

SuperKEKB 入射器におけるシンクロトロン放射光モニターを用いた非破壊のエミッタンス自動調整システムの開発と運用

DEVELOPMENT AND OPERATION OF NON-DESTRUCTIVE EMITTANCE AUTOMATIC TUNING SYSTEM UTILIZING SYNCHROTRON RADIATION MONITORS IN SUPERKEKB LINAC

清宮裕史 ^{*,A)}, 飯田直子 ^{A)}, 森隆志 ^{A)}
Yuji Seimiya ^{*,A)}, Naoko Iida ^{A)}, Takashi Mori ^{A)}
^{A)} KEK

Abstract

In SuperKEKB, the emittance and energy spread of the injection beam are critical parameters that significantly affect injection efficiency. In the LINAC, the beam tail is kicked depending on the beam orbit through the accelerating structures, which leads to emittance growth. These effects can be minimized by properly optimizing the beam orbit. Although the KEKB LINAC delivers beams to four different rings using pulsed steering magnets, their placement is limited in the upstream region of the LINAC. Consequently, orbit drift in this upstream section degrades the emittance and reduces injection efficiency. Temperature variation is considered to be one of the causes of these orbit fluctuations, and the same applies to the energy spread. To address this issue, we have developed a non-destructive automatic tuning system for emittance and energy spread using two synchrotron radiation monitors (SRMs) with different betatron phases.

1. 導入

SuperKEKB は、高エネルギー素粒子物理学のための KEK (高エネルギー加速器研究機構) の電子・陽電子衝突型加速器であり、最近の運転状況については以下のレポートに記載されている [1,2]。目標とされていると達成されているビームパラメータを Fig. 1 に示す。これらのエミッタンスの値は運転中のトラブルやスタディによる増大も含んでいるため、若干大きめに出ている。1st バンチと 2nd バンチの間は 96 ns 離れている。電荷量が目標より低い理由は、高い電荷量では低エミッタンス輸送に成功していないためであり、そのような増大したエミッタンスのビームによって Belle II のバックグラウンド (BG) も大きく増大してしまうためである。必要なことは、高品質で高電荷のビームをエミッタンスの悪化を可能な限り抑えてメインリング (MR) へと輸送することである。そうしなければ、入射効率が悪化し目標ミノシティに到達することは困難となる。

入射器およびビーム輸送ライン (BT) のレイアウトを Fig. 2 に示す。入射器は、セクター A、B、J-ARC、C、および 1~5 で構成されている。入射器には 2 種類の電子銃があり、1 つは陽電子生成に用いられる大電流ビームを得るための熱電子銃、もう 1 つは低エミッタンスの電子ビームを得るためのフォトカソード RF 電子銃である。低エネルギーリング (LER) 用の陽電子ビームはセクター 2 の終端から 1.1 GeV で LTR ラインへと取り出され、ダンピングリング (DR) に入射される。入射器パルス 2 サイクル後、ダンピングされたビームは RTL ラインを通過し入射器のセクター 3 の開始地点へ戻る。その後、陽電子ビームは 4 GeV まで加速され、陽電子 BT ラインを通り最終的に LER に到達する。低エミッタンスの電子ビームは 7 GeV まで加速され、電子

	Beam	Bunch Charge (nC)	Norm. Emit. (Hor./Ver.) (μm)	Energy Spread (%)
Target	e ⁻	4	40/20	0.07
	e ⁺	4	100/15	0.16
Actual (April 2026) (BT1)	e ⁻ (1st)	1.9	94/71	0.075
	e ⁻ (2nd)	1.8	136/103	
	e ⁺ (1st)	3.1	111/3.5	0.068
	e ⁺ (2nd)	2.9	115/3.9	

Figure 1: Required and averaged measured beam parameters at BT1 in April 2026 for SuperKEKB injector LINAC. The energy spread value is the value of 1σ when the total width is assumed to be 3σ .

BT ラインを通り最終的に高エネルギーリング (HER) に到達する。この報告では、HER 用の入射ビームについて議論する。

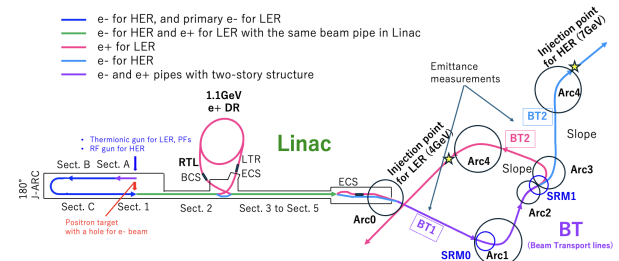


Figure 2: A layout of SuperKEKB injector LINAC and the beam transport line.

2. エミッタンス変動

入射器内においてエミッタンスの変動が観測されている。その原因の1つが軌道変動である。入射器では、加速構造を通過するビームの軌道に依存してビームテールが蹴られるため、これがエミッタンスの悪化につながる。入射器におけるエミッタンスの増大は、入射効率の低下を引き起こす。SuperKEKB リングのビーム寿命は KEKB よりも短いため、入射効率が MR の蓄積電流に影響を与える。したがって、エミッタンスの変動は SuperKEKB の性能であるルミノシティの低下を時に引き起こす原因となる。主な軌道変動は、入射器上流部における気温変動と相関している。現在も対策が進められているものの、その影響は依然として深刻である。入射器は、HER、LER、PF、および PF-AR という4つの異なるリングへの同時連続入射を行っている。各リング向けの軌道は、パルスステアリング電磁石によって制御されている。しかし現状においては、入射器上流部（セクター A、B、J-ARC、および C）ではパルスステアリング電磁石の台数が限られている。そのため、この領域での軌道を完全に固定（補正）することは困難である。

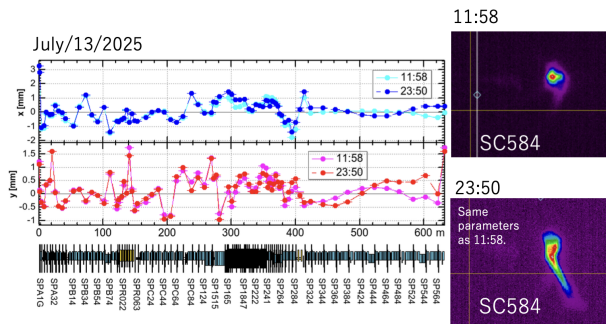


Figure 3: Beam orbit (left) and screen image (right) at LINAC end after about 12 hours with orbit FB OFF.

Figure 3 は軌道フィードバック (FB) を OFF したまま半日放置した際の軌道 (左図) とスクリーン画像 (右図) であり、軌道ドリフトによってビームプロファイルが大きく変化していることが分かる。パルスステアリングを使った軌道 FB を動かしている状態でも、前述の通り入射器上流部ではその数が限られているため軌道 FB が行えていない。例えば、J-ARC 直上流の軌道がドリフトすることが分かっており、数日間で軌道差が 0.1 mm ~ 0.2 mm 程度動くことがある。この軌道差によるエミッタンスへの影響を確かめるために、入射器単独運転時に上流のステアリング磁石を変えてこの軌道差を再現し、エミッタンス測定を行った。その結果、0.1 mm でおおよそ 70 μ m 程度の無視できないエミッタンス増大が発生することが確認されている。

興味深い例として、軌道によって発生した wake field によって通常ディスパージョンが存在しない直線部においてもビームが二球になる現象を紹介する。RF 空洞による加速ゲインと longitudinal wake [3, 4] によるビームローディングを足し合わせた加速ゲインを Fig. 4 の右図に示す。ビームの電荷量が増えることで、ビーム

ローディングも増加する。左図は進行方向にガウス分布を持つビームを仮定した際にエネルギー分散を最小にした場合のエネルギー分布を示している。ビームの電荷量がおおよそ 2 nC 程度以上の場合、エネルギーゲインが三次関数的に表現されるためエネルギー分散を最小化しようとするとエネルギー分布が二山になることが分かる。このエネルギー分布が二山の状態でディス

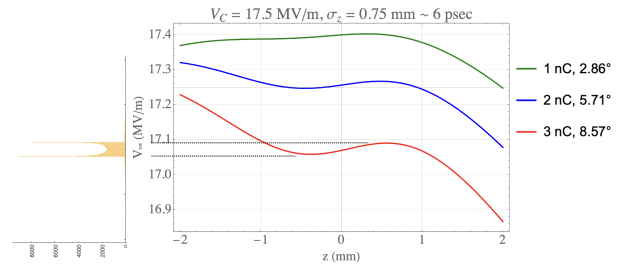


Figure 4: Acceleration curvature including longitudinal wake field (right) and energy distribution (left).

パージョンが存在すれば、もちろんスクリーン上で二球のビームが現れることになる。ここで、Fig. 4 は二山になるという事実だけでなくビーム前方と後方にエネルギーのピークが現れるという z - δ 依存があることを示している。一方、transverse wake によりビームが $x(y)$ - z 依存のキックをされる。これらの z - δ と $x(y)$ - z 依存が共に発生し位相が進むことで、 $x(y)$ - δ 依存を表すディスパージョンが発生する。つまり通常ディスパージョンが存在しない直線部においても、longitudinal wake によるエネルギー分布の二山と transverse wake によってディスパージョンが発生し、水平方向に二球が現れる。Figure 5 は wake field を考慮した SAD [5] によるトラッキングシミュレーションと実測とを比較したものであり、実測を再現することに成功している。

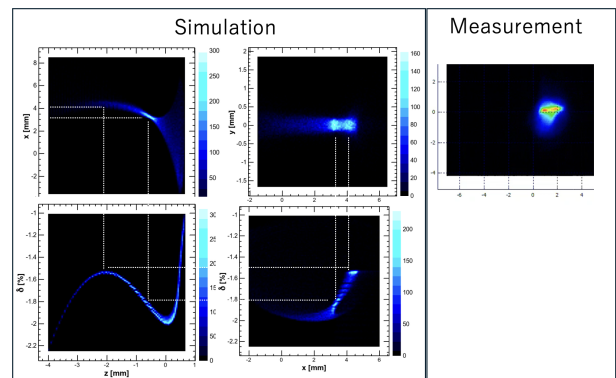


Figure 5: Comparison of simulation and actual measurement of beam profile at Sector A.

軌道補正前後のビームプロファイル測定結果を Fig. 6 に示す。この図から、軌道のみで二球を解消できたことが分かる。別途ワイヤースキャナで測定したエミッタンスも同様に劇的に改善した。原理的に、この二球問題は RF 位相を変えてエネルギー分散を調整するのと同じ方法でその影響を減少させることは可能であるが、根本的な解決とはならない。この問題を根本的に解決

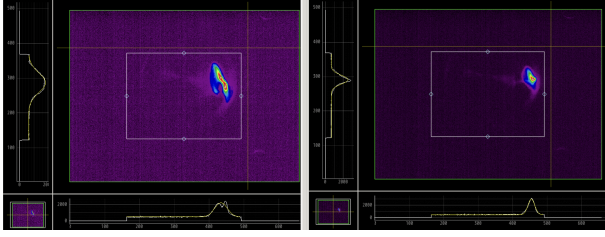


Figure 6: Beam profile at LINAC end before (left) and after (right) the orbit tuning was performed.

するためには transverse wake をキャンセルするような軌道補正をする必要があることには注意したい。

3. エミッタンス自動調整システム

BT 電子ラインには Fig. 2 に示すように、位相の異なる場所に 2 つのシンクロトロン放射光モニター (SRM0、SRM1) が導入されている [6]。SRM0 ではディスパージョンは 0 であるが、SRM1 には水平ディスパージョンが 0.37 m 程度存在する。加速構造内の wake field によって蹴られたビームテイルは一般的にビーム前方と異なる横方向の位置と運動量を持つ。その結果、ビーム全体としてはエミッタンス増大が発生する。逆に、軌道だけを変化させたときに位相の異なる 2 つの SRM でビームサイズが最小となる場所を探すことができれば、軌道だけしか変化させていないため基本的には β 関数は大きく変化しないと考えれば、これはビーム前方とビームテイルの横方向の位置と運動量の差を最小化したことと同じであり、エミッタンスも最小化されたことになる。我々は幾つかの入射器上流のパルスステアリングを探索パラメータとして、BT の SRM による非破壊のビームサイズ測定結果が最も小さくなる条件を自動的に探索するシステムを構築した。このシステムの名前はエミッタンス自動調整システム (EAT) と呼ばれており、最適化法として Downhill Simplex あるいは Bayesian を指定することができる。本報告の範囲内では両者に収束値や収束速度の点で目立った違いは見受けられなかった。そのため、最近は安定性の高い Downhill Simplex を採用している。目的関数は以下の通りである。

$$\frac{\sum_i \sigma_{x,i}^2 / \beta_{x,i} + w \sum_i \sigma_{y,i}^2 / \beta_{y,i}}{Q_{\text{Linac end}}^2 / Q_{\text{RF gun}}^2}, \quad (1)$$

ここで σ はビームサイズ、 β は β 関数、 $i = 0, 1$ は SRM0 と SRM1、 Q は電荷量、そして w は重みを表す。水平エミッタンスよりも垂直エミッタンスの方が入射効率への影響が大きいため、重みは $w=2$ を採用している。このシステムによる調整は SuperKEKB への入射中に継続的に行われているが、Belle II への BG 増加に伴う Abort を引き起こす可能性があるため慎重に探索する必要がある。そのため、このシステムは入射器や BT での軌道 FB システムと連動し、不用意に軌道を揺らさないよう制御されている。

1 つの例として、EAT 稼働前後のエミッタンスを Table 1 に示す。この表に記載されているエミッタンス

は、入射器終端部より下流の BT1 に設置されているワイヤースキャナ (WS) による測定結果である。2 バンチ運転 (1st + 2nd バンチ) の場合は、SRM で測定されるビームサイズは 2 つの分布の重ね合わせになる。EAT はこの重ね合わせのビームサイズを最小化するように最適化を行っている。2 つバンチを重ね合わせたエミッタンスを最適化していることになるため、2 バンチの総合的な入射改善という目的と合致している。EAT によって、1st バンチだけでなく 2nd バンチのエミッタンスが改善していることが分かる。

Table 1: Emittance Measurement Results Before and After Running EAT

Bunch		$\gamma\beta\epsilon_x$ [μm]	$\gamma\beta\epsilon_y$ [μm]
Before	1st	81 ± 16	37 ± 10
	2nd	116 ± 18	54 ± 13
After	1st	44 ± 12	21 ± 4
	2nd	66 ± 6	49 ± 6

最近の調査により、RF gun のレーザー位相が入射効率に大きく影響を与えることが判明した。システマ的にレーザー位相を直接何度も動かすことに問題が発生する可能性があったため、入射中はそれとほぼ等価な入射器全体の RF 位相 (全 RF 位相) を調整している。EAT (軌道調整のみ) と全体 RF 位相による入射改善を Fig. 7 に示す。この図では数回クライストロンがダウンしており蓄積電流が下がっている部分があるが、蓄積電流が下がると若干入射効率も高くなる。そのため、蓄積電流が下がっている時間帯は少々注意して入射性能を考察する必要がある。全 RF 位相、EAT (軌道調整のみ) とともに入射効率と Belle II の BG の改善に大きく寄与していることが分かる。RF 位相を調整すると軌道も変動するため、必然的に RF 位相を調整した後に EAT の調整となる。この測定を受けて、EAT は全 RF 位相も含めて最適化しよう改修を行い 2026 年 5 月中旬頃に再稼働している。Figure 8 に、EAT を走らせた際の目的関数の値 (左上図の紫) やその時のパルスステアリングの電流のトレンド (右図) を示す。時間とともに目的関数の値が減少し、それと相関するように Fig. 7 の入射効率が改善していることがわかる。

最適化は数時間ごとに行われており、その時間間隔はビームの繰り返しに依存する。Figure 9 で示したように、2026 年 1 月下旬から EAT の運用が開始されており、運転が終わる 2026 年 7 月までトラブル時以外は常に稼働し続けた。本システムにおけるビームアポートは無事 1 度も確認されずに SuperKEKB の 2026ab 運転は終了した。ここで、2nd バンチの測定のない期間は 1st バンチのみの運転となっている。この図には全てのエミッタンス測定が表示されており、トラブル時やスタディ時の測定も含まれている。1st バンチのみの運転の場合、つまり 2nd バンチのプロットがない期間については、EAT 稼働前は入射に影響の大きい垂直エミッタンス (赤点) が大きく安定していないが、稼働後はエミッタンスが安定して 50 μm を下回るケースが多い

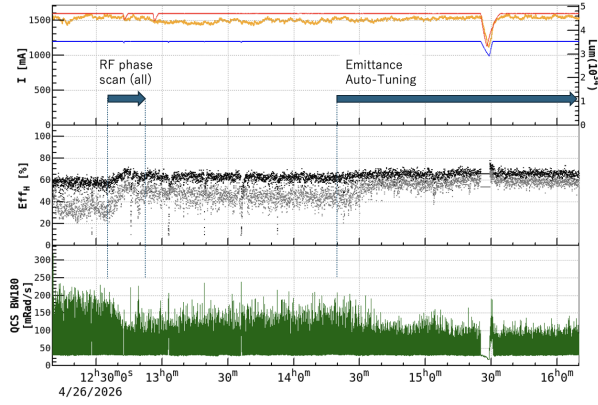


Figure 7: Injection improvement by LINAC tuning. From top to bottom, this figure shows stored current (LER: red, HER: blue), luminosity (yellow), injection efficiency (1st bunch: black, 2nd bunch: gray), and one of the Belle II backgrounds (green).

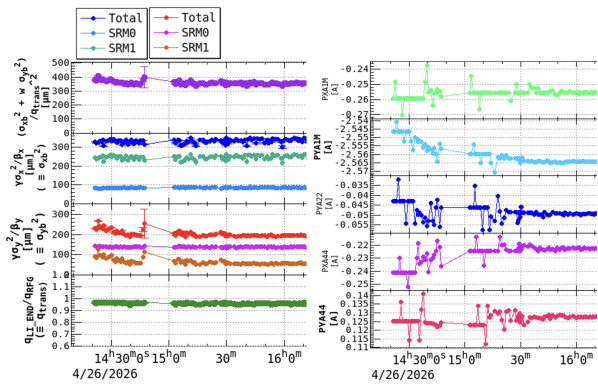


Figure 8: Trend graph of several parameters related to objective function (left) and currents of pulsed steering magnets using as search parameters in EAT (right).

ことがわかる。一方、2 バunch 運転の場合 2nd バunch と同時に最適化しようすると 2nd バunch に引きずられて 1st バunch も悪化し、エミッタンスの改善は期待したほどではなかった。この原因としては RF 位相のドリフトが有力候補であり、事実 Fig. 7 では全 RF 位相を変えることで 2nd バunch の入射効率が大きく改善している。全 RF 位相調整も行おうよう EAT 改修後は、1st、2nd バunch 共に入射に重要な垂直エミッタンス (赤点) が以前より良い状態を維持できるようになり、大きな改善が見られた。

Figure 10 に入射効率、LER/HER の蓄積電流、全 RF 位相、Belle II BG の 1 つの推移を示す。メンテ後やトラブル後の入射については、例えばメンテ時は通常 1 シフト (8 時間) 程度入射しない時間が存在するため、これまでは 2nd バunch の入射に苦労しており数日調整が必要なこともあった。図の 2026 年 5 月初めに 1st バunch のみの入射となっているのは、2nd バunch の入射が悪化し Belle II BG のため入射を断念したためである。一方、Fig. 10 の黒枠に示すように EAT 改修後は特別な調整なしに 2 バunch 入射することが可能となり、2nd バ

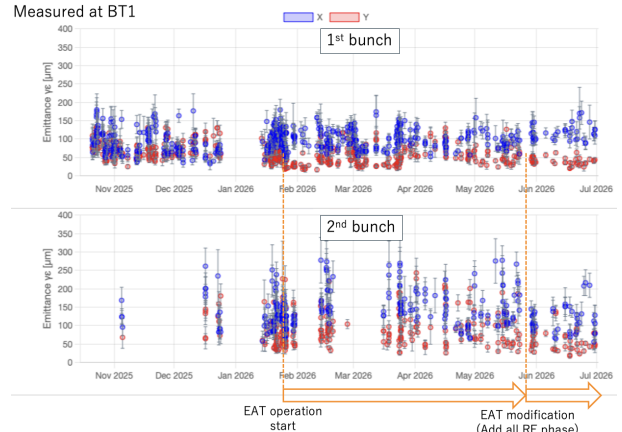


Figure 9: Emittance history at BT1. The upper and lower diagrams represent the emittance of the 1st bunch and 2nd bunch, respectively.

unch との入射効率の乖離も減少している。以前ほどではないが改修後も 2nd の乖離が進んでいる場所が見受けられるが、2nd バunch の軌道ドリフトを高速キッカーで補正することや、2nd バunch のエネルギードリフトを RF タイミングを変えて 1st と 2nd の加速ゲインを調整することで補正されるケースが多い。これらに関しては、来期に自動調整の導入を予定している。全体的に入射効率の変動が大きく見えるが、これには MR のライフタイムも大きく影響している。例えば、入射器のビーム性能はほとんど変化していないが MR の蓄積電流を増やすことや Tune がわずかに変化することでもライフタイムが大きく変化し、見かけ上の入射効率が大きく減少することが何度も発生している。そのため、入射効率のみで入射ビーム性能を見ようとする場合は注意が必要であり目安程度と考えるのが無難である。同様に Belle II BG においても入射効率との相関は見取れず、MR のオプティクス等のマシン状態による影響が大きいように思われる。2026 年 6 月 19 日に発生した瞬停後においては、様々な機器の故障や MR 運転終了後に測定された RF クレスト位相が大幅にずれてしまっていたため EAT でも改善は困難であったと考えられる。

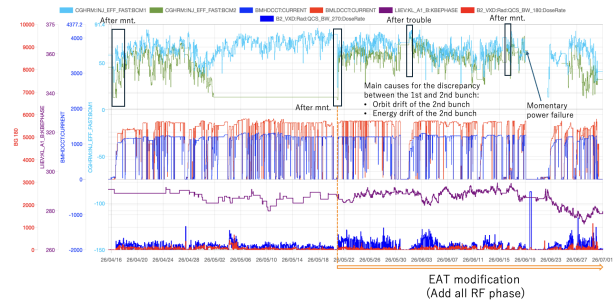


Figure 10: Trend of injection efficiency, stored current, all RF phase, and Belle II BG from top to bottom.

Figure 11 は 2026ab の BT2 でのエミッタンス測定結果をまとめたものである。これは Qscan による測定と

なるが、測定条件を整える必要があるなど時間を要するため、この測定は稀にしか行われていない。2025 年における BT2 での測定値は $\gamma\epsilon_y > 200 \mu m$ であることが多く 2nd に関しては入射が悪く MR 入射できない状態であったが、Fig. 11 に示す EAT 稼働直後の 2026 年 2 月の BT2 での測定で直近では最良の垂直エミッタンスとなった。更に、全 RF 位相を EAT で最適化するようになった 2026 年 5 月中旬後はより改善し、同じ電荷量のビームにおいて BT2 の測定はこれまでで最良の結果 $\gamma\epsilon_y \sim 104 \mu m$ となった。しかし、この値は目標値 $\gamma\epsilon_y \sim 40 \mu m$ と比較して依然大きいため、エミッタンスを減らすための努力は引き続き行う必要がある。

KBE		Feb./13/2026		Jun./17/2026		Jun./24/2026	
BT1 (WS)		1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd
$\gamma\epsilon_x [\mu m]$		81 ± 9	144 ± 16	118 ± 16	69 ± 32	100 ± 16	208 ± 26
$\gamma\epsilon_y [\mu m]$		41 ± 5	79 ± 8	36 ± 4	39 ± 9	24 ± 11	31 ± 6
BT2 (MSE.16)		1 st	1 st + 2 nd	1 st	1 st + 2 nd	1 st	1 st + 2 nd
$\gamma\epsilon_x [\mu m]$		173 ± 3	237 ± 3	188 ± 3	238 ± 3	289 ± 3	-
$\gamma\epsilon_y [\mu m]$		134 ± 84	176 ± 18	105 ± 2	137 ± 11	145 ± 11	104 ± 9

Figure 11: Emittance measurement results at BT2.

4. まとめ

入射器ではビーム軌道変動に伴いエミッタンスが変動している。この変動を低減するため、シンクロトロン放射光モニターを用いた非破壊エミッタンス調整システムを開発と、数ヶ月にわたり SuperKEKB 入射中に本システムの継続運用を行なった。同様に、エネルギー分散の変動を低減するために、全 RF 位相調整を調整

パラメタとして導入した。本システムにより、エミッタンスの改善、安定性の向上、SuperKEKB への入射効率の向上、そして Belle II における BG の低減に成功した。しかし、これらは依然として改善が必要な状況にある。入射性能に影響を与える 2nd バンチのみを選択的にキック可能な高速キッカーや入射点での 1st と 2nd のエネルギー差をなくするような自動調整を導入することで、さらなる入射効率と安定性の向上を図るつもりである。

参考文献

- [1] SuperKEKB Home Page - Operation - Operation status and plan, https://www-linac.kek.jp/skekb/status/web/status_plan.md.html
- [2] Y. Ohnishi, “Recent experience with high-luminosity operation of SuperKEKB”, in *Proc. NAPAC’25*, Sacramento, California, USA, Aug. 2025, pp. 14–20. doi:10.18429/JACoW-NAPAC2025-MOYD02
- [3] K. Yokoya, “Short-range wake formulas for infinite periodic pill-box”, local communication, KEK, 1998.
- [4] K. Bane, “Short range dipole wakefields in accelerating structures for the NLC”, SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA, USA, SLAC-PUB-9663, LCC-0116, Mar. 2003. <https://inspirehep.net/literature/614846>
- [5] Strategic Accelerator Design (SAD) home page, <http://acc-physics.kek.jp/SAD>
- [6] T. Mori, “SuperKEKB-BT optical monitor”, in KEK Local Research Introduction, Tsukuba, Japan, Dec. 2024. https://researchmap.jp/longzhi/misc/53688309/attachment_file.pdf