

## スパークプラズマ焼結法で製作されたフェライト-銅接合ブロックの特性

### CHARACTERISTICS OF FERRITE-COPPER BLOCKS FABRICATED BY SPARK PLASMA SINTERING (SPS)

末次祐介<sup>#A)</sup>, 石橋拓弥<sup>A)</sup>, 照井真司<sup>A)</sup>, 石崎博之<sup>B)</sup>, 木村惇郎<sup>B)</sup>, 澤畠孝博<sup>B)</sup>

Yusuke Suetsugu<sup>#A)</sup>, Takuya Ishibashi<sup>A)</sup>, Shinji Terui<sup>A)</sup>, Hiroyuki Ishizaki<sup>B)</sup>, Atsurou Kimura<sup>B)</sup>, Takahiro Sawahata<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Metal Technology Co. Ltd. (MTC)

#### Abstract

Ferrite is a well-known material for effectively absorbing electromagnetic waves, and has been used in accelerators as higher-order modes (HOM) absorbers in beam pipes. However, one difficulty in using ferrite as absorbers is the poor bonding strength between a base metal, resulting in the weak mechanical strength and also the small heat transfer rate. Herein we report the fabrication of ferrite-copper block using the spark plasma sintering (SPS) technique in which the ferrite powder is directly sintered on the copper block. The ferrite-copper block fabricated via SPS can be directly brazed or welded to other desired metals or directly to the beam pipes. The ferrite has the RF properties comparable to those of the ferrite tiles in commercial.

#### 1. はじめに

高次高周波(Higher Order Modes, HOM)吸収体は、近年の高強度加速器にとって、ビーム不安定性や各種機器の発熱を抑制するために必須の機器となっている。吸収体として、SiC、フェライトやカンタル等がこれまで使用されてきた[1-3]。これらのうち、フェライトは、吸収効率が最も良い一方、線熱膨張率が小さく、また引っ張り強度が弱いいため、銅等の基盤となる金属との接合が難しいという問題があった。

我々は、SuperKEKBのビームコリメータ用にHOM吸収チェンバー(ビームパイプ)を検討・開発している[4]。検討しているチェンバーの概略構造をFigure 1に示す。チェンバーはビームチャンネルの両側にアンテチェンバーを持つ複雑な断面となっている。吸収体となる数個のフェライトは、銅チェンバーの周囲に配置される。そのため、フェライトを銅板接合したブロック(以下、フェライト-銅ブロック)を製作する必要がある。接合方法として、ろう付け、熱間等方加圧加工(Hot Isothermal Pressing, HIP)を含め様々な方法を検討してきたが、最終的にスパークプラズマ焼結(Spark Plasma Sintering, SPS)が最も有望であることが分かった。ここでは、接合方法の検討結果、およびSPSで製作したフェライト-銅ブロックの特性等を報告する。

#### 2. 接合方法の比較・検討

今回調査した接合方法の概略をFigure 2に示している。各方法の主な特徴や評価結果をTable 1にまとめている。使用したフェライトは、TDK株式会社のM8NBA(粉)あるいはIB004(焼結ブロック)である。これらはKEKBの超伝導高周波空洞のHOM吸収体として用いられている[3]。Figure 1のような銅製HOM吸収チェンバーを想定して、今回は30-50mm程度のフェライト-銅ブロックの製作を目指した。フェライトの厚みは5mm

<sup>#</sup> yusuke.suetsugu@kek.jp

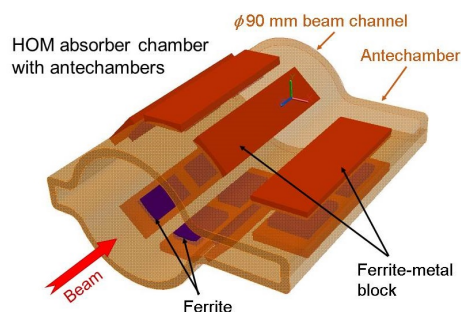


Figure 1: Concept of the HOM absorber chamber for Super KEKB.

以上を目標とした。

セラミックスを金属に接合する際によく使用されている方法はろう付けである。しかし、フェライトの場合には、活性ろうを含め様々なろう材でもその濡れ性が悪く、密着性が悪かった。温度の低いハンダ付も使用されているが、高温となり得る高パワーHOM吸収チェンバーには採用し難い。フェライトは粉でも供給できるので、ホットスプレーも可能かと考えられた。しかし、試験では、銅の基盤では厚みが0.5mm以上となるとフェライト層に亀裂が入った。また、フェライトの密度が小さい事もわかった。一方、フェライト粉を高温高圧下で焼結するHIPでは、十分な接合強度は得られたが、製作できる大きさが25mm程度に留まった。それ以上になると、カプセルからの切断工程で亀裂が生じた。また、毎回新しいカプセルを使用するので費用も高くなる。それに比べて、フェライト粉をグラファイトのコンテナに詰め、低真空環境の高温高圧下で焼結するSPSでは、十分な接合強度が得られ、費用も抑えることができる。直径30mm以上のブロックも製作可能であった。密度も市販の焼結材と同程度の約5g/cm<sup>3</sup>であった。結局、今回の調査では、このSPSが我々の目的には最適であると判断された。Figure 3には直径30mmと50mmのSPSで製作したフェライト-銅ブ

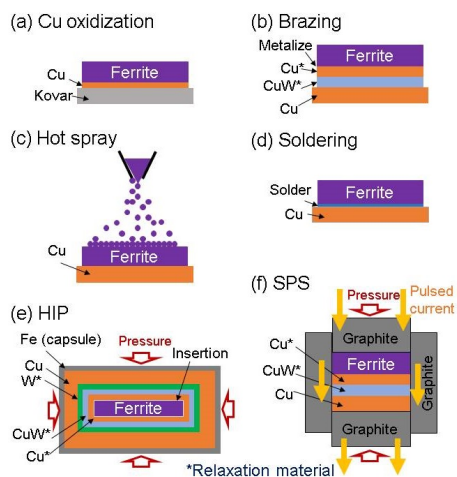


Figure 2: Schematic of several bonding methods between ferrite and copper plate.

ロックを示す。銅タンゲステン合金は応力緩和剤として挟んでいる。

Table 1: Comparison of the Bonding Methods (a)–(f) in Fig. 1, where ○: Good, ◇: Moderate and ●: Bad

Property	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Bonding strength	●	◇	●	○	○	○
Ferrite thickness	○	○	●	○	○	○
Area available	●	●	○	○	●	○
Heat transfer rate at bonding plane	●	◇	●	○	○	○
HOM absorbing	○	○	●	○	○	○
High power HOM	●	◇	●	◇	○	○
Bakable temperature	○	○	●	●	◇	○
Direct bonding to chamber	●	●	○	○	●	●
Outgassing rate	○	○	●	●	○	○
Cost	○	◇	◇	○	●	◇

### 3. SPS で焼結されたフェライトの特性

#### 3.1 接合面の熱伝達

フェライトと銅基板の接合面の熱伝達率は、フェライトをヒータで加熱し、その時の銅基板側の温度変化から実験的に見積もった。得られた値は、約  $1000 \text{ W K m}^{-2}$  と十分高いものであった。密着性が高いことを示している。

#### 3.2 ガス放出率

直径 40 mm の 2 個のフェライト-銅接合ブロックを用いて室温(25°C)での熱的ガス放出率を測定した。排気開始約 100 時間後、ガス放出率は約  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  であった。一方、市販のフェライト焼結ブロック(IB004)では、約  $1 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  と、約一桁低かった。SPS で製作されたフェライトブロックを超高真空雰囲気下で使用するには、何らかのガス放出低減が必要である。HIP で製作されたフェライトブロックについて、200°C のベーキング後ガス放出率が約一桁下がったという報告がある

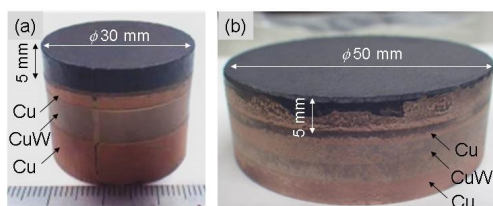


Figure 3: Ferrite-copper blocks fabricated by the SPS method, with a ferrite thickness of 5 mm and a diameter of (a) 30 mm and (b) 50 mm.

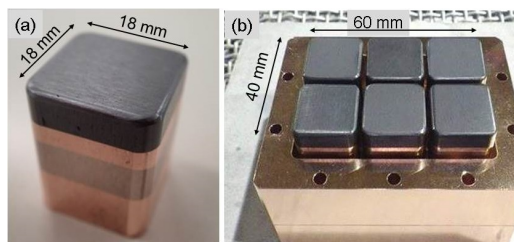


Figure 4: (a) A square ferrite-copper block machined from the cylindrical block in Fig. 3 (a), and (b) the assembly of six ferrite-copper blocks brazed to a copper block with cooling channel.

[3]. そこで、SPS で製作された  $\phi 40 \text{ mm}$  のブロック試料を  $150^\circ\text{C}$  で 24 時間ベーキングしたところ、ガス放出率は約  $5 \times 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  に下がることが分かった。

#### 3.3 フェライト-銅ブロックの銅板への接合

フェライト-銅ブロックを銅製の真空チェンバーに適用するには、ブロックを銅板に接合しなければならない。そこで、電子ビーム溶接とろう付けによって、ブロックの銅基板を銅板に接合することを試みた。その結果、どちらの方法でも問題無く接合することができた。しかし、フェライト-銅ブロックの冷却を考えると、その接合面の広さからろう付けが優れている。ただし、ろう付け時、フェライトに亀裂が入ることがあった。この問題は、ろう付け時の昇温速度や降温速度の制御、低温(約  $700^\circ\text{C}$ )ろう材の採用、焼結前のフェライト粉のベーキング等によりほぼ解決できた。Figure 4 (a) はろう付け試験に用いた、18 mm 角のフェライト-銅ブロックである。これは Figure 3 (a) の円筒ブロックから切り出したものである。また、Figure 4 (b) はこのブロックを 6 個同時にろう付けした試料である。

#### 3.4 複素誘電率と複素透磁率

複素誘電率と複素透磁率はフェライト-銅ブロックからフェライト部分を切り出した試料を用いて測定した。0.3~10 GHz 帯での結果を、市販のフェライトブロック(IB004)の測定値と一緒に Figure 5 に示している。SPS で製作されたフェライトの値は IB004 の値と同程度であった。

#### 3.5 導波管を用いた $S_{11}$ 測定

直径 50 mm のフェライト-銅ブロックを L バンド導波管の H 面に置いて、 $S_{11}$  パラメータを測定した。フェライトは短絡された最終端近くに取り付けられた。 $S_{11}$  はフェライトが無い場合に比べると 5~10 dB 低下した。この低下割合は Figure 5 の誘電率、透磁率で予想される値に近

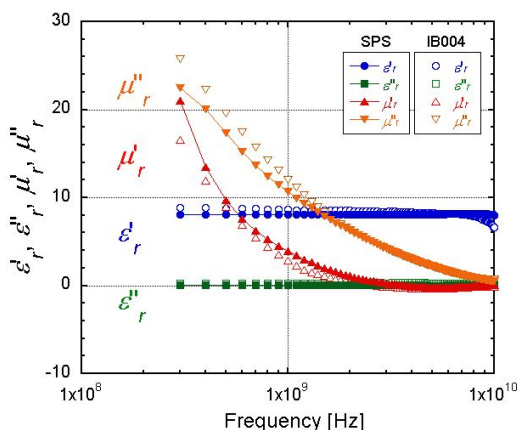


Figure 5: Complex dielectric constant and permeability of the ferrite fabricated by the SPS method (SPS) and IB004 in commercial (IB004).

かった。

### 3.6 試験空洞を用いた S<sub>21</sub> 測定

アンテチェンバーを持つ実機ビームパイプと同じ断面 (Figure 1 参照) を持つ試験空洞を製作し、S<sub>21</sub> パラメータを測定した。試験空洞を Figure 6 (a) に示す。中央のビームチャンネルの直径は 90 mm、空洞の長さは 143 mm である。測定装置を Figure 6 (b) に示す。空洞の両端はアルミ板で短絡されており、φ2.4 mm のアンテナを端板の穴から内部に挿入した。Figure 4 (b) に示した銅フェライトブロックあるいは銅板をアンテチェンバー部の上下に取り付け、フェライトの有無での変化を調べた。S<sub>21</sub> の典型的な周波数スペクトルを Figure 7 に示す。アンテチェンバー内に磁場が侵入する TE モードが強く減衰していることがわかる。一方、ビームチャンネルに電場、磁場が留まる TM モードにはフェライトの影響が見えない。Figure 8 にまとめているように、アンテチェンバー部に置かれたフェライトによる測定共鳴周波数や外部 Q 値の変化は、試験空洞と同形状モデルでの Microwave Studio によるシミュレーション結果とよく一致した。

## 4. まとめと今後の予定

SPS を使ったフェライトと銅基板との接合方法は、密着性の高いフェライト-銅ブロックを製作するのに適していることがわかった。物理的、電気的特性はこのブロックが HOM 吸収体として十分機能することを示した。今後、高パワーのマイクロ波を用いた発熱試験等を行い、SuperKEKB 用の HOM 吸収チェンバー試験機の具体

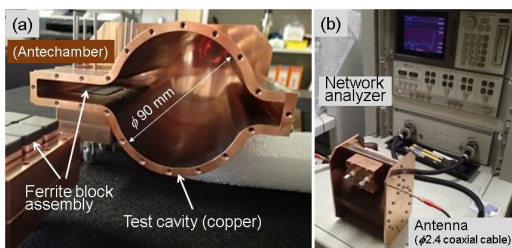


Figure 6: (a) Test cavity and (b) setup for S<sub>21</sub> measurement.

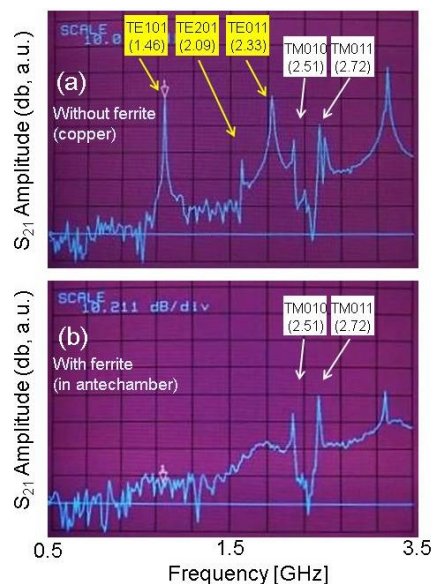


Figure 7: Frequency spectra of S<sub>21</sub> (a) without and (b) with ferrite-copper blocks at the antechamber.

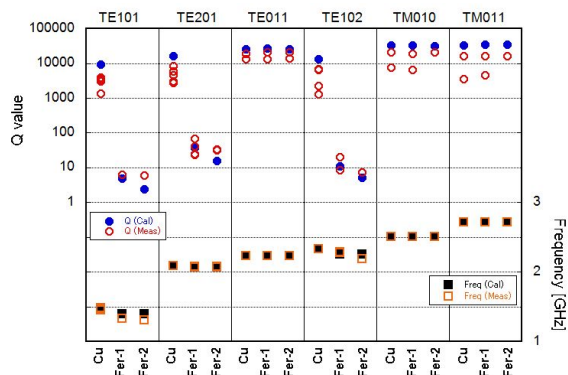


Figure 8: Measured (Meas) and calculated (Cal) external  $Q$  values and resonant frequencies for several modes. Here “Cu” means no ferrite, and “Fer-1” and “Fer-2” mean that one and two ferrite-copper blocks are attached to the antechamber, respectively.

的検討を始める予定である。

## 謝辞

本研究にあたり、KEK 加速器研究施設の影山達也氏、竹内保直氏、阿部哲郎氏、古屋貴章氏、森田欣之氏、渡邊 謙に多くの助言、協力を頂きました。ここに深謝いたします。

## 参考文献

- [1] Y. Takeuchi, T. Abe, T. Kageyama and H. Sakai, in Proc. PAC’05, pp. 1195-1197.
- [2] F. Miyahara *et al.*, in Proc. IPAC’13, pp. 2744-2746.
- [3] T. Tajima *et al.*, in Proc. PAC’97, pp. 3090-3092.
- [4] Y. Suetsugu *et al.*, “Construction status of the SuperKEKB vacuum system”, Vacuum, 121, p. 238-244, 2015.