

EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF MOVABLE MASK WITH LOW BEAM IMPEDANCE

Yusuke Suetsugu^{1,A)}, Kyo Shibata^{A)}, Akira Morishige^{B)}, Yasuaki Suzuki^{B)}, Masao Tsuchiya^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{B)} Kinzokugiken Co, Ltd., 713 Shake Aza Narihira, Ebina, Kanagawa 243-0424, Japan

Abstract

A new-type movable mask (collimator) with low beam impedance for future high-intensity accelerators has been proposed and investigated in KEK. A conductive mask head is supported by a dielectric material in order to reduce the interference with beams. The present test model had a head and support made of graphite and artificial diamond, respectively. The test model was installed into the KEK B-factory (KEKB) positron ring, and tested with real beams up to a beam current of 1300 mA to prove the principle. The temperatures of bellows and SiC HOM absorbers near to the new-type masks were found to be lower than those in the case of old-type ones. This fact indicated that the HOM excitation was mitigated by using the new-type mask.

低インピーダンス型可動マスクの実証実験

1. はじめに

可動マスク(コリメータ)とは、加速器において正規のビーム軌道から外れた荷電粒子の通過を制限し、測定器のノイズを低減、またはビームの質を向上させるための真空機器である^[1-3]。可動マスクは、そのヘッド(荷電粒子を遮断する物質)がビームの極近傍にあるため、必然的にビームインピーダンスが高くなる。その結果、発生した高次高周波(Higher Order Modes, HOM)によってビーム振動が励起されたり、近傍の機器が加熱されたりしやすい。また、予期せぬビーム本体の衝突によるヘッドの損傷も問題となる。これらの課題に対応した可動マスクの開発は、将来の大強度加速器を実現する上で重要なR&D項目の一つとなっている^[4]。

我々は、従来よりも低いインピーダンスを持つ新しい構造の可動マスクを提案した^[5]。誘電体で導電性のマスクヘッドを支える構造とすることにより、ビームとの干渉が減り、インピーダンスが小さくできる。これまで、シミュレーションを通して本構造の高周波特性や熱特性を評価し、その実現可能性を検討してきた。また、2007年には試作1号機をKEK Bファクトリー(KEKB)の陽電子リングに設置し、実機ビームを使った試験を行った^[6]。

今回、これまでの検討・試験結果を踏まえ、試作2号機を同リングに設置して、ビーム運転中のヘッドの温度、近傍のベローズチェンバーやSiC HOM吸収体冷却水の温度等を測定した。そして、それらの温度上昇が旧型マスクの場合に比べ少なくとも1/2程度まで減少することを確認し、この新型マスクによってHOMの発生が低減されることを実験的に実証することができた。ここでは、試作2号機のビーム試験の結果、問題点、および今後の方針等について報告する。

2. 試作2号機

試作1号機は、マスクヘッドとサポートをアルミナ(99% Al_2O_3)で製作し、ヘッド部分のみに銅(厚み約10 μm)をコーティングした^[6]。形状的には提案した構造と同じであったが、サポートがアルミナであったためサポートを通しての伝熱はほとんど期待できず、ヘッドへの入熱は主に輻射によりチェンバー側に伝達されることになった。アルミナ自体の高周波での誘電損も大きかった。その結果、ビーム試験では、ビーム電流700 mA (1389バンチ、 $I_b^2/N_b = 350 \text{ mA}^2$)の時、圧力のバーストと同時にヘッド温度が1300 $^\circ\text{C}$ 以上に達した。マスクヘッドの銅のコーティングはほとんど消失し、ヘッドとサポートの接続部分のアルミナが熔融していた^[6]。残念ながら原理実証には至らなかった。

今回の試作2号機は、1号機の経験を元に、形状はほぼ同じであるが構成材料が見直された。試作したマスクヘッド部を図1に示す。ヘッドにはグラファイト(コンポジット材)を採用した。グラファイトは融点が約3000 $^\circ\text{C}$ と熱的強度が高い導体であり(導電

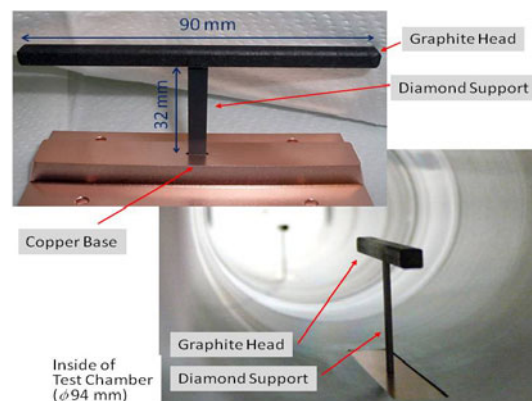


図1：可動マスク試作2号機マスクヘッド部分

¹ E-mail: yusuke.suetsugu@kek.jp

率 $1 \times 10^5 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ 、輻射率も高い($\epsilon > 0.7$)。一方サポートには人工ダイヤモンドを用いた。ダイヤモンドは誘電体($\epsilon_r = 6$)であるが、熱伝導率が室温にて $1 \text{ Wmm}^{-1}\text{K}^{-1}$ と銅よりも高い。つまり、ヘッドへの入熱は輻射ばかりではなくサポートを通じた熱伝導でもチェンバー側に伝わり、試作1号機に比べて熱的強度を高めることができる。熱解析では、KEKBの典型的なフィルパターンである1389バンチ1700 mA ($I_b^2/N_b = 2000 \text{ mA}^2$)でも、ヘッドでの最高温度は $780 \text{ }^\circ\text{C}$ と材質的には問題無い範囲であった(解析では熱伝導率を室温の約半分とした)。なお、ロスファクターは約 $2.1 \times 10^{10} \text{ VC}^{-1}$ であった(バンチ長6 mm)。ちなみに、同条件での既存の可動マスクのロスファクターは約 $5 \times 10^{11} \text{ VC}^{-1}$ である。

ヘッドは長さ90 mm、幅5 mm、厚み5 mmの直方体である。サポートは高さ38 mm、幅5 mm、厚みは1.2 mmである。ただし、今回サポートには導電性膜は付けなかった。また、現象を単純にするためにテストチェンバーにはHOM吸収体(SiC)は取り付けなかった。グラフィイトとダイヤモンドはロウ付けで接合した。さらに、ダイヤモンドサポートの根元に銅ブロック(台座)をロウ付けし、この銅の台座をチェンバーに固定した。マスクヘッドとビームとの距離は正規の位置で10 mmであった。

3. ビームテスト

3.1 設置

試作2号機2台(V_1 , V_2)は、2008年冬にKEKB陽電子リングの既存の垂直方向可動マスクと入れ替えられた。ヘッド中央部の温度はチェンバーのサファイア窓を通して赤外温度計(波長 $1.6 \mu\text{m}$)で測定した。近傍のベローズチェンバーのベローズひだ、および可動マスクチェンバー本体の温度も常時監視した。ベローズひだの温度は発生するHOMの強度の指針となる。なぜなら、その温度上昇はベローズのフィンガー型RFシールドから漏れ出るTEモードのHOMが主な原因だからである。また、可動マスクの近傍に設置されているHOM吸収体付きチェンバーの冷却水温度も測定した。試作機(V_1 , V_2)、旧型水平マスク(H_1 , H_2)、ベローズチェンバー(B)、HOM吸収体(A_1 , A_2)等のリングでの位置関係を図2に示す。

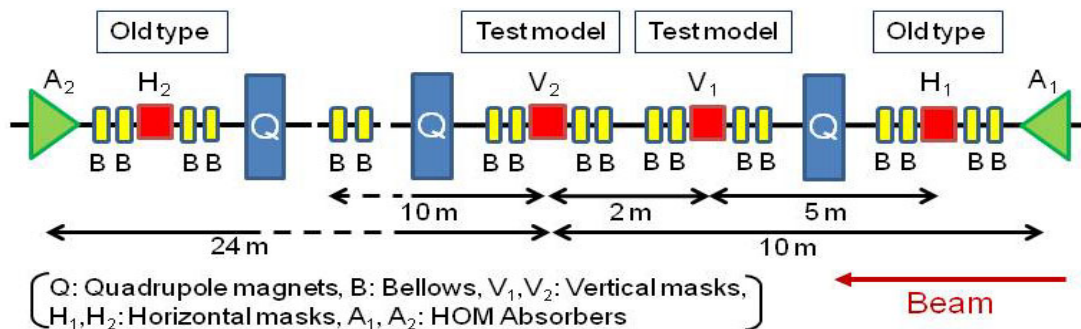


図2：試作機(V_1 , V_2)近くのコンポーネント配置図。Q：四極電磁石、B：ベローズチェンバー、 H_1 , H_2 ：旧型水平方向可動マスク、 A_1 , A_2 ：HOM吸収体チェンバー。

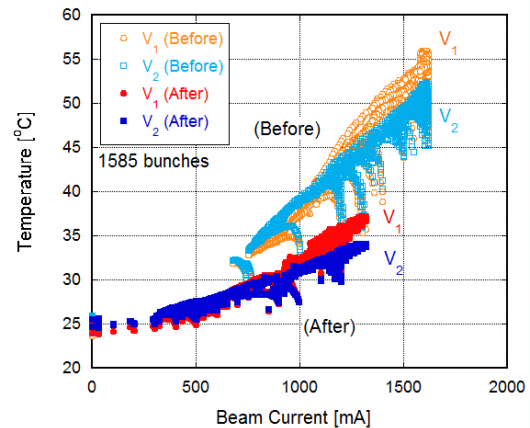


図3：旧型(Before)と試作機(After)設置時の可動マスク(V_1 , V_2)近傍のベローズひだの温度。

3.2 ベローズひだの温度

図3に、設置した2台の垂直方向マスク(V_1 , V_2)近くにある4個のベローズひだの温度(平均値)のビーム電流に対する変化を示す。バンチ数は1585、バンチ間隔約6 ns、バンチ長約7 mmである。旧型マスクを設置していた時のベローズひだ温度(Before)と比べると、ビーム電流1300 mA ($I_b^2/N_b = 1100 \text{ mA}^2$)までの範囲で、温度上昇率は約1/2になっている。これは、試作機に交換することで発生するHOMのパワーが減少したことを示している。また、 V_1 , V_2 マスクの上流、下流にある旧型水平方向マスク(H_1 , H_2)の近傍のベローズひだ温度上昇率も約30%低下した。これはHOMがビームパイプ内を伝搬しているためである。このことは、逆に図3の温度上昇にも H_1 , H_2 の影響が含まれていることを示唆する。

3.3 HOM吸収体チェンバーのSiC冷却水の温度

V_2 マスクから約10 m上流側にあるHOM吸収体チェンバー(A_1)のSiC冷却水出口温度の変化を図4に示す。チェンバーには2本のSiC (SiC_1, SiC_2)が挿入されていて、SiC_1とSiC_2の冷却水は連続して接続されている^[7]。旧型マスク設置時と比較してみると、温度上昇が約40%低下しているのがわかる。これはHOM発生量が減少したことを直接示すものである。冷却水の流量は 4 l s^{-1} であることから、例

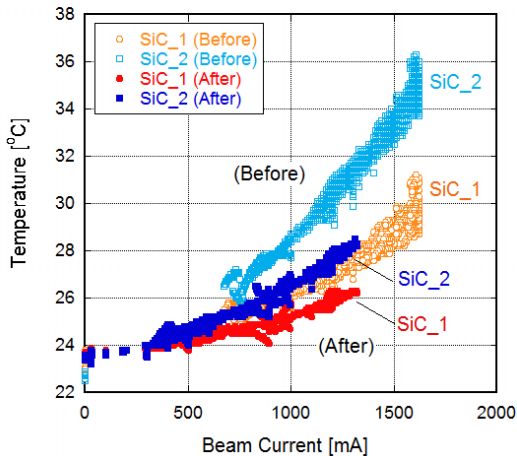


図4：旧型(Before)と試作機(After)の場合のHOM吸収体チェンバー(A₁)のSiC冷却水の温度。SiC_1とSiC_2は連続して冷却されている。

例えばビーム電流1300 mAでの4 °Cの低下は、吸収パワーが1.1 kW減少したことになる。ここで、HOM吸収体チェンバーのSiCが垂直方向に設置されていることに注意すべきである。この配置では、水平方向に偏極しているHOMに対して吸収効率が大きい。つまり、水平方向マスクのHOMを効率良く吸収する。このことから、試作2号機を使用することで実際に減少したHOMパワーは、図4の冷却水の温度変化から単純に計算される値より大きいと推定される。もう一つのHOM吸収体チェンバー(A₂)でもSiC冷却水温度の低下が確認された。

3.4 破損

ビーム電流900 mA ($I_b^2/N_b = 510 \text{ mA}^2$)程度から、試作機内部の温度が予想以上に上昇していることが観測された。そして、1300 mA ($I_b^2/N_b = 510 \text{ mA}^2$)にて付近の圧力の突出と同時にビームロスが発生した。内部を確認したところ、V₁マスクのサポート部が破損していることがわかった(図5)。

サポートは銅の台座に近いところで破断していた。台座のロウ付けは残っていたが、サポートのエッジ部分で放電跡が確認された。ダイヤモンドは炭化し、

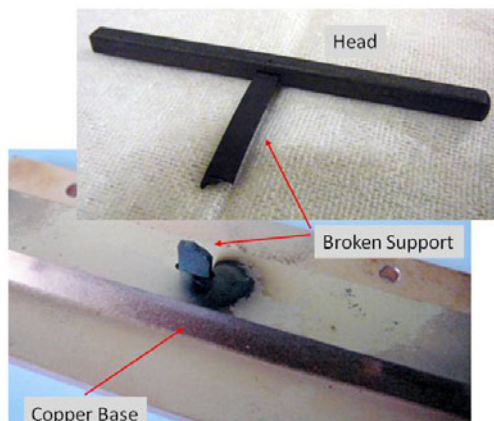


図5：破損したV₁マスクのヘッド、サポート。

導電性が認められた。これはサポートの温度が1500 °C以上になったことを示す。

破損の原因は、破損の状況や運転中の温度の振る舞いから、サポート部で放電が発生したためと推定された。放電の原因としては、次のようなことが考えられる。(1)ダイヤモンドの欠陥。同一条件で試験していたV₂マスクのサポートは健全だった。(2)銅-ダイヤモンドのロウ付け部の不具合。(3)いわゆる三重点(ダイヤモンド、銅(金属)と真空)からの電子放出に起因する沿面放電。ダイヤモンドの高い二次電子放出率が誘引の一つとも考えられる。

4. まとめと今後の方針

試作2号機を用いて提案した可動マスクの実験を行い、ビーム電流1300 mA ($I_b^2/N_b = 1100 \text{ mA}^2$)までの範囲で発生するHOMが低減されることを実験的に実証した。しかし、最終的には予想より低い電流でサポート部が破損した。さらに高い電流に対応するために、以下のような改良を考えている；(1)ロウ付け部の電界強度を下げる構造とする、(2)より均一な特性とするためダイヤモンドの品質を上げる、(3)沿面放電の成長を抑えるためサポートを傾ける、(4)サポートの表面に薄い導電性膜を付ける、等。

リングに設置する前の地上試験も検討している。今回の放電現象を確認するために、1.25 GHzのマイクロ波導波管内(真空中)にマスクヘッド部分を設置し高電力のマイクロ波を通過させてサポート部を観察した。その結果、約70 kW入力時に放電を確認することができた。実際のバンチとは周波数スペクトルが異なるが、マスクヘッド部の放電特性を評価する良い指針になると考えている。

謝辞

本研究にあたり、KEKB RFグループの影山達也氏、阿部哲郎氏、竹内保直氏には計算および実験に対してご協力を頂きました。また、KEKBの生田勝宣氏、金澤健一氏には多くの助言を頂きました。ここに深謝します。

参考文献

- [1] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Sanami, T. Kageyama and Y. Takeuchi, *RSI*, **74** (2003) 3297.
- [2] Y. Suetsugu, T. Kageyama, K. Shibata and T. Sanami, *NIM-PR-A*, **513** (2003) 465.
- [3] Y. Suetsugu, "Vacuum System for High Power Lepton Rings", PAC2003, Portland (OR), 2003 May 12-16, p.612.
- [4] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, S. Kato, H. Hisamatsu, M. Shimamoto and M. Shirai, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A21 4** (2003) 1436.
- [5] Y. Suetsugu, K. Shibata, A. Morishige, Y. Suzuki and M. Tsuchiya, *PRST-AB*, **9** (2006) 103501.
- [6] Y. Suetsugu and K. Shibata, *Proceedings of PAC2007* (June 25-30, Albuquerque, 2007), p.2587.
- [7] Y. Suetsugu, T. Kageyama, Y. Takeuchi and K. Shibata, *NIM-PR-A*, **533** (2004) 295.