

## KEK 電子陽電子入射器の現状

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

清宮 裕史\*, 明本 光生, 荒川 大, 荒木田 是夫, 飯田 直子, 池田 光男, 恵郷 博文, 榎本 収志, 榎本 嘉範, 大沢 哲, 大西 幸喜, 小川 雄二郎, 柿原 和久, 梶 裕志, 片桐 広明, 紙谷 琢哉, 川村 真人, 菊池 光男, 倉品 美帆, 小磯 晴代, 佐武 いつか, 佐藤 政則, 設楽 哲夫, 周 翔宇, 白川 明広, 末武 聖明, 杉村 仁志, 杉本 寛, 諏訪田 剛, 竹中 たてる, 田中 窓香, 多和田 正文, 張 叡, 邱 丰, 峠 暢一, 中尾 克巳, 中島 啓光, 夏井 拓也, 西田 麻耶, 東 保男, 肥後 寿泰, 船越 義裕, 古川 和朗, 本間 博幸, 松下 英樹, 松本 修二, 松本 利広, 三浦 孝子, 三川 勝彦, 道園 真一郎, 三増 俊弘, 宮原 房史, 森 隆志, 森田 昭夫, 矢野 喜治, 横山 和枝, 吉田 光宏

Yuji Seimiya\*, Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Yoshio Arakida, Naoko Iida, Mitsuo Ikeda, Hiroyasu Ego, Atsushi Enomoto, Yoshinori Enomoto, Satoshi Ohsawa, Yukiyoshi Ohnishi, Yujiro Ogawa, Kazuhisa Kakiyama, Hiroshi Kaji, Hiroaki Katagiri, Takuya Kamitani, Masato Kawamura, Mitsuo Kikuchi, Miho Kurashina, Haruyo Koiso, Itsuka Satake, Masanori Satoh, Tetsuo Shidara, Xiangyu Zhou, Akihiro Shirakawa, Masaaki Suetake, Hitoshi Sugimura, Hiroshi Sugimoto, Tsuyoshi Suwada, Tateru Takenaka, Madoka Tanaka, Masafumi Tawada, Rui Zhang, Feng Qiu, Nobukazu Toge, Katsumi Nakao, Hiromitsu Nakajima, Takuya Natsui, Maya Nishida, Yasuo Higashi, Toshiyasu Higo, Yoshihiro Funakoshi, Kazuro Furukawa, Hiroyuki Honma, Hideki Matsushita, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Katsuhiko Mikawa, Shinichiro Michizono, Toshihiro Mimashi, Fusashi Miyahara, Takashi Mori, Akio Morita, Yoshiharu Yano, Kazue Yokoyama, Mitsuhiro Yoshida  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

#### Abstract

The KEK electron/positron injector linac was upgraded for Phase-II SuperKEKB (HER/LER). Pulsed magnets were installed in the linac for simultaneous injection to four different rings, HER/LER/PF/PF-AR. RF gun improvement for stable high-charged beam generation was also done. Phase II commissioning started in March 2018 and finished in July 2018. For Phase III commissioning, more stable high-quality beam operation is necessary. This report describes the present status of the linac and the related upgrade efforts for Phase III.

#### 1. 入射器の運転概況と現状

KEK 電子陽電子入射器では SuperKEKB のためのアップグレードが行われてきた。4 リング (HER/LER/PF/PF-AR) 同時入射のためのパルス磁石の導入や高電荷の低エミッタンスビームを生成する RF 電子銃に用いるレーザーの強度増強や安定化が行われた。ダンピングリングコミッショニングが 2018 年 1 月～7 月に、SuperKEKB phase II コミッショニング

が 2018 年 3 月～7 月に行われた [1]。2018 年度末から予定されている Phase III では、Phase II 以上の高電荷ビームを Phase II 以上に低エミッタンス且つ安定に SuperKEKB メインリングまで輸送する必要がある。

Figure. 1 は、入射器全体の略図である。入射器はセクター A、B、J-ARC、C、1～5 で構成されており、2 種類のタイプの電子銃を用いて運転が行われている。1 つは陽電子を生成するための高電荷電子ビーム生成用の熱電子銃である。熱電子銃によって生成された高電荷電子ビーム (10 nC) はセクター 1 のタンングステンターゲットに衝突し制動放射、対生成が

\* seimiya@post.kek.jp

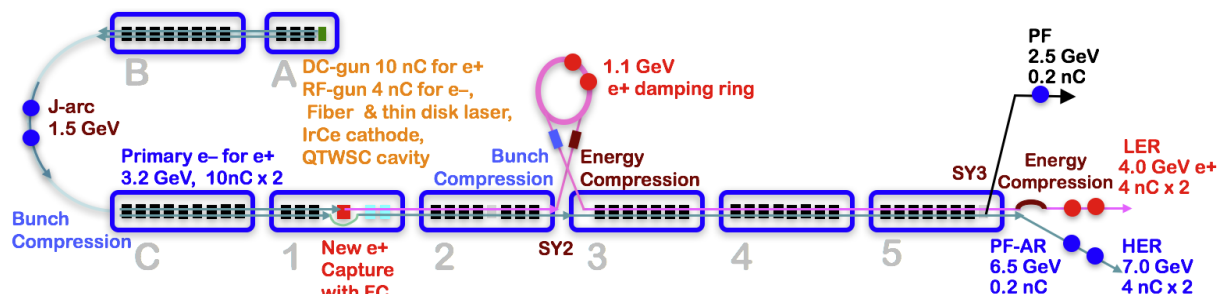


Figure 1: Schematic layout of the SuperKEKB injector linac.

起こる。対生成によって生まれた陽電子はターゲット直後の Flux Concentrator, 収束ソレノイドで効率良く捕獲される。陽電子は 2 セクター終端からダンピングリングへ輸送され、放射減衰によって低エミッタンスとなった陽電子が SuperKEKB の陽電子用リングへ輸送される。また、熱電子銃は PF、PF-AR 用の電子ビーム生成にも用いられている。陽電子生成用ターゲットには電子ビーム通過用の孔が存在し、ターゲット上流のパルスステアリングによって電子ビームをターゲットに衝突させるか、孔を通過させるかを選択することができる。PF, PF-AR からビーム供給の要請が来た際には、ターゲット孔を通過させた電子ビームをセクター 5 のパルスバンドで PF または PF-AR ビームラインに振り分ける。もう 1 種の電子銃は、低エミッタンスビーム用のフォトカソード RF 電子銃である。フォトカソード RF 電子銃から生成された電子ビームはセクター 1 のターゲットの孔を通過し、SuperKEKB の電子用リングへ輸送される。また、熱電子銃、RF 電子銃共に 96 ns スペースの 2 バンチ運転が可能である。ビーム繰り返しは、現状では熱電子銃で 50 Hz、RF 電子銃で 25 Hz 運転が可能であるが、RF 電子銃においても 50 Hz 運転ができるよう開発が進められている。

## 2. 運転統計 (FY2017)

2017 年度の入射器の運転は、4 月～5 月、10 月以降行われた。Figure. 2 が運転統計履歴と故障率、Fig. 3 が故障率と入射遅延率、RF トリップの推移を示している。運転時間は例年並みで 4636 時間であったが、故障率は今年の 2 倍弱と多い。これは、2018 年 1 月からダンピングリングのコミッショニング開始後、イベントシステムのトラブルが長時間続いたことが一因である。

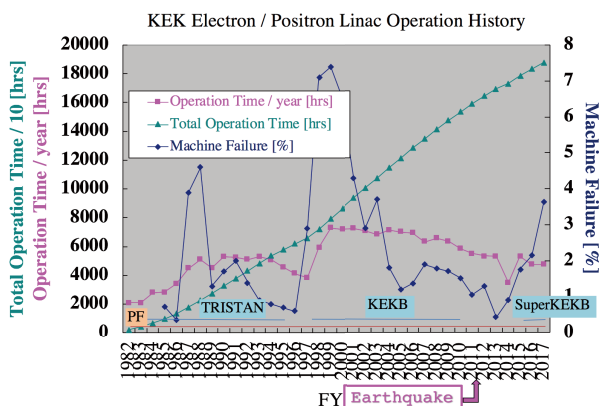


Figure 2: Operation time and machine failure.

## 3. 入射器アップグレード

### 3.1 RF 電子銃

Nd:YAG レーザーと Ir<sub>2</sub>Ce カソードを用いた quasi-traveling-wave side-couple (QTWSC) cavity によって高電荷の低エミッタンスビームを生成している。Phase

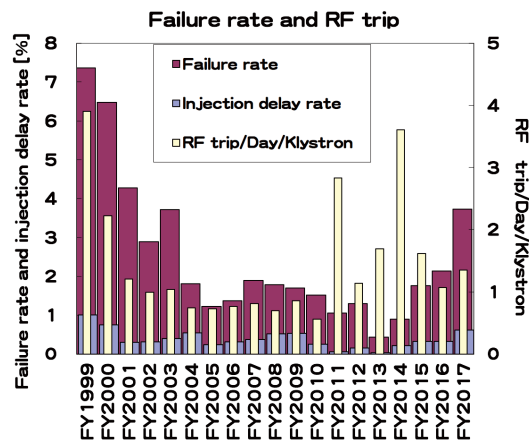


Figure 3: Failure, Injection delay rate, and RF trip.

II では、レーザーの増強と安定化により RF 電子銃から約 2 nC の電子ビームを安定にリングへ供給することに成功した。Phase III では、より高電荷な 4 nC の電子ビーム生成が要求されている。そのため、レーザーの増幅率を向上させるためのモジュール追加とカソードの量子効率を回復させるための加熱洗浄機構を備えた RF 電子銃の導入が予定されている [2,3]。

### 3.2 パルスマグネット

SuperKEKB の短いライフと補うための高繰り返しビームと、PF、PF-AR 運転を両立させるために 4 リング (HER/LER/PF/PF-AR) 同時入射のための研究がこれまで行われてきた。2017 年夏に、3 セクター～5 セクターまでのステアリング磁石と 4 極磁石のパルス化が行われた。Figure. 4 は、実際に導入されたパルスステアリング磁石とパルス 4 極磁石であり、アライメントのための位置調整機構が備わった架台の上に 2 つのパルス 4 極磁石、その間に 2 つのパルスステアリング磁石が設置されている。この構成を 1 つのユニットとして、現在 13 ユニットが導入されている。パルス化に伴いイベントベースの制御システムも新規導入され、パルス磁石、制御システム共に安定に動作することが確認された。このアップデートにより、4 つのリングへの同時入射に成功している [4]。また、パルス磁石の導入に伴い、小口径の新規ビーム位置モニタも導入された。

熱電子銃と RF 電子銃のビームラインが合流するセクター A の一部においても、偏向磁石、4 極磁石、ステアリング磁石のパルス化が進行中であり、今夏以降に順次設置予定である。加速管の wake field によるエミッタンス増大を抑えるための軌道補正用パルスステアリングや、J-ARC 前後の軌道調整用のパルスステアリングの検討または製作が進められている。

### 3.3 陽電子生成とダンピングリング

高いルミノシティを目指す SuperKEKB では、高電荷の低エミッタンスビームが必要不可欠であるが、入射ビームのエミッタンスが要求値を満たさない場合、メインリングのアクセプタンスにビームが入

Table 1: Required and Achieved Parameters of Injection Beams at Linac End (Positron/Electron)

| Stage                              | KEKB      | Phase-I  | Phase-II | Phase-III     |                   |
|------------------------------------|-----------|----------|----------|---------------|-------------------|
|                                    | achieved  | achieved | achieved | 1st year plan | final requirement |
| Energy (GeV)                       | 3.5/8.0   | 4.0/7.0  | 4.0/7.0  | 4.0/7.0       |                   |
| Bunch charge (nC)                  | 1/1       | 0.4/1    | 1.4/2.4  | 2/2           | 4/4               |
| Hor. emittance ( $\mu\text{rad}$ ) | 1400/310  | 1000/130 | 200/40   | 100/40        | 100/40            |
| Ver. emittance ( $\mu\text{rad}$ ) | -/-       | -/-      | 2/40     | 15/20         | 15/20             |
| Energy spread (%)                  | 0.13/0.13 | 0.5/0.5  | -/-      | 0.16/0.07     | 0.16/0.07         |

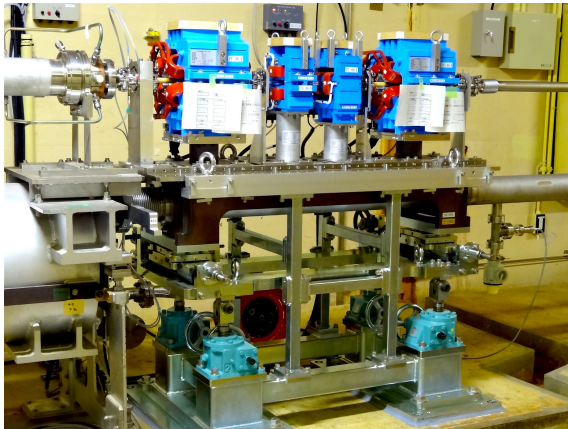


Figure 4: Two pulsed quads and two pulsed steerings with a newly designed stand.

りきらず、低入射効率となり、それに伴い低ルミノシティの原因となってしまう。陽電子生成直後のエミッタンスは非常に大きいため、ダンピング (DR) での放射減衰によって陽電子ビームのエミッタンスを減少させなければならない。DR 運転に向けて、入射器から DR、DR から入射器までの陽電子ビーム用のビームライン、及び電子ビームが迂回するためのシケイン (セクター 2 と 3 の間) を含むビームラインが整備された。また、DR 入出射に必要なイベントシステム [5]、DR 入射に必要なエネルギー圧縮、DR 出射に必要なパンチ圧縮に必要となる加速管や導波管といった RF システム、ビームパラメータを測定するためのビーム位置モニタ、ストリークカメラ、スクリーン、ワイヤースキャナも新規導入された。

#### 4. コミッショニング状況

SuperKEKB コミッショニングで達成された入射パラメータと今後要求される入射パラメータを Table 1 にまとめる。注意点としては Phase II の電荷量とエミッタンスは同時に測定されたものではなく、それぞれの最良時のデータであり、エミッタンスに関しては約 1 nC 時の測定値である。Phase II のビーム要求は概ね達成されたが、Phase III の要求には電荷量、エミッタンス共に届いていない。今後 RF 電子銃 (レーザー) のアップデートやエミッタンス保存のためのビーム制御システムの構築が必須である。陽電子ビームの水平エミッタンスについては、Phase III の要求の 2

倍程度の値となっており、原因究明が進められている [6]。また、Table 1 のデータは入射器終端のデータであるが、入射器終端から SuperKEKB リングに入るまでの Beam transport line にて大きなエミッタンス増大が確認されており、別途原因究明が進められている。加えて、Phase III では、ビーム位相空間ジッタがエミッタンスに無視できない影響を与える可能性があり、ビーム位相空間ジッタの原因究明が行われている [7,8]。また、ビームの安定性を高めるために Phase II ではエネルギーフィードバックを行っていたが、Phase III ではこれに加えて RF モニタを使用したビーム安定度解析システムや安定な低エミッタンスビーム輸送に不可欠な軌道フィードバックシステムを運用し、より安定なビーム輸送に繋げる予定である。

#### 5. まとめと今後の予定

4 リング同時入射のためのパルス磁石とその制御に必要なイベントシステムが新規導入され、安定に動作することが確認された。RF 電子銃に関しては、レーザーの増強と安定化により約 2 nC の電子ビームを安定にリングへ供給することに成功した。SuperKEKB Phase II コミッショニングでは、要求された高電荷の低エミッタンスビームを入射器終端まで輸送することに電子/陽電子共に成功した。

Phase III に向けて、高電荷ビームのためにレーザーパワーの増強とカソードの量子効率回復のための加熱洗浄機構が導入予定である。より安定な運転のために、RF モニタを使用したビーム安定度解析システムや低エミッタンスビーム輸送に不可欠な軌道補正、軌道フィードバックのためのソフトウェア開発が進行中である。また、Phase II で問題となったダンピングリング後の陽電子ビームの水平エミッタンス増大と入射器終端から SuperKEKB リングまでの Beam transport line で発生するエミッタンス増大に関して原因究明が進められている。

#### 参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, WEOLP01, “SuperKEKB フェーズ 2 におけるコミッショニングの成果”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [2] M. Yoshida *et al.*, FROM06, “SuperKEKB 用 RF 電子銃のコミッショニング”, Proceedings of the 15th Annual Meet-

- ing of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10 , 2018.
- [3] X. Zhou *et al.*, WEP006, “SuperKEKB 用 RF gun の Phase-II コミッショニング”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10 , 2018.
- [4] F. Miyahara *et al.*, WEP082, “KEK 電子陽電子入射器タイミングシステム”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10 , 2018.
- [5] H. Kaji *et al.*, THOM03, “SuperKEKB phase-2 運転における入射制御”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10 , 2018.
- [6] N. Iida *et al.*, THOM04, “SuperKEKB の陽電子ダンピングリングの入出射路コミッショニング”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10 , 2018.
- [7] Y. Seimiya *et al.*, TUP003, “SuperKEKB 入射器におけるビーム変動とエミッタンス成長シミュレーション”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 1-3 , 2017.
- [8] Y. Seimiya *et al.*, WEP002, “SuperKEKB 入射器におけるビーム位相空間ジッタと有効エミッタンス”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10 , 2018.