

# KEK 電子陽電子入射器の現状

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

夏井拓也<sup>#</sup>, 明本光生, 荒川大, 荒木田是夫, 飯田直子, 池田光男, 岩瀬広, 惠郷博文, 榎本收志, 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, Qiu Feng, 佐武いつか, 佐藤政則, 佐藤大輔, 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, 清宮裕史, 竹中たてる, 田中窓香, 張叡, 峠暢一, 中尾克巳, 中島啓光, 西田麻耶, 肥後寿泰, 福田茂樹, 船越義裕, 舟橋義聖, 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, 宮原房史, 矢野喜治, 横山和枝, 吉田光宏

Takuya Natsui<sup>#</sup>, Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Yoshio Arakida, Naoko Iida, Mitsuo Ikeda, Hiroshi Iwase, Hiroyasu Ego, Atsushi Enomoto, Yoshinori Enomoto, Satoshi Ohsawa, Yukiyoshi Ohnishi, Yujiro Ogawa, Kazuhisa Kakihara, Hiroshi Kaji, Hiroaki Katagiri, Takuya Kamitani, Masato Kawamura, Mitsuo Kikuchi, Miho Kurashina, Haruyo Koiso, Qiu Feng, Itsuka Satake, Masanori Satoh, Daisuke Satoh, Tetsuo Shidara, Xiangyu Zhou, Akihiro Shirakawa, Masaaki Suetake, Hiroshi Sugimoto, Tsuyoshi Suwada, Yuji Seimiya, Tateru Takenaka, Madoka Tanaka, Rui Zhang, Nobukazu Toge, Katsumi Nakao, Hiromitsu Nakajima, Nishida maya, Toshiyasu Higo, Shigeki Fukuda, Yoshihiro Funakoshi, Yoshisato Funahashi, Yoshisato Funahashi, Kazuro Furukawa, Hiroyuki Honma, Hideki Matsushita, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Katsuhiko Mikawa, Shinichiro Michizono, Fusashi Miyahara, Yoshiharu Yano, Kazue Yokoyama, Mitsuhiro Yoshida

High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

### Abstract

In FY2016, the KEK electron/positron injector linac has continued upgrade for Phase-II SuperKEKB (HER/LER) beam injection. Phase-I commissioning had been finished successfully in June 2016. Lower emittance beam is required in Phase-II, RF gun study with stable laser system for electron beam was carried out and flux concentrator and dumping ring construction is also proceeding for positron beam.

### 1. 入射器の運転概況と現状

KEK 電子陽電子入射器は, SuperKEKB の LER/HER, PF, PF-AR の 4 リングにビームを供給している. Figure 1 に KEK 入射器棟の構成図を示す. ビーム繰り返しは基本的には 50 Hz であり, 現在は Pulse-to-pulse での切り替えを行って供給先のリングを替える運転は行っていない. また, これまではビームライン途中 3 セクターに配置された熱電子銃により生成された電子ビームを用いて, PF/PF-AR リングにビーム入射を行っていた.

しかし, SuperKEKB Phase-II 運転が始まるのを期に, 3 セクターの熱電子銃を撤去し, 電子源は最上流の電子銃を使用することとなり, また, 下流の電磁石, 加速管の LLRF システムを Pulse-to-pulse の切り替え運転が可能になる機器に置き換えて 4 リング同時入射を行っていく. PF-AR 運転に関しては新しく直接入射路を建設したので, 6.5 GeV の電子ビームを入射する予定である.

最上流 A1 に配置されている電子銃は, 従来から用いられている熱電子銃と SuperKEKB 電子ビームのために開発されたフォトカソード高周波電子銃(RF gun)の 2 種

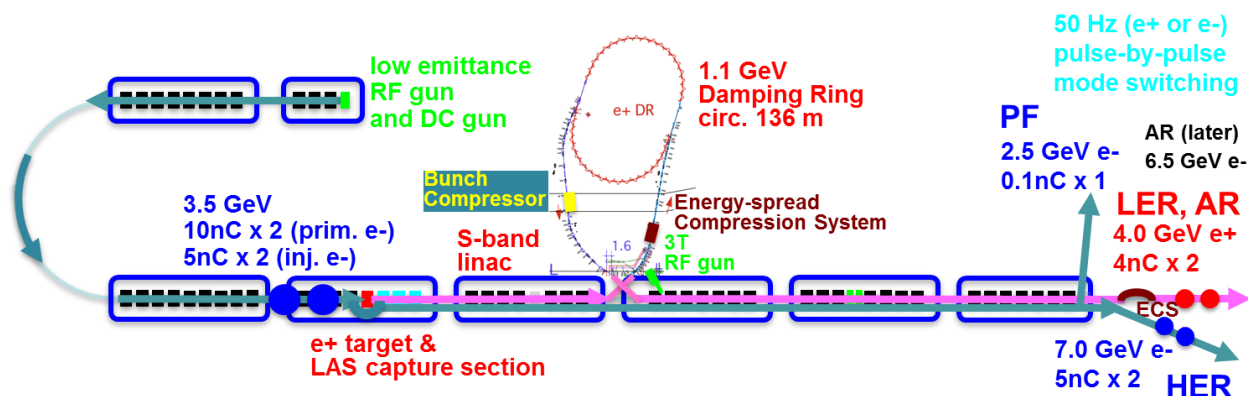


Figure 1: Layout of SuperKEKB injector linac

<sup>#</sup> takuya.natsui@kek.jp

類が配置されている. この入射部部分は, 熱電子銃と RF gun のビームラインが 2 階建て構造となっている. また, RF gun は更に 0 度ラインと 90 度ラインに分かれており, 2 種類の RF gun 空洞をスタディーすることができるビームラインになっている.

熱電子銃により PF, PF-AR リングへのビーム供給, または, 陽電子ビーム生成用プライマリ電子ビーム生成を行い, RF gun により低エミッタンス電子ビームスタディーを行っている. また, RF gun でのフォトカソード電子生成用ハイパワーレーザの開発も進められている.

## 2. 運転統計(FY2016)

2016 年度までの運転統計履歴と故障率を Fig.2 に, 故障率と入射遅延率, RF トリップの推移を Fig.3 に示す. 2010 年 6 月に KEKB 運転を終了し, SuperKEKB に向けてのアップグレードのための工事を進めながら, 2016 年 5 月まで 3 セクター下流のみの運転で放射光リングへの入射を行ってきた. 2014 年度の運転時間は 3448 時間で少ないが, これは, 1~3 月期に放射光リングの運転がなかったためである. 入射器では, この期間を工事やアップグレードのし検討に当てた. 2015 年度は 2 月から HER/LER への入射も開始され例年並みの運転時間で 5296 時間となった. 故障率は 2014 年度より増加しているが, A1 の 2 階建てビームラインの立ち上げや SuperKEKB 対応機器の立ち上げに伴うデバッグ等が必要だったことが主な理由である. 2014 年度に多かった RF トリップは, 陽電子ビームラインのフラックスコンセントレータ(FC)や Large Aperture S-band (LAS)加速管のコンディショニングが進んだことによって 2015 年度は減少したと言える. しかし, 大きな真空悪化が起こる傾向があり, 一度ダウンすると機器の再立ち上げに時間がかかるので電流値を下げたり, 出力パワーを下げる必要があり, その設定でのビーム輸送を確立するために調整時間を設けて入射を一旦中断する場合もある. 時間を要するコンディショニングと判断した場合には, ビームと異なるタイミングでコンディショニングを行い, ビーム入射を妨げないようにしている. 2016 年度も引き続き RF gun, FC などの調整運転が続く故障率, RF トリップ回数などが高めている.

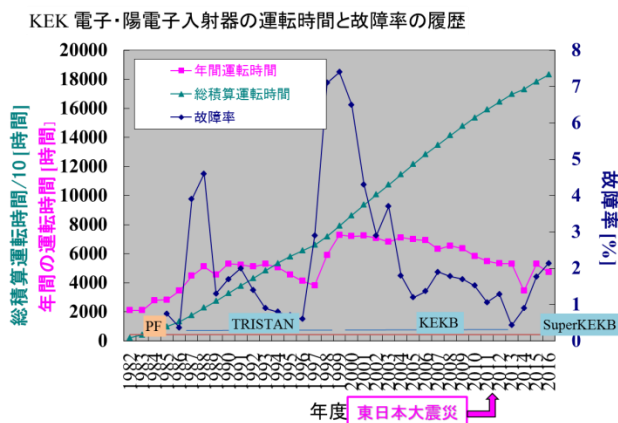


Figure 2: Operation time and machine failure.

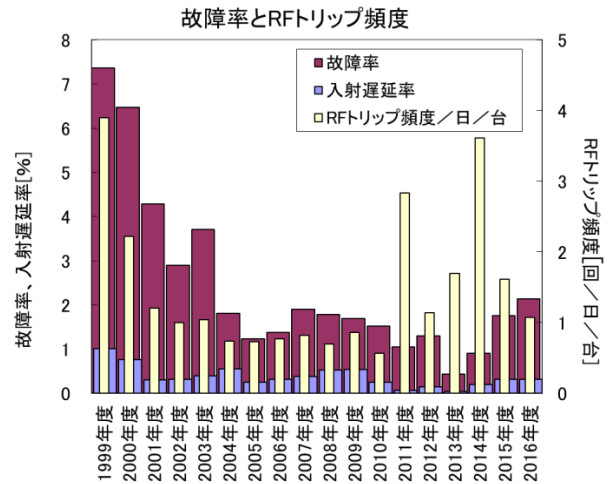


Figure 3: Failure, Injection delay rate and RF trip

## 3. 維持・改善

### 3.1 高周波源

KEK 電子陽電子入射器では, 高周波源として 57 台の大電力クライストロンを使用している. 2011 年より SuperKEKB へのアップグレード作業が開始され, 57 台の高周波源は入射器上流部(23 台), 下流部(34 台)と分かれ 2 つのリングへの入射で必要となる入射器下流部のみ連続運転が行なわれてきたが, 2016 年 2 月から SuperKEKB への入射(Phase-I)が開始され, 全 57 台が連続運転となった. Phase-I は 2016 年 6 月に終了したが, Phase-II に向けてビームスタディーを行なう為, 57 台の連続運転を継続している. このため, 運転時間は増加傾向にある. クライストロンやサイクロトロンでは長期使用のものがあり, パルス電源も長期使用している事から, 経年劣化が原因で起こる不具合が増える事が予想される. 今後も蓄積してきた点検データを参考に不具合の兆候を捉え, 安定した加速器運転を継続できるよう努める[1].

クライストロンモジュレータの電源としては, 2017 年 7 月下旬時点で 13 台のインバータ電源が使用され, 更に低速陽電子実験施設専用ライナックに 1 台, テストスタンドに 5 台が使用されている. また, 2017 年 10 月からの SuperKEKB Phase-II の運転では, 更にインバータ電源 2 台が追加される予定である[2].

Pulse-to-pulse でオプティクスを切り替えながらの 4 リング同時入射においては特に LLRF の改善が必須であり, 新たな小型励振器とその制御システムの導入が進められている. KEK 入射器棟のような大規模な Linac システムに於いては安定した RF の制御が不可欠であり, 現在のフィードバックを用いないシステムでは, SuperKEKB で要求される 0.1 deg 以内の安定度を達成するためには不十分である. 現在, シングルモードファイバーを使ったフィードバックシステムを持つ RF phase コントロールシステムの性能評価を進めており, 短期的, 長期的な安定度の測定を進めている[3].

### 3.2 陽電子ビームライン

フラックスコンセントレータ(FC)の試験においては、2016年度には、テストスタンドにおいて設計電流値である12 kAの長期通電試験を行い、問題が無いことが確認できた。その後、2017年春のメンテナンス期間中にトンネル内の設置を終え、実際のビームラインでの試験運転を開始している。また、陽電子生成ターゲットの破損防止のため温度センサ、冷却水流量センサなどの増強も進めている。

### 3.3 RF gun およびレーザー

RF gunを使用したHER電子ビーム入射はSuperKEKB Phase-IIでは必須になるため、安定運転に向けたスタディーが行われている。特にPhase-IIでは大電荷を要求されることは無く、エミッタンス悪化が起きにくいと考えられるため、電子発生に使用するレーザー結晶をNd:YAGとした。現在は、2 nC程度の電子ビーム生成を目標としたPhase-II向けの波長1064 nm狭帯域Nd:YAGレーザーの調整運転を行うのと並行して、Phase III向けの5 nC低エミッタンス電子ビーム生成用の1030 nm広帯域Yb:YAGレーザーの開発も進められている。

現在、入射器棟A1には2つのRF gunが設置されている。一つは疑似進行波空洞のRF gunでLinacビームライン上に設置されている。二つ目はCut disk structure (CDS)という空洞を用いたRF gunで、こちらはビームラインに90度に設置されている。2017年春にNd:YAGを用いたLaserとこれらRF gunを用いたビームスタディーが行われた。発生電荷量は1 nC程度であったが、0.2%程度の安定度でビームを生成することができ、Linac終端までのビーム輸送、2 bunch運転、エミッタンス測定などが行われた。2 bunchによるビーム運転も問題なく行われ、今後は、電荷量の増加とエミッタンスの低減にむけた取り組みをしていく予定である[4-7]。

### 3.4 パルスマグネット

4リング同時入射を行いながら、SuperKEKB HER/RERには高電荷低エミッタンスのビームを入射するために、3 sector以降のオプティクスはPulse-to-pulseで切り替える必要がある。このために、現在3 sector以降のQ-magnet, steering magnetのパルス化を進めている。2016年度にはパルスQ magnet driverを実際の負荷につなぎ、長期試験を行い問題が無いことが確認されている。2017年夏メンテナンス期間に計68台のパルスマグネットの設置を終えている。現在は、秋からの運転に向けて個々の電源の校正、オペレーションソフトウェアの開発、予備品の準備などを進めている。

## 4. コミッショニング状況

2017年春は主にRF gunを使った電子ビームのスタディーやアーク部分のディスパージョン測定などが行われた[8]。電子ビーム輸送においては1 nC程度の電荷量ながら2 bunch運転において入射器終端までほぼ問題なく輸送が行われることを確認できた。この時のBPMビーム軌道測定結果をFig.4に示す。また、安定度においても現在のレーザーの安定度であれば、Phase IIの運転

には十分耐えられると考えられる。

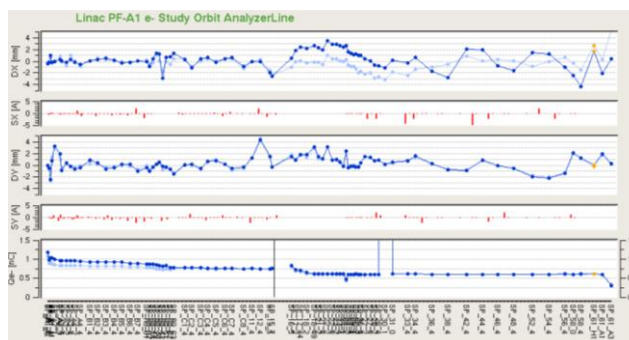


Figure 4: 2 bunches beam transport orbit and charge

## 5. まとめ

KEK入射器では、SuperKEKB Phase-IIへ向けてのアップグレードを進めているとともに、PF, PF-ARの放射光リングへの電子ビーム入射を続けている。特に、2017年夏メンテナンス期間中は、この4リングへの同時入射に向けたパルスマグネットの入れ替え工事、ダンピングリング稼働に向けた準備など、様々なハードウェアの更新があった。また、フラックスコンセントレータもフルスペック運転への準備が進められている。

Phase-IIへ向けてのスタディーも順次行われており、Nd:YAG結晶を使ったレーザーを電子発生に用いたRF gunによる電子ビームの測定なども行われているが、2016年度の故障率やRFトリップ回数は特段多くなっていることは無い。

今後も、放射光リングへの入射、SuperKEKB HER/LERへの入射のためのアップグレードを継続していく。

## 参考文献

- [1] M. Baba *et al.*, “Operation statistics and maintenance activity of RF system in KEK electron-positron linac”, these proceedings, WEP056
- [2] M. Kawamura *et al.*, “Present status of inverter power supplies for modulators in KEK electron-positron linac (2)”, these proceedings, TUP060
- [3] N. Liu *et al.*, “The consideration of RF phase reference distribution system for the injector linac of SuperKEKB”, these proceedings, WEP065
- [4] T. Natsui *et al.*, “RF gun development for SuperKEKB”, these proceedings, TUP004
- [5] D. Satoh *et al.*, “Improvement of photoemission properties of iridium cerium compound for SuperKEKB injector linac”, these proceedings, WEP106
- [6] Xi. Zhou *et al.*, “Yb fiber and Nd:YAG hybrid laser system of RF gun for SuperKEKB's phase-II commissioning”, these proceedings, WEP116
- [7] R. Zhang *et al.*, “Study on stable and high output energy laser system for RF-gun at SuperKEKB injector”, these proceedings, WEP117
- [8] M. Satoh *et al.*, “Present status of SuperKEKB injector linac commissioning (IV)”, these proceedings, TUP005