

SuperKEKB 用新規コリメータヘッド素材候補の調査

INVESTIGATION OF NEW COLLIMATOR HEAD MATERIAL CANDIDATES FOR SuperKEKB

照井真司^{#, A)}, 石橋拓弥^{A)}, ナトチーアンドリー^{B)}, 劉清源^{C)},
金秀光^{A)}, 白井満^{A)}, ヤオムーリー^{A)}, 柴田恭^{A)}, 阿部哲郎^{A)}
Shinji Terui^{#, A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Andrii Natochii^{B)}, Qingyuan Liu^{C)},
Xiuguang Jin^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Mulee Yao^{A)}, Kyo Shibata^{A)}, Tetsuo Abe^{A)}

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

^{B)} Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y. 11973-5000 USA

^{C)} University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822, USA

Abstract

Currently, SuperKEKB faces the challenge of sudden beam loss (SBL), which occurs with almost no prior sign. The causes of SBL are not fully understood. A damaged collimator reduces its ability to suppress beam background noise compared to an undamaged one. In cases that the beam background noise reduction decrease, it is necessary to stop the operation and replace the collimator jaw. Therefore, a robust collimator head material is required. In this conference, we report the results of our investigation of copper-carbide graphite (CuGr), which is a candidate as a new collimator head material for SuperKEKB. Measurements of electrical conductivity in the high-frequency region, secondary electron yield, outgassing rate due to photon stimulated desorption, and the amount of dust generated by ultrasonic cleaning of CuGr, along with simulation results of beam background with CuGr, are presented.

1. はじめに

SuperKEKB は電子・陽電子衝突型加速器であり、前身である KEKB のルミノシティを飛躍的に向上させることを目指す。衝突点に置かれた Belle II 検出器は標準理論を越えた新しい物理を探索することを目的としている[1]。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。高ルミノシティを実現するため、設計ビーム電流は、LER が 3.6A、HER が 2.6A となっており、それぞれ KEKB の約 2 倍に相当する[2]。ルミノシティを向上させるため SuperKEKB では、KEB に比べて衝突点における垂直方向ビームサイズを極小にすることを旨とする。このため、衝突点近傍の最終収束マグネット(QCS)[3]内ではベータ関数が非常に大きくなる。このことが原因で、素粒子検出器の beam background noise(BG)は増加する。素粒子検出器を安定的に稼働できるようにするためには、KEKB 時代以上に BG を低減させるコリメータの役割は重要となっている[4]。しかし、実際の運転中では、ビームが垂直方向コリメータに衝突して損傷する事象が起きている。損傷した垂直方向コリメータは、損傷前より BG を低減する能力が下がることがわかってきた。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ジット保護の機能を兼ねたコリメータの検討を始めた。

本学会では、新規のコリメータヘッド候補材料として考えている銅含有グラファイト(CuGr)の 2 次電子放出率、光刺激脱離(Photon Stimulated Desorption; PSD)ガス、

[#] sterui@mail.kek.jp

高周波領域での電気伝導度、材料からのダストなどの測定結果と、CuGr を用いた場合のビームバックグラウンドシミュレーションの結果について報告する。

2. コリメータ損傷の影響

SuperKEKB では、Sudden beam loss(SBL)[5]と呼ばれるビームロスの際に、コリメータヘッドにビームが衝突して、コリメータヘッドが損傷する現象が、10 回以上起きている。2024 年のビームスタディで、ダストや放電と関係ある現象であることは確認できたが、メカニズムは完璧には理解されていない。SuperKEKB のコリメータの配置図を Fig. 1 に示す。この図中の IR は interaction region の略である。SBL が原因で損傷したコリメータジョーの写真を、Fig. 2 に示す。Figure 2(a)は、コリメータチャンバーのフランジから撮影した写真である。チャンバー内にダストが飛び散っていることがわかる。Figure 2(b)は、コリメータジョーをチャンバーから取り外して、撮影したコリメータジョーである。ここから、ヘッドにくぼみができていることがわかる。この写真のコリメータヘッドの素材は、タンタルである。タンタルが使用されたのは、高融点であることと、放射長が短いためヘッド長が短くできるのでインピーダンスを小さくできることが理由である。SuperKEKB 運転初期は、タングステンを使用していたが、ビームが当たった際の高温の影響により、脆化を起し、放射化したタングステンの破片がビームパイプ内部に散乱して、内部被ばくの危険性が出たため、新たな使用をやめた。2020 年には、ビームが当たっても損傷しにくい carbon-fibre-composite (CFC) を、コリメータヘッド材料としたコリメータ (low-Z collimator)[6]を D06V1 にインストールした。Low-Z collimator は、ビームが当たって損傷することはなかつ

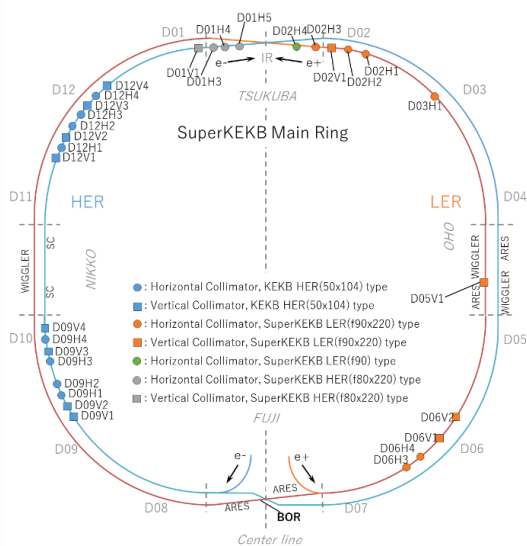


Figure 1: Location of the KEKB-type and SuperKEKB-type collimators in the SuperKEKB main rings. Here, H and V in the collimator names represent the horizontal and vertical collimators, respectively.

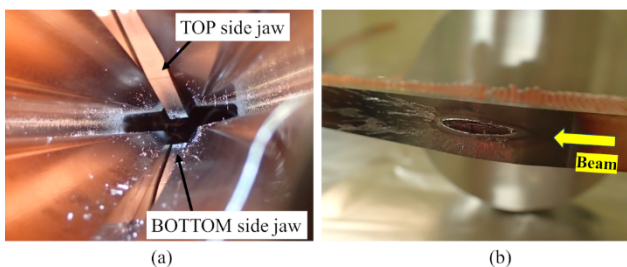


Figure 2: (a) Photograph of the inside of the collimator taken from the collimator chamber flange, and (b) collimator jaws removed from the collimator chamber.

たが、インピーダンスの影響で垂直方向ビームサイズが増大する現象が起きたため、使用するのを諦め、現在 D06V1 のヘッド材料はチタンを試験的に使用している。

ここでは、SBL によって、コリメータヘッドが損傷することの悪影響について簡単に記述する。

2022 年の運転中の BG 変化状況を、Fig. 3 に示す。この図から、コリメータ損傷後から BG が増えていることがわかる。これは、コリメータヘッドが Fig. 2 の状態になった場合には、ビームがコリメータヘッドにできたどげの部分でスカッターされたことが原因ではないかと推測されている。このコリメータ損傷の悪影響は、SuperKEKB 運転の大きな障害になっているため、対応策が求められている。我々は、グラファイト程度の損傷しにくさを持ち、low-z collimator よりインピーダンスが低いコリメータの開発のために、新規コリメータヘッド材料の調査を始めた。

3. 新規コリメータヘッド材料の調査

3.1 新規コリメータヘッド材料調査の概要

SuperKEKB のようなリング型電子・陽電子コライダーの新規コリメータヘッド材料には、低いガス放出率(放射光照射による光刺激脱離も含む)、高い電気伝導度、低い2次電子放出率、冷却用金属との接合しやすさなどの多くのことが求められる。SuperKEKB のビームサイズが小さいことと、ビーム電流が高いことから、全てのビームが当たった場合には、一般的に真空チェンバー内で使用できる材料は、融点を超えるということがわかっている。特に、金属材料では融点を超えるまでのビーム電流が低いことがわかる。我々は、金属材料より融点を超えるまでのビーム電流値が高いグラファイト系の材料について調べることにした。この章では、CuGr がコリメータヘッド材料に適応可能かどうかを調べた結果を記述する。比較のために low-Z collimator のヘッド材料として用いた CFC[7]と、CERN のコリメータヘッドの材料として使用されている MoGr(モリブデン含有グラファイト)[8]の調査結

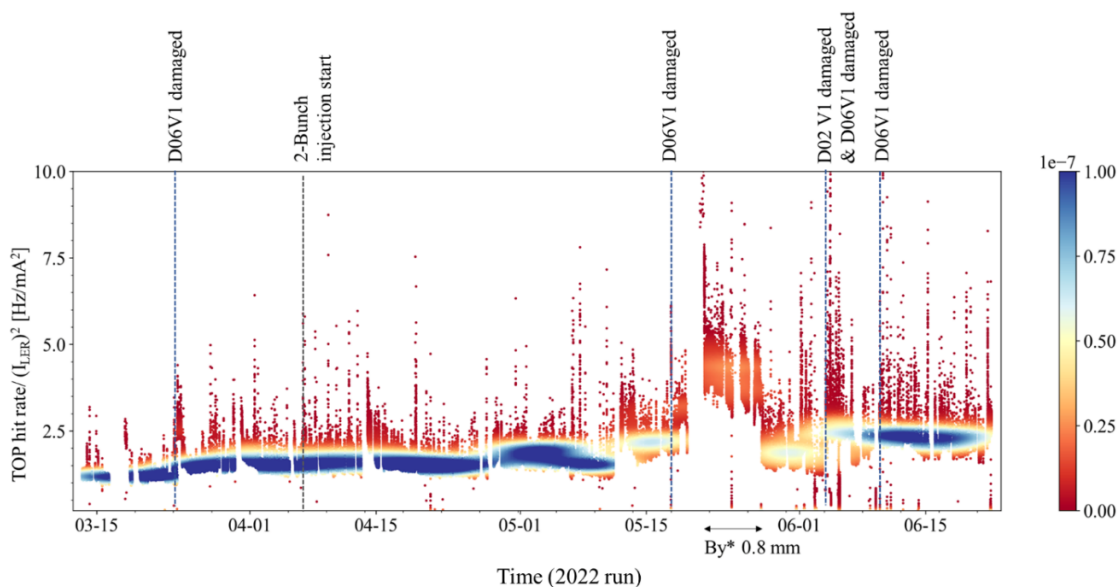


Figure 3: History of BG fluctuations during 2022 run.

果も記述する。以下では、調査材料をサンプルと表記する。

3.2 表面の調査

サンプルがどのような表面構造になっているかを電子顕微鏡で観察した結果を Fig. 4 に示す。Figure 4 から、CuGr は、CFC に比べて膜が積層されたような呼応増になっていることがわかる。また、MoGr は、表面が滑らかな状態であるということもわかる。

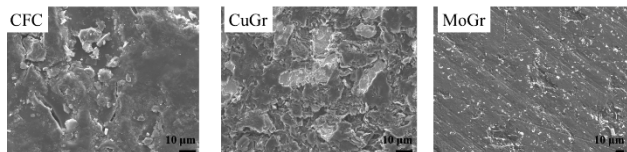


Figure 4: Electron microscope pictures of CFC and CuGr and MoGr samples.

3.3 接合試験

SuperKEKB で使用するコリメータヘッドは、resistive wall などが原因で大きな熱負荷を受けるため徐熱する必要があり、また、パンチ長が短いため隙間があると、その隙間で放電する可能性があるためできるだけ隙間を少なくする必要がある。LHC では、参考文献[9]のように MoGr 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 のようなパンチ長が短い加速器では、放電の危険性が非常に大きいため、我々は採用しなかった。通常のコリメータヘッドで用いられているタンタルはコリメータジョーボディ部の銅と、密着度が非常に良い Hot Isostatic Pressing(HIP)で接合している。しかし、グラファイト系の材料は曲げや引張などの応力に弱いため、HIP で接合すると割れてしまうので、我々はろう付けを採用することにした。Figure 5 に、CuGr と銅の接合サンプルを示す。ちなみに、MoGr は、いろいろなろう材や、メッキなどを試したが、接合することができなかった。

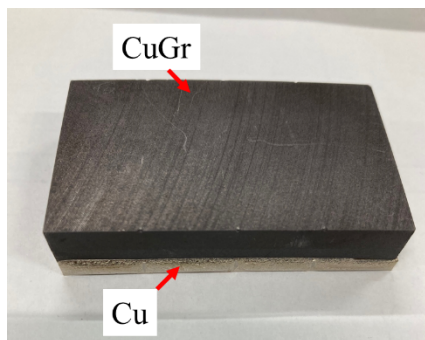


Figure 5: Photograph of a test piece for bonding between CuGr and copper.

3.4 ガス放出率

SuperKEKB でのビームライフタイムは、タウチェックの影響が支配的であり、残留ガスとの散乱によるビームライフタイムへの影響は小さい。しかし、ビームと残留ガスとの散乱は、素粒子検出器でのビームバックグラウンドノイズ

に大きく影響するため、SuperKEKB ビームパイプ内の圧力は超高真空を保つ必要がある。電子・陽電子のリング型加速器でのビーム運転中の動的ガス放出としては、synchrotron radiation (SR)照射部の温度上昇や higher order mode による温度上昇による熱脱離と、SR 照射による光刺激脱離 (PSD) に大別され、SuperKEKB でのビームパイプ内の圧力上昇の主要因は、PSD である。

我々は、photon factory (PF)の BL21 で、サンプルの PSD を測定した[10]。PSD 測定装置の概念図を、Fig. 6 に示す。SR は、scraper で成形して、サンプルに照射される。サンプルが高温にならないように、冷却水でサンプルは冷却されるシステムになっている。SR 照射試験の結果を Fig. 7 に示す。Figure 7 は、横軸に photon dose をとって、縦軸に PSD yield (η)をとったものである。銅と比較した場合、CuGr も MoGr とほぼ同等の値になっていることがわかる。したがって、CFCからのガス放出は、運転に悪影響を与えないと予想される。

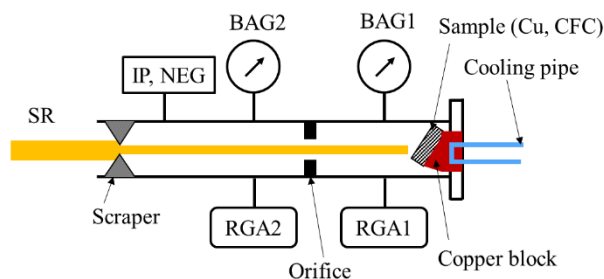


Figure 6: Schematic drawing of PSD measurement system at PF BL21.

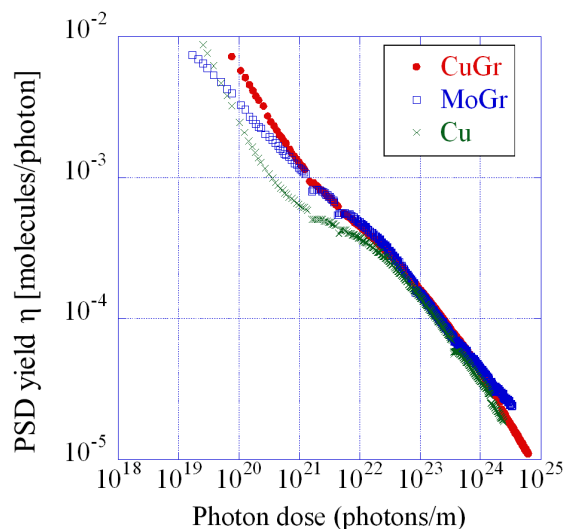


Figure 7: Result of CuGr, MoGr and copper of PSD measurement.

3.5 2次電子放出率

SuperKEKB LER では、将来の大電流時には電子雲不安定性が問題になる可能性がある。電子雲不安定性

が起きた場合には、ビームサイズが増大してしまい、その影響でルミノシティを高くすることができなくなる。電子雲は、放射光や光電子などがビームパイプに衝突した際にでてくる電子(Secondary electron yield: SEY)を減らすことで抑制できるということが知られている。我々は、サンプルの SEY の測定を行った。測定結果を、Fig. 8 に示す。Figure 8 から、銅よりも MoGr と CuGr は SEY が低いことがわかり、電子雲不安定性の原因にならないということが分かった。

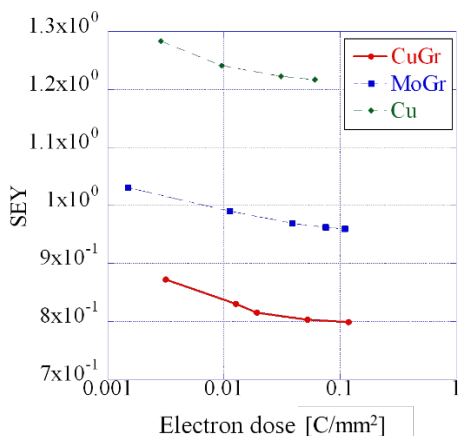


Figure 8: SEY versus electron dose.

3.6 ヘッド候補材料からのダスト析出

グラファイト系の材料を垂直方向コリメータの先端に付ける場合、材料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。

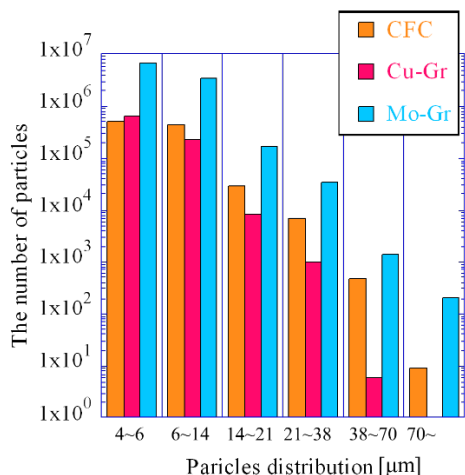


Figure 9: Result of the measurement of the number dust particle generated from CFC, CuGr and MoGr.

カーボンから発生するダストについて調べるために、液中でサンプルの超音波洗浄を行い、析出した粒子の大きさ量を調べた[11]。測定結果を、Fig. 9 に示す。

Figure 9 から、MoGr のダストの量が非常に多いことがわかる。また、CFC と CuGr を比較すると、CFC のほうが小さいダストの量は少ないが、CuGr のほうが大きいダストは少ないということが分かる。大きいダストのほうが、ビームに悪影響を及ぼすと考えられるため、CuGr は、SuperKEKB で使用しても問題ないと思われる。

3.7 高周波領域での電気伝導度測定

SuperKEKB のバンチ長は 5-6 mm と短いので、ビームは高い高周波成分を持っている。コリメータは、ビームに非常に近い位置で使用するため、ヘッド材料は、良い電気伝導度である必要がある。グラファイト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[12]。我々は、Fig. 10(a) のような空洞を作成して、Q 値を測定することで、サンプルの高周波表皮抵抗の測定を試みた。図にある空洞内のグループは、縮退を解くための加工である。空洞が大きい場合、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という利点がある。しかし、グラファイト系のサンプルの場合、炉の関係で大きなサンプルの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)。今回測定に使用する空洞内で励振される TE₀₁₁ モード(Fig. 10(b))で Q 値を測定した。TE₀₁₁ モードを選択した理由は、空洞の端板の材料を変えるだけで、サンプルの高周波領域の電気伝導度が測れるからである。

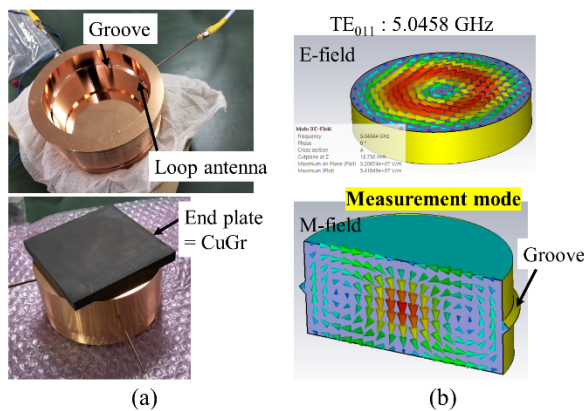


Figure 10: (a) Photograph of the cavity for measuring electrical conductivity in the high-frequency range. (b) Excited mode in this cavity.

最初に、銅の端板を用いて、測定値が計算値とほぼあっていることを確かめた。測定された S_{21} のシグナルを Fig. 11 に、金属の高周波表皮抵抗の特性を仮定して算出した電気伝導度を Table 1 に示す。ここから、CuGr や MoGr の電気伝導度は、銅に比べると 1% 以下だが、銅コーティング(10 μm)した CuGr は、銅電気伝導度の理論値 60% 以上になっていることがわかる。ここから、CuGr に銅コーティングを行えば、インピーダンスの問題が少なくなることがわかった。

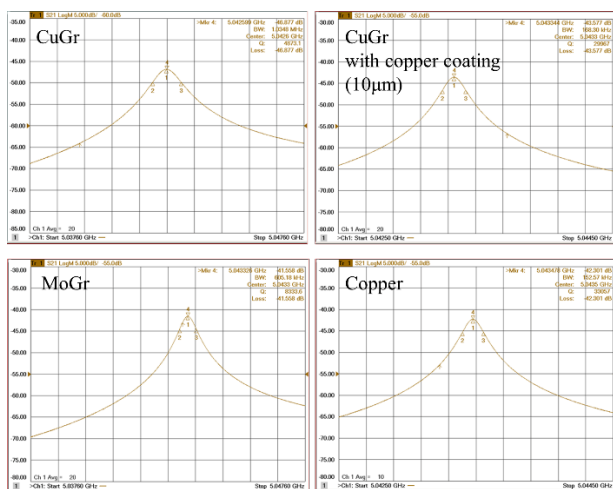


Figure 11: Result of spectra using the sample of CuGr, CuGr with copper coating, MoGr and copper.

Table 1: Electrical Conductivity (EC) from Measured Q Value at 5.04 GHz, Theoretical Value of the Electrical Conductivity of Copper = TC (5.8×10^7)

Samples	Q0 value	EC [S/m]	EC/ TC [%]
CuGr	4898	1.4×10^5	0.2
CuGr with copper coating	30278	3.7×10^7	63.7
MoGr	8420	5.0×10^5	0.8
Copper	33400	5.75×10^7	99.3

3.8 トラッキングシミュレーション

我々は、CuGr をヘッド素材として用いた場合、ヘッド長をどのくらいの長さにするかを見積もるために、トラッキングシミュレーションを行った[13]。このシミュレーションでは、D06V1 のヘッド素材の差がわかりやすいように、D05V1 と D02V1 を開けた設定にした。Figure 12 がトラッキングシミュレーションの結果である。この図は、横軸に CuGr ヘッドの長さを、縦軸に IR でのロスをとったものである。比較のためにチタンの場合もプロットしてある。この図から、チタンヘッドと同等程度の BG 削減能力をもたせるためには、CuGr ヘッドの長さを 20 mm 以上にする必要があることがわかる。CFC をヘッド材料にした Low-Z collimator のヘッド長は 60 mm だったので、CuGr を用いた場合には 1/3 程度にできることがわかった。

ヘッド長によって、どれくらいキックファクターが変わるのかを計算した結果を、Fig. 13 に示す。この計算は、バンチ長が 6 mm、ハーフギャップ(ビーム中心とコリメータヘッドまでの距離)を 2 mm を仮定して、ジオメトリカルなインピーダンス計算を行った。ここから、ヘッド長を 60 mm から 20 mm にすることで、キックファクターが 20 %程度減らせることがわかる。

4. まとめ

以下に、本論文のまとめを箇条書きで述べる。

- 損傷したヘッドの写真や損傷が BG に及ぼす影響から、SuperKEKB で新規コリメータヘッド材料が必要な背景について記述した。
- 新規ヘッド候補材の CuGr についての多くの測定結果(接合試験、PSD 測定、SEY 測定、ダスト析出に関する測定、高周波領域の電気伝導度)で、SuperKEKB に使用しても問題ないことを示した。
- トラッキングシミュレーションを行って、CFCを用いたコリメータより、ヘッド長が短くできることを示した。また、ヘッド長が短くできるため、キックファクターを小さくできることを示した。

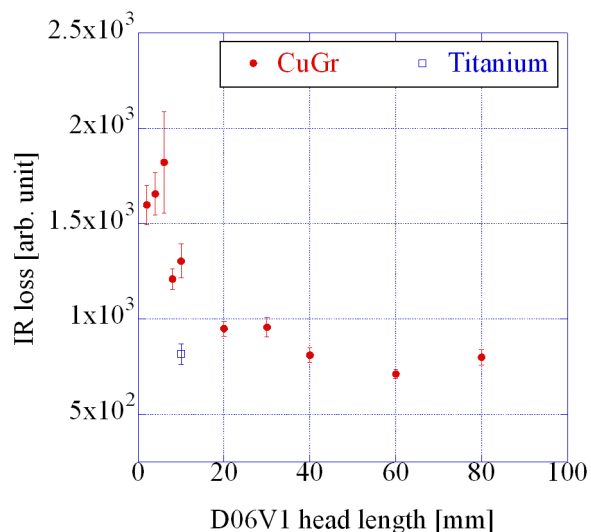


Figure 12: IR loss versus D06V1 head length.

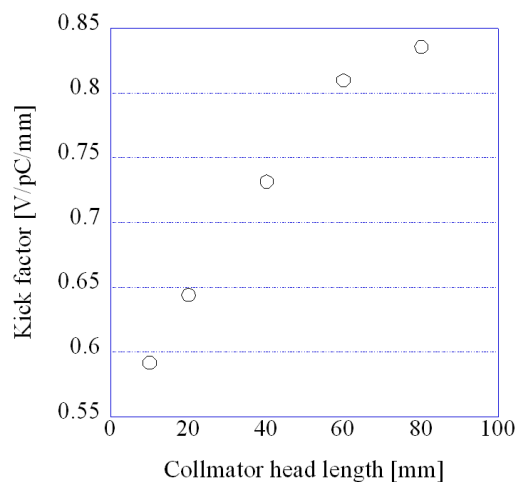


Figure 13: Kick factor versus collimator head length.

参考文献

- [1] Z. Doležal, S. Uno, “Belle II Technical Design Report”, KEK Report 2010-1, October 2010, H.
<https://www-superkekb.kek.jp/documents/B2TDR.pdf>
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”. Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2013, Issue 3, March 2013, 03A011.
<https://doi.org/10.1093/ptep/pts083>
- [3] N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022) 165930.
- [4] M. Iwasaki *et al.*, “Background and MDI Design for SuperKEKB/Belle-II”, Published in: Conf.Proc.C 1205201 (2012), 1825-1827.
- [5] H. Ikeda, “Sudden Beam Loss”, The 26th KEKB Accelerator Review Committee (2022), December 13-14, 2022.
- [6] S. Terui, T. Ishibashi, T. Abe, Y. Funakoshi, H. Nakayama, K. Ohmi, D. Zhou, A. Natochii, N. Yoshifuji, “Low-Z collimator for SuperKEKB”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1047, 2023, 167857.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167857>
- [7] <https://www.toyotanso.com/Products/catalog.en.full.pdf>
- [8] G. Giorgia *et al.*, “Novel LHC collimator materials: High-energy Hadron beam impact tests and nondestructive postirradiation examination”, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 27, 1-13.
doi:10.1080/15376494.2018.1518501
- [9] B. Alessandro *et al.*, “The Mechanical Design for the LHC Collimators”, 9th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004), EPAC-2004-MOPLT008.
- [10] X. Jin *et al.*, “Development of highly durable Pd coatings with ultra-low photon-stimulated desorption and low resistivity values”, Vacuum, Volume 215, 2023, 112370.
doi:10.1016/j.vacuum.2023.112370
- [11] <https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISSearch.html>
- [12] F. Sakamoto, Y. Nikawa, M. Chino, Study on radio absorptive material with shielding material using carbon, ITE Technical Report, 22 (1998) 13-18.
- [13] A. Natochii, S.E. Vahsen, H. Nakayama, T. Ishibashi, S. Terui, Improved simulation of beam backgrounds and collimation at SuperKEKB, Physical Review Accelerators and Beams, 24 (2021) 081001.