

SuperKEKB 常伝導加速空洞区間で用いる SiC-HOM ダクトの性能評価 PERFORMANCE EVALUATION OF SiC-HOM DUCT FOR THE SECTION OF THE ARES CAVITIES IN SuperKEKB

榎本瞬[#], 竹内保直, 阿部哲郎, 小笠原舜斗, 影山達也, 坂井浩, 吉野一男

Shun Enomoto [#], Yasunao Takeuchi, Tetsuo Abe, Shunto Ogasawara, Tatsuya Kageyama, Hiroshi Sakai,
Kazuo Yoshino

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

SuperKEKB accelerator is operated with gradually increasing the beam current to achieve higher luminosity. The SiC-HOM ducts were installed upstream and downstream of the RF straight sections for the purpose of absorbing the high order mode (HOM) power generated in the ARES cavities. The SiC-HOM duct should be tested to see if it can absorb the HOM power at the high beam current. This report presents the estimation of the HOM power for the design beam current and the results of the high power test of the SiC-HOM duct using L-band klystron.

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、高ルミノシティを目指し、ビーム電流を徐々に上げながら運転が行われている。これまでに行われたランでは 4 GeV の陽電子リング(LER)で約 1.3 A、7 GeV の電子リング(HER)で約 1.1 A のビーム電流まで到達した[1]。

炭化珪素セラミックスを用いた HOM ダンパー(以下、SiC-HOM ダクト)は、常伝導加速空洞(ARES)からの High-order-modes(HOMs)を RF 区間で閉じる目的で、ARES 空洞が設置されている直線区間の上下流に 1 台ずつ設置されている(Fig. 1)[2]。SiC-HOM ダクトは、長さ 255 mm、内径 150 mm、SiC 厚さ 10 mm になる。

SiC-HOM ダクトは、KEKB 加速器時にインストールしてから、現在に至るまで大きなトラブルもなく順調に稼働している。しかし、SuperKEKB 加速器のビーム電流の最終設計値は KEBK 加速器の 2 倍にあたる LER: 3.6 A、HER: 2.6 A[2]であり、今後ビーム電流の増加に伴い、耐久性などが懸念事項に上げられる。特に熱吸収量に関しては大ビーム電流を想定した精密測定は行われていない。

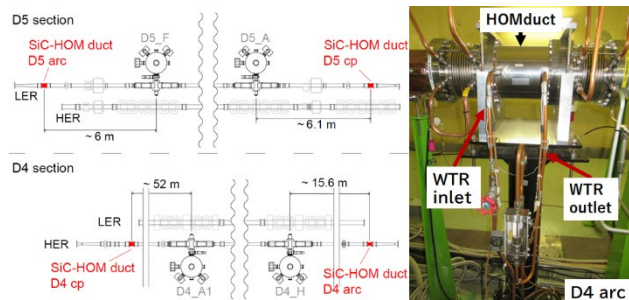


Figure 1: Schematic view of the D4 and D5 RF straight sections. SiC-HOM ducts are installed on both sides of the ARES installed sections.

[#] enoshun@post.kek.jp

本論文では、最初に、これまでのラン中に行った SiC-HOM ダクトの熱吸収量の測定から、最終設計値で想定される熱吸収量について定量的に示し、L-band (1.249 GHz)を用いて行ったハイパワー試験、熱吸収量の測定結果について示す。また、ハイパワー試験では、赤外線カメラを用いた SiC の表面温度の測定や、新たな取り組みとして音響信号測定についても説明を行う。

2. 想定される HOM パワーの見積もり

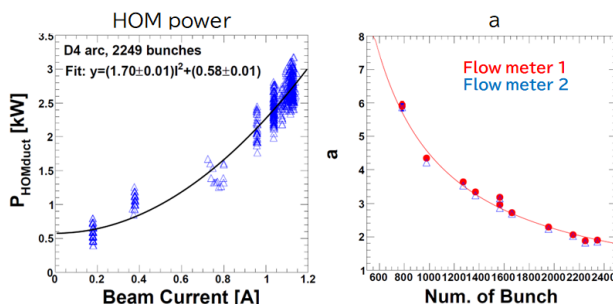


Figure 2: Measurement of HOM power for 2249 bunches (left) and bunch number dependences of coefficient “a” (right) in D4 arc.

2023 年現在、SuperKEKB 加速器は、Belle2 検出器アップグレードのため長期シャットダウン中であるが、それまでに行われた加速器運転から SiC-HOM ダクトの熱吸収量の評価を行った。特に、2022 年春の運転(2022ab run)では、ビーム電流を増加させるとともに、バンチ数を増やしての物理ランが行われた。その結果から最終設計ビーム電流値・バンチ数で想定される熱吸収量について見積もった。

SiC-HOM ダクトの熱吸収量の測定は、冷却水温度・流量の変化量から評価する。熱量 Q は以下の式で表される。

$$Q = c \times \Delta T \times Flow \quad (1)$$

c は比熱。冷却水は加速器および後述のテストスタンドでも純水を利用しているため比熱は 4.186 [J/kgK]であ

る。ΔT は HOM ダクトの冷却水の出口、入口に設置した温度計(熱電対もしくは測温抵抗体 Pt100)の温度差 (T_{out} - T_{in})、Flow は冷却水の流量になる。今回 HER、LER 両リングを評価するために、HER は、D4 アーク側 (D4 arc)、LER は、D5 実験棟側(D5 cp)、D5 アーク側 (D5 arc)に設置された SiC-HOM ダクトを用いた。

ビーム電流に対して熱吸収量の測定結果の一例を Fig. 2(left)に示す。また、HOM パワー P_{HOM} とビーム電流 I₀ は以下の相関関係があるので、フィッティングから係数 a をもとめることができる。

$$P_{HOM} = a I_0^2 + offset$$

$$a = \frac{k_{HOM}}{f_0} \left(\frac{1}{n_b} \right) \quad (2)$$

係数 a は、SiC-HOM ダクト固有の定数 k_{HOM}、周回周波数 f₀、バンチ数 n_b で表すことができる[3]。ここで、f₀ は加速器によって固定であるため、バンチ数を変更したデータを取ることによって、a とバンチ数の相関関係が得られる(Fig. 2(right))。この結果からデザイン値で想定される HOM パワーを見積もることができる。

Figure 3 に結果を示す。ビーム電流は最終運転電流を想定し、HER は 2.6 A、LER は 3.6 A での HOM パワーを見積もった。過去の実績[4-5]から HER・D4 arc では、現状のままで問題ないことが分かる。一方、LER・D5 arc、D5 cp では、実績値以上の熱吸収量になることが想定される。

SiC-HOM ダクトは KEKB 加速器を想定して作られたものであり、上限値は 20 kW 程度とされている[4]。しかし、上限値に関しては、推測を含む部分もあるため、ハイパワー試験を行うことによって、その上限値をもとめることが望まれる。

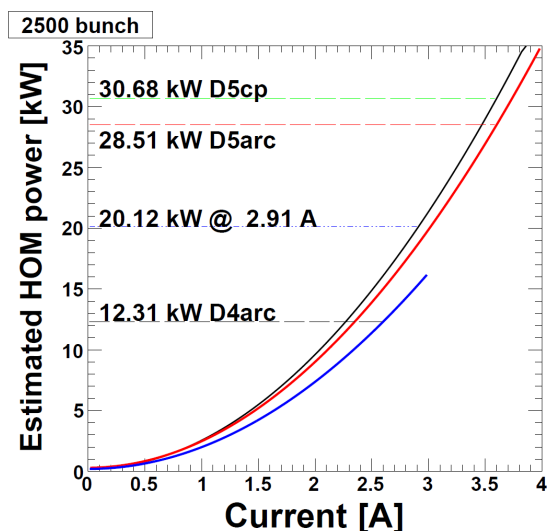


Figure 3: Estimated HOM power at D4 arc (blue), D5 cp (black) and D5 arc (red) by 2022ab run data.

3. 試験セットアップ

3.1 セットアップ

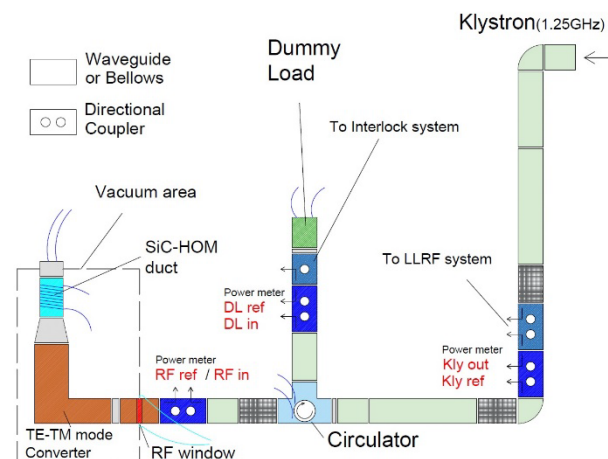


Figure 4: Schematic view of the high power test setup in D1-CT for the SiC-HOM duct.

前節で示した結果から、SiC-HOM ダクトの吸収パワーの性能評価試験を行う。ハイパワー試験は、KEK D1-CT テストスタンドにある L-band (最大出力 50 kW、1.249135 GHz、CW)のクライストロンを用いた。Figure 4 にセットアップを示す。クライストロンから矩形導波管 (WR-650)を通った TE₁₀ モード電磁波は、矩形 TE₁₀ 対円形 TM₀₁ モード変換器により、TM₀₁ モードに変換される。そして、SiC-HOMダクトの中心に同軸内導体を設置することにより、SiC-HOM ダクトの区間では、TM₀₁ モードから TEM モードになる(Fig. 5)。終端はショート板となっており、反射したものは、サーキュレータを介してダミーロードで吸収される。

SiC-HOM ダクトの内部は、モード変換器の上流に RF 窓をとりつけることにより、真空状態で試験を行う。SiC-HOM ダクトの熱吸収量は、加速器に設置した SiC-HOM ダクトと同様に冷却水の出入り温度および流量を測定することにより求める。また、SiC-HOM ダクトに入力するパワーおよび反射パワーは、モード変換器の上流に設置した方向性結合器にパワーメータを接続することにより測定を行う(P_{RF in}、P_{RF ref} Fig. 4 参照)。また、クライストロン下流(P_{Kly out}、P_{kly ref})、ダミーロード上流(P_{DL in}、P_{DL ref})にもパワーメータを設置し、システム全体のモニターも行う。

今回の試験は、SiC を破壊するところまでパワーを上げる可能性があるため、加速器で現在使われている(予備機の少ない)フルジャケット式の SiC-HOM ダクト (Fig. 5(b))ではなく、旧式の銅パイプを巻き付けた SiC-HOM ダクトを使用した。大きな違いは冷却能力のみであり、熱吸収量の評価には問題はないと考えられる。(正確には、SiC の誘電率はロットが異なるので若干の違いは見られる。)

また、今回のハイパワー試験では、熱吸収量の評価に直接関係はないが、SiC の知見を得るのに重要な、SiC 表面温度の測定、および放電や SiC 損傷をモニターする音響センサーによる測定を行ったので、次章で結果を示す。セットアップに関しては 3.3、3.4 節で説明を行う。

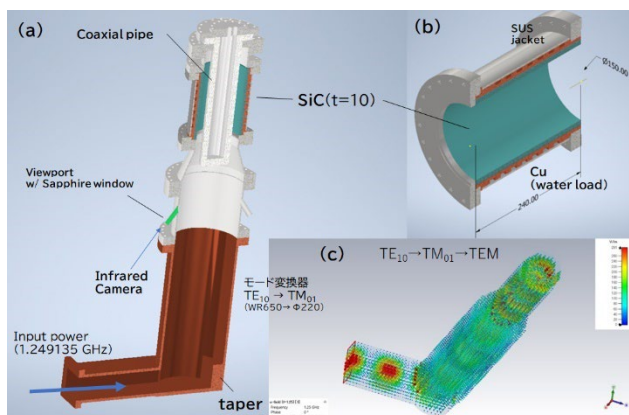


Figure 5: Cross-sectional view of the HOM duct test stand (a), SiC-HOM duct (b) and result of the electric field distribution at 1.25 GHz in CST simulation (c).

3.2 シミュレーション

CST MW STUDIO の周波数ドメイン・ソルバーを用いた。先に述べたように SiC-HOM ダクトに入力される伝搬モードや 1.249 GHz で得られる S パラメータなどを確認した。S パラメータ(モード変換器の入り口を port 1 とした時の $|S_{11}|$)に関しては、ネットワークアナライザを使ったローパワーレベル測定との比較を行った。一部差異が見られ、シミュレーションで使用している幾何学的にモデルが、もしくは SiC 誘電率データが実機と合っていないことが想定される。例えば、シミュレーションでは 1.25 GHz で吸収率 $(1 - |S_{11}|^2)$ は 0.97 程度であったが、ローレベルでは、0.85 となった。シミュレーションでは、同軸の突き出し量がセンシティブに影響することが確認されている。

3.3 赤外線カメラによる SiC 表面温度測定

テストスタンドには、SiC 表面が覗けるようにビューポートが取り付けられている。今回の試験は、真空中でおこなうため、ビューポートにはサファイア窓(SVP-075)を取り付けた。サファイア窓の光透過率は、波長範囲 0.3 ~ 5 μm で高くなっており、その範囲で感度のある赤外線サーモグラフィカメラ(TVS-100, Avio)を用いて SiC の表面温度の測定を行った。

赤外線の放射率は、物体固有の放射率の他に、温度依存性、サファイアの光透過率、物体表面とカメラの角度、周辺環境など複合的な影響が考えられる。そのため

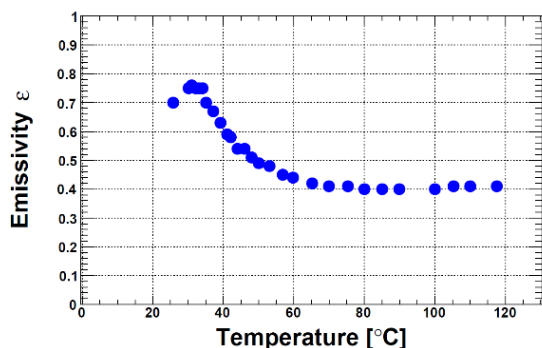


Figure 6: Result of the emissivity of the infrared camera.

放射率を校正するために、ハイパワー試験と同じセットアップで、SiC 表面を测温抵抗体と赤外線カメラで測定し、その比から放射率をもとめた。Figure 6 にその結果を示す。温度依存性があることが分かり、ある温度まで行くとも放射率はほとんど変化しないことが分かる。

3.4 音響センサー

加速器では、加速管など放電時に発生した熱衝撃を直接測定する測定装置として、音響センサー(AE sensor)がよく利用されている。圧電素子による圧電現象を利用したものであり、機械的な振動を電気信号に変換できる。一般的に普及した方法ではあるが、今回の試みの特徴としては、狭い範囲での放電箇所、SiC クラック発生箇所の同定、および複数の物質を介しての音波検出を目的としているところにある。

SiC-HOM ダクトの形状・大きさは Fig. 5 (B)に示した通りであり、音響センサー(AE124-AT, マテックス建材)の取り付け位置は、SiC に直接取り付けることはできないので、SUS フランジ、SUS ジャケット、もしくは旧式ダクトでは銅パイプの部分になる(Fig. 7(left))。事前の確認では、SiC 表面に取り付けた音響センサーをソースとしパルス波を入力したところ、部分的にはあるが、ソースとセンサーの距離に対して、パルスの到達時間に相関関係が見られた(Fig. 7(right))。長手方向の測定では距離が遠くなるほど、円周方向は反対側に行くほど、時間差が大きくなる。相関関係が崩れているのは、焼き締めで接合している SiC と銅の接触面の状態によることが考えられる。また、パルス高に対しては、距離との相関が見られないことも分かった。

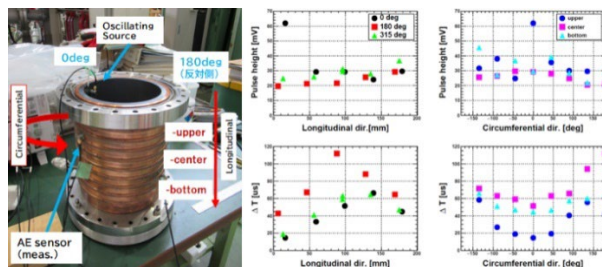


Figure 7: Setup of the acoustic emission (AE) sensors test (left) and the measurement results of the AE sensor signal (right).

4. ハイパワー試験

クライストロン出力は、試験体の真空度を一定に保つことを目安に行った。真空圧力値で $\sim 10^{-3}$ Pa でインターロック(I/L)がかかるように設定されており、開始時は数 kW 程度でリミット値に達していたが、エージングをしていくと徐々に出力を上げることができる。RF システムとしては、真空 I/L の他に入力、反射 I/L などの閾値もクライストロン出力に合わせて設定をしている。

ハイパワー試験の結果の一例を Fig. 8 に示す。

パワーメータの測定結果は、接続した導波管やサーキュレータなどで大きなロスがないことを示している。また、ダミーロードからの反射(P_{DL_ref})、クライストロンへの反射(P_{KLY_ref})は入力に対してかなり低いことや、各位置の温

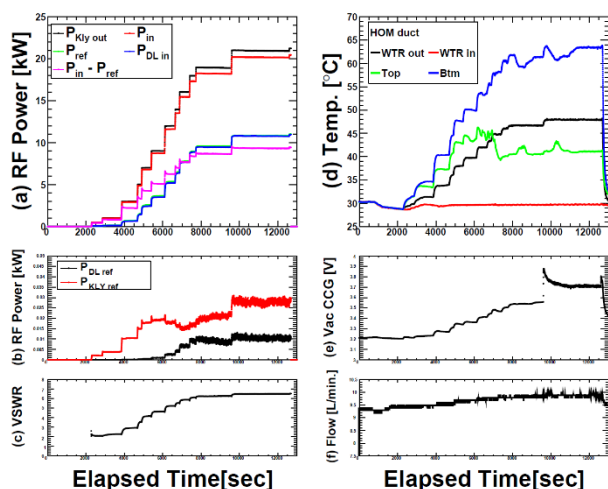


Figure 8: The results of high power test. Input and reflection power of SiC-HOM duct, klystron and dummy load (a)(b), VSWR (c), temperatures (d), vacuum value (e) and cooling water flow (f) in SiC-HOM duct.

度モニター結果から、問題はないことを確認している。

試験体で消費されるパワーは $P_{in} - P_{ref}$ で表され、後に示す SiC-HOMダクトの熱吸収量を比較すると大きく変わらないことも確認している。

Figure 9 (bottom) に冷却水温度の変化量の終始からもとめた熱吸収量の結果を示す。クライストロン出力に対して、熱吸収量は 3 kW 程度で傾きが変わっている。これは SiC の誘電率の温度依存性が影響していると考えられる。SiC は高温になると、熱吸収量は下がることが分かっている[6]。

Figure 9 (top) にクライストロン出力と SiC 表面温度の測定結果を示す。熱吸収量の傾きの変化している領域と同様、SiC の温度上昇カーブに変化が見られる。この領域では、SiC 誘電率と温度(吸収量)が相互に作用し変化している状態だと考えられる。その後、高温になると平衡状態になり、線形に上昇していることが分かる。

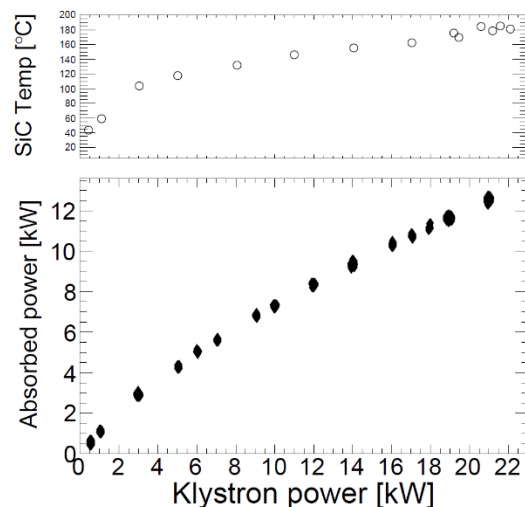


Figure 9: The absorbed power of SiC-HOM duct (top) and temperature of the SiC surface (bottom).

ハイパワー試験は、試験体内の真空度を指標に徐々に上げていることもあり、現在目標としているパワーには達していない。ブレイクダウン起因の RF ダウンは数回しか起きておらず、真空バーストによるダウンも数える程度である。今回取り付けした音響センサーでは、何かしらの信号は検出されているが、事象が少ないこと、RF ダウン時との同期が難しい側面があり、明確な判別はできていない。また、試験後に SiC 表面を直接目視で確認したところ、放電痕やクラックなどは見られなかった。

SiC-HOMダクトの熱吸収量は、~13 kW 程度まで確認することができた。これは、HER 2.6 A 時の想定される HOM パワーに相当し、また LER では現時点で、2.3 A 程度までは許容量であることを確認した。

5. まとめ

SuperKEK 加速器で使用されている SiC-HOM ダクトの性能評価を行った。SuperKEKB で最終的目標とされるビーム電流値での HOM パワーを見積もるとともに、実際に L-band クライストロンを用いたハイパワー試験をおこなって SiC-HOM ダクトの熱吸収量で 13 kW まで問題ないことを確認した。試験はまだ途中の段階であるが、現時点で HER では十分な能力を有していることが確認でき、LER に関しても、ブレイクダウンの頻発、クラックなどの欠損も見られないことから、引き続き試験をおこなうことによって、さらなる許容量の向上が期待できる結果が得られた。

今後、さらに大きなパワーを印加することにより、SiC-HOM ダクトの上限値を見積もるとともに、放電、クラックによる音響センサーによる新たな知見を得ることが期待できる。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Recent progress of SuperKEKB project and future prospect”, Proceedings of the 14th International Particle Accelerator Conference, Venezia, Italy, May 7-12, 2023, pp. 1321-1324. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-TUOGB1
- [2] <http://www-superkekb.kek.jp>
- [3] H. Wiedemann (2007). doi:10.1007/978-3-540-49045-6
- [4] Y. Takeuchi and Y. Morita private communication, 2021.
- [5] Y. Morita, “Power challenge for SuperKEKB”, ERL2011, KEK, Tsukuba, Japan, October 16-21, 2011.
- [6] S. Enomoto *et al.*, “Design of HOM absorber for SuperKEKB vacuum systems considering RF dielectric properties of SiC ceramics”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31-August 3, Kyoto, Japan, 2019, pp. 298-301.