

話 題

SuperKEKB 始動！

船越 義裕*

SuperKEKB Commissioning Start!

Yoshihiro FUNAKOSHI*

Abstract

In this report, we describe the machine operation in the first 4 months of the Phase 1 commissioning of SuperKEKB. The beam commissioning is smoothly going on. Vacuum scrubbing, the optics corrections and others are described.

1. はじめに

KEKB は 11 年半にも及ぶビーム運転の末に、ルミノシティの世界記録を保持したまま、2010 年 6 月末に運転を休止した。運転休止後、直ちに SuperKEKB に向けての大規模なアップグレードの工事を開始し、5 年半の工事の末に 2016 年 2 月に SuperKEKB の試運転が開始された。本稿では、SuperKEKB のコミッショニングの最初の 4 ヶ月の状況について述べる。

2. SuperKEKB の概要

図 1 に SuperKEKB の概要と主な改造点を示す。SuperKEKB は、電子陽電子用入射器（全長約 600 m）、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 7 GeV 電子）と低エネルギーリング（LER 4 GeV 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。その他の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、表 1 にまとめて示す。

3. SuperKEKB のコミッショニング

3.1 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 2016 年 2 月初めから 6 月末まで行われる予定であり、本稿執筆時（2016 年 5 月）は、その途中に当たる。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

表 1 SuperKEKB の設計パラメータ。()内は intra-beam scattering が無視できる場合の値を表す。

	LER	HER	Units
Beam Energy	4.000	7.007	GeV
Beam Current	3.6	2.6	A
# of bunches	2500		
Circumference	3016		m
Hor. Emittance ϵ_x	3.2 (1.9)	4.6 (4.4)	nm
Ver. Emittance ϵ_y	8.64 (2.8)	11.5 (1.5)	pm
IP Beta function β_x^*/β_y^*	32/0.27	25/0.30	mm
Full crossing angle	83		mrad
Momentum compaction	3.25×10^{-4}	4.44×10^{-4}	
Energy spread σ_δ	$8.1(7.7) \times 10^{-4}$	$6.4(6.3) \times 10^{-4}$	
RF voltage V_c	9.4	15.0	MV
Betatron tune ν_x/ν_y	44.53/44.57	45.53/43.57	
Synchrotron tune ν_s	-0.0247	-0.028	
Energy loss / turn	1.87	2.43	MeV
Damping time $\tau_{x,y}/\tau_s$	43.1/21.6	58.0/29.0	ms
Beam-beam parameter ξ_x/ξ_y	0.0028/0.0881	0.0012/0.0807	
Bunch length σ_z	6.0 (5.0)	5.0 (4.9)	mm
Luminosity	8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: yoshihiro.funakoshi@kek.jp)

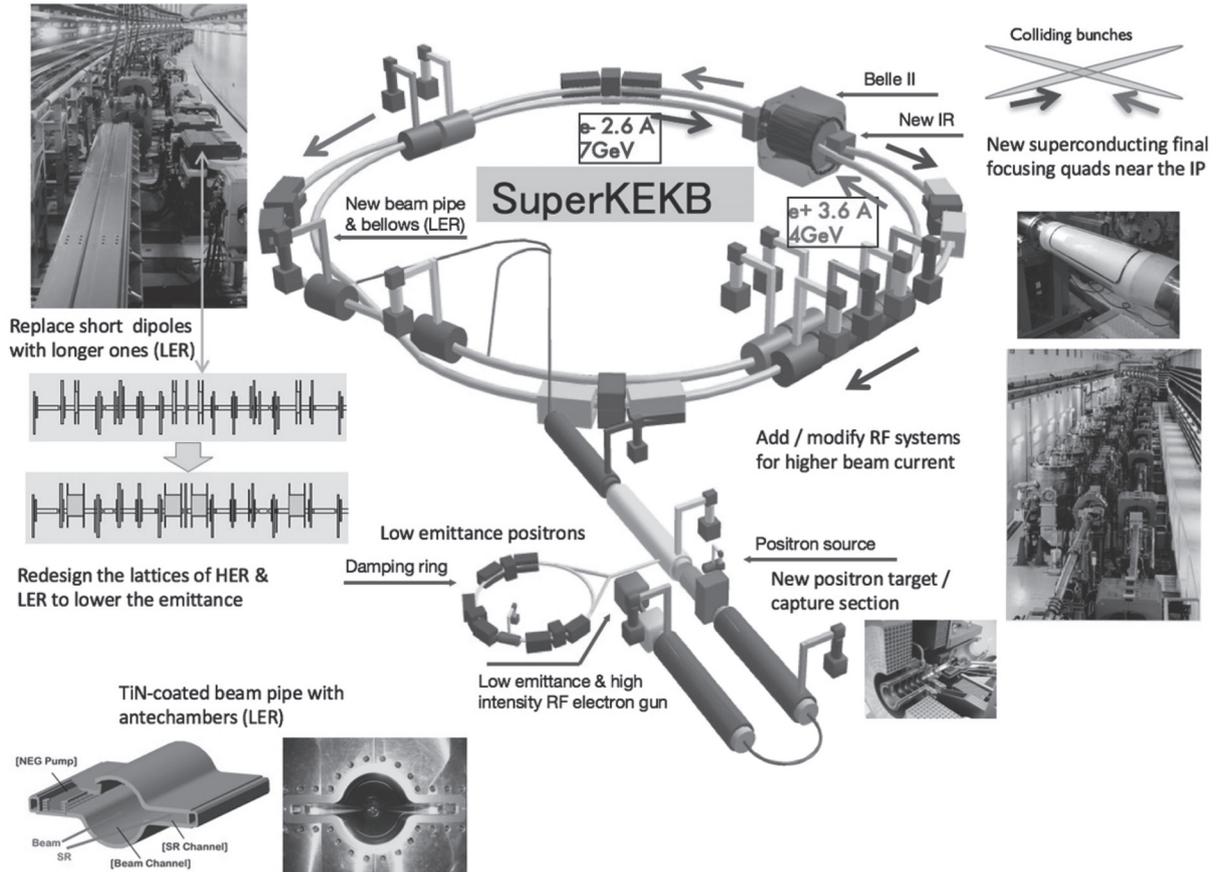


図 1 SuperKEKB の概要と主な改造点

器はビームラインにインストールされない。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、続いて衝突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。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。

3.2 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。(1) 各ハードウェアコンポーネントの立ち上げ、(2) 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、(3) Phase 2 での Belle II 検出器の設置のための準備、(4) Belle II 検出器 (特にそのソレノイド磁場) と QCS がいない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、(5) その他のマシンスタディ、である。これらの内、(3) 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 ~ 1 A のビーム電流で 1 ヶ月程度の vacuum scrubbing が要請されている。これは、積分のビー

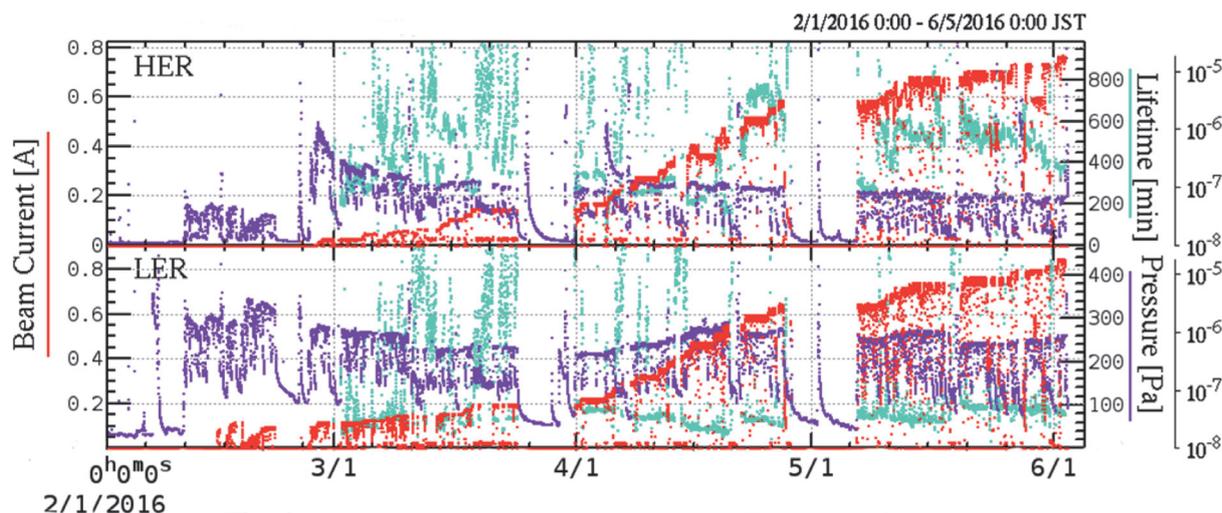


図2 SuperKEKB Phase 1 のビーム運転4ヶ月の歴史

ムドーズにすると360～720 Ah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う。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。なお、Phase 1ではビーム衝突は行わない。

4. Phase 1 コミッショニング

4.1 ビーム運転の経緯

現在Phase 1 コミッショニングの途中で、本稿では5月末までの運転について報告する。図2にPhase 1 コミッショニングの4ヶ月間の経緯を示す。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5月31日現在、LER及びHERの最大電流はそれぞれ820 mA及び740 mAである。KEKBの立ち上げ時の場合、最初の4ヶ月後のビーム電流は、HER、LERそれぞれ540 mA、300 mA程度であっ

たので、SuperKEKBの立ち上げは、KEKBに比べてかなり早いペースで進んでいると言える。この速い立ち上げの理由として、以下の要因が考えられる。

- (1) 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こと
- (2) 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、安定に動作したこと
- (3) 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こと
- (4) KEBK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こと

以上のように、KEKBの経験はSuperKEKBの立ち上げを早めるのに有効に働いている。5月31日現在の運転パラメータを表2に示す。

4.2 Vacuum scrubbing (真空焼き出し)

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。図2の紫のプロットの傾向から

表2 Phase 1 の運転パラメータ (2016/5/31 現在).
Intra-beam scattering の効果は無視している.

	LER	HER	Units
Beam Energy	4.000	7.007	GeV
Beam Current (vacuum scrubbing)	820	740	mA
Beam Current (optics corrections)	~30	~30	mA
# of bunches	1576 (3 bucket spacing)		
Hor. Emittance ϵ_x	1.8	4.6	nm
Momentum compaction	2.45×10^{-4}	4.44×10^{-4}	
Energy spread σ_o	7.7×10^{-4}	6.3×10^{-4}	
RF voltage V_c	7.45	11.99	MV
Betatron tune ν_x/ν_y	44.56/46.60	45.56/43.57	
Synchrotron tune ν_s	-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 σ_z	4.8	5.4	mm

わかるように, vacuum scrubbing は比較的スムーズに進んでいる. 5月末現在, 全周平均の真空度は, LER が 820 mA の時に 8×10^{-6} Pa, HER は 740 mA の時に 8×10^{-7} Pa 程度である. その時のビーム寿命は, LER, HER それぞれ 90 分, 400 分程度である. ビーム寿命に関しては, 真空で決まるもの (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. 5月末の時点で, Phase 1 の最初からの累積ビームドーズは, LER, HER それぞれ 516 Ah, 439 Ah であり, 目標値に向けて順調に進んでいる. 真空システムのコミッショニングの詳細に関しては, 参考文献を参照していただきたい²⁾.

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

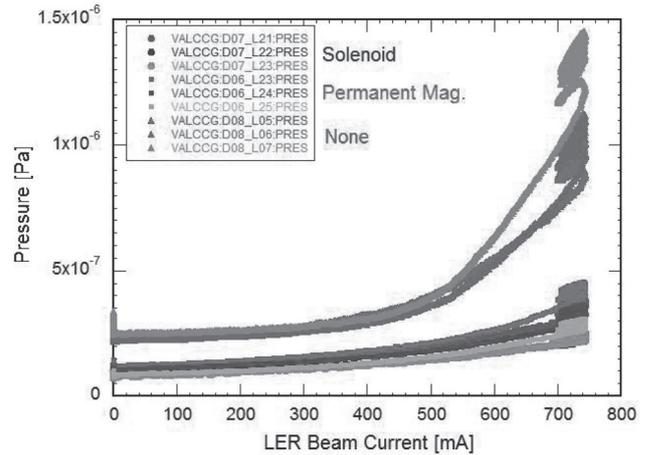


図3 LER における真空度のビーム電流依存性

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, 壁電流に対する電気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.

もう一つの問題は, やはり LER で観測されているもので, 図3に示されているように, 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問題である. 原因として考えられるのは, アルミ製のベローズチェンバー部において, 電子増倍が生じているということである. 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, このベローズチェンバーには施されていない. テスト用に残されている TiN コーティングのな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3に示されているように, ベローズチェンバー部にソレノイド磁場 (~50 G) を加えたり, 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わかった. このタイプのベローズチェンバーは, 長さ 20 cm で LER に平均 3 m 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ェンバーに永久磁

石のソレノイド磁石を設置する予定である。

4.3 オプティックス補正

オプティッ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、そのオプティックス補正のベースとして、BPM (ビーム位置モニタ) 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プを作って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の測定が行われ、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、やはり軌道のバンプを作る方法で、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わかるが、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程度であることがわかった。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±3 mm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ックス測定と補正が行われている。その詳細については、参考文献を参照していただきたい³⁾。本稿では、オプティックス補正の現状の概要のみを示す。まず重要なのは、線形オプティックスの補正で、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。図4にLERのX-Y couplingの測定の結果の例を示す。X-Y couplingは、ステアリング電磁石を使ってビームを水平方向に蹴って、垂直方向への回り込んだ軌道(COD)を測定することより行われる。グラフには6つの水平ステアリング電磁石を用いて、それぞれ独立に蹴った場合の垂直方法の全周の軌道を示している。蹴り角は全て200 μrad であり、水平方向の軌道のズレはピークの値で、2~3 mmであった。グラフの横軸はリングの場所でs=0は衝突点(予定地)である。X-Y couplingの補正にはSuperKEKBでは、6極電磁石に巻いたskew-Qコイルを用いる。図の一番下の行は、このskew-Q補正コイルの強さ(K値)を表している。図4は補正の努力を行った後の測定である。s=-1300 m付近の残留のX-Y couplingがやや大きいのが、これはs=-1400 m付近に設置されているビームアポート用のLambertsonセプタム電磁石の漏れ磁場の影響である。漏れ磁場の主成分はskew-Q成分である。この漏れ磁場の影響を補正するために、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を試みた。なお、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。このSF電磁石のskew-Qコイルを使うこと

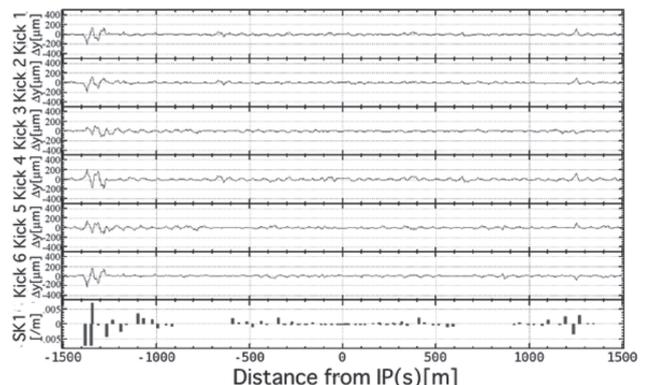


図4 LERにおけるX-Y coupling測定の例

により、漏れ磁場の影響はかなり補正されたが、それでも図4に見られる程度にはXY couplingは残っている。また、LERの垂直 dispersion に関しても、s=-1300 m 付近に補正しきれない残留 dispersion が残っている。これらをさらに補正するために、Lambertson セプタムの付近にさらに、永久磁石を用いた skew-Q 磁石を設置することを計画中である。表3に現時点での線形オプティックスの補正の現状を示す。KEKBのLERの典型的な値も合わせて示されている。Dispersion と beta-beat は各BPMで測定された設計値からのズレのrmsを示している。Beta-beat はすでにKEKBより良い値に到達しているが、これは一つに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。LERのX-Y coupling と垂直 dispersion はHERに比べて悪いが、これはLambertson セプタムの漏れ磁場の影響である。HERにもLambertson セプタムは設置されているが、LERほどは影響が大きい。設置が予定されている永久磁石を用いた skew-Q 磁石を用いると、シミュレーションではLERのX-Y coupling と垂直 dispersion がそれぞれ、18 μm, 4.1 mm 程度に小さくなることが予想されている。Phase 1での低エミッタンス調整の目標値としては、両リングとも垂直エミッタンスが10 pm 以下を目指している。X線モニタを用いた測定値は、LER, HER に対して、現在のところそれぞれ、13 pm, 165 pm という値になっている。LERの方はオプティックス補正の結果と矛盾がないが、HERの値はオプティックス補正の現状から考えると大きすぎる値になっており、測定上の問題があることが疑われる。

4.4 LERにおける垂直方向の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

表3 線形オプティックス補正の現状

	LER	HER	LER KEKB	Units
X-Y coupling*	22.8	7.6		μm
$\Delta\eta_x$ rms	12.3	16.1	10	mm
$\Delta\eta_y$ rms	7.2	4.8	8	mm
$\Delta\beta_x/\beta_x$ rms	2.0	2.5	6	%
$\Delta\beta_y/\beta_y$ rms	2.9	3.7	6	%

* 6つの垂直漏れ軌道のrmsの平均

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ル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ナチャ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ている。図5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。このように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、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示せる。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。また、KEKBでも同様の観測結果が得られている。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ペローズ部分に電子雲が溜まることが考えられる。また、LERにはアルミにTiNコーティングがない部分とある部分の両方で、電子雲の密度が測定できる装置が設置されているが、その測定データの予備的な解析結果から、このブローアップはTiNコーティングのないペローズチャンバー部の電子雲によって引き起こされるという

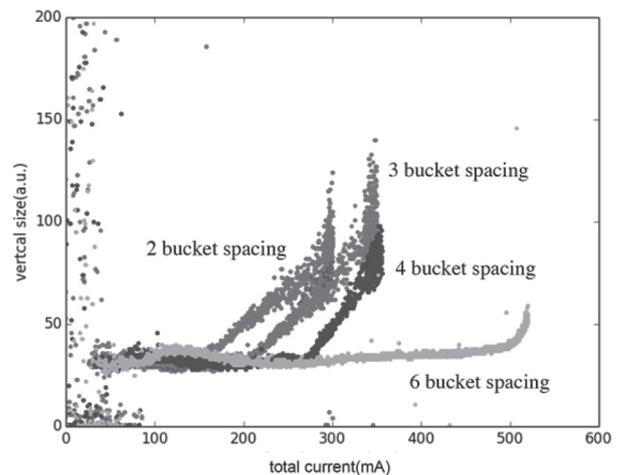


図5 LERにおける垂直ビームサイズのビーム電流依存性

説明と矛盾がないという結果が得られている。6月初めの運転休止期間に、全てのベローズチェーンに設置される永久磁石のソレノイド磁石により、このブローアップが抑制されることが期待されている。

4.5 その他のコミッショニング

ビームバックグラウンドに関しては、Beast 検出器を用いたマシンスタディが行われた。このマシンスタディでは、リングの幾つかの場所の真空度をわざと悪くする vacuum bump のスタディ、垂直方向のビームサイズを変化させて主に Touschek 効果によるバックグラウンドの変化を見るスタディ、ビーム入射条件をわざと悪くしてビーム入射に起因するバックグラウンドの変化を見るスタディ、さらにビームのテールを切るためのコリメータの位置を変化させてバックグラウンドの変化を見るスタディが行われた。これまでのところ、観測されたバックグラウンドは概ねシミュレーションと一致しているようである。

また、ビームサイズを測定する X 線モニタや放射光モニタの較正、bunch-by-bunch フィードバックシステムの調整、などが行われている。Bunch-by-bunch フィードバックシステムに関しては、KEKB では、transverse 方向のみが必須で longitudinal 方向のフィードバックは必要がなかったが、SuperKEKB の LER では 700 mA 程度の比較的低い電流でも結合バンチ不安定性を抑制するために longitudinal 方向のフィードバックが必要であることがわかった。しかし、今のところこの不安定性の原因はわかっていない。

さらに、SuperKEKB で HER に導入された立ち上がり時間の速いアボートキッカーシステムを用いて、アボートギャップを縮めるためのスタディ及びリングのインピーダンスの測定のスタディも行われている。

本稿では、SuperKEKB リングのコミッショニングについて述べたが、入射器のコミッショニングも並行して精力的に行われている。リングのコミッショニングが始まってからも毎週 1 日程度の入射器優先のスタディ時間が確保され、スタディが行われている。SuperKEKB での入射器のミッションは、KEKB よりバンチ当たりのチャージ量を増やし、エミッタンスを下げることである。こ

の目的のために、電子では低エミッタンス、高チャージの RF 電子銃が開発中であり、陽電子ではフラックスコンセントレータなどを用いた高チャージ用の新しい陽電子生成系とダンピングリングが導入される。Phase 1 では、RF 電子銃はまだ開発途中であり、代わりに熱電子銃が運転に用いられているが、6月初めに RF 電子銃を用いたビーム入射のテストが予定されている。陽電子については、ダンピングリングはまだ建設中であるが、フラックスコンセントレータについては、初号機がすでに導入され、実用に用いられている。

5. 今後の予定

Phase 1 は 6 月末までの予定である。あと 1 ヶ月の間の課題として、さらに電流を上げて vacuum scrubbing を進め、また大電流に伴う問題点があれば把握しておくこと、LER の Lambertson セプタムの漏れ磁場補正用の永久磁石による skew-Q 磁石を用いて、LER の垂直エミッタンスをさらに下げること、X 線モニタの較正、LER のサイズブローアップに関するスタディ、RF 電子銃を用いたビーム入射のテスト、その他 Phase 2 に向けて必要なスタディを進めることが挙げられる。

既に述べたが、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予定である。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 年の秋から始まり、SuperKEKB は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. A preliminary version is seen in "<https://kds.kek.jp/indico/event/15914/>".
- 2) Y. Suetsugu et al., IPAC 2016, Busan, Korea (TUOCB01).
- 3) Y. Ohnishi et al., IPAC 2016, Busan, Korea (THPOR007).