

SuperKEKB 用非線形コリメータの最初の試験結果の報告

REPORT ON THE RESULTS OF THE FIRST EXPERIMENTS ON A NONLINEAR COLLIMATOR FOR SuperKEKB

照井真司^{#, A)}, ブロッジジャコモ^{B)}, 船越義裕^{A)}, 飯田直子^{A)}, 石橋拓弥^{A)},
小磯晴代^{A)}, 劉清源^{C)}, 森田昭夫^{A)}, ヤオムーリー^{A)}, 中村衆^{A)},
ナトチーアンドリー^{D)}, 宇野健太^{A)}, 生出勝宣^{E)}, 大西幸喜^{A)}, 杉本寛^{A)}
Shinji Terui^{#, A)}, Giacomo Broggi^{B)}, Yoshihiro Funakoshi^{A)}, Naoko Iida^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)},
Haruyo Koiso^{A)}, Qingyuan Liu^{C)}, Akio Morita^{A)}, Yao Mulee^{A)}, Shu Nakamura^{A)},
Andrii Natochii^{D)}, Kenta Uno^{A)}, Katsunobu Oide^{E)}, Yukiyoshi Ohnishi^{A)}, Hiroshi Sugimoto^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki

^{B)} Sapienza University of Rome, Rome, Italy

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

^{D)} Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA

^{E)} University of Geneva, Geneva, Switzerland

Abstract

SuperKEKB requires a small vertical beam size at the interaction point (IP) and a higher beam current to achieve higher luminosity. One of the challenges is how to manage beam backgrounds for the Belle II detector. Several sets of movable collimators are used to reduce the beam backgrounds. When the distance between the collimator head and beam position is too small, an impedance effect may induce beam instabilities. Thus, we decided to adopt a nonlinear collimator to reduce the beam backgrounds for the Belle II detector as well as to reduce the collimator impedance, then the beam instabilities due to the short-range wake field can be suppressed. The nonlinear collimator has been utilized since February 2024. In the article, we report the results of impedance effects, beam backgrounds reduction, and beam lifetime when the nonlinear collimation system is turned on and off, respectively.

1. はじめに

SuperKEKB は KEKB のルミノシティを飛躍的に向上させることを目指す電子・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]。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[2]。ルミノシティを向上させるため SuperKEKB では、ビーム最終集束用超伝導マグネット (QCS) [3]を用いて衝突点 (Interaction point: IP)における垂直方向ビームサイズを極小にする。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 または 0.9 mm)であり、実用型加速器では、世界最小である[4]。SuperKEKB のルミノシティは、世界最高値を更新し続けているが、運転から課題も発見された[5]。我々は、運転でわかったコリメータに関連する課題[6]への対応として、非線形コリメータ(nonlinear collimator :NLC) [7-11]のインストールを決めた。本学会では、NLC の概要と最初のビームスタディの結果について報告する。

2. SuperKEKB NLC の概要

2.1 ラティスデザイン

SuperKEKB の NLC は LER に設置された。NLC 区

間のラティスを Fig. 1 に示す。SuperKEKB の NLC では、同じ強さを持つ一組の歪六極電磁石 (SuperKEKB NLC の歪六極電磁石は SNAP と呼ばれる。)が、 $-I'$ 転送行

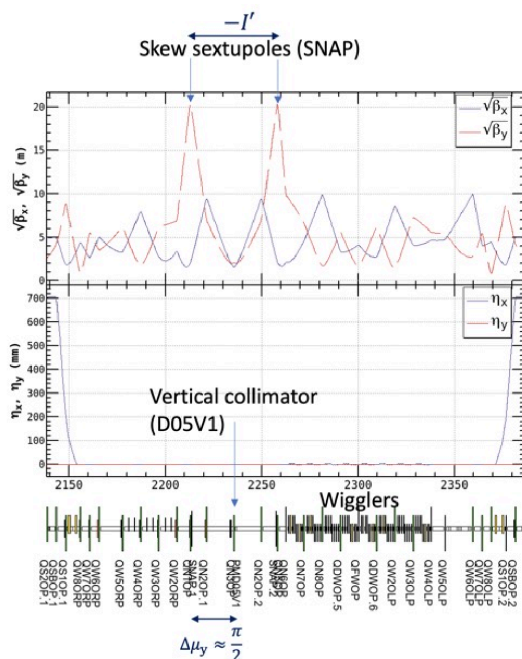


Figure 1: Layout of design lattice for NLC.

sterui@mail.kek.jp

列で結合されている。これは、歪六極電磁石による幾何学的なオプティクスの収差を補正するためである。

垂直方向のビームハローを上流の歪六極電磁石の非線形磁場で垂直方向に大きく蹴り、歪六極電磁石間に置かれた垂直方向コリメータでビームハローをカットする。ビームハローがカットされたビームは、下流の歪六極電磁石で、蹴り返されるという仕組みになっている。この仕組みを用いることで、コリメータをビームコアに近づけることなく、ビームハローを効率的にカットできる。NLC は、ビームコアにコリメータを近づけないため、impedance が小さいという特徴がある[12]。本論文では、kick factor と、その場所での垂直方向 β 関数 (β_y) の積の和を、 $\sum \beta_{y,i} k_{\perp,i}$ と、vertical transverse impedance を impedance と表記する。Table 1 に、NLC の設計パラメータを示す。また、D05V1 というのが、SNAP に挟まれたコリメータの名前である。

Table 1: Design Parameter of NLC

Parameters	Units	Values
β functions of SNAP ($\beta_{x,ys}$)	m	7.08/378.5
β functions of D05V1 ($\beta_{x,yc}$)	m	3.55/4.05
Components of transfer matrix b/w SNAP and D05V1 (R_{33}/R_{34})	m	3.11/37.2
Strength of SNAP (K_s)	m^{-2}	6.00
SNAP effective length (L_s)	m	0.335
SNAP pole tip field (B_s)	T	0.71

2.2 NLC に要求される項目

NLC インストールで一番懸念されることは、歪六極電磁石の非線形磁場によるダイナミックアパーチャーの減少である。ダイナミックアパーチャーの減少は、ライフタイムの減少や、入射効率の減少をもたらすため、大電流を目指す SuperKEKB では、避けなければならない。

次に、Background (BG)リダクションについて記述する。NLC に要求される BG リダクション能力について、説明するために SuperKEKB のコリメータ配置図を Fig. 2 に示す。図中の IR は、interaction region の略である。SuperKEKB LER では、垂直方向コリメータは 4 台使用されている。この 4 台の場所での β_y^* が 1 mm のときのパラメータとスタディ時のコリメータ設定の 1 例を、Table 2 に示す。この表は垂直方向エミッタンスを 20 pm として計算した。また、D05V1 の HG/ σ_y は、後述する NLC のハーフアパーチャーの式を用いて計算したものである。D06V1 は、一番アパーチャーを狭くして、入射ビームのビームテイルを切る役目と、異常な軌道を通るビームを最初にストップする役目を担っている(プライマリーコリメータ)。D02V1 は、損傷した際には、BG に及ぼす影響が大きく、運転上最重要のコリメータと考えられ、損傷し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。D02V1 は、素粒子検出器や QCS を守る最終砦としての役割を担っており、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(セカンダリーコリメータ)。D06V2 は、D06V1 が損傷した際のバックアップと、D06V1 でスキヤッタされた入射ビームの粒子が IR に届かないようにするために設置されている。

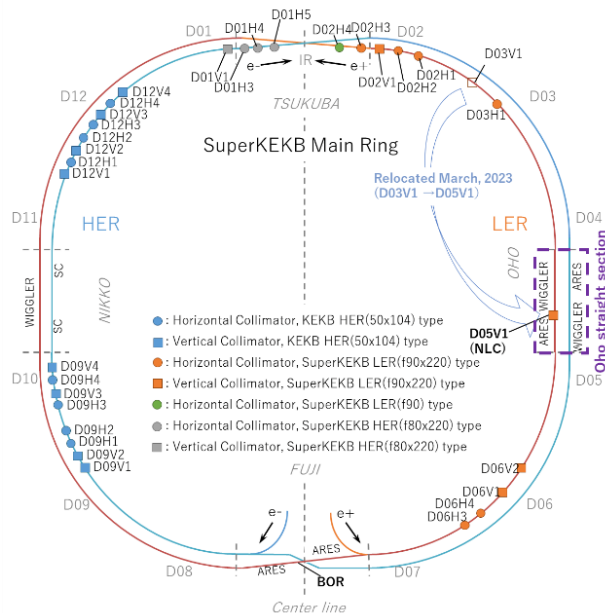


Figure 2: Location of collimators in the main ring of SuperKEKB. The terms H and V in the collimator names represent the horizontal and vertical collimators, respectively.

Table 2: Example of aperture in 14/Mar/2024. HG means half gap, σ_y means vertical beam size.

Collimator (Magnet)	β_y [m]	HG [mm]	HG/ σ_y [σ]	$\beta_{y,i} k_{\perp,i}$ [E15 V/C]
QC1RP	764	13.5	109.2	
D02V1	11.9	1.1	70.8	12.90
D06V2	20.6	1.8	88.7	10.66
D06V1	67.3	2.4	65.4	22.63
D05V1	4.05	3.6	65.4*	0.73

*): effective collimation capability in units of σ_y

プライマリーコリメータとされている D06V1 は、Table 2 にあるように、他のコリメータの場所と比較して大きい β_y の場所であるため、 $\beta_{y,i} k_{\perp,i}$ が大きい。Impedance が大きいと、より高いバンチ電流の運転時には、ビーム不安定性が問題となるため、将来の運転では D06V1 を使用することが難しい。したがって、我々は、NLC には低い impedance で、D06V1 と同等以上の BG リダクション能力を求めることになった。測定は、 β_y^* が 1 mm、LER のシングルビーム、94 バンチという条件で行った。また、大電流状態では NLC 部でのビームロスが原因で、大穂実験棟の放射線量が高くなるのがわかったため、今回の

ビーム実験は、小電流での測定のみを行った。

3. ビームを用いた NLC 関連の測定

3.1 ライフタイムと入射効率の測定

先述のように、NLC の懸念点はダイナミックアパーチャーの減少である。我々は、歪六極電磁石の電源を On/Off した場合のライフタイムと入射効率を測定した。Figure 3 は、歪六極電磁石の電源を On/Off (on: SK2=-6, Off: SK2=0) 時のライフタイムをエミッタンスの 1/2 乗で割ったものである。歪六極電磁石の電源を off したときと On したときのライフは、ほぼ同等という結果になった。

Figure 4 は、歪六極電磁石の電源を On/Off したときの入射効率を示したものである。ここから、歪六極電磁石の電源を On/Off 状態の入射効率は同等であることがわかる。したがって、これらの測定結果は、歪六極電磁石の効果は、ダイナミックアパーチャーの減少に大きな影響をもたらしていないことを示唆している。

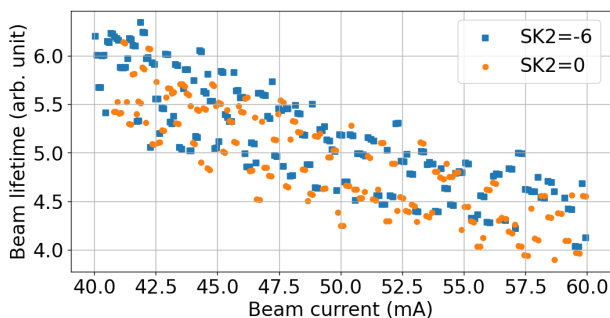


Figure 3: Comparison of lifetime when SNAP is turned on (SK2=-6) and off (SK2=0). The vertical axis is the measured lifetime divided by the square root of the emittance.

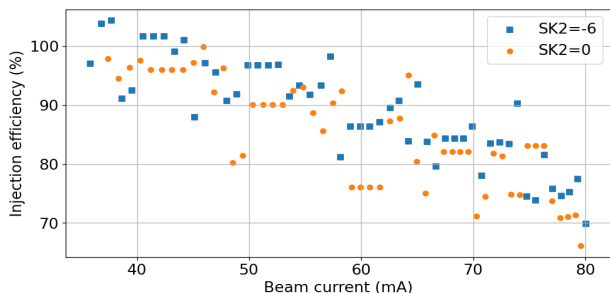


Figure 4: Comparison of injection efficiency when SNAP is turned on (SK2=-6) and off (SK2=0).

3.2 BG の削減

プライマリーコリメータとして用いられている D06V1 の代わりに D05V1 を使用できることが NLC 設置の目的の一つである。よって、我々は、D06V1 の BG リダクション能力と同等以上となる D05V1 のアパーチャーを調査した。このセクションでは、ストレージ BG と入射 BG を分けて記述していく。本論文での測定 BG は、IP 付近に設置されたダイヤモンドセンサーの値を用いた。この測定装置の

設置場所などの詳細は、参考文献[13]に詳しく記述されている。

3.2.1 NLC によるストレージ BG の削減

歪六極電磁石によってビーム粒子が受けるキックは以下の式で表される(以下、全て薄レンズ近似である)。

$$\Delta p_y = (y^2 - x^2) K_s / 2, \Delta p_x = K_s x y \quad (1)$$

ここで、 $\Delta p_{x,y}$ は、それぞれ水平、および垂直方向のキックである。 x と y は、SNAP での粒子の水平および垂直方向の軌道のオフセットである。また、SNAP の強さ (K_s) は以下の式で定義される。

$$K_s = \frac{L_s}{B\rho} \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} \quad (2)$$

ここで、 $B\rho$ 、 B_x および L_s は、それぞれ magnetic rigidity, 水平方向の磁場の強さ、電磁石の有効長を表される。D05V1 を用いて、軌道オフセットが上流の SNAP の場所で $|y| > y_s$ のストレージビームのハローをカットしたい場合、D05V1 のハーフアパーチャーは、以下の値に設定する必要がある。

$$A_{y,c} = R_{34} K_s y^2 / 2 \quad (3)$$

Figure 5 に、ストレージ BG の測定結果を示す。D05V1 は、式(3)で計算された結果を、D06V1 はハーフギャップ(ビームからコリメータヘッドまでの距離)を垂直方向ビームサイズで割ったものをハーフアパーチャーとした。この図は、ストレージ BG のみをチェックするために、decay 時のデータをプロットした。この図から、同じアパーチャーの時には、D05V1 のほうがストレージ BG の削減能力が高いことを示している。これは、D05V1 のほうが、IP に近いいため、クーロン散乱起因の BG をより減らせるためだと考えられる。また、D06V1 と D05V1 を同じアパーチャーにした場合は、ストレージ BG は D05V1 のアパーチャーの場合と同じになった。

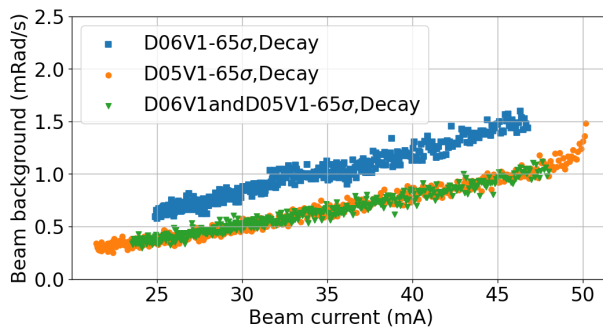


Figure 5: Comparison of storage BG when half aperture is equal between D06V1 and D05V1

3.2.2 NLC による入射 BG の削減

入射 BG をストレージ BG と分けて記述したのは、入射振動と、歪六極電磁石からのキック力の関係で、入射ビームのハローをカットする能力が通常のコリメータと異なるためである。SuperKEKB の現在の入射方式は、off-axis 入射であるため、入射ビームは、ストレージビームの周りを水平方向に振動する。この水平方向の振動が原

因で、式(1)から、SNAP での垂直方向キック力 Δp_y が小さくなることわかる。D05V1 で、D06V1 と同等の入射 BG を削減するためには、よりハーフアパーチャーを狭くする必要がある。Figure 6 に、横軸にビーム電流を、縦軸に入射時の BG をとったものを示す。ここから、D05V1 は、D06V1 より BG 削減できていないことが分かる。

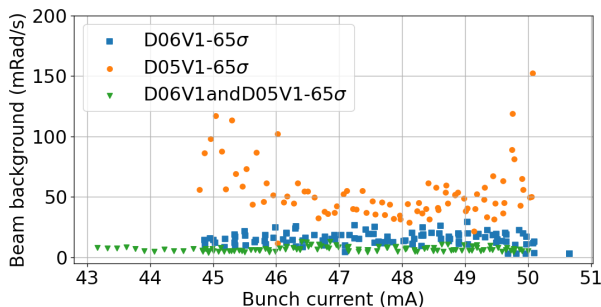


Figure 6: Comparison of BG including injection beam when half aperture is equal between D06V1 and D05V1

D05V1 では、どれくらいストレージ BG 削減と入射 BG 削減のときのアパーチャーが違うのかを示したのが、Fig. 7 である。Figure 7 は、横軸に D06V1 のハーフギャップを、縦軸に D05V1 のハーフギャップをとったものである。この計算は、リングアクセプタンスの測定結果 ($2J_x = 2 \times 10^{-6}$ m) を用いて計算した。また、現在のオプティクスでは SNAP の β_x は 7 m である。Figure 7 から、D06V1 のハーフギャップが 2.4 mm と同等のアパーチャーとするには、D05V1 のハーフギャップはストレージ BG で 3.8 mm、入射 BG で 2 mm (SNAP の β_x が 7 m のとき) となる。Figure 8 は、横軸に入射時の振動を考慮に入れたハーフアパーチャーを、縦軸に入射時の BG をとったものである。この測定時の SNAP の β_x は 7 m である。この図から、入

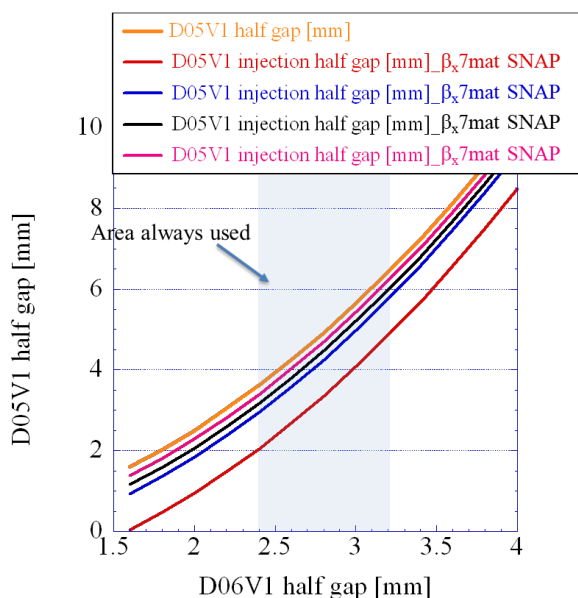


Figure 7: D05V1 half gap versus D06V1 half gap. Change of half gap at D05V1 considering the effects of injection oscillation when changing β_x at SNAP.

射振動を考慮に入れたハーフアパーチャーで比較した場合、D05V1 の入射時の BG リダクション能力は、D06V1 より同等以上であることがわかる。

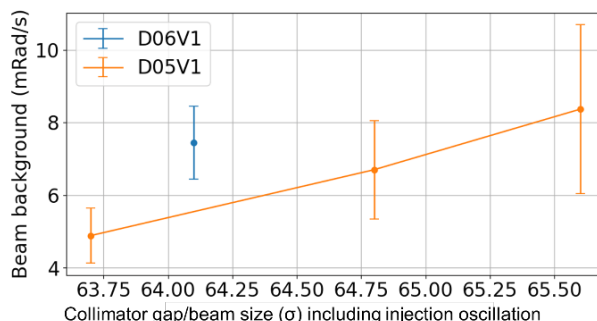


Figure 8: BG including injection timing versus half aperture. D05V1 half aperture considers the effects of injection oscillation.

Figure 7 から、SNAP の β_x を小さくするとストレージ BG をカットする曲線に、入射 BG をカットする曲線が近づいていることがわかる。ただし、SNAP での β_x を小さくすると D05V1 での β_x は大きくなる。つまり、D05V1 での入射振幅がコリメータヘッドの水平方向の幅 (12 mm) をはみ出さない範囲から、SNAP の β_x は下限が決まる。また、 β_x が小さい場合、入射条件が厳しくなるため、どの値が安定運転に適しているかはビームで確認する必要がある。Figure 9 は、SNAP の β_x を横軸にとって、縦軸に D05V1 での入射振幅をとったものである。ここから、SNAP の β_x は、約 1.5 m 以上でないと、入射振幅がヘッドの幅以上になることがわかる。我々は、放射線シールド準備が整う次期の運転で、SNAP の β_x を小さくしていき、最適値を調査する予定である。

3.3 NLC による impedance 低減の評価

SuperKEKB LER では、ハイバンチ電流スタディ時に vertical beam size blow-up (VBSB) が観測された。この VBSB の原因は、スタディの結果、-1 mode 不安定性

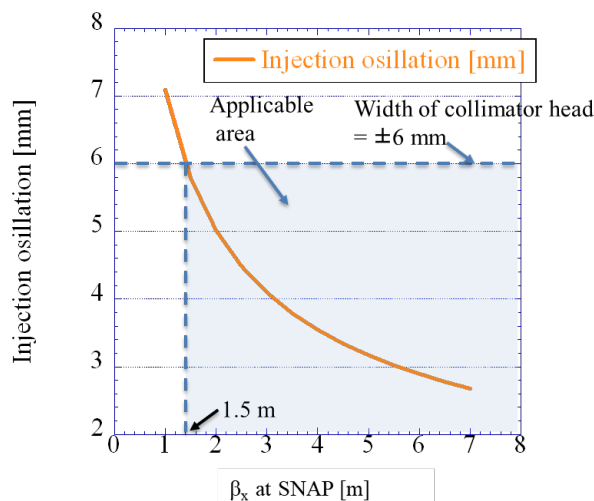


Figure 9: Injection oscillation at D05V1 versus β_x at SNAP.

(impedance と bunch by bunch feedback system の相互作用) が原因とわかった[14]。 $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$ の運転時には、VBSB が起きるバンチ電流閾値は 1.2 mA 程度であった[15]。この値は、設計バンチ電流 (1.4 mA) より低いため、impedance を減らし、VBSB 等の impedance 起因の運転上の障害がクリアする必要がある。我々は、D06V1 の代わりに D05V1 を使用した場合には、impedance を減らせることができるのかを確認するためにチューンシフトを測定した。また、VBSB が起きるバンチ電流閾値の調査も行った。垂直方向チューンシフト測定の結果を Fig. 10 と Table 3 に示す。Table 3 の理論値は、バンチ長 6 mm で計算した kick factor から、下の式を用いて算出した[16]。

$$\Delta v_y = \frac{T_0 I_b}{4\pi E/e} \sum_i \beta_i k_{\perp i} \quad (4)$$

ここで、 T_0 は revolution time、 $T_0 I_b$ はバンチ電流、 E/e はビームエネルギー [GeV] である。この図と表から、非常に計算値と測定値がほぼ合っており、D05V1 を用いたほうがチューンシフトの傾きが小さいのがわかる。

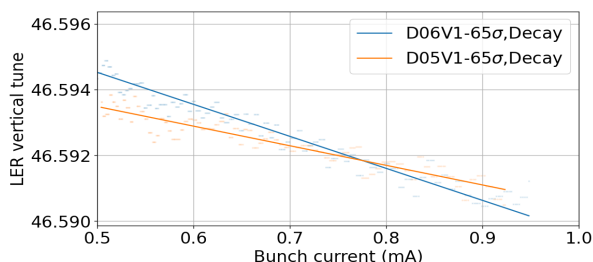


Figure 10: Comparison of LER vertical tune shift when half aperture is equal between D06V1 and D05V1.

Table 3: Measured and Calculated Value of LER Vertical Tune Shift

Collimator setting	Measured Δv_y [/mA]	Calculated Δv_y [/mA]
D06V1=65 σ	0.0097	0.0092
D05V1=65 σ	0.0059	0.0055

次に、VBSB の測定結果を Fig. 11 に示す。この図は、バンチ電流を横軸に、垂直方向エミッタンスを縦軸にとったものである。この図から、D05V1 を用いた場合には、設計バンチ電流 (1.4 mA) でも VBSB は起きていないが、D06V1 を用いた場合にはバンチ電流 1.2 mA 手前から、急激に VBSB が起きていることがわかる。

チューンシフトと VBSB の測定結果より、想定通り D06V1 を使用するより、D05V1 を使用することで、impedance を減らし、VBSB が起くるバンチ電流閾値を押し上げることができた。

3.4 NLC でのビームロスに起因する放射線の問題

NLC は、Fig. 3 に示すように大穂直線部に設置された。この区間には、トンネルに機器の搬入ができる実験棟が併設されている。NLC 設置前に、NLC でのビームロス起因の放射線シミュレーションは行っていたが、実際の運転では、想定より 10 倍以上の放射線が実験棟で観測さ

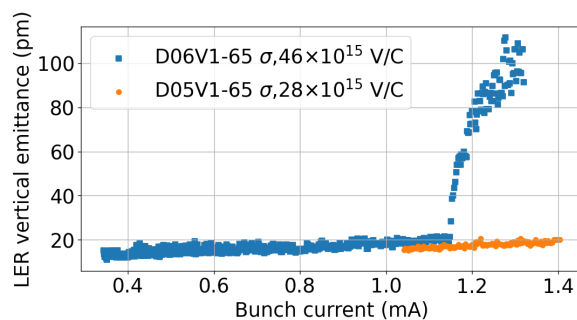


Figure 11: Comparison of bunch current threshold of VBSB when half aperture is equal between D06V1 and D05V1.

れた。D05V1 のギャップを D06V1 と同じくらいにした場合、KEK の放射線自主規制値の上限を超えるため、今期の運転中では、高いビーム電流状態の時は D05V1 のギャップをあまり狭くできなかった。Figure 12 に、低ビーム電流時に大穂実験棟で測定された放射線モニター (ガンマ+中性子) の値を示す。D05V1 の入射振動を考慮に入れたハーフアパーチャーが 63.7 σ で、ビーム電流 80 mA のとき最大 0.8 $\mu\text{Sv/h}$ であり、ビーム電流 2 A のときには 20 μSv 程度になる。今後、シールド増強していき、ビーム電流 2 A のときでも、1.5 $\mu\text{Sv/h}$ 以下にする予定である。

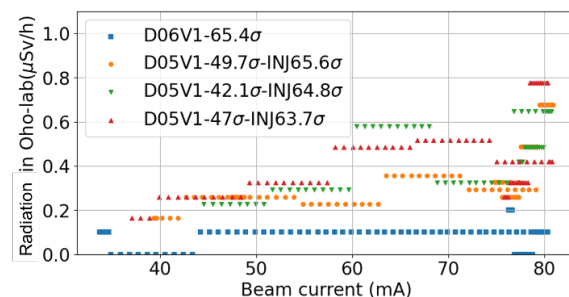


Figure 12: Radiation in Oho-lab versus beam current.

4. 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。

- 歪六極電磁石の効果は、ダイナミックアパーチャーの減少に大きな影響をもたらしていないことがわかった。
- D05V1 のストレージ BG、入射 BG 削減能力はともに合理的な測定結果であり、インピーダンス削減効果も想定通りであった。
- 実験棟での放射線の問題がシールド増強で解決次第、さらなる NLC に関するコミッションングを進めていく。

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] N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022).
- [4] Y. Funakoshi *et al.*, “The SuperKEKB Has Broken the World Record of the Luminosity”, in Proc. IPAC'22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1-5. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPLXGD1.
- [5] Y. Ohnishi, “Recent progress of SuperKEKB project and future prospect”, in Proc. IPAC'23, Venice, Italy, May 2023, pp. 1339-1342. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-TUOGB1
- [6] S. Terui *et al.*, “Challenges related to SuperKEKB collimator”, Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 – September 1, 2023, Funabashi, Japan.
- [7] “JLC-I”, Tech. Rep. KEK Report KEK-92-16 (KEK, 1992) sec.4.2.4.
<https://libexopc.kek.jp/preprints/PDF/201992/9224/9224016.pdf>
- [8] N. Merminga, J. Irwin, R. Helm, and D. Ruth, R, “COLLIMATION SYSTEM FOR A TEV LINEAR COLLIDER”, Part. Accel.48, 85 (1994).
- [9] N. Toge(ed), “Jlc design study”, KEK-REPORT-97-1 (1997).
- [10] A. Faus-Golfe and F. Zimmermann, “A Nonlinear collimation system for CLIC”, in 8th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2002) (2002) pp. 533–535.
- [11] J. Resta Lopez, F.-G. Angeles, L. Lari, and F. Zimmermann, “UPDATE ON NONLINEAR COLLIMATION SCHEME FOR THE LHC”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 151(2014).
- [12] S. Terui *et al.*, “Nonlinear collimator design for SuperKEKB”, Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 – September 1, 2023, Funabashi, Japan.
- [13] S. Bacher *et al.*, “Performance of the diamond-based beam-loss monitor system of Belle II”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 997 (2021) 165157.
- [14] 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.
- [15] S. Terui *et al.*, “Challenges related to SuperKEKB collimator”, Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 – September 1, 2023, Funabashi, Japan.
- [16] T. Ieiri, H. Fukuma, Y. Ohnishi, M. Tobiyama, “Measurement of wake effects by means of tune shift in the KEKB low-energy ring”, in: Proc. EPAC, Edinburgh, Scotland, 2006, 2101-2103.