

## SuperKEKB 入射器コミッショニングの現状

### PRESENT STATUS OF SUPERKEKB INJECTOR LINAC COMMISSIONING

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

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

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Organization (KEK/SOKENDAI), Accelerator Laboratory

<sup>B)</sup> Tokyo Institute of Technology (TITECH)

#### Abstract

The SuperKEKB project is aiming at the peak luminosity of 40 times higher than that by the KEKB project. Toward SuperKEKB based on the nano-beam scheme, the electron/positron injector linac is now under upgrade for achieving a high intensity and a small emittance beam. For the low emittance and high intensity electron beam generation, we have developed the new rf gun based on the noble scheme of quasi-travelling wave side-coupled rf cavity and the new laser system. To increase the positron capture efficiency, the flux concentrator and large aperture S-band accelerating structure have been manufactured and installed into the beam line. For the stable and fine beam control, many new devices are now under development like the high precision BPM readout, fast rf monitor, rf deflector, and so on. The linac beam commissioning started in the last October. The obtained maximum electron and positron bunched charges were 5.6 nC and 0.18 nC, respectively, before summer shutdown. We report the injector linac commissioning status and future plan together with the upgrade outline.

#### 1. はじめに

現在 KEK では、KEKB 加速器<sup>[1-4]</sup>で達成した約 40 倍のルミノシティを目指し、SuperKEKB 加速器<sup>[5, 6]</sup>の建設を進めている。このため、KEKB 加速器と比較して、蓄積電流値を約 2 倍にし、なおかつ衝突点でのビームサイズを約 20 分の 1 に絞る必要がある。SuperKEKB の電子陽電子入射器（以下、入射器）には、大バンチ電荷量かつ低エミッタンスビームの安定供給が求められている。電子（陽電子）ビームに要求されるバンチ電荷量は 5 nC (4 nC) であり、KEKB 入射器と比較して約 5 倍のバンチ電荷量が求められている。一方、ナノビーム方式を採用した主リングの低エミッタンス化にともない、入射器ビームの垂直方向規格化射影 rms エミッタンスは 20

mm-mrad 以下であることが要求される。とりわけ電子ビームについては、ダンピングリングを用いずに低エミッタンスビーム入射を実現する必要があるため、新方式の光陰極 RF 電子銃<sup>[7-10]</sup>を開発し、現在、精力的に種々のビーム試験をおこなっている。また、陽電子ビームの収量増大を目指して、フラックスコンセントレータ<sup>[11, 12]</sup>および大口径 S バンド加速管<sup>[13]</sup>の開発・試験を進めてきた。これらと並行して、低エミッタンス陽電子ビーム実現のため、陽電子用ダンピングリングの建設も進められている。その他、安定なビーム入射を実現するために、ビーム位置モニタ用高精度データ収集系<sup>[14]</sup>、高速 RF 制御<sup>[15]</sup>およびモニタシステム<sup>[16]</sup>、バケットセレクションを含む新タイミングシステム<sup>[17]</sup>、パルス四極電磁石、安全系システムの更新など、多数の技術開発をおこなっている。これらの機器開発・試験と並行して、昨年秋より、SuperKEKB へのビーム入射に備えた入射器

<sup>#</sup> masanori.satoh@kek.jp

ビームコミッションを開始した。本稿では、入射器アップグレードの概要とあわせて、ビームコミッションに関する現状および今後の展望について報告する。

## 2. SuperKEKB 入射器

### 2.1 概要

入射器は、100 m および 500 m の長直線部から構成される。これら 2 つの直線部は 180 度偏向ビームライン(J-ARC 部)により接続され、J 型の形状を示している。Figure 1 は、入射器のレイアウトを表している。また、Table 1 に KEKB および SuperKEKB 入射器の主要パラメータを示した。SuperKEKB へ向けた入射器アップグレードの主要開発項目として、RF 電子銃、陽電子生成部、および陽電子用ダンピングリングの建設が上げられる。また、ビーム運転上の最重要課題は、大電荷ビームの低エミッタンス保存および安定供給である。

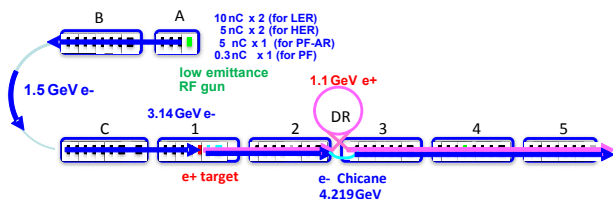


Figure 1: Layout of SuperKEKB injector linac.

Table 1: Main Parameters of KEKB and 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)   | 100  | 2100    | 20        | 20      |
| Normalized horizontal emittance (mm-mrad) | 100  | 2100    | 50        | 100     |
| Energy spread (%)                         | 0.05 | 0.125   | 0.08      | 0.07    |
| Bunch length (mm)                         | 1.3  | 2.6     | 1.3       | 0.7     |
| # of bunch                                |      | 2       |           |         |
| Maximum beam repetition (Hz)              |      | 50      |           |         |

\*: Primary electron beam for positron production.

### 2.2 電子源

KEKB へのビーム入射で使用していた熱陰極電子銃に変えて、大バンチ電荷量かつ低エミッタンスビームを生成するための光陰極 RF 電子銃を開発した。これは、疑似進行波管型空洞<sup>[7]</sup>、Yb 系レーザー<sup>[8]</sup>、および Ir<sub>3</sub>Ce 陰極<sup>[9]</sup>を用いた先駆的なシステムである。

疑似進行波管型空洞は、通常の空洞と比較して電極間距離を短くすることにより、強い収束電場を発生させることが可能である。これにより、高バンチ電荷電子ビームからの強い空間電荷力を打ち消し、生成電子ビームの低エミッタンス化が期待できる。

また、Yb 系レーザーシステムは、広い周波数帯域特性を持つため、時間方向でのパルス波形整形が可能である。Table 1 に示すとおり、SuperKEKB 入射器では 0.1% 以下のビームエネルギー広がりが必要されている。このため、縦方向のバンチ内粒子分布形状を、一般的なガウス分布ではなく、一様な矩形型分布にすることが望ましい。このような操作は、従来の Nd 系レーザーシステムでは実現が困難であった。

さらに、陰極に採用した Ir<sub>3</sub>Ce は、一般的に使用される LaB<sub>6</sub> などに比べて高い量子効率(Qe ~ 10<sup>-4</sup>)を持つ。また、低真空環境下においても表面状態が劣化しづらく、長寿命が期待される。これらの特性は、長期安定運転が要求される SuperKEKB 入射器に、最適な選択であるといえる。

陽電子生成用 1 次電子ビームとしては、従来と同様に 10 nC のバンチ電荷量が必要である。一方、SuperKEKB 入射用低エミッタンス電子ビームおよび PF 入射用電子ビームには、それぞれ、5 nC および 0.3 nC のバンチ電荷量が要求される。これらの電荷量をパルス毎に制御するため、異なるパワーに最適化したレーザーシステムを独立に構築し、必要電荷量に応じて打ち分ける予定である。

### 2.3 陽電子源

陽電子生成標的は、KEKB 入射に使用していたものと同様、タングステン標的を使用する。これは、直径 3 mm、長さ 14 mm のタングステンを銅に HIP 処理を用いて埋め込んだものである。電子ビームおよび陽電子ビームをパルス毎に切り替えるため、標的部の横に直径 2 mm の孔を設けている。入射用電子ビームはこの孔を通過させ、陽電子生成用 1 次電子ビームは標的に衝突させる。ビーム軌道の高速制御には、標的上流部のパルスステアリング電磁石を使用する。このような運転方式は、KEKB 運転時にすでに確立した。KEKB 運転時との大きな違いは、電子ビーム通過用の孔をビームライン中心に設けたことである。これは、低エミッタンス電子ビームが要求される SuperKEKB 入射を考慮し、横方向ウェイク場によるエミッタンス増大を極力避けるためである。

また、過度に絞られた大電荷量の 1 次電子ビームが標的に照射され、標的が破壊されることを避けるため、標的上流部にビームスポイラーを設置した。これは、酸化アルミのスクリーンおよび純アルミの



間入射器を占有することになる。これは、ビーム輸送路を KEKB と共有していること、また、輸送路の電磁石システムが 6.5 GeV に対応していないことなどから、PF-AR を含めた同時トップアップ入射ができないことに起因する。

SuperKEKB のナノビーム方式運転においては、ビーム寿命が約 10 分程度しか見込めないため、20 分間のトップアップ入射中断でさえも運転効率を大きく減少させることになる。このような事態を避けるため、現在、PF-AR 専用のビーム輸送路を新たに建設中である。トンネル工事は既に完了し、機器のインストールおよびビームライン構築作業の準備を進めている<sup>[23]</sup>。

### 3. コミッショニング

#### 3.1 電子ビームコミッショニング

2013 年 10 月より、SuperKEKB へ向けた入射器の電子ビームコミッショニングを開始した。コミッショニングは、年末年始および 2014 年 3 月の保守期間を挟み、今年の 7 月 1 日まで続けられた。コミッショニング開始後もビームライン建設作業が継続したため、ビームコミッショニングは、主に夕方から夜間にかけておこなわれた。

空間電荷効果を緩和するため、低エネルギー部ではバンチ長を比較的長くすることが望ましい。このため、入射部にバンチ圧縮用のシケインを構築した。Figure 3 に、入射部のレイアウトを示す。シケインは、4 台の偏向電磁石から構成され、中央部にスクリーンモニタ、下流部にストリークカメラを設置し、ビームプロファイルおよびバンチ長の診断を可能とした。シケインによるバンチ圧縮を評価する

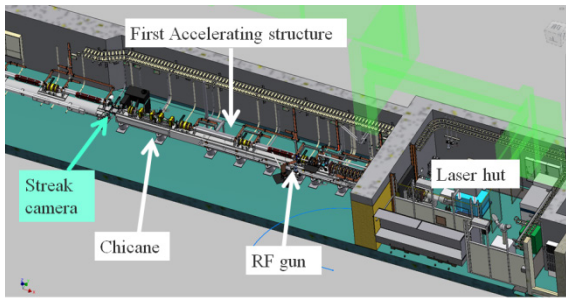


Figure 3: Layout of the new rf gun, laser hut, and chicane at the injector section.

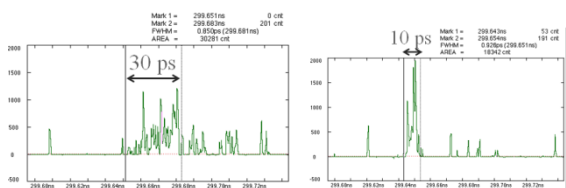


Figure 4: Bunch length measured by the streak camera downstream of chicane. Left and right figures show the results without and with bunch compression, respectively.

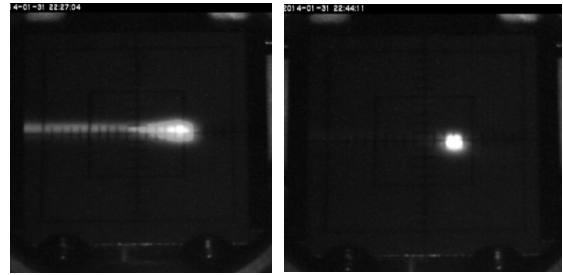


Figure 5: Electron beam profile measured by the screen monitor installed at the center of J-ARC. Left and right figures show the result without and with bunch compression at chicane, respectively.

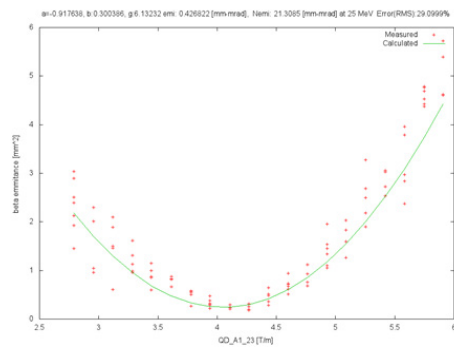


Figure 6: Example of quadrupole scan measurement for electron beam emittance evaluation. Squared horizontal beam size as the function of excitation current to the quadrupole magnet is plotted (red) together with fitted curve (green).

ため、ストリークカメラによるバンチ長計測をおこなった。Figure 4 の左 (右) 図は、バンチ圧縮無し (有り) の測定結果を示している。この結果より、バンチ長が 30 ps から 10 ps 程度にまで圧縮されたことが見て取れる。また、バンチ圧縮の有無によるエネルギー広がりの変化を、J-ARC 部中央のスクリーンモニタにより観測した。Figure 5 の結果より、バンチ圧縮有りの場合、スポットサイズが小さくなっていることがわかる。これは、バンチ長を圧縮することにより、エネルギー広がり抑制されたことを意味している。

また、入射部でのエミッタンスを評価するために、Q スキャン法による測定をおこなった。これは、四極電磁石の磁場を変化させたときのビームプロファイル変化から、エミッタンスを算出するものである。プロファイルの計測には入射部中央に設置したスクリーンモニタを用い、画像解析によりビームサイズを算出した。Figure 6 に、Q スキャン法による水平方向エミッタンス測定例を示す。本測定方式では、パルス毎のビーム変動が測定結果に影響するため、平均的な結果を表している。典型的な結果として、水平 (垂直) 方向規格化エミッタンス 20 (7) mm-mrad が得られた。

Figure 7 に、コミッショニング開始以降の電子ビームバンチ電荷量履歴を示した。電荷量計測には BPM を用い、異なる 4 つの場所における測定結果を



プロットしたものである。これらは、入射器最上流（黒）、J-ARC 入口（赤）、J-ARC 出口（黄緑）、および入射器終端部（青）の測定結果を示している。これまでに得られた最大バンチ電荷量は、最上流部で 5.6 nC、入射器終端では 0.58 nC である。真空焼きだしや機器の健全性確認を目的とした SuperKEKB 立ち上げ運転時には、1 nC 程度のバンチ電荷量が求められている。まずは、1 nC の電子ビームを安定して入射器終端まで導くことが、最優先課題である。

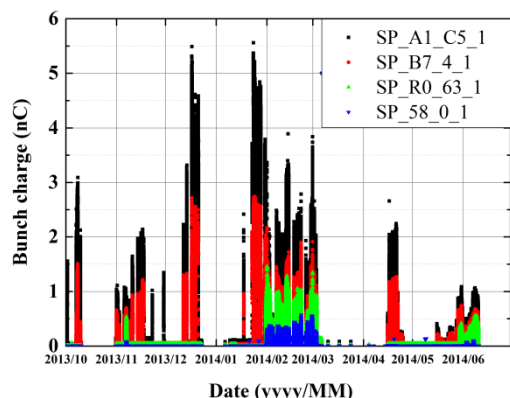


Figure 7: Electron beam charge history measured at the several typical locations since October 2014.

### 3.2 陽電子ビームコミッショニング

2014 年 4 月に陽電子生成部のビームライン工事が完了し、引き続いて、陽電子ビームコミッショニングを開始した。2014 年 6 月 6 日には、新システムを用いた初の陽電子ビーム観測に成功した。

陽電子収量のフラックスコンセントレータ励磁電流値、ブリッジコイル励磁電流値、および陽電子捕獲部の電場・位相などに対する依存性を詳細に測定した。さらに、陽電子生成標的上の 1 次電子ビーム位置および角度の最適パラメータ探索をおこなった。これらのビーム調整を継続しておこなった結果、陽電子生成標的に照射する 1 次電子ビーム 0.6 nC に対して、陽電子捕獲部では 0.18 nC の陽電子ビームを観測した。また、入射器の主ビームラインからダンピングリングへの分岐点においては、0.12 nC の陽電子ビームを観測した。

本コミッショニングでは、電力系・冷却水系の能力から、フラックスコンセントレータおよび DC ソレノイドの励磁電流値は運転値の半分に制限されていた。今夏の保守期間中にこれらの増強をおこなうため、秋から再開するコミッショニングにおいては、さらに高い磁場を用いたビーム試験を予定している。陽電子ビームコミッショニングについては、他稿に詳細な報告があるのでそちらを参照されたい<sup>[24]</sup>。

## 4. まとめと今後の課題

2013 年 10 月より、SuperKEKB メインリング入射へ向けた、入射器ビームコミッショニングを開始した。新規開発の RF 電子銃を用いて、最大 5.6 nC(目

標値 5 nC)の電子ビームを観測し、入射器最下流では 0.58 nC の電子ビーム輸送を達成した。また、新規に構築した陽電子生成部を用いて、最大 0.18 nC の陽電子ビームを観測した。

今秋 10 月から再開する次期コミッショニングでは、電荷量および安定度向上を目指した RF 電子銃用レーザーシステムの改善をおこなう。また、バンチ軌道などを用いた入射器終端での低エミッタンス保存スタディーに本格的に取り組む予定である。

## 参考文献

- [1] T. Abe et al., “Achievements of KEKB”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A001.
- [2] M. Akemoto et al., “The KEKB injector linac”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A002.
- [3] A. Akiyama et al., “Accelerator control system at KEKB and the linac”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A008.
- [4] T. Abe et al., “Commissioning of KEKB”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A010.
- [5] Y. Ohnishi et al., “Accelerator design at SuperKEKB”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A011.
- [6] H. Koiso et al., “Construction Status of the SuperKEKB Rings”, in these proceedings.
- [7] T. Natsui et al., “Commissioning of High-Charge, Low-Emittance, RF Gun for SuperKEKB”, in these proceedings.
- [8] X. Zhou et al., “Laser system upgrade for RF gun at SuperKEKB”, in these proceedings.
- [9] D. Satoh et al., “Research and development of high-temperature operating photocathode electron source for high brightness electron gun”, in these proceedings.
- [10] R. Zhang et al., “Improvement of the laser system for RF-Gun at SuperKEKB injector”, in these proceedings.
- [11] L. Zang et al., “Design Optimization of Flux Concentrator for SuperKEKB”, in Proceedings of IPAC’12, New Orleans, USA, May 2012, pp.1473-1475 (2012).
- [12] T. Kamitani et al., “SuperKEKB positron source construction status”, in Proceedings of IPAC’14, Dresden, Germany, June 2014, pp.579-581 (2014).
- [13] S. Matsumoto et al., “Large Aperture S-band Structures in KEK Injector Linac”, in these proceedings.
- [14] R. Ichimiya et al., “Development of high position resolution Linac BPM readout system towards the SuperKEKB”, in these proceedings.
- [15] Y. Yano et al., “RF CONTROL SYSTEM FOR SuperKEKB INJECTOR LINAC”, in these proceedings.
- [16] H. Katagiri et al., “RF MONITOR SYSTEM FOR SuperKEKB INJECTOR LINAC”, in these proceedings.
- [17] H. Kaji et al., “Construction and Commissioning of Event Timing System at SuperKEKB”, in Proceedings of IPAC’14, Dresden, Germany, June 2014, pp.1829-1832 (2014).
- [18] Strategic Accelerator Design (SAD). (Available at: <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>. last accessed August 2014).
- [19] S. Ushimoto et al., “Present status of the alignment of KEK LINAC for SuperKEKB”, in these proceedings.
- [20] K. Kakihara et al., “Supports of Accelerator Section of KEK Injector Linac”, in these proceedings.
- [21] M. Tanaka et al., “Measurement of floor movement in the KEKB injector LINAC tunnel”, in these proceedings.
- [22] S. Kazama et al., “EMITTANCE PRESERVATION IN SUPERKEKB INJECTOR”, in these proceedings.
- [23] H. Takaki et al., “Construction project of a new beam transport line for PF-AR”, in these proceedings.
- [24] T. Kamitani et al., “Initial commissioning of SuperKEKB positron source”, in these proceedings.