

KEK 7 GeV 電子陽電子入射器の 20 万時間運転の達成

ACHIEVEMENT OF 200,000 HOURS OF OPERATION AT KEK 7-GeV ELECTRON POSITRON INJECTOR LINAC

古川和朗^{*A)}、明本光生^{A)}、阿部哲郎^{A)}、荒川大^{A)}、荒木田是夫^{A)}、飯田直子^{A)}、池田光男^{A)}、岩瀬広^{A)}、恵郷博文^{A)}、榎本収志^{A)}、榎本嘉範^{A)}、大越隆夫^{A)}、大沢哲^{A)}、岡安雄一^{A)}、小川雄二郎^{A)}、柿原和久^{A)}、梶裕志^{A)}、片桐広明^{A)}、紙谷琢哉^{A)}、川村真人^{A)}、佐武いつか^{A)}、佐藤政則^{A)}、設楽哲夫^{A)}、周翔宇^{A)}、白川明広^{A)}、杉村仁志^{A)}、諏訪田剛^{A)}、清宮裕史^{A)}、染谷宏彦^{A)}、竹中たてる^{A)}、田中窓香^{A)}、張叡^{A)}、邱丰^{A)}、峠暢一^{A)}、中島啓光^{A)}、夏井拓也^{A)}、東保男^{A)}、肥後寿泰^{A)}、本間博幸^{A)}、松下英樹^{A)}、松本修二^{A)}、松本利広^{A)}、三浦孝子^{A)}、三川勝彦^{A)}、宮原房史^{A)}、矢野喜治^{A)}、横山和枝^{A)}、吉田光宏^{A)}

Kazuro Furukawa^{* A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Tetsuo Abe^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Yoshio Arakida^{A)}, Naoko Iida^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Hiroshi Iwase^{A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Takao Oogoe^{A)}, Satoshi Ohsawa^{A)}, Yuichi Okayasu^{A)}, Yujiro Ogawa^{A)}, Kazuhisa Kakihara^{A)}, Hiroshi Kaji^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Masato Kawamura^{A)}, Itsuka Satake^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Xiangyu Zhou^{A)}, Akihiro Shirakawa^{A)}, Hitoshi Sugimura^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Yuji Seimiya^{A)}, Hirohiko Someya^{A)}, Tateru Takenaka^{A)}, Madoka Tanaka^{A)}, Rui Zhang^{A)}, Feng Qiu^{A)}, Nobukazu Toge^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Takako Miura^{A)}, Katsuhiko Mikawa^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Kazue Yokoyama^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

KEK electron positron injector linac initiated the injection operation into Photon Factory (PF) light source in 1982. Since then for 38 years, it has served for generations of projects, namely, TRISTAN, PF-AR, KEKB, and SuperKEKB. Its total operation time, the high-voltage application time, has accumulated 200 thousand hours on May 7, 2020. We are extremely proud of the achievement following continuous efforts by our seniors. Because of COVID-19 we simply celebrated this opportunity over morning coffee through video conferencing. The construction of the injector linac started in 1978, and it was commissioned for PF with 2.5 GeV electron in 1982. In parallel the positron generator linac was constructed as the TRISTAN collider project was approved, and the electron positron beams were injected and collided in 1986. The slow positron facility was also commissioned in 1992. After the KEKB asymmetric-energy collider project was commissioned in 1998 with direct energy injections, the techniques such as two-bunch acceleration, continuous injection, simultaneous injections, were developed. As the great east Japan earthquake was too strong against the soft structure design of the linac, it took three years to recover. Then the construction and commissioning for the SuperKEKB project went on, and the simultaneous injection into four storage rings contributes to elementary particle physics and photon science.

1. はじめに

高エネルギー物理学分野においては、国際的に第一線の成果を挙げていた素粒子理論研究に加えて、素粒子の実験研究においても国内での成果を期待する機運が1970年代に高まり、世界最高エネルギーの衝突型加速器の実現が検討された[1]。一方、放射光科学分野においても、東京大学原子核研究所の電子シンクロトロンを利用した放射光実験の成果を踏まえて、放射光専用加速器を中心とする放射光総合研究所の設立が期待されていた[2]。

これらの双方の加速器計画を高エネルギー物理学研究所の敷地において実現すべく、先に予算が認められた放射光実験施設フォトンファクトリ (PF) の一

部として、2.5 GeV の直接エネルギー入射が可能な400 m の線形加速器が建設された。

この入射器はその後の TRISTAN、KEKB、PF-AR、SuperKEKB の各加速器実験計画に対応しながら38年間運転を継続し、今年20万時間の運転時間（大電力マイクロ波発生時間）を達成した。その運転の変遷の概略を振り返ってみたい。

2. PF 及び TRISTAN 2.5 GEV 入射器

当初の建設の頃には、原子核研究所の他にも、国内では東北大学の原子核理学研究施設も成果を挙げており、多数の小型電子線形加速器も建設されていた。原子核研究分野には以前から将来計画があり、電子加速器自体についての開発研究も進んでいた。その成果も利用しながら、素粒子物理研究分野と放射光科学研究分野の双方を対象とする線形加速器と複合

* kazuro.furukawa@kek.jp

加速器群を建設できたことは、先端科学研究を進める上で資源を共用する部分を増やすことができ、幸いであったと思われる。J-PARCが原子核素粒子物理学分野と中性子科学分野の双方を対象としていたことと似ているかもしれない。他国では当初から複数の目的を掲げる加速器計画は、あまり多くないようにも思われる。

当時、米国のSLACに続いて世界で2番目の規模の線形加速器を建設することとなったが、入射器の建設には上のような状況の下で、実績のある人材が集まり、設計・建設が遂行された。放射光計画が先に予算執行されたため、少し大きめの入射器を建設することになり、予算的には厳しい環境ではあった。当初から放射光総合研究所を高エネルギー分野から独立させたいとの思いを持つ研究者も多かったが、加速器科学分野がその繋ぎの役割を果たしていたと考えることができる。

入射器の加速管としては、超精密旋盤切削と電鋳法を組み合わせる2メートル長の準定勾配 $2\pi/3$ モードSバンド進行波型加速管を160本製作し、8 MeV/mの加速を行った。476 MHzの基準マイクロ波を分配し、6 逡倍して60 kWドライバクライストロンで増幅し、さらに10メートル間隔に置かれた8ユニットの大電力マイクロ波源に分配して、1セクタと呼んだ。個々のユニットでは20 MWのクライストロンから4本の加速管を駆動した。5セクタ分の40の加速ユニットに、後に陽電子生成用に7加速ユニットが追加・建設され、陽電子エネルギー200 MeVで主リニアックに合流し、電子・陽電子とも2.5 GeVまで加速された (Fig. 1)。

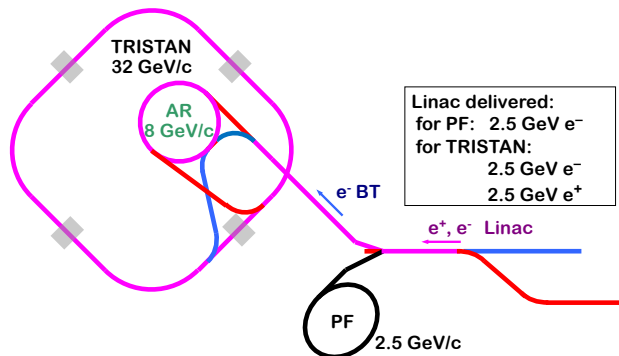


Figure 1: Configuration of electron positron accelerator complex during TRISTAN period.

ビームブレイクアップ (BBU) 不安定を避けるために、加速管全体としては5つの異なる高調波共振周波数を持たせてあり、長パルス加速も可能であった。陽電子については、短パルスでの電流を確保するために119 MHzのサブハーモニックバンチャが導入された。放射光施設入射向けには1マイクロ秒までの長パルスビームが入射された。また、後にはイオン捕獲不安定性を避けるために40ナノ秒の準長パルス陽電子入射も行われた。

TRISTANは単一リングで単バンチャの衝突が行われたので、入射器のSバンドの数バンチャのビームが生成されて、蓄積リング (AR) に入射され、8 GeVまで

加速された後、さらに主リング (MR) に入射されて、世界最初の本格的な超伝導加速空洞により世界最高エネルギー32 GeVまで加速され、衝突が行われた。

TRISTANで目標とされたトップクォークは、当初期待された質量よりも重かったために発見に至らなかったが、超伝導空洞技術、アルミニウムを用いた真空技術、広域機器制御技術など加速器技術は大きく進展し、その後の加速器開発に繋がった。最終年の1995年には大型放射光加速器実験が行われ、その後の放射光加速器設計にも知見を与えた。

放射光施設が完成したときには、放射光専用の加速器施設が運用され放射光科学の研究が推進できるとの高揚があったと思われるが、TRISTAN計画についても、それまで素粒子理論で世界の物理学の発展に貢献してきた日本が、実験においても世界の第一線に立つことができたので、成果を発信しようという気概が感じられた。最近になって、当時建設された電力設備が徐々に更新されているが、当時の仕様を見ると、後のKEKBやSuperKEKB向けの入射器としても余裕のある設計を行っていたことがわかり、加速器側には予算はあまり無くても、原子核物理学分野や紫外放射光科学分野への拡張可能性を確保しようとしたのであろうと思われ、当時の苦勞が想像される [3]。なお、残念ながら、その後電子を利用した原子核物理実験施設や紫外放射光施設が建設されることは無かった (Fig. 2)。

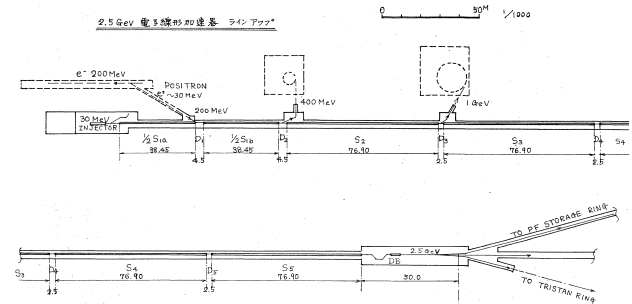


Figure 2: Layout plan of KEK electron/positron linac as of 1977 [3].

3. KEKB 入射器

TRISTAN 建設期から次の素粒子物理実験計画としてリニアコライダが期待されていたところ、規模の大きさからすぐに推進することは困難かと思われた。一方、小林誠氏と益川敏英氏が提案した素粒子理論の残された課題を日本で実験的に確認したい、との思いがBファクトリを建設する原動力となり、計画が認められることになった。ファクトリとして積分性能を向上させるためには入射性能が重要なため、並行してBファクトリ計画を立てていたSLAC/PEP-IIに比べるとKEKの入射器の非力が心配された。一時、入射用シンクロトロンの設置も検討されたが、入射器を増強して直接入射を可能とすることになった。

まず、2.5 GeVの電子エネルギーを8 GeVに向上させるために、入射器の長さを1.5倍にして、さらにク

ライストロン出力を2.5倍とし、SLED エネルギー増倍器も投入することにより、加速電界を2.5倍に増強することにした。敷地境界が近く、直線的に延長することが難しいこともあり、陽電子生成装置に使われていた建物を組み合わせて使用し、Fig. 3のようにJの文字の形をした入射器となった。また、ビーム特性の管理も重要と思われ、それまで設置されていなかったビーム位置モニタやビームワイヤスキャナなども設置された。建物も装置も大きな改造となったが、SLAC/PEP-IIとの競争もあり、厳しい建設であった[4]。

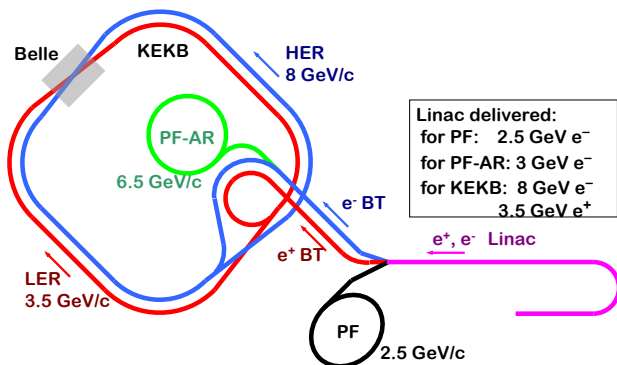


Figure 3: Configuration of electron positron accelerator complex during KEKB period.

建設時期においては、改造が質・量とも多かったので、3ヶ月PF向けの入射運転を行い、3ヶ月建設を行う、というスケジュールを繰り返すことにした。3ヶ月の入射運転時期には装置の製造・納入・試験を行い、その後の3ヶ月の建設時期に設置を行った。予算総額は充分とは言えなかったが、比較的予定通りに予算が提供されたので、このような計画的な更新作業が可能であった。また、PFの高度化に合わせて、1997年には9ヶ月連続の建設期間を確保することができた。

建設途中で研究所に原子核研究所が合流することになり、改組の一部として、入射器は放射光施設から加速器施設に移動することになった。TRISTAN時には共同でのビーム開発が行われることは稀であったが、この改組によりKEKB向けのビーム開発試験を合同で行うことが容易になった。KEKBの運転操作での成功はSADプログラムによるオンライン操作環境と、EPICS制御フレームワークによるところが大きかったが、入射器におけるビーム試験が良い練習対象になっていたと思われる[5]。

先に述べたPEP-IIとの競争が厳しく、毎日制御室で双方の加速器性能を見比べてながら入射器の装置に無理をさせたところがあり、2000年には電子銃直後と陽電子標的直後の加速管を放電で傷め、交換することになった[6]。そこで適切なビーム管理を行い、電流増強には工夫を凝らすことにした。まず1パルス当たり2バンチ加速を行うことにして、ビーム制御の整備を進めた。入射器とリングの周波数関係から、2つのバンチは少なくとも96ナノ秒離す必要があり、その条件で、複数の場所でビームエネルギーを測定し、Fig. 4のようにエネルギーを均等に揃え、入射することに成功した[7]。

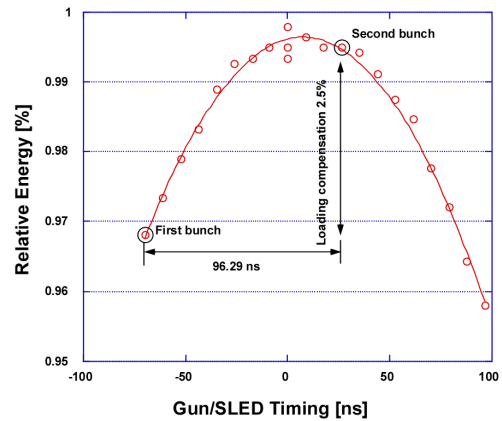


Figure 4: Energy equalization of 2 bunches separated by 96 ns in a pulse.

その後、Belle衝突検出器を動作状態のまま入射を切り替える連続入射にも成功した。そのような入射の改善を繰り返し(Fig. 5)、PEP-IIの衝突性能を上回るような貢献を続け、2008年からはPF-ARを除く3蓄積リングの同時入射も達成した(Fig. 6)[8]。

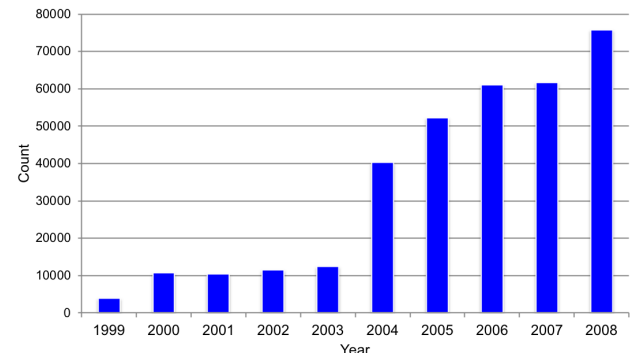


Figure 5: Beam mode transitions per year between injections into KEKB-HER, KEKB-LER, PF and PF-AR.

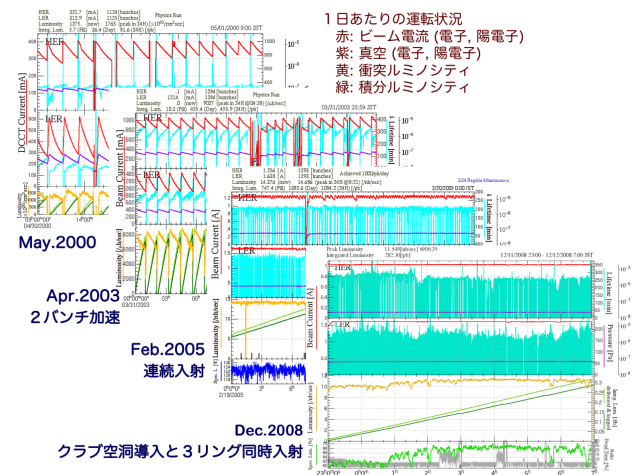


Figure 6: Injection progress in the KEKB project.

4. 低速陽電子

入射器施設は通常下流の蓄積リング加速器に入射することによって貢献をしている。しかし、直接電子を利用する実験が行われる場合もある。過去には、ビームダンプを用いたアクシオン粒子探索実験、SSC計画向けのタイルファイバ・カロリメータ検出器のビーム照射校正試験、陽電子ビームによるチャネリング実験、電子のチャネリング放射光による陽電子生成実験、などである。最後の陽電子生成実験成果により、2006年に実際にKEKB入射用の陽電子生成に結晶標的が適用され、陽電子生成効率を約25%向上させることに成功した [9]。

その他に、継続的に行われている実験が、低速陽電子実験である。TRISTAN計画の中期の入射の合間に入射器末端で陽電子を生成減速して、実験室に導き、物性や素粒子の実験が行われた。その後、入射器のビームの利用形態が変遷したため、2度の実験装置の移動を余儀なくされたが、現在は加速器装置などの資源を主線形加速器と共通化した50 MeVの専用線形加速器を利用して、低速陽電子の共同利用実験が行われている [10]。入射器棟内で共同利用の実験成果が産み出される貴重な存在である。

5. SUPERKEKB と同時トップアップ入射

KEKB計画が2010年に終了した後、架台が柔構造の考えで作られていた入射器は、2011年の東日本大震災の影響により他の加速器に比べて大きな被害を受けた。ビーム品質の要件が厳しくなかった放射光施設には、下流の24加速ユニットを用いて、2ヶ月あまりで入射開始にこぎ着けたが、SuperKEKB向けに100ミクロンのアライメント精度が求められるため、全体の正常化にはさらに3年を要した。KEKB計画の建設時に比べると、SuperKEKB計画の年度毎の建設予算配分が明確に示されなかったため、建設計画の策定の難しさが心配された。結果としては全体の予算配分が遅れたため、毎年放射光向けの運転を続け、2017年に最も長い5ヶ月の建設期間が確保され、さまざまな装置が設置された。

KEKB計画での入射器においては、エネルギーの増強が主要な課題であったが、SuperKEKB計画ではナノビームスキームによる衝突の高度化により、入射ビームに高い品質が求められることになった。電子陽電子とも、バンチ当たり4nCの電荷量で、約20mm.mradのエミッタンスを要求された。そのため、陽電子向けにはフラックスコンセントレータによる陽電子生成部と大口径加速管を含む捕獲部の再構築、そしてダンピングリングの建設が行われた。また、電子向けには陽電子生成用大電流熱電子銃を維持しながら、イリジウムセリウム合金の光陰極と擬似進行波型サイドカップル空洞を組み合わせた大電流低エミッタンスRF電子銃が新設された。さらに、ビーム品質管理のため、100台にのぼるパルス電磁石や高精度ビーム位置モニタが設置された [11]。2019年からは Fig. 7 のように4蓄積リング同時トップアップ入射を開始し、飛躍的な実験効率向上に貢献し、

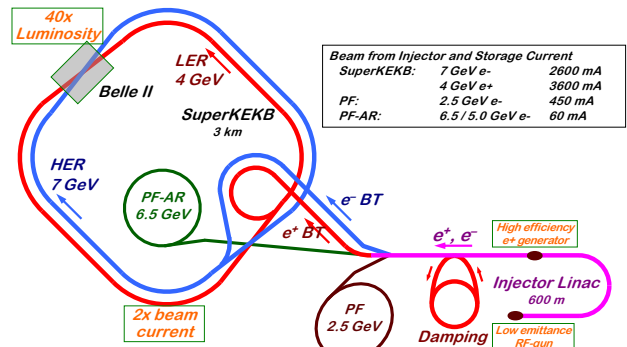


Figure 7: Configuration of electron positron accelerator complex during SuperKEKB period.

ビーム開発を日々続けているところである [12]。

このような電子陽電子入射器の運転継続により、Fig. 8 のようなさまざまな計画にビームを提供し、KEKの先端研究の歴史を支えてきた。

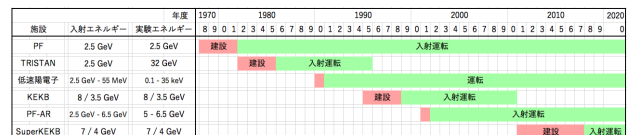


Figure 8: Electron positron accelerator projects and injection energies.

そして、今年の5月7日8時50分には、1982年にPF入射運転を開始して以来、Fig. 9のように、大電力マイクロ波発生時間積算で20万時間の運転を達成することができた。先輩方の積み上げて来られた運転成果を引き継いで、20万時間運転の節目を迎えられたことは、我々が大変誇りに思うところである。当日は新型コロナウイルスの影響により特に行事は催されなかったが、ビデオ会議経由のモーニングコーヒーで乾杯することができた。統計情報のうち、故障率はなんらかの装置が故障しているが冗長性などによりビーム入射運転は可能である状態、ビーム停止率は故障が重大で入射が不可能な状態をそれぞれ表す。それぞれの計画の開始時期には、装置の特性の把握やビーム運転のスキルのために故障率が上昇

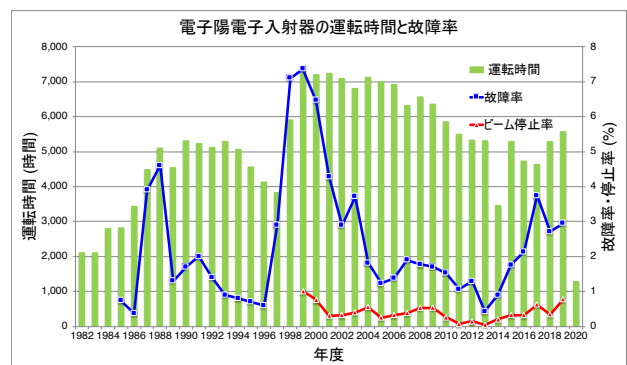


Figure 9: Operation hours and failure rates of the injector linac.

するが、対策が施されるに従って安定してくる傾向がある。

6. まとめ

このように KEK の電子陽電子入射器は、当初から複数分野の実験を支えてながら 20 万時間の運転時間を達成することができたが、今後ともビーム性能を向上させるためにさまざまな技術研究開発をもって各分野に貢献するとともに、人材の育成にも役割を果たして行きたいと考える。

参考文献

- [1] 高エネルギー物理学研究所, “トリスタン計画報告書”, KEK progress report 96-2, September 1996; <http://www.kek.jp/hyouka/TRISTANreport/>
- [2] 高良和武, “フォトンファクトリー誕生のころ”, 日本物理学会誌, vol 51, pp.879-886, 1996; https://www.jps.or.jp/books/50thkinen/50th_12/001.html
- [3] 田中治郎, 佐藤勇, “フォトンファクトリー 2.5GeV 電子線形加速器計画”, Proc. of the 2nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Japan, 1977, pp. 20–24; https://www.pasj.jp/web_publish/lam1977/30a06.pdf
- [4] “放射光入射器増強計画 –KEKB に向けて–”, I. Sato (ed.), 1996, KEK Report 95-18; <https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/1995/9524/9524018.pdf>
- [5] J.W. Flanagan *et al.*, “A Simple Real-Time Beam Tuning Program for the KEKB Injector Linac”, in *Proc. ICAP1998*, Monterey, USA, 1998, F-Tu09; <https://www.slac.stanford.edu/xorg/icap98/papers/F-Tu09.pdf>
- [6] K. Furukawa *et al.*, “Towards Reliable Acceleration of High-Energy and High-Intensity Electron Beams”, in *Proc. LINAC2000*, Monterey, USA, 2000, pp.630–632; <https://epaper.kek.jp/100/papers/TUE09.pdf>
- [7] K. Furukawa *et al.*, “Beam Feedback Systems and BPM Read-Out System for the Two-Bunch Acceleration at the KEKB Linac”, in *Proc. ICALEPCS2001*, San Jose, USA, 2001, pp.266–268; <https://epaper.kek.jp/ica01/papers/WECT006.pdf>
- [8] M. Akemoto *et al.*, “The KEKB injector linac”, *Prog. Theor. Exp. Phys*, vol. 2013, p. 03A002, 2013; <http://doi.org/10.1093/ptep/ptt011>
- [9] T. Suwada *et al.*, “First application of a tungsten single-crystal positron source at the KEK B factory”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 10, 2007, 073501; <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.073501>
- [10] Slow positron facility; <https://www2.kek.jp/imss/spf/>
- [11] K. Furukawa *et al.*, “Rejuvenation of 7-GeV SuperKEKB Injector Linac”, in *Proc. IPAC2018*, Vancouver, Canada, 2018, pp.300–303; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-MOPMF073>
- [12] K. Furukawa *et al.*, “Advanced acceleration mode switching for simultaneous top-up injection at KEK electron/positron injector linac”, presented at *PASJ2020*, 2020, paper WEOOP01.