

HIGH-POWER TESTING OF BULLET-SHAPED SiC CERAMIC HOM ABSORBERS

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

The KEKB ARES cavity is equipped with four HOM-damping waveguides, each of which is terminated with two bullet-shaped SiC ceramic absorbers. The design power capacity per absorber is 1.25 kW for KEKB, and has been tested up to 3.3 kW at a test stand with an L-band CW klystron. Preparing for KEKB's future plans expecting higher beam currents, we have constructed a new test stand capable of high power testing over 10 kW or more. This paper reports the recent results of high power tests carried out for both old and new absorbers up to 10 kW. From a theoretical viewpoint of treating the bullet-shaped SiC absorber as a kind of dielectric rod waveguide, the shape optimization and its thermal structural properties are also discussed.

砲弾形SiCセラミックスを用いた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(吸収体1本当り最大1.25kW)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。さらにLバンドクライストロンを使用したテストスタンドでの電力試験において吸収体1本あたり3.3kWまでの性能確認がなされている^[2]。

KEKBの将来計画では空洞1台当り最大約80kWのHOM電力が予想されており、吸収体あたり10kWを見据えた性能増強が必要となる。そこで現行砲弾形吸収体(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種類について最大10kW程度までの大電力試験を実施した。各吸収体1本をWR650導波管終端部より装填し、管中雰囲気については温度測定の都合により真空と大気のとおりの場合について試験を行った。RF源としては東芝製クライストロンE3718(1.25GHz, 1.2MW)をKEKB用UHFクライストロン電源と組み合わせて使用した。

クライストロンを使用した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)吸収体を含む導波管の構造が実機用のものとは異なる、等の条件の違いがあり、試験結果をそのままHOM減衰器の性能と見なすことはできない。しかし、放電、破壊現象の有無確認や、温度上昇、反射係数等のデータは、実機設計に有用な情報である。

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^[3]。伝搬モードとなる HE_{11} 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、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($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)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。例えば、96式SiCの場合、先端部では外径が小さいため、1.25GHzでは、大部分の電磁波が先端付近のテーパ部分から伝搬し始めることが予想される。

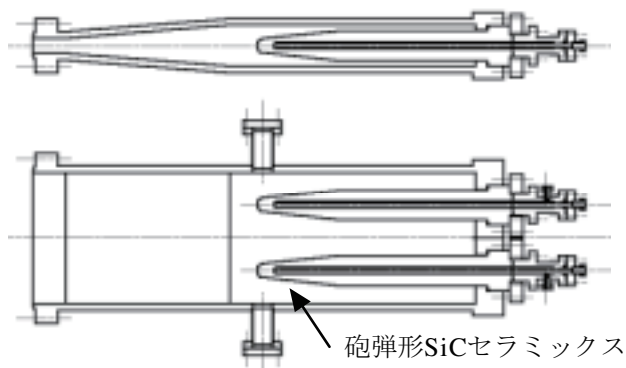


図1: ARES空洞の導波管型HOM減衰器の構造

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セラミックスであり、その誘電率は緩和型分散特性(緩和周波数:1MHz付近)を持つことが確認されている^[4]。また、室温付近では、 ϵ' 、 ϵ'' 共に温度上昇につれて増大する(0.8~2GHz)。これらの特性の発生メカニズムは、「高抵抗の結晶粒界と低抵抗の粒内」というモデルでうまく説明でき、温度による誘電率(0.8~2GHz)の増大は、緩和

¹ E-mail: yasunao.takeuchi@kek.jp

周波数の上昇に対応している^[5]。運転時の吸収体の温度上昇による誘電率の変化は吸収体内外に沿っての電磁波伝搬特性に影響をあたえ、吸収特性を変化させる。よって、砲弾形吸収体に使用するSiCについては誘電率の温度依存性が小さいものが望ましい。ARES空洞では、緩和周波数が100MHz程度の製品に比べてHOM周波数領域(0.8~2GHz)で ϵ' 、 ϵ'' 共に小さいという欠点があるが、小さい温度依存性の特性を利用するために、あえて緩和周波数の低い(1MHz程度)製品を選択した^[5]。

2. 大電力試験

図2に96式SiC、06式SiCの形状を示す。06式の設計にあたっては、1) 96式との互換性を考慮して外径、長さ、及び真空シール部の構造は同じとすること、2) 冷却水路の内径を上げ、先端までの距離を小さくすること、3) 現行実機空洞の導波管型減衰器に取り付けた場合0.8~2GHzの範囲で反射係数が0.2以下であること、の三項目を条件とした。特に三番目の条件については、誘電率のばらつきがKEKB建設の際の吸収体量産の場合と同程度であれば満足されることを電磁場シミュレーション(HFSS)により確認した。

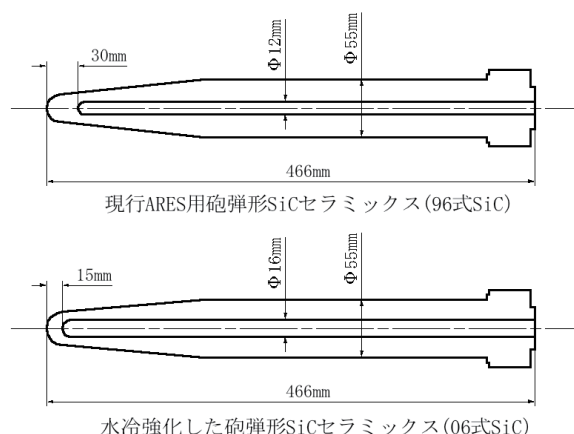


図2：96式SiCと06式SiCの形状

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、06式で、それぞれ、6リットル/分、10リットル/分とした。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。

図3に真空中で行う大電力試験装置の概略を示す。導波管の材質は銅で、管外壁に冷却水ジャケットが取り付けられ、ユニットクーラーからの冷却水(3.6リットル/分)で冷却されている。運転時の吸収体の温度は放射温度計で測定したが、その際の温度測定の誤差要因となる背光(導波管壁面からの熱輻射)の影響を最小に抑える必要があった。そのため、導波管を室温に近い温度に保つべく当該冷却水温度は20℃とかなり低めに設定した。

図4に大気中で行う大電力試験装置の概略を示す。

導波管の材質はアルミニウムで、E面に冷却水路が溶接されており、真空導波管と同様に冷却されている。H面上には、温度測定用の覗き穴(内径16mm)が計5箇所(A-E)に設けられている。

初期の大電力試験においてはサーモラベルによる直接的な温度測定を試みたが、ラベル自身の誘電損失による発熱が無視できないことが分かった。今回は、放射温度計(アビオニクス社製TVS-100)を代わりに使用した。SiCの放射率については、ホットプレート上に円筒形状試料(直径50mm×高さ50mm)を置き、放射温度計の低温レンジ(-20~120℃)では100℃、高温レンジ(50~300℃)では120℃で測定し、それぞれ、0.60、0.57の値を得た。サファイア窓を通した場合は、それぞれ、0.51、0.47であった。

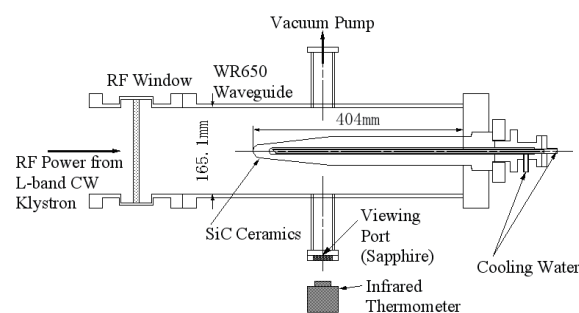


図3：大電力試験装置(真空雰囲気)

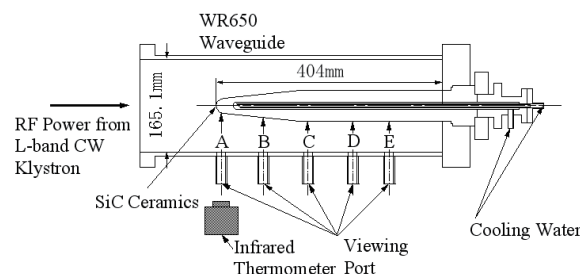


図4：大電力試験装置(大気雰囲気)

真空中での大電力試験は、96式SiC、06式SiC共に吸収電力10kW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。吸収電力10kWのときの圧力は、96式SiC、06式SiCで、それぞれ 1.6×10^{-4} Pa、 1.6×10^{-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123K、75Kであった。

図5に大気中試験での96式SiC表面温度上昇と反射係数を示す。吸収電力3kW以下ではテーパ部の点Bの温度が高いが、4kW以上では先端付近の点Aの温度が急激に上昇している。点Aの温度は10kWのとき266℃であり、同時に、Aより先端に近い部分で最高温度288℃を測定した。反射係数は3kW以上で上昇しており、点Aの温度上昇と傾向が似ている。

図6に大気中試験での06式SiC表面温度上昇と反射係数を示す。96式と同じように4kW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。10kWでは点Aの温度は152°Cであり、同時に、Aより先端に近い部分では166°Cであった。反射係数は緩やかに上昇しているが、96式と同じように、点Aの温度上昇と傾向が似ている。

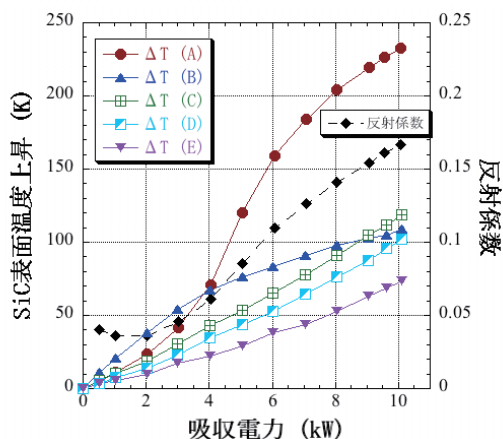


図5：96式SiCの試験結果（大気中）

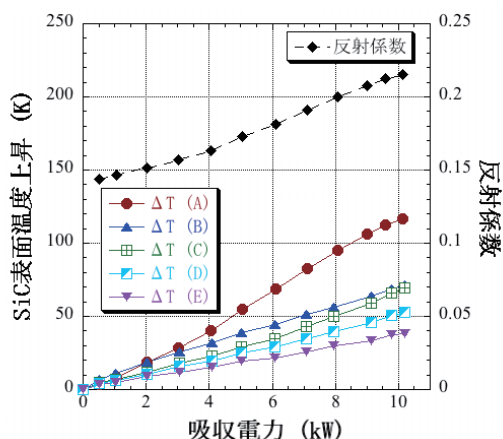


図6：06式SiCの試験結果（大気中）

尚、表面温度の測定は、導波管H面から行われており、E面側の温度は測定されていないことに注意が必要である。電場分布から、E面側温度が、H面側より高いことが予想される。

3. 考察

96式SiCの反射率が4kW以上で上昇している原因は、温度上昇により電磁波吸収特性が変化しているためであると考えられる。96式SiCでは先端テーパ部分が06式SiCに比べて絞りこまれているため、電磁波（1.25GHz）はテーパ部の途中から吸収体内部を伝搬し、3kW以下では先端に近い点Aよりも点Bの温度が高い。吸収電力が増加すると、先端付近の誘電率が温度上昇により大きくなる。それにより伝搬特性が変化し、より先端に近いところから電磁波は吸収体内部を伝播し始め、4kW以上で温度分布が逆

転すると考えられる。一方、06式SiCでは、先端部付近での温度上昇が他の場所に比べて大きいものの、冷却を強化した効果が現れており、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、緩和周波数が十分に離れている性質から、温度上昇に伴う誘電率の変化の割合は小さく、温度上昇による反射係数の大きな変化は現れていない。以上の結果から、吸収体当り電力10kWでの連続運転に耐えるだけの潜在的性能を06式SiCは十分に有すると考える。

砲弾形吸収体の導波管中での配置については、上述の如き吸収体先端部での局所的な電磁場吸収を避けるような配慮も必要となる。現行ARES空洞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故、吸収体先端部での発熱が今回の電力試験（図3）に比べて軽減されるであろうと予想される。これについては今後の電力試験で確認する予定である。

4. 結論

砲弾型炭化珪素吸収体の現行型と水冷増強型の新旧2種類について、10kW（1.25GHz）の大電力試験を、WR650導波管を用いた試験装置で実施した。この試験により、吸収電力に対する吸収体の表面温度上昇、反射係数等の詳細なデータが得られた。これらの結果から、KEKB将来計画で想定される要求仕様、即ち「砲弾型炭化珪素吸収体1本当り10kW以上」の性能達成は可能であることが実証された。

5. 謝辞

KEKの福田茂樹氏にはKlystron（E3718）、導波管等の機材の提供と共に、細部にわたる技術的な指導をしていただきました。日本原子力研究開発機構の平野耕一郎氏には、E3718の開発、運転の経験から、貴重な助言をいただきました。テストスタンドの建設では、KEKB-RFグループの方々の協力があり、特に海老原清一氏には、RF制御系の整備をしていただきました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. Kageyama, et al., APAC98-6D039.
- [2] Y. Takeuchi, et al., PAC97-4P034.
- [3] Y. Takeuchi, et al., EPAC96-WEP062L.
- [4] Y. Takeuchi, et al., PAC2005-WPAT010.
- [5] 竹内保直, 影山達也. “炭化珪素セラミックスの誘電特性とHOM減衰器設計への応用”, SAST03, KEK Preprint 2003-121.