

SiC セラミックスの高周波誘電特性を考慮した SuperKEKB 真空システム用 HOM 吸収体の設計

DESIGN OF HOM ABSORBER FOR SUPERKEKB VACUUM SYSTEMS CONSIDERING RF DIELECTRIC PROPERTIES OF SiC CERAMICS

榎本瞬^{#, A)}, 照井真司^{A)}, 竹内保直^{A)}, 石橋拓弥^{A)}, 渡邊謙^{A)}, 白井満^{A)}

Shun Enomoto^{#, A)}, Terui Shinji^{A)}, Yasunao Takeuchi^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Ken Watanabe^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)}

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

Abstract

KEK plans to develop a vacuum chamber with high order mode (HOM) absorber for the SuperKEKB vacuum systems. HOM absorber is considering the SiC ceramic block used in the ARES cavity of the KEKB. Several experiments and verifications have been conducted as design items for the HOM absorber. This report presents the brazing test of SiC ceramic and copper, the verification of joint strength by the tensile test, and the comparison of the high-power test with calculation considering RF dielectric properties of the SiC ceramics.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の SuperKEKB 加速器では、現在 phase3 の運転が順調に行われている。その中で今後ビーム電流の増加に伴い、ビーム衝突点付近では、高次モードの高周波(High Order Mode, HOM)による進行方向のビーム不安定性や真空圧力の跳ねが懸念されている。現在 KEK では、その対策として真空ペローズに置き換わる HOM 減衰器付きの真空チャンバーの開発を計画している[1]。

HOM 吸収体は、KEKB 加速器の ARES 空洞・溝付きビームパイプで用いられた実績のある炭化ケイ素ブロックと同等のものを用いることを検討している。ハイパワー試験は衝突点付近でトラップされることが予想される高周波領域で行った。本論文では HOM 吸収体の設計項目として、以下のものについて実験および検証を行った。

- SiC セラミックスと銅のろう付け
- 引張試験による接合強度の評価
- ハイパワー試験とシミュレーションの比較

2. SiC セラミックスと銅のろう付け

SiC ブロックは常圧焼結 α 型 SiC セラミックス(製品名: CERASIC-B[®])を使用した。この SiC ブロックは KEKB メインリングの ARES 空洞・溝付きビームパイプ[2]および SuperKEKB 陽電子ダンピングリング・常伝導加速空洞の HOM 導波管ロードおよび溝付きビームパイプ[3]と同様のものである。また近年では、ブロック形状ではないが超伝導空洞(SCC)用 SiC 製の HOM ダンパーの開発が行われており、同様のものが使用されている[4]。Figure 1 にマイクロ波帯域での複素比誘電率($\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$)の測定結果を上記試料の測定結果も含めて示す。それぞれ原料ロットが異なるため若干の比誘電率の違いはあるが、Al の含有量を調整することによって誘電率の調整を行っている。また今回用いた SiC ブロック(Fig. 1 の TEST)は

1 GHz で ϵ'_r が 26.5 を目標値として調整している。

SiC ブロックと銅のろう付けは、ろう材の成分・量、ろう付け温度などによって強度が変わってくる。今までアレス空洞グループでは、かなりの数の SiC セラミックスを用いた HOM 吸収体の製作を行ってきた。しかし、製作してから年月が経ち、製造会社の事情もあり、製造工程の確立も含め、今回検証が行われた。

今回新しい試みとして、活性銀ろう材(Ag-Cu に Ti を少量添加したもの)にインジウムの入った市販のろう材シートを使用した。この利点としてはろう付け温度を下げる点である。熔融温度が低温の時は、Ti が

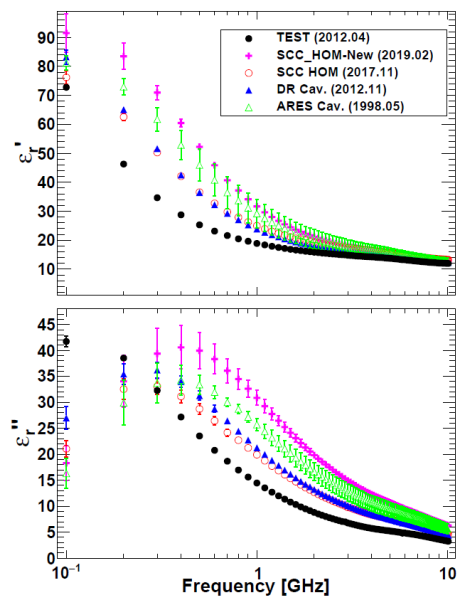


Figure 1: Measurements of relative permittivity of the SiC blocks at room temperature. The SiC blocks were used for this test (black points), SCC HOM-damper (magenta points and red circles), DR cavity (blue triangles) and ARES cavity (green triangles), respectively.

[#] enoshun@post.kek.jp

溶融ろう材中を拡散し、SiC 界面で反応し、 Ti_3SiC_2 を形成し良好な格子接合性から接合強度が高くなる。一方で、高温またはろう付け時間が長くなると SiC 側に Ti が供給され接合強度の弱い Ti_5Si_3 や TiC_x が界面に形成される [5]。アレス空洞では Ag-Cu に Ti を少量添加した活性銀ろうを使っていたため、溶融温度が高くなり、高温では接合強度の劣化も確認されていた。そのため温度制御範囲が狭くなるという難しい面があった。一方でインジウムは他の材質に比べ蒸気圧が低いため、ビームライン内で真空悪化の原因になる可能性が懸念された。特に ARES 空洞では、SiC ブロックを高電圧に近いところに配置するため、放電等の原因になる可能性があり見送った経緯がある。今回設置予定される箇所では、そのような影響はないと考えられるためインジウムが添加されたりろ材を使用した。

技術情報も含まれるため実際のろう付け温度・時間などの詳細は載せることができないが、次の章で示すように引張試験でも良好な結果が得られている。また今回ハイパワー試験用、引張試験用にろう付けを4セット行ったが、全て問題なく、ろう付けできており、歩留まりがよいことも確認できている。

3. 引張試験

ろう付けの接着強度を評価するため、KEK 機械工作センターにある材料試験機 (RTC-1325A, オリエンテック製) で引張試験を行った。上下から均等に力が掛かるように治具を用意し (Fig. 2(left)), 同じ条件 (常温、ヒートサイクルなし) の試料2つを評価した。また試験速度は 3 mm/min と同様にした。

破断後の試料の接合面を Fig. 2(right)に示す。図を見ても分かる通り両試料とも母材 (SiC) 破壊であることがわかる。中心部が破断しているのは銅側の接合面の外側をろう付けしやすくするためスリット形状になっているためであり、接着として問題ないことが分かる。また、Fig. 3 に張力と伸び量の相関関係を示す。2つの試料の傾きが比例関係であることから、弾性変形がまず起こり、塑性変形を起こさず、すぐに脆性破壊が起きていることが分かる。これはセラミックス特有の破壊機構であり、測定結果からも SiC セラミックスで破断が起きていることが分かる。

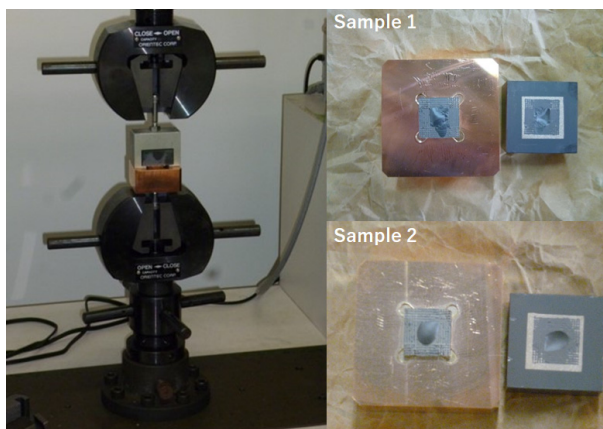


Figure 2: Picture of the tensile testing machine (left) and the fracture of SiC after tensile test (right).

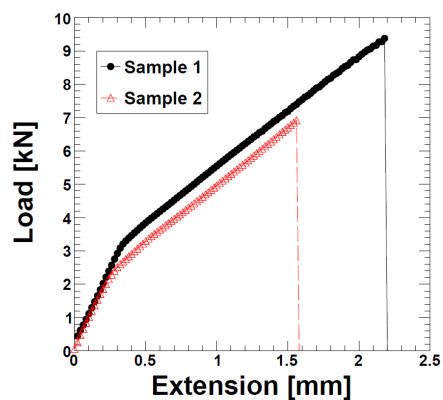


Figure 3: Results of the tensile tests of SiC-Cu bonding. Test speed is 3 mm/min.

Table 1: Comparison of Tensile Test Results

	Tensile strength(kgf/mm ²)	Remark
Sample 1	4.88	
Sample 2	3.60	
<ARES Cav.>		
Sample A	1.95<	w/ Heat cycle
Sample B	1.95<	w/ Heat cycle
Sample C	1.58	
Sample D	1.21	
Sample E	0.58	

今回のろう付けの接合強度の妥当性について、アレス空洞で用いる際に行った引張試験の結果と比較し、強度の評価を行った。

Table 1 に破断したときの引張強度の結果を示す。アレス空洞で試験したものは、インジウムが入っていない活性銀ろう材を使用している。そのため (技術情報のため具体的な数値は記載できないが) ろう付け温度は今回のものより高い領域で行っている。今回の試料は、過去の測定データと比較しても十分な強度が保たれていることが分かる。ろう付け温度の差が強度にどれだけの影響を与えているのか定量的に評価するのは、ろう付け条件、試験条件も若干異なるので難しい。しかしアレス空洞で使用している SiC ブロックは長く KEKB および SuperKEKB で稼働しているが、運転中に外れたなどの報告はない。今回のろう付けに関しても問題ないと考えられる。

1 つ懸念材料としては、ヒートサイクルについて今回検証できていない点である。過去の試験ではヒートサイクルを行って強度劣化などの問題ないことを確認しているが、許容温度などの定量的に評価は行ってこなかった。ろう材の成分も変更しており、その影響については興味がある。

4. 高周波誘電特性

4.1 電力試験

HOM 吸収体としてマイクロ波電源(MKN-152-3S9, 日本高周波)を用いて電力試験を行った。セットアップは本学会の報告[1]を参照されたい。SiC ブロックはろう付けした銅ブロックを介し水により冷却される。試験は大気中と真空中で行うことを検討しており、今回は大気中で試験を行った。周波数は 2450 MHz、電力は最大 350 W まで印加をした。

4.2 シミュレーション

HOM 吸収体の性能評価として、CST MW STUDIO の周波数ドメイン・ソルバーを使用して実験データの比較を行った。RF シミュレーション用ソリッドモデルを Fig. 4 に示す。実際のセットアップを簡略したモデルではあるが、導波管の上面に対して SiC ブロックの位置は透過、反射に大きく影響するので正確に配置した。Figure 5 にこの時の透過係数、反射係数の結果を示す。また、計算結果と測定結果の比較を Fig. 6 に示す。大きく相違ないことは確認できるが、入力パワーが大きくなるにつれ実験結果差が大きくなることを確認できる。以下、この差について SiC の誘電特性の観点から考察を行う。

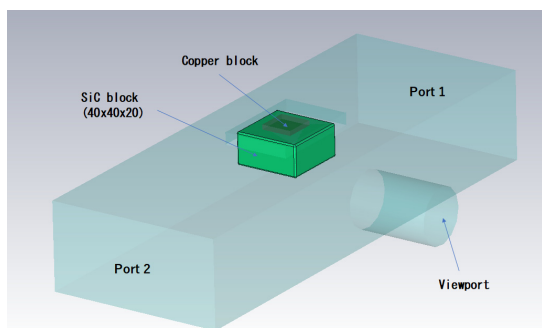


Figure 4: Solid model for RF simulation.

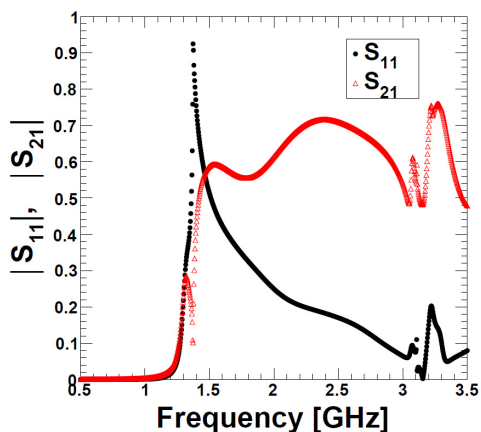


Figure 5: Calculation results of transmission coefficient S_{11} and reflection coefficient S_{21} at room temperature.

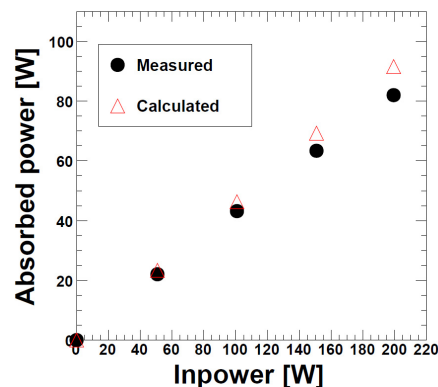


Figure 6: Absorbed power in the SiC block. Comparison between measured and CST calculation.

4.3 比較検証

SiC の誘電特性が「低抵抗結晶粒内と高抵抗結晶粒境界モデル」(2 層コンデンサーモデル)であると仮定すると、比誘電率は、以下の式で表すことができる[6, 7]。

$$\epsilon'_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1)$$

$$\epsilon''_r = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} + \frac{(\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2)$$

$\epsilon_{r0}, \epsilon_{r\infty}$ はそれぞれ角周波数 ω がゼロと無限大の時の ϵ'_r を示し、 τ は緩和時間を示す。また、Eq.(2)の第一項は減衰項を示し、高周波領域で十分小さいと仮定すると、Eq. (3)の Debye 式で表すことができる。

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (3)$$

このモデルを用い、SiC の比誘電率について評価する。

高周波試験では、入力パワーに依存して SiC の温度が上昇していることが確認されている[1]。SiC ブロックの状態を再現するため試験で使った試料と同様のものをホットプレートで過熱をし、比誘電率の温度依存性について、ネットワークアナライザーで測定を行った。

Figure 7 に Cole-Cole プロットを示す。温度上昇に伴い比誘電率の変化が大きいことが確認できる。また、Debye 式 (Eq. (3)) を解くと Eq. (4) を導くことができる。

$$\left(\epsilon' - \frac{\epsilon_{r0} + \epsilon_{r\infty}}{2}\right)^2 + \epsilon''^2 = \left(\frac{\epsilon_{r0} - \epsilon_{r\infty}}{2}\right)^2 \quad (4)$$

これは、Cole-Cole プロットにおいて、Debye 式が $(0, (\epsilon_{r0} + \epsilon_{r\infty})/2)$ を中心とする円(半円)であることを示唆し、今回の測定結果より今回用いた SiC ブロックは Debye 型の誘電分散特性であることを視覚的に確認することができる。

また各温度での比誘電率の測定結果を Debye の Eq. (1), (2) もしくは Eq. (4) でフィッティングすることにより SiC ブロックの $\epsilon_{r0}, \epsilon_{r\infty}, \tau$ をもとめることができる (Fig. 8)。上記の 2 層コンデンサーモデルより、 ϵ_{r0} は空乏層、 $\epsilon_{r\infty}$ は境界の静電容量に比例するもの、緩和時間 τ は粒界の抵抗と空乏層の静電容量の積を意味する。Figure 8 では緩和時間が温度上昇に伴い減少していくのに対し、 ϵ_{r0} が

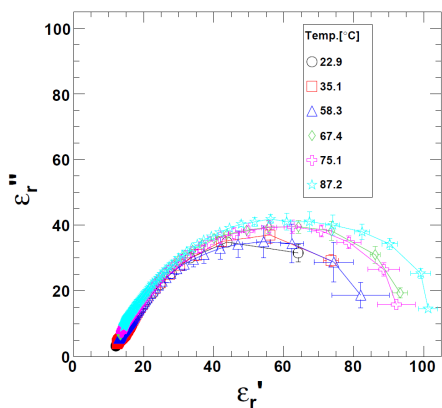


Figure 7: Cole-Cole plots of SiC (22 to 87 °C).

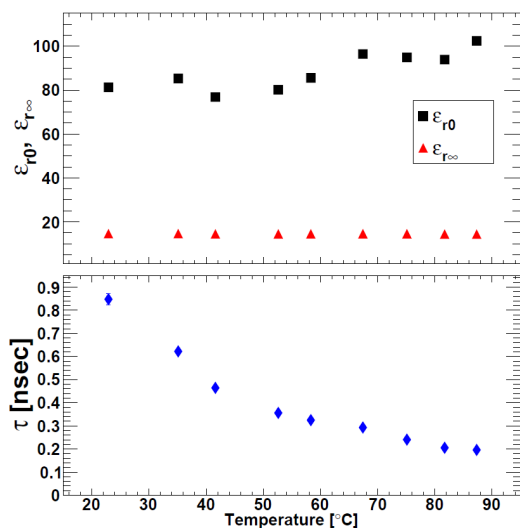


Figure 8: Temperature dependence of (up) relative permittivity $\epsilon_0, \epsilon_\infty$ and (down) relaxation time τ .

若干増加していることから、粒界の抵抗が大きく減少していることが確認できる。

測定値と計算値の差は、温度上昇に伴う、SiC の比誘電率を低く見積もっていたことが原因であると考えられる。温度依存性を考慮した CST 計算を行い再び比較を行った。Figure 9 に示すように補正後は、高温時(高い入力パワー)の時に吸収量が小さくなり、より実験を再現する結果が得られた。

ただし補正後の計算結果でも実験値と差が見られるのは、幾何学的にモデルが実験セットアップと異なる可能性がある。特に SiC ブロックの突き出し具合は顕著に反射係数、透過係数の計算結果に影響するので注意が必要である。また今回は冷却水温の差から熱流入量の評価も行いたかったが、流量下限値に対して温度差が小さく不確実性が大きかったため断念した。今後セットアップの変更も検討したい。

5. まとめ

SuperKEKB 用に現在開発されている真空システム用 HOM 吸収体の設計を行っている。設計の評価として以下の項目について実験・検証を行った。

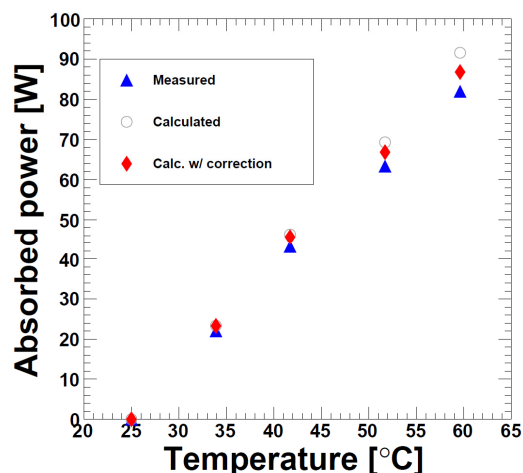


Figure 9: Absorbed power in the SiC block. Comparison between measured and CST calculation after temperature correction.

- SiC セラミックスと銅のろう付け
- 引張試験による接合強度の評価
- マイクロ波による試験結果について、高周波誘電特性を考慮した計算との比較検証

各項目とも実機に対して十分な性能が出ていることが確認した。今後はさらに真空容器の中で同様のハイパワー試験も計画しており、妥当性について検証を行う予定である。

謝辞

今回行った引張試験は、KEK 機械工作センター・江並氏の全面協力いただきました。また、試験用の導波管については KEK 機械工作センターの工作支援により製作していただきました。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] S. Terui *et al.*, presented at the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, 2019.
- [2] T. Kageyama *et al.*, “ARES Cavity system for SuperKEKB,” presented at the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, 2011.
- [3] T. Abe *et al.*, “RF accelerating structure for the positron damping ring of the SuperKEKB injector,” presented at the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, 2011.
- [4] M. Nishiwaki *et al.*, “Status of Superconducting accelerating cavity and development of SiC damper for SuperKEKB,” presented at the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, 2017.
- [5] T. Yano *et al.*, “Joining of pressureless-sintered SiC to stainless steel using Ag-Cu alloy and insert-metals,” 窯業協会誌, 95, 357-362, 1987.
- [6] R. Von Hippel, “Dielectrics and Waves”, pp.228-234, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1954.
- [7] Y. Takeuchi, “高周波窓などを例としたマイクロ波回路の設計,” OHO2017.