

SuperKEKB 入射器コミッショニングの現状 (II)

PRESENT STATUS OF SUPERKEKB INJECTOR LINAC COMMISSIONING (II)

佐藤政則^{#, A, B}, 明本光生^{A, B}, 荒川大^A, 荒木田是夫^{A, B}, 飯田直子^{A, B}, 池田光男^A, 岩瀬広^{B, C}, 榎本收志^A, 榎本嘉範^{A, B}, 大沢哲^{A, B}, 大西幸喜^{A, B}, 小川雄二郎^{A, B}, 柿原和久^A, 風間慎吾^A, 梶裕志^{A, B}, 片桐広明^A, 紙谷琢哉^{A, B}, 菊池光男^{A, B}, 小磯晴代^{A, B}, 佐藤大輔^D, 設楽哲夫^E, 周翔宇^{A, B}, 白川明広^A, 末武聖明^A, 杉本寛^{A, B}, 諏訪田剛^{A, B}, 清宮裕史^A, 田中窓香^A, 多和田正文^{A, B}, 張叡^A, 峠暢一^{A, B}, 中尾克巳^A, 中島啓光^A, 夏井拓也^{A, B}, 肥後寿泰^{A, B}, 福田茂樹^A, 船越義裕^{A, B}, 古川和朗^{A, B}, 本間博幸^A, 松下英樹^A, 松本修二^{A, B}, 松本利広^{A, B}, 三浦孝子^{A, B}, 三川勝彦^A, 道園真一郎^{A, B}, 三増俊弘^{A, B}, 宮原房史^{A, B}, 森隆志^{A, B}, 森田昭夫^{A, B}, 矢野喜治^{A, B}, 横山和枝^{A, B}, 吉田光宏^{A, B}

Masanori Satoh^{#, A, B}, Mitsuo Akemoto^{A, B}, Dai Arakawa^A, Yoshio Arakida^{A, B}, Naoko Iida^{A, B}, Mitsuo Ikeda^A, Hiroshi Iwase^{B, C}, Atsushi Enomoto^A, Yoshinori Enomoto^{A, B}, Satoshi Ohsawa^A, Yukiyoshi Ohnishi^{A, B}, Yujiro Ogawa^{A, B}, Kazuhisa Kakihara^A, Shingo Kazama^A, Hiroshi Kaji^{A, B}, Hiroaki Katagiri^A, Takuya Kamitani^{A, B}, Mitsuo Kikuchi^{A, B}, Haruyo Koiso^{A, B}, Daisuke Satoh^D, Tetsuo Shidara^E, Xiangyu Zhou^{A, B}, Akihiro Shirakawa^A, Masaaki Suetake^A, Hiroshi Sugimoto^{A, B}, Tsuyoshi Suwada^{A, B}, Yuji Seimiya^A, Madoka Tanaka^A, Masafumi Tawada^{A, B}, Rui Zhang^A, Nobu Toge^{A, B}, Katsumi Nakao^A, Hiromitsu Nakajima^A, Takuya Natsui^{A, B}, Toshiyasu Higo^{A, B}, Shigeki Fukuda^A, Yoshihiro Funakoshi^{A, B}, Kazuro Furukawa^{A, B}, Hiroyuki Honma^A, Hideki Matsushita^A, Shuji Matsumoto^{A, B}, Toshihiro Matsumoto^{A, B}, Takako Miura^{A, B}, Katsuhiko Mikawa^A, Shinichiro Michizono^{A, B}, Fusashi Miyahara^{A, B}, Takashi Mori^{A, B}, Akio Morita^{A, B}, Yoshiharu Yano^{A, B}, Kazue Yokoyama^{A, B}, and Mitsuhiro Yoshida^A

^A) Accelerator Laboratory, KEK

^B) Department of Accelerator Science, SOKENDAI,

^C) Radiation Science Center, KEK

^D) TITECH

^E) Research Administration Department, KEK

Abstract

The SuperKEKB main ring is currently being constructed for aiming at the peak luminosity of $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. The electron/positron injector linac upgrade is also going on for increasing the intensity of bunch charge with keeping the small emittance. The key upgrade issues are the construction of positron damping ring, a new positron capture system, and a low emittance photo-cathode rf electron source. The injector linac beam commissioning started in the October of 2013. In this paper, we report the present status and future plan of SuperKEKB injector commissioning.

1. はじめに

KEKB リングは、設計値を大幅に上回るピークルミノシティーである、 $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。また、到達積分ルミノシティーは 1 ab^{-1} を超え、2010 年 6 月、成功裏に終了した^[1]。KEKB 運転時、入射器は、異なるエネルギーおよびバンチ電荷量の電子、陽電子ビームを 4 つのリング (KEKB 電子・陽電子、PF、PF-AR) に供給し続けてきた。2008 年 10 月、VME を基盤としたイベントタイミングシステムを導入し、PF-AR を除く 3 リングへの同時トップアップ入射を実現した。それにより、当初 50% 程度であった蓄積電流値安定度は、KEKB および PF リングにおいて、それぞれ、0.05% および 0.01% にまで向上した。両リングにおける物理実験の効率を、飛躍的に向上させることに成功した。KEKB 運転終了後、約 40 倍のピークルミノシティーを目指した

SuperKEKB 計画に向けた建設を進めてきた。

Figure 1 に、SuperKEKB 入射器のレイアウトを示す。また、Table 1 に主要パラメータを列挙した。SuperKEKB 計画^[2]に向けた入射器アップグレードの要は、低エミッタンスかつ大強度バンチビームの実現である。陽電子ビーム強度増強のためには、フラックスコンセントレータおよび 10 本の大口径 S バンド加速管を開発し、設置した^[3, 4, 5]。低エミッタンス電子源として、光陰極 RF 電子銃を開発し、2013 年に設置した^[6]。本電子銃は、擬似進行波型と呼ばれる新奇な設計に基づく斬新なものであり、光

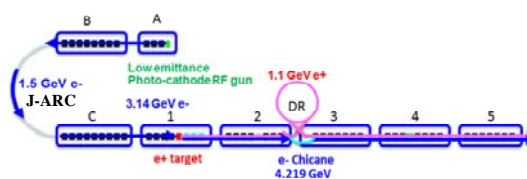


Figure 1: Layout of SuperKEKB injector linac.

[#] masanori.satoh@kek.jp

陰極として Ir_3Ce を採用している。また、要求される電子ビームのエネルギー広がりや 0.1% 以下であり、時間方向レーザー波形成形によるエネルギー広がり補正を計画している^[7, 8, 9, 10]。

Table 1: Main Parameters of SuperKEKB Injector Linac

	KEKB		SuperKEKB	
	e-	e+	e-	e+
Beam energy (GeV)	8	3.5	7	4
Bunch charge (nC)	1	1 (10 [*])	5	4 (10 [*])
Normalized vertical emittance (mm·mrad)	310	1400	20	20
Normalized horizontal emittance (mm·mrad)	310	1400	50	100
Energy spread (%)	0.05	0.125	0.1	0.3
Bunch length (mm)	1.3	2.6	1.3	0.7
# of bunch with interval of 96 ns			2	
Maximum beam repetition (Hz)			50	

*: Primary electron beam for positron production.

2. ビームコミッションング

2.1 概要

2013 年 10 月、SuperKEKB 主リング入射に向けて、新規開発の RF 電子銃を用いたビームコミッションングを開始した。コミッションング開始当初、RF

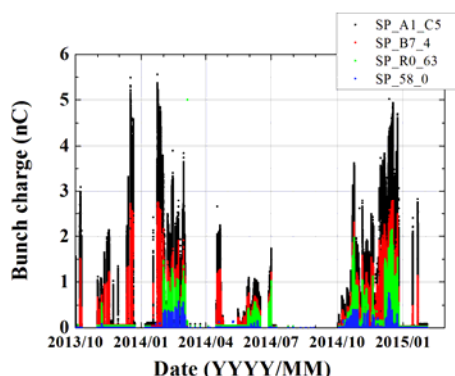


Figure 2: Bunch charge history at the several locations of SuperKEKB injector linac. SP_A1_C5, SP_B7_4, SP_R0_63, and SP_58_0 are the bunch charges measured at the rf electron gun exit, end of Sector B, exit of J-ARC, and the end of linac, respectively.

電子銃用のレーザーや、新規設置機器の調整運転を集中的におこなった。

Figure 2 に、コミッションング期間中におけるバンチ電荷量の履歴を示す。バンチ電荷量は、四電極ストリップライン型ビーム位置モニタ (BPM) を用いて測定した。SP_A1_C5 は、一番目の BPM により得られたバンチ電荷量を示している。SP_B7_4 および SP_R0_63 は、それぞれ、B セクタ終端および J-ARC 出口におけるバンチ電荷量を示している。SP_58_0 は、入射器終端でのバンチ電荷量を表している。これまでのビームコミッションングでは、電子銃直後および入射器終端位置において、それぞれ、5.6 nC および 0.75 nC のピークバンチ電荷量を達成した。KEKB 運転時のバンチ電荷量安定性は約 2.5% であったが、本 RF 電子銃においては、典型的な場合、10% 程度の変動が見られた。これは、主にレーザーの安定性に起因するものと考えられるが、今後の改善が必要である。SuperKEKB Phase III 運転において要求されるバンチ電荷量は約 5 nC であるが、主に真空焼き出しや機器チェックのためにおこなわれる Phase I 運転においては、1 nC 程度のバンチ電荷量で満足できる。そのため、今秋開始予定の次期コミッションングでは、1 nC 程度の安定なビーム開発に集中する予定である。

2.2 バンチ圧縮

RF 電子銃を用いた場合のビームバンチ長は、30 ps 程度に調整されている。その後、入射部に新規建設したシケインを用いて、10 ps 程度のバンチ長に圧縮する。Figure 3 (a) および (b) に、入射部シケインにおけるバンチ圧縮前後でのバンチ長測定結果を示す。バンチ長の測定には、ストリークカメラを用いた。圧縮前のバンチ長である 30 ps は、別途測定した RF 電子銃用レーザーのパルス長とほぼ一致する。

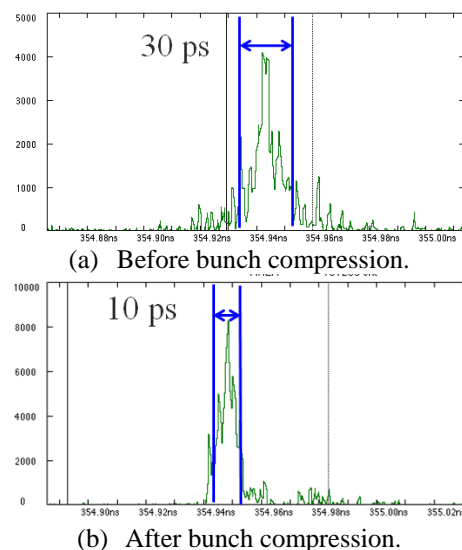


Figure 3: Bunch length measured by a streak camera before (a) and after (b) bunch compression at the chicane of injector section.

Figure 3 (b)のパンチ長圧縮度は、シケインの偏向電磁石磁場およびエネルギー広がりをも最適化して得られたものである。これらの調整より、入射部シケインでのパンチ圧縮は、計算機シミュレーション通りの満足する結果が得られた。さらに、J-ARC 部でのパンチ圧縮も計画しており、これにより C セクタから 5 セクタ間で生じるエミッタンス増大を抑制する計画である。今後は、ビームによる実証実験をおこなう予定である。

2.3 低エミッタンス保存

SuperKEKB において、最終的に要求されるパンチ電荷量は電子および陽電子ビームについて、それぞれ、5 nC および 4 nC である。とりわけ電子ビームは、ダンピングリングを用いない運転をおこなうため、入射ビームの低エミッタンス保存が最重要課題である。これに向けた計算機シミュレーションは、SAD および Elegant コードを用いて精力的におこなっている^[11, 12]。Table 1 にあるとおり、垂直方向の要求エミッタンスは 20 mm-mrad である。低エミッタンスビームの輸送には、四極電磁石および加速管のアライメントが重要である。機器アライメントの目標精度は、加速管架台長に対応する約 10 m の短距離区間においては 0.1 mm 以下であり、入射器全体では 0.3 mm 以下である。これらの値は、これまでの機器アライメントにおいて、概ね達成されている^[13]。エミッタンス増大の計算機シミュレーション結果によると、機器アライメントの目標精度を達成した場合、入射器末端における目標エミッタンスの実現は可能である。しかしながら、高精度なビーム軌道制御が必要であるため、BPM データ収集系の改善が必要となる。その目的のため、VME モジュールを用いた信号処理回路を新規開発し、今秋より順次設置予定である^[14]。本システムを用いたビーム試験をおこない、ビーム位置の読み出し精度を評価した。その結果、オシロスコープを基盤とした現システムの 25 μm から 6 μm にまで改善されることが確認できた。

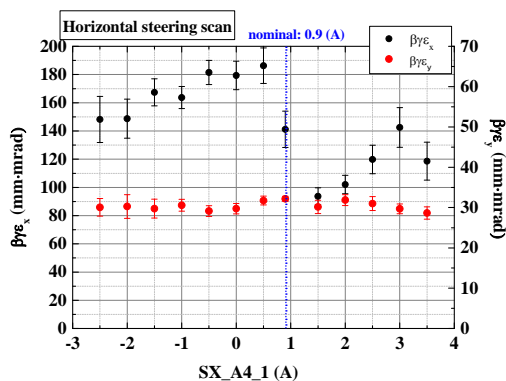


Figure 4: Results of emittance preservation study at the end of Sector B. The black and red filled circles mean the horizontal and vertical emittances, respectively.

Figure 4 は、異なるビーム軌道に対するエミッタンスの変化を測定したものである。エミッタンスは、B セクタに設置されているワイヤスキャナで測定した。本図で、黒点および赤点は、それぞれ、水平方向および垂直方向のエミッタンスを示している。横軸は、変化させた水平方向ステアリング電磁石への励磁電流値を示している。垂直方向ステアリングを変化させた測定もおこない、同様な結果を得ている。これらの結果より、ビーム軌道を変化させることによるエミッタンス増大の抑制の実現可能性が、実験的に示されたことになる。

Figures 5 および 6 は、それぞれ、電子銃直後および B セクタ末端でのエミッタンス測定結果を示している。電子銃直後でのエミッタンスは、スクリーンモニタによる Q スキャン法を用いて測定した。一方、B セクタ末端でのエミッタンスは、ワイヤスキャナを用いて測定した。B セクタでのエミッタンスは、概ね電子銃直後のそれと比較して大きな値を示している。ワイヤスキャナによる測定は、ビームパルスごとの位置変動を含んだものになるため、シングルショットにおける固有エミッタンスよりも大きな値を示している。今後は、入射器末端でのエミッタンス保存に先立ち、B セクタ末端でのエミッタンス保存技術の確立を目指す。また、Q スキャン法における測定時間の短縮化に関しても改善を図る予定である。

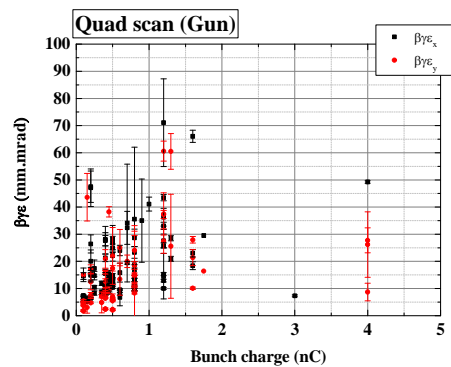


Figure 5: Emittance measurement results at the injector section by using the quadrupole scan method.

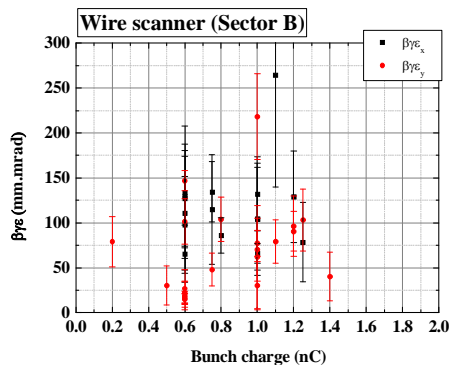


Figure 6: Emittance measurement results at the end of Sector B by using the multiple wire scanners.

る。

2.4 陽電子ビームコミッションング

2014年6月に、フラックスコンセントレータ、大口径Sバンドの加速管を用いた新陽電子生成ラインを用いて、初めての陽電子ビームを観測した。本観測では、0.6 nCの一次電子ビームバンチ電荷量に対し、0.18 nCの陽電子バンチ電荷量が得られた。また、フラックスコンセントレータは運転値の約半分である6.4 kAで運転していた。また、収束用ソレノイドコイルなども、電源容量および冷却水量不足のため最大値では運転していなかった。

陽電子収量のフラックスコンセントレータ磁場依存性を始めとして、陽電子ビームのコミッションングを進めていた。しかしながら、その後、二度のケーブル焼損トラブルに見舞われたため、対策に追われることとなり、十分なコミッションング時間が確保できなかった。陽電子ビームラインの電源容量および冷却水増強工事は既に完了したため、今秋からの次期運転では、フラックスコンセントレータおよび収束用ソレノイドを最大磁場値にて運転し、陽電子ビームコミッションングを進める予定である。

4. 熱電子銃ビームライン

2016年2月に開始予定のSuperKEKB Phase I運転では、1 nCの陽電子ビームが要求されている。そのためには、陽電子生成用に大バンチ電荷量の電子ビームを安定供給することが重要である。しかしながら、RF電子銃からのバンチ電荷量は、最大5 nC程度であった。Phase Iでの陽電子ビーム入射に万全を期すため、KEKB入射に使用していた熱電子銃を再び使用することとした。熱電子銃の再利用は本年初頭に急遽決定し、短期間でのビームライン設計を余儀なくされた。また、電磁石を始めとした機器類

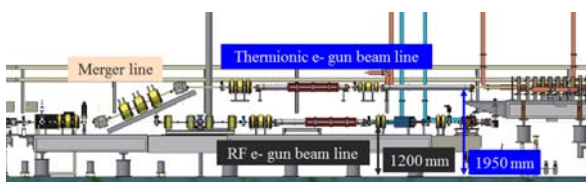


Figure 7: Layout of the new thermionic electron gun beamline. The existing beam line is kept for the rf electron gun. The bunching section of thermionic electron gun is constructed at the beam line height of 1950 mm from the floor though the height of original beam line is 1200 mm from the floor.



Figure 8: Photograph of the new thermionic electron gun beam line.

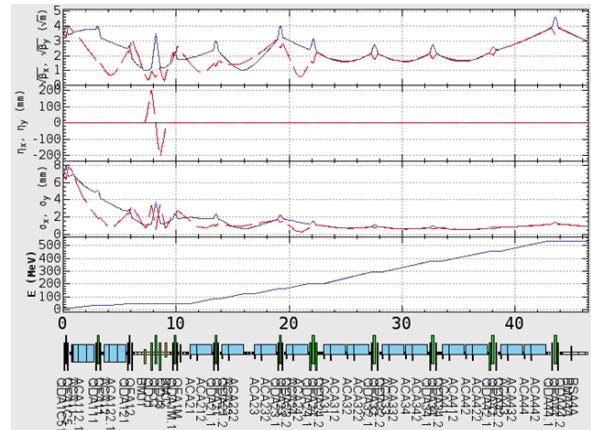


Figure 9: Optics design of Sector A for the thermionic electron gun. Square root of beta function, dispersion function, beam size, and energy profile are shown from top to bottom. Horizontal and vertical values are indicated by the blue and red colored solid lines, respectively.

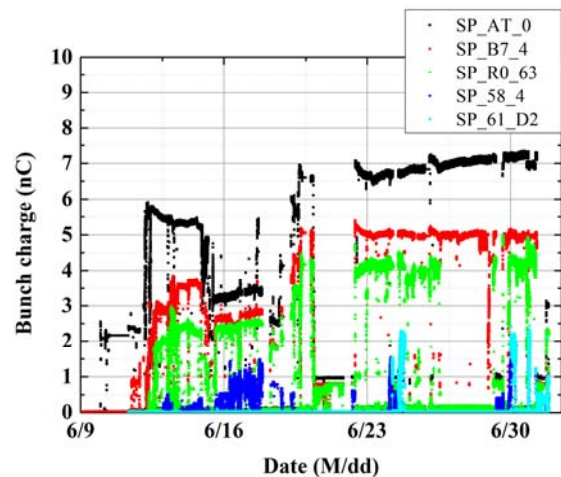


Figure 10: Bunch charge history by using the thermionic electron source. SP_AT_0, SP_B7_4, SP_R0_63, SP_58_4, and SP_61_D2 are the bunch charges measured at the thermionic electron gun exit, end of Sector B, exit of J-ARC, end of linac, and the beam dump at linac end, respectively.

にはなるべく予備品を活用し、工期短縮およびコスト削減に努めた。

Figure 7 に、熱電子銃ビームラインのレイアウトを示す。また、Figure 8 にビームラインの写真を示す。バンチング部および2本の加速管は、既存RF電子銃ビームラインの750 mm上部に構築した。その後、垂直偏向電磁石2台により、RF電子銃ビームラインと合流させる設計となっている。RF電子銃からの低エミッタンスビームを利用するため、そのような設計方針を採用した。ビームライン建設工事は、既設ラインの解体に始まり、本年2月から5月末までの4ヶ月間にわたった。6月上旬にRFコンディショニングを開始し、7月3日までの約1ヶ月間は、熱電子銃を用いたビームコミッションングを集中的

におこなった。

Figure 9 に、熱電子銃ビームラインのオプティクス設計値を示す。本図は、電子銃から A セクタ終端までのベータ関数、分散関数、ビームサイズ、およびエネルギーをプロットしたものである。水平および垂直方向の値は、それぞれ、青線および赤線で示している。合流部では垂直方向に分散が生じるが、既設ビームラインとの合流後には分散が閉じるように設計している。合流部でのビームサイズは 4 mm 以下であり、真空ダクトの内径が $\Phi 40$ mm であることを考慮しても、深刻なビームロスはないものと考えられる。

Figure 10 は、熱電子銃コミッショニング期間中におけるバンチ電荷量の履歴を示している。SP_AT_0、SP_B7_4、SP_R0_63、SP_58_4、および SP_61_D2 は、それぞれ、熱電子銃直後、B セクタ終端、J-ARC 出口、入射器終端、および入射器終端ビームダンプでのバンチ電荷量を示している。プレバンチャ、バンチャ、および 2 台のサブハーモニックバンチャを精密に調整し、バンチング部下流での電荷量は 7 nC を達成した。

合流部での垂直方向ビームエミッタンスは、当初、200 mm-mrad を超える値であったが、その後、垂直方向の分散を閉じるよう、適切な調整をおこなった。その結果、水平および垂直エミッタンスともに、100 mm-mrad 程度の値を達成することができた。約 1 ヶ月間という比較的短い期間の間に、機器の立ち上げおよび基礎的なビーム調整を終えることができた。ビーム運転終盤には、陽電子生成標的部の放射線施設検査を受け、無事に合格した。これにより、標的部でのビーム電流値は、200 nA まで出力可能となった。今後、さらに標的部の放射線シールドを強化し、1250 nA まで段階的なビーム電流値の増強を計画している。

5. まとめと今後の課題

現在、SuperKEKB 主リング運転に向けて、入射器ビームコミッショニングを精力的に進めている。すでに、新規開発の低エミッタンス RF 電子銃から 5 nC のバンチ電荷量を達成した。また、入射部シケインにおいて、30 ps から 10 ps までのバンチ圧縮に成功した。現在、短期間ならびに長期間におけるビーム安定性の実現が重要課題であり、精力的に取り組んでいる。とりわけ、ビーム軌道の精密制御および維持は、入射器終端でのエミッタンス保存のために不可欠である。今秋からの次期コミッショニングでは、新 BPM データ収集系^[14]、新イベントタイミングシステム^[15]、高速 RF モニタ^[16]など、新たなハードウェアの導入も計画している。今後は、2016 年 2 月に開始予定の主リング運転開始に向けて、効率的なビームコミッショニングを進めていきたい。また、入射器施設全般の現状については、施設報告を参照されたい^[17]。

参考文献

- [1] Mitsuo Akemoto, et al., "The KEKB injector linac", Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A002.
- [2] T. Miura, et al., "Progress of SuperKEKB", TUYB1, in Proceedings of IPAC'15, Richmond, VA, USA (2015).
- [3] S. Matsumoto, et al., "LARGE-APERTURE TRAVELLING-WAVE ACCELERATOR STRUCTURE FOR POSITRON CAPTURE OF SuperKEKB INJECTOR LINAC", in Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, May 15–20, pp.3872-3874 (2014).
- [4] T. Kamitani, et al., "SuperKEKB POSITRON SOURCE CONSTRUCTION STATUS", in Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, May 15–20, pp.579-581 (2014).
- [5] T. Kamitani, "Present status of SuperKEKB positron source", in these proceedings.
- [6] T. Natsui, et al., "Quasi-Traveling Wave RF Gun and Beam Commissioning for SuperKEKB", TUPJE003, in Proceedings of IPAC'15, Richmond, VA, USA (2015).
- [7] R. Zhang, et al., "Improvements of the Laser System for RF-Gun at SuperKEKB Injector", TUPWA071, ibidem.
- [8] R. Zhang, et al., "25 Hz, Sub-mJ Ytterbium Laser Source of RF Gun for SuperKEKB Linac", WEPMA044, ibidem.
- [9] T. Natsui, et al., "COMMISSIONING OF RF GUN FOR SUPERKEKB", in these proceedings.
- [10] R. Zhang, et al., "IMPROVEMENTS OF THE LASER SYSTEM FOR RF-GUN AT SUPERKEKB INJECTOR", in these proceedings.
- [11] S. Kazama, et al., "Emittance Preservation in SuperKEKB Injector", MOPWA053, in Proceedings of IPAC'15.
- [12] S. Kazama, et al., "EMITTANCE PRESERVATION IN SUPERKEKB INJECTOR", in these proceedings.
- [13] S. Ushimoto, et al., "STATUS OF ALIGNMENT OF KEK LINAC FOR SuperKEKB (2)", in these proceedings.
- [14] R. Ichimiya, et al., "DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION BEAM POSITION MONITOR READOUT SYSTEM WITH NARROW BANDPASS FILTERS FOR THE KEKB INJECTOR LINAC TOWARDS THE SUPERKEKB", in Proceedings of IBIC2013, Shanghai, China, September 16-19, pp.698-701 (2013).
- [15] H. Kaji, et al., "INSTALLATION AND COMMISSIONING OF NEW EVENT TIMING SYSTEM FOR SUPERKEKB", in these proceedings.
- [16] H. Katagiri, et al., "PRESENT STATUS OF RF MONITOR SYSTEM FOR SUPERKEKB INJECTOR LINAC", in these proceedings.

[17] X. Zhou, et al., "PRESENT STATUS OF THE KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC", in these proceedings.