

KEK 電子陽電子入射器アップグレードによるビーム入射性能向上

IMPROVEMENT ON BEAM INJECTION BY THE UPGRADE OF THE KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

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, 阪本雅昭, 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, 張叡, 中島啓光, 夏井拓也, 東保男, 肥後寿泰, 古川和朗, 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, Masaaki Sakamoto, Itsuka Satake, Masanori Sato, Satoru Shitara, Tetsuo Shidara, Xiangyu Zhou, Akihiro Shirakawa, Tsuyoshi Suwada, Yuji Seimiya, Hirohiko Someya, Tateru Takenaka, Rui Zhang, Hiromitsu Nakajima, Takuya Natsui, Yasuo Higashi, Toshiyasu Higo, Kazuro Furukawa, 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. The injector has been upgraded since FY2022 with large-aperture quadrupole magnets for optics matching, fast kickers for beam orbit correction, and a high-precision beam diagnostics line. We report on the improvement of the injector beam performance by using the new equipment.

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(以下、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、陽電子ビームを供給している。この入射スキームでは、複雑なビームパラメータを高速に50 Hzで切り換えて、各リングから要求されるビーム生成と加速を行っている[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、 $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 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2022年より4年計画で入射器のアップグレードを行ってきた[4, 5]。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た。本報告ではインストールされたアッ

プグレード機器と得られたビーム性能改善について報告する。

2. 入射器構成

Figure 1に入射器の構成図を示す。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50 Hzで切り替えながら生成する全長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。4種の仮想的な入射器として50 Hzでイベント駆動されており、4リング同時トップアップ入射を行っている[6]。

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、特有な機能を持つ。最初のAセクター

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

[#] ego@post.kek.jp

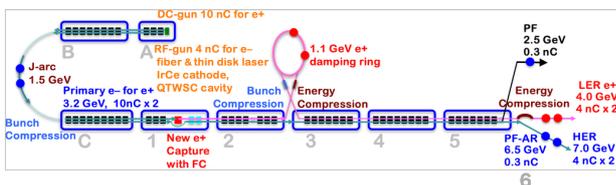


Figure 1: Component layout of the KEK injector linac.

に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は B セクターから J-ARC と呼ばれる 1.5 GeV の 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まで加速される。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。

3. アップグレードによるビーム性能向上

3.1 大口径四極パルス電磁石

エネルギー回収率 80%以上の高効率パルス電源[7]によって駆動された大口径パルス四極電磁石[8]が J-ARC 出入口各 4 台設置された (Fig. 2)。各電子ビームパルス毎、独立にオプティクスマッチング調整を行うことができるようになり、J-ARC でのビームロス大幅に削減できるようになった[5]。コイルの発熱問題のため、当初ブローア空冷で運用していたが、コイル水冷化試験によって、最大定格の 50 Hz、600 A での運転も問題ないことが実証されたため、2025 年夏、すべてのコイルを水冷化する。

3.2 機械学習によるビーム制御

陽電子電荷量を最大化するため、機械学習を用いた自動調整を行っている[5]。陽電子生成部下流の第 2 セクターでの電荷量がほぼシミュレーションに匹敵する結果となっていたが、更にこの調整を進め、設計値である入射器終端で電荷量 4 nC ビームの生成に成功した (Fig. 3)[9]。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。

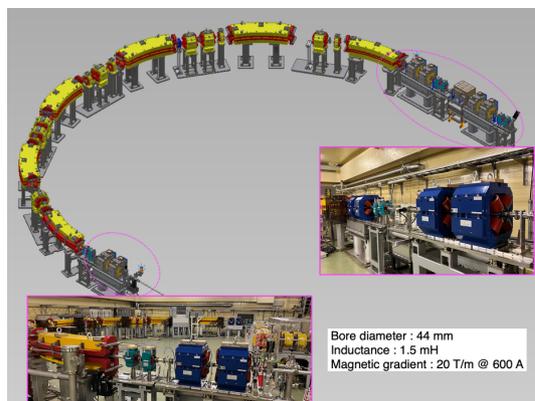


Figure 2: Large-aperture pulsed quadrupole magnets at the entrance and exit of J-ARC.

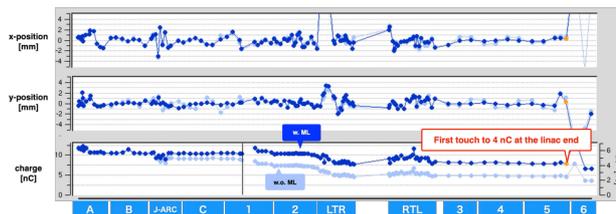


Figure 3: Orbits and charges of the positron beams with/without the automatic control by machine-learning. From top to bottom, they are the horizontal orbit, the vertical orbit and the charge.

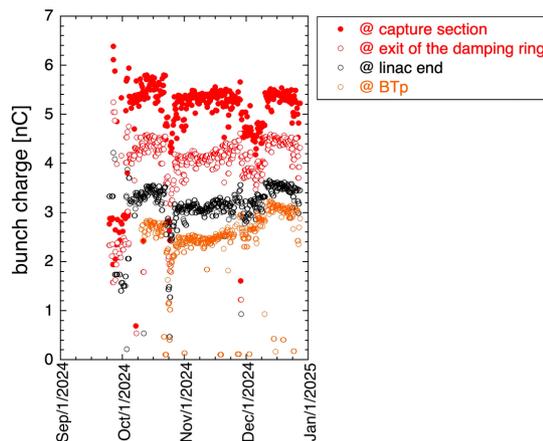


Figure 4: History of the positron beam charges at the positron capture section, the exit of the damping ring, the linac end and the beam transport line to LER (BTp).

Figure 4 に 2024 年 9 月から 2025 年 1 月の運転における入射器内陽電子捕獲部、ダンピングリング出口、入射器終端および LER ビーム輸送ラインの陽電子ビーム電荷量を示す。自動機械学習制御により、入射器終端で 3 nC 以上の陽電子ビームを得ている。低繰り返し試験では、前述したように 4 nC に到達しているが、ダンピングリングの電荷制限のため、高繰り返し運転では生成電荷量を抑える必要があった。2025 年秋からの運転では、この制限が解除されるため、4 nC 入射を行う。

LER のビーム調整時に入射電荷量を絞ることがある。これまで、陽電子捕獲部のフラックスコンセントレータ [10]の電圧で制御していたが、この場合、1 次電子ビームの電荷量は 10 nC のままなので、不必要なターゲットの熱負荷やビームロスによる放射化が生じる。そこで、陽電子収量率を維持するように、陽電子生成量に応じた 1 次電子ビームの電荷量調整に機械学習を適用した。電子銃下流のサブハーモニックバンチャーの位相、ビームエネルギー、タングステンターゲットまでのパルスステアリングやパルス四極電磁石の強さを調整パラメータとした。ターゲット直前の 1 次電子ビームの損失最小化、ターゲット後の陽電子生成電荷量最大化の順で、バイズ最適化とダウンヒルシンプレックス法 (DHS 法) の 2 つを適用した。Figure 5 に調整状況を示す。手動設定の後、自動調整プログラムによって 1 次電子ビームの損失が減っていく一方、陽電子生成量が減少した。そのため、1 次電

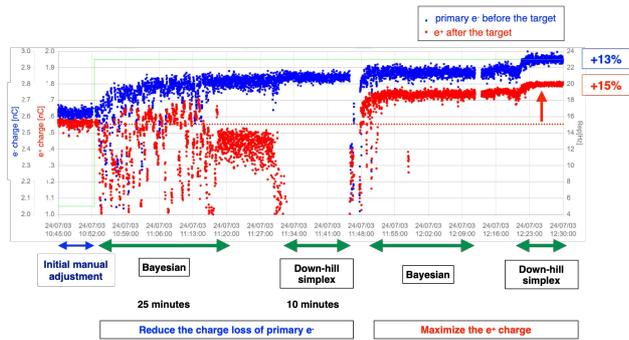


Figure 5: Charge maximization process of the beam charges by machine-learning.

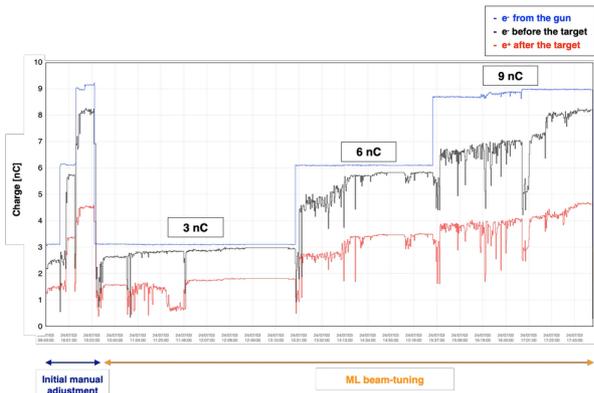


Figure 6: Positron charge maximization processes at the primary electron charges of 3, 6 and 9 nC.

電子ビームが最大となった後、パラメータを変えて陽電子生成最大化を行った。ベイズ最適化に加え、DHS法による最適化を行うと電荷量増加とともに変動も小さくなり、安定した陽電子生成が達成された。1次電子ビーム電荷量が3、6、9 nCの場合の最適化状況を Fig. 6 に示す。いずれも電子銃の出力電子ビーム一定の元、陽電子電荷量を増加させることができた。Table 2 に生成電荷量と収量率を示す。シミュレーション値は約 60% [11]で、これに近い値を達成しているが、電荷量を上げると収容率が少し下がってくる。今回用いたパラメータ以外の機器調整を加えれば、向上できる可能性がある。

3.3 高速パルスキッカーによるバンチ軌道補正

SuperKEKB の蓄積リングには、96.3 ns 間隔の 2 バンチ入射運転を行っている。通常、先頭の第 1 バンチに対して最適化した軌道調整が行われるため、第 2 バンチの軌道は第 1 バンチからずれる。第 2 バンチの垂直方向位置ずれが大きくなると加速管によるウェイク場によりエミツ

Table 2: Electron-to-positron Charge Ratios

Primary electron charge [nC]	Positron charge [nC]	Ratio [%]
3.1	1.8	61
6.1	3.5	60
9.0	4.7	58

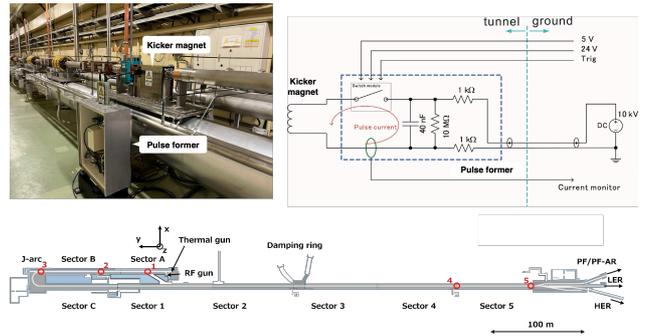


Figure 7: Photo of the high-speed pulsed kicker magnet, its electric diagram and the installed positions in the linac.

タンスも増大して入射効率が低下する。そのため、第 1 バンチには影響を与えず、第 2 バンチのみ軌道補正する高速パルスキッカーを入射器に導入している。機器構成を Fig. 7 に示す。入射器トンネル外から 1 kV (松定プレジジョン製電源 HUNA-1P150)、もしくは 10 kV (同社 HUNA-10P15) の直流電源を用いて、トンネル内に設置した充電回路へ給電する。Nexfi 社の SiC FET 高圧スイッチ (HS24003A) でコンデンサの充電電荷を蹴り出して、京セラ製セラミックスチェンバー一体型パルス電磁石 (CCiPM) を励磁する。CCiPM は KEK 満田氏らが開発したもので、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ある[12]。

高速パルスキッカーは HER 入射電子ビーム軌道に対してディスパーションが閉じる 5 箇所を選定し (Fig. 7)、キックするビームのエネルギーに応じて電源出力を設定した。最大ピークパルス電流は 600 A、キック磁場は 6 ~ 10 mT である。キッカーの立ち上がり時間は、バンチ間隔の 96.3 ns 未満を目標として設計したが、実測は 115 ns 程度となっており、電源の動作タイミングを変えてビームに与える蹴り角を調整している。これにより、第 1 バンチの軌道には影響を与えず、第 2 バンチのみ垂直方向の位置ずれが補正され、HER への電子ビーム入射効率が改善されることを実証した (Fig. 8)。現在は、立ち上がり時間を短縮するため、低インダクタンス化とインターロック系の改良に取り組んでいる。

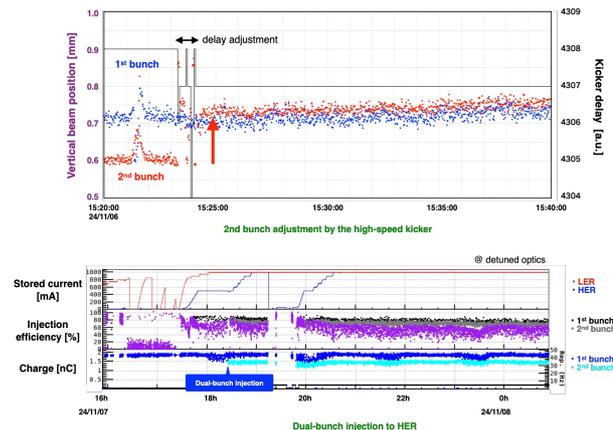


Figure 8: 2nd bunch vertical position adjusted by the high-speed kicker (Top) and the HER beam-injection efficiency (Bottom).

3.4 ビーム診断高度化

6 セクター下流のビーム切換領域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、HER 入射の障害とならずに、高精度ビーム診断や入射器単独のビーム調整、ビーム実験ができるように改造した[13]。Figure 9 に機器レイアウトを示す。既存の大型 DC 偏向電磁石 1 台が撤去され、小型パルス偏向電磁石 (0.59 T) 2 台と小型 DC 偏向電磁石 2 台に置き換えられている。

この診断ラインは HER 入射ラインとは分離されているので、HER 入射に直接は影響しない。取り出したビームの位置とプロファイルを計測してビームのエネルギー中心値とその拡がりやウェーク場によるエミッタンス増大などを評価するため、水平方向ディスパージョン値の異なる 3 箇所 (61_H1, A1, A3) にそれぞれストリップライン型ビーム位置モニターとスクリーンモニターの対が置かれている。特に最上流側の 61_H1 部では HER 入射ビームラインとダンプ向けビームラインが近接して通るため、これらを包含できるような大型のビーム位置モニターとスクリーンモニターを開発して新設した。

目的の診断に合わせて、ビームの取り出しには 2 つの運転モードがある。7.0 GeV の電子ビームをパルス電磁石で蹴り出す方法 (モード 1) とビームエネルギーを下げて連続的に取り出す方法 (モード 2) である。モード 2 は、加速管の加速位相を調整して、バンチの前後にエネルギー勾配をつけることでバンチ進行方向のプロファイルを観測するために用いられる。2025 年 6 月に行われた性能評価のビームスタディの結果を示す。Figure 10 は HER 入射モード、モード 1、モード 2 によるスクリーンモニター SC_61_H1 のビーム位置とビームプロファイル画像である。各モードのビームを同じスクリーン上の異なった位置で観測することができる。このスクリーンではビームサイズは 0.078 mm/pixel の精度で観測される。モード 2 のビームは付与したエネルギー勾配のため、バンチの進行方向プロファイルがスクリーンの横方向に射影されて観測される。Figure 11 にビームダンプ直前にあるスクリーンモニター SC_61_A3 におけるビームプロファイル例を示す。このスクリーン上ではビームサイズは 0.068 mm/pixel の精度で測定される。ここでは水平方向のディスパージョン値が 4.6 m であるため、ビームプロファイル

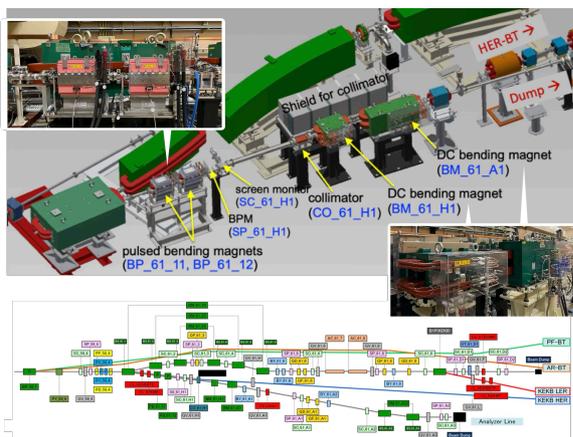


Figure 9: Equipment layout and photos of the high-resolution beam diagnostic line downstream of the linac.

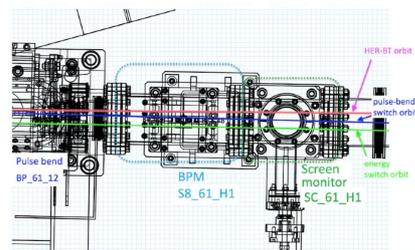


Figure 10: Wide-aperture screen monitor (SC_61_H1 in Fig. 9) and measured beam profiles of the three operation modes: HER injection mode (top), mode 1 (middle) and mode 2 (bottom).

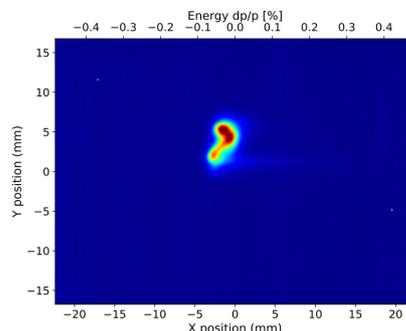


Figure 11: Beam profile on the high-resolution screen (SC_61_A3) before the beam dump.

の水平方向拡がりにはビームが元々持っていたビームサイズとエネルギー拡がりの影響が重畳されたものとして観測される (4.6 mm でエネルギー拡がり 0.1% に相当)。一方、ビームの垂直方向にはディスパージョン値がゼロなので、この観測例のようにウェーク場によりバンチ後方が蹴られてビームサイズが伸びる現象を観測するのに有用である。

これまでの HER ビーム入射運転では、一時的にビーム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していく。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。新ビーム診断ラインでの観測を定常化させて、ビームのエネルギー拡がりやエミッタンス増大抑制の調整に活用していく。

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

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、機械学習によるビーム制御が開発され、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、入射器終端で過去最大となる4 nCビーム生成が達成された。2バンチ運転において、高速キッカーによる第2バンチの垂直方向軌道が独立に調整できるようになり、HERへのビーム入射効率が大きく改善された。新設された高精度ビーム診断ラインにおいて、電子ビームのプロファイルやエネルギー広がりがHER入射から切り離して測定できるようになったため、今後、ビーム品質の常時管理と常時調整に活用していく。

謝辞

PF放射光光源、SuperKEKB、Belle IIに携わるスタッフ各位に感謝いたします。入射器と各蓄積リング間での研究協力および情報共有により、研究を推進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も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] H. Ego *et al.*, “Upgrade status of KEK electron/positron injector linac for improvement on beam injection to SuperKEKB”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 608-612.
- [6] 古川和朗, 佐藤政則, 電子陽電子入射器グループ「KEK 電子陽電子入射器の多目的同時トップアップ入射」, 日本加速器学会誌「加速器」, 21 巻 3 号, 2024, pp. 198-207.
- [7] T. Natsui, “Development of new pulse driver for high power pulsed magnet”, LINAC2024, Chicago, USA, Aug. 2024, pp. 418-420.
- [8] K. Yokoyama *et al.*, “Pulsed magnets at KEK electron/positron injector linac”, PASJ2022, Kyushu University (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 1029-1033.
- [9] T. Natsui *et al.*, “Upgrade of KEK electron/positron injector linac using pulsed magnets and machine learning”, IPAC2025, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, pp. 1651-1655.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.