

# SuperKEKB 用 nonlinear collimator の設計

## NONLINEAR COLLIMATOR DESIGN FOR SUPERKEKB

照井真司<sup>#, A)</sup>, 船越義裕<sup>A)</sup>, 石橋拓弥<sup>A)</sup>, 小磯晴代<sup>A)</sup>, 増澤美佳<sup>A)</sup>, 森川祐<sup>A)</sup>,  
森田昭夫<sup>A)</sup>, 中村衆<sup>A)</sup>, 中山浩幸<sup>A)</sup>, ナトチーアンドリー<sup>B)</sup>, 生出勝宣<sup>C)</sup>, 大西幸喜<sup>A)</sup>,  
大見和史<sup>A)</sup>, 柴田恭<sup>A)</sup>, 白井満<sup>A)</sup>, 末次祐介<sup>A)</sup>, 飛山真理<sup>A)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 周徳民<sup>A)</sup>,  
Shinji Terui<sup>#, A)</sup>, Yoshihiro Funakoshi<sup>A)</sup>, Takuya Ishibashi<sup>A)</sup>, Haruyo Koiso<sup>A)</sup>, Mika Masuzawa<sup>A)</sup>, Yu Morikawa<sup>A)</sup>,  
Akio Morita<sup>A)</sup>, Shu Nakamura<sup>A)</sup>, Hiroyuki Nakayama<sup>A)</sup>, Andrii Natochii<sup>B)</sup>, Katsunobu Oide<sup>A)</sup>, Yuki Yoshi Ohnishi<sup>A)</sup>,  
Kazuhito Ohmi<sup>A)</sup>, Kyo Shibata<sup>A)</sup>, Mitsuru Shirai<sup>A)</sup>, Yusuke Suetsugu<sup>A)</sup>, Makoto Tobiyama<sup>A)</sup>,  
Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Demin Zhou<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, USA <sup>C)</sup> University of Geneva, Geneva, Switzerland

### Abstract

The operation of the SuperKEKB collimators has encountered challenges in achieving beam stability and reducing beam background. To tackle these issues, we decide to introduce a novel collimation approach called the nonlinear collimator (NLC). We show a comprehensive description of the NLC concept, and its effectiveness through evaluations of collimator impedance, beam background reduction, impact on beam lifetime and dynamic aperture. The possibility of using NLCs as absorber collimators to counteract events that damage the collimator was also shown to be useful.

### 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]。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 $\beta$ 関数( $\beta^*_y$ )は 0.8 mm(通常運転の $\beta^*_y$  は 1 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。我々は、運転でわかったコリメータに関連する課題への対応として、非線形コリメータ(nonlinear collimator :NLC)のインストールを決めた。本学会では、NLC の概要と、NLC でどのように課題に対応していくのかについて報告する。

### 2. NLC の概要

NLC は、1990 年頃から NLC は、1990 年頃から next linear collider[5,6,7]や CLIC[8], LHC 用[9]に提案されてきたが、実機では採用された事例はない。SuperKEKB は NLC をインストールされた初の実機となる。NLC の原理は、垂直方向に大きな軌道のずれを持つビームハローを最初の歪六極電磁石の非線型磁場で垂直方向に大きくキックして、その下流に置かれた垂直コリメータでビームから取り除くことである。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コリメーションできる。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。

本論文では、kick factor と、その場所での垂直方向 $\beta$ 関数の積の和を、 $\sum \beta_{y,i} k_{\perp,i}$ と表記する。また、SuperKEKB タイプの垂直方向コリメータには、コリメータジョーが上下に設置されている[10]。

LER の垂直方向コリメータでは、関連する大きな課題が存在する[11]。この課題に対応するために、NLC は LER にインストールされることになった。よって、ここからは、LER の垂直方向コリメータについて記述する。

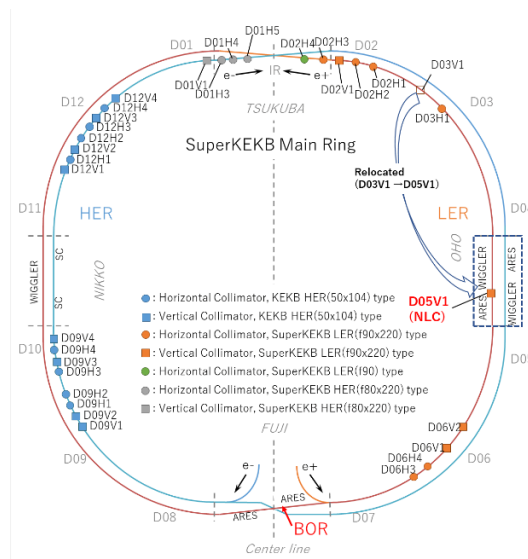


Figure 1: Location of collimators in the MR. The terms H and V in the collimator names represent the horizontal and vertical collimators, respectively.

Figure 1 に、MR でのコリメータの配置図を示す。IP と

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

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、interaction region (IR) の beam background (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である。我々は、impedance が高くなるため運転で使用されていない D03V1 というコリメータを移設して、NLC (D05V1) として用いることにした。

### 3. SuperKEKB NLC のラティスデザイン

Figure 2 に NLC 付近のラティスの設計を示す。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(ベータatron振動振幅に依存した)オプティクスの収差を補正するためである。ここで、 $-I'$  転送行列とは、4行4列の転送行列(水平および垂直方向)の対角行列要素が  $-1$  で非対角要素は (2,1) と (4,3) 要素を除いて、0 となる行列である。SNAP 間のベータatron位相は、水平、垂直両方向とも  $\pi$  に設定されている。また、SNAP と D05V1 の間のベータatron位相は両方向とも  $\pi/2$  近くに設定されている。さらに、SNAP と、QCS 内の QC1LP と QC1RP の間の垂直方向の位相は  $N\pi$  ( $N$ : 整数) に設定されている。これは、Belle II への BG の主要な原因である、QCS 内部でのビームロスを低減するためである。

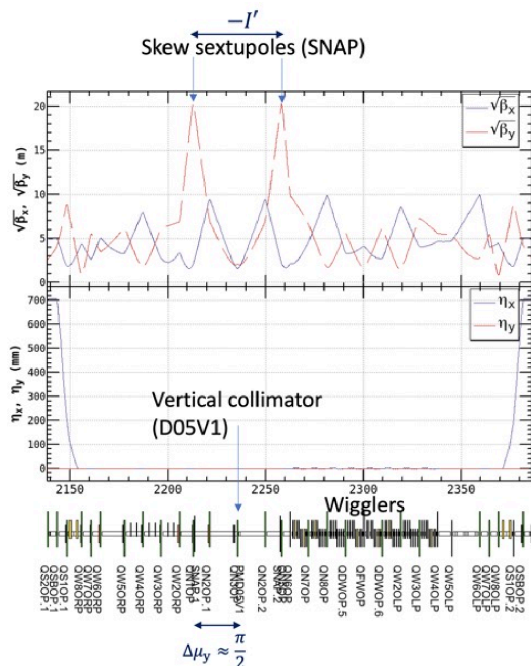


Figure 2: Layout of design lattice for NLC.

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ように表される(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。次に、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す。Figure 2 にあるように、非線型キックを大きくするために、SNAP での垂直方向の  $\beta$  関数は、大きな値に設定されている。Table 1 に、NLC の設計パラメータを示す。

Table 1: Design Parameter of NLC

Parameters	Units	Values
$\beta$ functions of SNAP ( $\beta_{x,ys}$ )	m	7.08/378.5
$\beta$ 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 <sup>-2</sup>	6.00
SNAP effective length ( $L_s$ )	m	0.335
SNAP pole tip field ( $B_s$ )	T	0.71

### 4. NLC をインストールするメリット

#### 4.1 インピーダンスの低減と BG の削減

最初に、NLC の設置を検討したのは、参考文献[12, 13]に記載されている vertical beam size blow-up (VBSB) が、Transverse Mode Coupling Instability (TMCI)[14]が原因だと考えられたため、impedance を減らすことが最優先課題だと考えたからである。しかし、VBSB の原因は、-1 mode 不安定性が原因とわかり、bunch by bunch feedback system の調整後には、 $\beta_y^* = 1$  mm の運転時には、コリメータヘッドが損傷していなければ、VBSB が起きるバンチ電流閾値を 1.25mA 程度にはできることを、少数バンチのビームスタディで示した[11]。この値は、設計バンチ電流より低い、通常運転時に sudden beam loss (SBL)[15]を考慮して制限している 0.7 mA より、高い値である。したがって、現在の通常運転には impedance は支障を及ぼしていない、しかし、impedance の低減は将来の SuperKEKB にとって、非常に重要な課題である。

D05V1 を用いて、軌道オフセットが上流の SNAP の場所で  $|y| > y_s$  のビームハローをコリメーションしたい場合、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。

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

先述のように一番狭いアパーチャーに設定されているプライマリーコリメータと同等のコリメーション能力となるように NLC を設定した際のアパーチャーを比較した。

Table 2 に、20/Dec/2021 の LER の垂直方向コリメータの設定値を示す (half gap: コリメータヘッド間の長さを 2 で割った値)。これらの設定は、ライフタイムや入射効率に影響を及ぼさないという条件下で、Belle II の BG を最小にするように実験的に決められた。この表には、垂直ビームサイズ ( $\sigma_y$ ) で規格化したアクセプタンスも示されている。ここで、 $\sigma_y$  は、 $\beta_y$  と、垂直エミッタンス (39.8 pm) を用いて計算した。表には QC1 電磁石 (QCS 内で最も IP に近い 4 極電磁石、垂直方向  $\beta$  関数がリング内で最大の場所) のアクセプタンスも示されているが、実験的には、コリメータのアクセプタンスは、QC1 のビームパイプ径よりかなり狭くする必要があることが分かる。また、表には、プライマリーコリメータと同等より小さいコリメーション ( $50\sigma_y$ ) を与えたときの D05V1 のアパーチャーも示されている。D05V1 のアパーチャーは式(3)を用いて、最初の SNAP での  $50\sigma_y$  のアパーチャー 6.14 mm を仮定して計算した。ここで、式(3)から分かるように、上下のどちらかのコリメータジョー (SNAP の極性による) だけで、必要なコリメーションを実現できるが、表では、両方とも同じ half gap に設定して、 $\beta_{y,i}k_{\perp,i}$  を計算した。D06V1 を、D05V1 に置き換えることにより、 $\sum \beta_{y,i}k_{\perp,i}$  の値を大きく減らすことができることが、表からわかる。

Table 2: Comparison of Collimator Aperture in 20/Dec/2021

Collimators (Magnet)	$\beta_y$ [m]	Half gap [mm]	Half gap/ $\sigma_y$	$\beta_{y,i}k_{\perp,i}$ [E15 V/C]
QC1RP	764	13.5	76.2	
D02V1	11.9	1.06	48.95	13.47
D06V2	20.6	2.67	93.2	5.88
D06V1	67.3	3.10	59.75	15.37
D05V1	4.05	4.32	50*)	0.56

\*) : effective collimation capability in units of  $\sigma_y$

現在の運転状態と同程度の BG 量を許容した場合の、 $\sum \beta_{y,i}k_{\perp,i}$ 、及び TMCI と VBSB が発生するバンチ電流 (閾値) を Fig.3 に示す。この図は、 $\sum \beta_{y,i}k_{\perp,i}$  と TMCI と VBSB のバンチ電流閾値 (それぞれ、 $Ib_{TMCI\ threshold}$  と、 $Ib_{-1mode\ threshold}$  と表記する) を  $\beta_y^*$  の関数としてプロットしたものである。TMCI の閾値は式(4)から求めており、それぞれ NLC がある場合とない場合の結果を示した。横軸に  $\beta_y^*$  にとって、縦軸に NLC がある場合とない場合の  $\sum \beta_{y,i}k_{\perp,i}$  と、NLC がある場合とない場合の TMCI の式(4)[14]から導かれるバンチ電流閾値 ( $Ib_{TMCI\ threshold}$ ) と、-1 mode 不安定性による VBSB のバンチ電流閾値 ( $Ib_{-1mode\ threshold}$ ) をプロットしたものである。VBSB については、未だ解明できていないことがあるため、本論文では、簡便に  $\beta_y^* = 1\text{ mm}$  時の測定値 (1.25mA) と、TMCI の理論式 によるバンチ電流閾値 (2.4mA) の比を用いて、式(5)で計算した。ここで  $C_1$  は定数 (8)、 $f_s$  はシ

ンクロトン周波数、 $E$  はビームエネルギー ( $eV$ ) である。

$$Ib_{TMCI\ threshold} = C_1 f_s E / \sum \beta_{y,i} k_{\perp,i} \quad (4)$$

$$Ib_{-1mode\ threshold} = Ib_{TMCI\ threshold} \times \frac{1.25}{2.4} \quad (5)$$

図から、わかるように NLC を導入した場合、TMCI と -1 mode 不安定性のバンチ電流閾値ともに改善がみられる。ただし NLC を導入しても、 $\beta_y^*$  を絞った際には、最終設計バンチ電流には届かないことから、更なる改善策を検討する必要がある。

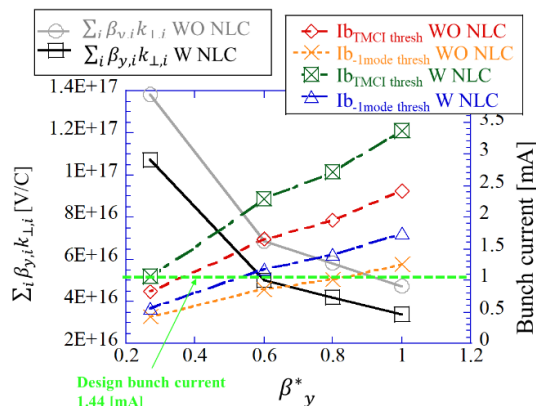


Figure 3: Vertical impedance, threshold of bunch current of TMCI and -1 mode with / without NLC versus  $\beta_y^*$ .

NLC を導入した場合、同レベル (NLC と D06V1 の両方を用いた場合) の  $\sum \beta_{y,i}k_{\perp,i}$  で、BG 量を減らすことも可能になる。D05V1 の half gap を狭くした際の BG 量とビームライフタイムの変化を示したものを、Fig. 4 に示す。計算は、参考文献[16]に示す方法で行われた。ここから、half gap を 4mm より小さくするとライフタイムが減少してしまうため、4mm 以上で運用しなければいけないことと、half gap が 20mm より小さくした場合に BG 量が減っていることがわかる。

#### 4.2 NLC を用いた SBL 対策

SuperKEKB では SBL が起きて、コリメータヘッドが損傷する事象が起きて、BG の増加や、impedance の増加が問題になっている。我々は、SBL 対策として、コリメータヘッドの素材として carbon fiber composite (CFC) を使用した、ビームが当たっても壊れにくいコリメータ (low-Z コリメータと呼ばれ、コリメータヘッド長は 60mm[17]) を加速器内に 2020 年の秋の運転前に、インストールした。Low-Z コリメータを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、損傷しなかった。しかし、コリメータの impedance に関連するビームサイズブローアップが起きたため、impedance が小さいコリメータヘッドにタンタルを用いたものに交換した。この経験から、CFC のような軽い素材は、ビームが当たった際にできるペアクリエーションの数が少ないため壊れにくいということと、ヘッド長が長い場合、impedance が大きくなり、加速器運転に支障をきたすということがわかった。low-Z コリメータは失敗したが、SBL が原因のヘッド損傷は、重大な問題であ

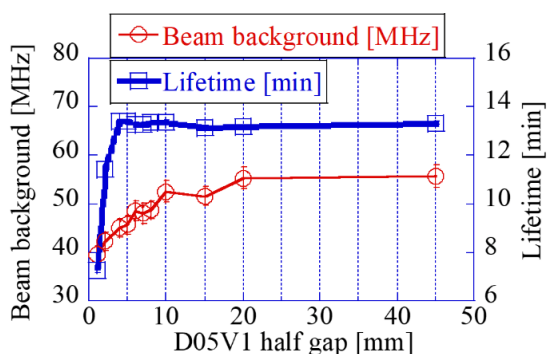


Figure 4: BG and lifetime versus D05V1 half gap.

るため、別な対策をとる必要があった。我々は、NLC 上流にある D06V1 に、軽い材料でヘッド長が長くないコリメータヘッドをインストールして、D06V1 のアパーチャーを一番狭いポジションになるようにして、スポイラーコリメータ(粒子を散乱させるコリメータ)として使い、NLC をアブソーバーコリメータ(粒子を受け止めるコリメータ)とする方法を採用できないか検討した(method using NLC as absorber collimator: MNAC)。この2段階でコリメーションする方法は、プロトン加速器では、一般的なものである[18]。MNAC を採用した場合に、異常な軌道を通るビームは、ビームコアがスポイラーコリメータに当たるが、スポイラーコリメータは軽い材料かつ、ヘッド長が短いため、粒子の角度などが変化するだけで、ほとんどの粒子が通り抜け、ビームコアのサイズが膨らんだ状態になり、下流に進む。膨らんだビームコアが、下流の NLC に当たるようになる。NLC に当たるビームコアのサイズは膨らんでいるため、NLC のコリメータヘッドを損傷しない。この方法は、現状から impedance を増やすことをせずに、SBL が原因のコリメータヘッド損傷の確率を下げられるというのが、メリットである。

コリメータが損傷しないという観点からは、コリメータヘッドの材料にはできるだけ軽い材料を用いたいところだが、軽い素材を選択した場合、ヘッド長が長くなったことに伴う impedance 増加の問題も出てくる。これらを考慮して、現在のところ、金属の中では密度が低く、比較的融点が高いチタンを選択した。

我々は、上述した MNAC のシナリオが成り立つかどうかについて、計算を行った。計算は、以下の2種類のシミュレーションを行った。なお、スポイラーコリメータのヘッド材料はチタンを、アブソーバーコリメータのヘッド材料はタンタル(ヘッド長が 10 mm)を想定して計算を行った。

1 種類目の計算では、SBL 時のビームが、スポイラーコリメータに当たって散乱された粒子が、Belle II でロスしないかを、beam tracking シミュレーションで調べた。D06V1 ヘッドが損傷したイベントの時、参考文献[11]に示すように bunch oscillation recorder (BOR, 場所は Fig. 1 参照)の位置で、垂直方向に最大-0.5mm 程度ビーム軌道がオフセットしたことがわかった。そこで、我々は、ヘッドが損傷したのは、ビーム軌道がずれたためだと仮定した。また、BOR の位置で垂直方向にビーム軌道を-0.5mm オフセットさせただけでは、そのターンで D06V1 にぶつかるという結果がでなかったため、BOR

の位置でビームを垂直方向に-0.5mm ビームをオフセットさせて、かつ、D06V1 コリメータに当たるように垂直方向の角度をスキャンしてみた。計算は  $\beta_y^* = 1 \text{ mm}$  のオプティクスファイルを用いて行った。この結果、垂直方向に、-59  $\mu\text{rad}$  以下、56  $\mu\text{rad}$  以上に角度を持った粒子は、D06V1 ヘッドにビームコアが当たることがわかった。Figure 5 に、BOR の位置で、ビーム軌道を垂直方向に、-0.5mm オフセットかつ 56  $\mu\text{rad}$  の角度をつけた場合の計算結果を示す。横軸にスポイラーコリメータのヘッド長を、縦軸に該当コリメータ付近( $\pm 4 \text{ m}$ )での ロスをプロットした。ここから、スポイラーコリメータ(D06V1)のヘッド長が 10 mm 以下の時には、アブソーバーコリメータ(D05V1)付近でもロスが出てくるが、IR でのロスは出てこないということがわかる。したがって、MNAC は IR でロスを発生させることはないと考えられる。ちなみに、計算からスポイラーコリメータのヘッドは、2 mm 以下でも問題ないように見えるが、製作上の問題と参考文献[17]に示すように、先端に電界が集中する危険性があるため、2 mm を下限とした。

2 種類目の計算では、MNAC を採用した場合、SBL のビームがアブソーバーコリメータに当たった際に、どれくらいのビーム電流まで壊れないかを調べた。このシミュレーションは、1 種類目の beam tracking で計算された粒子を用いた。Figure 6 に、横軸にビーム電流をとって、縦軸にスポイラーを用いた場合と用いていない場合の、アブソーバーコリメータ(D05V1)の融点を越えた体積をとったものを示す。スポイラーは、チタンのヘッド長 2mm を仮定した。スポイラーを用いた場合は、ロスしたビーム電流が 1500 mA 以上のときにタンタルが溶け始めるということがわかる。スポイラーがない場合は、50 mA 程

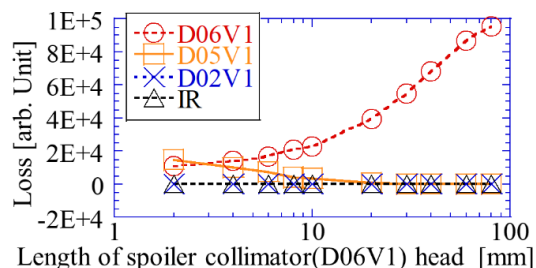


Figure 5: Losses near collimator and IR versus D06V1 head length.

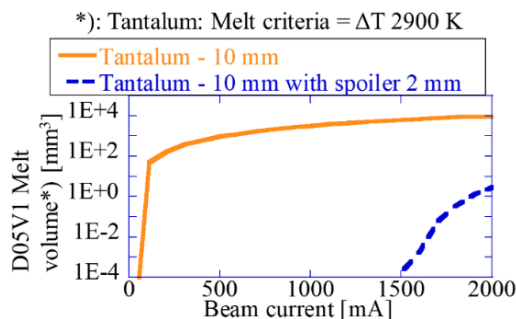


Figure 6: D05V1 melt volume versus beam current with/without MNAC adoption.

度でタンタルが溶け始める。スポイラーを用いた場合には、溶けだすビーム電流の値が、非常に高くなっているということがわかる。したがって、スポイラーを用いる方法で SBL が起きた時にスポイラー以外のコリメータや IR を保護するというシナリオが成り立つと考えられる。先述のように SBL の原因を調べているが、まだわかっていないため、MNAC を採用して、LS1 後の安定運転を実現しながら、SBL の原因の追究を行う予定である。

## 5. SuperKEKB NLC インストールの懸念点

### 5.1 ダイナミックアパーチャーの減少

我々は、NLC 導入を検討する際に、SNAP の非線形成分が影響してダイナミックアパーチャーが減少して、入射効率が減少することを懸念した。そのため、NLC がある場合と、ない場合のオプティクスについてダイナミックアパーチャーの比較を行った。Figure 7 に計算結果を示す(垂直水平エミッタンス比  $\varepsilon_y/\varepsilon_x = 0.03$ 、ベータatron 振動の初期位相が 0: 赤、 $\pi/2$ : 青)。図から、NLC 有無によるダイナミックアパーチャーの変化は小さいことがわかる。よって、入射効率への影響は小さいと予想される。

### 5.2 一部 wiggler 撤去に伴うダンピングタイムの増加

我々は、NLC を導入する場所として、Fig.1 に示した

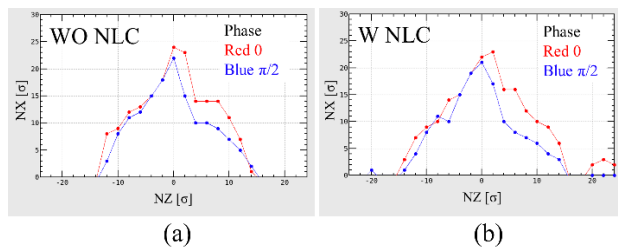


Figure 7: Dynamic aperture with/without NLC.

大穂直線部の wiggler section 上流部を選択した。NLC を wiggler section 下流部に設置すると NLC に照射される放射光の熱量が大きすぎるので、上流部の wiggler (大穂直線部に設置されている全 wiggler の 5/13) を撤去して NLC 設置に十分な長さの区間を確保した。我々は、wiggler section 一部撤去の影響(ダンピングタイムの増加)が運転上問題になった際には、残っている wiggler の磁場を強めて、ダンピングタイムを NLC 設置前の値に戻すこともプランとして考慮している。この場合、wiggler section のビームパイプに非常に強い放射光が当たるため、フランジにかかるストレスが大きくなり、真空リークの危険性が高くなる。我々は、真空リークの危険性を減らすために光マスクの増加や冷却ファンの増加を行うことにした。

## 6. 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 NLC のラティスを示し、また、NLC の採用が impedance と BG の低減にメリットがあることを示した。また、D06V1 をスポイラーコリメータとし、NLC をアブソルーブコリメータにすることで、SBL 対

策にも有用である可能性についても示した。

- SuperKEKB NLC インストールで懸念される、ダイナミックアパーチャーの減少が引き起こす入射効率への影響は小さいという検討結果と、wiggler 電磁石の一部を撤去したダンピングタイムの増加への対応方針について、報告した。

## 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”, Proceedings of the 13th International Conference on Particle accelerator, p. 1-5.
- [5] “JLC-I” [JLC Group], KEK Report 92-16, Sec.4.2.4 (1992), <https://libex.topc.kek.jp/preprints/PDF/1992/9224/9224016.pdf>
- [6] N. Merminga *et al.*, “Collimation system for a TeV linear collider”, Part. Accel. 48, 85 (1994).
- [7] N. Toge, (ed). [JLC Design Study Group], “JLC Design Study”, KEK-REPORT-91-1 Sec. 13.2.3 (1997), <https://lss.fnal.gov/archive/other1/kek-report-97-1.pdf>
- [8] A. Faus-Golfe\*, F. Zimmermann, “A Nonlinear Collimation System For CLIC”, 8<sup>th</sup> EPAC, CERN-SL-2002-032(AP) (2002).
- [9] J. Resta-López *et al.*, “Update on nonlinear collimation scheme for the LHC”, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, 151(2014).
- [10] T. Ishibashi *et al.*, “Movable collimator system for SuperKEKB”, Physical Review Accelerators and Beams, 23 (2020) 053501.
- [11] S. Terui *et al.*, “Challenges related to SuperKEKB collimator”, Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29 – September 1, 2023, Funabashi, Japan.
- [12] S. Terui *et al.*, “The report of machine studies related to the vertical beam size blow-up in SuperKEKB LER”, *J.Phys.Conf.Ser.* 2420 (2023) 1, 012061, JACoW IPAC2022 (2022) WEPOTK050.
- [13] 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.
- [14] “Transverse mode coupling instability (TMCI)”, Handbook of Accelerator Physics and Engineering, 3rd Printing (2009)
- [15] H. Ikeda, “Sudden Beam Loss,” The 26th KEKB Accelerator Review Committee (2022), December 13-14, 2022.
- [16] A. Natchii *et al.*, “Improved simulation of beam backgrounds and collimation at SuperKEKB”, Physical Review Accelerators and Beams 24 (2021) 081001.
- [17] S. Terui *et al.*, “Low-Z collimator for SuperKEKB”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 1047 (2023), doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB358
- [18] Ralph W. Aßmann, “Experience in Beam Collimation”, SuperKEKB: Challenges for the High Luminosity Frontier 30 - 31 January 2020, KEK, Japan, [https://conference-indico.kek.jp/event/103/contributions/7/attachments/30/33/2020-01-31\\_collimation\\_assmann\\_out3.pdf](https://conference-indico.kek.jp/event/103/contributions/7/attachments/30/33/2020-01-31_collimation_assmann_out3.pdf)