

HIGH-POWER TESTING OF BULLET-SHAPED SiC CERAMIC HOM ABSORBERS FOR KEKB ARES CAVITY

Yasunao Takeuchi¹, Tetsuo Abe, Tatsuya Kageyama, Hiroshi Sakai, Kazuo Yoshino
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

Abstract

R&D studies have been ongoing in order to develop a next generation of the ARES cavity system, which shall be capable of accelerating beam currents of up to 10 A supposed for one of the KEKB upgrade plans. Currently, there are 32 ARES cavities operated for the KEKB double-ring collider, 20 for the Low Energy Ring (LER) and 12 for the High Energy Ring (HER). For Higher-Order-Mode (HOM) damping, every ARES cavity is equipped with four rectangular waveguides, each of which is terminated with two bullet-shaped SiC ceramic absorbers. Fortunately, all the 256 (=32×4×2) absorbers have been working well without any troubles for over 10 years of KEKB operation, while the HOM power per absorber has been about 0.63 kW at maximum. On the other hand, the HOM power per absorber is estimated around 10 kW for the above upgrade plan. Recently, we have developed a new type of bullet-shaped absorber, whose thermal properties are improved by optimizing the nosecone shape together with the inner diameter of the water-cooling channel inside. This paper reports the results of the high power tests carried out for both of the currently used and the newly developed absorbers, together with low-level RF measurements for both absorbers in comparison with electromagnetic simulation results.

砲弾形SiCセラミックスを用いたKEKB ARES空洞用HOM吸収体の大電力試験

1. はじめに

KEKB常伝導加速空洞(ARES空洞)では、砲弾形炭化珪素(SiC)吸収体(外径55mm、有効長400mm)2本が組込まれた導波管型高次モード(HOM)減衰器(図1)が4式備えられている^[1]。HOM減衰器は空洞1台当り最大10kW(HOM減衰器一式当り最大2.5kW)のHOM電力(周波数0.8~2GHz)を想定して設計され、現在まで問題なく機能している。

KEKBの将来計画での最も厳しい条件下では、当初、空洞1台当り最大約80kWのHOM電力が予想されたため、吸収体あたり10kWを見据えた性能増強が必要となった。これに対して、現行砲弾形吸収体(以下96式SiCと略)と、水冷を強化した砲弾形吸収体(以下06式SiCと略)の2種類について、WR650導波管中で、吸収体1本当り最大10kWまでの大電力試験を実施し、SiC単体での性能達成の可能性を実証した^[2]。今回は、実際のHOM導波管内に組込まれた場合の砲弾形SiCの性能を確認し、かつ、このHOM導波管システムの性能を試験するために、現行ARES空洞のHOM導波管を使用して、96式SiC×2本、06式SiC×2本の各構成について、RF大電力試験(1.25GHz、20kW)を、真空中および大気中で実施した。RF源は、L-バンドCWクライストロンを用いた。

このようなテストスタンドでの電力試験においては、1) 周波数が1.25GHzと限られており、想定され

るHOM周波数(0.8~2GHz)とは異なる、2) HOM減衰器へ接続される導波管の形状が実機のものとは異なる、等の条件の違いがあり、注意が必要である。

96式SiC、06式SiCの双方とも同じメーカーの常圧焼成α型SiCセラミックスである。その誘電率($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)は緩和型分散特性(緩和周波数: 1MHz付近)を持ち^[3]、室温付近では、 ϵ' 、 ϵ'' 共に温度上昇に伴って増大する(0.8~2GHz)^[4]。

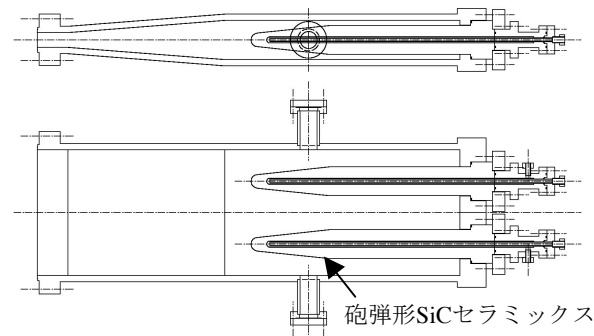


図1: ARES空洞の導波管型HOM減衰器の構造

砲弾形吸収体の電波吸収特性については、吸収体を円柱状誘電体導波路と見なすことによって理論的な取扱いが可能となる^[5]。伝搬モードとなる表面波HE₁₁モードの性質から、1) ある周波数 f_c (96式ARESでは外径55mmの部分で約0.7GHz)以下では、

¹ E-mail: ytake@post.kek.jp

大部分の電磁波が吸収体外部を伝搬するため吸収されない、2) この周波数 f_c は、吸収体の外径、誘電率の実数部 ϵ' によって定まる、等の特性が定性的に理解できる。今回試験した、96式および、06式SiCは、このような理論的モデルを基礎にして、SiCセラミックスの複素誘電率の測定と、その結果を用いたRFシミュレーションにより、それぞれの最大HOM電力の仕様（96式：1.25kW/1本、06式：10kW/1本）に対して、設計を最適化し、製造したものである。今回、1) この理論的モデルの検証、2) 誘電率測定とRFシミュレーションの結果の検証、の二つの目的のために、ネットワークアナライザを用いて、これらのSiCを用いた導波管型HOM減衰器の反射係数を測定した。

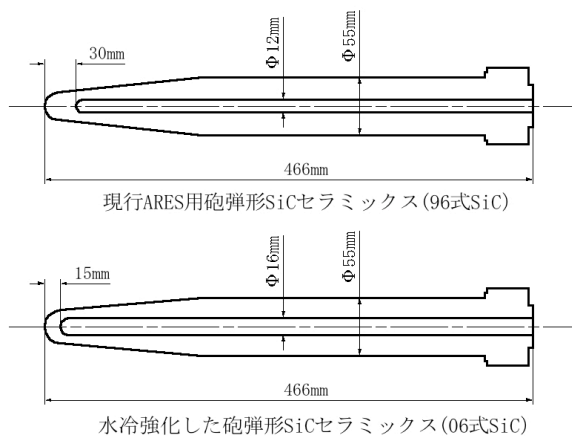


図2：96式SiCと06式SiCの形状

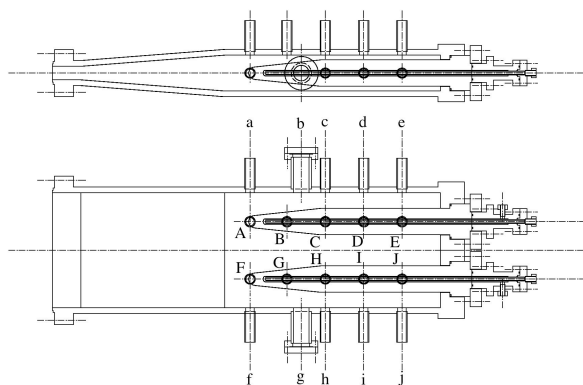


図3：大気雰囲気中試験のセットアップ

2. 大電力高周波試験

図2に96式SiC、06式SiCの形状を示す。06式では、96式の形状を基礎にして、冷却水路の内径を上げ、先端までの距離を小さくする変更が行われている。冷却水路は、吸収体中心に設けた穴（96式：内径12mm、06式：内径16mm）にアルミナ管（96式：外径8mm×内径5mm、06式：外径13mm×内径9mm）を挿入する形で構成されている。試験時の流量は、96式で、真空中試験：7 L/min、大気中試験：6 L/min、06式では両試験共、10 L/minとした。06式SiCでは、水路形状変更に伴い、先端部の丸みが13R

→16Rに変更されている。

真空中で行う大電力試験装置は、Lバンド導波管（WR650）、RF窓（WR650）、テーパ導波管（テーパ部長さ：600mm）、HOM導波管（図1）で構成されている。テーパ導波管とHOM導波管の材質はSUS304であり、これらの外壁（E面）には、冷却水ジャケットが取り付けられている。試験時の吸収体（片側のみ）の温度は、ICF70ポートに取り付けられたサファイア窓を通して、放射温度計（Avio TVS-100）で測定した（サファイア窓透過を含むSiCの放射率：低温レンジ0.51、高温レンジ0.47）。

大気中試験では、HOM導波管を、図3に示す覗き穴付に変更して実施した。導波管には、温度測定用の覗き穴が計20箇所（E面にA~Jの10箇所、両脇H面に、a~jの10箇所）に設けられている。放射温度計は、NEC/Avio TVS-500EXを使用した（SiCの放射率：低温レンジ0.73、高温レンジ0.74）。

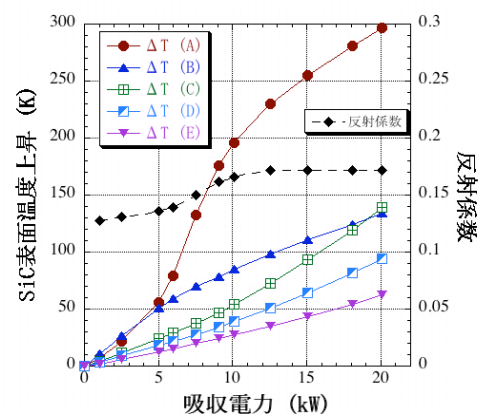


図4：96式SiC×2本の試験結果（大気中）

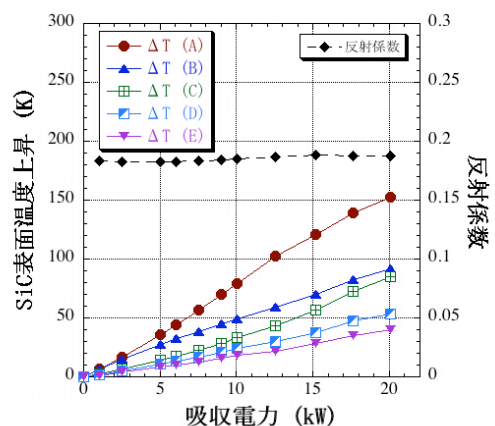


図5：06式SiC×2本の試験結果（大気中）

真空中での大電力試験は、96式、06式共にHOM導波管当り、吸収電力20kWまで実施した。試験中、放電や急激な真空圧力上昇は観測されなかったが、06式の試験時に、約15~20kWでHOM導波管真空フランジから、温度上昇が原因と考えられる小さい真空リークが発生した。フランジからのリークはボルト増締めで対処したが、小リークを繰り返した。吸収電力20kWのときの圧力は、96式SiC、06式SiCで、

それぞれ 9.2×10^{-5} Pa、 5.5×10^{-5} Pa、サファイア窓を通して測定したSiCの表面温度上昇はそれぞれ93K、82Kであった。

図4に大気中試験でのE面から測定した96式SiC（片側）の表面温度上昇と反射係数を示す。吸収電力2.5kW以下ではテーパ部の点Bの温度が高いが、5~10kWでは先端付近の点Aの温度が急激に上昇している。点Aの温度は20kWのとき320℃であった。反射係数は5~10kWで上昇し、10kW以上ではほぼ一定となっている。反射係数が上昇する吸収電力は、点Aの温度上昇が急な吸収電力の範囲と一致している。

図5に大気中試験での06式SiC表面温度上昇（E面）と反射係数を示す。96式と同じように5kW以上で点Aの温度上昇が点B~Eに比べて高くなっている。20kWでは点Aの温度は180℃であった。反射係数は、吸収電力に関わらずほぼ一定であった。

96式、06式ともに、表面温度は、E面からの測定値がH面側より高い（例えば、吸収電力20kWの時、96式のE面-点C：169℃、H面-点c：147℃）。

3. HOM減衰器の反射率測定

96式および、06式SiCを組み込んだHOM減衰器の反射率を測定した。ネットワークアナライザの校正は、WR975同軸導波管変換器、WR975からHOM導波管へのテーパ導波管（テーパ部長さ：1m）を2組使用して、HOM導波管フランジ部を基準面とする、TRL校正を実施した^[6]。

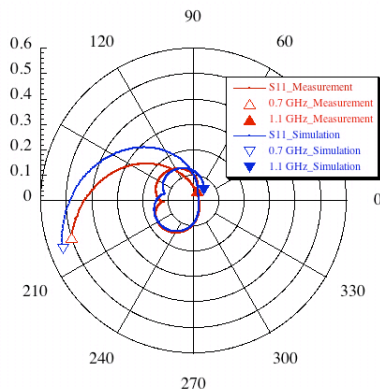
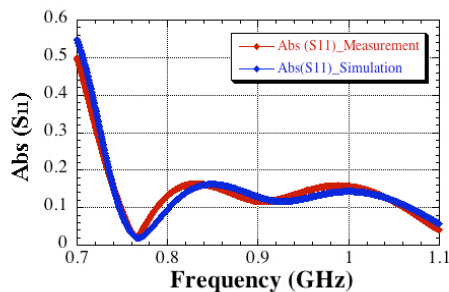


図6：ARES用HOM減衰器の反射係数（96式SiC×2本、測定値と計算値の比較）
下図は、 S_{11} の極座標表示

図6、図7に、それぞれ、96式、06式SiCを使用したHOM減衰器の反射係数の測定値を、RFシミュ

レーション（MW STUDIO）の結果と比較して示す。RFシミュレーションでは、それぞれ、96式SiC、06式SiCと同じ焼結ロットで製造されたSiCサンプルの誘電率測定値を用いた。これらより、1) 円柱状誘電体導波路を用いた理論的モデルから予想される、 f_c （約0.7GHz）以下での反射率の増大傾向が、測定によっても確認された、2) 測定結果が計算値と非常によく一致することから、誘電率測定、RFシミュレーション、反射率測定の3者に矛盾なく整合性がある、が分かった。

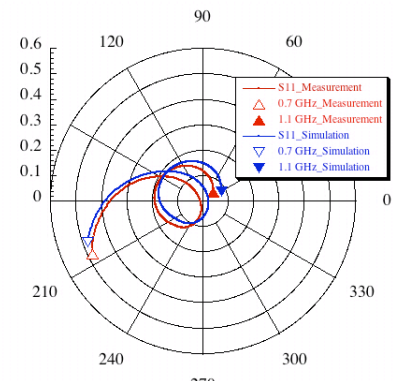
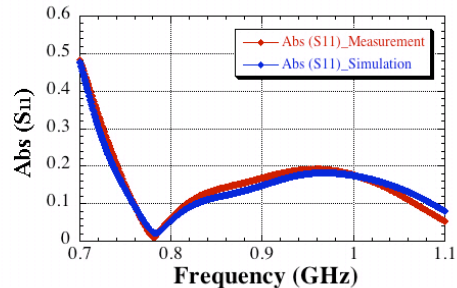


図7：ARES用HOM減衰器の反射係数（06式SiC×2本、測定値と計算値の比較）
下図は、 S_{11} の極座標表示

4. 考察

大電力試験での96式、06式SiC表面温度上昇は、WR650導波管中でのSiC単体試験結果^[2]と同じ傾向であるが、反射係数の変化は単体試験に比べて小さい。5~10kWでの96式SiC先端部温度上昇と反射率の上昇の原因は、SiC単体試験と同様に考えられる。すなわち、「先端部温度上昇→誘電率上昇→電磁波吸収特性変化→SiC先端部から電磁波が内部を伝搬→先端部温度上昇」のメカニズムで説明できる。一方、06式SiCでは、先端部付近での冷却を強化した効果が現れており、先端部の急な温度上昇はなく、96式に比べて各部の温度上昇は約半分程度に減少している。さらに、反射係数は、吸収電力に関わらず常にほぼ一定を保っており、電磁波吸収特性が大きくは変化していないことを示している。通常SiCセラミックスの耐熱衝撃性が約450℃であることを考慮すると、06式SiC2本を備えたこのHOM減衰器では、

SiC自体は20kWの連続運転に耐えられる能力を十分に有する。ただし、HOM導波管全体のシステムでは、温度上昇によって真空フランジからのリークを起こしたことから、10kW以上のHOM電力に対しては、真空フランジのシール方法、温度上昇が少ないフランジ付近の材質、冷却の方法等を検討して、真空シール能力を改善する必要がある。

今回試験したHOM減衰器(図1)においては、吸収体2本を電場が最大となる導波管中央から離して並列に配置しているため、WR650導波管中心に配置したSiC単体試験に比べて先端部発熱が軽減されるであろうと予想したが^[2]、96式SiC単体(10kW) : 288℃に対して、今回試験の96式SiC×2本(20kW)では、先端部位置での導波管モードの電場は約3/4となるが、314℃(H面点a測定)と高い結果であった。近似的には、表面波HE₁₁モードがSiC先端部に侵入する程度によって先端部の損失を見積もることができると、必ずしも導波管モードの電場の大きさだけで先端部発熱が予想できるとは限らないと考えられる。

5. 結論

砲弾形炭化珪素吸収体の現行型(96式SiC)と水冷増強型(06式SiC)の新旧2種類について、20kW(1.25GHz)の大電力試験を、現行HOM導波管を用いた試験装置で実施した。この結果から「HOM導波管(SiC2本)当り20kW」の性能は、水冷増強型SiCを採用すれば可能であることが実証された。ただし、10kW以上では、HOM導波管フランジの真空シールでリークの可能性が高く、改善が必要である。低レベルRF測定の結果、円柱状誘電体導波路モデルと、誘電率の測定値を用いたRFシミュレーションによる設計方法の妥当性を確認した。

参考文献

- [1] T. Kageyama, et al., APAC98-6D039.
- [2] Y. Takeuchi, et al., pasj4_lam32-TP08.
- [3] Y. Takeuchi, et al., PAC2005-WPAT010.
- [4] Y. Takeuchi, et al., SAST03-1P074, KEK Preprint 2003-121.
- [5] Y. Takeuchi, et al., EPAC96-WEP062L.
- [6] R. Pendleton, et al., SLAC-PUB-6552.