

SuperKEKB フェーズ2におけるコミッショニングの成果

REPORT ON SuperKEKB COMMISSIONING IN PHASE 2

大西幸喜*

Yukiyoshi Ohnishi*,

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

on behalf of the SuperKEKB Commissioning Group and the Belle II Commissioning Group

Abstract

SuperKEKB is an electron-positron double-ring asymmetric-energy collider to search new physics phenomena appeared in B-boson decays. In order to accomplish this purpose, the huge statics, namely, extremely high luminosity is necessary which can be realized by a novel “nano-beam” collision scheme. First of all, the commissioning was focused on the verification of nano-beam scheme. Secondary, beam related background for the Belle II detector was also studied for the preparation of the pixel vertex detector installed before the Phase 3 operation. The preliminary results and accomplishments of the commissioning will be reported in this article.

1. はじめに

SuperKEKB 衝突型加速器 [1] は、4 GeV の陽電子と 7 GeV の電子を 1 箇所衝突させる。陽電子を LER リングに、電子を HER リングに蓄積する周長約 3 km の 2 リング構成で、設計上のビーム電流の最高値は、LER では 3.6 A、HER では 2.6 A であり、KEKB 加速器の約 2 倍である。衝突点での垂直ベータ関数 (β_y^*) は、約 300 μm が最終的な目標であり、これは KEBK 加速器の 20 分の 1 である。SuperKEKB 加速器では、こうした性能向上によって KEBK 加速器の 40 倍のルミノシティである $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ が目標とされる。この場合、ビームビーム・パラメータ (ξ_y) は KEBK 加速器の実績値である 0.09 を仮定している。ただし、これを達成するためには、水平方向に対する垂直方向のエミッタンス比 ($\varepsilon_y/\varepsilon_x$) は、0.3% という値が要求される。

通常の交差角がない（正面衝突）または小さい衝突方式では、 β_y^* をバンチ長 (σ_z) より小さくしても「砂時計効果」によって、ルミノシティの増加効率が下がる。したがって、 β_y^* の設計値は、 σ_z 以上となりルミノシティが制限される。この問題を解決するために、SuperKEKB では「ナノビーム方式」[2]を採用する。ナノビーム方式では、低エミッタンスのビームを大きな交差角 83 mrad をつけて衝突させる。Figure 1 に、フェーズ2における典型的な衝突するビームの模式図を示す。この衝突方式では、衝突領域は小さな重なり領域に限定され砂時計効果の影響を非常に小さくすることができる。衝突領域の進行方向の広がり、バンチ長の有効値として

$$\sigma_{z,eff} = \frac{\sigma_x^*}{\phi_x}, \quad (1)$$

と表すことができる。 σ_x^* は、衝突点における水平方向のビームサイズ、 ϕ_x は、交差角の半分である。つ

まり、 β_y^* は $\sigma_{z,eff}$ よりも大きければよく、

$$\beta_y^* > \frac{\sigma_x^*}{\phi_x} = \frac{\sigma_z}{\Phi}, \quad (2)$$

に従って、小さくすることが可能となる。ここで、 Φ は Piwinski 角である。SuperKEKB でのバンチ長は約 6 mm を想定している。通常の衝突型加速器の Piwinski 角は 1 以下であるのに対して、SuperKEKB におけるナノビーム方式では、約 12 から 20 と大きな Piwinski 角であることが特徴で、 β_y^* をバンチ長の $1/\Phi$ に絞ることができる。

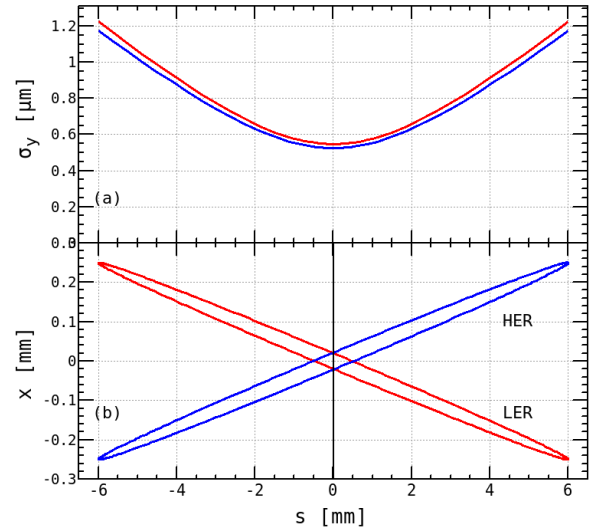


Figure 1: (a) Beam spot-size in the vertical direction in the vicinity of the IP. (b) Top of view of the colliding bunches with a large crossing angle. The ratio of vertical emittance to the horizontal emittance is assumed to be 5% in the LER and 2% in the HER.

見方を変えて、ビームを x 軸に射影してみると、水平方向のビームサイズの有効値が $\sigma_{x,eff}^* = \sigma_z \phi_x$ で、バンチ長の有効値が $\sigma_{z,eff}$ であるビームが、正

* yukiyoshi.ohnishi@kek.jp

面衝突しているとも見ることが出来る。この場合、ルミノシティは次式で与えられる。

$$L = \frac{N_- N_+ n_b f_0}{4\pi(\sigma_z \phi_x) \sqrt{\varepsilon_y \beta_y^*}} \approx \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} \quad (3)$$

$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e N_{\mp}}{2\pi\gamma_{\pm}(\sigma_z \phi_x)} \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\varepsilon_y}}. \quad (4)$$

N_{\pm} は、バンチ内の電子または陽電子の粒子数、 n_b はバンチ数、 f_0 は周回周波数である。ここでは、 β_y^* と ε_y は電子と陽電子では同じであると仮定した。式(3)と式(4)より、 β_y^* を小さくすれば、垂直ビーム・パラメータ (ξ_y) は $\sqrt{\beta_y^*}$ に比例して小さくなるが、ルミノシティは、逆比例して大きくなる。また、 β_y^* を絞るにつれて ε_y も同じ比率で小さくできれば、 ξ_y を変化させずに β_y^* に逆比例してルミノシティを増大させることができる。一方、水平方向のビーム・パラメータは値が非常に小さいので、ダイナミックな効果 (ダイナミック・ベータやダイナミック・エミッタンス) は無視できる。

2. フェーズ2コミッショニングの目標

SuperKEKB のコミッショニングはフェーズ1、フェーズ2、フェーズ3の3つの段階に区別される。フェーズ1は、2016年2月から6月末まで運転が行われ、コミッショニングの詳細は、参考文献[3]および[4]で報告されている。フェーズ2の始まる前に陽電子ダンピングリング (DR) [5] のコミッショニングが2月8日より開始された。DRは、周長135m、エネルギー1.1 GeV のリングで、フラックス・コンセントレーター [6] を用いた陽電子源からの陽電子

ビームのエミッタンスを減少させる。フェーズ2は、2018年3月19日から7月17日までの約4ヶ月間行われた。Figure 2にコミッショニングの経緯を示す。フェーズ2では、最終収束系の超伝導磁石群 (QCSと総称) [7] 及び Belle II 測定器 (ピクセルを用いた崩壊点位置検出器はインストールされない) が設置され、加速器のハードウェアとしては、ほぼ最終形に近い状態でコミッショニングが行われる。

フェーズ2の目標は、

- ナノビーム方式の検証
- Belle II 測定器に対するビームバックグラウンドの理解と低減
- 入射システムの確立

である。まず、ナノビーム方式の検証では、 β_y^* をバンチ長よりも小さくしてもルミノシティが上がること及び β_y^* を2~3 mm程度に絞った状態において、ビーム・パラメータで0.03以上を達成することを目標とした。また、ルミノシティの目標も LER電流1 Aにおいて $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ とした。

ビームバックグラウンドは、入射ビームによるものと蓄積ビームによるものに分けられる。フェーズ2期間中の入射ビームについては、衝突点付近に設置された、ダイヤモンド・センサーのビームドーズを主に測定し、入射調整において高い入射効率を保ちつつノイズの低減を試みる。蓄積ビームについては、残留ガスとのクーロン散乱または非弾性散乱、タウシェック効果によるビームロス、ルミノシティ・バックグラウンドなどが検討項目となる。バックグラウンドは、基本的に、入射効率やビーム寿命を鑑みながら可動式コリメータによって制御される。入射条件を変えてのバックグラウンドの測定や垂直方

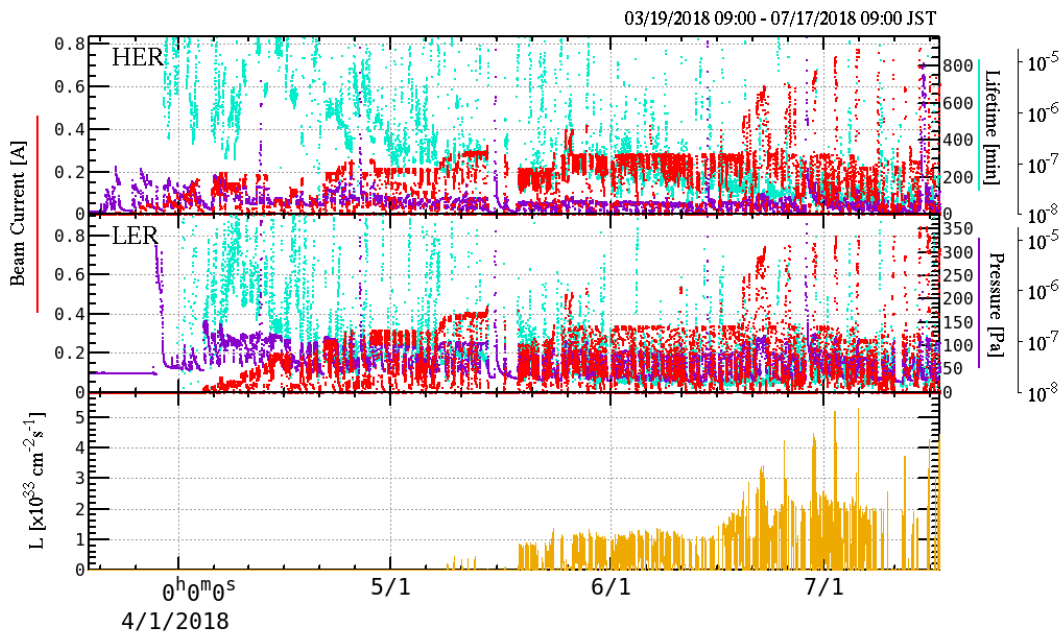


Figure 2: History of Phase 2 commissioning. The red points indicate the beam current, cyan for the beam lifetime, purple for the average vacuum pressure. The luminosity is indicated by yellow.

向のエミッタンスを変化させながらタウシェック効果によるバックグラウンドの測定を行った。これらの情報を総合して、フェーズ3で崩壊点位置検出器をインストールするかどうかの決定を行う。

入射システムについては、新たに陽電子ダンピングリング (DR) が加わり、入射器から DR 入射、DR 出射から入射器への再入射を経て、陽電子は LER へと入射される [8]。電子の HER 入射には、熱電子銃と RF 電子銃 [9] の両方が使用可能である。熱電子銃は、2 階建て構造の二階に、RF 電子銃は一階に設置されている。熱電子銃で生成される電子は二階から 24 度ライン [10] を下って、一階へ合流する。合流部には偏向磁石が設置されており、磁場値を変更することによって熱電子銃と RF 電子銃を切り替えることができる。陽電子生成用大電荷電子は熱電子銃で生成されるので、熱電子銃であれば LER と HER へのパルスごとの同時入射が容易となる。また、熱電子銃からの電子ビームは、PF と PF-AR という 2 つの放射光リングにも同時入射が可能である。合流部の偏向磁石は、フェーズ3ではパルス化され、RF 電子銃であってもパルスごとに切り替えが可能となる予定である。入射器終端部にはパルス化された偏向磁石が設置されており、パルスごとに SuperKEKB と PF、PF-AR にビームが振り分けられる。KEKB 時代より PF については同時入射が可能であったが、近年、PF-AR 直接入射路を建設したことにより HER へのビーム輸送路と分離され、SuperKEKB とは独立に入射ができるようになり、4 リング同時入射が可能となった。これらのリングは全てエネルギーが異なるが、加速管の減速位相を用いたエネルギー調整を行う入射器下流の 3 セクターから 5 セクターにはパルス偏向磁石とパルス 4 極磁石が設置され、それぞれの入射ビームに最適化する。

フェーズ3は、2019 年春から始まる予定で、フェーズ2が順調にいけば、Belle II 測定器に崩壊点位置検出器を予定通りに組み込む。物理実験を行いながら、最終的な設計性能を目指して調整を進めることになる。

3. フェーズ2 コミッショニングの概要

3.1 ビーム入射、蓄積調整、機器類の立ち上げ

まず最初に、QCS の設置誤差や磁場の健全性を考慮して、 β_y^* および β_x^* をなるべく大きな値にデチューンした上で、ビームを入射し蓄積する試みを行った。デチューンされたオプティクスでは、局所的色収差補正を導入しない。この段階は、Phase 2.0 と呼ばれる。デチューン量は、Table 1 に示されている。3 月 19 日に HER への入射調整が開始され、高周波加速空洞を切った状態で 約 20 ターンほど周回したところで、高周波加速空洞を入れて 3 月 21 日にビーム蓄積が成功した。ビーム蓄積後の閉軌道を見ると、水平方向に約 7 mm、垂直方向に約 5 mm の軌道がアーク部で測定された。これより QCS の設置誤差は、約 100 μm 以下と推測される。しかしながら、正常にビームが蓄積されず低電流で制限されてしまうので、原因を調査すると、入射キッカー 6 台のうち

5 台が動作しておらず、1 台のみで入射していたことが判明した。入射キッカーの動作不良は、ノイズが原因であったが、こうした不具合を直した後は正常にビームが蓄積されるようになった。

LER の入射調整は、3 月 27 日より開始された。3 月 30 日には高周波加速空洞を切った状態で約 12 ターン、その後、高周波加速空洞を入れてビーム蓄積に成功した。しかし、入射ビームがある電流以上蓄積されない、QCS 付近の軌道が異常である等の原因を調査するために、QCS コレクターを 1 台ずつ励磁して軌道応答を測定しモデルと比較したところ、LER の QC2LP (QCS において衝突点を挟んで左側 2 番めの水平収束 4 極磁石) の水平ステアリングと同じく QC2LP の歪 4 極コイルの電源へのケーブル接続が入れ替わっていたことが判明した。そのケーブルの接続ミスを修復した後は、軌道も正常となり、ビームが蓄積されるようになった。

このようなハードウェアのトラブルに見舞われながらも、ビームの蓄積に成功した要因は、QCS が非常に高い精度で設置されていたこと、ターン毎ビーム位置モニターによる入射調整が可能であったことが挙げられる。4 月 13 日までの間、デチューンされたオプティクスで、オプティクス診断と補正 [11]、QCS の水平ステアリング、垂直ステアリング、および歪 4 極コイルの軌道応答の測定 [12]、ビーム運転を行うための制御系や運転用のソフトウェア、各種ハードウェアの整備と監視、調整が進められた。また、衝突実験のために衝突点領域の真空焼き出しを行った。衝突実験までに要求されている積分ビームドーズは 100 Ah である。フェーズ2 期間中、衝突軌道を維持するための dithering システム [13]、速い collision フィードバックの試験が継続的に行われた。また、衝突調整に不可欠なビームサイズ測定を行う X 線モニター [14] の調整も行われた。

3.2 β_y^* を絞る

QCS の磁場は設計磁場を変更せず、衝突点から見て QCS の外側の磁石によって衝突点ベータ関数を制御する。QCS は、1.5 T の測定器ソレノイド磁場中にあり、補償ソレノイドと主コイルである 4 極コイル、および非常に多くのコレクターコイル群から構成されている。デチューンされた衝突点ベータ関数を絞る場合、局所的色収差補正部を設計に近い形にする必要がある。局所的色収差補正を含む衝突用オプティクスが出来上がれば、局所的色収差補正部とアーク部の間にあるマッチング部の 4 極磁石によって衝突点ベータ関数を制御することができる。Table 1 に、様々な段階における衝突点ベータ関数を示す。Phase 2.1.0 から Phase 2.1.7 までが、実際に物理ランを行いミノシティー調整を行ったオプティクスである。Phase 2.2.0 の β_y^* が 2 mm のオプティクスは、試験的に絞ったもので、物理ランでは使用していないがオプティクス補正までは完了している。この衝突点ベータ関数は、衝突型加速器としては、世界最小である。

Table 1: Beta Squeezing in Phase 2

Phase	β_x^* [mm]	β_y^* [mm]	L $\times 10^{33}$	I_L/I_H [mA], n_b
	LER/HER	LER/HER		
2.0	348/400	48.6/81	-	200/200, 1576
2.1.0	200	8	0.93	250/220, 600
2.1.1	200	6	1.37	340/285, 789
2.1.2	200	4	1.36	340/285, 789
2.1.6	200/100	4	2.04	350/295, 789
2.1.7	200/100	3	2.6	340/285, 789
2.2.0	200	2	-	50/50, 1576

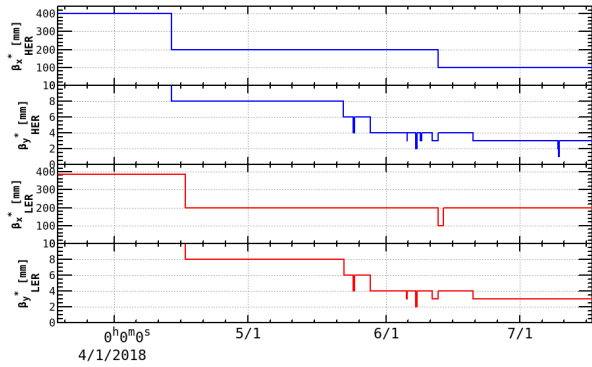


Figure 3: History of beta squeezing in the Phase 2 commissioning. The blue lines for the HER and the red lines for the LER.

3.3 初衝突

初衝突は、Phase 2.1.0 にて試みる事となった。4月13日に、HERの衝突点ベータ関数を、 $\beta_x^*=200$ mm、 $\beta_y^*=8$ mmまで絞り、4月16日に、LERの衝突点ベータ関数を同様に絞ることに成功した。4月25日にビームビーム・スキャンを行い、水平方向および垂直方向におけるビームビーム・キックの測定に成功した。Figure 4にLERのRF位相をずらして、衝突タイミングのスキャンを行ったときの水平ビームビーム・キックおよび垂直ビームビーム・キックの様子を示す。水平方向のビームビーム・キックは、交差角があるために現れ、HERビームがLERビームに対して垂直方向にオフセットを持っているために、垂直方向のビームビーム・キックも観測されている。水平方向のビームビーム・スキャンによって衝突タイミングを調整した後に、垂直方向のビームビーム・スキャンを行った結果、HERのLERに対する垂直オフセットは約35 μm 程度であった。このことは、QCSの設置精度の高さを示している。こうした調整により衝突実験の準備が整い、4月26日にBelle II測定器にて、初めてハドロン事象が観測された。

3.4 フェーズ2コミッションングの成果

初衝突後は、各種ハードウェアの調整、真空焼き出しとともに、衝突ビームを用いたルミノシティ・

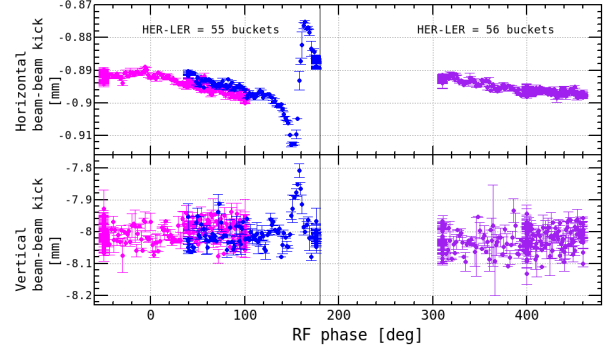


Figure 4: Horizontal beam-beam scan. Observed beam-beam kick as a function of RF phase.

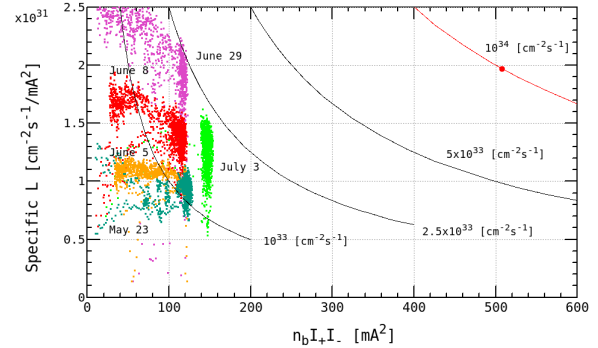
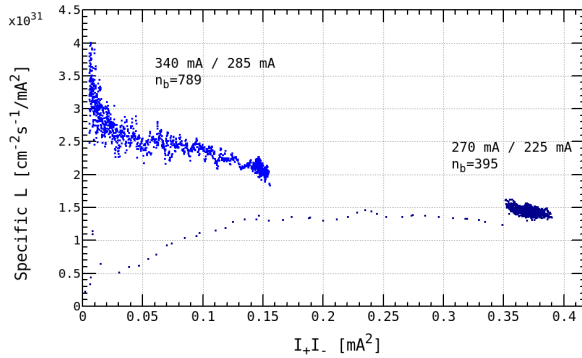


Figure 5: Specific luminosity as a function of bunch current product multiplied by number of bunches. Plots except for green dots indicate the reference beam currents and bunch numbers. The green dots indicate the high bunch current operation.

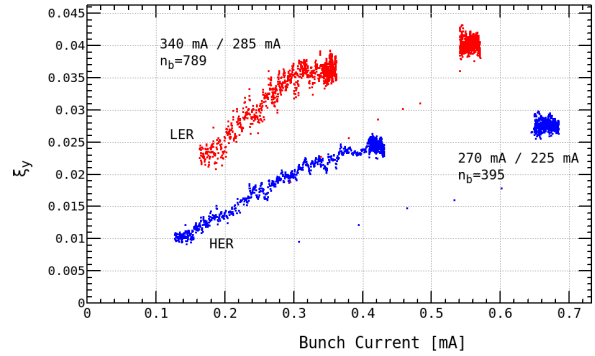
ランを行い、Belle II測定器でデータ収集が行われた。Belle IIのデータ解析により、衝突点が設計よりも1 cmほど進行方向にずれていることが判明し、これを修正するために水平方向の軌道バンプを作りビーム衝突のタイミングの調整を行った。さらに、Fig. 3に示すように、衝突点ベータ関数を絞っていき、最終的には3 mmまで絞ってルミノシティ調整を行った。その間、ウエスト、衝突点のX-Y結合、垂直分散の調整を行い、得られたルミノシティを、Table 1に示す。しかしながら、当初 β_y^* を6 mmから4 mmに絞っても、その効果がルミノシティに反映されない問題に直面した。これは、ビームビーム・ブローアップがほとんど起こらない低バンチ電流において、スペシフィック・ルミノシティが幾何学的な値に到達しないというものであった。スペシフィック・ルミノシティは、以下のように表せる。

$$L_{sp} = \frac{L}{n_b I_+ I_-} = \frac{1}{4\pi e^2 f_0 (\sigma_z \phi_x) \sigma_y^*} \quad (5)$$

衝突点のノブ・スキャンをするうちに、X-Y結合がルミノシティに寄与することが判明した。衝突点のX-Y結合のパラメータ(R_2)をQCSの歪4極コイルを使って補正し、幾何学的なルミノシティが向上し



(a) Specific luminosity as a function of bunch current product.



(b) Vertical beam-beam parameter as a function of bunch current.

Figure 6: Specific luminosity and vertical beam-beam parameter are obtained from the parameters in Phase 2.1.7.

た。衝突点ベータ関数の絞りと衝突点におけるオプティクス調整、ウエスト調整を繰り返すことによって、スペシフィック・ルミノシティが向上して行く様子を Fig. 5 に示す。この図において主要な運転パラメータは、LER のビーム電流が 340 mA、HER が 285 mA、バンチ数が 789 である。Figure 5 は、Table 1 に、ほぼ対応している。達成されたスペシフィック・ルミノシティとビームビーム・パラメータを、Fig. 6 に示す。高バンチ電流運転におけるマシン・パラメータを Table 2 に示す。このパラメータで、バンチ数のみを 4 倍とすると、LER のビーム電流が 1.08 A の時に、 $9 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティが達成されると予想される。また、最高ルミノシティは、LER のビーム電流が 790 mA の時に、 $5.55 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ が達成されている。

Table 2: Machine Parameters in Phase 2.1.7. Intra-beam scatterings are included.

Parameter	LER	HER	Unit
I	270	225	mA
n_b		395	
ε_x	1.8	4.6	nm
β_x^*	200	100	mm
β_y^*	3	3	mm
α_c	2.9×10^{-4}	4.5×10^{-4}	
σ_δ	7.58×10^{-4}	6.31×10^{-4}	
U_0	1.76	2.43	
V_c	8.4	12.8	MV
ν_s	-0.0220	-0.0258	
ν_x	44.562	45.542	
ν_y	46.617	43.609	
σ_y^*		560	nm
ξ_y	0.042	0.030	
L		2.29×10^{33}	$\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

フェーズ 2 における最高蓄積ビーム電流は、LER

で 860 mA、HER で 800 mA に到達した。これは、当初、LER の目標値である 1 A に到達できなかったが、コミッショニング期間が 4 ヶ月と短いこと、 β_y^* を絞ることを最優先したことなど考慮すると、十分な成果である。

マシン・スタディも各種行われた。特に電子雲のスタディにおいて、2RF バケットごとにビームを蓄積するフィルパターンでは、0.8 mA のバンチ電流までビームサイズ・ブローアップは観測されなかった。フェーズ 1 後より真空チェンバーに設置された永久磁石によるソレノイド的磁場の効果を確認することができた。

以上の成果によりフェーズ 2 の目標は達成されたので、フェーズ 3 へ進むことが決定されている。

3.5 フェーズ 2 コミッショニングの課題

フェーズ 2 の開始から、QCS クエンチが問題となっていた。これは、入射ビームもしくは蓄積ビームが、何らかの原因で QCS のコイルに当たってクエンチするというものである。入射ビームによる QCS クエンチは、実績のない β_y^* に初めて絞る時、オプティクス補正前ではリングの X-Y 結合が大きく、水平方向の入射振動が垂直方向のビーム振動に転化され、物理口径の狭い QCS でビームロスすることによって引き起こされることがほとんどである。これについては、可動式コリメータの適切な設定やビーム・バックグラウンドの監視・アポートによって防ぐことが可能である。蓄積ビームによる QCS クエンチは、ほとんどの場合、可動式コリメータによって防ぐことができているが、原因が不明な事象も起きており、さらなる調査と対策が必要である。特に、大電流ビームを蓄積中のビームロス、QCS クエンチを引き起こすばかりだけでなく、可動式コリメータのヘッドを損傷させることもあった。QCS クエンチは、HER と比べて LER の方が圧倒的に回数が多く、可動式コリメータの数が少ないことに起因すると考えられる。LER には、垂直方向の可動式コリメータは衝突点領域に 1 台しかなく、アーク部がないことがビームロスの制御を難しくしている。フェーズ 3 までにアーク部に可動式コリメータを追加する予定

であるが、インピーダンス源としての検討が必要である。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 201303A011 (2013).
- [2] “SuperB Conceptual Design Report”, INFN/AE-07/2, SLAC-R-856, LAL 07-15, March 2007.
- [3] 紙谷琢哉 他、MOOLP02 “SuperKEKB フェーズ 1 における入射器とリングの現状”, 第 13 回日本加速器学会年会、千葉、2016.
- [4] 船越義裕 他、MOOL02 “SuperKEKB のフェーズ 1 のビームコミッショニング”, 第 13 回日本加速器学会年会、千葉、2016.
- [5] M. Kikuchi *et al.*, TUPEB054 “Design of Positron Damping Ring for SuperKEKB”, Proc. of IPAC’10, Kyoto, Japan, 2010; <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC10/papers/tupeb054.pdf>
- [6] 榎本嘉範 他、MOP063 “SuperKEKB 用フラックスコンセントレーターの開発”, 第 13 回日本加速器学会年会、千葉、2016.
- [7] 有本靖 他、THP065 “SuperKEKB ビーム最終集束用超伝導電磁石システム -ハーモニックコイルによる 4 極電磁石の磁場測定-”, 第 15 回日本加速器学会年会、長岡、2018.
- [8] 飯田直子 他、THOM04 “SuperKEKB の陽電子ダンピングリングの入出射路コミッショニング”, 第 15 回日本加速器学会年会、長岡、2018.
- [9] 吉田 光宏 他、FROM06 “SuperKEKB 用 RF 電子銃のコミッショニング”, 第 15 回日本加速器学会年会、長岡、2018.
- [10] 紙谷 琢哉 他、WEP076 “KEK 電子陽電子線形加速器 24 度ビーム合流ラインのパルス偏向磁石の端部磁場検討”, 第 15 回日本加速器学会年会、長岡、2018.
- [11] 杉本 寛 他、THP002 “SuperKEKB コミッショニングにおけるビーム光学系の調整”, 第 15 回日本加速器学会年会、長岡、2018.
- [12] 森田昭夫 他、THP007 “Local Orbit Bump を用いた SuperKEKB 最終収束光学系の誤差評価”, 第 15 回日本加速器学会年会、長岡、2018.
- [13] 大木俊征 他、WEOM10 “SuperKEKB における水平方向衝突軌道保持制御システムの実証試験”, 第 15 回日本加速器学会年会、長岡、2018.
- [14] フラナガン ジョン 他、“SuperKEKB 用 X 線ビームプロファイルモニタの検討”, 第 7 回日本加速器学会年会、姫路、2010.