

SuperKEKB のフェーズ 1 のビームコミッショニング SUPERKEKB PHASE 1 BEAM COMMISSIONING

船越義裕、阿部哲郎、安達利一、赤井和憲、有本靖、植木竜一、江川一美、Dima El Khechen^{A)}、榎本嘉範、John Flanagan、福岡均、古川和朗、飯田直子、飯沼裕美、池田仁美、石橋拓弥、岩崎昌子、影山達也、梶裕志、紙谷琢哉、川本崇、風間慎吾、菊池光男、小林鉄也、小玉恒太、小磯晴代、増澤美佳、三増俊広、三浦孝子、宮原房史、森隆志、森田昭夫、中村衆、中村達郎、中山浩幸、夏井拓也、西脇みちる、大見和史、大西幸喜、大木俊征、佐々木信哉、佐藤政則、清宮裕史、柴田恭、末武聖明、末次祐介、杉本寛、田中窓香、多和田正文、照井真司、飛山真理、上原貞治、宇野彰二、王旭東、渡邊謙、矢野喜治、吉本伸一、張叡、周徳民、周翔宇、宗占国

Yoshihiro Funakoshi*, Tetsuro Abe, Toshikazu Adachi, Kazunori Akai, Yasushi Arimoto, Ryuichi Ueki, Kazumi Egawa, Dima El Khechen^{A)}, Yoshinori Enomoto, John Flanagan, Hitoshi Fukuma, Kazuro Furukawa, Naoko Iida, Hiromi Iinuma, Hitomi Ikeda, Takuya Ishibashi, Masako Iwasaki, Tatsuya Kageyama, Hiroshi Kaji, Takuya Kamitani, Takashi Kawamoto, Shingo Kazama, Mitsuo Kikuchi, Tetuya Kobayashi, Kouta Kodama, Haruyo Koiso, Mika Masuzawa, Toshihiro Mimashi, Takako Miura, Fusashi Miyahara, Takashi Mori, Akio Morita, Shu Nakamura, Tatsuhiro Nakamura, Hiroyuki Nakayama, Takuya Natsui, Michiru Nishiwaki, Kazuhito Ohmi, Yuki Yoshi Ohnishi, Toshiyuki Oki, Shinya Sasaki, Masanori Satoh, Yuuji Seimiya, Kyo Shibaya, Masaaki Suetake, Yusuke Suetsugu, Hiroshi Sugimoto, Madoka Tanaka, Masafumi Tawada, Shinji Terui, Makoto Tobiyama, Sadaharu Uehara, Shoji Uno, Xudong Wang, Ken Watanabe, Yoshiharu Yano, Shin-ichi Yoshimoto, Rui Zhang, Demin Zhou, Xiangyu Zhou, Zhanguo Zong

KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{A)} LAL, Orsay, France

Abstract

In this report, we describe the machine operation of Phase 1 commissioning of SuperKEKB. The beam commissioning is smoothly went on. Vacuum scrubbing, issues on the high beam current operation, the optics corrections and others are described.

1. はじめに

SuperKEKB は KEKB の後継プロジェクトであり、KEKB 加速器が 2010 年 6 月末に運転を停止した直後からアップグレードの工事に入り、5 年半の工事を経て、2016 年 2 月 1 日より実際のビームを使ったコミッショニングが始まった。このコミッショニングは Phase 1 と呼ばれるが、6 月 28 日までの約五ヶ月にわたって行われた。このレポートでは、この Phase 1 のコミッショニングについて報告を行う。

2. SUPERKEKB の概要とコミッショニングの戦略

2.1 SuperKEKB の概要

SuperKEKB では、B 中間子系において素粒子物理学の標準モデルを超える新しい物理の発見を目指す。SuperKEKB は、大幅にアップグレードした電子陽電子用入射器(全長約 600m)及び二つの主リング、新しく建設される陽電子用ダンピングリング、物理検出器(Belle II)からなる。主リングは、高エネルギーリング(HER 7GeV 電子)と低エネルギーリング(LER 4GeV 陽電子)からなる。物理検出器も Belle から大幅なアップグレー

ドを施した Belle II に変わる。改造の詳細については、参考文献を参照していただきたい [1]。SuperKEKB の設計パラメータについては、Table 1 にまとめて示す。

2.2 SuperKEKB のコミッショニングの戦略

SuperKEKB のコミッショニングは、Phase 1, Phase 2, Phase 3 の三段階に分けて行われる。Phase 1 は五ヶ月間行われ、既に終了した。Phase 1 では、最終収束系の超伝導電磁石群(QCS と総称)及び Belle II 検出器は設置されず、ビーム衝突も行わなかった。これは、QCS の建設スケジュールや Belle II をインストールする前に十分な vacuum scrubbing(真空焼き出し)やビーム入射等の基本的なビーム調整を行っておきたいという考えに基づいている。Phase 2 コミッショニングは 2017 年秋に開始予定で、最初にダンピングリングのコミッショニングを行い、続いて(または一部並行して)衝突リング(主リング)のコミッショニングを行う。この Phase 2 では QCS 及び Belle II 検出器がインストールされるが、Belle II 検出器の vertex detector はインストールされない。これは、ビームバックグラウンドに敏感な vertex detector は QCS を用いた状態で十分な調整を行った後にインストールしたいという考えに基づいている。Phase 2 は加速器サイドから見るとハードウェアの条件としては、ほぼ最終状態に近い状態でのコミッショ

*yoshihiro.funakoshi@kek.jp

Table 1: Design Machine Parameters of SuperKEKB (Values in parentheses of the emittances correspond to those at zero bunch currents.)

	LER	HER	Units
Beam Energy	4.000	7.007	GeV
Beam Current	3.6	2.6	A
# of Bunches	2500		
Circumference	3016.315		m
Hor. Emittance	3.2(1.9)	4.6(4.4)	nm
Ver. Emittance	8.6(2.8)	11.5(1.5)	pm
β -function at IP(H/V)	32/0.27	25/0.30	mm
Moment. compaction	3.25	4.55	$\times 10^{-4}$
Energy spread	8.08	6.37	$\times 10^{-4}$
RF voltage	9.4	15.0	MV
Hor. tune ν_x	44.53	45.53	
Ver. tune ν_y	46.57	43.57	
Synchrotron tune ν_s	-0.0247	-0.0280	
Energy loss / turn	1.87	2.43	MeV
Damping time $\tau_{x,y}/\tau_s$	43/22	58/29	ms
Bunch length	6.0	5.0	mm
Beam-beam param. H	0.0028	0.0012	
Beam-beam param. V	0.0881	0.0807	
Luminosity	8×10^{35}		/cm ² /s

ニングになる。Phase 2 でのルミノシティの目標値は、KEKB の設計値である $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。Phase 2 の期間は約 5 ヶ月の予定である。Phase 3 は 2018 年秋から始まる予定で、Belle II の vertex detector も設置され、物理実験も行いながら設計性能を目指して調整を進めていくことになる。

3. PHASE 1 コミッショニングのミッション

Phase 1 のコミッショニングのミッションは以下の通りである。

- 各ハードウェアコンポーネントの立ち上げ
- ビームオペレーションソフトウェア群の立ち上げと整備
- Phase 2 での Belle II 検出器の設置のための準備
- ビーム電流を増やした時の問題点の発見と対策
- Belle II 検出器（特にそのソレノイド磁場）と QCS が不在状態でのオプティクス補正、特に低い垂直エミッタンスを得るための低エミッタンス調整
- その他のマシンスタディ

これらの内、「Phase 2 での Belle II 検出器の設置のための準備」に関しては、十分な vacuum scrubbing と検出器に対するビームバックグラウンドノイズに関するスタディが重要である。Vacuum scrubbing に関しては、Belle II グループから Phase 1 の間に 0.5~1A のビーム電流で 1 ヶ月程度の vacuum scrubbing が要請された。これは、積分のビームドーズにすると 360~720Ah に相

当する。ビームバックグラウンドノイズのスタディに関しては、Belle II 検出器は設置されていないが、Beast と呼ばれる小さなテスト検出器を設置してスタディを行った。Phase 1 では衝突点付近の電磁石の配置や衝突点でのビームサイズなどが Phase 2 以降とは大きく異なるが、ビームバックグラウンドノイズに関するシミュレーションが実験値と一致するかどうかを調べておくことは重要である。

4. PHASE 1 コミッショニング

4.1 ビーム運転の経緯

Figure 1 に Phase 1 コミッショニングの経緯を示す。図中、ビーム電流、リングの平均の真空度、ビーム寿命が、それぞれ、赤、紫、水色のドットで示されている。コミッショニングは 2 月 1 日に開始され、最初の一週間は入射器からリングまでのビーム輸送路の調整に充てられた。LER(陽電子リング) への入射の調整は 2 月 8 日に開始され、2 月 10 日にはビーム蓄積が成功した。HER(電子リング) への入射の調整は 2 月 22 日に開始され、2 月 25 日にはビーム蓄積が成功した。それ以来、ビーム電流を徐々に上げて Phase 1 での LER 及び HER の最大電流はそれぞれ 1010mA 及び 870mA であった (HER のビーム電流を 6 月の後半に下げているのは、トランスバース方向の bunch-by-bunch フィードバックのキッカーの問題による)。ビーム電流を立ち上げからの増加は KEKB の場合に比べて、2~3 倍速いペースで進んだ。この早い立ち上がりの理由として、以下の要因が考えられる。

- bunch-by-bunch フィードバックシステムが早い時期から立ち上がり、ビーム不安定性を抑制することができた
- 各ハードウェアシステムは KEKB の経験をもとにアップグレードされ、安定に動作した
- ビームオペレーション用のソフトウェアツール (軌道補正ソフト等) も KEKB での経験をもとに整備され、早い時期から安定に動作した
- KEKB の立ち上げ時に比べて、比較的マシントラブルが少なかった

以上のように、KEKB の経験が SuperKEKB の立ち上げを早めるのに有効に働いている。Phase 1 でのマシンパラメータを Table 2 に示す。

4.2 Vacuum scrubbing

LER の真空チェンバーに関しては、KEKB で使われていたものの 98% が新しい真空チェンバーに入れ替えられた。アーク部では、KEKB で問題になった電子雲の効果を抑制することと KEKB より強くなる放射光によるチェンバーの発熱を軽減する目的で、アンテナチェンバーが採用されている。HER に関しては、アーク部の真空チェンバーはほぼ全て KEKB のものが再利用されている。全周では、約 18% のチェンバーが新しいものに入れ替えられた。Figure 1 からわかるように、vacuum scrubbing は比較的スムーズに進んだ。全周平均の真空

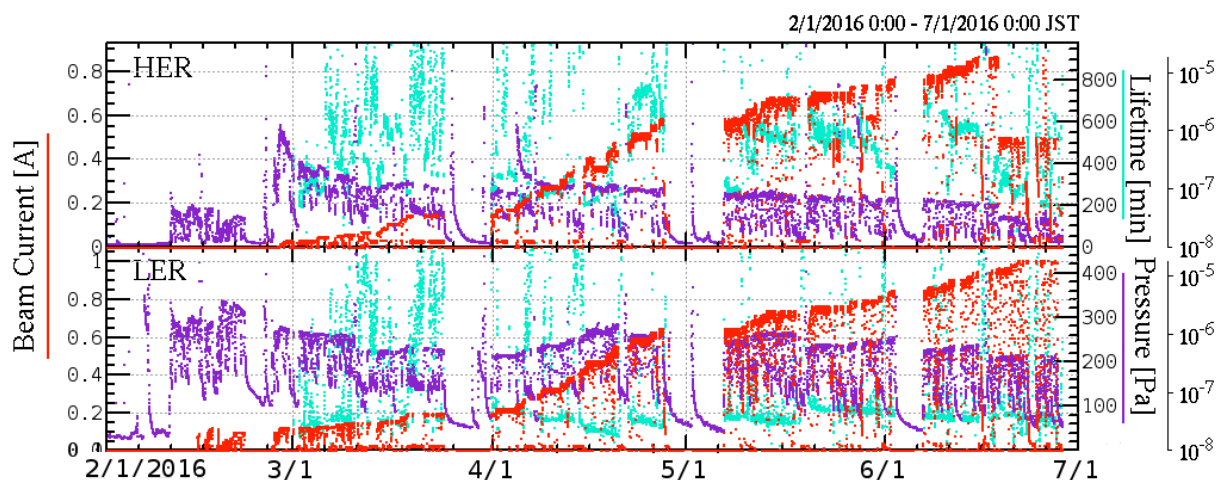


Figure 1: History of SuperKEKB operation in Phase 1.

Table 2: Machine Parameter in Phase 1 (Horizontal emittances are values at zero bunch currents.)

	LER	HER	Units
Beam Energy	4.000	7.007	GeV
Beam Current	1010	870	mA
# of Bunches	1576	1576	
Hor. Emittance	1.8	4.6	nm
Momentum compaction	2.45	4.44	$\times 10^{-4}$
Energy spread	7.7	6.3	$\times 10^{-4}$
RF voltage	7.45	11.99	MV
Hor. tune ν_x	44.53	45.53	
Ver. tune ν_y	46.57	43.57	
Synchrotron tune ν_y	-0.0190	-0.0246	
Energy loss / turn	1.87	2.43	MeV
Damping time $\tau_{x,y}/\tau_s$	44/22	58/29	ms
Bunch length	4.8	5.4	mm

度は、LER が 1010 mA の時に 4.7×10^{-7} Pa (6月17日)、HER は 870 mA の時に 5.7×10^{-8} Pa (6月22日) 程度であった。その時のビーム寿命は、LER、HER それぞれ 60分、200分程度であった。ビーム寿命に関しては、真空中で決まるもの(残留ガスとの衝突で制動放射を放出してエネルギーを失うプロセスが主なものである)に加えて、Touschek 効果も効いている。Phase 1 終了時点で累積ビームドーズは、LER、HER それぞれ 776Ah, 662Ah であり、Belle グループからの要請は満たした。真空システムのコミッショニングの詳細に関しては、別論文にまとめられている [2]。

4.3 大電流に伴う問題と対策

4.4 LER の真空度のビーム電流に対する非線型性

Figure 2 に示されているように、LER 真空度がビーム電流に対して非線形依存性を持ち、電流が増えると急激に真空度が悪くなるという現象が見つかった。原因として考えられたのは、アルミ製のベローズチャンバーにおいて、電子増倍が生じているということ

ある。LER のアンテチェンバーには二次電子放出率を下げるために TiN コーティングが施されているが、このベローズチャンバーには施されていない。テスト用に設置されている TiN コーティングの無いアルミチェンバー部で測定した電子数の振る舞いと圧力の振る舞いが類似していることが観測されている。また、図 2 に示されているように、ベローズチャンバー部にソレノイド磁場 (~50G) を加えたり、ソレノイドライクな永久磁石 (中央部で 100 G) を取り付けるとその付近の圧力上昇はビーム電流に対して直線的になることが分かった。このタイプのベローズチャンバーは、長さ 20 cm で LER に平均 3m 毎に設置され、全周で約 800 個存在する。6月初めの短い運転休止期間に、これら全てのベローズチャンバーに永久磁石のソレノイド磁石を設置した結果、vacuum scrubbing 用のフィルパター (平均 3.06 RF bucket spacing, バunch数 1576) では少なくとも 1 A まではこの問題はほぼ起こらなくなった。

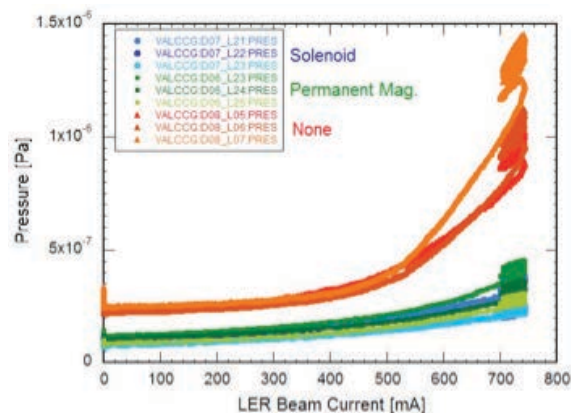


Figure 2: Nonlinear vacuum pressure against beam current in LER.

4.5 LER の垂直ビームサイズのブローアップ

KEKB の LER(陽電子リング)において、電子雲の効果による垂直方向のビームサイズのブローアップが

ミノシティの制限要因になり、長い間その効果を軽減する努力が続けられた。SuperKEKB では、KEKB での経験をもとにアンテチェンバーの導入など様々な対策が施されている [1]。その結果、Phase 1 の低い電流では、ビームブローアップは起きないことが予想されていたが、実際はかなり低い電流でブローアップが観測された。vacuum scrubbing 用のフィルパターンでは、500mA 以上で急激なブローアップが観測された。このブローアップをより詳細に調べるために、フィルパターンを変えてスタディが行われた。Figure 3 は、バンチ間隔を変えて LER の垂直方向のビームサイズを X 線モニタを用いて観測した結果である。バンチ間隔は 2~6 RF bucket で、バンチ数は全て 600 バンチであった。バンチ間隔が狭いほど低い電流でブローアップが生じるが、図に示したようにグラフの横軸を全電流をバンチ間隔で割った変数に変えると、ほぼ同じ値でブローアップが始まることが分かる。ビームが生成する電子雲の密度は、全電流をバンチ間隔で割った量の関数で変化することが予想されることから、このブローアップは電子雲によるものであることが示唆される。このように予想外に大きなブローアップが低い電流で起こっている理由として、上記の TiN コーティングを施していないアルミ製のベローズ部分に電子雲が溜まることが考えられる。上述のように、6月初めの運転休止期間に全てのベローズチェンバーに永久磁石のソレノイド磁石が設置されたが、その結果このブローアップもある程度抑制された。Figure 3 の下図は永久ソレノイド磁石の設置前の結果、上図は永久ソレノイド磁石の設置後の結果であるが、永久ソレノイド磁石の設置によりブローアップの閾値がおよそ 1.5 倍上がったことが分かる。Phase 2 の運転で設計電流の半分程度のビーム電流 (LER: 1.8A, HER: 1.3A) 程度でルミノシティ調整を行うことを想定すると、LER のブローアップはさらに抑制することが望ましいが、そのためにはベローズチェンバー以外のアンテチェンバー部分にもソレノイド磁場を設置することが必要であると思われる。

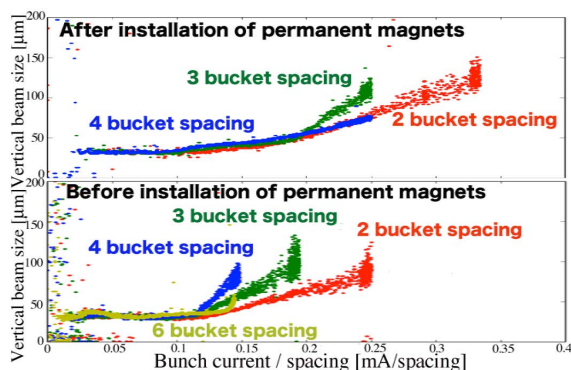


Figure 3: LER beam blowup study with different bunch spacing.

4.6 LERにおける真空バーストを伴う頻繁なビームアポート

Vacuum scrubbing における問題点の一つは、LER で時々見られる真空度のハネ (バースト) を伴うビームア

ポートである。SuperKEKB では、機器を保護するために、マシンに何らかのトラブルが生じた場合に、ビームをアポートしてビームダンプに導くアポートシステムが存在するが、このアポートは、全周に設置されたビームロスモニターがビームロスの兆候を捉えた場合に、大きくビームロスが起こる前にビームアポートするいわゆるロスモニターアポートである。この現象では、多くの場合、真空バーストは衝突点に比較的近い場所の偏向電磁石の中のアルミチェンバーで起こる。バーストの原因としては、壁電流に対する電氣的なコンタクトが弱い部分があり放電が起きている可能性とチェンバー内のダスト粒子との衝突などが考えられる。一つの試みとして、真空チェンバーを強く叩く装置を設置して動かしてみると、問題になっている真空バーストを伴うアポートが再現性よく発生した。このことから、このアポートはダスト粒子によるものの可能性が高いと考えられる。

5. オプティクス補正

オプティクス補正はマシンオペレーションのベースになるものであるが、そのオプティクス補正のベースとして、BPM (ビームモニター) やステアリング電磁石のビームを用いたシステムチェックが重要である。BPM に関しては、まずビーム軌道のバンブを作って BPM による軌道変化を観察するなどの方法で、BPM のケーブルの誤配線などが少数の BPM で発見され、修正された。また、ビームを使って各 BPM の 4 つの電極の相対ゲインを較正する測定が行われ、軌道測定に組み込まれた。さらに、BPM の読みの中心 (ゼロ点) と近傍の 4 極電磁石の磁場中心とのオフセットを測定する測定が行われ、測定値が軌道測定に組み込まれた。次にステアリング電磁石に関しては、やはり軌道のバンブを作る方法で、一部のステアリング電磁石の励磁曲線に誤りがあることが発見され、修正された。これらの測定と修正をもとに、信頼性が高い軌道補正ソフトウェアが確立され、ビーム運転に用いられている。軌道補正のデータからリングの周長が分かるが、LER の周長の測定値と設計値のズレは 2 mm 程度であり、また LER と HER の周長の差は 0.2 mm 程度であることが分かった。この周長の差は LER に設置されているシケイン電磁石で補正されるが、その可変範囲は 3mm であり、実測値はこの可変範囲に比べて十分小さく、電磁石のアラインメントの作業が正確だったことを示している。

これらの測定や修正を基礎にしてオプティクス測定と補正が行われる。その詳細については、参考文献に記述されている [3] のので、本論文ではオプティクス補正の現状の概要のみを示す。まず重要なのは、線形オプティクスの補正で、X-Y coupling、dispersion、beta 関数のズレ (beta-beat) に関する測定と補正が行われている。補正の方法は、KEKB 方式を踏襲している。十分な数のシングルパス BPM が設置されていないため、従来型の COD (Closed Orbit Distortion) を測定する BPM を用いる。KEKB と同じく、これら 3 つの補正を一つずつ行い、収束するまで何度か 3 つの補正のループを繰り返すというやり方である。それぞれの補正は完全

には独立ではないが、独立性が高いので補正のループを繰り返すことで補正が収束するということが、KEKBでも実証されている。X-Y coupling と beta-beat の測定では、ステアリング電磁石でビームを蹴って、軌道変化のレスポンスを測定する。Phase 1 における重要調整項目である低エミッタンス調整にとっては、X-Y coupling と垂直 dispersion の補正が特に重要である。

HER の低エミッタンス調整 (X-Y coupling と垂直 dispersion の補正) は比較的順調に進んだが、LER で大きな問題になったのはビームアポート用の Lambertson セブタム電磁石の漏れ磁場 (主成分は skew-Q 成分) の影響であった。この漏れ磁場に対する対策として近傍の収束 6 極電磁石 (SF 電磁石) に巻いた skew-Q コイルに電源をつないで使うこと (Phase 1 では、発散 6 極電磁石 (SD 電磁石) に巻いた skew-Q コイルには電源が用意されているが、SF 電磁石の skew-Q には用意されていなかった) 及び、永久磁石を用いた skew-Q 磁石を設置して補正に用いることを試みた。これらはどちらも有効で、これを用いることにより LER の垂直エミッタンスは劇的に小さくなった。LER の垂直エミッタンスの測定値の改善の経緯を Figure 4 に示す。目標の 5pm には届かなかったが、8pm 程度の低エミッタンスが実現できほぼ目標は達した。これに対して、HER の低エミッタンス調整はオプティクス補正自体は上手いいき、その結果から予想される垂直エミッタンスが 10 pm 以下と比較的小さな値であるにもかかわらず、X-ray モニタによる測定値は 120 pm 程度となり大きな不一致がある。X-ray モニタの校正など様々な検討、スタディが行われたが、現時点ではこの不一致の原因は完全には理解されていない。一つの可能性として X-ray モニタの測定に大きなオフセットが乗っている可能性がある。これは、X-ray の発光点の垂直ベータ関数を変更してビームサイズを測定したスタディから示唆されるものであるが、ビームサイズはベータ関数の平方根に比例せずに変化が小さかった。オフセットがどのくらいかは、解析に用いる仮定やモデル式、測定データの処理方法などに依存するが、オフセットを差し引いた垂直エミッタンスとしては、20~80pm ぐらいの値が得られる [3]。但し、このオフセットの原因は分かっておらず、今後の課題の一つになっている。

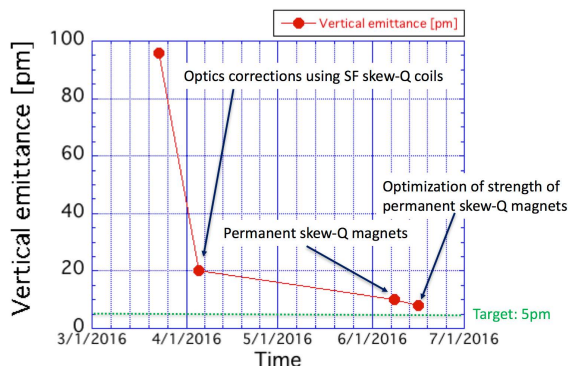


Figure 4: History of improvement in LER vertical emittance.

Table 3 に現時点での線形オプティクスの補正の到達

点を示す。KEKB の LER の典型的な値も合わせて示されている。KEKB に比べてかなり良い値が得られているが、IR (特に Belle ソレノイド) がないことが効いていると思われる。また、特に beta-beat に関しては水平方向のチューンが KEKB の時よりも半整数から遠いことにもよっている。Phase 2 に向けて、オプティクス補正自体は順調に進んでいると考えられる。

Table 3: Present Status of Optics Corrections

	LER	HER	LER KEKB	Units
X-Y coupling*)	9	6		$\times 10^{-3}$
$\Delta\eta_x$ r.m.s.	8	11	10	mm
$\Delta\eta_y$ r.m.s.	2	2	8	mm
$\Delta\beta_x/\beta_x$ r.m.s.	3	3	6	%
$\Delta\beta_y/\beta_y$ r.m.s.	3	3	6	%

*) Ratio between r.m.s values of the vertical and horizontal orbits.

6. その他

本論文では、入射器のコミッショニングには触れられなかったが、これについては参考文献を参照していただきたい [4]。また、Beast を用いたビームバックグラウンドのスタディに関しては、ビームサイズを変更して Touschek 効果によるバックグラウンドの変化を見るスタディ、特定区間の真空度を悪くしてビームと残留ガスの衝突に由来するバックグラウンドの変化を見るスタディ、わざと入射条件を悪くしてバックグラウンドの変化を見るスタディ、コリメータを変化させてバックグラウンドの変化を見るスタディなどが行われ現在データ解析中である。

7. 今後の予定

Phase 2 コミッショニングは、2017 年秋からの約 5 ヶ月間の予定であるが、最初にダンピングリングのコミッショニングが行われる。この Phase 2 では、Belle II の vertex chamber を除いて、ハードウェアとしてはほぼ最終系に近い状態でコミッショニングが可能になり、ビーム衝突やルミノシティ調整も行われる。Phase 2 での目標のルミノシティは KEKB の設計値と同じ $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。Phase 3 のコミッショニングは、2018 年の秋から始まる予定で、SuperKEKB は物理実験と並行して設計ルミノシティに向けて長い戦いに入る。

参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, Technical Design Report of SuperKEKB, in preparation and to be published as a KEK report. An preliminary version is seen in "https://kds.kek.jp/indico/event/15914/".
- [2] Y. Suetsugu *et al.*, in these proceedings (TUP105).
- [3] H. Sugimoto *et al.*, in these proceedings (MOP062).
- [4] T. Kamitani *et al.*, in these proceedings (MOOLP02).