

# KEK 電子陽電子入射器の現状

## PRESENT STATUS OF THE KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

周 翔宇<sup>#A)</sup>, 明本 光生<sup>A)</sup>, 荒川 大<sup>A)</sup>, 荒木田 是夫<sup>A)</sup>, 飯田 直子<sup>A)</sup>, 池田 光男<sup>A)</sup>, 一宮 亮<sup>A)</sup>, 岩瀬 広<sup>A)</sup>, 榎本 收志<sup>A)</sup>, 榎本 嘉範<sup>A)</sup>, 大沢 哲<sup>A)</sup>, 大西 幸喜<sup>A)</sup>, 岡田 尚起<sup>A)</sup>, 小川 雄二郎<sup>A)</sup>, 柿原 和久<sup>A)</sup>, 風間 慎吾<sup>A)</sup>, 梶 裕志<sup>A)</sup>, 片桐 広明<sup>A)</sup>, 紙谷 琢哉<sup>A)</sup>, 菊池 光男<sup>A)</sup>, 倉品 美帆<sup>A)</sup>, 小磯 晴代<sup>A)</sup>, 佐藤 政則<sup>A)</sup>, 臧 磊<sup>A)</sup>, 設楽 哲夫<sup>A)</sup>, 白川 明広<sup>A)</sup>, 末武 聖明<sup>A)</sup>, 杉本 寛<sup>A)</sup>, 諏訪田 剛<sup>A)</sup>, 清宮 裕史<sup>A)</sup>, 高富 俊和<sup>A)</sup>, 竹中 たてる<sup>A)</sup>, 田中 窓香<sup>A)</sup>, 多和田 正文<sup>A)</sup>, 邱 豊<sup>A)</sup>, 張 叡<sup>A)</sup>, 峠 暢一<sup>A)</sup>, 中尾 克巳<sup>A)</sup>, 中島 啓光<sup>A)</sup>, 夏井 拓也<sup>A)</sup>, 肥後 寿泰<sup>A)</sup>, 福田 茂樹<sup>A)</sup>, 船越 義裕<sup>A)</sup>, 舟橋 義聖<sup>A)</sup>, 古川 和朗<sup>A)</sup>, 本間 博幸<sup>A)</sup>, 松下 英樹<sup>A)</sup>, 松本 修二<sup>A)</sup>, 松本 利広<sup>A)</sup>, 三浦 孝子<sup>A)</sup>, 三川 勝彦<sup>A)</sup>, 道園 真一郎<sup>A)</sup>, 三増 俊弘<sup>A)</sup>, 宮原 房史<sup>A)</sup>, 森 隆志<sup>A)</sup>, 森田 昭夫<sup>A)</sup>, 矢野 喜治<sup>A)</sup>, 横山 和枝<sup>A)</sup>, 吉田 光宏<sup>A)</sup>, 佐藤 大輔<sup>B)</sup>

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

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

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

### Abstract

In KEK, electron/positron injector linac is now under upgrade for achieving a high intensity and small emittance beam for the arm of SuperKEKB project. And the injector linac beam commissioning already started in the autumn of FY2013. The electron beam is also delivered to photon factories (PF, PF-AR) by using downstream 3 sectors of the injector. In this report, the present status of the injector linac is described.

### 1. 入射器の運転概況と現状

KEKB は 2010 年にビーム運転を終了し、SuperKEKB の建設を開始した。入射器下流においては放射光施設 PF、PF-AR へのビーム供給運転を続けている。一方、上流部においては KEKB が到達した最高ルミノシティの 40 倍を実現するために、電子銃やアライメントシステムのアップグレード・試験を行ってきた<sup>[1]</sup>。Figure 1 のように入射器では全 8 セクターのうち、第 2、3 セクターの間に壁を設け、第 3 セクターに仮の電子銃を設置し、上下流独立に運転が可能である。最上流部 A1 ユニット部において新型 RF 電子銃と熱電子銃の併用を進めて、50Hz ダブルバンチシステムの開発を行っている。新型 RF 電子銃と熱陰極電子銃から最下流まで入射器全体を通したビームも確認した。そして、陽電子生成部が第 1 セクターに設置され、陽電子の観測を達成

し、陽電子増強実験を行っている。



Figure 1: Layout of SuperKEKB injector linac.

### 2. 運転統計

2013 年秋より、上流部において SuperKEKB へのビーム入射に備えた入射器ビームコミッショニングを開始した。下流部においては PF、PF-AR へのビーム入射も続けた。Figure 2 に 2014 年度までの運転統計履歴と故障率を示す。2013 年度と 2014 年度は 5315, 3448 時間の総運転を行った。全体故障率は 1% (0.43%と 0.9%)以下を達成、例年より減少に

<sup>#</sup>xiangyu.zhou@kek.jp

なった。

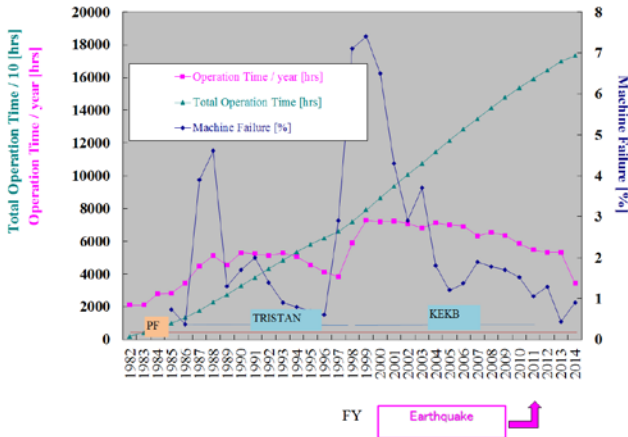


Figure 2: Operation time and machine failure.

Figure 3 は故障率と入射遅延率、RF トリップの推移を示している。故障率が低いものの、RF トリップ頻度が増えていることがわかる。一つの原因は陽電子捕獲セクションに置かれる 4 つの加速ユニット (1-5、1-6、1-7、1-8) に新しい大口径 S-band(LAS) 加速管を採用し、そのコンディショニングに時間がかかっていることがある。もう一つは新 RF 電子銃の新しい空洞加速管のコンディショニングが原因と考えられ、まだ時間が必要と考えている。

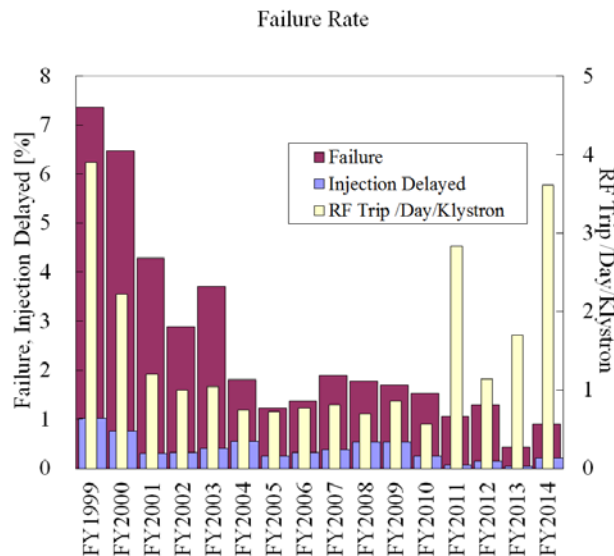


Figure 3: Failure, Injection delay rate and RF trip.

### 3. 維持・改善

#### 3.1 高周波源

ここ数年 SuperKEKB へのアップグレード作業や震災復旧のため、高周波源の連続運転時間や稼働台数が少なく、クライストロン及びサイラトロン等の交換台数は少ない傾向にあった。アップグレード作業が進むにつれ、徐々に運転時間や稼働台数も増えてきており、交換台数が徐々に増加していく。電子陽電子入射器の高周波源としての大電力クライスト

ロンのパルス電源は、PFN(パルス成形回路)コンデンサを充電するためのスイッチング電源である。全容量  $0.62\mu\text{F}$  の PFN コンデンサを 18ms 以内に 43kV まで充電する動作を、50Hz の繰り返しで行う。定格動作時の安定度は、3 相 420V 入力の変動 $\pm 5\%$  に対して 0.03%p-p 以内である。この電源は、速やかな充電と高い安定度を同時に満たすため、従来使用していた出力 30kW 安定度 0.2%p-p の電源に、新たに開発した出力 5kW の電源を組み合わせる構成になっており、両者を協調動作させることで安定度を確保している<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 ビームロスモニタとワイヤスキャナ

SuperKEKB に向けた改造ではワイヤスキャナの増設が予定されている。ワイヤスキャナはワイヤ駆動部と検出部から構成されており、 $100\mu\text{m}$  のタングステンワイヤや光電子増倍管を組み合わせ運用している。ビームエネルギーに対応した場所に検出器を設置する必要がある。そこで既存の設置場所も含めシミュレーションによって信号の出る場所を予測した<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 制御システム

SuperKEKB 加速器では高いリミノシティを達成するため、蓄積電流値の倍増および衝突点での極小ビームサイズの実現を設計基盤とした、ナノビーム方式を採用している。一方、ダンピングリングを用いずに低エミッタンス電子ビーム入射を実現するため、制御システムの高度化を推進してきた<sup>[4]</sup>。

KEKB 入射器は、4 つの異なるリング (KEKB HER/LER、PF、PF-AR) へ電子および陽電子ビームを安定に供給してきたが、SuperKEKB に向けてはダンピングリングとも協調して入射する必要があり、イベント制御システムを増強している。

正しく定電流動作ができない電磁石電源について、コイルの温度変化により電流変化が起きることから、電磁石電源の定電圧制御下における電流の安定化のために EPICS EPID (Enhanced version of the EPICS PID record) を利用したフィードバックシステムの構築を行った<sup>[5]</sup>。そして、複数リングへの同時入射運転に対応可能な高周波モニターシステムの導入を進めている。現在、約 60 台のモニターユニットを導入し、EPICS-IOC の整備を進めている<sup>[6]</sup>。

## 4. 入射器アップグレード

#### 4.1 高電荷低エミッタンス RF 電子銃及びレーザー

熱カソード DC 電子銃はダンピングリング無しで 20mm-mrad 5nC という高電荷低エミッタンスを達成するのは非常に困難である。従って、SuperKEKB ではフォトカソード S-band RF 電子銃を使用することになった。通常使用される RF 電子銃では 1nC 程度の電荷発生が限度であり、2011 年に Disk and Washer (DAW)型の軸外結合の空洞が検討された。DAW 型 RF 電子銃はすでに開発され、試験を通して狭い加速ギャップによるビーム集束の効果や  $\text{Ir}_3\text{Ce}$

のカソードの量子効率などを確認することができた。DAW 型の RF 電子銃では、ある程度の高電荷ビーム発生試験が可能であったものの 5nC のスペースチャージによる発散力に対する集束電場はまだ弱い。更に強い集束電場を発生させるため、新たに 2013 年にサイドカップル空洞を軸上に 2 つ配置した擬似進行波型と呼ばれる空洞を開発した<sup>[7]</sup> (Fig. 4)。

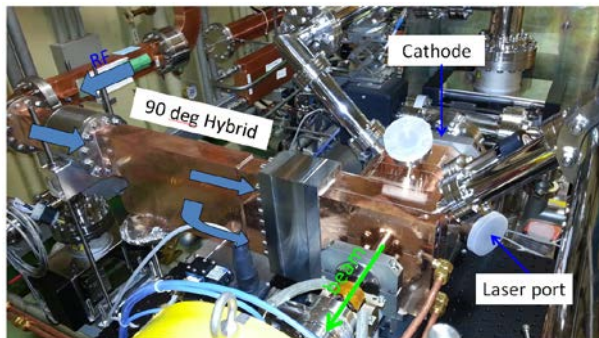


Figure 4: A1 RF-electron gun.

この新しい RF 電子銃を使ったビームコミッションが 2013 年秋から始まっている。用いたレーザーシステムはイットリビウム (Yb) 系を使った Yb ドープファイバー種光パルス発振器、Yb ドープファイバー増幅器、Thin-disk 結晶 Yb:YAG 固体増幅器から構成され、中心波長 1035nm、パルス幅 20ps の広帯域光源を開発した<sup>[8]</sup> (Fig. 5)。この赤外レーザーパルスの 2 段階の 2 倍波変換によって、中心波長 259nm の紫外光源を作って、Ir<sub>5</sub>Ce カソードに入射している。2Hz 運転において最高 5.1nC のビーム発生を確認していた。

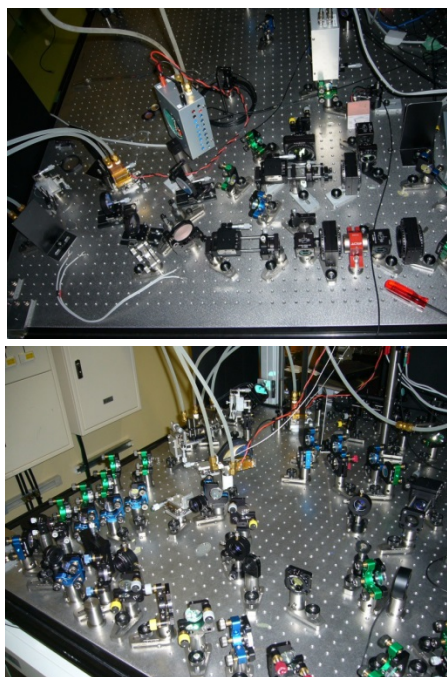


Figure 5: Laser amplifier system for RF gun. Focused type multi-pass amplifier (upper), Non-Focused type multi-pass amplifier (lower).

繰り返し周波数が 25Hz に上がると、連続使用による熱蓄積が Yb:YAG 結晶に熱レンズ効果を引き起こし、Yb:YAG 固体レーザーの増幅率が急激に下がることになる。そこで Yb:YAG 結晶クーリングシステムの改善のため、結晶と基板の間に共晶混合物である金/すず (Au/Sn) 層をいれ、冷却性能の向上を実現した<sup>[9]</sup>。Yb:YAG 媒質の増幅率の維持の上に、結晶表面の変形も抑えることができる。更に、25Hz ダブルバンチに対応するため、レーザーシステムの改造を継続している<sup>[10]</sup>。シングルバンチの場合には、3nC 以上の電子ビームを得た。ダブルバンチを作る場合には、1 バンチ目のレーザー強度を抑えて、二つのバンチの出力が同等となるようにコントロールし、各 1nC 電子ビームを観測した<sup>[11]</sup>。

#### 4.2 熱カソード DC 電子銃

繰り返し周波数を 50Hz に上げると、ポンプ半導体レーザーの熱蓄積による Yb:YAG 結晶の熱レンズ効果を引き起こし、レーザー増幅システムの増幅率及びビーム品質を悪化させる。RF 電子銃に入射すると陽電子生成の 1 次ビームに要求されるバンチ電荷量を満たせない。SuperKEKB に向けて RF 電子銃及びレーザーの開発は継続する必要があるが、低エミッタンスの必要のない陽電子の 1 次電子ビームのために温存されていた熱電子銃を復旧した。



Figure 6: Thermal electron gun and RF electron gun.

Figure 6 のように、最上流 A1 ユニット部に 2 階建て構造を設置し、新型 RF 電子銃と熱電子銃の併用を進めている。上段のビームライン高さ 1950mm に熱電子銃を復旧し、50Hz ダブルバンチシステムの開発を行っている。

#### 4.3 陽電子ビームライン

陽電子生成標的は直径 3mm、長さ 14mm のタンゲステンを銅ブロックに HIP 処理で埋め込んだものであり、KEKB 入射に使用していたものと同様である。陽電子生成と電子入射をパルスごとに電子ビーム軌道を振って切り替えるため、標的部の横に直径 2mm の孔を空けている。入射用電子ビームは孔を通過させ、陽電子生成用 1 次電子ビームは標的に衝突させる。高い電荷量の電子ビームを標的上で小さいスポットに絞って照射すると、局所的なエネルギー密

度が高くなり標的の疲労破壊を起こすので、それを防ぐため、標的の約 3m 上流にビームスポイラと呼ばれる散乱板を入れ、スポットサイズを 0.7mm になるように広げることにした。スポイラー中心部においても、標的と同様に電子ビーム通過用の孔を設けている。

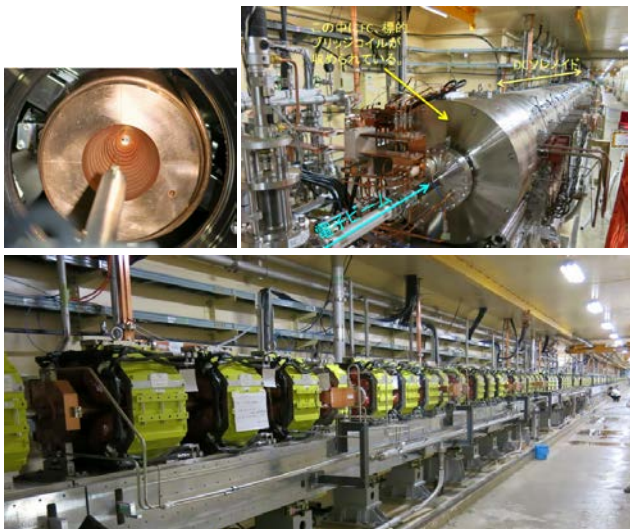


Figure 7: Flux concentrator (upper left), positron capture section (upper right), focusing system of quad magnets (lower).

陽電子ビーム強度を増加させるためには、1 次電子ビームのエネルギーや強度を上げることはコスト的にまた技術的に困難であることから、生成された陽電子の収集効率を向上させる方針を取ることにした。標的直後で生成された陽電子を収束するためにフラックスコンセンレータ (FC) 型パルスソレノイドを使用した。約 3.5T の強ソレノイド磁場を作ることができ、外側に設置されるブリッジコイル磁場 1.0T との重ね合わせで標的直後に実効的に 4.5T の収束磁場が生成される。また、FC 下流に位置する陽電子捕獲部には、開口直径 30mm の大口徑 S-band 加速管を 6 本設置し、下流へのビーム透過率を向上させた<sup>[12]</sup>。陽電子捕獲部直後には電子陽電子ビームセパレータを設置し、2 次電子を取り除いている。それより下流の加速ユニットでは 64m 長の領域に四極電磁石を増設してビーム収束を行った。

2014 年 4 月に陽電子生成用のコンポーネントを設置した。ビーム調整の結果として、標的に照射する 1 次電子電荷量 0.6nC/bunch に対して、陽電子捕獲部直後で電荷量は 0.18nC/bunch が得られ、陽電子収量は 30% となった。また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、0.12nC、20% の陽電子ビームを観測した<sup>[13]</sup>。

今後のビーム増強に伴い陽電子生成部および捕獲部からの放射線が増加するので、新たに遮蔽体を設計・設置した<sup>[14]</sup>。その後、熱電子銃を用い、陽電子増強を目指し、改善を継続している。7 月に、4nC 25Hz の電子に対して、陽電子生成標的に 1.6nC の電荷量を得た<sup>[15]</sup>。

#### 4.4 アライメント

SuperKEKB 向けに入射器の各コンポーネントを設置するため、高精度長基線レーザーアライメントシステムの開発を 2013 年 3 月に終了し、2015 年 1 月全セクターに渡る加速ユニットの初期アライメントを終了した。地面変動が入射器建屋を変形させ、現在の静的な計測システムでは入射器アライメントの動的変位を計測し続けることは困難である。2014 年 12 月入射器加速ユニットの動的変位を連続計測するシステムを導入し、2015 年 1 月よりトンネル床面変動の連続観測を開始した<sup>[16]</sup>。さらに、アライメントレーザーフィードバックシステムの改良により、入射器のアライメント高精度化が進められている<sup>[17]</sup>。

#### 4.5 ビーム診断

SuperKEKB ではエミッタンス制御のために 10 $\mu$ m 以下のビーム位置測定分解能が要求されるが、既設のオシロスコープを使った読み出しシステムの 30 $\mu$ m の位置分解能では要求を満たしておらず、新たに高位置分解能の読み出しシステムを開発した。読み出しシステムは狭帯域バンドパスフィルタ及び 16-bit、250 MSa/s ADC で構成され、ゲインの時間変動補正やケーブル接続の緩みなどの異常を検知するための較正用パルスの出力が可能である。ビーム位置演算と制御には FPGA を用い、50 Hz でビーム位置読み出し、アッテネータ設定、較正パルス出力が可能である。電荷量 0.8 nC/bunch のビームを用いた 3-BPM 法により得た位置分解能は 3  $\mu$ m であった。現在、約 100 台の BPM の読み出しシステムの置き換えを進めている<sup>[18]</sup>。

#### 4.6 タイミング制御

入射器は 4 つのリングへ電子ビームもしくは陽電子ビームを供給する。SuperKEKB プロジェクトではより高度なタイミング制御が要求されるため、新しいイベントタイミングシステムを構築し、メインタイミングステーションに設置した。新イベントタイミングシステムにより入射器全域でのビーム運転、2 つの放射光リングへのビーム入射が実現されている<sup>[19]</sup>。

### 5. まとめと今後の予定

電荷量の向上と同時に安定度向上を目指す新型 RF 電子銃と復活させた熱電子銃の併用によって大電流・低エミッタンスビームの研究開発を進めている。また、50Hz ダブルバンチ対応できるレーザーシステムの開発を続けている。これらによって 2015 年度中に最初のリング入射を実現し、さらに SuperKEKB の目標達成に向けた初期エミッタンスの改善及びその保存の研究を継続して、2017 年度にはダンピングリングも利用した低エミッタンスビームの入射を開始する予定である<sup>[20]</sup>。

#### 参考文献

[1] K. Furukawa et al., "Beam Property Management at KEK

- Electron/Positron 7-GeV Injector Linac”, in these proceedings.
- [2] H. Akikawa et al., “Development of High-Precision Capacitor-Charging Power Supply for Pulse Modulators”, in these proceedings.
  - [3] Y. Yano et al., “Optical Fiber Beam Loss Monitor and Wire Scanner”, in these proceedings.
  - [4] M. Satoh et al., “Present Status of SuperKEKB Injector Linac Control System”, in these proceedings.
  - [5] S. Kusano et al., “Development of a Feedback Control System for Magnet Power Supplies using EPICS EPID at KEK Injector Linac”, in these proceedings.
  - [6] H. Katagiri et al., “Present status of RF monitor system for SuperKEKB injector linac”, in these proceedings.
  - [7] T. Natsui et al., “Commissioning of High-charge, Low-emittance, RF Gun for SuperKEKB”, PASJ2014.
  - [8] X. Zhou et al., “Laser system upgrade for RF gun at SuperKEKB”, PASJ2014.
  - [9] R. Zhang et al., “Improvements of the Laser System for RF-Gun at SuperKEKB Injector”, in these proceedings.
  - [10] X. Zhou et al., “25Hz and 50Hz Double-bunch Laser System Upgrade for RF Gun at SuperKEKB”, in these proceedings.
  - [11] T. Natsui et al., “Commissioning of RF gun for SuperKEKB”, in these proceedings.
  - [12] S. Matsumoto et al., “Large Aperture S-band Structures in KEK injector linac”, PASJ2014.
  - [13] T. Kamitani et al., “Initial Commissioning of SuperKEKB Positron Source”, PASJ2014.
  - [14] S. Matsumoto et al., “Radiation Shield Structure for the Positron Target Region of KEKB Injector Linac”, in these proceedings.
  - [15] T. Kamitani et al., “Present status of SuperKEKB positron source”, in these proceedings.
  - [16] T. Suwada et al., “Dynamical Measurement System of Tunnel Floor Motion with a Long Laser-Based Alignment System at the KEKB Injector Linac”, in these proceedings.
  - [17] T. Ichikawa et al., “Improvement of Alignment Laser Feedback System for KEK electron/positron Injector Linac”, in these proceedings.
  - [18] F. Miyahara et al., “High Position Resolution BPM Readout System for KEK  $e^+/e^-$  Linac”, in these proceedings.
  - [19] H. Kaji et al., “Installation and Commissioning of New Event Timing System for SuperKEKB”, in these proceedings.
  - [20] S. Kazama et al., “Emittance Preservation in SuperKEKB Injector”, in these proceedings.