

## SuperKEKB 用ハイブリッドコリメータの開発 DEVELOPMENT OF HYBRID COLLIMATOR FOR SuperKEKB

照井真司<sup>#, A)</sup>, 石橋拓弥<sup>A)</sup>, ナトチーアンドリー<sup>B)</sup>, 森川祐<sup>A)</sup>, 白井満<sup>A)</sup>, 柴田恭<sup>A)</sup>, 末次祐介<sup>A)</sup>

Shinji Terui<sup>#, A)</sup>, Takuya Ishibashi<sup>A)</sup>, Andrii Natochii<sup>B)</sup>, Yu Morikawa<sup>A)</sup>,

Mitsuru Shirai<sup>A)</sup>, Kyo Shibata<sup>A)</sup>, Yusuke Suetsugu<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> University of Hawaii

### Abstract

Collimator damage events have occurred in SuperKEKB. Since the beam background reduction capability is reduced after an event of collimator damage, it is now recognized as a major problem. To counter this problem, we began developing a durable collimator. As the first prototype of a durable collimator, a collimator head made of graphite (low-Z collimator) was installed. However, the low-Z collimator was removed because of its high impedance, which was one of the causes of beam size blow-up. Next, a hybrid collimator using both tantalum and graphite for the collimator head was designed and installed as a low impedance and durable collimator. The hybrid collimator was confirmed during accelerator operation to have sufficient beam background reduction capability, lower impedance than the low-Z collimator, and to contribute to stable operation.

### 1. はじめに

SuperKEKB は KEKB のルミノシティ記録からの飛躍的向上を目指す電子・陽電子衝突型加速器である。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。メインリング(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。ルミノシティを向上させるため 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極小にすることを旨とする[1]。このため、衝突点近傍のビーム最終集束用超伝導マグネット(QCS) [2]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 (BG)は増加する[3]。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, 5]。

### 2. コリメータ損傷への対応

コリメータを損傷させる事象について説明する。SuperKEKB には水平方向コリメータと、垂直方向コリメータの 2 種類がインストールされている。現在まで、ビームが当たって垂直方向コリメータが損傷したイベントは 10 回以上起きている。水平方向コリメータはビームの入射振動があるため、垂直方向コリメータよりアパーチャーを狭くできない。この理由から、垂直方向コリメータがリング内で一番狭いアパーチャーであることが垂直方向コリメータばかり損傷する原因だと考えている。このイベントの多くは、LER で起きているため、ここから先では、LER のコリメータについて記述していく。我々は、参考文献[6]にあるように、コリメータヘッドの素材としてグラファイトを使用した、ビームが当たっても壊れにくいコリメータ(Fig. 1 に示すもので low-Z コリメータと言われている。ヘッド長は 60 mm である。)を加速器内に 2020 秋の運転 (19/October/2020 - 18/December/2020)前に、イ

ンストールした。Figure 1 に示すように、コリメータジョーのボディ部分は、熱伝導を考慮して銅を使用している。メインリング内のコリメータの位置を、Fig. 2 に示す。Figure 2 中の IR は interaction region (衝突点付近)の略である。

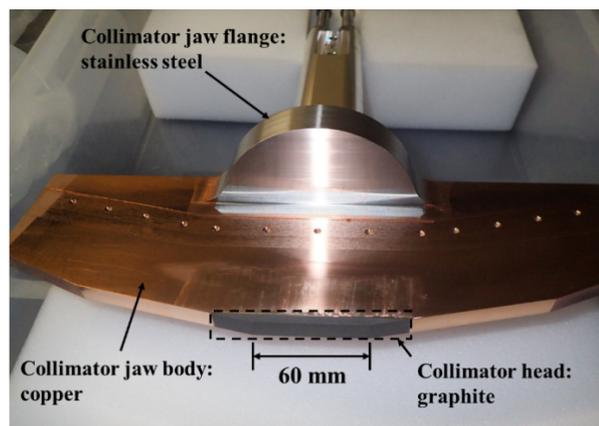


Figure 1: Low-Z collimator.

SuperKEKB の横方向インピーダンス源としては、コリメータが 90 %以上を占めている[7]。横方向インピーダンスがビームに与える影響は、インピーダンス源の kick factor とその場所の  $\beta$  関数の積で決まる[8]。

Low-Z コリメータをリング内で一番狭いアパーチャーとした状態で、加速器運転を行ったが、損傷することはなかった。しかし、コリメータのインピーダンスに関連するビームサイズブローアップが起きたため、low-Z コリメータより kick factor が低い、タンタルを用いたコリメータヘッドに交換することになった。

コリメータを損傷させる事象は、beam instability の振動の兆候が見えずにビームロスして、その後 3 ターン近くでビームアポートされるという現象[6]で sudden beam loss と呼ばれている。タンタルを用いたコリメータヘッドは、ビームが当たった際にペアクリエーションが起きて損傷

<sup>#</sup> sterui@mail.kek.jp

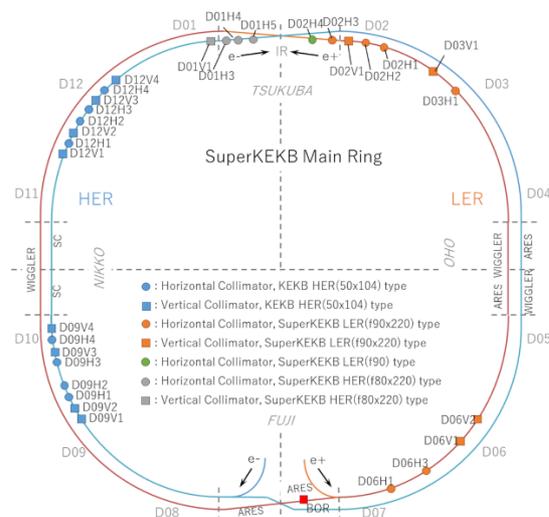


Figure 2: Location of collimators in the main ring of SuperKEKB.

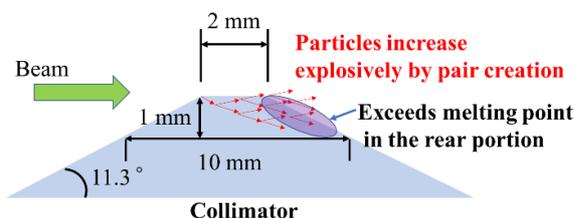


Figure 3: Image of collimator damage when beam hits collimator.

する (Fig. 3 にコリメータにビームが当たった際のイメージ示す。)と推測されている。

SuperKEKB の BG は、多くの種類がある。素粒子検出器に高圧をかけていないときにも測定できるので、本論文では、参考文献[9]にある QCS 先端に取り付けられたダイヤモンド検出器で測定された値を用いた。

Figure 4 に、sudden beam loss が起きてコリメータが損傷した後の BG の変化を示す。同じビーム電流の状態でも、BG が 1.5 倍程度悪化していることがわかる。Figure 5(a)に、ビームが当たって損傷したコリメータヘッドを示す。Figure 5(b)に、損傷したヘッドの相対している側のコリメータヘッドを示す。損傷した側の表面はえぐれていて、また、一部突起物も確認された。Figure 5(b)から、溶けたタンタルが蒸着されていることが確認された。

蒸着されたコリメータヘッドと、損傷したコリメータヘッドのどちらが、BG に悪影響を及ぼすのかを調べた。Figure 6 に、コリメータヘッドのギャップを変化させたときの BG の変化を調査した結果を示す。損傷したコリメータは、ギャップを 4 mm から 3 mm に変えた際に、BG が減っているが、蒸着されたコリメータは、ギャップを変化させても BG は減っていったことがわかる。どちらのコリメータも、ギャップを 2 mm より小さくした際には、BG は増えていった。これは、損傷や蒸着がないコリメータヘッドの時には、観測されなかったことから、コリメータヘッド表面の状態が影響したと考えられ、赤丸の蒸着されたコリメータ

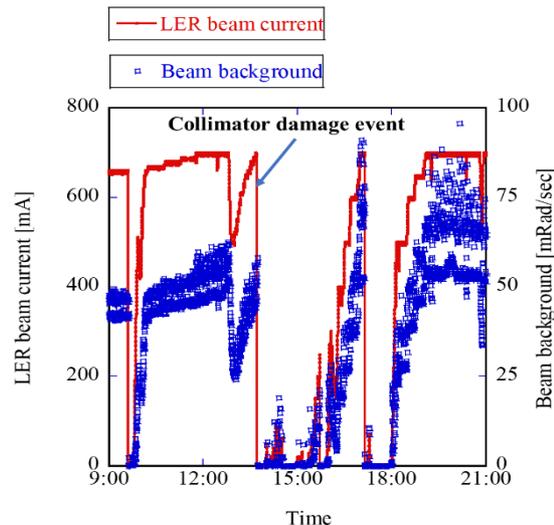


Figure 4: Beam background before and after the event of the damaged collimator jaw.



Figure 5: (a) Collimator jaw damaged by beam and (b) that located on the opposite side of (a) where the melted materials are deposited on the surface.

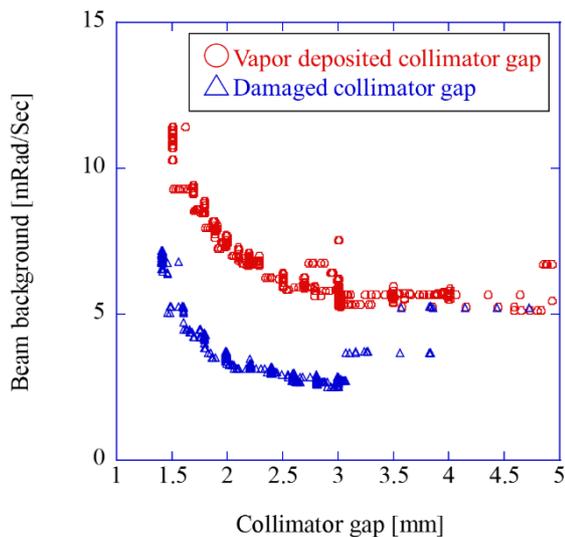


Figure 6: Beam background versus collimator gap after collimator damage event.

タヘッドのほうが、BG へ及ぼす悪影響は大きいことが確認された。我々は、コリメータヘッド表面の突起物(蒸着された金属)が、ビームハローの一部を散乱させたため

BG へ悪影響を及ぼしたと考え、蒸着される金属の体積が少ない場合、ビームハローとの散乱確率が小さくなり、BG への悪影響が少なくなると推測した。

### 3. Hybrid collimator の設計

#### 3.1 Hybrid collimator のアイデア

上で記述した経験から、我々は、低インピーダンス、損傷にくさの両立を目指して、タンタルとグラファイトを組み合わせたコリメータヘッド (hybrid collimator) を製作するというアイデアを出した。Hybrid collimator のアイデアの内容は、Fig. 7 に示すように、コリメータヘッドのビーム上流側とヘッド先端には、タンタルを用いて、コリメータヘッドのビーム下流側には、グラファイトを用いるというものである。タンタルの放射長が 4.1 mm [10] と短いため、ヘッド長を短くできるので、インピーダンスを下げる事ができることが1つめのメリットである。ビームが当たった際に、ペアクリエーションが原因で粒子が増えて、融点を超える危険性が高いコリメータヘッドのビーム下流側には、軽い素材で融点が高いグラファイトを用いることで、ビームが当たった際の損傷する体積が少なくできることもメリットである。タンタルとグラファイトと銅の接合サンプルを

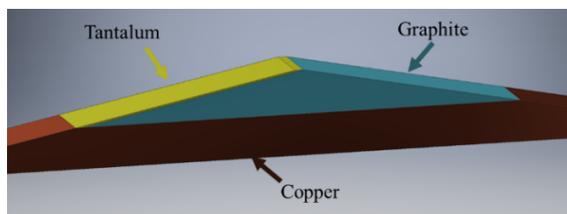


Figure 7: Image of hybrid collimator.

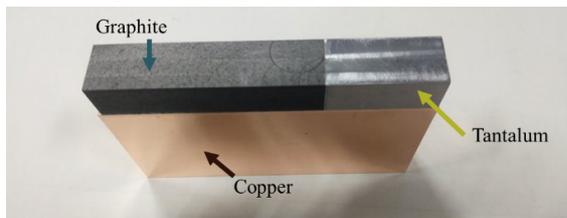


Figure 8: Sample of bonding test for hybrid collimator.

Fig. 8 に示す。厚みは、本番のコリメータジョーと同じく 12 mm である。

#### 3.2 ビームトラッキングシミュレーション

Hybrid collimator のヘッド長を、いくつにするのかを決定するために、GEANT4 [11] と SAD [12] を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションは、衝突点の垂直方向  $\beta$  関数が 1 mm のオブティクスファイルを用いて行った。Hybrid collimator を、D06V2 にインストールするという仮定で行った。D06V2 を選んだのは、衝突点から遠いため、hybrid collimator が何らかのトラブルで、予想される働きができなかった場合に検出器に及ぼす影響が少ないからである。

計算はヘッド長を変えて 6 ケース行った。計算した 6 ケースの設定を、Table 1 に示す。Figure 9 に Case 1-Case 6 のシミュレーション結果から導いた、衝突点での

BG を示す。BG は、Coulomb 散乱、Bremsstrahlung、Touschek の成分に分けて示した。この結果から、Coulomb 成分については、Case 1 (Tantalum 5 mm) と同じ BG 削減能力を持つためには、タンタルは 2 mm 以上必要であることがわかった。また、Touschek 成分については、Case 1 (Tantalum 5 mm) と同じ BG 削減能力を持つためには、タンタルは 3 mm 以上必要であることがわかった。これらの結果から、我々は少し余裕を見て、ヘッド長を 4 mm と決定した。

Table 1: Setting With Head Length

Case	Setting
Case 1	Tantalum 5 mm (2021 ab run)
Case 2	Tantalum 0.3 mm + Graphite
Case 3	Tantalum 1 mm + Graphite
Case 4	Tantalum 2 mm + Graphite
Case 5	Tantalum 3 mm + Graphite
Case 6	Tantalum 4 mm + Graphite

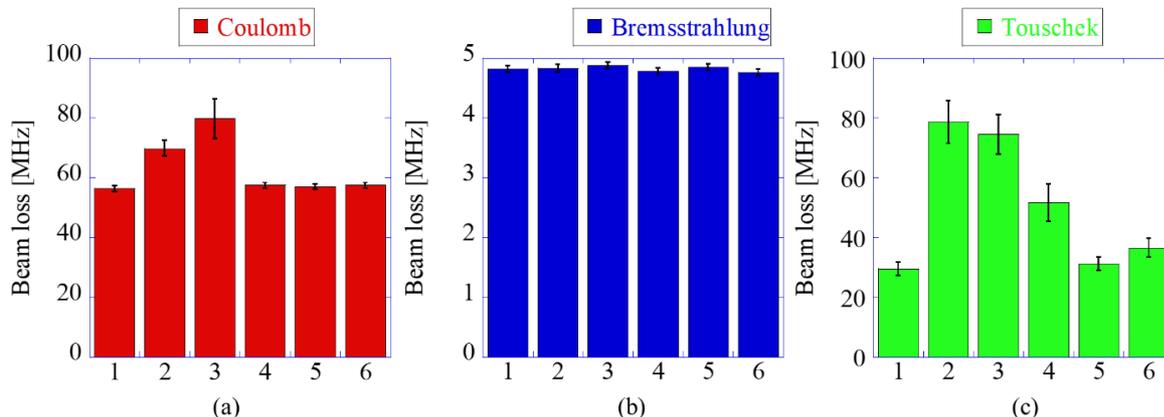


Figure 9: Calculated beam losses at IR due to (a) Coulomb scattering, (b) Bremsstrahlung, and (c) Touschek effect for six cases in Table 1.

### 3.3 ビーム照射シミュレーション

Hybrid collimator のヘッド長を 4 mm にした場合、ビームがコリメータに当たった際に溶ける体積を調べた。計算に用いたパラメータを、Table 2 に示す。計算はシミュレーションソフト FLUKA[13]を用いた。ビームはガウシアン分布を仮定して、垂直方向ビームサイズの半分 (50  $\mu\text{m}$ ) を垂直方向コリメータに当てるように設定した。Figure 10 に、横軸にビーム電流をとって、縦軸に融点を超えたタンタルの体積をとったものを示す。ここから、hybrid collimator のほうが、融点を超える体積が少ないことがわかる。したがって、ビームがコリメータに当たった際にも、BG に与える影響は少なくなると予想される。

Table 2: Parameters with Simulation of Beam Irradiation

Particle	Positron
Beam energy	4 GeV
Horizontal beam size	300 $\mu\text{m}$
Vertical beam size	100 $\mu\text{m}$

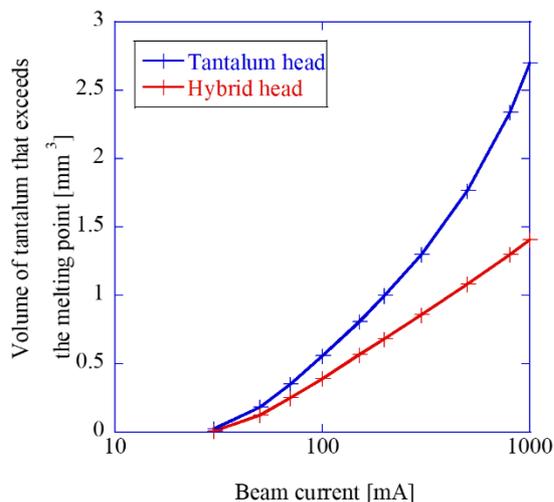


Figure 10: Volume of tantalum whose temperature exceeds the melting point of tantalum when the beam hits the normal collimator and the hybrid collimator.

## 4. 運転に hybrid collimator が及ぼす影響

### 4.1 Hybrid collimator の BG 削減能力調査

Hybrid collimator のギャップを狭くしていった際に、衝突点の BG が削減できるのかを調査した結果を、Fig. 11 に示す。Figure 11 から、hybrid collimator のギャップを狭くしていった際に、衝突点の BG が減少して、ギャップを広げた際に、BG が増加していることがわかる。ここから、hybrid collimator が BG 削減能力を有していることが確認された。

### 4.2 Hybrid collimator の検出器保護性能評価

Hybrid collimator の検出器保護性能を評価するため

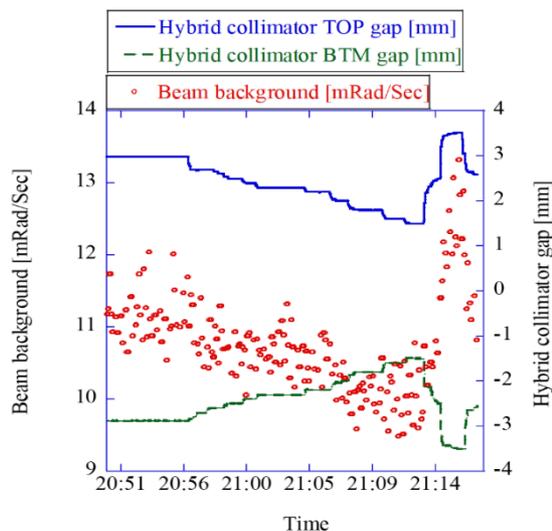


Figure 11: The change of beam backgrounds signal when gap of the hybrid collimator was changed.

に、Fig. 12 のプロットを作成した。Figure 12 は、横軸に時間を取り、一日の最大ビーム電流 (青丸) とコリメータを壊す可能性がある事象の sudden beam loss が起きた時のビーム電流 (ひし形) をとったものを、1 つ目の縦軸に表示した。2 つ目の縦軸には、sudden beam loss が起きた時のバックグラウンドの値を表示した。3 つ目の縦軸には、sudden beam loss が原因で起きた QCS のクエンチの数を、1週間分足したものを表示した。Figure 12 から、運転期間が短いものの最大ビーム電流を記録した期間を含んでいるが、hybrid collimator を狭くしていったからは、QCS のクエンチが起きていないことや、sudden beam loss 回数自体は少なくなっていることがわかった。ただし、sudden beam loss 時のバックグラウンドの値は、hybrid collimator を狭くしても減っていないこともわかった。

## 5. まとめと今後の開発

### 5.1 まとめ

以下に箇条書きで、本論文のまとめを記述していく。

- ビームが当たった際に損傷したコリメータヘッドと、蒸着されたコリメータヘッドでは、蒸着されたコリメータヘッドの方が BG に及ぼす影響が大きいことがわかった。
- インピーダンスが高いコリメータジョーは、ビームサイズブローアップの原因の 1 つになっていることがわかったため、低インピーダンス、丈夫なコリメータジョーの開発を行った。このコリメータジョーは、ヘッド素材にタンタルとグラファイトを用いたものである。
- ビームトラッキングシミュレーションやビーム照射シミュレーションやインピーダンスの計算を行った結果、SuperKEKB で使用できるスペックのコリメータジョーを製作できると判断した。
- Hybrid collimator を加速器運転中に使用した結果、バックグラウンド削減能力を有していることが観測された。また、hybrid collimator のアパーチャーを小さくしてからは、クエンチは起きなかった。

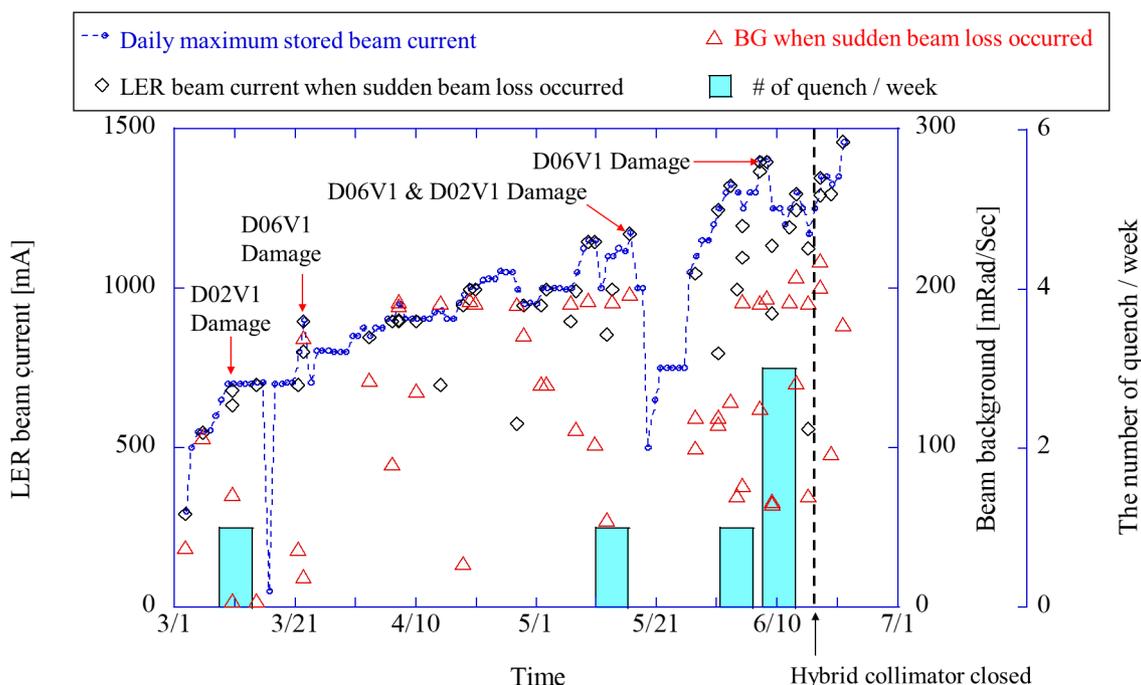


Figure 12: Daily maximum stored beam current (blue circles), beam currents (black diamonds) and beam backgrounds (red triangles) when the sudden beam losses occurred, and frequency of (QCS) quenches per week (light blue bars) during the latest run from 1st March to 22nd June 2022.

## 5.2 今後の開発

SuperKEKB が更なるルミノシティ向上を目指していくためには、ビームサイズを小さくしていくことや、ビーム電流を上げていくことが必要となり、hybrid collimator では対応できない状況が予想される。我々は将来を見据えて、以下のようなコリメータシステムの開発を進めている。ビームが 1 番最初に当たる(リング内で一番狭いアパーチャーに設定したコリメータ)、コリメータヘッドには軽い素材を用いて、またヘッド長を短くする。ヘッドが軽い素材で、短い場合には、ビームが当たった際にも損傷する可能性は小さくできるが、IR まで粒子が届いて検出器を損傷させてしまう。IR まで、粒子が届かないように LHC などの陽子加速器ではセカンダリーコリメータ[14,15]を置くというのが一般的な方法であるが、我々の場合、インピーダンスや higher order mode が問題になるため、この方法をとってこなかった。我々は、インピーダンスや higher order mode が問題にならないように、非線形磁場を用いたコリメータをインストールすることで、コリメータヘッド損傷の問題を対応できないか、現在検討中である。

## 参考文献

[1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”. Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2013, Issue 3, March 2013, 03A011; doi.org/10.1093/ptep/pts083  
 [2] N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022) 165930.  
 [3] H. Nakayama *et al.*, “Beam background and MDI design for SuperKEKB/Belle II”, Proceedings of the 3rd International

Conference on Particle accelerator (JACoW, Geneva, 2012), TUPPR007, p. 1825; <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2012/papers/TUPPR007.PDF>

[4] T. Ishibashi *et al.*, Movable collimator system for SuperKEKB. Physical Review Accelerators and Beams, 23 (2020) 053501.  
 [5] A. Natochii *et al.*, Improved simulation of beam backgrounds and collimation at SuperKEKB. Physical Review Accelerators and Beams, 24 (2021) 081001.  
 [6] S. Terui *et al.*, “Low-Z Collimator for SuperKEKB”, NIMA-D-22-00710, (submitted to Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A).  
 [7] T. Ishibashi *et al.*, “Impedance modeling in SuperKEKB LER”, Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8 - 11, 2022, Kitakyushu, Japan.  
 [8] “Transverse mode coupling instability (TMCI)”, Handbook of Accelerator Physics and Engineering, 3rd Printing (2009).  
 [9] S. Bacher *et al.*, Performance of the diamond-based beam-loss monitor system of Belle II. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 997 (2021) 165157.  
 [10] Don Groom, Atomic and Nuclear Properties of Materials for more than 350 materials, available at <https://pdg.lbl.gov/2020/AtomicNuclearProperties/index.html> (Accessed on).  
 [11] <https://geant4.web.cern.ch/>  
 [12] <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>  
 [13] <http://www.fluka.org/fluka.php>  
 [14] S. Redaelli, “Beam cleaning and collimation systems”, Proceedings, 2014 Joint International Accelerator School: Beam Loss and Accelerator Protection: Newport Beach, CA, USA, November 5-14, 2014, 403-437.  
 [15] M. Shirakata *et al.*, “Beam cleaning and collimation systems”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp. 441-443.