

# SuperKEKB フェーズ3コミッショニング START OF PHASE 3 COMMISSIONING AT SuperKEKB

大西幸喜\*

Yukiyoshi Ohnishi\*

on behalf of the SuperKEKB Accelerator Group and Belle II Group  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

SuperKEKB is an electron-positron asymmetric-energy and double-ring collider to search a new physics in the B-meson decays. In order to make  $\Upsilon(4S)$  and boost it to distinguish two vertices of B-meson decays from  $\Upsilon(4S)$ , electrons with the energy of 7 GeV are stored in the high energy ring (HER) and 4 GeV positrons in the low energy ring (LER). The luminosity of 40 times of the highest luminosity recorded at KEKB, namely  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  is necessary to accomplish this purpose. We have applied a novel “nano-beam scheme” and have squeezed the beta function at the interaction point (IP) down to 2 mm in the vertical direction and 80 mm in the horizontal direction which is the smallest beta function for colliders in the world. The peak luminosity of  $1.23 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  was achieved at 800 mA in the LER and 822 mA in the HER. We report the commissioning at Phase 3 Spring run 2019 in this article.

## 1. はじめに

2019年3月11日から7月1日までの期間、フェーズ3における最初のコミッショニングが行われた。Belle II 測定器 [1] をロールインした後、ここに至るまでには、2018年3月19日から7月17日まで4カ月間のフェーズ2運転 [2]、その後測定器をアップグレードするための長期シャットダウンを経ている。フェーズ2と異なるのは、Belle II 測定器に最内層のピクセル崩壊点検出器 (PXD) が設置され、ほぼフル装備となったところである。また、測定器に対するビーム由来のバックグラウンドを低減するための可動コリメータも [3]、HER (7 GeV 電子) には水平方向が1台、LER (4 GeV 陽電子) には水平方向3台および垂直方向1台が追加された。さらに、測定器へのビーム・バックグラウンド低減のためだけでなく、ビーム損失による最終収束超伝導電磁石群 (QCS) [4] のクエンチ防止のために可動コリメータの口径も徹底的に管理された。入射システムについては、RF電子銃 [5] がフェーズ2では試験的に短期間使用されたただけであったが、フェーズ3ではHERへ電子ビームを供給するために長期間本格的に使用された。本稿では、フェーズ3における第1期のコミッショニングについて報告を行う。

## 2. 運転概要

HERは3月11日に、LERは陽電子ダンピングリングの出射セプタム電源不具合のため2日遅れて3月13日にビーム運転を開始した。両リングとも、まず衝突点ベータ関数をあまり絞らないデチューンド・オブティクス<sup>1</sup>にて、小ビーム電流を蓄積し、軌道補正およびビーム光学系補正、バンチ電流モニターや

バンチ毎フィードバックシステムの調整、ビーム・アポートシステムの調整を行った。

100 mA 以下の比較的低いビーム電流を安定に積めるようになってからは、入射調整および可動コリメータの調整を行い、真空焼き出しのための準備を行った。3月20日まで、デチューンド・オブティクスで真空焼き出しを行い、最高電流は、LERで350 mA、HERで470 mAに到達した。積分ビーム電流は、LERでは、20 Ah および HERで40 Ahとなった。同日には、衝突点の垂直ベータ関数を  $\beta_y^* = 8 \text{ mm}$  (水平ベータ関数  $\beta_x^* = 200 \text{ mm}$ ) に絞って衝突調整を開始した。

3月25日に、LERのビーム電流230 mA、HERのビーム電流180 mAにて物理ランを開始した。これまでに真空焼き出しが進み、LERでは50 Ah および HERで75 Ahの積分ビーム電流となった。この時はまだ、ビーム電流を積み上げて減衰させながら物理データを取得する Normal Injection Mode (NIM) である。衝突点の進行方向の位置調整も行った。3月29日には、衝突点の垂直ベータ関数を  $\beta_y^* = 4 \text{ mm}$  に絞った。物理ランを行いながら、ウエスト調整、衝突点における X-Y 結合パラメータ ( $r_2^*$ ) の調整を行った。4月1日には、衝突点の垂直ベータ関数を  $\beta_y^* = 3 \text{ mm}$  に絞り、フェーズ2と同じオブティクスに到達した。水平方向の衝突点ベータ関数は、LERでは  $\beta_x^* = 200 \text{ mm}$ 、HERでは、 $\beta_x^* = 100 \text{ mm}$  である。LERのビーム電流を220 mA、HERのビーム電流を170 mAに設定し物理ランを行い、必要に応じて測定器に対するビーム・バックグラウンドの調査を行っている。

4月3日午後9時45分に入射器棟にて火災報知器が発報し実火災が確認されたため、LERとHERのビーム運転を停止した。実際に火災が発生したのは、SuperKEKB、PF、およびPF-ARへの入射器本体ではなく、Nextefと呼ばれる加速管試験施設であったが、火災による煤が入射器の機器に甚大な影響を及ぼしたために、復旧までに約3週間を要することとなっ

\* yukiyoshi.onishi@kek.jp

<sup>1</sup> HERでは、 $\beta_x^* = 400 \text{ mm}$ 、 $\beta_y^* = 81 \text{ mm}$ 、LERでは、 $\beta_x^* = 384 \text{ mm}$ 、 $\beta_y^* = 48.6 \text{ mm}$ 。

た。入射器が復旧した後、4月25日にHERのビーム運転を再開した。翌4月26日にはLERもビーム運転を行い、物理ランを再開した。プラチナ・ウィーク中は、LERのビーム電流370 mA、HERのビーム電流350 mAで順調に物理ランが行われた。

5月9日からは、入射しながら物理ランを行う連続入射モード (Continuous Injection Mode (CIM)、放射光施設ではtop-up入射とも呼ばれる)の試験をLERで行い、5月11日からはHERでも連続入射モードの試験を行い、両リングとも高いビーム電流を保ちつつ物理ランを行うことに成功した。ここで言う連続入射モードでは、陽電子と電子はLERとHERにそれぞれパルス毎、適切に切替えて入射される。5月21日に $\pm 3$  MeVのエネルギー・スキャンを行い、ビームの重心系エネルギーが $\Upsilon(4S)$ 共鳴に合っていることを確認した。5月27日、5月28日および6月6日に、衝突点近くにあるビーム最終収束超伝導電磁石 (QCS)の一つであるQC2LEの電源トラブルによるQCSクエンチが発生した。これはIPMモジュールの不具合によるもので、基板のハンダ付け不良が疑われて対処を施したが、根治に至っていない。

5月30日から6月3日までの期間に、重心系エネルギーで60 MeVのエネルギーを下げて共鳴からはずれたところでの物理ランを行った。共鳴エネルギーに戻ってからは、ビーム電流を徐々に増やして、6月9日までにLERは660 mA、HERは620 mAの最高ビーム電流で物理ランを行った。この期間の最高ルミノシティは、 $5.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。

6月9日の午後10時11分に、ビームロスに起因するQCSクエンチが発生し、補償ソレノイドの一つであるESRまでもがクエンチを引き起こした。その際に、圧縮機が停止し様々なトラブルが重なったために復旧までに約3日間を要した。このQCSクエンチは、「ダスト」が原因であると考えられているが、確実な証拠があるわけではない。同時に、ビーム損

失による被曝でPXD検出器の一部がダメージを負うこととなった。こうした事象を鑑みて、より高速なビームアポート・システムの必要性が再認識されるようになった。

6月下旬までに、物理ランによってBelle II測定器は積分ルミノシティで約 $6 \text{ fb}^{-1}$ のデータを収集した。6月20日に、LER垂直ビーム軌道の衝突点における角度を変えてビーム・バックグラウンドとルミノシティの変化を調べた。垂直角度を1 mrad付けるとビーム・バックグラウンドは10~15%減少し、ルミノシティが約20%増加した。2 mradの角度では、ルミノシティは激減し、ビーム・バックグラウンドが増加した。0.5 mradと1 mradではルミノシティに遜色がないようなので、最終的には0.5 mradに設定した。結局、垂直軌道の角度はルミノシティについて感度があることがシミュレーションによって示され、0.1 mradのステップでスキャンする必要があることが分かった。

マシン・スタディは、6月の最終週に集中して行った。6月21日には、衝突点のベータ関数を、 $\beta_y^* = 2 \text{ mm}$ および $\beta_x^* = 80 \text{ mm}$ まで絞って、ルミノシティ性能について調べた。これは、衝突点ベータ関数としては世界最小である。ベータ関数を絞ってからは、HERの電子ビームからの反射光がPXD検出器に当たる現象が起きた。HERの水平軌道の衝突点における角度の依存性とベータトロン・チューンのスキャンを行ったところ、チューンによってビーム・バックグラウンドおよびPXD検出器に当たる放射光が大きく変化することが分かった。これは、 $2\nu_x + 3\nu_s = \text{整数}$ という共鳴線が強く、増大したビームハローによる放射光が原因と推定され、この共鳴線から離れるとPXD検出器に当たる放射光は激減した。

マシン・スタディ期間中は、真空システムの耐久性を確認する高ビーム電流スタディ (なるべく高い

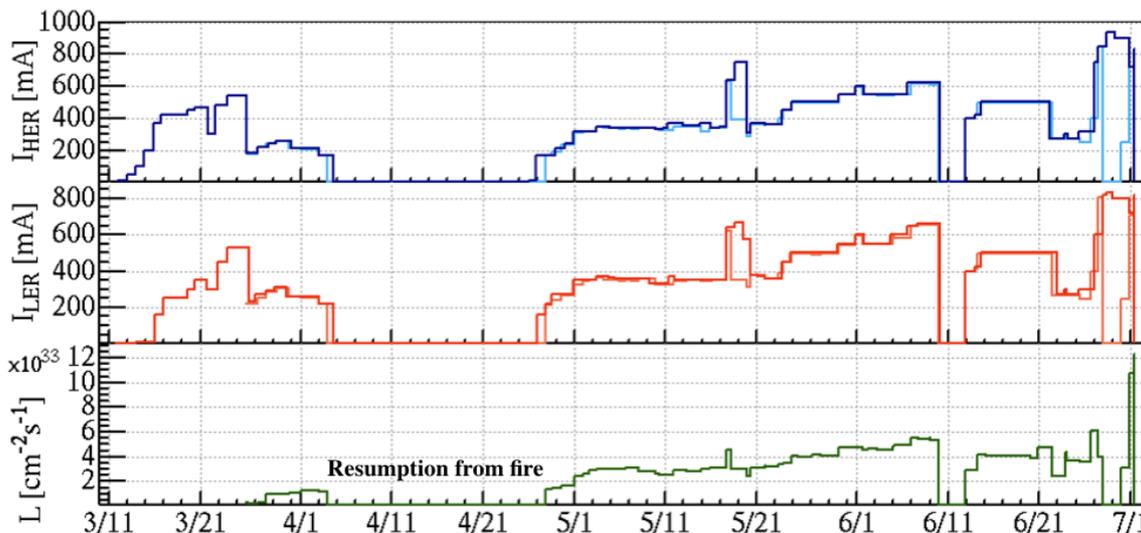
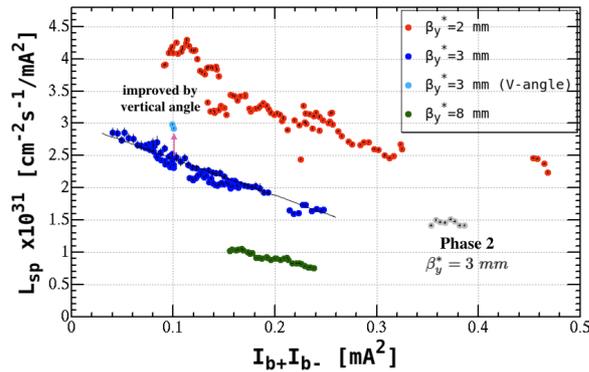
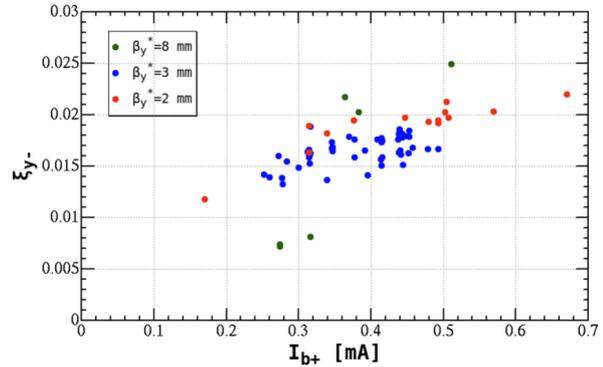


Figure 1: Operation history in Phase 3 Spring run 2019. Light colors show the beam currents correspond to the peak luminosity in a day.



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



(b) Beam-beam parameters for the electron beam (HER) as a function of positron bunch current.

Figure 2: Specific luminosity and beam-beam parameters.

ビーム電流で運転)、バンチ長測定、衝突軌道フィードバック・システム、高周波加速空洞の0モードダンパー、X線ビームサイズ・モニター等の調整、ビーム光学系の測定(運動量のずれた光学系を含む)、電子雲効果の測定を行った。高ビーム電流スタディでは、LERで830 mA、HERで940 mAの最高ビーム電流に到達した。6月30日からは、 $\beta_y^* = 2$  mmに設定して再び SuperKEKB 加速器における最高ルミノシティの記録を目指しルミノシティ調整を行った。ただし、この期間は Belle II 測定器でのデータ収集は行っていない。同日午後4時19分に、 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を越えるルミノシティを達成することができた。この時、LERおよびHERのビーム電流は約700 mAであった。 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成するまでに運転日数で言えば、Belle II 測定器がロールインしてから219日を要している。これはKEKB 加速器が $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に到達するまでの約5分の1の日数にあたる。運転停止直前には、LERで800 mA、HERで820 mAのビーム電流において、 $1.23 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティを記録した。ビーム電流とルミノシティの推移を、Fig. 1に示す。

### 3. フェーズ3第1期の到達点

#### 3.1 ビーム電流

それぞれの状況下でのビーム電流の最高値を Table 1に示す。今期の最高ビーム電流を達成したビーム光学系は、Table 2に示されている physics run (1)の設定である。測定器に対するビーム・バックグラウンドの寄与は、LERの蓄積ビーム電流によるものが支配的であった。特に、残留ガスとの散乱によるものは真空圧力が下がれば減少していくものと予想される。

#### 3.2 衝突点におけるベータ関数

Table 2に衝突点ベータ関数の実績値を示す。最初の立ち上げと真空焼き出しには、デチューンド・オプティクスを用いた。物理ランは、基本的に physics run (2)の設定である。フェーズ3の最高ルミノシティを

Table 1: Beam Currents

condition	LER	HER	Unit
single beam (non-collision)	830	940	mA
physics run (1)	660	620	mA
collision w/o Belle II	820	830	mA
final design	3600	2600	mA

記録したのは、 $\beta_y^* = 2$  mmの設定である。バンチ長は6 mmを想定しているので、 $\beta_y^* = 2$  mmおよび3 mmというのはバンチ長より短くナノビーム領域であると呼べる。衝突点ベータ関数を絞るときは、基本的に筑波直線部にあるマッチング部の四極磁石を用いる。それと同時に、色収差補正のための六極磁石(54ファミリー)も調整する必要がある。可動コリメータの口径も衝突点ベータ関数に合わせて、基本的にQCSの口径と比べて狭くなるように設定している。これに加えて、入射効率とビーム寿命、ならびに測定器に対するビーム・バックグラウンドを見ながら日々調整される。

Table 2: Beta Functions at the IP

condition	LER		HER		Unit
	$\beta_x^*$	$\beta_y^*$	$\beta_x^*$	$\beta_y^*$	
detuned optics	384	48.6	400	81	mm
physics run (1)	200	8	200	8	mm
physics run (2)	200	3	100	3	mm
physics run (3)	100	3	100	3	mm
collision w/o Belle II	80	2	80	2	mm
final design	32	0.27	25	0.3	mm

#### 3.3 ルミノシティとビームビーム・パラメータ

ルミノシティ性能は、スペシフィック・ルミノシティとビームビーム・パラメータによって表現され

る。スペシフィック・ルミノシティは、

$$L_{sp} = \frac{L}{I_b + I_{b-} n_b} = \frac{1}{2\pi e^2 f_0 \phi_x \Sigma_z \Sigma_y^*} \quad (1)$$

ただし、 $L$  はルミノシティ、 $n_b$  はバンチ数、 $\Sigma_z$  は両方のビームのバンチ長の二乗和平方根、 $\Sigma_y^*$  は両方のビームの衝突点垂直ビームサイズの二乗和平方根である。 $f_0$  は周回周波数 99.4 kHz、 $\phi_x$  は交差角の半分 41.5 mrad を表す。一方、ビームビーム・パラメータは、

$$\xi_{y\pm} = \frac{r_e N_{\mp}}{2\pi\gamma_{\pm}\phi_x\sigma_{z\mp}} \sqrt{\frac{\beta_y^*}{\varepsilon_{y\mp}}} \quad (2)$$

と表される。Figure 2 に、スペシフィック・ルミノシティとビームビーム・パラメータを示す。Figure 2(a) には、フェーズ 2 との比較、ならびに垂直軌道の衝突点における角度を調整した場合にルミノシティが約 20% 向上した点も示されている。Figure 2(b) に示されるビームビーム・パラメータは、LER と HER のビームサイズが等しいと仮定して小さい値のビーム (HER) について示している。

衝突点ベータ関数を絞るにつれて、ほぼ衝突点垂直ベータ関数に反比例して、スペシフィック・ルミノシティが向上している。しかしながら、いずれの  $\beta_y^*$  の場合もバンチ電流積が増加するにつれてスペシフィック・ルミノシティは減少する傾向にある。これは、ビームビーム・ブローアップと呼ばれる現象で、比較的小さなバンチ電流でも起こっていることがわかる。非衝突では、X-Y 結合、ベータ関数、分散といったビーム光学補正により、かなり小さな垂直エミッタンスが達成されている。しかし、バンチ電流が 0.4 mA で衝突させると、LER では 6.1 pm の垂直エミッタンスが 88 pm まで増大し、HER では、20 pm が 61 pm まで増大する。また、ある程度バンチ電流積が増加したところで、減少傾向が緩やかになっている。なお、フェーズ 3 のビーム電流領域では電子雲効果は観測されていない [6]。ビームビーム・パ

ラメータについては、バンチ電流が 0.7 mA の時に  $\xi_y = 0.022$  が  $\beta_y^* = 2$  mm における最高値である。衝突点ベータ関数を絞ると、Eq. (2) に示されるように、ビームビーム・パラメータは一般的に小さくなる。しかし絶対値は 0.03 に満たないながらも、フェーズ 3 運転では、ビームビーム・パラメータの大きさを維持することができていることが Fig. 2(b) からわかる。Table 3 に、典型的なマシン・パラメータを示す。

Table 3: Machine Parameters in Phase 3 Spring Run 2019

	LER / HER	LER / HER	Unit
$\beta_x^*$	200 / 100	80	mm
$\beta_y^*$	3	2	mm
$I$	495 / 496	800 / 822	mA
$n_b$	1576	1576	
$I_b$	0.314 / 0.317	0.507 / 0.521	mA
$\xi_y$	0.034 / 0.019	0.036 / 0.020	
$L_{sp}$	$3.1 \times 10^{31}$	$3.0 \times 10^{31}$	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1} / \text{mA}^2$
$L$	$4.8 \times 10^{33}$	$1.23 \times 10^{34}$	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

#### 4. 運転統計

SuperKEKB 加速器の運転には、職員が 2 名 (シフトリーダーとコミッショニング・シフト)、1 日 3 交替で 24 時間担当している。さらに、運転員 2~3 名が、常時サポートに入って運転およびコミッショニングを支援するという体制である。また、Belle II 測定器との連絡と物理ラン調整を行う BCG シフトが 1 名、加速器コントロール室に滞在する。

Figure 3 に、運転統計を示す。Machine Tuning は、NEG の活性化、真空焼き出し、磁石の初期化、各種ハードウェアの調整を含み、Beam Tuning は、入射調整、ビーム光学系補正、衝突調整、ビーム・バックグラウンドのための可動コリメータ調整などを含む。3 月から 4 月の運転上のトラブルは、主に入射器棟の火災による運転停止で約 35% を占めている。5

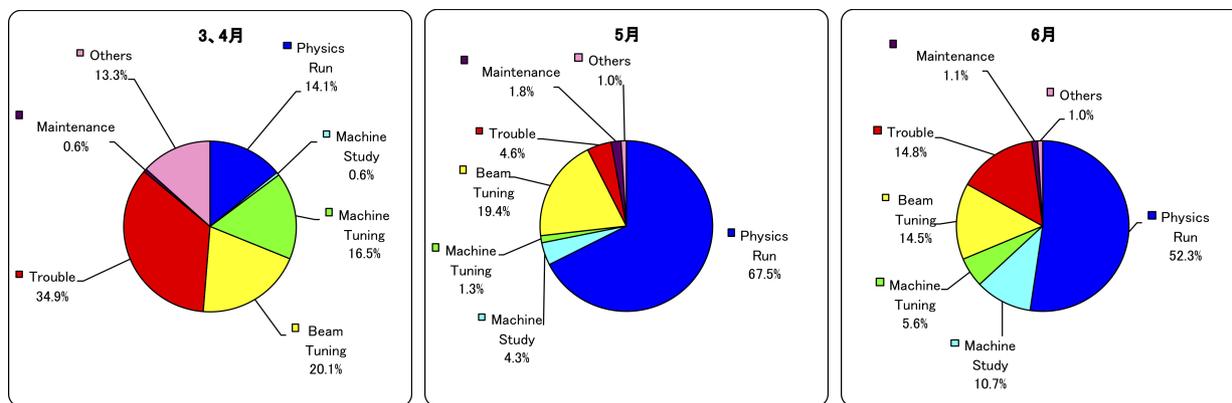


Figure 3: Operation statistics in Phase 3 Spring run 2019.

月は、約 70% を物理ランに運転が費されており、トラブルも 5% 以下と少ない。6 月に入ると、物理ランは約 50% となり、そのかわりにマシンスタディに約 11% を費している。トラブルは、約 15% と若干増えて、これは主に QCS/ESR のクエンチによるものである。フェーズ 3 の最初の運転は、フェーズ 2 の復元と CIM による安定な物理ランの確立を目標としており、全体的に見ると、マシンスタディの占める割合は約 12% と低く、物理ラン主体の運転であったことがわかる。

## 5. まとめと今後の予定

衝突点ベータ関数を最終的には、 $\beta_x^* = 80$  mm、 $\beta_y^* = 2$  mm まで絞って衝突調整を行った。最高ルミノシティは、LER のビーム電流が 800 mA、HER のビーム電流 822 mA の時に、 $1.23 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であった。衝突点ベータ関数を絞っても、ビームビーム・パラメータの大きさを維持できているということは、衝突点ベータ関数が小さくなるにつれてビームビーム・ブローアップの度合いが低減していることを意味する (Eq. (2))。このため、スペシフィック・ルミノシティが、ほぼ  $1/\beta_y^*$  に従って向上している。つまり、衝突点ベータ関数を絞ればルミノシティが高くなることを意味する。衝突点ベータ関数を絞ることによって、どれだけスペシフィック・ルミノシティが向上するのが今後の注目点となる。

夏期長期シャットダウンの後は、2019 年秋期ラン

として 10 月 15 日から 12 月 12 日までビーム運転を行う予定である。秋期ランでは、衝突点ベータ関数を絞ることに重点を置くことを検討中である。今後、衝突点ベータ関数を絞ることによって、様々な情報が得られると期待される。

## 参考文献

- [1] Belle II Technical Design Report;  
<http://arXiv.org/abs/1011.0352>
- [2] Y. Ohnishi, "Highlights from SuperKEKB Phase 2 Commissioning";  
<http://arXiv.org/abs/1904.10236>
- [3] S. Terui *et al.*, FRPH016, "SuperKEKB メインリングのコリメータの現状", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2019.
- [4] N. Ohuchi *et al.*, Proceedings of IPAC'18 Vancouver, BC, Canada, May 2018, p. 1215-1219.
- [5] X. Zhou *et al.*, WEPI023, "SuperKEKB の Phase-III コミッショニングに向けた電子銃システムのアップグレード", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2019.
- [6] Y. Suetsugu *et al.*, THPH014, "SuperKEKB 加速器真空システムの現状-Phase 3 2019 春の運転-", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31- Aug. 3, 2019.