commissioning Status of High Luminosity Collider Rings for SuperKEKB," Proc. IPAC'17 (2017) pp. 1275–1280.
- [2] T. Ishibashi, Y. Suetsugu, S. Terui, "Low Impedance Movable Collimators for SuperKEKB," Proc. IPAC'17 (2017) pp. 2029–2032.
- [3] Y. Suetsugu, T. Kageyama, K. Shibata, T. Sanami, NIM-PR-A, 513 (2003) 465.
- [4] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Sanami, T. Kageyama, Y. Takeuchi, Rev. Sci. Instrum., 74 (2003) 3297.
- [5] A. Novokhatski, J. Seeman, M. Sullivan, "RADIOLOCATION OF A HOM SOURCE IN THE PEP-II RINGS", Proc. EPAC'08 (2008) pp. 1664–1666.
- [6] Y. Suetsugu, T. Kageyama, Y. Takeuchi, K. Shibata, "Development of Winged HOM Damper for Movable Mask in KEKB," Proc. PAC'03 (2003) pp. 803–805.
- [7] T. Tajima *et al.*, "DEVELOPMENT OF HOM DAMPER FOR B-FACTORY (KEKB) SUPERCONDUCTING CAVITIES," Proc. PAC'95 (1995) pp. 1620–1622.
- [8] Y. Suetsugu, T. Ishibashi, S. Terui, H. Ishizaki, A. Kimura, T. Sawahata, "CHARACTERISTICS OF FERRITE-COPPER BLOCKS FABRICATED BY SPARK PLASMA SINTERING (SPS)," Proc. 13th Annual Meeting of PASJ (2016) pp. 1197–1199.
- [9] S. Terui, T. Ishibashi, Y. Suetsugu, Y. Takeuchi, K. Watanabe, H. Ishizaki, A. Kimura, T. Sawahata, "Development of HOM Absorber for SuperKEKB," Proc. IPAC'17 (2017) pp. 3394–3397.
- [10] Y. Suetsugu, T. Ishibashi, S. Terui, H. Ishizaki, A. Kimura, T. Sawahata, "FABRICATION OF FERRITE-COPPER BLOCK BY SPARK PLASMA SINTERING (SPS)," Proc. IPAC'16 (2016) pp. 3654–3656.
- [11] K. Ohmi, F. Zimmermann, Phys. Rev. Lett., 85 (2000) 3821.
- [12] K. Shibata, M. Shirai, H. Hisamatsu, Y. Suetsugu, K. Kanazawa, T. Ishibashi, S. Terui, "TiN coating and pre-baking of beam ducts for SuperKEKB," Proc. 10th Annual Meeting of PASJ (2013) pp. 1168–1172.
- [13] K. Shibata, Y. Suetsugu, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, and H. Hisamatsu, "J. Vac. Sci. Technol. A, 35 (2017) 03E106.
- [14] S. Weathersby, M. Kosovsky, N. Kurita, A. Novokhatski, J. Seeman, "A PROPOSAL FOR A NEW HOM ABSORBER IN A STRAIGHT SECTION OF THE PEP-II LOW ENERGY RING," Proceedings of PAC'05 (2005) pp. 2173–2175.
- [15] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai, S. Terui, J. Vac. Sci. Technol. A, 34 (2016) 021605.
- [16] S. Weathersby, M. Kosovsky, N. Kurita, A. Novokhatski, J. Seeman, "A NEW HOM WATER COOLED ABSORBER FOR THE PEP-II B-FACTORY LOW ENERGY RING," Proc. EPAC'06 (2006) pp.1499–1501.