

KEK 7-GeV 電子陽電子入射器と複数の蓄積リングへの入射運転 (II)

INJECTION OPERATION INTO MULTIPLE STORAGE RINGS AT KEK ELECTRON/POSITRON 7-GeV INJECTOR LINAC (II)

古川和朗^{*A)}、明本光生^{A)}、荒川大^{A)}、荒木田是夫^{A)}、池田光男^{A)}、恵郷博文^{A)}、榎本収志^{A)}、榎本嘉範^{A)}、大沢哲^{A)}、小川雄二郎^{A)}、柿原和久^{A)}、片桐広明^{A)}、紙谷琢哉^{A)}、川村真人^{A)}、倉品美帆^{A)}、佐武いつか^{A)}、佐藤大輔^{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)}、竹中たてる^{A)}、田中窓香^{A)}、張叡^{A)}、邱丰^{A)}、峠暢一^{A)}、中尾克巳^{A)}、中島啓光^{A)}、夏井拓也^{A)}、西田麻耶^{A)}、肥後寿泰^{A)}、福田茂樹^{A)}、舟橋義聖^{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)}、道園真一郎^{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)}, Dai Arakawa^{A)}, Yoshio Arakida^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Satoshi Ohsawa^{A)}, Yujiro Ogawa^{A)}, Kazuhisa Kakihara^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Masato Kawamura^{A)}, Miho Kurashina^{A)}, Itsuka Satake^{A)}, Daisuke Satoh^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Xiangyu Zhou^{A)}, Akihiro Shirakawa^{A)}, Hitoshi Sugimura^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Yuji Seimiya^{A)}, Tateru Takenaka^{A)}, Madoka Tanaka^{A)}, Rui Zhang^{A)}, Feng Qiu^{A)}, Nobukazu Toge^{A)}, Katsumi Nakao^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Maya Nishida^{A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Yoshisato Funahashi^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Takako Miura^{A)}, Katsuhiko Mikawa^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Kazue Yokoyama^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

KEK injector linac has delivered electrons and positrons for particle physics and photon science experiments for more than 30 years. It is being upgraded toward the SuperKEKB project, which aims at a 40-fold increase in luminosity over the previous project of KEKB, in order to increase our understanding of flavour physics. This project requires ten-times smaller emittance and five-times larger beam current in injection beam from the injector. Many hardware components are being tested and installed. Even during the 6-year upgrade, it was requested to inject beams into light source storage rings of PF and PF-AR. Furthermore, the beam demanding approaches from those storage rings are different. SuperKEKB would demand highest performance, and unscheduled interruption may be acceptable if the performance would be improved. However, light sources expect a stable operation without any unscheduled break, mainly because most users run experiments for a short period. In order to deal with the both requirements several measures are taken for operation, construction and maintenance strategy including simultaneous top-up injections in the virtual accelerator concept.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構においては、B フォトリ、電子・陽電子コライダー SuperKEKB のビーム・コミッションングが 2016 年より始まった。2010 年まで運転された KEKB 計画に比べて SuperKEKB 計画では、蓄積電流を倍増させ、また衝突点でのビームサイズを絞る、いわゆるナノビーム・スキームにより、40 倍のルミノシティを目指し、素粒子のフレーバ物理の理解を進展させることができると期待されている [1]。SuperKEKB 計画は電子陽電子入射器、7 GeV 電子リング (HER)、4 GeV 陽電子リング (LER) から構成され、この年末からは、低エミッタンスの陽電子を得るために新しくダンピング・リングも運転を開始する。電子陽電子入射器においては、Photon

Factory (PF) と PF Advanced Ring (PF-AR) の二つの放射光施設への入射を継続しながら、ナノビーム・スキームに対応する大電流・低エミッタンスの電子と陽電子の入射を達成すべく、改造を進めている [2]。

2016 年 2 月から 6 月までは、SuperKEKB の最初のコミッションング (Phase 1) が行われ、1 アンペア以上のビームのリング蓄積や、低エミッタンスビーム光学の確認などが行われた [3]。一方、2017 年 2 月には、PF-AR への直接入射路のコミッションングが行われ、PF-AR への 6.5 GeV 入射が可能となった [4]。Figure 1 に示すように SuperKEKB と 2 つの放射光施設を含め、4 つの蓄積リング及びダンピング・リングへそれぞれエネルギーやビーム特性の大きく異なるビームを切り替えながらの入射運転も視野に入ってきた。

特に SuperKEKB リングへ入射するビームについては、前の KEKB に比べ格段に小さなエミッタンス

* <kazuro.furukawa@kek.jp>

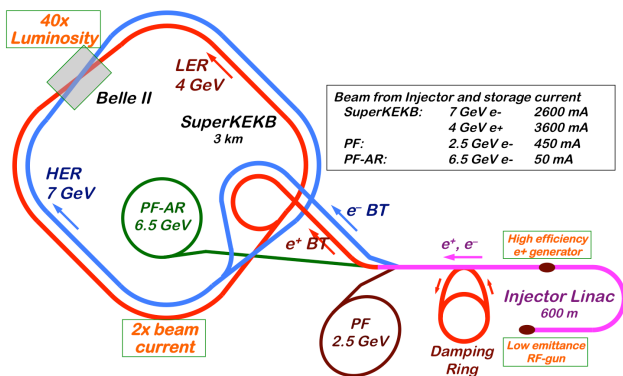


Figure 1: The configuration of electron/positron accelerator complex at KEK with linac and four storage rings of SuperKEKB-HER, LER, PF and PF-AR.

~20 mm-mrad とエネルギー拡がり ~0.1% が必要とされており、バンチ当たり 4 nC の大電流の下で達成することは大きな試練である。このようなビームを高精度に維持するために、大電流 RF 電子銃や新陽電子捕獲セクション等を新規に構築し、また、加速機器の横方向アライメント精度を短距離区間については 0.1 mm、600 m 全体にわたっては 0.3 mm に抑え、さらに高い安定度をもった運転制御を必要とする。その基礎として、各加速器装置の静的・動的な特性の評価・繰り返し補正により、設計通りのビームの確立を目指している。

これらの目的の異なる複数の蓄積リングへのビーム入射運転・更新について昨年度報告を行った [5]。ここでは、さらに最近の建設の進展との関連を考えてみたい。

2. 入射器の更新の計画

1978 - 1982 年に PF 放射光実験向けに入射器が建設されたあと、1982 - 1986 年には TRISTAN 素粒子実験向けに陽電子入射器が増設されたが、その際にはほぼ独立の建設が可能であり、人的資源の不足を除けば運転と建設の間の対立は小さかった。また、1995 - 1999 年の KEKB 向けの入射器の改造の際には、予算が計画的に配分されたために、放射光施設の運転計画を調整することも可能であった。改造期間中の毎年 4 - 6 月と 10 - 12 月を放射光入射運転に割り当て、残りの 6 ヶ月を建設期間に充てるとともに、1997 年の 1 - 9 月には連続で運転を停止し、前年までに製造された機器をまとめて設置する建設計画が可能であった [6]。

しかし、今回の SuperKEKB に向けた入射器の改造においては、2011 年の東日本大震災と重なったこともあり、2010 - 2016 年に計画的に製造を行うことが困難となり、連続してまとまった建設設置期間を獲得することができなかつた。そのために、前年度から放射光実験関係者と調整を行った上で、2017 年 5 - 9 月に初めて連続した設置期間を確保することができて、ダンピング・リングのコミッショニングに備えようとしているところである。

これらの蓄積リング加速器での実験を比較すると、少人数で短期間行われるために毎日の安定な実験が期待される放射光実験と、大人数で行われて最大限の年間積分性能の向上を求める素粒子実験の間で、入射器の建設更新計画の合意を取り付けることは容易ではない。

3. 同時入射の進展

更新時だけでなく、運転時においても実験目的による違いが大きいことは昨年度報告を行った [5]。特に、その差分を吸収する同時入射運転と仮想加速器概念の最近の進展を以下に述べる。

B ファクトリ電子陽電子衝突実験と放射光科学実験を同時に行うために、入射器はダンピングリングと協調運転するとともに、PF と PF-AR の 2 つの放射光蓄積リングと、HER と LER の 2 つの SuperKEKB 衝突蓄積リングに同時にビームを入射する必要がある。

KEKB 計画の終盤からクラブ空洞も用いた高い衝突性能が求められ、繊細な衝突点でのビーム光学係数の安定化が重要となった。そのためには蓄積電流も一定に保つことが重要とされ、トップアップ入射の必要性が高まった。同様に放射光実験においても精度の高い測定を行うために、できるだけ実験条件を一定に保つトップアップ入射が要望されていた。入射器は 1 秒間に 50 回、つまり 20 ミリ秒毎にビームを加速することが可能なので、20 ミリ秒毎にマイクロ波や電磁石などの装置パラメータを変更し、電子や陽電子を切り替えながら加速すれば、複数の蓄積リングに対するトップアップ入射を、あたかも同時であるかのように実行することができる。そこで入念な準備を重ね、2009 年からこのような同時入射を実現した [7, 8]。

SuperKEKB の実験が本格化すると、蓄積リングとは言ってもビーム寿命は 5 分程度になるとも予想されているので、数時間のビーム寿命があった KEKB 計画に比べると、格段に同時入射の必要性が高い。このため、入射器にはさまざまなパルス動作装置を追加で導入し、50 Hz で動作を切り換えることによって、低エミッタンス大電流の電子陽電子ビームを確実に制御した上で、4 + 1 蓄積リングに同時入射することが重要となる。

この同時入射は、イベント制御機構によって高速制御されている [9, 10]。イベント制御機構上にはソフトウェア的に 10 個のビームモードが用意され、その内の 4 つが通常の SuperKEKB-HER 及び LER、そして PF、PF-AR の入射運転に対応している。一つのビームモードは複数のイベントコードを伴ない、一つのイベントコードは区別のための番号と約 10 ps 精度のタイミング情報を入射器全体（と蓄積リングの入射システム）に運ぶ。高速に切り替わるべき約 250 個ほどの装置パラメータは、これらのイベントコードに反応して高速に変化する。

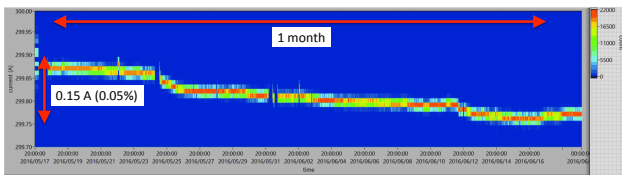


Figure 2: Stability measurement of pulsed magnet system at 50 Hz for a month.

3.1 パルス電磁石の開発

KEKB の運転時には、低エミッタンスのビームが要求されなかったため、軌道の乱れやビーム光学的マッチングの悪化の影響は小さかった。そのため、入射器内では HER、LER、PF 向けのビームについて、ビーム光学的な妥協点を探して加速を行い、ビーム光学の調整は、入射器からそれぞれのリングへのビーム輸送路において行われた。

しかし、共通の DC 電磁石設定を用いた妥協点のビーム光学条件では、エネルギーを含めて大きく異なるそれぞれの入射ビームの軌道がミリメートル以上ずれてしまうので、高次航跡場による射影エミッタンスの増大が大きくなり、SuperKEKB 向けの低エミッタンスビーム入射の要求からは許されない。そこで、入射器の特に下流部を中心にパルス電磁石を新設して、入射ビームの種類毎に、ビーム光学条件とビーム軌道を確実に管理する必要がある。

このような目的のために、50 Hz で動作を切り換えることが可能なパルス収束電磁石電源を 30 台、パルス軌道補正（ステアリング）電磁石を 36 台増設し、10 月から運用する予定となっている。また、電子銃の選択やビーム診断のためにさらに数台の偏向電磁石を必要とする。この内、パルス収束電磁石と偏向電磁石は、約 1 mH のインダクタンスに対して、330 A、340 V、1 ミリ秒という比較的大電力のパルスを安定に供給する電源装置を用意する必要がある。また、航跡場の影響を避けて低エミッタンスを維持するために、パルス軌道補正電磁石についても、高精度の軌道再現性が求められる。

パルス電源自体は高強度レーザー向けに内製していた電源などの実績があり、それらを応用することができる。しかし、インダクタンス負荷に対応し、さらに入射器の商用電源の大幅な増強を避けるために、負荷からのエネルギー回収を行う必要があるため、たいへん挑戦的な開発となった。構成としては、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transister) 素子 2 個により DC 電源、エネルギー回収用コンデンサ、負荷電磁石との間の電流制御を行なっている。このエネルギー回収により、7～8 割の電力が節約できると考えている。昨年度までの試験においては、Figure 2 のように数ヶ月の連続運転に耐えられるようになっており、安定度も仕様を満足している。

昨年 6 月にはビームラインに設置した 2 台のパルス収束電磁石を用いて、磁場強度をパルス毎に変更した際に、中心を通らないビームが正しく偏向されるかどうかの試験を行った。通常の運転に使われ

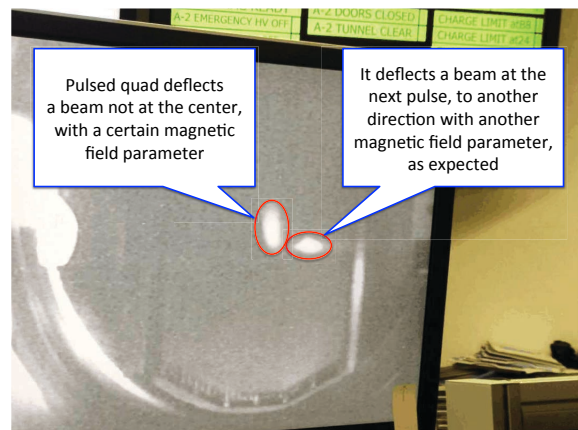


Figure 3: The beam test of pulsed magnets with pulse-to-pulse beam displacements.

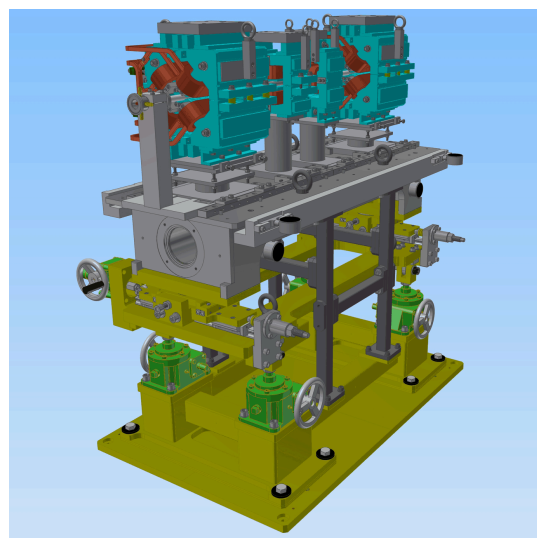


Figure 4: Girder design with precise alignment movers.

ているイベント同期制御系を接続してみたところ、Figure 3 のように期待した通りの動作を確認することができた。

66 台のパルス電磁石を設置するほとんどの場所では、Figure 4 に示すように新しく入射器内で図面設計した架台に、2 台ずつのパルス収束電磁石とパルス軌道補正電磁石を乗せて設置する。この架台は将来の高精度ビーム制御に向けて、10 μ m 精度のアライメントが可能となる。

3.2 PF-AR 直接入射路

2016 年までは、エネルギーの異なる PF-AR と (Super)KEKB-HER の電子入射について、入射器からリングまでのビーム輸送路が共用されていたために、特に PF-AR の入射が行われる 10～15 分間は同時入射が不可能となり、実験の安定度に影響を与えていた。SuperKEKB 計画においては、高いルミノシティを達成するために、蓄積ビームの寿命が 5 分程度と極端に短くなることが予想され、10～15 分の入射中断は事実上の実験停止を意味すると考えられた。そのた



Figure 5: The beam switch yard at the end of linac. From right to left, beamlines of PF, PF-AR, straight dump, SuperKEKB LER, HER, and east dump.

め、SuperKEKB の陽電子入射とエネルギーを共通にして、3 GeV の電子の代わりに、PF-AR には 4 GeV の陽電子を入射する案が提案されたこともあった。

しかし技術的な困難も指摘され、その後入射器と PF-AR を直接結ぶ、直接入射路を建設することになった。昨年度、その直接入射路のコミショニングにも成功させることができた [4]。将来は 6.5 GeV のエネルギーで PF-AR にトップアップ運転の可能性も生まれ、4 リングの同時入射が実際に可能となれば、双方に大きな利点が生まれることになる (Figure 1)。

直接入射路の建設においては、入射器終端の第 3 スイッチ・ヤードにおいて、ビームを振り分ける電磁石が必要となる。当初は、先に述べたエネルギー回収型のパルス四重極電磁石電源と同じ技術を用いて、パルス偏向電磁石を開発し、SuperKEKB や PF 向けのビームと振り分けることを想定していた。しかし、大きい曲げ角が必要であるために励磁繰り返しに 5 Hz に制限されるなど困難があった。一方、直流セプタム型電磁石を追加して、PF 向けの既存のパルス偏向電磁石と組み合わせることによっても、ビームを振り分けることが可能であるため、最終的には直流電磁石を採用することになった。

今年度集中的に追加設置される同時入射向けの新規装置と組み合わせることにより、近い将来、PF-AR

も含めた 4 リング同時入射が可能になると期待される (Figure 5)。

4. まとめ

2018 年早々に予定されている次の SuperKEKB コミショニング (Phase 2) 運転に向けて、2017 年夏の長期停止期間を利用した機器の設置・試験を進めている。特に今回設置を進めているパルス電磁石群は、同時入射機構を通してビーム特性や実験形態・目的が異なる素粒子実験と放射光実験の両立に寄与するものと期待される。今後も精度の高いビーム制御を確保しながら、同時入射の技術開発を進め、SuperKEKB リング入射と放射光施設入射の双方の高度化する運転に対応が可能な、複数仮想加速器の概念を進展させる方向性を追求していきたい。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A011.
- [2] T. Natsui *et al.*, “Present Status of the KEK Electron/Positron Injector Linac”, *these proceedings of PASJ'17*, FSP004, Sapporo, Japan, 2017.
- [3] T. Kamitani *et al.*, “SuperKEKB Phase1 (Injector+Ring) Status Report”, *Proc. PASJ'16*, MOOLP02, Chiba, Japan, Aug. 2016, pp.4-8.
- [4] N. Higashi *et al.*, “Construction and Commissioning of Direct Beam Transport Line Dedicated for PF-AR”, *these proceedings of PASJ '17*, THOL10, Sapporo, Japan, 2017.
- [5] K. Furukawa *et al.*, “Injection Operation into Multiple Storage Rings at KEK Electron/Positron 7-GeV Injector Linac”, *Proc. PASJ'16*, MOP059, Chiba, Japan, Aug. 2016, pp.501-504.
- [6] I. Abe *et al.*, “The KEKB Injector Linac”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **499**, 2003, pp.167-190.
- [7] K. Furukawa *et al.*, “Event-based Timing and Control System for Fast Beam-mode Switching at KEK 8-GeV Linac”, *Proc. PAC'09*, Vancouver, Canada, 2009, pp.4797-4799.
- [8] M. Satoh *et al.*, “First Simultaneous Top-up Operation of Three Different Rings in KEK Injector Linac”, *Proc. LINAC'10*, Tsukuba, Japan, 2010, pp.703-707.
- [9] K. Furukawa *et al.*, “New Event-based Control System for Simultaneous Top-up Operation at KEKB and PF”, *Proc. ICALEPCS'09*, Kobe, Japan, 2009, pp.765-767.
- [10] <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/event/>