

DEVELOPMENT OF A 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

^{B)} Kinzokugiken Co, Ltd.

713 Shake Aza Narihira, Ebina, Kanagawa, 243-0424

Abstract

A movable mask (collimator) with low beam impedance is proposed for high-intensity colliders. The mask head is supported by a dielectric rod, instead of a conventional metal block or rod, and that decreases the interference with beam. Based on the simulation study, the first test model was manufactured and installed into the KEK B-factory (KEKB) positron ring, and tested with the beams. The head and the support were made of alumina ceramic, and the head was coated by copper. Contrary to our expectation, however, excess heating of the head and the support was observed from a low beam current. High frequency HOM seemed to cause the considerable dielectric loss not only inside the support but also the head, which shaped an RF cavity due to the copper coating. The revised model is now under design based on the experience of the first test model.

低インピーダンス型可動マスクの開発

1. はじめに

可動マスク(コリメータ)とは、主に衝突型加速器において、正規のビーム軌道から外れて周回する荷電粒子を測定器の手前で遮断し、測定器のノイズを低減す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真空機器が加熱されたりしやすい。また、ビーム強度が高くなるとビームによるヘッドの損傷も問題となる。可動マスクは、将来の加速器を実現する上で重要な開発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]。まず、ビームインピーダンスを低減するために、セラミックス(誘電体)でマスクヘッドを支える。これにより、ビームとの干渉が減り、結果的にインピーダンスが小さくなる。また、マスクヘッドは、グラファイトまたは金属をコーティングしたセラミックスとする。これまで、捕捉モードのインピーダンス、ロスファクターなどの高周波特性を計算し、本構造の実現可能性を検討してきた。

今回、これらの検討結果を踏まえ、試作1号機を製作してKEK B-factory (KEKB)の陽電子リングに設置し、ビーム試験を行った。ビーム運転中にヘッドの温度、近傍のチェンバー温度、圧力等を測定した。ここでは、ビーム試験の結果、および今後の方針について報告する。

2. 試作1号機

試作1号機の内部を図1に示す。試作1号機の構造は、基本的には提案された構造と同じである^[5]。ただし、低電流での原理実証を目指すこと、および、製作を容易にすることから、幾つか単純化が図られた。すなわち、ヘッドはグラファイトではなく、銅(約10 μm)をコーティングしたアルミナ(99% Al_2O_3 , $\epsilon_r = 10$)とした。ヘッドは直方体で、幅6 mm、厚み4 mm、長さ90 mmである。長さ90 mmのアルミナは放射長約1.0に相当する。サポートも同じくアルミナで、サポートとヘッドは一体で焼成された。サポートをアルミナにした場合、ロスファクターはBN(窒化ほう素)を使用した場合よりも2-3倍大きい、従来型の可動マスクよりもまだ小さい。サポートは直方体で、幅6 mm、厚み4 mm、長さ33 mmである。サポートがあるため、ヘッドは完全に銅で覆われてはいなかった。これが後述する発熱問題の原因の一つとなった。サポートの側面には、ヘッドの余分な

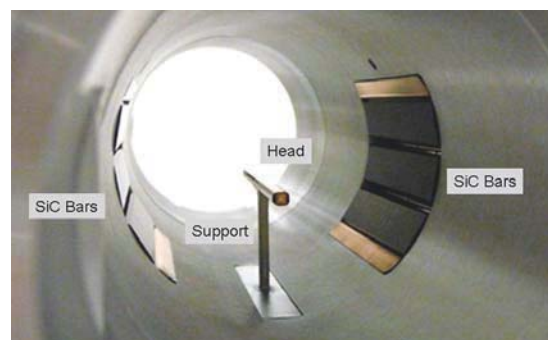


図1：試作1号機の内部。

¹ E-mail: yusuke.suetsugu@kek.jp

荷電を防ぐために、薄いチタンのコーティング(1 μm 以下)が施されている。コーティングの直流抵抗は2.5 k Ω であった。ヘッド傍のチェンバー内面には、幅15 mm、厚み10 mm、長さ90 mmのSiCロッドが計8本、HOM吸収体として備えられた。サポートがアルミナであるためサポートを通しての伝熱はほとんど期待できず、ヘッドへ入力したパワーは主に輻射によりチェンバー側に伝達されることになる。

3. ビームテスト

3.1 設置

2007年冬季シャットダウン中に、KEKB陽電子リング(LER)の既存する垂直方向可動マスクと入れ替えた。ヘッド中央部の温度は、サファイア窓を通して赤外温度計(波長1.6 μm)で測定した。近傍のベローズ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。これらの温度は発生するHOMの強度の目安となる。近くの圧力も常時観測された。

設置後、まず、可動マスクとしての機能を確認するためにヘッド位置を変えビームライフタイムの影響を調べた。70 mA (1389バンチ)蓄積時にヘッドをビームから3 mmまで近づけると、ライフタイムが100分ほど短くなることを確認した。

3.2 発熱問題

運転開始後間もなく、ビーム電流40 mA (51バンチ)にてヘッドが予想以上に発熱していることが判明した。放射温度計の輻射率を0.2に設定時、温度は約1000 Kであった。ヘッド付近に捕捉されるモードとビームによるジュール損から推定したヘッドへの入力パワーは0.11 Wであり、輻射率(ϵ)を0.02(きれいな銅)としても予想された温度は320 Kであった。

同じモードで数日の運転後、温度が70-80%低下した。これは、ヘッド表面の特性またはヘッドの構造が変化したものとして推定された。その後、温度は安定であったが、バンチフィルパターンに関わらず I_b^2/N_b に依存して変化した(I_b :ビーム電流、 N_b :バンチ

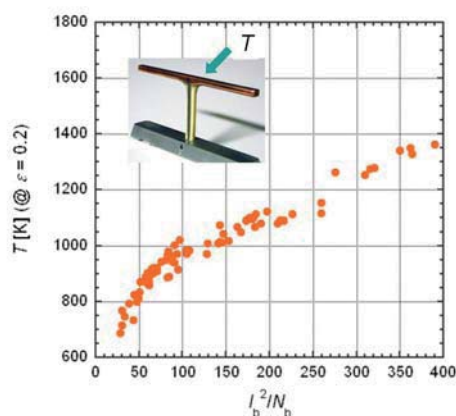


図2: ヘッド中央部の温度(T)の I_b^2/N_b (ビーム電流の2乗をバンチ数で割ったもの)に対する変化。放射温度計の輻射率は0.2とした。

数)。このことは、入力パワーがHOMであることを示唆する。図2に I_b^2/N_b に対する温度変化を示す。

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1600 K以上の発熱が観測された。この段階で、可動マスク内部を調べると、銅のコーティングがほとんど消失していた。また、ヘッドとサポートの接続部分のアルミナが溶融していることも確認された。

これらのことは、40 mA (51バンチ、 $I_b^2/N_b = 35 \text{ mA}^2$)でヘッド温度が800 K以上(銅の蒸気圧 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 以上)となって銅が蒸発し、さらに、ビーム電流700 mA (1389バンチ、 $I_b^2/N_b = 350 \text{ mA}^2$)でヘッド中央付近がアルミナの融点、すなわち2500 K近くまで温度に達したことを意味する。

3.3 解析・検討

この想定外の発熱の原因として下記の点が挙げられる:

- ヘッドの構造; 銅をコーティングしたアルミナヘッドは高周波空洞を形成し、内部で高周波が進入して誘電損により発熱した。アルミナのサポートはその窓となった。
- $\tan\delta$ (損失角)の増大; $\tan\delta$ の高周波および高温での増大について考慮が無かった。
- 輻射による熱伝達の過大評価。 $\epsilon = 0.2$ を仮定していた。

観測した発熱を定量的に考察するために、誘電損の温度依存性を含めて温度分布を再度評価した。MAFIAによって誘電体内の電界分布を求め、それを基に誘電損を計算し、温度分布をANSYSによって求めた。 $\tan\delta$ の温度変化として、ここでは温度に対して指数関数的に増大すると仮定した^[6]。具体的には、 $\log_{10}(\tan\delta) = 5.22 \times 10^{-4} \times T [\text{K}] - 2.27$ に従って変化するとした。例えば、300 K - 2000 Kで $\tan\delta \sim 0.008 - 0.06$ である。

図3は、銅をコーティングしたアルミナヘッドとアルミナサポートの時の電場分布である。確かにヘッド内部に高周波(10 GHz以上)のモードが見られた。推定された温度は、ビーム電流42 mA (51バンチ)で約880 Kと、蒸発するには十分な温度となった($\epsilon = 0.02$)。この時、 $\tan\delta = 0.016$ であった。ヘッド内のパワー密度は約0.002 W mm^{-3} 、ヘッド全体への入熱は4.3 Wであった。これは、捕捉モードとジュール損から見積もった値よりも遥かに大きい。

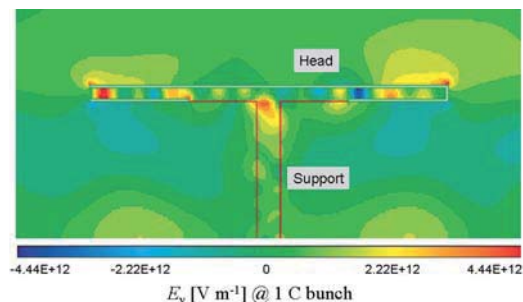


図3: ヘッド(銅メッキしたアルミナ)およびサポート(アルミナ)内の電場強度分布。

表 1 : 各種のヘッドとサポートを組み合わせた時のサポートの最大温度

Type	Head material	Support material	Support λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ϵ_r	ϵ	Max. T [K]	Max. T [K]	Loss Factor [V C^{-1}]
						$I_b^2/N_b = 353 \text{ mA}^2$	$I_b^2/N_b = 2000 \text{ mA}^2$	
1 ¹⁾	$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cu}$ ⁵⁾	Al_2O_3	0.01	10	0.5	(980 @ 35 mA^2)	—	1.4×10^{11}
2 ²⁾	Al_2O_3	Al_2O_3	0.01	10	0.5	2600	—	3.7×10^{11}
3 ³⁾	Graphite ⁶⁾	Al_2O_3	0.01	10	0.5	800	—	7.9×10^{10}
4 ³⁾	Graphite ⁶⁾	Quartz (SiO_2)	0.0015	4	0.5	700	> 2000	2.7×10^{10}
5 ³⁾	Graphite ⁶⁾	AlN	0.1	9	0.5	480	1200	7.9×10^{10}
6 ³⁾	Graphite ⁶⁾	BN	0.02	4	0.5	580	1100	2.7×10^{10}
7 ⁴⁾	Graphite ⁶⁾	Diamond (C)	0.5	6	0.4	410	730	2.1×10^{10}

1) 1号機。2) 銅が蒸発した後。3) サポートサイズ = $\phi 4 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ 。4) サポートサイズ = $1.2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ 。5) 銅に対して $\epsilon = 0.02$ 。6) 電気伝導率 = $1 \times 10^5 \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ 、輻射率 = 0.7。

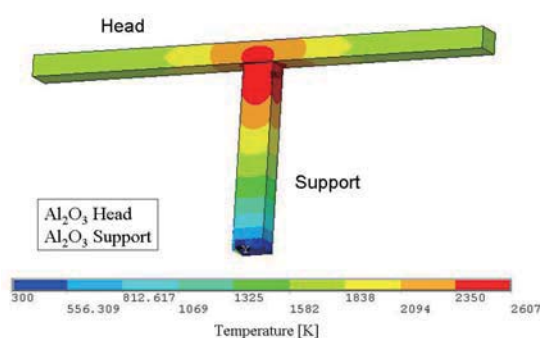


図 4 : 銅が蒸発した後のヘッドおよびサポートの温度分布。

銅のコーティングが蒸発してヘッドがアルミナだけになると、全く異なった構造のマスクとなる。ロスファクターは4倍ほど高くなり、計算では従来の構造とほぼ同じになる。実際、近くのベローズの温度は以前とほぼ同じであった。計算した誘電損はヘッドとサポートの接続部で最も大きかった(図4)。パワー密度は 1.2 W mm^{-3} に達した。推定される温は、700 mA (1389バンチ)で約2600 Kであった ($\tan \delta = 0.12$)。この温度は、アルミナの融点に近い。

このように、観測された発熱現象は、誘電損を考慮した無理のないパラメータで一応説明できる。誘電損が温度に対して指数関数的に増大するため、輻射熱伝達に頼りすぎると危ないことも分かった。

4. 次期試作機

次期試作機は、上記1号機の経験を踏まえて設計・検討が行われている。ヘッドは当初の設計通りグラファイトとする(導電率 $1 \times 10^5 \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$, $\epsilon = 0.7$)。ただし、サポートの材質は再検討する必要がある。サポート材質の候補としては、アルミナ(Al_2O_3)、窒化ほう素(BN)、窒化アルミ(AlN)、石英ガラス(SiO_2)、ダイヤモンド(C)が挙げられる。BNと石英は比誘電率(ϵ_r)が4程度と低いのが特長である。比誘電率が小さいとロスファクターも小さくなる。窒化アルミはアルミナと同程度の誘電率($\epsilon_r = 9$)であるが、熱伝導率が大きい(室温でアルミと同程度)。一方、ダイヤモンドは、誘電率は6程度であり、また熱伝導率が非常に高く、室温では銅よりも高い

(> $1000 \text{ Wmm}^{-1}\text{K}^{-1}$)。

これらの組み合わせで、発熱問題を解析した際と同様の方法、パラメータで温度分布を推定した。なお、計算では熱伝導率を室温の約半分とした。700 mA (1389バンチ, $I_b^2/N_b = 350 \text{ mA}^2$) と 約1700 mA (1389バンチ, $I_b^2/N_b = 2000 \text{ mA}^2$)における、誘電体上での最大温度を表1にまとめている。同時にロスファクターと計算に用いた主なパラメータ値も示している。ここで、1700 mA (1389バンチ)はKEKBでの典型的な運転モードである。最も有力な組み合わせは、グラファイトヘッドとダイヤモンドサポートである。ダイヤモンドの高い導電率がヘッドおよびサポートの温度を安定化している。現在この組み合わせでの試作2号機の検討を始めている。ただし、この組み合わせでは、Super-Bで想定されている10A (5000バンチ, $I_b^2/N_b = 20000 \text{ mA}^2$)では使用できない。さらなる検討が必要である。

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] W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics (Second Edition)", John Wiley & Sons, Inc., 1976.