

SuperKEKB 入射性能向上への KEK 電子陽電子入射器アップグレード

UPGRADE STATUS OF KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC FOR IMPROVEMENT ON BEAM INJECTION TO SuperKEKB

惠郷博文[#], 明本光生, 荒川大, 飯田直子, 岡安雄一, 柿原和久, 片桐広明, 紙谷琢哉, 川村真人, 佐武いつか, 佐藤政則, 設楽暁, 設楽哲夫, 周翔宇, 白川明広, 諏訪田剛, 清宮裕史, 染谷宏彦, 竹中たてる, 田中窓香, 張叡, 中島啓光, 夏井拓也, 古川和朗, 東保男, 肥後寿泰, 松下英樹, 松本修二, 松本利広, 三浦孝子, 宮原房史, 矢野喜治, 横山和枝, 吉田光宏, 由元崇, 王迪, 王盛昌
Hiroyasu Ego[#], Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Naoko Iida, Yuichi Okayasu, Kazuhisa Kakihara, Hiroaki Katagiri, Takuya Kamitani, Masato Kawamura, Itsuka Satake, Masanori Satoh, Satoru Shitara, Tetsuo Shidara, Xiangyu Zhou, Akihiro Shirakawa, Tsuyoshi Suwada, Yuji Seimiya, Hirohiko Someya, Tateru Takenaka, Madoka Tanaka, Rui Zhang, Hiromitsu Nakajima, Takuya Natsui, Kazuro Furukawa, Yasuo Higashi, Toshiyasu Higo, Hideki Matsushita, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Fusashi Miyahara, Yoshiharu Yano, Kazue Yokoyama, Mitsuhiro Yoshida, Takashi Yoshimoto, Di Wang, Shengchang Wang
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

For experiments on both elementary particle physics and synchrotron radiation science, the KEK electron/positron injector linac provides up to 7 GeV electrons and 4 GeV positrons to four storage rings (SuperKEKB HER/LER, PF ring, and PF-AR) by means of simultaneous top-up injection. Especially low emittance and high charge beams are indispensable and must be injected stably against short beam lifetimes less than 10 minutes in the LER and HER. Therefore, new pulsed magnets with large apertures, fast kicker magnets, S-band high-gradient accelerating structures and intelligent beam control by machine learning have been introduced to upgrade the injection performance. In this report, we show the outlines of the upgrade and the present status of the improved performance.

1. はじめに

素粒子物理学実験と放射光科学実験のために、高エネルギー加速器研究機構(KEK)電子陽電子入射器は4つの蓄積リング(SuperKEKB HER/LER、PFリング、PF-AR)に同時トップアップ入射にて電子、陽電子ビーム供給している。この入射スキームでは、各リングから要求される複雑なビームパラメータを50 Hzで高速に切り換えながらビーム生成と加速を行う[1]。

SuperKEKBは電子陽電子コライダーで、7 GeV電子蓄積リング(HER)と4 GeV陽電子蓄積リング(LER)で構成される[2]。大量のB中間子生成のため、衝突点でビームサイズを極限まで絞るナノビーム・スキームを使用して、 $6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティ到達とBelle IIによる 50 ab^{-1} のデータ収集を目指し、フレーバー素粒子実験を通して標準モデルを超える新物理の発見が期待されている[3]。SuperKEKB HER、LER両リングの蓄積電流は1 Aを超え、ビーム寿命は10分以下となるため、同時トップアップ運転においても、低エミッタンスかつ大電荷の安定ビーム入射が求められる。Table 1にSuperKEKB入射の要求ビームパラメータを示す。常時4 nCの大電荷ビーム入射を達成するために4年計画で入射器のアップグレードが進行中で[4]、入射性能を向上させる新たな大口径パルス電磁石、高速軌道補正キッカー電磁石、高電界加速管、機械学習によるビーム制御等が導入されている。本報告では入射器アップグレードの全体像と現状について報告する。

[#] ego@post.kek.jp

2. 電子陽電子入射器におけるビーム生成

2.1 入射器の構成

Figure 1に入射器の構成図を示す。この入射器は世界的にも例を見ない複合機器で構成されており、多品質の電子・陽電子ビームを生成する全長700 mのSバンド(2856 MHz)線型加速器である。定格20 MV/mの加速電界でビーム加速を行う。この線形加速器は、「セクター」と呼ばれる9つの区域に分けられて運用されており、いくつかのセクターにはビーム加速以外に特有の機能を持つ。Aセクターでは熱電子銃と光陰極型RF電子銃が設置され、電子ビーム生成とビーム成形が行われる。この2つの電子銃は下流の蓄積リングから要請されるビーム性能に応じて使い分けられている。生成された電子ビーム

Table 1: Injection Beams Required for SuperKEKB

	positron (LER)	electron (HER)
Beam energy [GeV]	4.0	7.0
Normalized emittance [μm] (horizontal/vertical)	100/15	40/20
Energy spread [%]	0.16	0.07
Bunch charge [nC]	4	4
Bunch number per pulse	2	2
Repetition rate (max) [Hz]	23	25

は B セクターから J-ARC と呼ばれる 180° 周回部を経て、C セクターへ到達した後、後続のセクターに配置された加速管群によって各蓄積リングに必要なエネルギーへ加速されていく。最終 6 セクターには陽電子用エネルギー圧縮システム ECS (Energy Compression System) とビーム振り分け装置群が設置されている。

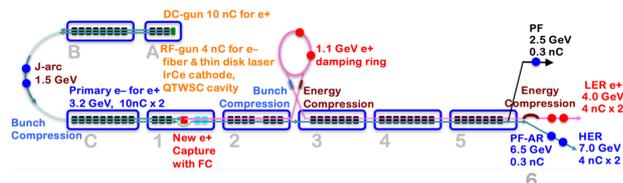


Figure 1: Component layout of the KEK injector linac.

2.2 電子ビーム生成

PF リング、PF-AR 用電子ビームは、熱電子銃によって生成され、電荷量 0.6 nC、バンチ長 2 ns のシングルバンチビームである。114.24 MHz および 571.2MHz のサブハーモニックバンチャー 2 台、S バンドのプリバンチャーおよびバンチャーによって 10 ps へ圧縮された後、1.5 GeV まで加速されて J-ARC を通り、Fig. 2 で示したダイアグラムにて必要エネルギーまで加速される。PF リング用電子ビームは第 2 セクターまで加速された後、第 3 セクター以降では減速されて 2.5 GeV に調整される。これは、第 2 セクターまでは直流電磁石による共通オプティクスを使用し、第 3 セクター以降は 50 Hz で切り換え動作するパルスマグネット群でエネルギーの異なるビーム毎に適切な収束を行うためである[5]。

HER には、光陰極型 RF 電子銃を使用して電荷量 4 nC、バンチ長 20 ps の低エミッタンス 2 バンチ電子ビームを生成する[6]。バンチ間隔はリングとの同期を考慮した周波数 10.38 MHz で決まる 96.3 ns である。光陰極には量子効率が高く、長寿命のイリジウム・セリウム合金 Ir_7Ce_2 を採用している。試験運転では、5 nC のビーム生成を実現し、入射器出口で電荷量 4 nC となる 7 GeV ビーム加速も成功している。ただし、エミッタンスやビーム安定性は実用域には到達しておらず、低エミッタンスを維持して安定運転できる電荷量は 2 nC である。現在、安定した高出力に向けて、RF 電子銃の改良が進められている[7]。J-ARC のオプティクスは当初、achromatic かつ isochronous となっていたが、ウェイク場によるエミッタンス悪化を抑えるため、バンチ長圧縮する必要があり[8]、現在は $R_{56} = 0.3 \text{ m}$ に設定して、J-ARC 通過後のバンチ長を 7 ps (FWHM) に圧縮している。その後、C セクター以降の加速管群によって 7 GeV まで加速される。

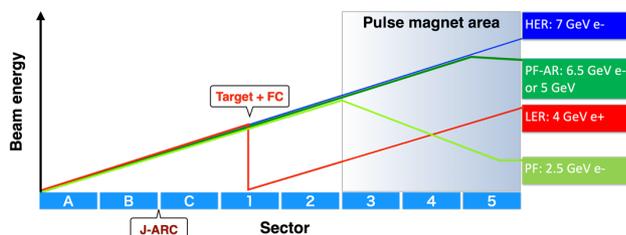


Figure 2: Energy gain diagram.

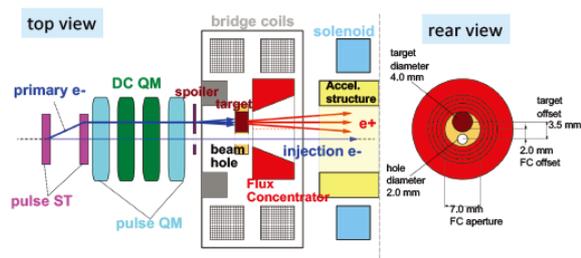


Figure 3: Positron generator.

2.3 陽電子ビーム生成

陽電子生成用 1 次電子ビームとして、熱電子銃で 2 つのグリッドパルサーを使用して電荷量 10 nC、96.3 ns 間隔の 2 バンチビームを生成する。A、B セクターで 1.5 GeV まで加速後、J-ARC を通過した 1 次電子ビームは C、第 1 セクターで 3.2 GeV まで加速され、1 セクター中央部で陽電子に変換される。陽電子生成部はターゲットとフラックスコンцентрレータ (FC) から構成される (Fig. 3) [9]。ターゲットブロックは直径 4 mm のタングステンターゲットと直径 2 mm のビームホールを持つ。パルス電磁石を使用して 1 次電子ビームを、このターゲットに衝突させるが、2.2 で記した電子ビームは、ビームホールを通過していく。

生成された陽電子は、FC とブリッジコイルによる断熱圧縮によって集束され、並行ビームとなって、ソレノイド電磁石内に収められた大口徑 S バンド加速管[10]で集群と加速を受けていく。第 2 セクター出口までに 1.1 GeV に加速され、専用ダンピングリングへ出射される。ダンピングリングによって低エミッタンス化された陽電子ビームは入射器に戻され、第 3 から第 5 セクターの加速管群で 4 GeV まで加速される (Fig. 2)。最終第 6 セクターに設置された陽電子用 ECS でエネルギー圧縮を受けて LER へ出射される。

2.4 同時トップアップ運転

SuperKEKB の短いビーム寿命への対応と放射光施設の実験を同時に成立させるために、4 リング同時トップアップ入射が行われている[1]。この実現のためにパルス電磁石やパルスビーム診断システムなどのさまざまな高精度パルス動作機器が開発され、また広域同期ビーム制御機構の構築により、2 章で示した電子、陽電子ビームをパルス毎に独立して運用することができるようになっていく。一つの入射器が 50 Hz でイベント駆動され、4 種の仮想的な入射器として、あたかも 4 つの蓄積リング専用入射器があるかのごとく動作する (Fig. 4)。これにより、精度の高い素粒子衝突実験と放射光実験を同時に可

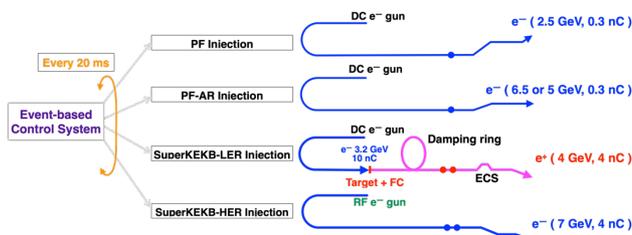


Figure 4: Virtual injector operation.

能にするだけでなく、PF リング、PF-AR 放射光実験を行う一方で、SuperKEKB 向けのビーム開発を行うなどの自由度を与え、それぞれの仮想的入射器でビームの改良が続けられている。

3. 入射性能向上へのアップグレード

3.1 J-ARC ビームマッチング

J-ARC 入口、出口部には上流、下流の周期収束系とのオプティクスマッチングを取るために直流四極電磁石が計 6 台設置されていた。2 章で記したように J-ARC に 4 種の電子ビームを通すが、直流四極電磁石ではビーム毎に独立なマッチング調整を行うことはできなかった。シミュレーションにより、入口、出口部を各 4 台のパルス四極電磁石に置き換えることで、すべてのビームに対して広範囲のマッチングが取れることがわかった。

陽電子生成用 1 次電子ビームが J-ARC でロスし易いのは、元々エミッタンスが大きい上に mismatching の影響でビームサイズが更に広がるためである。パルス四極電磁石を導入すると、HER 用低エミッタンス電子ビームに影響を与えることなく、独立にマッチング調整を行えるようになり、ビームロスを緩和することができる。また、J-ARC を出たビームに対して、設計オプティクスと整合した状態を実現することは入射器のビームモデル計算と実際のビームの合致精度を向上させていくためにも有益である。

サイズの大きいビームを通すため、大口径の新型パルス四極電磁石、および、600 A 高出力かつ 80% 以上のエネルギー回収率を誇るパルス駆動電源を新たに開発して 2023 年に設置した (Fig. 5)。コイルの発熱問題のため、現在は 7 台で運用しているが、2024 年夏期保守期間にコイルを水冷化し、秋からの運転で当初計画通りの 8 台運用を行う。

3.2 陽電子捕獲部の電子ビーム収束強化

陽電子生成ターゲットより下流の第 1, 2 セクターのビーム捕獲領域では直流電磁石が利用されており、そのビーム収束の強さは、エネルギーが低く、エミッタンスの大きな陽電子がなるべくロスせずに通るように最適化されている。そのため、3 GeV を超えるエネルギーを持つ

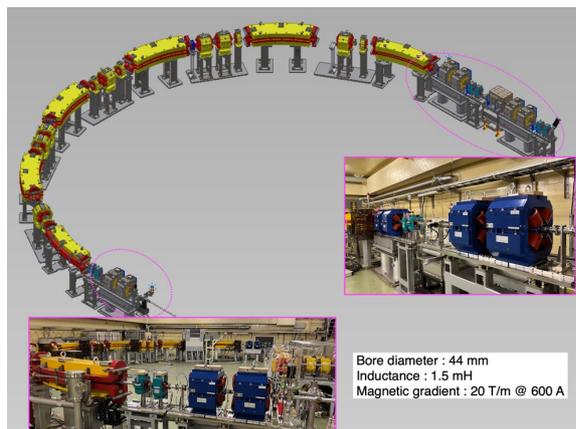


Figure 5: Large-aperture pulsed quadrupole magnets at the entrance and exit of J-ARC.

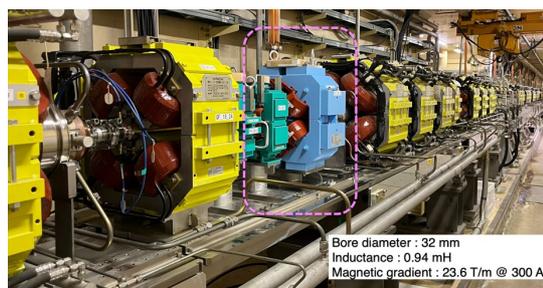


Figure 6: Large-aperture pulsed quadrupole magnet installed in the positron capture section.

電子ビームにとっては β 関数が大きく、緩い収束のオプティクス (compatible optics) で通り抜けていく。そのため、電子ビームへのエミッタンス増大因子に対して脆弱な領域となっていた。この状況を改善するために 4 台の直流四極電磁石を大口径パルス四極電磁石に置き換え、陽電子用オプティクスには影響を与えず、独立的に電子ビームに対して β 関数を絞ることができるようになった。Figure 6 に設置した大口径パルス四極電磁石を示す。シミュレーション [11] により、電子ビームのバンチ電荷量が 4 nC の場合でもエミッタンス増大が半減され、オプティクス上の脆弱性改善が示されている。

3.3 機械学習によるビーム制御

陽電子生成とビーム伝送に関係する RF 加速位相、100 台以上の DC ステアリング、四極電磁石に対して機械学習を用いた陽電子電荷量を最大化する自動調整を行った [12]。これにより、第 2 セクター終端のビームダンプ前で、2 バンチビームで過去最高となる電荷量 5 nC ビームの生成に成功した (Fig. 7)。アップグレード前の最大電荷量は 3 nC である。この結果には、今回導入した

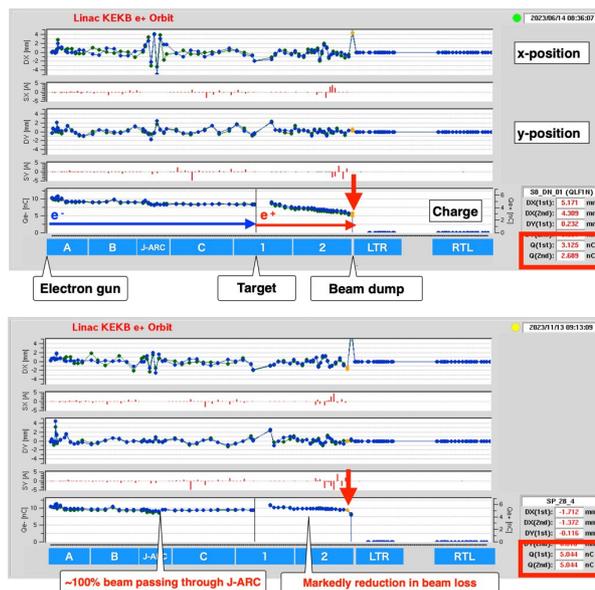


Figure 7: Orbits and charges of the positron beams (Top) before and (Bottom) after installation of the large-aperture quadrupole pulsed magnets and beam control by machine-learning. Blue and green closed circles show the data of 1st and 2nd bunches, respectively.

大口径四極電磁石によるビームマッチング性能の向上が大きく寄与しており、Fig. 7 下図に示すように、電荷ロスがほとんどなく、1次電子ビームがJ-ARCを周回し、陽電子捕獲部で生じていた電荷ロスも大幅に改善された。現在、機械学習制御で1度に調整する機器パラメータは16個であるため、区域、機器区分毎に最適化を行なった。また、ベイズ最適化アルゴリズムとダウンヒルシンプレックス法の2つを併用してビーム調整を行っている。このように人の手では不可能な大量の機器を精密調整することにより、シミュレーション結果に匹敵する陽電子生成率と電荷量のビーム生成が可能となった。今後は他のビーム調整に、この最適化手法を拡大して適用し、ビーム調整の自動化を推進する。

3.4 高速キッカーによる2バンチ軌道補正

HERへの96.3 ns 間隔2バンチ入射運転において、第2バンチが垂直方向に位置ずれすると入射効率が低下する。そのため、第2バンチのみ軌道補正する装置が必要となった。その解決法として導入したのが高速パルスキッカー電磁石で、KEK 満田氏らが開発したものである[13]。セラミックスパイプにコイルを直接埋め込んだ構造体で、高速パルスドライバーと組み合わせれば、100 ns レベルで駆動が可能である[14]。2022年にJ-ARC 入口に設置したプロトタイプ機にて、入射器での軌道補正性能は実証済みである。今回、新たに入射器出口、および、第3スイッチヤード(SY3:各蓄積リングへビーム振り分ける領域)に高速キッカーを設置し、HERへの第2バンチビームの入射効率改善と安定化が期待された(Fig. 8)。しかしながら、このキッカーを高速駆動するため、ドライバーを直結する必要がある。残念ながら、高放射線区域のSY3キッカー用ドライバーが損傷したため、定時運用には至らなかった。現在、設置場所の変更を検討中である。

3.5 ビーム診断高度化

SY3に設置されているビームダンプラインを改造して、HER入射ビームの一部をパルスの(最大5 Hz)に取り出し、ビーム診断や入射器単独ビーム調整、ビーム実験ができるように改造する[15]。Figure 9に機器レイアウトを示す。現状のビーム運転では、機器調整してHER入射ビームのチューニングを行っても外部環境などの影響を受けてビーム性能が日時変動する。入射効率を安定化させるためには、入射ビームの性能を常時診断し、最適値に保つ必要がある。改造ラインには高精度のビーム位置(精度7~30 μm)、プロファイル(精度25 μm)、エネルギー広がり(精度0.01%)モニタを新設する。ビーム破壊的



Figure 8: Fast vertical kicker magnet at the end of the KEK injector linac.

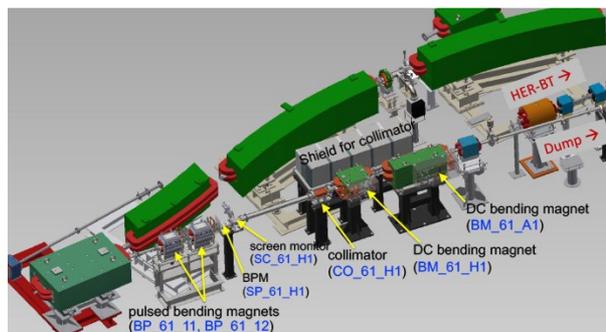


Figure 9: Design of the beam extracting section for the new beam diagnostic line.

モニタを含むが、入射ライン(HER-BT: Fig. 9)と異なるラインになるため、入射ビームには影響しない。

3.6 エネルギー広がり抑制

HERへの2 nC 入射ビームには設計より大きいエネルギー広がり0.05%程度のジッターがあり、入射効率の低下の一因と考えられている。この大きなエネルギー広がりジッターはRF等の安定性不足が原因と推定されているが、速やかに解消することは難しい。そこで、入射器からHERビーム輸送路に入った区域の偏向電磁石によるR₅₆を利用して、エネルギー圧縮システム(HER-ECS)を構築する。設計パラメータ、R₅₆ = -0.6 m、加速電圧70 MVで計算した場合の入射効率をFig. 10に示す。横軸は第3~5セクターでのRF加速位相のずれを表している。シミュレーション結果よりHER-ECS設置によって、高い入射効率を維持できる安定領域が拡大されることがわかる。現在、必要コンポーネントの調達、冷却系や給電系設備の工事が進められている。2024年度内に設置工事を完了し、大電力高周波加速システムのコンディショニングや全体システム調整を経て、2025年度より運用を開始する。

3.7 Sバンド高電界加速管

約40年に渡り入射器で使用されているPFタイプSバンド加速管が経年劣化し、水漏れや放電多発などが生じてきている。劣化した加速管の修復は困難であるため、代替機となる新型高電界Sバンド加速管の開発を行った[16, 17]。加速管はTM₀₁-2 π /3モード2856 MHz進行波準定勾配型で、シャントインピーダンスは61.7 M Ω /m、

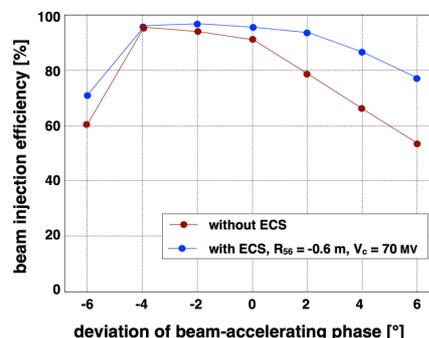


Figure 10: Simulations of HER beam injection efficiency improved by using the new ECS in the HER beam transport line.



Figure 11: S-band high gradient travelling-wave-type beam-accelerating structures installed in the beam line.

定格 40 MW 入力で 25.9 MV/m の加速電界を発生する。新規開発にあたり、放電抑制のため表面電界を下げるディスクアイリスエッジの楕円形状化、内面エッジを排除した対称性補正カプラー、4 nC の大電荷 2 バンチビーム安定加速のため HEM11 ウェイクの抑制などの機能を付した。2023 年夏までに 16 本の新型加速管がビームラインに設置され、順調にビーム加速を行っている (Fig. 11)。しかしながら、水漏れ劣化加速管は毎年発生しており、その対策として、新たに 12 本の加速管を製作している。

4. まとめ

KEK 電子陽電子入射器は SuperKEKB HER/LER、PF リング、PF-AR ヘットアップ入射運転を行っている。SuperKEKB の両リングに対して、設計された低エミッタンスかつ大電荷の安定ビーム入射を実現させるため、4 年計画で入射器のアップグレードが進行中である。大口径パルス四極電磁石、高速軌道補正パルスキッカー電磁石、機械学習によるビーム制御、高電界加速管が新たに開発され、ビーム運転に導入された。陽電子生成では新電磁石と機械学習制御により、過去最大となる 5 nC ビームの安定生成が達成された。また、新加速管によってビーム加速性能が向上した。現在、HER 用入射電子ビームのエネルギー広がりを抑制する ECS や高精度ビーム診断ラインの建設が進行中である。

謝辞

PF 放射光光源、SuperKEKB、Belle II に携わるスタッフ各位に心より感謝いたします。入射器、各蓄積リング間での研究協力および情報共有により、成果を達成することができました。また、三菱電機システムサービス(株) 運転員各位による、優れた入射器運転および保守維持作業に深く感謝いたします。

参考文献

[1] K. Furukawa *et al.*, “Advanced acceleration mode switching for simultaneous top-up injection at KEK electron/positron injector linac”, PASJ2020, Matsuyama (Online meeting), Japan, Sep. 2020, pp. 1-6.

[2] Y. Ohnishi *et al.*, “Recent progress of SuperKEKB project and future prospect”, IPAC2023, Venice, Italy, May 2023, pp. 1339-1342.

[3] 中村克朗, 松岡広大, 「Belle II 実験による新物理探索の初期結果」, 日本物理学会誌 77, 2022, pp. 745-750.

[4] K. Furukawa *et al.*, “SuperKEKB injector improvement plan at KEK electron positron injector linac”, PASJ2021, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 320-324.

[5] K. Yokoyama *et al.*, “Pulsed magnets at KEK electron/positron injector linac”, PASJ2022, Kyushu University (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 1029-1033.

[6] M. Yoshida *et al.*, “Commissioning of RF-gun for SuperKEKB”, PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 200-203.

[7] R. Zhang *et al.*, “Development of laser stabilization for SuperKEKB RF gun”, PASJ2022, Kyushu University (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 483-485.

[8] M. Yoshida *et al.*, “Longitudinal manipulation to obtain and keep the low emittance and high charge electron beam for SuperKEKB injector”, IPAC2013, Shanghai, China, May 2013, pp. 1337-1339.

[9] Y. Enomoto *et al.*, “A new flux concentrator made of Cu alloy for the SuperKEKB positron source”, PASJ2021, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 211-215.

[10] S. Matsumoto *et al.*, “Large-aperture travelling-wave accelerator structure for positron capture of SuperKEKB injector linac”, IPAC2014, Dresden, Germany, June 2014, pp. 3872-3874.

[11] Y. Seimiya *et al.*, “Optical investigation of new pulsed magnet installation in KEK e-/e+ injector linac”, PASJ2021, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 511-513.

[12] F. Miyahara *et al.*, “The current status and performance evaluation of the positron generation of KEK injector linac”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, THP090.

[13] C. Mitsuda *et al.*, “Adaptive development of ceramics chamber with integrated pulsed magnet for future light source in KEK-PF”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 631-635.

[14] S. Shinohara *et al.*, “Development of a fast pulsed power supply using SiC-MOSFETs for KEK-PF”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 1010-1014.

[15] K. Yokoyama *et al.*, “Pulsed bending magnet for the beam diagnostic line at KEK electron/positron injector linac”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FRP057.

[16] H. Ego *et al.*, “New S-band accelerating structure for the KEK electron and positron injector linac”, PASJ2021, QST-Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 130-132.

[17] H. Ego *et al.*, “Upgrades of S-band accelerating structures and pulse compressors in the electron and positron injector linac of KEK”, IPAC2023, Venice, Italy, May 2023, pp. 2932-2935.