

KEK 電子陽電子入射器の現状

PRESENT STATUS OF THE KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

宮原房史[#]

Fusashi Miyahara [#]

High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

Abstract

In FY2012, the KEK electron/positron injector linac delivered the electron beam to photon factories (PF, PF-AR) by activating downstream 3 sectors which had been recovered from the Great East Japan Earthquake. It has run for 5331 hours without any serious trouble. The remaining 5 sectors have been being recovered in this year aiming at the upgrade for the SuperKEKB use. This report describes the status of the linac and the upgrade.

1. 入射器の運転概況と現状

KEK 電子陽電子入射器では震災後からこれまで全 8 セクターのうち、下流側の 3 セクターを使い放射光施設 PF, PF-AR へのビーム供給を行っている。これと同時に上流側では SuperKEKB のためのアップグレード^[1,2]を行っている。Figure 1 に入射器の概略を示す。PF, PF-AR へのビーム入射は第 3 セクターに設置された DC 電子銃を用い、2012 年度は計 5331 時間の運転を行った。Figure 2 に 2012 年度までの運転統計と故障率を示す。2012 年度の故障率は 1.3% であり、昨年度と比べると 0.2% ほど増加したが、近年の平均的な値であった。なお、故障率は入射器全体の故障を表しており、PF, PF-AR への入射に使用していない機器や予備装置の故障も含まれている。上流部では復旧の遅れていた損傷した架台の修復、強度増強を行い、SuperKEKB へのアップグレードのための電子銃やアライメントシステムの開発・試験を行ってきた。2012 年 11 月には、上流部復旧の途上ではあったが、入射器全体の健全性確認のため、A セクター DC 電子銃を用いたビーム試験を行い、最上流から最下流までのビーム輸送を震災後初めて確認した。この後、最上流部の A セクターではこれまで使用してきた DC 電子銃下流のバンチャーを取り外し、新たに Disk and Washer 型のレーザーフォトカソード RF 電子銃を導入した。カソードの評価やレーザーシステムの開発、試験を行っている。

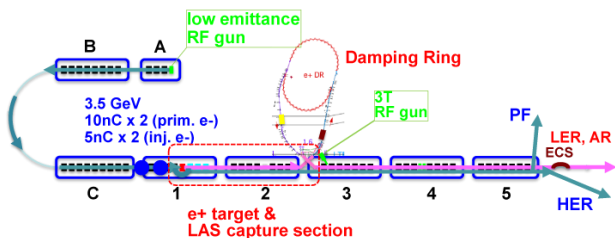


Figure 1: Layout of injector Linac.

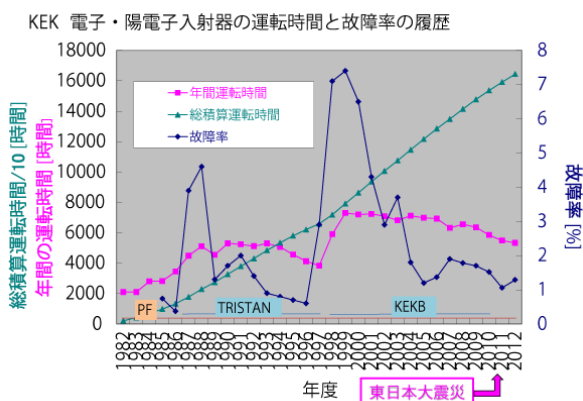


Figure 2: Operation time and machine failure.

2. 運転統計

故障率と入射遅延率、RF トリップの推移を Figure 3 に示す。故障率は平年並みであるが 2011 年以降の入射遅延が減少している。これは SuperKEKB への入射がなくなり、2.5 GeV の PF, 3 GeV の PF-AR への入射のみでビームのエネルギーマージンが増したためにスタンバイ状態のクライストロンが増えたことが理由と考えられる。故障の中では、2012 年 11 月に加速管の冷却水漏れの影響が大きかった。RF トリップは 2011 年から増加しているが、VSWR インターロックが主であり震災による加速管の大気暴露により加速管中での放電が増えたことが原因と思われる。RF トリップは復旧時のコンディショニング中のデータも含んでおり、2011 年度は主に下流側、2012 年度は上流側のコンディショニングを行っている。

[#] fusashi.miyahara@kek.jp

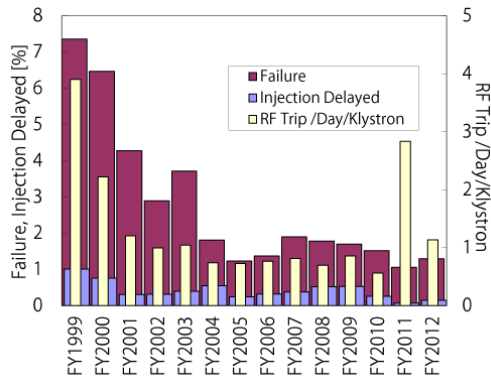


Figure 3: Failure, Injection delay rate and RF trip.

3. 維持・改善

3.1 高周波源

入射器では高周波源として 60 台のクライストロンが設置されており、過去 12 年で約 7000 時間の連続運転を行ってきた。震災後はこのうち下流部 24 台のクライストロンを使って運転を継続してきたが、経年劣化による冷却水配管の水漏れ、クライストロン管内の放電に加えて、震災の影響と思われるクライストロン内部の真空悪化等による故障事例が発生している。今後、これらのトラブルはさらに増えることが予想されるため主要部品の点検整備と予備品整備を随時行い、故障からの迅速な復旧が可能な体制を整えている。さらにクライストロンの各出力や統計データから事前の不具合予測や部品交換を行っている^[3]。PFN コンデンサに関しては過電圧した電圧加速試験を長期間にわたって測定し、使用条件の違いや、トリスタン時代に不具合が多発した初期のモデルとの設計の違いが寿命にどう影響するか分かってきた^[4]。また PFN コンデンサを高速充電するための大電力スイッチング電源（最大出力電圧 43 kV、充電電力 30 kJ/s）の開発を行い 0.2%p-p 以下を実現し、現在長期運転での耐久試験を行っている^[5]。

3.2 電子銃・ビーム輸送

SuperKEKB に向けたレーザーフォトカソード RF 電子銃導入のため、最上流部に新たにレーザー生成用のクリーンルームを用意した (Figure 4 上段)。これまで設置されていたバンチャー部分を Disk and Washer (DAW) 型の A1 RF 電子銃^[6]に置き換え (Figure 4 下段)、2013 年 5 月にはこの電子銃からのビームを全リナックに通し、ダンピングリング入・出射路新設作業に関連する放射線レベルと遮蔽性能確認のための施設検査を行った。Figure 5 に A1 RF 電子銃から J-ARC 部出口 (約 140 m) までのビームプロファイルモニター (BPM) で測定したビーム位置と電荷量を示す。BPM の較正が十分ではない点はあるが、0.1 nC のビームが輸送されている様子が分かる。しかし、J-ARC 部では一様に電荷量が下がっており、ビームスタディからビームが四極

磁石の中心を通っていないことが分かった。後に詳細な位置測定を行ったところ AB セクター直線部と J-ARC 部 (入口 SP_R0_01~出口 SP_R63) に大きなミスアライメントがあることが分かったため、修正を行っている。

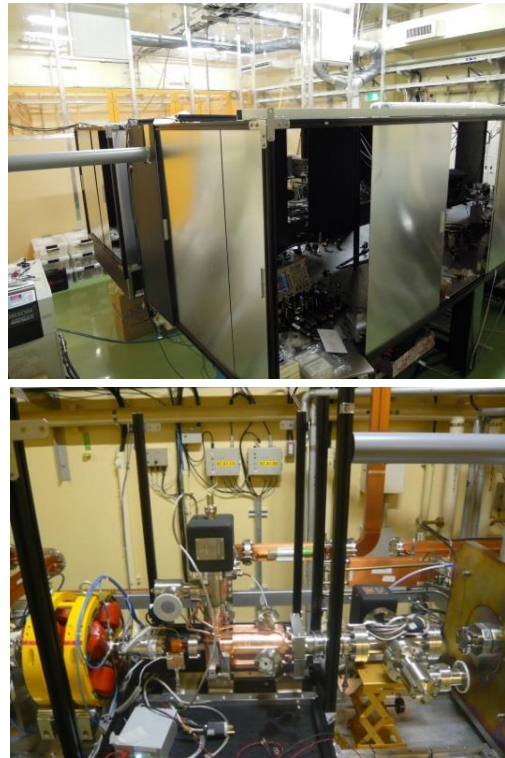


Figure 4: A1 laser room (upper) and Disk and Washer type photocathode RF Gun (lower).

レーザートラッカーや傾斜計を用いた測定から、トンネルの接合部を中心に 1 mm オーダーで床変動の疑いがあることが分かった。現在、より詳細な測定と長期間のデータ収集を行っているが、アクティブムーバー付の架台導入の検討も始めている。

加速管に関しては震災時の大気暴露の影響と思われる放電の増加が見られる。このほかに経年劣化が原因と思われるカプラー部での内部と外側への冷却水漏れがそれぞれ 1 件発生し、この 2 つの加速管に関しては予備品と交換を行った。

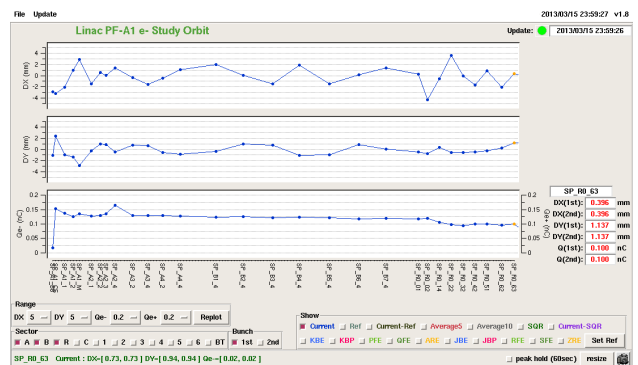


Figure 5: Beam Position and Charge.

3.2 ビームロス診断とワイヤースキャナへの適用

今期夏のシャットダウン中に第 2 セクターにビーム診断用のワイヤースキャナを新たに設置する。また、これまでワイヤースキャナ挿入に伴う二次粒子の検出は光電子増倍管を利用していたが、S/N 向上のためビームロス測定用に敷設された光ファイバーの信号を利用するようにシステムの変更を行っている。ビームロス測定用光ファイバーは第 5 セクター下流側など複数の箇所に増設された。PF 入射用のビームラインでは震災後パルス偏向電磁石の後で電荷量が下がる問題があった。偏向磁石下流の BPM までの距離が長く、ビームロスを起こしている場所の特定が困難であったが、新たに敷設したファイバーを用いたビームロス測定からロスの場所が偏向磁石内のビーム分岐ダクトであることが特定できた^[7]。

3.3 ビーム制御システム

制御システムに関してはトリスタン時代から追加を繰り返して構築されたトリガー信号生成の回路が複雑で冗長な部分があったことと、古い専用 NIM モジュールなどは予備品の入手が困難となり保守性に問題が出てきた。そこで、SuperKEKB へのアップグレードの変更にも備えてよりシンプルな構成へと回路の変更を進めている。クライストロンや BPM 等のトリガーのタイミングはこれまで NIM 回路の途中に専用のモジュール TD4V (VME) 経由して決定していたが、Micro-Research Finland (MRF) のタイミングシステムを用いた統合的なシステムへの変更を進めている。各機器の操作、状態確認は Tcl/Tk, Python/Tk を用いた運転アプリケーションを用いているが、機器担当者が制御室とは別の場所から状態を確認するためには X-Window System を用いた環境を整備する必要があり、利便性に欠ける点があったため、CGI や php を用いた Web アプリケーションも用意していた。しかし、この方法はリアルタイム性が低く、機器の変化を早く表示できない問題があった。そこで、新たに Web サーバとクライアント間で双方向通信が可能でリアルタイム性の高い WebSocket プロトコルを用いた運転情報パネルを開発中である^[8]。また、加速器の安定運転には計算機と制御機器の安定なネットワーク通信が必要である。これまでネットワークのトラブルで運転が一時遅延するなどの事例も発生していた。そこでより高性能かつ信頼性の高いネットワークシステムへ更新を行った^[9]。

2013 年 5 月の J-PARC ハドロン施設での事故を受け、安全系の確認と緊急時のマニュアル整備を再度行い、KEK 職員および、オペレータの再教育を行った。また事故時に迅速に対応できる様に事故を想定した訓練も計画している。

4. 入射器アップグレード

4.1 低エミッタンス電子ビーム生成

SuperKEKB では KEKB の 40 倍のルミノシティを達成するために電荷 5 nC、エミッタンス 20 mm-mrad の電子ビームが要求される。電子銃はこれまでの熱陰極 DC 電子銃に代わり、フォトカソード RF 電子銃を使用する。これまで第 3 セクターと最上流の A セクターで DAW 型の RF 電子銃を用いた試験を行っており、第 3 セクターの RF 電子銃から最大 4 nC のビーム生成に成功している。レーザー光源として大電流を目指すのに重要な時間構造の操作を可能にする広帯域の Yb ファイバー発振器および増幅器を用いたレーザーシステムの開発を行っている^[10]。現在、パルスエネルギーが 1 mJ、中心波長 258 nm の紫外光生成が可能である。光源の繰り返し周波数は主加速周波数の S-band と同期させるために光源の繰り返し周波数を 51.98 MHz でロックしている。高電荷の電子ビームを空間電荷効果によるビーム発散とエミッタンス増加を抑制しつつ輸送するためには、カソード表面での縦方向、横方向のレーザー分布の制御が必要であり、加速管中の横方向ウェーク場による射影エミッタンス増加と縦方向ウェーク場によるエネルギー分散の両者を適宜抑えるためにも時間構造の最適化が要求される。現在、矩形的時間構造をもつレーザーを実現するためのシステムを開発中で、ストリークカメラを用いてレーザーの時間構造を測定し、制御試験を行っている^[11]。またカソードとしては、新しく採用した Ir₅Ce が安定で高い量子効率（波長 213 nm で 9×10^4 ）を持ち、十分な性能であることが明らかになり、これに準拠したカソードを開発の中心においている^[12]。

4.2 陽電子ビームライン

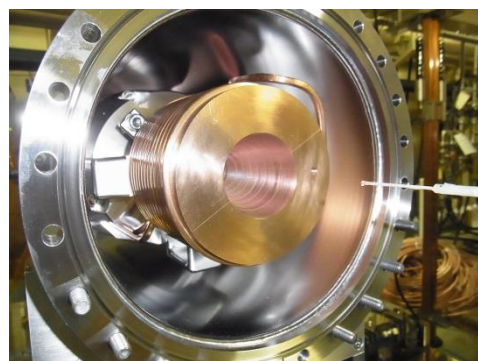


Figure 6: Flux Concentrator.

陽電子捕獲部はタングステン標的とパルスソレノイド (Flux Concentrator : FC) とそれに続く DC ソレノイドを備えた 6 本大の口径 S-band 加速管で構成される。タングステン標的には直径 2 mm の穴をあけて、リング入射用の電子ビームはオフセット軌道なくこの穴を通る。陽電子生成用の電子ビームは軌道をずらしてあり、標的保護のためのスポイラーに当たった後、標的に入射する設計とした^[13]。FC は螺旋状にスリットをもつ複雑な形状で低周波数の機械共

振特性が予想されることや加工製作上の難点を考慮して、はじめは疲労特性が優れている耐熱銅合金 (HRSC) を用いて試作機を製作・試験した。しかし現在では通常の無酸素銅でも可能だろうとの判断ができて無酸素銅 (OFC) で製作した FC を用いるべく進めている。FC の製作と同時に電源の開発も進めており、試作機としてクライストロンモジュレータ電源の PFN 経路を改造してピーク電流 6 kA、パルス幅 $6\mu\text{s}$ (半正弦波) の電源を製作し、磁場測定や大電流試験を行っている^[14]。Figure 6 に試作機の磁場測定の様子を示す。当初 FC の下流には陽電子の大アクセプタンスを実現でき、サテライトバンチも抑制できる S-band の 5/11 倍の周波数をもつ L-band 加速管を採用する予定であったが、コスト高とシステムの大型化の問題から、大口径の S-band 加速管で運転を開始することにした。サテライトバンチの抑制は、粒子トラッキングシミュレーションによる評価から S-band を用いた場合も加速電場を 10 MV/m から 14 MV/m 以上に増やすことで可能となることがわかっている^[15]。現在、大口径 S-band 加速管の製造は終わっており、2013 年夏期に陽電子ライン用に新たに設計製作した架台への設置作業を進める。また L-band 加速管を用いた場合は、DC ソレノイドで囲むことのできないカプラー—導波管部の磁場の落ち込みによる陽電子収量の低下とシステムの大型化の問題を避けるために、RF の出力カプラー部分を RF ロードに置き換えたコリニアロードを採用する必要がある、カンタル (Al-Cr-Fe 合金) を空洞内壁に溶射したコリニアロードの開発を行ってきた。この技術は S-band にも転用可能であるため、開発を継続して、表面にカンタルをコーティングした定在波型の空洞を製作し高電力試験を行った。これから 10 MV/m 級の高電界特性性能には問題無いことが確認できた^[16]。

4.3 アライメント

SuperKEKB では入射器の各コンポーネントの設置精度としてローカルで $\sigma = 0.1\text{ mm}$ 、グローバルに $\sigma = 0.3\text{ mm}$ が要求されている。入射器は最大直線部で 500 m あり、これまでは全体を通しての高精度のアライメントする方法が確立されていなかった。そこでこれまで同様の分割光センサーを用いるが、新しく高性能なレーザービームを開発して、500 m の真空ダクト中を通して一挙にアライメント計測できるようになった。アライメントの基準となる長基線に He-Ne レーザー (10 mW) を用い、500 m 先の分割光センサー出力をモニターして出射点のビーム出射角度をフィードバックするレーザー光学系を構築し、500 m 先で $\pm 40\mu\text{m}$ の位置安定性を達成した^[17]。

4.4 ビーム診断

入射器では低エミッタンスビーム輸送のため、ビームの位置測定精度 $10\mu\text{m}$ 以下を目標としている。入射器の BPM はすべてストリップライン型であるが、現在使用しているオシロスコープを用いた信号の読み出しシステムの位置測定精度は $30\mu\text{m}$ 程度であり、要求を満たしていない。そこで新しく BPM

の読み出しシステムの開発を行っている。帯域制限フィルタを基板としたアンダーサンプリング方式を採用したシステムを開発し、実際にビームを使った測定で分解能 $7\mu\text{m}$ を達成した^[18]。また、これとは別に 2 バンチ運転 (96 ns 間隔) 対応と BPM の各電極にパルスを与えることが可能な校正パルス発生器を備えた読み出しシステムの開発も行っている^[19]。開発の途中段階ではあるが、パルス信号を用いた測定で $10\mu\text{m}$ の分解能を達成しており、分解能向上のための開発を継続している^[19]。

4.5 タイミング制御

SuperKEKB 運転時には LER, HER の他にダンピングリング、PF、PF-AR へのビーム供給が必要になる。入射器では 50Hz でこれらのリングへのビーム供給を切り替えることとダンピングリング、LER、HER の任意のバケットにビームを入射することが要求され、非常に複雑な制御が求められる^[20]。現行の MRF のタイミングシステムを拡張、改良しバケットセレクション機能を備えたトリガーシステムを開発している^[21]。

5. 今後の予定

2013 年 9 月から DAW 型電子銃をよりビームの収束力の強い疑似進行波型^[22]の RF 電子銃に置き換え、低エミッタンス大電流電子ビームのコミッシュニングを開始する。陽電子ビームに関しては秋までに大口径 S-band 加速管を設置し、年末から陽電子コミッシュニングを予定している。現在 KEKB と PF-AR のビーム輸送ラインは共通であるが、PF-AR と SuperKEKB への入射を両立するために PF-AR への直線入射路の建設を開始した^[22]。

参考文献

- [1] T. Natsui, et al., “SuperKEKB に向けた入射器アップグレード”, in these proceedings.
- [2] K. Furukawa, et al., “High-intensity and Low-emittance Upgrade of 7-GeV Injector towards SuperKEKB”, Proceedings of the IPAC2013, Shanghai, China, May 13-17, 2013.
- [3] M. Baba, et al., “KEK 電子陽電子入射器における高周波源の運転保守”, in these proceedings.
- [4] H. Honma, et al., “KEKB 入射器クライストロン電源用 PFN コンデンサー寿命試験結果”, in these proceedings.
- [5] O. Endo, et al., “大電力スイッチング電源の開発”, in these proceedings.
- [6] T. Natsui, et al., “High Charge Low Emittance RF Gun for SuperKEKB”, Proceedings of the IPAC12, New Orleans, USA, May 20-25, 2012.
- [7] Y. Yano, et al., “Linac のパルスベンディングマグネット付近のビームロス調査”, in these proceedings.
- [8] T. Kudou, et al., “KEK 入射器における WebSocket を用いた運転情報表示パネルの開発”, in these proceedings.
- [9] S. Kusano, et al., “KEK 電子陽電子入射器の制御ネットワーク更新”, in these proceedings.
- [10] X. Zhou, et al., “SuperKEKB に向けた DAW 型 RF 電子銃用 Yb 系ハイブリッドレーザーシステム”, in these proceedings.

- [11] M. Yoshida, et al., “SuperKEKB 入射器用低エミッタンス・高電荷電子ビームに向けたバンチ内時間構造制御”, in these proceedings.
- [12] D. Sato, et al., “Development of Better Quantum Efficiency and Long Lifetime IrCe Photocathode for High Charge electron RF Gun”, Proceedings of the IPAC2013, Shanghai, China, May 13-17, 2013.
- [13] L. Zang, et al., “SuperKEKB Positron Source Target Protection Scheme”, Proceedings of the IPAC2013, Shanghai, China, May 13-17, 2013.
- [14] X. Zhou, et al., “SuperKEKB に向けた DAW 型 RF 電子銃用 Yb 系ハイブリッドレーザーシステム”, in these proceedings.
- [15] T. Kamitani, “Positron Source”, 18th KEKB Accelerator Review Committee, Tsukuba, Japan, March 4-6, 2013. <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2013/>
- [16] F. Miyahara, et al., “カンタル溶射空洞の RF コンディショニングと高電力特性”, in these proceedings.
- [17] T. Suwada, et al., “KEKB 入射器における高精度レーザーアライメントのための 500m 長レーザー長基線の伝送及び安定性特性”, in these proceedings.
- [18] M. Satoh, “SuperKEKB 入射器へ向けた BPM データ収集系アップグレード (II)”, in these proceedings
- [19] R. Ichimiya, et al., “SuperKEKB に向けた電子・陽電子入射器 Linac 用ビーム位置モニターの読み出しシステム開発”, in these proceedings.
- [20] H. Kaji, et al., “Event Timing System による SuperKEKB 入射制御”, in these proceedings.
- [21] H. Kaji, et al., “Event Timing System による SuperKEKB 入射制御”, in these proceedings.
- [22] T. Natsui, et al., “Quasi Traveling Wave Side Couple RF Gun for SuperKEKB”, Proceedings of the IPAC2013, Shanghai, China, May 13-17, 2013
- [23] PFNews, Vol.31, No.1, May, 2013. <http://pfwww.kek.jp/publications/pfnew/>