

SuperKEKB 用 Low-Z コリメータヘッドの開発 DEVELOPMENT OF LOW-Z COLLIMATOR FOR SUPERKEKB

照井真司[#], 石橋拓弥, 阿部哲郎, 船越義裕
Shinji Terui[#], Takuya Ishibashi, Tetsuo Abe, Yoshihiro Funakoshi
KEK Accelerator Laboratory

Abstract

SuperKEKB type collimators have been installed to suppress backgrounds in a particle detector named Belle II. They have contributed steady operations in SuperKEKB, however a problem found in the commissioning. A tip part of collimator jaws made from a tungsten was damaged by hitting uncontrollable beam. After this accident, Belle II sometimes was not able to take data because the background signal is too high. Low-Z collimator jaw, that is durable through hitting uncontrollable beam compared to the heavy metal jaws such as the tungsten, has been designed in order to protect important components (mainly collimators near Belle II) as a solution for the problem. We decided to apply a carbon composite as the low-Z material. We report the features of the low-Z collimator, and results of a high frequency characteristic, a dust generation test and so on.

1. はじめに

SuperKEKB は KEKB のルミノシティの約 40 倍($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)を目指す電子・陽電子衝突型加速器で、その目的は標準理論を越えた新しい物理を探索することである。主リング(Main Ring: MR)は 7 GeV 電子リング(High Energy Ring: HER)と 4 GeV 陽電子リング (Low Energy Ring: LER)から成る。ルミノシティの目標値を達成するため、SuperKEKB では蓄積電流を 2.6 A(HER)、3.6 A(LER)、衝突点における垂直方向ベータ関数(βy^*)を 0.30 mm(HER)、0.27 mm(LER)にすることを目標している[1]。SuperKEKB では、KEKB に比べて衝突点における垂直方向ビームサイズを小さくするため、局所的にベータ関数が大きくなる場所があり、また、蓄積電流も KEKB に比べて上がったため、素粒子検出器のバックグラウンドは増加する[2]。素粒子検出器が安定的に稼働できるようにするため、バックグラウンド低減用のコリメータは必要不可欠なものである[3]。しかし、運転中にビームがコリメータに衝突して損傷する事象がこれまでに数回起きた。損傷したコリメータは、損傷前よりバックグラウンドを低減する能力が下がることがわかってきた。損傷具合によっては、バックグラウンドの低減が十分できなくなり、素粒子検出器が稼働できなくなる。したがって、このトラブルの対応策は、プロジェクトにとって非常に重要なものであると認識されるようになった。我々は、この事象に対応するためにコンポーネント保護に特化したコリメータの検討を始めた。

2. コリメータの損傷

2.1 コリメータ損傷

ビームが衝突してのコリメータの損傷は、2020 年 8 月現在までに 4 回起きている。損傷したコリメータは、全て垂直方向コリメータである。これは軌道やエネルギーが何らかの理由で異常な状態になったビームが、リング内

の XY カップリングが原因で、Y 方向に振動するようになり、一番アパーチャーが小さい垂直方向コリメータに当たるためだと考えている。垂直方向コリメータの、断面図を Fig. 1 に示す。二つのコリメータヘッドが向かい合う構造で可動式になっている。コリメータヘッドの先端のビームを削る部分には、放射長が短く、高融点のタングステンを使用している。Figure 2(a)に、ビームが衝突して損傷したコリメータヘッドを示す。Figure 2(b)に、損傷したものの反対側のコリメータヘッドを示す。Figure 2(b)には、蒸発したタングステンがくっついているのがわかる。ビームは Fig. 2(a)の右側から左側に進んでいた。ここから、ビームが衝突してある程度の距離を過ぎてからタングステンが溶けていることがわかる。これは、ビームがタングステンを

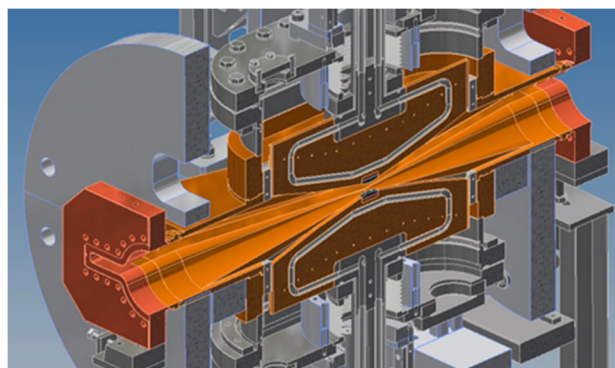


Figure 1: Vertical collimator for SuperKEKB.

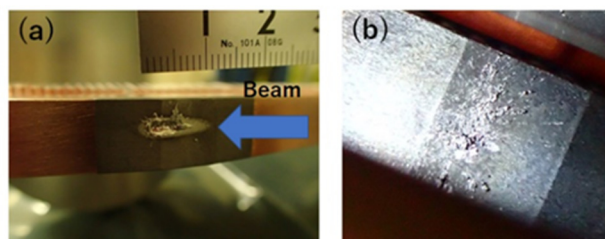


Figure 2: The photograph of (a) a damaged jaw, (b) a jaw of opposite side of a damaged jaw.

[#] sterui@mail.kek.jp

通り抜ける際に、ペアクリエーションを起こし、粒子が増えていきその energy deposit によりタングステン（タングステン）の温度が沸点（昇華点）を超え、蒸発（昇華）したと考えている。

2.2 コリメータ損傷の影響

Phase-3 2019c 運転のときのコリメータ損傷前後のバックグラウンドの変化を Fig. 3 に示す。800 mA 程度の高いビーム電流の時、損傷後のバックグラウンドは損傷前の 10 倍近く高くなっていることがわかる。この損傷後はバックグラウンドが大きいため、ビーム電流が高い時には、素粒子検出器を立ち上げることはできなかった。

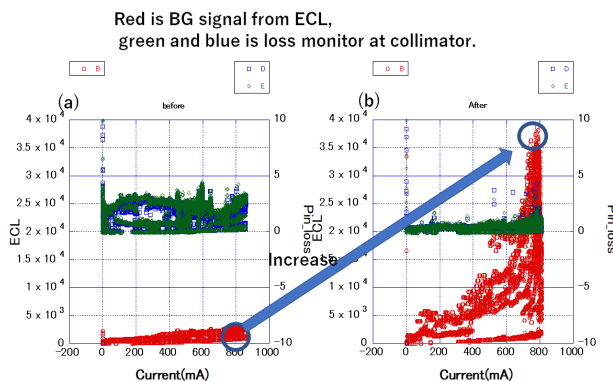


Figure 3: Background and loss monitor signal (a) before a jaw damaged event and (b) after it.

2.3 コリメータ損傷の原因

コリメータ損傷の原因となった異常なビームは、ビームにダストが衝突したことにより、急激にエネルギーが変化したことにより生じたと考えている[4]。バンチオシレーションモニターで取得したデータでは、アボート数ターン前にビームインテンシティが少なくなったことがわかった。Figure 4 に示すバンチオシレーションモニターの図は、横軸がバケットナンバーで、縦軸が(バンチインテンシティ) × (バンチ振動)である。ビーム振動などの不安定性が見えない中で急激なアボートだということと、真空バーストが観察されたことから、ダストが原因だと予想した。この考察については参考文献[4]を参照願いたい。



Figure 4: Bunch oscillation monitor signals in a damaged event.

3. Low-Z コリメータヘッドについて

3.1 材料の選択

材料の選択を行うときに、2 つの異なる方法が議論された。重たい物質をビーム進行方向に薄くして使用することで、energy deposit が少なくさせる方法と、軽い物質を使用することで energy deposit が少なくさせる方法である。

タングステン等の重たい物質を使用する際は、ビーム進行方向に対して非常に薄くする必要が出てくるため、ワイヤーのような形状しなくてはならないが、ビームインピーダンスの観点から SuperKEKB で使用することは難しいという結論になった。軽い物質の候補を絞るために、サンプルにビームを打ち込んだ時の、1 放射長の点での最大温度と融点を調べた。その結果、候補となる材料はカーボンとチタンとアルミニウムに絞られた。計算条件を、以下に示す。ターゲットは円柱型で厚さは 2 放射長で、直径は 10 mm である。ビームエネルギーは 4 GeV、ビームサイズは直径 0.5 mm、ビーム電流は 50 mA である。Figure 5 に計算結果を示す。計算は FLUKA を用いて行った。この計算で、融点より最大温度が低かったのは、チタン、アルミニウム、カーボンである。チタンは、KEKB 時代に採用したが、何度も損傷したため、今回は採用しなかった。アルミニウムは、融点の低さが問題となり、採用しなかった。したがって、候補はカーボン一択となった。我々のグループでは使用実績がないが、LHC のコリメータで使用実績があることも、採用の要因であった[5]。

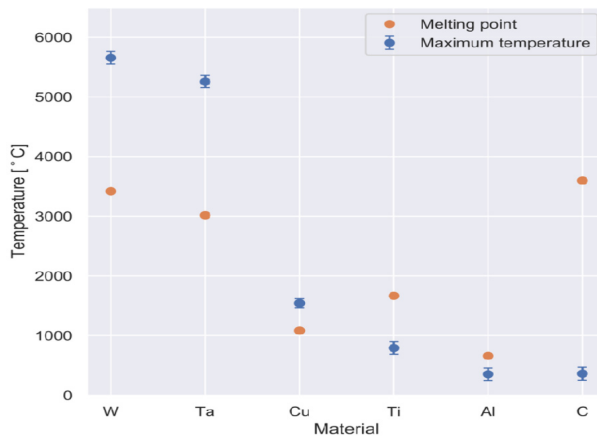


Figure 5: Comparison between maximum temperature within 1 RL and melting points.

3.2 コンポーネント保護用のコリメータの構造

我々は、カーボンが SuperKEKB のコリメータとして使用できるかの検討を行った。素粒子検出器グループから、1年以内にインストールすることを求められたため、短期間で開発しなくてはいけなかった。開発期間が短いため、SuperKEKB タイプのコリメータチェンバーはそのまま使用して、ヘッドだけを交換して対応することを前提に計算と試験を行った。検討事項としては多くのことが挙げられた。カーボンが取り付けられたコリメータヘッドの冷却をどうするのか、カーボン使用するためから出てくるダストは問題にならないか、ビームインピーダンスの観点から問題にならないか等を調べる必要がでてきた。これらの項目について、以下で詳細を記述していく。

3.3 コリメータヘッドの構造について

カーボンのコリメータヘッドの先端に取り付け使用するには、構造的には以下の2つを満たしている必要がある。**resistive wall**などが原因でヘッド先端は熱くなるので、それを徐熱できる構造であること、隙間がある場合には、その隙間で放電する可能性があるためできるだけ隙間がないことである。LHC では、参考文献[5]のようにカーボンと銅との接触は、ばねを用いて行っている。このばねを用いる方法は SuperKEKB のようなバンチ長が短い加速器では、放電の危険性が非常に大きい。SuperKEKB で使用する場合、エネルギーや加速している粒子が違うため、LHC の加速器と比べてカーボンのビーム進行方向長さが短くできる。LHC のカーボンコリメータのビーム進行方向長さは、1200 mm 以上[5]であるが、SuperKEKB での必要長さは、50~200 mm と考えられた。カーボンの長さが短いため、接合した場合でも、銅との熱膨張の差が原因で生じるカーボンへの応力は比較的小さくなる。我々はカーボンと銅のロウ付けでの接合が J-PARC で使用実績[6]があることから、これを採用できないかと考え、試験を行った。ロウ付けの利点としては、接合性が高いため徐熱には向いていることと、放電が起きる可能性がある隙間ができにくいことが挙げられる。接合の試験を行った結果、問題なく接合できていることが分かった。UT 検査でも問題は見つからなかった。Figure 6 が、銅とカーボンの接合サンプルである。カーボンの大きさは、100 mm×10 mm ×12 mm である。

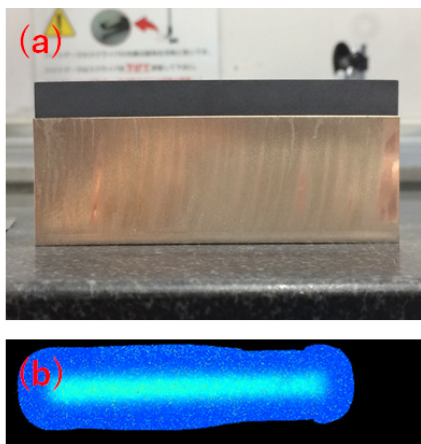


Figure 6: (a) Photograph of a test piece for bonding between carbon and copper and (b) image of an ultrasonic test for the bonding soundness check.

3.4 スキャタリングされた粒子のビームトラッキング

Low-Z の物質をコリメータヘッド先端に使用する場合には、コリメータでスキャタリングされた粒子が、素粒子検出器に飛び込み、壊す危険性がないかということも確認しなければならない。PHITS でコリメータヘッドにビームを打ち込むシミュレーションを行い[7,8]、その計算結果を用いて、SAD でスキャタリングされた粒子のシングルターンビームトラッキングを行い、素粒子検出器がある衝突点でロスする粒子があるのかを調べた。計算条件は、以下である。ビームエネルギーは 4 GeV とした。オプティクスは、 βy^* が1 mm の時のものを用いた。コリメータの

ビーム中心からのハーフギャップは 2 mm で、コリメータヘッドに角度をつけずに衝突するものとした。カーボンの密度は 1.75 g cm⁻³、コリメータヘッド設置場所は D06V1 (設置位置の詳細は Fig. 7 に示す)とした。

カーボンの長さ 50 mm のときの計算結果を、Fig. 8 に示す。縦軸の 0 は、衝突点である。横軸は基準エネルギーとのずれを示している。エネルギーや軌道がずれたほとんどの粒子は、青丸で囲まれた D06V1 直下流にある垂直方向コリメータ(D06V2)と、橙丸で囲まれたアーク部にある水平方向コリメータ(D02H3、D02H1)でロスされるということがわかった。赤丸で囲まれたエネルギーや軌道があまりずれなかった粒子は、衝突点でもロスされず、生き残るということがわかった。以上のことから、カーボンの長さは 50 mm 以上あればよいことが分かった。しかし、これは角度をつけずに、コリメータヘッドにビームがぶつかった場合であるので、角度をもってぶつかり、そのときのビームの侵入深さが 50 mm 以下のときはその限りではない。安全のためには、カーボンの長さは、できるだけ長いことが望ましい。しかし、カーボンの長さが長いと、3.6 節で述べる横方向インピーダンス増加の問題があるため、我々は、50 mm 以上で、横方向インピーダンス増加が許容できる範囲のものを製作して、LER 内に1台インストールしてみて試験するという方針をとることとした。

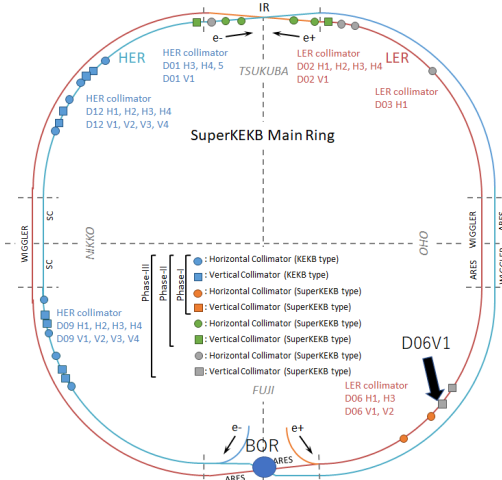


Figure 7: Collimator's location in MR.

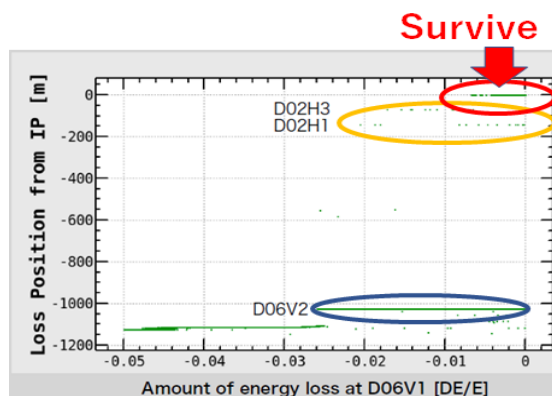


Figure 8: Loss position of particles which is scattered at the low-Z jaw simulated by a beam tracking.

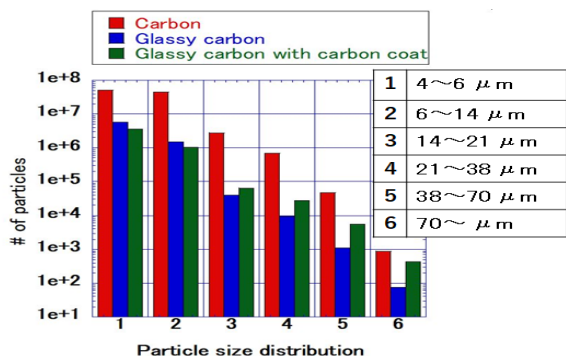


Figure 9: Measurements of the number of dusts generated from carbon samples sorted by the particle sizes.

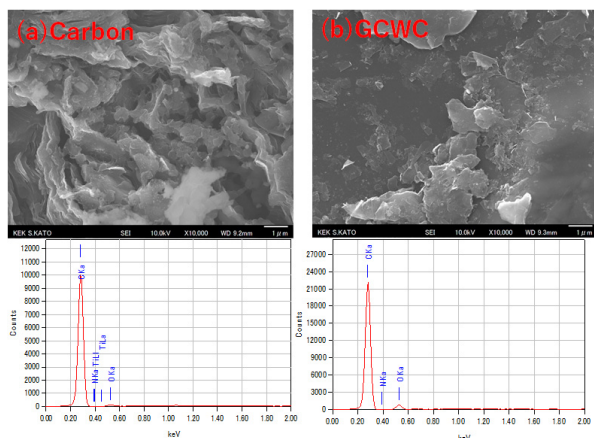


Figure 10: Photograph of electron microscope and results of element analysis for (a) a carbon and (b) GCWC.

3.5 カーボンからのダスト発生

カーボンを垂直方向コリメータの先端に付ける場合、カーボンから出てくるダストが、非常に少ないものを選ぶ必要がある。この理由は、ダストが重力で落ちてビームにぶつかった際に、ビームがエネルギーをロスして異常な軌道を通り、加速器内のコンポーネントを損傷させる可能性があるためである。カーボンから発生するダストについて調べるために、液中でカーボンから出てくる粒子の大きさと量を調べた。カーボン、Glassy Carbon(GC)、Glassy Carbon With Carbon coat(GCWC)のサンプルのダストの量を Fig. 9 に示す。GC とはカーボンのポーラスな部分に、カーボンガラスを含浸し焼結したものである。サンプルの大きさは、 100×10 mm である。Figure 9 の横軸の 1-6 は、粒子径の分類である。ここから、GC と GCWC は、カーボンに比べてダストが少ないことがわかった。その後、GC と GCWC のサンプルの接合試験をした結果、GC では接合がうまくいかないが、GCWC では接合ができることがわかったため、実機は GCWC で製作することとした。カーボンと GCWC の表面を電子顕微鏡で観察した写真と、元素分析の結果を Fig. 10 に示す。ここから、写真からは GCWC の表面のほうが、空隙が少ないことがわかる。ダストは、空隙から出てくると予想していたので、この写真の結果は予想とあっていた。また、元素分析からは両方ともカーボン以外の元素がほとんどないことがわかる。

3.6 ビームインピーダンス

SuperKEKB で問題になることの一つに、Transverse Mode Coupling Instability(TMCI)がある。これは横方向インピーダンスが大きいと、バンチ電流をこのビーム不安定性の閾値以上にできないというものである。そして、SuperKEKB での最も大きい横方向インピーダンス源は、コリメータであるので、この対処は非常に重要となる。バックグラウンドを減らす SuperKEKB タイプのコリメータのヘッドの材質は、タングステンとタンタルである。この理由は、高融点であることと、放射長が短いため、ヘッド先端の長さを短くする(現在使用しているものは長さが 5 mm または 10 mm である)ことができ、横方向インピーダンスを減らせるためである。今回開発する low-Z コリメータヘッドは、放射長が長いため、今までのものに比べて横方向インピーダンスが大きくなる。インピーダンスの計算を、GdfidL[9]を用いて行った。計算条件は、バンチ長 6 mm、ハーフギャップは 1.3 mm、コリメータヘッドの長さ 60 mm、Wake length は 10 m である。ビーム垂直方向の実数部の Wake Impedance を Fig. 11 に示す。1 GHz 付近に trapped mode があることがわかる。このため、low-Z コリメータヘッドの近くに、HOM 吸収体を設置することにした。HOM 吸収体についての詳細は、参考文献[10]を参照願いたい。 βy^* が 1 mm のオブティクスするとき、TMCI でリミットされるバンチ電流の値を計算した。計算結果を Table 1 に示す。緑字がタンタルの時のキックファクターで、赤字がカーボンの時のキックファクターである。この結果から、 βy^* が 1 mm のときであれば、デザインバンチ電流 (1.44 mA) まで到達可能なことがわかった。しかし、設計値の βy^* が 0.27 mm のときは、0.79 mA までしか到

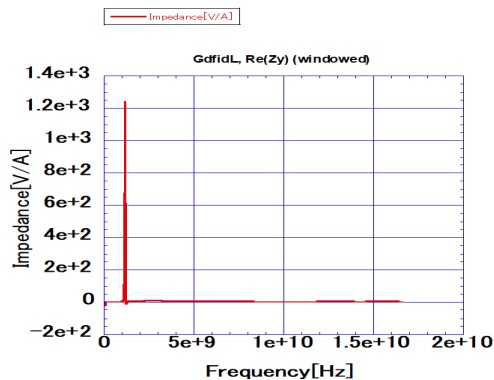


Figure 11: Real part of the impedance (beam transverse direction) in the low-Z collimator.

Table 1: Threshold of Bunch Current in TMCI

Collimator	βy [m]	aperture [mm]	kT [V/pC/m] Tantalum	kT [V/pC/m] VerLow-Z Ver
D06V1	61.4	± 2.6	279	398
D06V2	19.2	± 1.8	490	490
D02V1	14.6	± 1.4	688	688
QC1	782.2	13.5		
Threshold bunch current[mA]			2.15	1.8

達できないので、これを解決するためには何らかの対策が必要となる。

3.7 カーボンの高周波領域の抵抗

SuperKEKB のバンチ長は約 6 mm と短いので、このビームは非常に高い高周波成分を持っている。したがって、コリメータのようにビーム中心近くまで近づけるコンポーネントでは、材質の特性を調べるのが非常に重要になる。カーボンは金属のように直流電流を通すが、作製方法次第では高周波吸収の特性を持つことが報告されている[11]。我々は、Fig. 12 のような空洞を作成して、Q 値を測定することで、カーボンの高周波表皮抵抗の測定を試みた。空洞が大きい場合、測定できる周波数が低くでき、空洞とサンプルの隙間などが原因の誤差を小さくできる。しかし、カーボンの場合、サンプルが通常販売しているものより大きくなった場合、炉などの関係で製造が難しい場合がある。今回の測定では、測定のしやすさとサンプルの大きさの関係から、空洞の大きさを決定した(内径:96 mm)。空洞は、Fig. 13 のように縮退モード(TE₀₁₁ と TM₁₁₁)を分離するために、空洞内に溝をつけた。この空洞の特徴は、Fig. 13 の TE モードを見ればわかるように、空洞の端板の材料を変えるだけで、その材料の高周波領域の電気伝導度が測れることである。最初に、銅の端板を用いて、モードの分離ができていたかを確認した。このときの縮退が解けたモード間の周波数差の測定値は 22 MHz となり、計算と一致した。5.04 GHz にて測定した TE₀₁₁ モードの Q 値から、金属の高周波表皮抵抗の特性を仮定して算出した直流抵抗値は 3.33

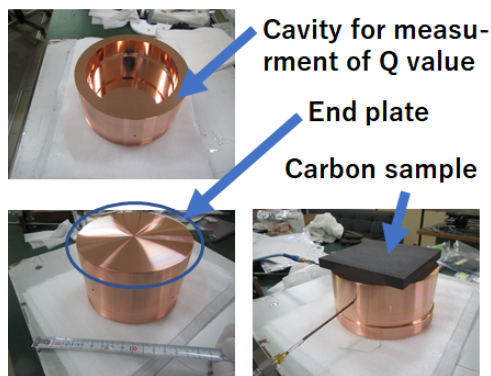


Figure 12: Photograph of a cavity for the RF surface resistance measurement.

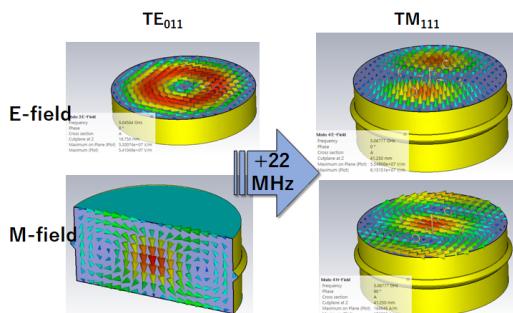


Figure 13: Excited modes in the cavity, where the TE₀₁₁ mode is used for the RF surface resistance measurement.

×10⁵ Ω・m であった。これは、実際の直流抵抗測定値(約 3×10⁵ Ω・m)に非常に近い。つまり、このカーボンサンプルは、直流から 5.04 GHz まで、金属と同様の高周波吸収特性を持っており、高い周波数で高周波吸収が特段大きくなることはないと推測できる。

4. まとめと今後の予定

ここまでの記述で、low-Z コリメータの必要な理由と、low-Z コリメータを SuperKEKB で使用するための計算と試験の結果を示した。この計算と試験の結果から、致命的な問題は見つからなかったため、今秋から行われる加速器運転に間に合うようにインストールを行う。

インストール後の試験内容は以下の 4 つを考えている。

- 1) コリメータのギャップを変えた時のチューンシフト量を測ることで、インピーダンスの計算結果と合っているのかを確認する、
- 2) ロスモニターや素粒子検出器での信号の変化を観察することで、トラッキング結果と矛盾していないかを調べる、
- 3) ビームの高周波成分や放射光からの影響で、放電が起きていないか、放出されるガスが予想より大きくないかを、近くの圧力計を用いて調べる、
- 4) コリメータで励振される wake field をモニターする。このために、コリメータ近傍に電極付きチェンバーをインストールする。現在のコリメータでも入射時に、コリメータで励振される wake field の影響を示唆するデータがでてきているので、今後注意深く観察する予定である。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Accelerator design at SuperKEKB. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2013(3), 2013.
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, Beam Background and MDI Design for SuperKEKB/Belle-II. Conf. Proc., C110904:3703-3705, 2011.
- [3] T. Ishibashi *et al.*, Movable collimator system for SuperKEKB. PRAB 23, 053501 (2020).
- [4] S. Terui *et al.*, "Observation of pressure bursts in SuperKEKB LER", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 145-149.
- [5] A. Bertarelli, *et al.*, "The Mechanical Design for the LHC Collimators"; https://www.researchgate.net/publication/42854161_The_Mechanical_Design_for_the_LHC_Collimators
- [6] K. Hirano *et al.*, "DEVELOPMENT OF RF CHOPPER SYSTEM AT J-PARC LINAC", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 858-861.
- [7] S. Tatsuhiro *et al.*, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.16, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018).
- [8] Y. Wu *et al.* CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC, Ann. Nucl. Energy, 82, 161-168 (2015).
- [9] <http://www.gdfidl.de/>
- [10] S. Terui *et al.*, "Development of SiC absorbers for the SuperKEKB vacuum system", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July. 31 - Aug. 3, 2019, pp. 911-915.
- [11] S. Miyoshi *et al.*, "Study on Radio Absorptive Material with Shielding Material using Carbon"; https://www.jstage.jst.go.jp/article/tvtr/20/72/20_KJ0001961905/_pdf-char/ja