

# SuperKEKB 加速器のロングシャットダウン (LS1) 後の運転状況

## RECENT STATUS OF SuperKEKB OPERATION AFTER LONG-SHUTDOWN (LS1)

大西幸喜 <sup>\*A)</sup>

Yukiyoshi Ohnishi <sup>\*A)</sup>

on behalf of the SuperKEKB accelerator group and Belle II group

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

### Abstract

The SuperKEKB accelerator is the positron-electron collider with a nano-beam scheme, and is operated to achieve the world's highest luminosity for the production of B meson pairs. The luminosity performance has been improved by adopting the crab-waist scheme. However, several problems have emerged, such as sudden beam loss, beam optics distortion due to movement of quadrupole magnets pushed by vacuum pipe deformed by synchrotron radiation heating, and luminosity degradation due to beam-beam interaction. The process leading up to this point will be discussed, and then the problems and issues to be overcome will be presented from the beam physics point of view to further improve the luminosity performance in the future.

### 1. はじめに

SuperKEKB 加速器 [1] は、世界で初めてナノビーム方式を本格的に採用した陽電子・電子衝突型加速器である。B 中間子対生成を目的とし世界最高ルミノシティを目指して運転されている。また、クラブウエスト方式を採用し実用化したことで、ルミノシティ性能が向上している。しかしながら、ビームが突然損失する Sudden Beam Loss 事象 [2]、放射光によるビームパイプの熱変形 [3] に起因する電磁石移動によるビーム光学系の変化 [4]、ビームビーム相互作用によるルミノシティ低下など、いくつかの問題点も浮上してきた。今期のビーム運転の概要と成果について述べた上で、今後さらなるルミノシティ性能向上に向けて、ビーム物理的な見地から何が問題となっているか、克服すべき課題は何かについて紹介を行う。

### 2. 2024 年春期運転の概要

2024 年春期の運転は、1 月 29 日から 7 月 1 日まで、155 日間にわたって行われた。Figure 1 に、運転の状況を示す。2022 年 7 月から約 1 年半を最初の長期シャットダウン (LS1) と呼び、いくつかの改造が行われた。LS1 後の運転の目標は、

- Sudden Beam Loss (SBL) の理解とその対策
- 非線形コリメータ [5,6] のコミッショニング [7]
- 高いビーム電流での運転、LER では、1.8 A 以上、HER では、1.4 A 以上
- 衝突点ベータ関数を 0.8 mm まで絞る
- $8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  以上のルミノシティを目指す

といった内容である。

2024 年春期の運転における最大ビーム電流は、LER で 1.5 A、HER で、1.2 A であった。バンチ数は、最大 2346 バンチで、これは設計値である。衝突点ベータ関数 ( $\beta_y^*$ ) については、0.9 mm まで絞ることができている。クラブウエスト [8–10] については、LER は 80%、HER は、40% から 60% に変更している。今期の最高ル

ミノシティは、 $4.47 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であり、残念ながら 2022 年の最高記録を更新することはできなかった。Table 1 に、加速器の運転パラメータを示す。

Table 1: Machine Parameters

	2022		2024		Unit
	LER	HER	LER	HER	
$I_{\pm}$	1321	1099	1394	1117	mA
$n_b$	2249		2249		
$I_{b\pm}$	0.587	0.489	0.620	0.497	mA
$\sigma_x^*$	17.9	16.6	17.9	16.6	$\mu\text{m}$
$\sigma_y^*$	0.215		0.240		$\mu\text{m}$
$\nu_x$	44.525	45.532	44.525	45.531	
$\nu_y$	46.589	43.573	46.580	43.575	
$\beta_x^*$	80	60	80	60	mm
$\beta_y^*$	1.0		0.9		mm
CW	80	40	80	60	%
$\xi_y$	0.0407	0.0279	0.0333	0.0237	
$L$	$4.65 \times 10^{34}$		$4.47 \times 10^{34}$		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

LS1 における加速器の改造について以下に述べるが、はじめに Sudden Beam Loss (SBL) の理解が最重要課題である。これを解決しなければ、大電流運転への道筋を立てることができない。HER の入射効率が低いこと、安定しないことも大電流運転の障壁となる。また、LER では、可動コリメータにおけるインピーダンスの短距離ウエイク場に関する  $-1$  モード不安定性 [11] が、バンチ電流の高い領域で観測されている。従って、インピーダンスの低減は、必須である。これらのことを踏まえて、以下の改造を行った。

- Belle II 測定器に対するビーム・バックグラウンド低減のための衝突点付近の放射線シールド増強
- LER に非線形コリメータを導入 (インピーダンス低減のため)
- HER における入射部のアパーチャーを広くする改造

\* yukiyoshi.ohnishi@kek.jp

- 損傷しにくい可動コリメータヘッドの導入
- SBL 観測のための様々なモニター類の設置および高速ビームアポート・システムの導入 [12]
- 入射器におけるビーム光学系と軌道制御の増強 (パルス 4 極磁石とパルス・ステアリングの追加)

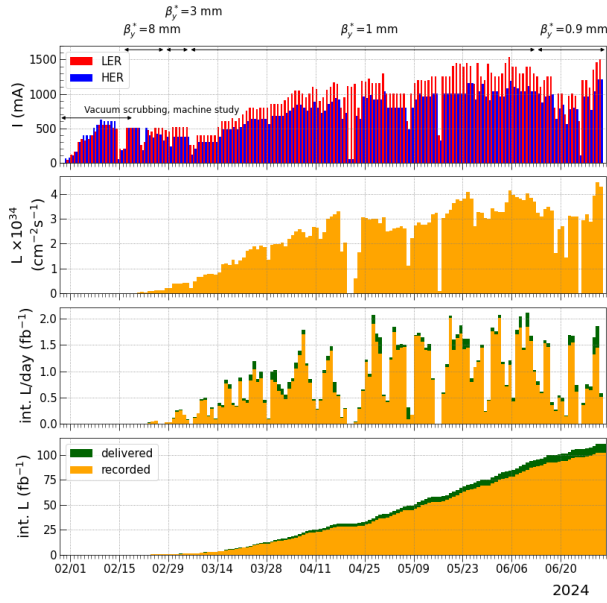


Figure 1: Operation history in the 2024 Spring run.

### 3. ルミノシティ性能

クラブウエストの効果を見るために、クラブウエストをオフした場合と LER に 80%、HER に 40% のクラブウエストを入れた場合のルミノシティ性能について比較を行った。 $\beta_y^*$  は、ともに 1 mm である。Figure 2 に、スペシフィック・ルミノシティとバンチ電流積 ( $I_{b+}I_{b-}$ ) の関係を示す。スペシフィック・ルミノシティは、次式で計算される。

$$L_{sp} = \frac{L}{n_b I_{b+} I_{b-}} \propto \frac{1}{\sigma_y^*} \quad (1)$$

$L$  は、ルミノシティ、 $n_b$  は、運転時のバンチ数で、393 バンチである。スペシフィック・ルミノシティは、衝突点の垂直ビームサイズ ( $\sigma_y^*$ ) に逆比例する関係にある。本来は、バンチ電流積に依らず一定であるべきものであるが、実際には、バンチ電流積が増加するとともにビームブローアップが観測されている。ビームブローアップを、如何に低減できるかによってルミノシティ性能が決まると言える。

クラブウエストをオフした場合とオンした場合を比べると、スペシフィック・ルミノシティは、オンした場合の方が約 30% 向上している。クラブウエストをオフした場合、垂直チューンによって、ルミノシティ性能が異なる。これは、垂直チューンが 46.590 の場合、5 次の共鳴線 ( $\nu_x + 4\nu_y + \alpha = N$ ) というビームビーム相互作用

用に関係する共鳴線に近づくため、ルミノシティ性能が悪化すると考えられる。したがって、垂直チューンを 46.567 と共鳴線から離せば、ルミノシティ性能はある程度回復する。これは、大角度の水平交差角を持って衝突させるナノビーム方式に由来する共鳴線である。クラブウエストを導入することによって、この共鳴線の強さを低減することが可能となることを示している。また、バンチ電流積の高い領域での衝突を容易にしている。この実験では、HER のクラブウエストが 40% であるが、後に 60% まで増加させる動機となっている。

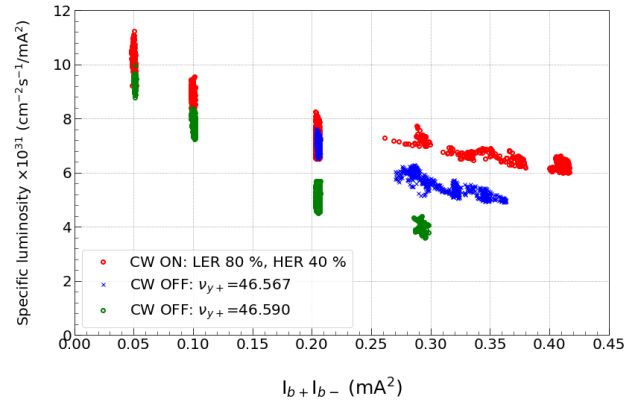


Figure 2: Specific luminosity.

### 4. SUDDEN BEAM LOSS

2022 年までの運転では、2 周から 3 周の間に 20~40% のビームロスに伴うビームアポートが発生する Sudden Beam Loss (SBL) と呼ばれる事象が、大電流運転を困難なものとしている。特に LER での発生頻度が非常に高く、SBL が起きると、コリメータ・ヘッドの損傷、QCS クエンチ、Belle II 測定器への損傷など危険度が高い。ビームロスが始まる前にビーム軌道の変動は観測されているが、0.1 mm 程度と小さく、最初に水平軌道が発生しているように見える。また、ビームアポート時に、垂直ビームサイズが増大していることが観測されている。SBL は、非衝突と衝突に関係なく発生する。LER において、SBL が発生したほとんどの事象で、スパイク的な真空圧力の急上昇が見られた。真空圧力上昇が観測された場所は、ウイグラー部であった。高いビーム電流における運転時間が長くなると、SBL の頻度が減少することから、ある程度コンディショニングの効果が見られた。

LS1 まで、可動コリメータ付近におけるファイヤーボール仮説 [13] をもとに、コリメータ・ヘッドに銅コーティングを施すことで SBL を防止することを試したが、実際に SBL は起きてしまった。音響センサーを可動コリメータ付近に設置したが、放電音は観測されなかった。これらの観測結果から、SBL の原因として、ファイヤーボール仮説は否定的であることがわかった。

2016 年の Phase-1 では、ビームロスに伴う圧力上昇が頻繁に観測されており、ビーム電流増大の妨げとなっていた。これはダストが原因であると推定され、ダスト発生場所はグループ付きのアルミ製ビームパイプ

であると推測された。ビームパイプを叩いてダストを落とす「ノッカー」を取り付け、ビームパイプを叩くことによってダストを、あらかじめ落下させておけばダスト事象頻度を低減できると考えた。当時、ノッカーでビームパイプを実際に叩いた結果、ダスト事象は激減した。

2024年のSBL観測から、ウイグラー部にあるクリアリング電極がダスト発生場所の候補となった。クリアリング電極は、LERリング(陽電子ビーム)に光電子雲除去を目的として設置された。クリアリング電極は、銅製のビームパイプに、厚み $200\mu\text{m}$ のセラミックス( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )を介在して、厚み $100\mu\text{m}$ のタングステンの電極が付けられており、フィードスルーを通して、電極に電圧がかけられるようになっている。クリアリング電極はビームパイプの上部についており、長さにして約 $150\text{m}$ 、リングに締める割合は、周長の約5%となる。通常の運転時は、 $10\text{V}$ 程度の電圧がかけられており、光電子雲除去として使用していない状況である。ダスト発生場所の推定には、Bunch Oscillation Recorder (BOR)、真空圧力上昇箇所の解析、アポート・タイミング情報などが使用された。ノッカー試験において、ビーム電流を蓄積した状態で、クリアリング電極があるビームパイプをノッカーで叩くと、SBLが発生することが確かめられた。グループ付きビームパイプやクリアリング電極付きビームパイプなどのダストが付着する可能性があるビームパイプをノッカーで叩いた場合に、SBLアポートが起きる。ビームパイプの同じ箇所を叩き続けると、SBLアポートは減少する。また、クリアリング電極に、 $-600\text{V}$ の電圧をかけた場合も、放電でSBLの発生が観測された。通常のビーム運転時に、クリアリング電極の電圧をオシロスコープで検出すると、ビームアポート時に正極の直流的な信号(イオン生成モデルと矛盾しない)、および放電と思われる信号が検出されている。ダスト現象および放電現象によるSBL事象のメカニズムは、まだ完全に理解されているわけではないが、ダストとSBLには、何らかの因果関係があると予想される。ダスト対策として、クリアリング電極を重力下方の下側にするために、ビームパイプを上下逆さまにすることが検討され次期運転で試験する予定である。

## 5. 非線形コリメータのコミッショニング

衝突型加速器では、測定に対するビームバックグラウンド低減のためのコリメータが必須である。コリメータは、口径を狭くすると、大きなインピーダンス源となるため、短距離ウエイク場による横方向モード結合不安定性(TMCI)が問題となる。1979年に、PETRA加速器で初めてTMCIが観測された[14]。近年になって、TMCIの閾値よりも低いバンチ電流でビームサイズがブローアップする現象がSuperKEKB加速器のLERで観測された。これは、 $-1$ モード不安定性と呼ばれ、コリメータのインピーダンスとバンチ毎フィードバック・システム[15]との干渉によって生じると考えられている。 $-1$ モード不安定性を低減するためには、バンチ毎フィードバック・システムの最適化とインピーダンスの低減が必要となる。コリメータのインピーダンスを

削減するために、LERに非線形コリメータを導入した。この非線形コリメータは、垂直方向に広がるビームハローをカットするためのものである。非線形コリメータの特徴は、比較的大きな口径でビームハローをカットできることである。通常、複数のコリメータを組み合わせて、バックグラウンドを低減するが、狭い口径のコリメータの代わりに非線形コリメータを使うことによって、インピーダンスを低減することが可能となる。

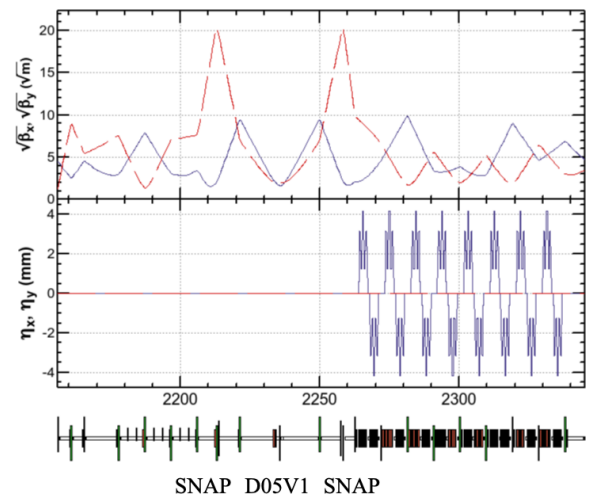


Figure 3: Optics of nonlinear collimator section.

非線形コリメータの仕組みは、Fig. 3に示すように、 $-I'$ の転送行列で結ばれた2台の歪6極磁石(SNAP)の間に垂直コリメータ(D05V1)を配置する構造となっている。一方の歪6極磁石による非線形キックは、もう片方の歪6極磁石でキャンセルされる。歪6極磁石と最も物理口径の狭い最終収束磁石(QC1RP)との垂直方向の位相差は $\pi$ の整数倍となるように調整されている。さて、歪6極磁石の作るハミルトニアンは、

$$H_s = \frac{K_2}{6}(y^3 - 3xy^2) \quad (2)$$

であり、これによる非線形キックの大きさは、

$$\Delta p_y = -\frac{\partial H_s}{\partial y} = -\frac{K_2}{2}(y^2 - x^2) \quad (3)$$

となる。したがって、コリメータでのビーム軌道は、

$$y_c = R_{34}\Delta p_y = -\frac{K_2}{2}\sqrt{\beta_y^c\beta_y^s}\sin\Delta\psi_y(y^2 - x^2) \quad (4)$$

となる。 $\Delta\psi_y$ は、歪6極磁石とコリメータ間の垂直方向の位相差で $\pi/2$ 付近に設定され、 $K_2$ の値によって、ビームハローをどこまでカットするかを制御する。また、コリメータでのベータ関数 $\beta_y^c$ をなるべく小さくして、TMCIまたは $-1$ モード不安定性の閾値を大きくする。そのため、歪6極磁石でのベータ関数 $\beta_y^s$ は非常に大きくなる。

Table 2: Parameters of Nonlinear Collimator

	Value	Unit
$\beta_x^s / \beta_y^s$ at SNAP	7.08 / 378.5	m
$\beta_x^c / \beta_y^c$ at D05V1	3.55 / 4.05	m
$K_2$ of SNAP	-6	$m^{-2}$
$\Delta\psi_y^{(s*)}$ from SNAP to IP	12.75	$2\pi$

非線形コリメータを導入することによって、著しく力学口径が減少することはなかった。ただし、 $\beta_y^s$  と  $K_2$  の積が非常に大きく、数  $\mu\text{m}$  の垂直軌道変化に対して、大きなベータビートが発生してしまうので、軌道制御と軌道安定性は非常に重要である。

蓄積ビームのバックグラウンド低減では、通常の垂直コリメータの一つと同等以上の効果があることがわかった。非線形コリメータは、アーク部にある通常の垂直コリメータと比較して衝突点に近く、クーロン散乱によるバックグラウンドを効率よく低減できると考えられる。入射ビームによるバックグラウンドについては、非線形コリメータは、通常の垂直コリメータほど低減はできていない。これは、水平方向に入射振幅があるため、Eq. (3) により垂直方向のキック角が減少するためである。しかしながら、歪 6 極磁石での  $\beta_x^s$  を、7m から 2m へと変更すれば、通常の垂直コリメータと同等の入射バックグラウンドが、低減できると予想される。

非線形コリメータによるビームロス、実験室に対する放射線の問題を生み出している。非線形コリメータの設置場所が、大穂実験棟のある直線部であるためである。実際のビーム運転では、想定の数倍以上の放射線量が観測された。通常の垂直コリメータと同等のバックグラウンド低減になるまで、D05V1 の口径を閉めた場合、KEK の放射線自主規制値を超えるため、追加の放射線シールドが必要であることがわかった。今後、放射線シールドを追加して、放射線量を自主規制値以下に低減する予定である。

## 6. ビーム軌道の安定性

ビーム軌道の変動要因は、

- 放射光によるビームパイプの熱変形
- 冷却水の流量変化、トンネル内の気温変動
- 地震と地盤の変化

などが挙げられる。ビームパイプに連結する BPM ブロックは、4 極磁石に固定されている。電磁石のサポートはトンネル内地面に固定されており、金属製なので温度変化があれば、膨張または収縮する。軌道変動は、これらの要因による電磁石の移動によって引き起こされる。放射光によるビームパイプの熱変形では、ビーム電流に依存した軌道変動が発生する。

特に、局所的色収差補正を行っている強い 6 極磁石では、垂直ベータ関数が大きいので、水平軌道が変化

すると、

$$\Delta\nu_y = -\frac{\beta_y^s}{4\pi}(K_2\Delta x) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\beta_y}{\beta_y} = \frac{\beta_y^s}{2\sin 2\pi\nu_y}(K_2\Delta x)\cos 2(|\Delta\psi_y| - \pi\nu_y) \quad (6)$$

のように、大きなチューンシフトおよびベータビートが発生する。 $-I'$  という転送行列で接続された 6 極磁石の間には、分散を制御するための偏向磁石があり、そこから放射される放射光によってビームパイプが発熱し水平方向に移動することがわかっている。また、ビームパイプは BPM ブロックを介して  $-I'$  区間の 4 極磁石に固定されているため、4 極磁石はビームパイプによって水平方向に押され軌道が発生するものと考えられる。このことから、水平軌道が、ほぼ同相 (cosine-like) に 6 極磁石に現れ、チューンシフトならびにベータビートを引き起こす。特に、HER では局所的色収差補正に使われる 6 極磁石の磁場が強く、垂直ベータ関数も大きいので、 $10\mu\text{m}$  の水平方向の cosine-like な軌道変化は、約 10% の  $\beta_y^*$  の変化となる。

そこで、HER における垂直方向の 2 組の局所的色収差補正のうち 1 組について、 $-I'$  の内側の 3 台の 4 極磁石を BPM ブロックから切り離して、独立にサポートする改造を行なった。切り離す前は、ビーム電流を増やす過程で、4 極磁石がビームパイプの熱変形とともに移動するばかりか、急に変化することが観測された。また、磁石の移動は、約 30 分程度の時定数を持ち、ヒステリシスが観測された。切り離した後は、ほとんど電磁石の位置は変化せず、ビーム軌道に対するヒステリシスも観測されなくなった。しかしながら、6 極磁石で測定されるビーム電流に依存する軌道変化を、無くすることはできていない。50 mA という低いビーム電流で、ビーム光学系の測定および補正を行っているので、ビーム光学系が高いビーム電流で変化することは望ましくない。したがって、ビームパイプの熱変形に伴う電磁石の移動に対する対策は、重要課題である。

SuperKEKB で使用されるアーク部に配置される 6 極磁石のペアは  $-I'$  という転送行列で接続されている。 $-I'$  内部の誤差源に起因する軌道変化は、外側には現れないので軌道補正には工夫が必要である。2024 年の運転では、局所的色収差補正の 6 極磁石と非線形コリメータで使われる歪 6 極磁石の隣の 4 極磁石に、軌道変化に合わせて 4 極磁場の補正を加えることによってフィードバックを行なった。

## 7. ビーム電流を制限する要因

高いビーム電流を保つために、トップアップ入射が行われる。LER と HER ともに十分な入射効率が確保できなければ、高いビーム電流を蓄積することはできない。また、力学口径が小さければ、Touschek 寿命が短くなり、ビーム電流を一定に保つことが難しくなる。入射能力は、ビームの繰り返しと入射ビーム電荷量で決まる。LER は最大 23 Hz、HER は最大 19 Hz 入射のビーム繰り返しを行っている。また、1 パルスあたり 2 バンチ入射 (96.29 ns 間隔) が可能である。

入射ビームのエミッタンスが小さい方が入射には有利となる。入射器からビーム輸送路 (BT) を経て入射される。ビーム輸送で測定された規格化エミッタンスを Table 3 に示す。BT1 は、ビーム輸送路上流、BT2 は、ビーム輸送路下流である。ビーム輸送路下流で、垂直エミッタンスが増大しているのは、途中の偏向電磁石の非線形磁場成分の寄与によるもので、主に 6 極成分である [16]。電子ビームの水平方向のエミッタンス増大は、放射光放出の拡散によるものである。ダンピング・リングでは、入射器で生成された陽電子ビームのエミッタンスを減衰させる。ダンピング・リングの平衡規格化エミッタンスは、 $\gamma\epsilon_x = 64 \mu\text{m}$  である。ダンピング・リングから入射器までの出射輸送路で、水平エミッタンスが増大していることがわかる。

Table 3: Normalized Emittance Measured at Beam Transport

Location	Positron		Electron		Unit
	$\gamma\epsilon_x$	$\gamma\epsilon_y$	$\gamma\epsilon_x$	$\gamma\epsilon_y$	
BT1 (上流)	150	10	30	40	$\mu\text{m}$
BT2 (下流)	180	25	130	170	$\mu\text{m}$

2024 年の運転から、HER にビーム診断に用いるための垂直キッカーが導入された [17]。LER については、2024 年秋期運転までに垂直キッカーを導入する予定である。また、運動量方向のアクセプタンスを測定するための RF キッカー [18] が両リングに新たに導入された。リングのアーチャー測定の結果を、Table 4 に示す。 $\beta_y^*$  は、0.9 mm で、LER の CW は 80%、HER の CW は 60% である。HER のクラブウエストについて、40% と 60% におけるアーチャーに差異は見られなかった。HER の垂直アーチャー ( $\gamma 2J_y$ ) と入射ビームの垂直規格化エミッタンスを比較すると、ビーム輸送路で増大するため、1 シグマ程度となり、リングのアーチャーが非常に狭いことがわかる。リングのアーチャーを広げ、入射ビームの垂直エミッタンス増大を低減する努力が必要である。HER における垂直方向のアーチャーには、バンチ電流が大きいほど、アーチャーが狭くなるバンチ電流依存性が観測された。これは、コリメータのインピーダンスによる短距離ウエイク場から受けるキックによるものと推測される。

Table 4: Measured Aperture in LER and HER

	LER	HER	Unit
$2J_x$	$1.0 \times 10^{-6}$	$6.5 \times 10^{-7}$	m
$2J_y$	N/A	$1.2 \times 10^{-8}$	m
$\Delta p/p_0$	0.92	0.69	%

陽電子ビームの入射効率は、約 90% であるが、バンチ毎フィードバックをオフすると約 40% に低下する。これは、水平方向の入射振動をバンチ毎フィードバックで減衰させアーチャー内で捕獲できているためである。しかしながら、バンチ毎フィードバックは蓄積ビームと入射ビームの重心軌道を減衰させる働き

を持っているため、蓄積ビームのバンチ電流が増加するにつれて、入射振動の減衰は弱くなる。

また、バンチ電流が増加するにつれて、ビームビーム相互作用における入射効率の悪化も顕著となる。水平振幅は、交差角のために進行方向の位置の変化に転換されるので、基本的にウエストのずれた場所、つまり相手ビームの垂直ベータ関数の大きい場所で衝突し、大きなキックが与えられ不安定になる可能性がある。クラブウエストは、この効果を緩和するが、完全ではない。LER 入射において、高いバンチ電流では、 $2\nu_x - 2\nu_s = N$  というシンクロベータ共鳴線に水平チューンを近づけると入射が回復することが観測された。チューン空間におけるワーキング・ポイントの選択は、高いビーム電流運転における重要事項と考えられる。HER では、水平方向の入射振幅を避けるためのシンクロトロン入射 [19] も検討され、次期運転で試験することが予定されている。

## 8. まとめと今後の展望

2024 年春期運転における成果をまとめると、以下のようになる。

- LER の最大ビーム電流は、1.5 A
- HER の最大ビーム電流は、1.2 A
- 最大バンチ数は、2346 バンチ (設計値)
- 最小  $\beta_y^*$  は、0.9 mm
- 最高ルミノシティは、 $4.47 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- クラブウエストの有用性が再確認された。
- 非線形コリメータの有用性が実証された。
- SBL の原因の一端を掴むことができた。

また、解決しなければならない課題として、

- ビームビーム相互作用下での入射効率低下
- 衝突時における LER の高いバンチ電流での垂直方向のビーム・ブローアップ
- 非衝突時における高いバンチ電流での垂直方向のビーム・ブローアップ、もしくは、ビーム振動
- ビーム電流に依存したビーム軌道変化 (放射光によるビームパイプ発熱変形)
- 老朽化対策

などが挙げられる。次期運転の目標は、 $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  である。これには、バンチ電流積で、 $0.9 \text{ mA}^2$  以上で運転する必要がある。LER のバンチ電流で、1.1 mA、HER では、0.78 mA のバンチ電流が必要である。このバンチ電流積で、 $5 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  のスペシフィック・ルミノシティを達成することができれば、2346 バンチの蓄積で  $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  に到達できる。コリメータのインピーダンスを抑え、バンチ毎フィードバックの最適化を行うことによって、LER の -1 モード不安定性を緩和することと、ビームビーム相互作用下での入射を確立することが鍵となる。

## 謝辞

SuperKEKB 加速器の運転に携わった全ての人々に感謝します。

## 参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2013** 03A011, (2013). doi:10.1093/ptep/pts083
- [2] H. Ikeda *et al.*, “Observation and cause investigation of sudden beam loss at SuperKEKB”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3 2024, FRP023.
- [3] M. Yao *et al.*, “New support for BPM to separate from Q-Magnet”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3 2024, FRP083.
- [4] H. Sugimoto *et al.*, 2024 JINST 19 P02012. doi:10.1088/1748-0221/19/02/P02012
- [5] L. Merminga *et al.*, “Optimizing a nonlinear collimation system for future linear colliders”, Proc. 1991 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC1991), San Francisco, USA, May 6 - 9 1991.
- [6] J. R. Lopez *et al.*, “An alternative nonlinear collimation system for the LHC”, Proc. 10th European Particle Accelerator Conference (EPAC2006), Edinburgh, UK, Jun. 26 - 30 2006.
- [7] S. Terui *et al.*, “Report on the results of the first experiments on a nonlinear collimator for SuperKEKB”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3 2024, THOA04.
- [8] P. Raimondi, presented at the 2nd Workshop on Super B-Factory, Frascati, 2006.
- [9] SuperB Conceptual Design Report, INFN/AE-07/2, SLAC-R-856,LAL 07-15, March 2007.
- [10] K. Oide *et al.*, Pys. Rev. Accel. Beams **19**, 111005 (2016). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.19.111005
- [11] K. Ohmi *et al.*, “Study for -1 mode instability in SuperKEKB low energy ring”. Proc. 65th ICFA Av. Beam Dyn. Workshop High Luminosity Circular  $e^+e^-$  Colliders eeFACT2022, Frascati, Italy. doi:10.18429/JaCoW-eeFACT2022-WEXAT0102
- [12] H. Kaji *et al.*, “Upgrade of beam abort system at SuperKEKB”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3 2024, WEOT01.
- [13] T. Abe *et al.*, “Fireball hypothesis for the trigger of sudden beam losses at SuperKEKB”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 29 - Sept. 1 2023, TUP01.
- [14] PETRA-Project Group, IEEE Trans. Nucl. Sci. **NS-26**, 2970 (1979).
- [15] M. Tobiyama *et al.*, “Bunch by bunch feedback system for SuperKEKB rings”, Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016), Chiba, Japan, Aug. 8 - 10 2016, TUOM06.
- [16] N. Iida, “Investigation of emittance blowup in the positron beam transport line for the SuperKEKB”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3 2024, THP025.
- [17] H. Sugimoto *et al.*, “Amplitude detuning in SuperKEKB”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3 2024, FRP087.
- [18] T. Kobayashi *et al.*, “Implementation of acceleration phase modulation function for evaluation of momentum acceptance in SuperKEKB LLRF control”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31 - Aug. 3 2024, THP068.
- [19] P. Collier, “Synchrotron phase space injection into LEP”, Proc. 16th Particle Accelerator Conference and International Conference on High-Energy Accelerators, HEACC 1995, Dallas, USA, May 1-5 1995, 551-553.