

SuperKEK の Collimator に関連する課題

CHALLENGES RELATED TO SuperKEKB COLLIMATORS

照井真司^{#, A)}, 船越義裕^{A)}, 石橋拓弥^{A)}, 小磯晴代^{A)}, 森川祐^{A)}, 森田昭夫^{A)},
中山浩幸^{A)}, ナトチーアンドリー^{B)}, 大西幸喜^{A)}, 大見和史^{A)}, 柴田恭^{A)}, 白井満^{A)},
末次祐介^{A)}, 飛山真理^{A)}, 植木竜一^{A)}, 周徳民^{A)},

Shinji Terui^{#, A)}, Yoshihiro Funakoshi^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Haruyo Koiso^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Akio Morita^{A)},
Hiroyuki Nakayama^{A)}, Andrii Natochii^{B)}, Yuki Yoshi Ohnishi^{A)}, Kazuhito Ohmi^{A)}, Kyo Shibata^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)},
Yusuke Suetsugu^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Demin Zhou^{A)}

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

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

Abstract

The operation so far has revealed several challenges related to the collimator that were not considered in the SuperKEKB design phase. One of the challenges is the vertical collimator damage event when the beam hits the collimator. Collimator damage not only prevents the physical detector from reducing beam background noise (BG), but also has a negative impact on the beam due to increased impedance. Another challenge is the need to develop a collimator with a small impedance to counter that the BG will increase when the beam current is increased in the future.

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[1]。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、衝突点 (Interaction point: IP)における垂直方向ビームサイズを極小にするナノビーム方式を採用している[2]。現在までに達成できた IP での垂直方向 β 関数(β_y^*)は 0.8 mm(通常運転の β_y^* は 1 mm)であり、実用型加速器では、世界最小である[3]。SuperKEKB のルミノシティは、世界最高値を更新し続けている。しかし、今後の運転で 10 倍以上のルミノシティに到達する必要がある。SuperKEKB は、より高いルミノシティに到達するために、ビーム最終集束用超伝導マグネット(QCS)[4]を用いて、より IP の垂直方向ビームサイズを絞っていき、より高いビーム電流(LER の最終設計ビーム電流は 3.6 A、バンチ電流は 1.44 mA)を目指していく必要がある。その際に、問題になる1つが素粒子検出器での beam background(BG)の増加である[5]。BG が増加した場合、測定器の粒子検出効率の低下、エネルギーや運動量の分解能の劣化をもたらす。SuperKEKB の非常にアグレッシブな加速器状況の中、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、BG を低減させるコリメータの役割は重要である[6]。

2. SuperKEKB におけるコリメータ運用戦略

最初に SuperKEKB のコリメータについて簡単に紹介する。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。Figure 1 に、SuperKEKB MR 内でのコリメータ配置状況を示す。図中の IR は interaction region の略である。LER は HER に比べて垂直方向コリメータの数が少ない、その中で、D02V1 は、LER の IR に一番近い垂直方向コリメータであり、このコリメータが損傷した際には、BG が急増して物理運転を続けることが困難になった経験から、運転上最

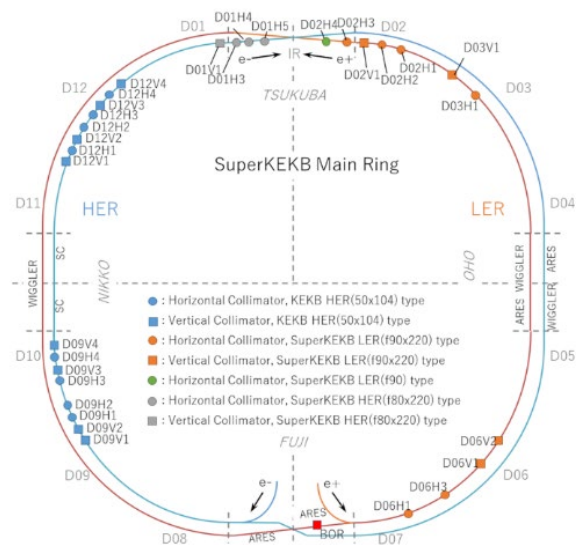


Figure 1: Location of collimators in the main ring of SuperKEKB. The terms H and V in the collimator names represent the horizontal and vertical collimators, respectively.

[#] sterui@mail.kek.jp

重要なコリメータと考えられている。損傷についての詳細は、次の章で記述する。

KEKB 時代から使用している KEBB タイプのコリメータと、SuperKEKB 建設時に開発した SuperKEKB タイプのコリメータが共存している。Figure 2 に、SuperKEKB タイプの垂直方向コリメータのイメージ図を示す[6]。

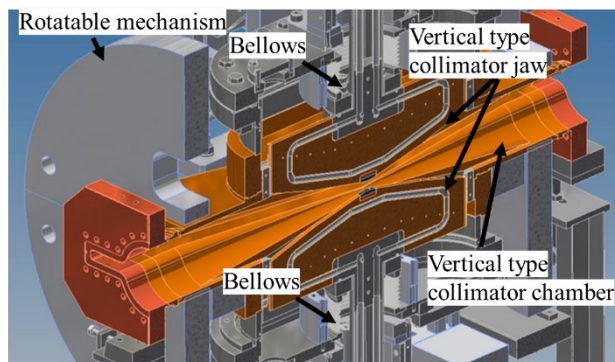


Figure 2: Schematic drawing of the cross-section of a SuperKEKB type vertical collimator.

SuperKEKB タイプコリメータジョーのボディは、熱伝導と加工性が良い銅を使用している。コリメータジョー先端部分はヘッドと呼ばれ、高融点かつ放射長が短いタンタルを使用している。高融点材料を使用している理由は、ビームが衝突した際に、できるだけ溶けにくい必要があるためである。また、放射長が短い材料を用いた場合、ヘッドの長さを短くしても BG の削減ができ、impedance も下げられるためである。ヘッドの長さの変化に伴う impedance 変化についての計算結果は、参考文献に記載されている[7]。SuperKEKB の transverse impedance 源としては、collimator が 90 % 以上を占めているため、impedance の検討は非常に重要である[8]。リング全周のダイポールキック量は、impedance 源の kick factor とその場所の β 関数の積の和で決まる。ダイポールキック量が大きくなりすぎると、transverse impedance がビーム不安定を引き起こす Transverse Mode Coupling Instability (TMCI) が起きる[9]。本論文では、垂直方向コリメータの kick factor とその垂直方向コリメータの場所での垂直方向 β 関数の積の和を、 $\sum \beta_{y,i} k_{\perp,i}$ と表記する。また、ここからは、現在コリメータに関連する問題がより深刻な LER について主に記述する。

先述したように、SuperKEKB はルミノシティを向上させるために、衝突点で垂直方向ビームサイズを絞込み込む。それに伴い、QCS 内での垂直方向 β 関数は他の場所より、急激に大きくなる。一方で SuperKEKB の QCS ビームパイプの内径(垂直方向の最小部では、ビームとビームパイプの距離は 13.5 mm)は小さいため、QCS ビームパイプ内でのビームロスが大きくなり、素粒子検出器での BG は増加する。QCS ビームパイプでのビームロスを削減するためにリングに設置する垂直方向コリメータのヘッドとビームの距離(half gap)が非常に近い(1~3 mm)状態での運用が要求されている。衝突点におけるビームロス量は垂直方向コリメータジョーの位置に鋭敏に依存

するため、ジョーの位置制御には、約 50 μm 以下という高い精度が求められる。

ここからは、コリメータの戦略に重要なコリメータのリング内への配置と impedance について記述する。KEKB では、コリメータはアーク部だけに設置されていたが、SuperKEKB では、衝突点上流 200 m 以内の直線部にも追加で設置することにした。これは、シミュレーションで、直線部に追加設置するコリメータによって、QCS 内でのビームロスを含む BG が大幅に削減可能であることが判明したためである[5]。

BG 削減のために要求されるジョーとビームの距離は、コリメータと衝突点の位相の関係や、コリメータを設置する場所の β 関数や、コリメータと衝突点の距離等によって決まる。また、先述したようにダイポールキック量は、half gap に応じて増減する impedance と、コリメータを設置する場所の β 関数によって変化する。したがって、half gap が非常に狭い垂直方向コリメータの設置場所は注意深く選定する必要がある。原理的には、コリメータは β 関数となるべく大きい場所に設置したほうが beam core と beam tail を切り分けやすいが、SuperKEKB のようなダイポールキックによる TMCI が問題となる可能性がある場合は、ダイポールキック量と BG 削減量が両方許容値以内に抑え込むためには、コリメータ設置場所の β 関数は大きすぎない方が、よいことを計算によって確かめている[10]。

LER の垂直方向コリメータは、D06V1、D06V2、D03V1、D02V1 の 4 台があり、衝突点と D02V1 と位相がほぼ合っている D06V1 は、一番アパーチャーを狭くして、入射ビームの tail を切る役目と、異常な軌道を通っているビームを最初にストップする役目を担っている。この一番アパーチャーが狭いコリメータは、プライマリーコリメータと呼ばれている。D02V1 は、先述したように運転上最重要のコリメータなので、損傷ないようにプライマリーコリメータより慎重に使われている。素粒子検出器や QCS を守る最終砦として役目を担っていて、リング内で二番目に狭いアパーチャーで運用されているため、セカンダリーコリメータと呼ばれている。D06V2 は、D06V1 が損傷した際のバックアップとしての役目を担っている。D03V1 は、さらなる BG 削減を目的にインストールされたが、横方向のダイポールキック量が増え過ぎてしまうため、現在ほとんど使われていない。

加速器運転中は、これらの知見を踏まえて、 $\sum \beta_{y,i} k_{\perp,i}$ の値を管理しながら、入射効率やビームライフタイムや BG の状況にあわせて gap を調整している。

3. SuperKEKB のコリメータに関連する課題

3.1 将来の BG 増加

コリメータに関連する大きな課題の 1 つとして、将来膨大に増えると予測される BG への対策が挙げられる。Belle II 測定器に使用されているセンサーのうち、最も BG に脆弱なのは TOP 検出器であり、BG が増加すると TOP 検出器内の光電子増倍管の光電面からの信号が劣化していく[11, 12]。運転中に TOP 検出器で観測された BG の値と、今後のルミノシティ増加に伴う BG 予測値を Fig. 3 に示す。現時点のビーム電流では BG は許容

上限値に達していないが、今後ルミノシティを向上させるためにビーム電流の増加させた場合には、1.6 A 以下で上限に達すると予測される。この測定は、 $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ のときの測定結果を用いており、 β_y^* がより小さいときには、もっと低いビーム電流で上限に達すると考えられる。

この BG 増加に対応するためには、より gap をより狭い設定で使う必要がある。しかし、先述のように gap を狭くしすぎると TMCI などの transverse impedance に関連する問題が出てくるため、よりダイポールキック量が少ないコリメータの開発が必要となる。

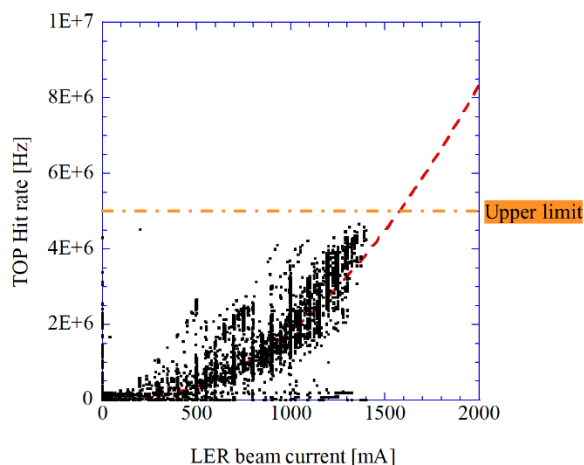


Figure 3: Measured values of BG and predicted values of BG.

3.2 コリメータ損傷

3.2.1 コリメータ損傷イベント

もう1つのコリメータに関連する大きな課題は、ビームが当たって垂直方向コリメータが損傷するイベントである。このイベントは、現在まで 10 回以上起きている。水平方向はビームの入射振動があるため、水平方向コリメータのアパーチャーは垂直方向コリメータほど小さくすることができない。垂直方向コリメータのアパーチャーは、リング内で一番狭くなっているため、コリメータの損傷は垂直方向コリメータでのみ起きていると考えられている。

Figure 4 に、ビームが当たって傷がついたコリメータヘッドの写真を示す。ヘッド表面に、ビームが通った真っ直ぐな線の跡があるのがわかる。この部分は、ビームが当たったことにより、温度が急激に上昇したため溶けたと考えられる。ヘッドが損傷する前後の BG の値を、Fig. 5 に示す。Figure 5 は、縦軸に TOP システムで観測された粒子のヒットレートと、ビーム電流をとったものである。ここから、ヘッドが損傷した場合には、BG の増加が観測されることがわかる。

コリメータを損傷させる事象は、ダイポール振動が原因の beam instability 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で sudden beam loss (SBL) と呼ばれている。SBL 自身は、500 mA 以上の電流から起き始める。ただ、バンチ電流が 0.7 mA を超えると、コリメータ損傷のリスクが高くなることを、これまで経験しているため、実用上の運転では、バ

ンチ電流が 0.7 mA をできるだけ超えないようにして、バンチ数を増やす方向で努力してきた。しかし、2022 年の運転の段階で、バンチ数はほぼ上限に達した(設計はバンチ数は 2500 であり、2021 年の運転では 2249 まで達成した)ため、これまで以上のルミノシティに到達するためには、バンチ電流を上げて、かつ、 β_y^* を絞るしかない。したがって、バンチ電流が制限されていることは、SuperKEKB にとって大きな問題である。

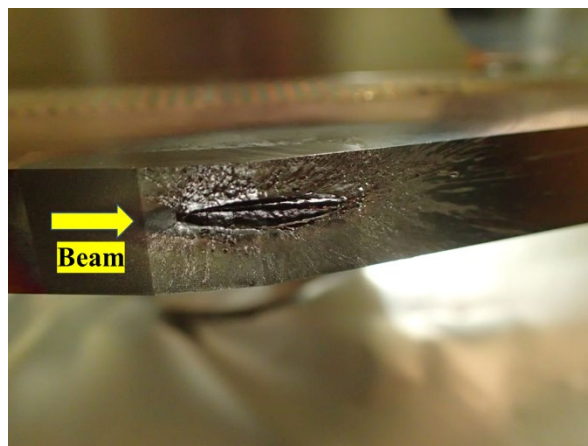


Figure 4: Collimator jaw with a scar on the surface of the collimator head through which the beam has passed.

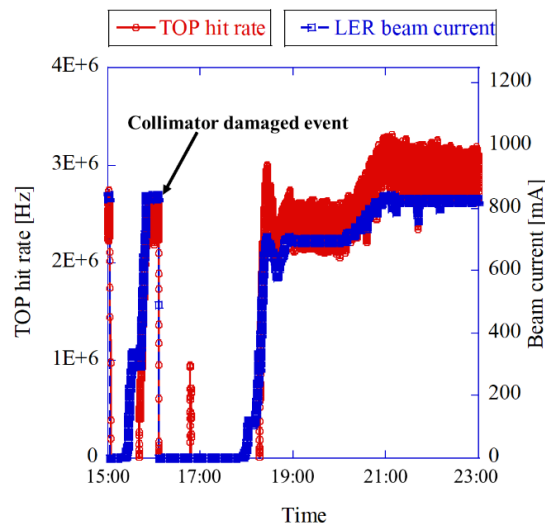


Figure 5: Beam background changed before and after the event of the damaged collimator.

Figure 6 に、コリメータ損傷時に bunch oscillation recorder (BOR) [13] で取得したデータ(ビームアポート前数ターン分)を示す。Figure 6(a)は、縦軸にバンチ電流をプロットしたもので、Fig. 6(b)は、縦軸に BOR の位置での垂直方向の位置変動をプロットしたもので、横軸はバケットナンバーである。Figure 6(b)の、赤点線で囲まれた部分が初めてビームの垂直方向位置変動が観測された瞬間である。赤点線のタイミングにビームロスしていないことが、Fig. 6(a)からわかる。次のターンの緑点線で囲まれたタイミングには、ビームロスしていることと、有意な垂直変位が観測されたことも分かった。

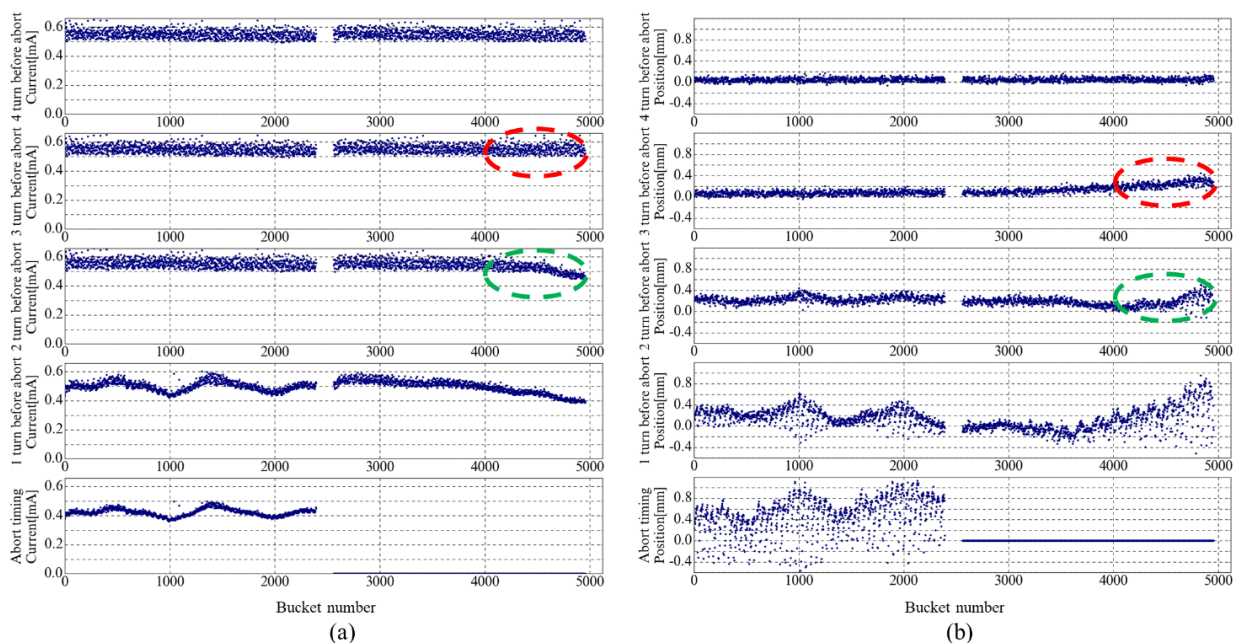


Figure 6: (a) Bunch current and (b) vertical position change during the damaged collimator jaw event.

アボート前 3 ターン目のから、ビームロスしていないタイミングには、最大 0.5 mm 近くの垂直方向位置変動が観測された。したがって、ロスしたことで垂直方向の位置が変動したわけではなく、垂直方向の位置が変動したことによりロスが始まったと予想される。ただし、BOR で観測できるのはビームの重心振動の位置であるため、ビームサイズが最初に変動した可能性は否定できなく、これに関しては、将来バンチごとにビームサイズがモニターできる装置をインストールして計測する予定である。なお、SBLの詳細は、文献[14]に示されている。

3.2.2 コリメータ損傷が impedance に及ぼす影響

LER では、コリメータの impedance の影響と、bunch by bunch feedback system(BxB)[15]の影響が組み合わさったことが原因で、バンチ電流が高くなった際に vertical beam size blow-up が観測された[16]。Figure 7 は、vertical beam size blow-up (VBSB)が観測されたときに、BOR で取得したデータを、fast Fourier transform (FFT)解析した結果である。Figure 7(b)に示すパイロットバンチとは、チューン測定のために強制的に励振しているバンチのことである。なお、図中に示したベータ関数とキックファクターの積の和は、バンチ長を 6 mm と仮定して GdfidL[17]で計算したキックファクターを用いて求めた値である。Figure 7(a), (b)を比較することで、 ν_y (0 mode と呼ぶ)の周波数の振動ではなく、 $\nu_y - \nu_s$ (-1 mode と呼ぶ)の周波数のポイントで、VBSB が観測された際には振動していたがわかった。ここで、 ν_y は vertical betatron tune、 ν_s は synchrotron tune (0.0227 kHz)である。また、パイロットバンチの FFT 解析の結果から、0 mode と-1 mode がカップリングしていないことから、transverse mode coupling instability (TMCI)の閾値手前であることがわかり、この VBSB は TMCI 起因ではないことがわかる。

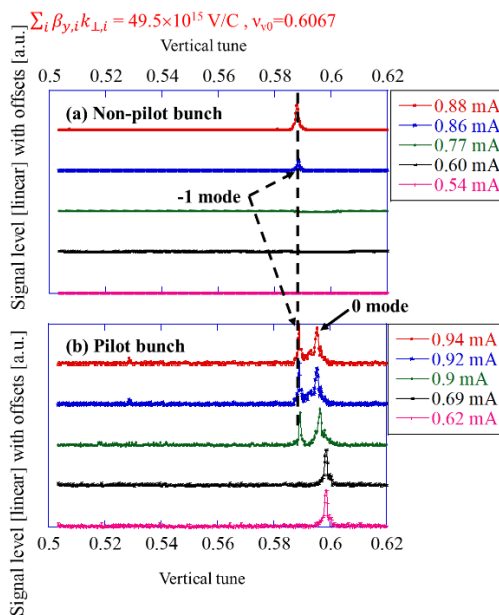


Figure 7: The results of the FFT analysis of (a) non-pilot bunch and (b) pilot bunch in the vertical motion.

我々は、コリメータ損傷前後に VBSB を測定した。Figure 8 に横軸にバンチ電流をとり、縦軸に垂直方向エミッタンスをとったものを示す。Figure 8 は、 β_y^* が 1 mm の状態で測定したものである。コリメータの gap 設定は、損傷前後共に、ほぼ同じ状態である (損傷前の $\sum \beta_{y,i} k_{\perp,i}$ は、 33.5×10^{15} V/C で、損傷後は 35.6×10^{15} V/C)。ここから、コリメータ損傷後では VBSB が起きるバンチ電流の閾値 (ここでは、衝突運転時の垂直方向エミッタンスが、約 30 pm であるため、30 pm を超えた場合を VBSB と規定した) が下がっていることがわかる。この測定は、多数バ

ンチの影響を受けないために、100 バンチ以下の少数バンチでの運転時に計測したものである。

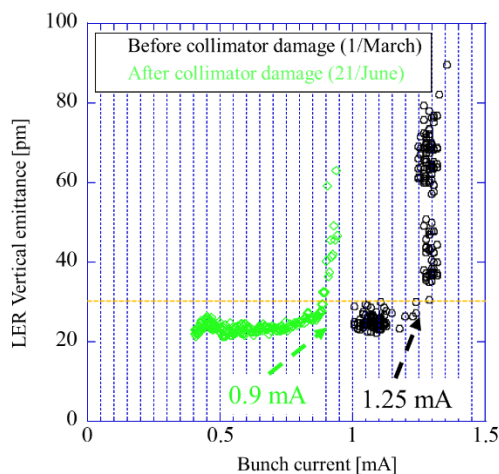


Figure 8: The LER vertical emittance before and after collimator damaged event.

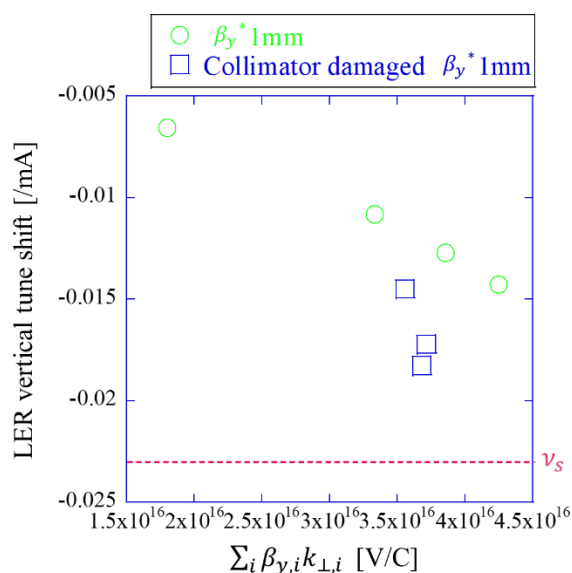


Figure 9: LER vertical tune shift/mA versus impedance.

Figure 9 に、横軸に $\sum \beta_{y,i} k_{\perp,i}$ をとり、縦軸にバンチ電流 1 mA あたりの vertical tune shift をとったものを示す。Figure 9 から、コリメータ損傷前後で、コリメータの gap を同じ $\sum \beta_{y,i} k_{\perp,i}$ に設定しても、コリメータ損傷後には、vertical tune shift が増えているということである。これは、損傷したコリメータヘッドが凸凹であることが影響していると推測している。我々は、Fig. 8 に示した、コリメータ損傷後の VBSB の閾値の変化は、impedance の増加だと考えている。また、コリメータが損傷したときの vertical tune shift は、1 mA で ν_s 近くになっていて、TMCI が起こる危険性も高くなっていることを示唆している。

4. まとめと今後の開発

4.1 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。

- SuperKEKB のコリメータに関連する重要な課題である、将来の BG 増加 (将来の BG 予測から、ビーム電流増加の制限要因になる) について記述した。
- もう一つの重要な課題であるコリメータ損傷 (損傷時のビーム軌道と、損傷後の BG 増加と impedance 増加) の影響について記述した。

4.2 今後の開発

これらの課題を解決するために、nonlinear collimator (NLC) の導入を決定して、工事を進めている。NLC についての詳細は、参考文献[18]に記載されている。

参考文献

- [1] Z. Doležal, S. Uno, Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1, October 2010, H.
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”. Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2013, Issue 3, March 2013, 03A011.
- [3] Y. Funakoshi *et al.*, “The SuperKEKB Has Broken the World Record of the Luminosity”, Proceedings of the 13th International Conference on Particle accelerator, p. 1-5.
- [4] N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022).
- [5] H. Nakayama *et al.*, “Beam background and MDI design for SuperKEKB/Belle II”, Proceedings of the 3rd International Conference on Particle accelerator, p. 1825-1827.
- [6] T. Ishibashi *et al.*, “Movable collimator system for SuperKEKB”, Physical Review Accelerators and Beams, 23 (2020) 053501.
- [7] S. Terui *et al.*, “Low-Z collimator for SuperKEKB”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 1047, (2023).
- [8] T. Ishibashi *et al.*, “Impedance modeling in SuperKEKB LER”, Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8 - 11, 2022, Kitakyushu, Japan.
- [9] A.W. Chao and M. Tigner, Handbook of accelerator physics and engineering, World Scientific (1999).
- [10] A. Natchii *et al.*, “Improved simulation of beam backgrounds and collimation at SuperKEKB”, Physical Review Accelerators and Beams 24 (2021) 081001.
- [11] Y. Horii *et al.*, “TOP Detector for Particle Identification at the Belle II Experiment”, PoS, EPS-HEP2013.
- [12] A. Natchii *et al.*, “Measured and projected beam backgrounds in the Belle II experiment at the SuperKEKB collider”. ArXiv. /abs/2302.01566, 2023.
- [13] M. Tobiyama, J. W. Flanagan, “Development of bunch current and oscillation recorder for SuperKEKB accelerator”, Proceedings of IBIC’12, Tsukuba, Japan, 2012.
- [14] H. Ikeda, “Sudden Beam Loss”, The 26th KEKB Accelerator Review Committee (2022), December 13-14, 2022.
- [15] M. Tobiyama, “Beam instrumentation and bunch feedback systems”, The 21th KEKB Accelerator Review Committee (2016), June 13-15, 2016.
- [16] K. Ohmi *et al.*, “Study for -1 mode instability in SuperKEKB low energy ring”, in Proc. 65th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop High Luminosity Circular $e^+ e^-$ Colliders eeFACT2022, Frascati, Italy.
- [17] The GDFIDL electromagnetic field simulator, <http://www.gdfidl.de>
- [18] S. Terui *et al.*, “Nonlinear collimator design for SuperKEKB”, Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 – September 1, 2023, Funabashi, Japan.