

KEK 電子入射器の運転統計の考察

ANALYSIS OF OPERATIONAL STATISTICS AT KEK INJECTOR LINAC

古川 和朗 ^{*,A)}, 佐藤 政則 ^{A)}, 松本 修二 ^{A)}, 鈴木 和彦 ^{B)}

Kazuro Furukawa ^{*,A)}, Masanori Satoh ^{A)}, Shuji Matsumoto ^{A)}, Kazuhiko Suzuki ^{B)}

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

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd. (MSC)

Abstract

The 7-GeV electron-positron injector linac at High Energy Accelerator Research Organization (KEK) has operated for approximately 5000 hours per year, continuously injecting electrons and positrons into two light sources (PF Ring, PF-AR) and an elementary particle collider (SuperKEKB). Since the injector began beam injection operation in 1982, it has undergone various modifications while continuing its operation. The operational mode has significantly changed according to the past experimental projects, and various characteristics have appeared in the operation statistics. In elementary particle physics experiments, electrons and positrons have been injected into the TRISTAN, KEKB, and SuperKEKB rings. The injection beam requirement varied greatly for each project, leading to larger failure rate during the early stages of each project. However, gradually, appropriate measures were taken, allowing for smooth operation. With reference to this operation statistical information, it is expected that optimization of injection operation will be achieved by balancing the demands of both particle physics experiments and photon science experiments, which have significantly different user requirements.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 7-GeV 電子陽電子入射器においては、年間約 5000 時間のビーム運転が行なわれており、2つの放射光実験施設 (PF、PF-AR) と衝突型素粒子物理実験施設 (SuperKEKB) への電子と陽電子の入射を継続している (Fig. 1) [1]。入射器がビーム入射運転を開始した 1982 年から現在までさまざまな改造を行いながら運転を継続しており、2020 年には運転時間が 20 万時間を超えた [2]。TRISTAN、KEKB、SuperKEKB と呼ばれるこれまでの素粒子物理実験計画への電子と陽電子の入射については、実験ごとに要求されるビームの特性も大きく変遷し、蓄積リングの設計が変わるとともに、入射器の装置構成も大きく進展してきた (Fig. 2)。

実験の特性によって入射器の運転形態も大きく変化を重ね、運転記録にもさまざまな特徴が現れている。高い性能を求める素粒子物理実験向けの入射ビームの開発が、放射光実験の入射にも活かされる場合も多い。運転の記録から得られる知見はたいへん大きいですが、それらを体系的に一般化することは容易では無い。実験ユーザーからの要求が大きく異なる素粒子物理実験と放射光科学実験の双方に、バランスを考慮した入射運転最適化が期待されており、ここでは過去の運転統計情報を示し、そこから得られる理解の一部について記述してみたい。

2. 運転記録

入射器の運転開始当初は運転の記録を紙のログブックに残していたが、1995 年には独自開発の電子ログブックに運転記録の蓄積を始め [3]、日々の運転の経験を活かせるように現在もその改善を続けている [4]。この電子ログブックの利用により、運転の改善に繋げられるよう

工夫をしてきた [5]。特に故障障害情報を容易に検索できるようにしており、運転に障害があった場合には、過去の経験を容易に見つけ出せるようになり、障害回復時間の短縮に効果を発している。

障害情報や運転統計情報については、時系列の運転記録に記載するとともに、8 時間の運転シフト毎にまとめたページが用意されており、また月間記録もまとめられている。そしてそれらを集計して年間の記録もまとめられる。障害は、マイクロ波や真空など 11 のカテゴリーに分けて集計されており、カテゴリー毎に改善の確認や問題点の発見に役立っている。

3. 2023 年度までの運転統計記録

Figure 3 に年度毎の運転統計情報のうち、入射器運転時間 (Operation hour)、機器故障時間比率 (Partial failure)、入射中断時間比率 (Injection stop) を示す。少しわかりに

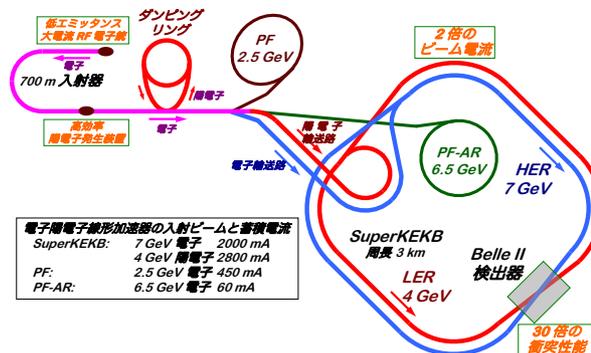


Figure 1: Accelerator and beamline layout of the electron and positron accelerator complex.

* kazuro.furukawa@kek.jp

施設	入射エネルギー	実験エネルギー	1970		1980		1990		2000		2010		2020	
			8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Photon Factory	2.5 GeV	2.5 GeV	建設											
TRISTAN	2.5 GeV	32 GeV			建設									
低速陽電子	2.5 GeV - 55 MeV	0.1 - 35 keV						建設						
KEKB	8 / 3.5 GeV	8 / 3.5 GeV												
PF-AR	2.5 GeV - 6.5 GeV	5 - 6.5 GeV												
SuperKEKB	7 / 4 GeV	7 / 4 GeV												

Figure 2: History of electron/positron accelerator projects operated by the injector LINAC.

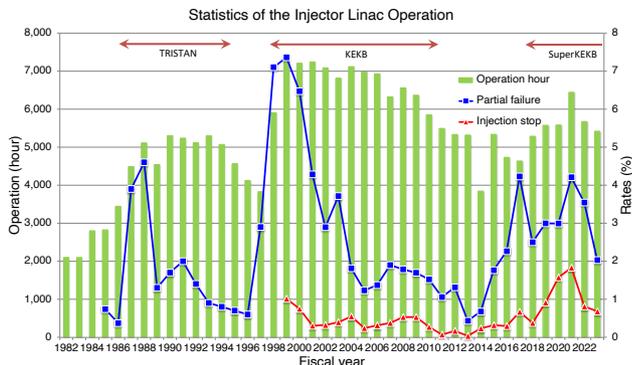


Figure 3: Yearly operational statistics of the injector LINAC. Operation hours (green), failure rate (blue), injection stop rate (red) are shown. Certain failures do not directly cause the injection stop.

くいが、いずれかの主要加速器装置が故障している状態が機器故障時間であり、故障があっても冗長構成のために、自動または運転員の介入によって、ビームの加速入射が可能になる場合も多い。冗長性の無い機器の故障や誤動作によって、蓄積リングへの入射が不可能となる状態が入射中断時間であり、1%以下の入射中断時間比率を目指している。

運転時間は、年間 5,000 時間を超える年が多く、特に KEKB と SLAC の PEP-II の競争が激しかった 2000 年代前半には、年間 7,000 時間を超えることも珍しく無かった。KEKB 計画や SuperKEKB 計画に向けては入射器の改造建設も幅広く行われたが、いずれの時期も PF の放射光実験は継続していたため、入射器の途中に仮の電子銃を設置した上で、PF リング向けの入射エネルギー 2.5 GeV の電子を生成して、できるだけ入射運転を長く確保した。建設のための最も長い連続停止期間は、KEKB 建設時には 9 ヶ月、SuperKEKB 建設時には 5 ヶ月しか確保できず、作業計画に工夫を凝らした。最近 SuperKEKB 向けの蓄積リングや入射器の改造時間も多く、また電気料金高騰のために、運転時間が制限されている。

故障時間比率については、過去にいくつかのピークが見える。各素粒子物理実験計画において、入射ビーム特性に対する要求がより厳しくなり、また新しい装置が設置されるため、TRISTAN、KEKB、SuperKEKB のそれぞれの運転開始時に故障比率が上昇する。機器の初期故障もあり、また新しい装置の故障修理の経験が浅いために、故障回復までの時間が長くなってしまっていることが影響している。さらに、ビームに対する冗長機能があって

Table 1: Required Injector Beam Parameters

Beam	Positron	Electron	
Beam energy	4.0	7.007	GeV
Normalized emittance $\gamma\epsilon_{x/y}$	100/15	40/20	μm
Energy spread	0.16	0.07	%
Bunch charge	4	4	nC
No. of bunches/pulse	2	2	
Repetition rate		50	Hz

も、より多くの時間をビーム調整に要してしまう場合もある。しかし、新しい装置の理解や入射運転の限られた資源内での特性の見極めが進むことによって、適切な対応による改善が見られるようになり、より円滑な運転が実現されて故障時間比率が下がってくる。

KEKB 計画の初期においては、多数のクライストロンやマイクロ波電源などの大電力装置が導入されたことや、電流が大幅に増大して電子銃直後や陽電子標の直後の加速管の交換を運転中に行わざるを得なかったことで、故障修理に大きな時間が割かれ、7%を超える故障時間となったが、徐々に落ち着いている。

SuperKEKB 計画においては 2 つのピークが見られるが、5 蓄積リング同時トップアップ入射 [6] に関連しており、想定されていたことである。2017 年にはパルス電磁石を含め [7]、多数の同時トップアップ入射向けのパルス動作機器が設置されて、その動作調整を放射光向け入射運転の合間に行っていたために故障時間が増加した。また、2019 年に本格的な同時トップアップ入射を伴った SuperKEKB 運転が始まって以降は、入射ビームの電荷量やエミッタンスの要求も Table 1 のような設計性能を目指して次第に厳しくなり、加速装置やビームを適切な状態に保つことがより困難になったことも故障時間に作用している。

入射中断時間比率については、最近まで目標とする 1% 以下を達成していた。ユーザに対する実験可能時間 (Availability) は、蓄積リングなどの障害にも左右されるので、入射器起因の入射中断時間は、できるだけ少ないことが望ましい。KEKB 計画や SuperKEKB 計画の初期には故障時間同様に入射中断時間も増加しており、特に SuperKEKB 向けには先に述べたようにビーム性能の要求が厳しく、装置故障だけでなく適切なビーム特性に保つための調整操作にも時間が振り向けられて、入射中断時間比率が 1% を超える時期もあった。

同時トップアップ入射は、Fig. 4 に示すように同時に 4 つの仮想加速器に対して運転操作を行わなければならないため、運転員に対する負荷も高く、障害対応にも幅

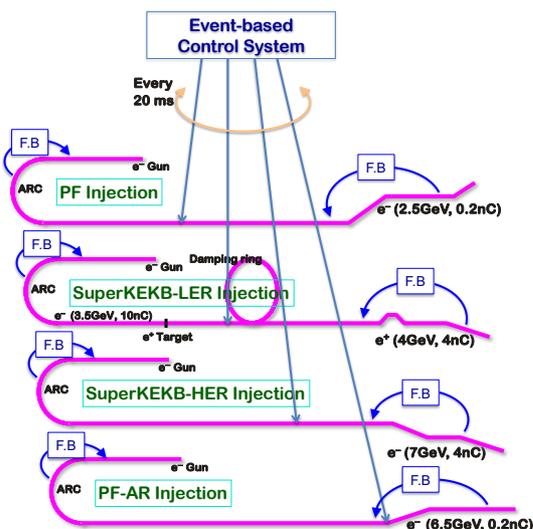


Figure 4: Single injector LINAC behaves as four virtual accelerators (VAs) to inject their beams into four separate storage rings. Each VA would be associated with several independent beam feedback loops.

広い知識と経験が必要となっている。同時トップアップ入射の初期には自動化されなかった手続きについて運転操作の誤りなども発生したが、徐々に対策が施され、最近では改善が見られる。

同時トップアップ入射が行われていなかった 2008 年以前や、2010 年から 2018 年の間には、入射の合間にも一部の故障修理を実施することができたが、同時トップアップ入射が 2019 年に導入されてからは、冗長性のない装置の修理は直接入射中断時間に加算されてしまい、入射中断時間を押し上げている。

最近では故障対応も円滑に行われるようになり、大きな改善がある。その改善が見られる 2022 年秋から 2023 年秋までは SuperKEKB は停止していたことに注意が必要であるが、一方その間には入射器内で SuperKEKB に向けた実験的なビーム調整の試みが行われていたこともあり、相反する効果があったと思われる。

4. 2021 年度から 2023 年度の障害分類

運転障害統計は 11 のカテゴリーに分けて蓄積しており、詳しい分析も可能となっている。Figure 5 は 2021 年度から 2023 年度の年度ごとのカテゴリー別の故障時間 (青) と入射中断時間 (赤) である。

2021 年度と 2022 年度は 2 本ずつの大電力クライストロンの交換が運転中に行われたため故障時間が目立っている。入射器内には 60 の加速ユニットがあり、それぞれ 1 本の大電力クライストロンが設置されており、クライストロンの寿命は約 7 万時間強となっているので、真空の破れがなく、比較的短い時間内に当該加速ユニットを予備の加速ユニットに入れ替えることができれば、入射中断時間は限定的となる [8]。

入射中断時間への影響が大きいのは入射部であるが、主な原因は RF 電子銃の空洞放電である。初期には RF 電子銃のレーザーの障害もあった。故障時間よりも入

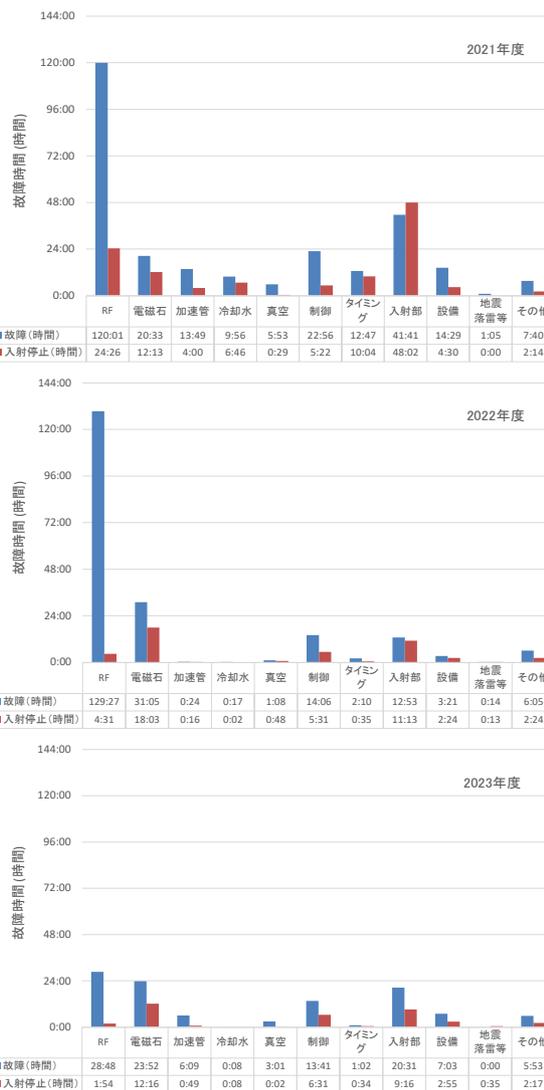


Figure 5: Breakdown statistics of the injector linac operational failures with failures in blue bars and injection stops in red bars.

射中断時間が長いのは、放電状態が解消されて故障状態から回復してもビーム品質が再現せず、運転者による時間を掛けたビーム調整によって入射が可能になる場合があるためである。電磁石の障害は当初は目立たなかったが、最近ではパルス電磁石の停止が相対的に目立つようになったため、昨年より制御機構の置き換えを進めている [9]。

装置故障時間の全てを入射中断に繋げないビーム運転技術の向上が図られており、効果が表れている。また、さまざまな監視機構の設置により障害処理の事前準備も図られている。

入射器では未だに装置の増設が続き変化が大きいが、運転状態が安定してきた場合にはカテゴリー別の故障率に基づいて次の年の予算配分に重みをつけることも考えられる。実際、オークリッジ国立研究所の SNS 施設などでは、そのような方針が停止時間の圧縮に効果を及ぼしている [10]。

5. マイクロ波トリップ

加速ユニットの大電力加速装置は故障修理や保守に時間を要するために、日頃から詳細な情報収集が行われている。例えば、Fig. 6 は、マイクロ波装置から見た加速ユニットの短期停止事象 (RF trip) と故障時間比率を示したものである。主に加速管の放電によるマイクロ波の反射を、VSWR の監視インターロックによって捉えてトリップしたものである。

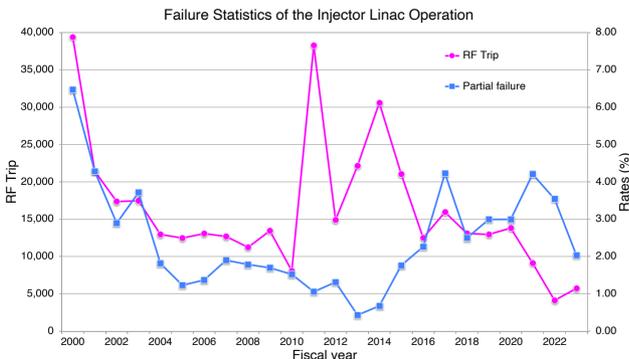


Figure 6: RF trips (red) and failures (blue) at the injector linac.

マイクロ波トリップのプロットのうち、2000年以前は非常に頻度が高い。これは KEKB 蓄積リングへの直接入射のために加速勾配を 2.5 倍に向上させたことと、当初無理をしてビーム電流を向上させようとしたことのために、頻度が高かったものである。その調整に徐々に慣れて、KEKB 運転の後半では頻度は落ち着いていた。しかし、2011年には東日本大震災のために全ての加速管が長期間にわたって大気暴露され、そのマイクロ波コンディショニングに時間を要し、トリップが増加した。さらに2012年から2015年については、SuperKEKB 向けの建設が本格的に行われ、入射器内の多数箇所が大気暴露されたことが影響したと考えられる。

SuperKEKB のビーム品質の制限が厳しいために、このトリップから加速電圧が回復する際に、ビーム条件の微妙なずれが蓄積リングの運転に影響する可能性がある。そのためトリップ頻度を下げるために、毎週 60 台の加速ユニットの運転状況を詳細に吟味し、トリップ頻度の高いユニットの加速電圧を下げて、他のユニットに加速を分担させる努力を続けている。その結果ここ 3 年は大幅にトリップ頻度を下げることに成功している。

このようにさまざまな角度から運転統計情報を検討することで、入射運転の改善を図ることが可能となると期待される。

6. まとめ

KEK 電子陽電子入射器においては、1982年の運転開始以来、運転統計情報や詳細な障害情報を蓄積している。入射が不可能となる入射中断時間比率は 1% 程度を推移しており、他の研究所に比べても良好な状態を維持している。このような統計情報を分析することにより、運転効率を改善するための知見も得ることができる。

素粒子物理衝突実験と放射光化学実験の双方を実施する電子陽電子複合加速器群の中で、入射器の入射中断比率が突出しないよう監視し、資源の分配を調整することが肝要と考えられる。また、長期の積分データを重視する素粒子物理実験と、短期ユーザのために数時間でも運転を中断させないことを重視する放射光科学実験の双方へ、バランスを考慮した運転計画や保守計画の最適化も重要となる [11]。

運転統計情報の解析により、大電流低エミッタンスの 5 蓄積リング同時トップアップ入射など、高度化する入射運転の最適化を進展させることが期待されるのである。

謝辞

入射器運転統計情報の理解を深める際に意見をいただいた、電子陽電子入射器のスタッフと三菱電機システムサービスの運転員の方々に感謝します。

参考文献

- [1] K. Akai *et al.*, “SuperKEKB Collider”, *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. **A 907**, 2018, pp. 188–199. doi:10.1016/j.nima.2018.08.017
- [2] K. Furukawa *et al.*, “Achievement of 200,000 hours of operation at KEK 7-GeV electron positron injector linac”, in *Proc. PASJ2020*, Matsuyama, Japan, Sep. 2020, pp.866–870. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP68.pdf
- [3] S. Kusano *et al.*, “The Operation Logbook System at KEKB Linac and Ring”, in *Proc. ICALEPCS2003*, Gyeongju, Korea, Oct. 2003, pp.430–432, paper WP528. <https://epaper.kek.jp/ica03/PAPERS/WP528.PDF>
- [4] T. Kudou *et al.*, “Development of operator interface using Angular in KEK e-/e+ Injector Linac”, in *Proc. PASJ2023*, Funabashi, Japan, Aug. 2023, pp.850–854. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/FRP1/FRP11.pdf
- [5] Y. Ogawa *et al.*, “Operation Status and Statistics of the KEK Electron/Positron Linac”, in *Proc. EPAC2006*, Edinburgh, UK, Jun. 2006, pp.2700–2702. <https://epaper.kek.jp/e06/PAPERS/WEPLS138.PDF>
- [6] K. Furukawa *et al.*, “Advanced acceleration mode switching for simultaneous top-up injection at KEK electron/positron injector linac”, in *Proc. PASJ2020*, Matsuyama, Japan, Sep. 2020, pp.1–6. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/WE00/WE00P01.pdf
- [7] Y. Enomoto *et al.*, “Pulsed Magnet Control System Using COTS PXIe Devices and LabVIEW”, in *Proc. ICALEPCS2019*, New York, USA, Oct. 2019, pp.946–949. doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2019-WECPR05
- [8] T. Toufuku *et al.*, “Operation and maintenance activity of RF system in KEK electron-positron linac (FY2021)”, in *Proc. PASJ2023*, Kitakyushu, Japan, Oct. 2022, pp.826–830. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/THP0/THP043.pdf
- [9] D. Wang *et al.*, “The Upgrade of Pulsed Magnet Control System Using PXIe Devices at KEK LINAC”, in *Proc. ICALEPCS2023*, Cape Town, South Africa, Oct. 2023, pp.635–638.

- doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2023-TUPDP048
- [10] G. W. Dodson, private communication at WAO2010, Daejeon, Korea, Apr. 2010.
- [11] K. Furukawa *et al.*, “Beam Operation for Particle Physics and Photon Science with Pulse-to-Pulse Modulation at KEK Injector Linac”, in *Proc. ICALEPCS2023*, Cape Town, South Africa, Oct. 2023, pp.627–630. doi:10.18429/JACoW-ICALEPCS2023-TUPDP046