

SuperKEKB 加速器の最近の運転状況

RECENT STATUS OF SuperKEKB OPERATION

大西幸喜^{*,A)},

Yukiyoshi Ohnishi^{*,A)}

on behalf of the SuperKEKB accelerator group and Belle II group

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

Abstract

The SuperKEKB accelerator is the first positron-electron collider with a nano-beam scheme and continues to achieve the world's highest luminosity for the production of B meson pairs. The luminosity performance has been improved by the full-scale adoption of the crab-waist scheme. The nano-beam scheme allows the vertical beta function at the interaction point to be much smaller than the bunch length. The vertical beta function and the beam size at the collision point are the smallest in the world among colliders. Recent progress will be presented, and then the problems and issues to be overcome from the beam physics point of view will be discussed for further improvement of luminosity performance in the future.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、B 中間子対生成を主目的とする陽電子電子衝突型加速器である。目標とする積分ルミノシティは、 50 ab^{-1} である。フェーズ 3 が開始された 2019 年 3 月から 2022 年 6 月まで約 3 年半の加速器運転を終えて、最初の長期シャットダウン (LS1) に入ることとなった。LS1 では、Belle II 測定器のアップグレードおよび加速器の小規模な改造が行われる予定である。本稿では、これまでに達成された加速器性能について報告する。なお、2 月から 3 月末までのランを *a*、4 月から 7 月までのランを *b*、10 月から 12 月までのランを *c* として、それぞれを西暦年の末尾につけて表す。最も最近の運転期である LS1 直前のランは、2022b と表される。

2. SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器 [1, 2] は、ビームエネルギー 7 GeV の電子リング (HER) とビームエネルギー 4 GeV の陽電子リング (LER) からなる主リングと陽電子ダンピングリングを持つ電子陽電子入射器 [3, 4]、それらをつなぐビーム輸送路で構成される。周長約 3 km の主リングでは、1 つの衝突点に Belle II 測定器 [5] が置かれる。非対称エネルギーでの衝突を実現するためには、ダブル・リングが要求される。これにより、衝突点を一つにしつつ、多バンチを蓄積することが可能となる。また、衝突点に大角度の交差角をつけることで、ナノビーム方式を実現する。衝突領域には、超伝導電磁石からなる最終収束システム (QCS) が配置され、ビームを強く絞る [6]。

LER には、常伝導空洞である ARES 高周波加速空洞が設置され、HER には ARES 空洞と超伝導高周波加速空洞 (SCC) が設置される [7]。入射器からは主リングと同じエネルギーのビームが、トップアップ入射で供給される。放射光放出で失われたエネルギーは、高周波加速空洞によって補償される。アーク部

は、KEKB 加速器と同様なノン・インターリーブド色収差補正を採用し、直線部 (OHO、NIKKO) のウィグラー磁石との併用でエミッタンスを調整することができる。これによって、ナノビーム方式で必要とする低エミッタンスを実現している。

衝突点領域のある直線部 (TSUKUBA) には、局所的色収差補正が配置され、最終収束四極電磁石から衝突点までのドリフト空間で発生する色収差を効率よく補正している。この局所的色収差補正用の六極電磁石は、クラブウエスト方式を行うためにも用いられる [8–10]。

3. ルミノシティ性能の向上

3.1 概要

2022 年 6 月までに達成された最高ルミノシティは、 $4.65 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。また、Belle II 測定器がデータ取得をしていない場合の非公式な記録は、 $4.71 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。これらの記録は、KEKB 加速器で達成された最高ルミノシティの 2 倍を超える値である。加速器から提供した積分ルミノシティは、 491 fb^{-1} であり、そのうち Belle II 測定器では、 428 fb^{-1} (4 fb^{-1} は、解析に使用されないデータ) が収集された。Table 1 に、シフト 8 時間あたり、1 日あたり、および 7 日間あたりの積分ルミノシティの記録を示す。

Table 1: Integrated Luminosity Records

	Recorded	Delivered	Unit
Shift (8 hours)	958	1036	pb^{-1}
1 day	2.5	2.9	fb^{-1}
7 days	15.0	16.6	fb^{-1}

最大ビーム電流は、LER で 1.46 A、HER で 1.14 A である。バンチ数は、最大で 2346 バンチを達成している。これは、2 バケット間隔で約 4 nsec にあたる。衝突点における垂直ベータ関数は、主に 1 mm を加速器運転に使用し、運転における最小値は 0.8 mm で

* yukiyoshi.onishi@kek.jp

ある。衝突点における垂直ベータ関数が、0.8mm の場合、力学口径もしくは可動コリメータ [11] で制限される物理口径の最適化に依存するビーム寿命や入射効率の問題がある。両リングともに、クラブウエスト方式を採用しており、LER では 80%、HER では 40% のクラブウエスト率を課している。クラブウエスト方式は、共鳴線によってルミノシティが悪化する効果を低減できる一方、力学口径を著しく低減させる効果が知られている。最高ルミノシティを達成したマシンパラメータを、Table 2 に示す。Table 2 に

Table 2: Machine Parameters

	LER	HER	Unit
Emittance, ε_x	4.0	4.6	nm
Beam current, I_{\pm}	1321	1099	mA
Number of bunches, n_b	2249		
Bunch current, $I_{b\pm}$	0.587	0.489	mA
Horizontal size at IP, σ_x^*	17.9	16.6	μm
Vertical size at IP, σ_y^*	0.215		μm
Hor. betatron tune, ν_x	44.525	45.532	
Ver. betatron tune, ν_y	46.589	43.573	
Beta at IP, β_x^* / β_y^*	80 / 1.0	60 / 1.0	mm
Piwinski angle, Φ	10.7	12.7	
Crab waist ratio	80	40	%
Beam-Beam, ξ_y	0.0407	0.0279	
Luminosity, L	4.65×10^{34}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

示されている σ_y^* は、ルミノシティから推定された Σ_y^* を $\sqrt{2}$ で割ったものである。この場合に用いられるバンチ長は、nominal な値を使用している。ルミノシティは、

$$L = \frac{N_+ N_- n_b f_0}{2\pi \phi_x \Sigma_z \Sigma_y^*} \quad (1)$$

と表され、 N_{\pm} は粒子数、 f_0 は周回周波数、

$$\Sigma_z = \sqrt{\sigma_{z+}^2 + \sigma_{z-}^2} \quad \text{and} \quad \Sigma_y^* = \sqrt{\sigma_{y+}^{*2} + \sigma_{y-}^{*2}} \quad (2)$$

である。Piwinski 角は、

$$\Phi = \frac{\sigma_z}{\sigma_x^*} \tan \phi_x \quad (3)$$

と表すことができ、 ϕ_x は交差角の半分で 41.5 mrad という大角度である。ナノビーム方式の特徴として、Piwinski 角が 10 以上と従来の衝突型加速器と比べて約 10 倍以上の大きさを持つことである。これによって、バンチ長を Piwinski 角で割った程度まで、衝突点の垂直ベータ関数を絞ることが可能となる。しかしながら、ルミノシティにバンチ長の効果が入ってくるので、幾何学的なルミノシティの低減を補うために垂直方向のビームサイズを小さくする必要がある。nominal なバンチ長は、LER で、4.6mm、HER で、

5.1 mm であるが、バンチ電流の増加とともにバンチ長は伸びるので、実際には、加速器運転におけるバンチ電流では、約 6mm 程度となっているものと推測される。

3.2 クラブウエスト方式

クラブウエスト方式の利点は、幾何学的なルミノシティ損失を補うだけでなく、ビームビーム相互作用によってもたらされるベータトロン、もしくはシンクロ=ベータトロン共鳴を低減させることである [12, 13]。クラブウエスト率 100% の場合、必要とされる 6 極電磁石の K 値 ($1/\text{m}^2$) は、

$$K_2 = \frac{1}{\cos \Delta\psi_x \sin^2 \Delta\psi_y} \frac{1}{\tan 2\phi_x} \frac{1}{\beta_y^s \beta_y^*} \sqrt{\frac{\beta_x^*}{\beta_x^s}} \quad (4)$$

と表すことができる。 β_x^s と β_y^s はクラブ 6 極電磁石でのベータ関数で、 $\Delta\psi_{x,y}$ は、衝突点との位相差である。通常、 $|\cos \Delta\psi_x| = 1$ 、および $\sin^2 \Delta\psi_y = 1$ となるように設計し調整される。

クラブウエスト方式を導入したことにより、高いバンチ電流積での衝突実験が可能となり、スペシフィック・ルミノシティが向上している。

3.3 スペシフィック・ルミノシティ

Figure 1 に、バンチ電流積とスペシフィック・ルミノシティの関係を示す。 $\beta_y^* = 1\text{mm}$ と 0.8mm の場合について示している。たとえば、設定が 1mm でも、何らかの原因によって局所的色収差補正における水平ビーム軌道のずれが生じればベータビートが発生し、衝突点垂直ベータ関数がずれる可能性がある。BPM による測定をもとに、推定される衝突点垂直ベータ関数についても図に示している。これは、LER よりも HER について顕著である。

スペシフィック・ルミノシティは、

$$L_{sp} = \frac{L}{n_b I_{b+} I_{b-}} \propto \frac{1}{\Sigma_z \Sigma_y^*} \quad (5)$$

で表される。したがって、ビームサイズ ブローアップが生じなければ、バンチ電流積に対して一定となるものである。 $\beta_y^* = 0.8\text{mm}$ の場合、バンチ電流積が 0.05mA^2 では、高いスペシフィック・ルミノシティが得られているが、 0.1mA^2 付近で急激に減少している。これは、X-Y 結合の色収差補正などが、最適化されていないことを示唆しているのかも知れない。

3.4 ビームビーム相互作用

衝突点垂直ベータ関数を絞っていくと、通常 $\sqrt{\beta_y^*}$ に従って、ビームビームパラメータは減少する。しかし、垂直エミッタンスも、 β_y^* に比例して小さくすることができれば、ビームビームパラメータは同じバンチ電流について一定に保たれる。ルミノシティは、 β_y^* だけ絞った場合、 $1/\sqrt{\beta_y^*}$ でしか増大しないが、垂直エミッタンスも同時に小さくできれば、ルミノシティは、 $1/\beta_y^*$ に比例して向上する。Figure 2 に、

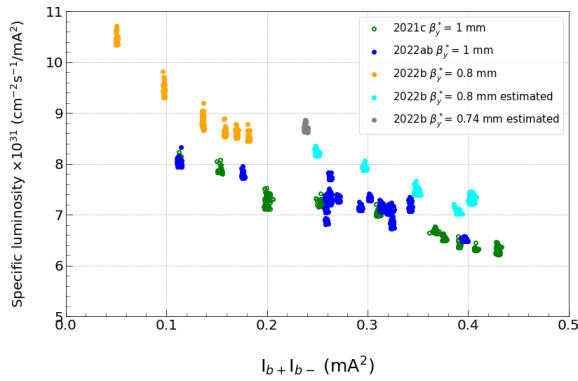


Figure 1: Specific luminosity.

相手ビームのバンチ電流に対するビームビームパラメータを示す。図には、物理ランにおける2種類のビームビームパラメータを示しており、ルミノシティから算出したビームビームパラメータは、

$$\xi_{y\pm} = 2er_e \frac{\beta_{y\pm}^* L}{\gamma_{\pm} I_{\pm}}, \quad (6)$$

と表され、一方、incoherentなビームビームパラメータは、

$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e}{2\pi\gamma_{\pm}} \left(\frac{I_{b\mp}}{ef_0} \right) \frac{\beta_{y\pm}^*}{\phi_x \sigma_{z\mp} \sigma_{y\mp}^*} \propto I_{b\mp} \sqrt{\frac{\beta_{y\pm}^*}{\varepsilon_{y\mp}}} \quad (7)$$

と表すことができる。ここでは、 $\beta_{y+}^* = \beta_{y-}^*$ とみなしている。HERのビームビームパラメータがLERのものより小さい理由は、主にルミノシティを最適化する過程でHERのビーム電流をエネルギー比と比べて大きくしているためである。つまり、HERのビーム電流が小さくなるとHERのビームサイズがブローアップしやすいという傾向がある。物理ランで使われるバンチ電流領域(0.8 mA以下)では、LERとHERの比は5対4が最適とされている。この電流比率を保持した上で電流増加をしていくと、LERのバンチ電流が0.6 mAを超えたところから、電子のビームビームパラメータの増加が鈍くなっている。そこで、ビームビームパラメータが0.03から0.035に制限されているように見える。ただし、少数バンチでの高バンチ電流衝突スタディでは、衝突性能に特化した最適化が施され、ビームビームパラメータで0.045を達成している。

3.5 LERの回転6極電磁石によるX-Y結合の色収差補正

LERには、衝突点を挟んで片側6ファミリー(12台)のビーム軸周りに回転する6極電磁石が配置されている[14]。これを用いることにより衝突点におけるX-Y結合の色収差を補正することができる。X-Y結合のパラメータは r_1, r_2, r_3, r_4 の4つがある。これらのうち、ルミノシティに直接効果のある r_1 と r_2 の色収差の補正を行った。X-Y結合の色収差の大

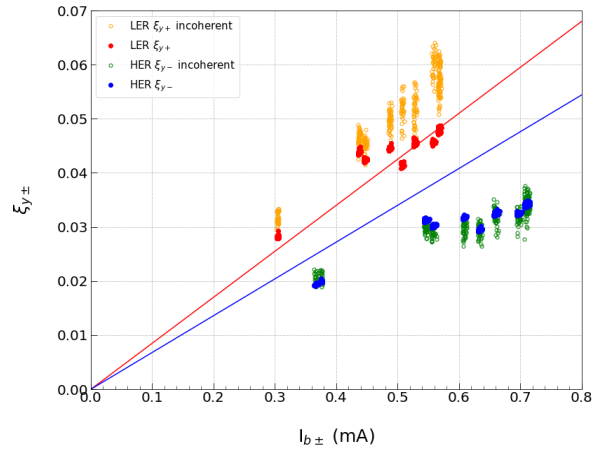


Figure 2: Beam-Beam parameter for the LER and HER, respectively. The red line shows calculated beam-beam parameter in the LER and blue line for the HER without beam-beam blowup where the vertical emittance is 25 pm in the LER and 40 pm in the HER.

きさを見積もるために、 $\nu_x - \nu_y - \nu_s = \text{整数}$ 、および $\nu_x - \nu_y - 2\nu_s = \text{整数}$ という共鳴線の強さに着目する。水平チューンを固定して、垂直チューンをスキャンし垂直ビームサイズをXRMビームサイズモニターで測定する。衝突点の r'_1 および r'_2 を変えた場合に、設定した垂直チューンと測定された垂直ビームサイズの関係をFig. 3とFig. 4に示す。これらの測定により、共鳴線の強さが一番弱くなる組み合わせとして、 $r'_1 = -1$ と $r'_2 = 0$ を採用することとした。

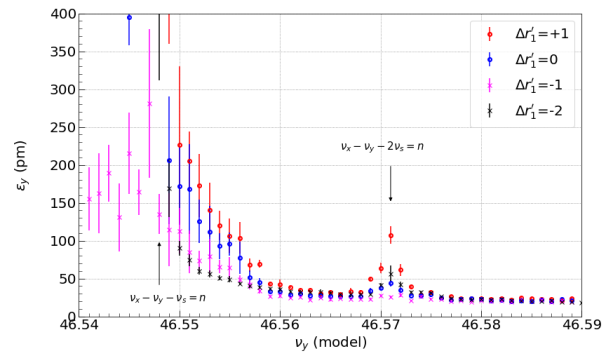


Figure 3: Vertical emittance as a function of vertical tune with different r'_1 .

4. ルミノシティ性能を制限している課題

4.1 速いビームロス (Sudden Beam Loss)

2ターンから3ターン程度でビームロスを起こして、ビームアポートに至る事象が多くある。大抵の場合、ビームロスを検知してロスモニターによるビームアポートに至るが、あまりにもビームロス量が大

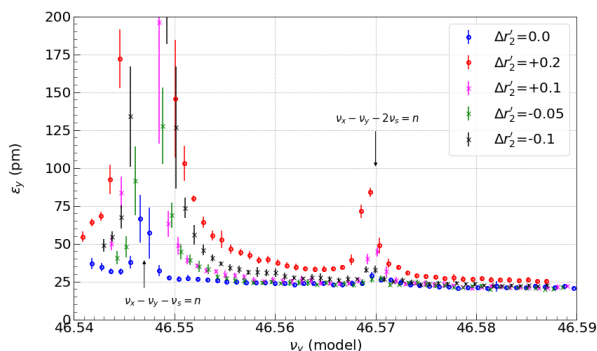


Figure 4: Vertical emittance as a function of vertical tune with different r_2' .

きい場合には、コリメータ・ヘッドの損傷や、QCSクエンチを引き起こす。LERについては、ビームの進行方向上流から、D06V1、D06V2、D02V1という3台の可動する垂直コリメータを主に使用している。これらのコリメータ付近で、速いビームロスが発生していることが観測されている。D02V1付近で大きなビームロスが発生すると、QCSがクエンチすることが多く、Belle II 測定器における被曝量も多くなる。QCSのうち衝突点下流最も衝突点に近いQC1LPというLER用の超伝導コイルがクエンチし、さらに大きなビームロスの場合、上流側のQC1RPという超伝導コイルもクエンチする。また、D06V1およびD02V1コリメータのヘッドも損傷することがある。その場合はコリメータ付近の真空圧力上昇が観測される。HER用の超伝導コイルは、通常の加速器運転ではクエンチした経験はない。大きな速いビームロスは、LERのバンチ電流が0.7 mAを超えると顕著になる傾向がある。また、コリメータのヘッドが損傷してインピーダンスが増大した場合は、こうした速い大きなビームロスを引き起こすバンチ電流の閾値が低くなる傾向にある。

4.2 コリメータのインピーダンスと損傷

可動式コリメータは、Belle II 測定器に対するビームバックグラウンドの低減に大きな役割を果たしている。ビームバックグラウンドには、入射ビームによるものと蓄積ビームによるものがある。蓄積ビームによるものには、真空パイプ内の残留ガスによる散乱、バンチ内の粒子散乱、ルミノシティが高くなると顕著となる相手ビームとの衝突による散乱がある。残留ガスは、真空焼きだしが進めば減少する。低エミッタンスの場合、バンチ内散乱の頻度が増え、衝突点を含む光学系では力学口径が減少するので、散乱された粒子が力学的安定領域から外れてバックグラウンドとなる。入射ビームのエミッタンスやエネルギー広がり、想定した値よりも大きい場合や、トップアップ入射に伴うコヒーレント振動が大きい場合は、入射ビームによるバックグラウンドの要因となる。

こうしたビームバックグラウンドを低減するた

めに、可動コリメータの物理口径を調節する。その場合、入射効率およびビーム寿命とのバランスを取りながら最適化を行う。水平コリメータと比較すると垂直コリメータの物理口径は、非常に小さくインピーダンスが大きいと考えられる。垂直コリメータの物理口径による垂直方向のチューンシフトは、

$$\frac{\Delta\nu_y}{I_b} = -\frac{T_0}{4\pi(E/e)} \sum_i \beta_{yi} \kappa_i(d) \quad (8)$$

と表現される。 T_0 は周回時間(約10 μsec)、 $\kappa_i(d)$ はコリメータのロスファクターで物理口径 d の関数である。Figure 5に、LERにおける垂直チューンシフトのバンチ電流依存性の測定と垂直コリメータのロスファクターとベータ関数との積の推定値の関係を示す。衝突点付近のインピーダンスが優位である場合、衝突点ベータ関数によるチューンシフトに違いが見られるはずであるが、その様子は見られない。一方、コリメータの物理口径によるインピーダンスの変化がチューンシフトに与える影響が顕著であることがわかる。物理ランでは、LERの $\beta_y \kappa(d)$ の総和が、約33 kV/pCであり、チューンシフトは、約 -0.011 mA^{-1} である。これは、LERのシンクロトロン・チューンの約半分に対応する。しかしながら、前節で説明したように大きなビームロスが起きてコリメータ・ヘッドが損傷した場合には、さらにチューンシフトは大きくなる。

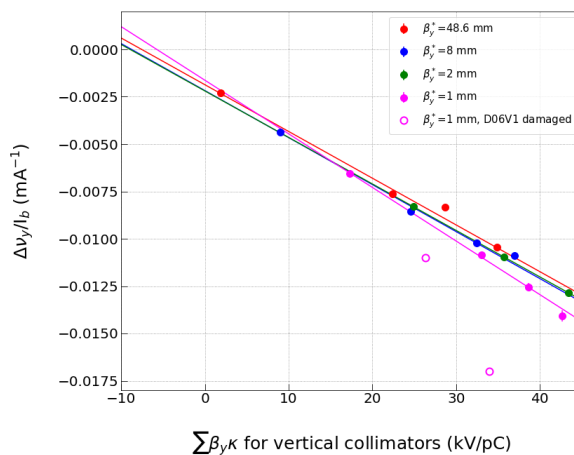


Figure 5: Slope of vertical tune as a function of $\sum \beta_y \kappa$.

4.3 LERにおけるビームブローアップ

LERにおける電子雲効果によるビームブローアップは、0.35 mA/バンチ/バケット間隔(1.64 A)まで観測されることはなかった。しかしながら、シングルビーム、シングルバンチでのビームブローアップが観測されている。チューンスペクトラムを観測していると、-1モードのサイドバンド($\nu_y - \nu_s$)が高いバンチ電流で現れる。この-1モード不安定性は、ビームブローアップと結びついていると考えられるが、全貌がすべて解明されているわけではない。-1モー

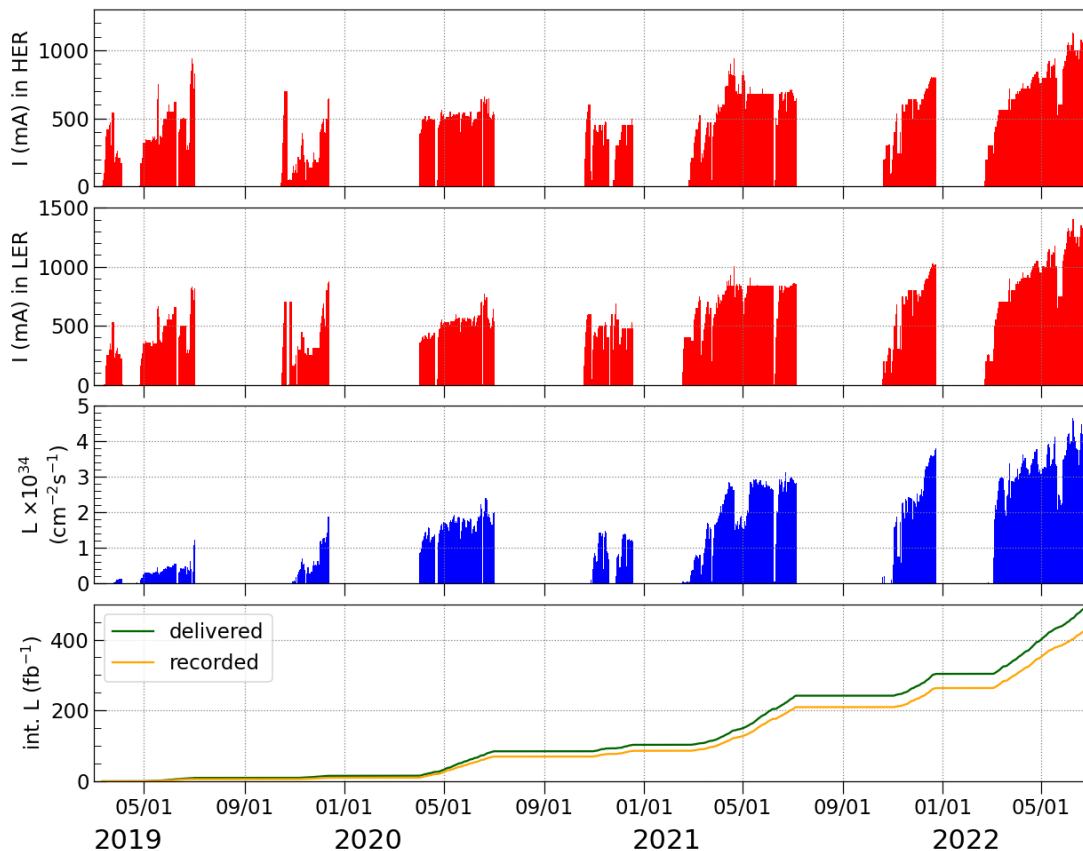


Figure 6: History of SuperKEKB.

ド不安定性には、可動コリメータによるインピーダンス、バンチ毎フィードバックシステムの調整、および垂直チューンの3つの要因がある。LERのコリメータによるインピーダンスを極力小さくした上で、バンチ毎フィードバックシステムの調整を行うと、ビームブローアップを抑制できることが実証されている。特に、バンチ毎フィードバックシステムのタップ数を減らすと、-1モード不安定性を引き起こすことがないことがシミュレーションの結果からわかっている。また、高い垂直チューンを選択することもビームブローアップを抑制する効果がある。

大きなビームロスによってコリメータ・ヘッドが損傷すると、垂直チューンシフトのバンチ電流依存性が大きくなることが観測されている。損傷したコリメータでは、インピーダンスが増大するものと推測される。コリメータの損傷は、ビームブローアップを誘因し、ビームバックグラウンドが増大するので、加速器運転上大きな問題となる。

4.4 ビーム電流増加によるビームラインの変形

HERにおいて、ビーム電流増加とともに垂直チューンシフトが顕著に観測されていた。最近になって、連続閉軌道補正(CCC)を15秒周期で行なって

いても、強い6極電磁石における水平軌道がビーム電流とともに基準軌道からずれていくことが判明した。6極電磁石における水平軌道のずれは、4極磁場成分を作り出すためにチューンシフトが発生する。特に、局所的色収差補正用の6極電磁石の場合、その場所での水平ベータ関数は小さく、垂直ベータ関数は大きい。そのために、主に垂直チューンシフトが発生する。ビーム電流増加とともに、放射光による発熱でビームラインが変形し、水平方向の軌道のずれが大きくなると仮定すると、これによる垂直チューンシフトは、実測値と矛盾がない。しかしながら、水平方向のチューンシフト量は、水平軌道のずれによって説明することはできない。ただし、resistive wall インピーダンスによる水平チューンシフトによって説明することはできない。resistive wall インピーダンスによるチューンシフトは、垂直方向にも寄与するはずである。垂直チューンシフトについては、resistive wall インピーダンスによるチューンシフトも寄与しているはずなので、さらなる詳細な検討が必要である。

強い6極電磁石で水平方向の軌道のずれによって作り出される4極磁場成分は、チューンシフトだけでなくベータビートを引き起こす。ベータビート

の結果、衝突点の垂直ベータ関数も変化する。HERの場合、ビーム電流が増加するにしたがって、L側の6極電磁石のペアにおける水平ビーム軌道が、揃ってリング外側へずれてく傾向にある。このずれは、衝突点の垂直ベータ関数が小さくなる方向で、 $20\mu\text{m}$ のずれで、 $\beta_y^*=1\text{mm}$ が約 0.8mm まで小さくなる。6極電磁石に立てるローカルバンブ軌道を利用して、水平方向のビーム軌道のずれを補正する。その結果、低電流(50mA)での光学補正の再現性がよくなった。また、高い電流領域での入射効率が低電流領域と同等に回復し、ビームバックグラウンドが安定した。ベータ関数は局所的色収差補正と比べて小さいが、強い6極電磁石はアーク部にもあり、垂直方向のずれは、X-Y結合を発生する。LERにおいても同様な問題があるので、リング全体としてビーム軌道とビームラインの変形を理解し、 $10\mu\text{m}$ オーダーのレベルで全ビーム電流領域においてビーム軌道を一定に保つ仕組みを検討する必要がある。

4.5 短寿命とビーム入射

ナノビーム方式の特徴として、低エミッタンスと小さな衝突点ベータ関数がある。これらは、十分な力学口径を確保することを難しくしている。クラブウエスト方式は、運動量のずれた粒子に対する力学的安定領域を減少させることがシミュレーションによりわかっている。ビームバックグラウンド低減のための可動コリメータの物理口径もビーム寿命に影響を与える。

衝突点における垂直ベータ関数を、絞っていくと入射効率が低下する。また、バンチ電流に依存して入射効率が変化することから、入射においてビームビーム効果を見捨てることはできない。今後、垂直ベータ関数を絞り、ビーム電流を増加して $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超えるルミノシティを達成しようとすると大きな課題となってくる。

5. まとめ

最近のSuperKEKB加速器の運転状況について報告した。2022年春期の加速器運転では、LERのビーム電流が1Aを超えて安定に運転できるようになり、最高ビーム電流は1.4Aに到達した。また、バンチ数も2346バンチ(2バケット間隔)まで増加することができた。その結果、最高ルミノシティ $4.65\times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。Figure 6に、これまでのビーム電流、ルミノシティ、積分ルミノシティの歴史を示す。2019年春期から2022年春期まで、フェーズ3として加速器運転を行ってきたが、2022年夏より長期シャットダウン(LS1)に入った。LS1では、非線形コリメータの採用、HER入射部真空パイプ改造等、加速器のアップグレードを行う。LS1後には、2年間をかけて $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成し、10年後に 15ab^{-1} の積分ルミノシティを達成する計画である。

謝辞

SuperKEKB加速器の運転に携わったすべての人々に感謝します。研究成果は、INFN(LNF)、CERN、KEKの共同研究による支援によるところが大きく、ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2013** 03A011, (2013). doi:10.1093/ptep/pts083
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, Eur. Phys. J. Plus. **136** (2021) 10, 1023. doi:10.1140/epjp/s13360-021-01979-8
- [3] M. Akemoto *et al.*, Prog. Theo. Exp. Phys. **2013** 03A002, (2013).
- [4] K. Furukawa *et al.*, Proc. of IPAC'22, Bangkok, Thailand, June 12-17 2022. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-THPOST011
- [5] Belle II Technical Design Report, arXiv:1011.0352, Nov. 2010.
- [6] N. Ohuchi *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A, **1021**, (2022) 105930. doi:10.1016/j.nima.2021.165930
- [7] K. Watanabe *et al.*, Proc. of IPAC'19, Melbourne, Australia, May 19-24 2019.
- [8] P. Raimondi, presented at the 2nd Workshop on Super B-Factor, 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] T. Ishibashi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **23**, 053501 (2020). doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.053501
- [12] P. Raimondi *et al.*, LNF-07-003-IR, 2007.
- [13] D. Shatilov *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 014001 (2011).
- [14] R. Sugahara *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **26** (2016).