

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 INJECTION OPERATION INTO MULTIPLE STORAGE RINGS AT KEK ELECTRON/POSITRON 7-GEV INJECTOR LINAC

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)}、榎本收志 ^{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)}、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)}、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)}, 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)}, 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)}, 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. As the injection energies for light sources were lower, a temporary electron gun was installed at the middle of the linac, that made the construction and commissioning of upstream part of linac manageable. 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、電子・陽電子非対称コライダ SuperKEKB のコミッショニングが始まっている。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、2010 年まで運転された KEKB に比べて 40 倍のルミノシティを達成し、素粒子のフレーバ物理の解明に繋げることができると期待されている [1]。SuperKEKB 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、また、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・リングも建設される。電子陽電子入射器においては、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ニング (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]。2017 年度には、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高速で切り替えながら入射運転を行う予定である。Photon Factory (PF) へは 2.5 GeV、PF Advanced Ring (PF-AR) へは 2017 年から 6.5 GeV、さらに HER・LER へは大電流の電子 7 GeV・陽電子 4 GeV という大きく異なるビーム特性がそれぞれ求められている。

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 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 5 nC の大電流の下で達成すること

* <kazuro.furukawa@kek.jp>

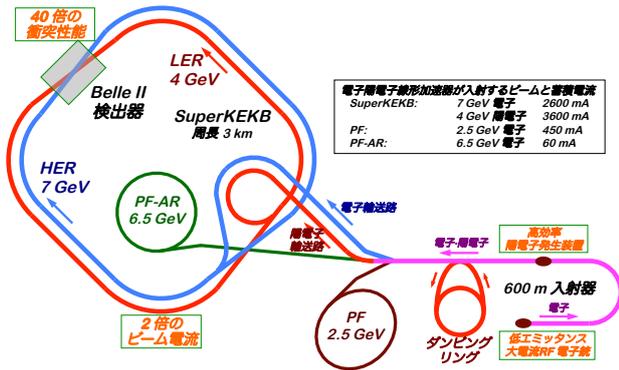


Figure 1: The configuration of electron/positron accelerator complex at KEK with linac and four storage rings of SuperKEKB-HER, LER, PF and PF-AR.

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、新規に大電流 RF 電子銃や陽電子捕獲のためのフラックスコンセントレータ等を導入し、また、加速機器の横方向設置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。

これらの複数の目的の異なる蓄積リングへのビーム入射の運転管理過程について考えてみたい。

2. 素粒子実験と放射光実験向けの入射

ビーム入射運転を行う際には、PF と PF-AR で行われる放射光科学実験と SuperKEKB で行われる素粒子物理実験の性格が異なり、そのことが加速器開発やビーム維持の進め方に影響を与えることがある。

素粒子実験においては、常により高い加速器性能を求め、また、それを限界まで追求するため、加速器の故障を恐れなところがある。成果の発表を行う国際会議までの半年程度の期間での積分性能がより高くなるのであれば、リスクを取っていこうという考え方である。これは、長期にわたる固定のユーザーグループによる実験であるための、ある意味必然的な考え方で、長期の積分性能を重視することになる。また、長期間にわたって同じ実験グループと加速器グループが同じ性能・成果向上の目的を共有するため、その達成感を共有することにもなる。

これに対して、放射光実験については、一つの実験は数日程度で行われることもあり、加速器施設に直接的に性能向上を求めることは少なく、むしろ安定なビームが求められ、故障は許されない。短期の多数のユーザーグループの実験が実施されるために、故障停止を嫌い、安定性能を重視することになる。

維持予算の使用目的についても、素粒子実験を重視すれば、改善のための予算執行の優先が求められることになり、放射光実験を重視する場合は、予防的保守も含めた計画的な保守のための予算執行を求められることになるので、それらの間のバランスが重

要になる。

実は双方の運転形態について、究極として求められているのは、性能が高くかつ安定な運転であるので、同じ目標を持っているわけだが、それぞれの実験においても、他の海外の研究グループとの競争があり、加速器に優先して求める性能が少し異なることになる。

2.1 保守と運転

このようなビーム運転に対する要求の違いから、加速器保守に対する考え方も異なる。素粒子実験向けの運転では加速器に大きな故障が生じるまでは連続して運転を求めることが多い。TRISTAN の運転においては、長期間の連続運転を行ったこともあった。性能向上を重視するあまりに、装置の使用やさえも変更することがあるため、予防的保守が重視されない傾向がある。SLAC における素粒子実験向けの運転においては、できるだけ長期間連続して運転を行い、その間に小規模な修理・保守項目を蓄積しておき、回復できない大きな修理が必要となった際に ”Repair Opportunity Day” という加速器保守日が宣言された。

一方、放射光実験向けの運転では、予定しない加速器停止をできるだけ避ける意味から、定期的・計画的な保守日を設ける場合も多い。TRISTAN 計画が終了して、KEKB 計画向けの改造を行いながら放射光施設への入射を継続した際に、改造を計画的に進めるためにも、定期的な加速器保守日が設けられることになった。KEKB 計画が始まってからも、一時期を除いては 2 週間に一度定期的な保守日を設けることが素粒子実験側と放射光実験側の合意となっている。

なお、2010 年から行われている加速器の SuperKEKB に向けた改造・建設においても、入射器から放射光施設への継続的な電子入射が求められている。エネルギーの低い放射光施設への入射のために入射器全体の下流側 8 分の 3 を使用することにして、まず改造の初めに仮の電子銃が設置された。1994 年から行われた KEKB 向けの改造においては、最長、9 ヶ月間の連続入射停止期間があったが、SuperKEKB 向け改造ではこれまでは長期の停止は無く、2017 年度に 5 ヶ月程度の停止が期待されているのみである。これは、予算の集中的な配分がされなかったことも影響しているが、改造作業を行う現場には厳しい条件となっている。同時期に発生した東日本大震災からの復旧も重なり、上に述べた仮電子銃が効果的ではあったが、並行した放射光施設入射と復旧及び改造作業はなおさら厳しいものであった。

ところで、故障を恐れずに性能向上を追求する運転形態を採用する素粒子実験向けの入射については、装置担当者、運転員が、日々新しい事態に遭遇し、対応を求められる。新しい事態に的確に対応できれば、評価されることになるために、やりがいも高くなる。また、まさに毎日が On-the-job-training と言える。一方、安定運転を求められる放射光施設入射に対しては、手続きに急激な変化が生じないため、自動化が可能となる余地が大きい。しかし、積極的に運転に変化を導入しないために、運転技術の訓練の機会が少なく、また突発的な事態の訓練が難しいために、運転マ

ニュアルによる訓練が欠かせなくなると思われる。

2.2 他の施設との比較

海外においても、電子入射器を素粒子実験と放射光実験の双方に利用した例は多い。例えば、SLAC においては、SLC リニアコライダの電子を NSRL 放射光施設にも入射していたが、SLC 向けのビーム利用が優先され、放射光実験へのビーム割り当てが困難になった。そこで、小型の専用入射器を独立に建設することになった。これによって、それぞれの目的に応じた運転に専念できるようになり、その後の SLC の性能向上に繋がり、放射光施設も運転時間が十分確保されることになった。DESY においては、電子・陽子コライダ HERA への入射と放射光施設への入射の両立が求められたが、SLC のように連続してビームが必要とされるわけではなく、蓄積リングに間欠的に入射を行えばよかったので、大きな問題になることはなかった [4]。

KEKB の運転開始当初には、一度電子と陽電子を入射すると 1-2 時間衝突実験を継続した。従って、その間に放射光施設に入射することも可能で、DESY の状況に近かった。しかし、KEKB の後期には衝突条件の維持のためのビーム安定化が求められ、トップアップ入射が必要になった。その頃には、放射光施設においても実験条件の維持のためにトップアップ入射が重要になっていった。また、SuperKEKB も蓄積リングではあるが、ナノビーム・スキームによりビーム寿命が短いので、連続トップアップ入射を求められている。そのため、状況はより SLC に近づいてきたことがわかる。

ちなみに、DESY と SLAC はその後 FEL 放射光施設へと舵を切り、加速器の運転形態が大きく変わることとなった [5]。

3. 同時入射と仮想加速器概念

素粒子実験向けと放射光実験向けの双方に対応することは、このようなビーム要求の違いから容易ではない。その解決策の一つとして、一つの入射器を複数の蓄積リング向けの複数の仮想加速器として動作させる考え方を導入してきた。

3.1 同時入射

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 [6, 7]。

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 [8, 9]。イベント制御機構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 KEBB-HER 及び KEBB-LER、PF、PF-AR 入射運転に対応していた。一つのビームモードには複数のイベントコードが伴ない、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 150 の装置パラメータはこのイベントコードに反応して高速に変化した。

2010 年までは、PF-AR 入射と KEBB-HER 入射はビーム輸送路を共用していたために、同時入射が不可能であったので、PF-AR だけ 1 日 2 回の入射を行い、他の KEBB-HER、LER、PF の 3 蓄積リングの同時入射を行っていた。典型的には 1 秒間あたりの平均で、KEKB-HER へ 12.5 回、KEKB-LER へ 25~37 回、PF へ 0.2 回程度の入射を行っていた。2017 年からは PF-AR 向けの直接入射路が独立に使用可能となるので [10]、SuperKEKB-HER 及び LER、PF、PF-AR の 4 つの蓄積リングとさらに陽電子ダンピング・リングへの同時入射を行うことになる。ちなみに、SuperKEKB 向けには精度の高いビーム制御が必要になるため、装置パラメータの数は 250 ほどになると思われる。

3.2 仮想加速器概念

上に述べたイベント制御機構は、それぞれのビームモード内のイベントコードにตอบสนองさせたビームモニタ同期読み出しも可能にする。これらのイベント制御された装置パラメータとビームモニタ同期読み出し情報は、ビームモードが異なれば、関連を持たない。従って、それぞれのビームモードでのビーム運転はほとんど独立に扱うことができる。

例えば、物理的には入射器内の同じ場所のビームモニターを使用して、エネルギー安定化フィードバックを動作させる場合にも、ビームモードが異なれば、

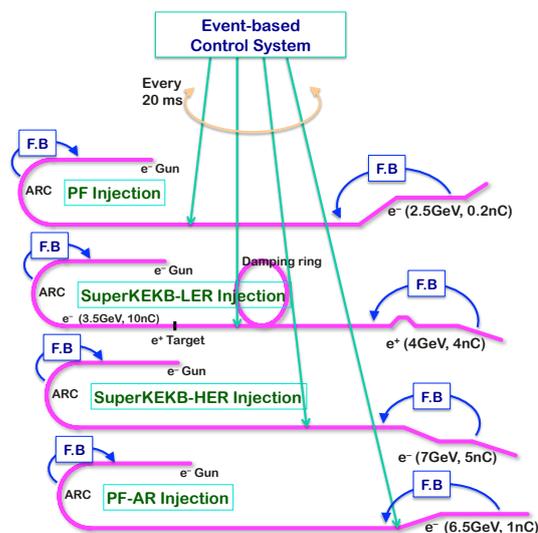


Figure 2: Each virtual accelerator (VA) would be associated with several beam feedback loops, independent of loops in other VAs.

制御変数は独立に存在して、独立のフィードバック・ループを動作させることができる [11]。このことは複数の加速器を並行して、かつ独立に運転していることと捉えることができるので、Figure 2 に示すように、複数の仮想加速器を運転することに相当する [12]。

このような複数の仮想加速器をそれぞれの蓄積リングのビーム入射要請に対して独立に運転することができれば、素粒子実験や放射光実験からの相異なるビーム特性の要請であっても、少なくとも一部に関しては相互に影響させずに運転することができると考えられる。つまり、仮想加速器概念を介在させることによって、性格の異なる素粒子実験向けの入射と放射光実験向けの入射の間の調停を行うことができることになる。

4. まとめ

SuperKEKB のコミッショニングが始まっているが、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に対応する蓄積リング入射について、入射器で考慮すべき点について考えてみた。ますます高度化する運転の中で、様々な要点で入射に対する要求が異なってきている。加速器保守などの考え方については、11 年間にわたる KEKB の運転の間に、妥協点を見出したものもあるが、今後とも調停が必要と考えられる点も多い。一部の要点については、イベント制御機構を基礎とした複数の仮想加速器を入射に用いるという概念を導入することにより、技術的に調停が可能となることがわかった。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A011.
- [2] K. Yokoyama *et al.*, “Present Status of the KEK Electron/Positron Injector Linac”, *these proceedings for PASJ 2016*, FSP020, Chiba, Japan, 2016.
- [3] T. Kamitani *et al.*, “SuperKEKB Injector and Ring Phase-1 Status”, *these proceedings for PASJ 2016*, MOOLP02, Chiba, Japan, 2016.
- [4] M. Bieler, “From High Energy Physics to Synchrotron Radiation”, *WAO'12*, Menlo Park, USA, 2012.
- [5] R. Erickson, “Adapting to Changes at the SLAC National Accelerator Laboratory”, *WAO'12*, Menlo Park, USA, 2012.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/event/>
- [10] S. Nagahashi *et al.*, “The Construction of the Direct Beam Transport Line for the PF-AR”, *these proceedings for PASJ 2016*, MOP075, Chiba, Japan, 2016.
- [11] K. Furukawa *et al.*, “Pulse-to-pulse Beam Modulation and Event-based Beam Feedback Systems at KEKB Linac”, *Proc. IPAC'10*, Kyoto, Japan, 2010, pp.1271-1273.
- [12] A. Akiyama *et al.*, “Accelerator Control System at KEKB and the Linac”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A008.