

話 題

高速ビームモード切り替えのための KEK 入射器アップグレード(II)

佐藤 政則*1・IUC*2

KEK injector linac upgrade for fast beam-mode switch (II)

Masanori Satoh*1 for the IUC members*2

1. はじめに

KEK の電子・陽電子入射器は、全長約 600 m の線形加速器であり、4つのリング(KEKB 電子/陽電子, PF, PF-AR) へ、異なる品質のビームを供給している。表 1 は、各ビームモードに於ける主要な入射器パラメータを示している。入射器のビームモード毎に、要求されるビームの電荷量・電荷種・エネルギー等が異なるため、電磁石磁場・RF 位相・タイミング等の入射器パラメータは、当該ビームの輸送効率ひいてはリングへの入射効率を最大とする組み合わせを用いる必要がある。このため、異なるリングへのビーム入射は、入射器パラメータをその都度切り替える事により実現している。

現在、KEKB リングは、連続入射 (Continuous Injection Mode; CIM) 運転を行っており、KEKB 電子及び陽電子用のビームモードを頻りに切り替えた運転が行われている。図 1 に、KEKB 電子/陽電子モード

間に於ける入射器パラメータ切り替え時間の一例を示す。電磁石磁場・タイミング等、多くのパラメータをシーケンシャルに切り替えており、典型的な切り替え時間は約 30 秒である。KEKB に於けるルミノシティ調整効率の更なる向上のために、より高速な電子

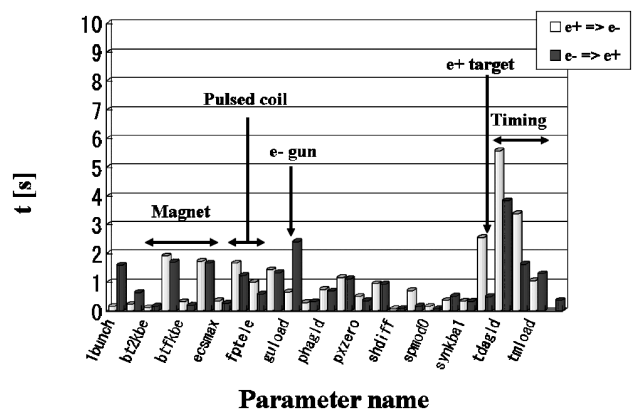


図 1 KEKB 電子/陽電子モード切り替え時間の一例

表 1 入射器ビームモードと主要パラメータ

| ビームモード: | KEKB 電子 | KEKB 陽電子 | PF | PF-AR |
|-------------|--------------------|------------------------|----------------|----------------------|
| 電荷量/ 電荷種: | 1 nC/電子 | 1 nC/陽電子 (一次電子: 10 nC) | 0.1 nC/電子 | 0.2 nC/電子 |
| 入射ビームエネルギー: | 8 GeV | 3.5 GeV | 2.5 GeV | 3 GeV ^(*) |
| 最大ビーム繰り返し: | 50 Hz | 50 Hz | 25 Hz | 25 Hz |
| 使用電子銃: | A1 ^(**) | A1 | A1 | CT ^(***) |
| ECS 電磁石: | ON (KEKB mode) | ON (KEKB mode) | ON (KEKB mode) | ON (AR mode) |

(*) 蓄積後、メインリングにて最大 6.5 GeV まで加速する。

(**) 入射器最上流に設置の電子銃

(***) A1 電子銃より約 240 m 下流に設置の電子銃

*1 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設

Accelerator Laboratory, KEK, High Energy Accelerator Research Organization

(E-mail: masanori.satoh@kek.jp)

*2 PF 光源・KEKB・入射器メンバーから構成されるアップグレード共同チーム

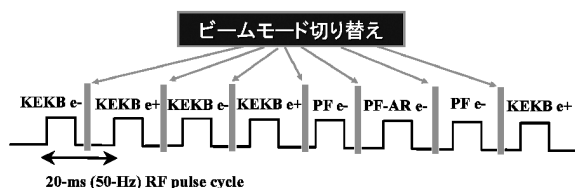


図2 高速ビームモード切り替えの概念図

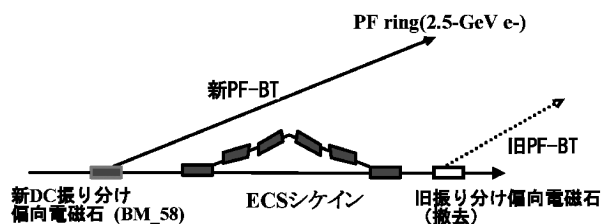


図3 新 PF-BT ライン及び ECS 電磁石

/陽電子モード切り替え運転への要求が高まっている。

一方、PF 及び PF-AR リングは、1 日 2 回の定時入射を行っている。PF リングに於いては、近年の放射光リングで広く行われている Top-up 運転への要望が高まってきている。しかしながら、現状のビームモード切り替え運転形態を用いる限り、KEKB CIM 及び PF Top-up を同時に満たす運転は困難である。このため、KEKB 及び PF リングへ同時入射を行うためのアップグレード計画が進行中である^{1,2)}。さらに、平行して検討が進められている PF-AR を含めた高速ビームモード切り替えが実現されると、全 4 リングへの同時入射が可能となる。このようなビーム運転が可能となれば、各リングに於ける物理実験の高効率化に加えて、各リングは他リングの入射状況に依らずにマシンスタディーを行う事が出来る等、加速器側のアクティビティ向上に対しても非常に有益である。

図 2 に、理想的な高速ビームモード切り替え運転の概念図を示す。高速ビームモード切り替え運転では、タイミング信号・低電力 RF 位相等の必要最小限のパラメータのみを高速に変更し、DC 電磁石磁場値等の高速切り替えが困難な物に対しては、異なるビームモードに於いても、協同調和的な同一設定値を使用する。本アップグレードは、上記の方式に基づき、入射器の最大ビーム繰り返しである 50 Hz 毎に、ビームモードを切り替える事を最終目的としている。

2. アップグレード計画概要

本計画は、Phase-I~III から成る段階的アップグレードであり、Phase-I は 2005 年夏に完了した。各アップグレード Phase の概要を以下に示すが、詳細は以前の学会誌に掲載された通りである¹⁾。現在は、Phase-II, III に向けた各種マシンスタディーを精力的に行っている。

2.1 Phase-I (新 PF-BT ライン)

2005 年夏に行った Phase-I では、約 60 m の新規 PF-BT ラインを建設した³⁾。新 PF-BT ライン建設の目的は、入射器最下流の ECS シケインをバイパスする事である。図 3 に、新・旧 PF-BT ライン及び

ECS シケインの位置関係を示す。旧 PF-BT では、ECS 下流に PF-BT 用振り分け偏向電磁石が設置されていたため、KEKB・PF 間のビームモード切り替え時に ECS OFF/ON 及び初期化の工程が必要であった。一方、新 PF-BT では、ECS シケインの上流に振り分け偏向電磁石を設置する事により、KEKB・PF 間のビームモード切り替え時に於いても、ECS の初期化等を不要とした。これにより、往復でのモード切り替えに要する時間は、約 5 分半から 2 分半へと半減し、大きな成果を得た。

Phase-II 以降に必要とされるパルス偏向電磁石システムは、2007 年度冬期メンテナンス中にインストールが完了し、現在は通常ビーム運転において安定な運用を行っている。パルス偏向電磁石システムについては、第三章にて詳述する。

2.2 Phase-II (KEKB 電子/PF モードの高速切り替え)

Phase-II においては、KEKB 電子/PF モード間の高速ビームモード切り替えを実現する。現在、入射器のビームモード切り替えでは、電磁石磁場・電子銃・タイミング及び RF 位相等の運転パラメータを変更している。このうち、現行システムに於いては、電磁石磁場を高速制御することは困難である。そこで、我々は、“Multi-Energy Linac” と呼ばれる方式を用いることにより、高速ビームモード切り替えを実現する⁴⁾。本方式では、異なるビームモードすなわち、異なるエネルギー・電荷量のビームを加速する場合においても、同一の電磁石磁場パラメータを用い、エネルギーの変更は、低電力 RF 位相の高速制御により行う。計算機シミュレーション及びマシンスタディーによる feasibility study の結果、原理的な困難はないことが検証された。また、本方式を用いた KEKB 電子リング及び PF リングへの入射スタディーを幾度か行い、入射率・物理実験検出器へのノイズレベル等から、実用運転に適用可能であることを確認した。

現在、Phase-II 以降に必要な Multi-Energy 方式の運転パラメータ開発に向けたマシンスタディーを精力

的に行っている。最近のスタディー結果によると、四極電磁石の fudge factor を精密に求める事により、入射器の実ビーム軌道及びモデル計算が高精度に一致することを確認した。さらに、バンプ軌道による軌道補正など、実運用ソフトウェアツール群の整備も同時に進められている。これらのスタディー結果については、別の機会に詳しく報告する予定である。

2.3 Phase-III (KEKB 電子/陽電子, PF モードの高速切り替え)

Phase-III に於いては、KEKB 陽電子ビームを含めた高速モード切り替えを行う。現システムでは、陽電子生成標的部を機械的に出し入れすることにより、電子/陽電子モードの切り替えを行っているため、高速なモード変更は困難である。そこで我々は、孔空き陽電子生成標的を使用し、標的直上流の電子ビーム軌道を高速制御する方式を採用する。

図 4 に、孔空き陽電子生成標的の写真を示す。標的は直径 5 mm のタングステン結晶であり、標的中心から横方向に 4.5 mm ずれた位置に、直径 3 mm の孔を設けている。陽電子モード時には、一次電子ビームを標的へ衝突させるが、電子モード時には、一次電子ビームが孔を通過することにより下流へ導かれる。原理実証実験では、孔を通過する電子ビームの量を、標的を抜いた場合と比べて 90% 以上にまで高める事に成功した。さらに、Multi-Energy 方式による PF リング入射に於いて、孔を通過させた電子ビームを用いたところ、安定なビーム入射を確認した。

従来、入射器では、陽電子生成標的としてタングステン非結晶を使用してきた。近年、我々は、新たな陽電子生成標的としてタングステン結晶を採用する事により、陽電子生成効率を約 25% 増加させると共に、標的部の熱負荷を 20% 程度低減させることに成功している⁵⁾。陽電子生成標的は、毎年夏期メンテナンス中に交換しているが、本年夏にインストール予定の結晶標的も、現在準備を進めている。

一次電子ビームの高速軌道制御には、パルスステアリング電磁石が不可欠である。昨年度冬期メンテナンス中に、水平方向 (3 台) 及び垂直方向 (1 台) のパルスステアリング電磁石を設置した (図 5)。これらの電磁石は、既存の予備品を流用し、電源についても比較的安価な商用品を用いる事により、導入コストを抑えた。既に、基礎的な試験を終了し、実ビーム運転のための各種ソフトウェアを準備中である。また、一次電子通過量をさらに向上させるために、パルス四極電磁石の導入も検討されている。

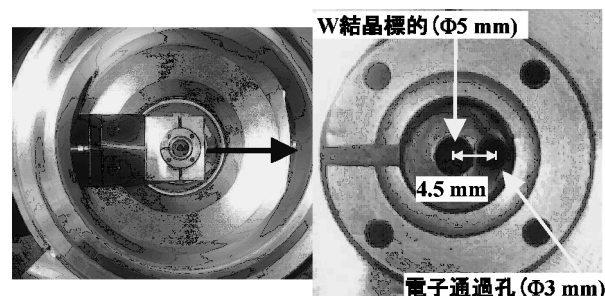


図 4 孔空き陽電子生成標的

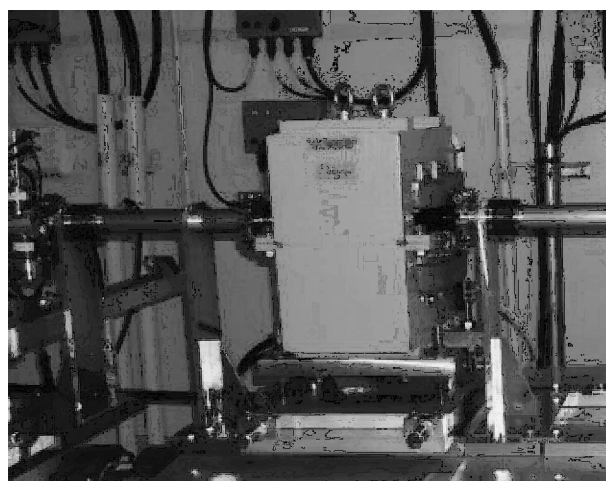


図 5 パルスステアリング電磁石

2.4 PF-AR 入射

現状の PF-AR 入射には、3 GeV 電子ビームを用いている。その後、メインリングにて 6.5 GeV まで加速し、ユーザー運転に供される。PF-AR Top-up を行うためには、6.5 GeV 入射が必要となるが、これには、BT ラインの電磁石及び電源の増強が必要であり、現状のトンネルスペースを考えると、AR-BT ラインを 6.5 GeV 対応にする事は非常な困難を伴う。

しかしながら、Top-up を行わない場合には、KEKB 陽電子モードと同一の 3.5 GeV 陽電子ビームを入射する方法が提案されている。この場合、AR-BT 部の偏向電磁石電源改造・四極電磁石ボア径縮小及びこれに伴う真空ダクト交換を必要とする。さらに、AR-BT 及び KEKB-BT は一部の区間が共通であるため、BT 下流部において振り分け用パルス偏向電磁石の新設を要する。詳細な振り分けラインの検討・設計は、今後進めていく予定である。

3. パルス偏向電磁石

KEKB 及び PF リングへの高速ビーム切り替えを

表2 パルス偏向電磁石システム主要パラメータ

| | |
|-------------|-----------------|
| パルス偏向電磁石： | |
| ビーム曲げ角： | 7 deg. (3-GeV) |
| 最大磁場： | 1.36 T |
| ギャップ： | 157×30 mm (W×H) |
| コイル巻き数： | 1 ターン |
| パルス偏向電磁石電源： | |
| 最大電流値： | 32 kA (12.5-Hz) |
| | 27 kA (25-Hz) |
| パルス幅： | 200 us (半サイン) |
| 安定度： | 0.1% |
| セラミックチェンバー： | |
| 全長： | 1200 mm |
| コーティング： | Ti (1 μm) |



図6 パルス偏向電磁石電源及び内部リアクトル

行うためには、PF ビームを PF-BT 側へ選択的かつ高速に蹴り出すためのパルス偏向電磁石が不可欠である。このため、昨年度冬期メンテナンス時に、Phase -Iにて設置した既存の DC 振り分け偏向電磁石 (図3の BM_58) をパルス偏向電磁石と交換した。表2に、パルス偏向電磁石システムの主要パラメータを示す。また、図6、図7にパルス偏向電磁石電源及び磁石本体の写真を示す。電源筐体は、入射器クライストロンギャラリ最下流に設置されているが、そのサイズは、通常のクライストロンモジュレータより若干コンパクトな物である。電源制御部は、専用ボード及び PLC により構築されている。これらのローカルコントローラ・入射器制御システム間は、EPICS 経由の制御を行っている。磁石制御及び監視パネルのための HLA (High Level Application) 開発には、Python 及び EPICS MEDM を使用した。

現在の PF リングは 2.5 GeV 運転を行っているが、将来の可能性を考慮し、3 GeV 入射まで対応可能な設計を行った。電源の最大繰り返しは 25 Hz であり、出力電流は 200 μs 幅の半サイン型である。また、電源の出力安定度は、短期・長期的のいずれに於いても 0.1% 以下を実現している。電磁石本体の予備機は既に製作が完了し、本年夏期メンテナンス中に磁場測定等を行う予定である。また、電磁石電源については、主要部品の予備品を確保し、不測の障害に備えている。

パルス偏向電磁石部には、磁場遮蔽の影響から通常の金属製チェンバーが使用出来ないため、全長 1200 mm のセラミックチェンバーを使用している。断面形状は電磁石のギャップ形状から、レーストラック型となっている。また、チェンバー内壁には、約 1 μm 厚

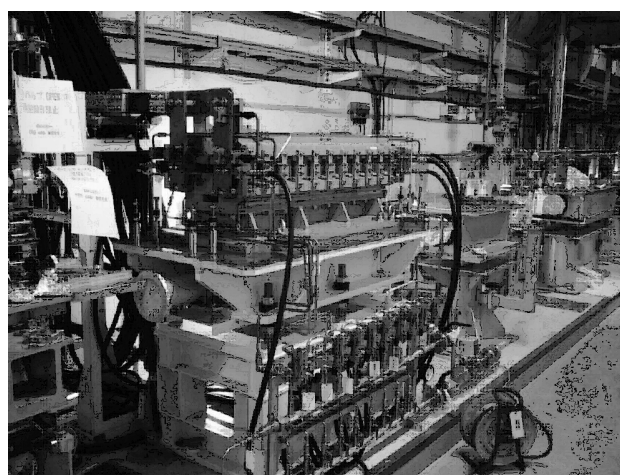


図7 パルス偏向電磁石

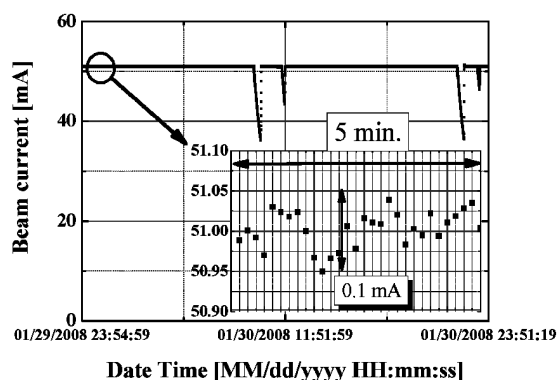


図8 シングルバンチトップアップスタディに於ける PF リング蓄積電流値安定性

の Ti コーティングが施されている。これは、電気伝導度の確保によって壁電流を円滑に流し、セラミックチェンバー部での発熱を抑制するための物である。

現在の PF 入射は、1日2回の定時入射であるが、昨年度末の KEKB 停止期間中の1週間を利用し、PF シングルバンチモードでの Top-up ユーザー運転を行った。PF-BT に設置されたスリットを用い、入射電荷量を絞ることにより、リング蓄積電流値の安定度は 10^{-3} を達成した (図 8)。また、パルス偏向電磁石を1週間連続運転した結果、安定性などに特に大きな問題は見られなかった。現在、PF リング側に於いても、Top-up ユーザー運転のための各種マシンスタディーや準備作業が進められている。

4. 電荷制限システム

本アップグレード完了後には、各リングへの入射ビームをパルス毎に切り替えることとなるが、入射器ビーム運転をこれまで以上に複雑化させることとなる。また、KEKB への入射率を増加させるために現在検討中のマルチバンチ入射 (3バンチ以上) に於いては、現状の許容電流値を2倍以上に高めることが要求される。このような運転を実現するためには、高いビーム安定性及び高信頼性の放射線安全システムが必要となる。放射線安全の目的は、安定したビーム加速の監視及び機器の保護にあるため、ビーム強度の監視及び制限を、高い信頼性をもって実現するための電荷制限システムが不可欠となる。

従来、入射器では、ビーム位置モニターシステム (Beam Position Monitor; BPM) を利用して入射ビームの電荷量を読み出し、ビーム強度の超過を計算機上で監視し制限していた。しかしながら、従来のシステムは、放射線安全のための専用システムではなく、ソフトウェアを基本とした物であるため、全てのビーム電荷を積算する事が不可能であった。このため、ハードウェアを基本とした信頼性の高い電荷制限システムが開発された⁶⁾。本システムは、既に従来システムと置き換えられ、実用運用が開始されている。

今回開発された電荷制限 (Beam Charge Interlock; BCI) モジュールは、壁電流モニター (Wall Current Monitor; WCM) からの信号をビームパルス毎に積算する事が可能である。BCI モジュールは、取得した電荷積算値を電荷制限値と常時比較し、許容制限値を超過した場合、安全系 PLC に対してアボート信号を発生させる。これにより、異常時には即座にビーム運転が停止される事となる。また、上位に設置されている電荷制限システム用 PLC 計算機は、BCI モジュールの計測値を毎秒読み出し、入射器制御室に設置されているタッチパネル画面上へ情報表示を行っている (図 9)。また、入射器制御室以外からも積算電荷情報

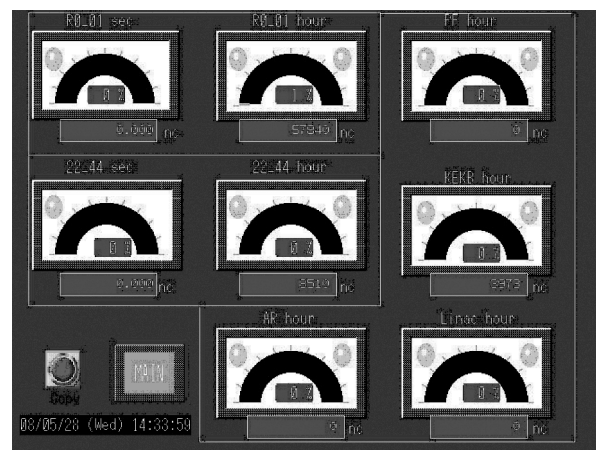


図 9 電荷制限システムのタッチパネル画面

を表示させるために、電荷制限用 PLC は、EPICS によるデータ読み出しが可能となっている。

電荷積算情報は、入射器のビーム運転を安全に行う上で非常に重要であるため、許容値に達する前段階に於いても、視覚的なアラーム及び音声アラームが発報する機能を組み込んだ。さらに、電荷積算値が許容値の 80% に達した場合には、運転員の注意を喚起するために、一時的にビームゲートを閉じる仕組みも取り入れている。

5. 新タイミングシステム

現在の入射器タイミングシステムの中核は、TD4/TD4V と呼ばれる遅延信号生成モジュールであり、約 150 台が運転に使用されている。これらは、CAMAC 及び VME-bus ベースのモジュールであり、16 bit ECL カウンタを用いて遅延信号の生成を行う。基本クロックには、入射器の第二サブハーモニックバンチャーと同一の 571 MHz を使用している。このため、最大約 114 μ s の遅延信号生成が可能となっている。

入射器においては、機器毎かつビームモード毎に必要とされるタイミングが異なるが、TD4/TD4V 及び Fan out 等の NIM ベースモジュールを多数組み合わせ、トリガロジックを構築することにより、複雑なタイミング信号群を制御している。また、クライストロンに供される 50 Hz 信号は、信号が欠落した場合にはインタロックが動作するため、50 Hz タイミング欠落監視モジュールなどの監視用モジュールも多数整備されている。

これらのタイミングシステムは、1箇所のメインタイミングステーション及び 15 箇所のサブタイミング

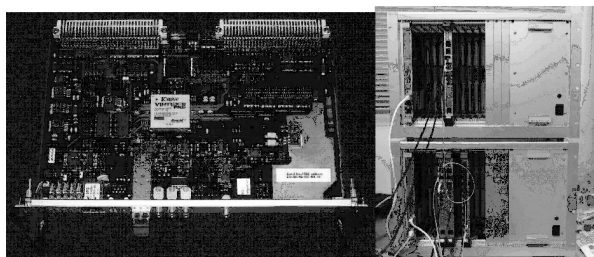


図10 試験中の新タイミングシステム

ステーションから構成され、600 m の入射器に沿って分散配置されている。しかしながら、現状のシステムを用いたビームモードの高速切り替えや複雑なモード管理は実現が困難であるため、タイミングシステムのアップグレードが不可欠となる。

新タイミングシステムとして、VME64x-bus ベースの Event Generator/Receiver (EVG/EVR) システムを採用した(図10)。本システムは、EVG 及び EVR を光ファイバー接続する事により、イベント情報・RF クロック・タイムスタンプ及びデータバッファ等の情報を同時かつ高速に送信することが可能である。また、EVG/EVR を使用した場合、現タイミングシステムで使用されているモジュールの数を大幅に低減することが可能となり、耐障害性の向上が見込まれる。さらに、本システムは、近年多くの加速器(DIAMOND, LCLS, SNS, SSRF, BEPCII 等)に於いて採用或いは採用が検討されている物であり、VxWorks や RTEMS 等のリアルタイム OS 用 EPICS ドライバが既に開発されている。これらを利用することにより、ソフトウェア開発期間の大幅な短縮化が期待出来る。

我々は、KEKB 制御システムに於いても広く使われている VxWorks を採用し、運転用ソフトウェアの開発を進めている。秋以降の運転に於いては、本 EVG/EVR システムを複数のタイミングステーションに設置し、本格的な運用を開始する予定である。先行して、数カ所のタイミング信号供給を EVG/EVR システムに切り替えて運転しているが、現在の所、大

きな問題は見つかっていない。しかしながら、複雑な高速ビームモード切り替え運転に対応するためには比較的大規模なソフトウェア更新を必要とするため、現在、各種の開発・試験が急がれている。

7. まとめ

KEK 入射器アップグレード計画の最終目的は、入射器ビームモードを高速に切り替える事による、4 リング同時入射の実現である。本アップグレードは、三つの Phase を経て段階的に実施される予定であり、現在、KEKB・PF の同時入射を目指した Phase-II 及び III の準備が平行して進められている。4 リング同時入射を行う事により、各リングでの物理実験のみならず、加速器マシンスタディーを含めた全体的なビーム運転効率の飛躍的向上が期待される。

参考文献

- 1) 佐藤政則・IUC (Injector Upgrade Committee : 入射改善グループ), “高速ビームモード切替のための KEK 入射器アップグレード”, 日本加速器学会誌, 日本加速器学会, **3**(2) (2006).
- 2) M. Satoh, *et al.*, “The KEK Linac Upgrade for the Fast Beam Mode Switch”, Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, 26-30 June 2006, pp. 855-857 (2006).
- 3) N. Iida, *et al.*, “NEW BEAM TRANSPORT LINE FROM LINAC TO PHOTON FACTORY IN KEK”, Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, 26-30 June 2006, pp. 1505-1507 (2006).
- 4) Y. Ohnishi, *et al.*, “Design and Performance of Optics for Multi-Energy Injector Linac”, Proc. of LINAC2006, Knoxville, 21-25 August 2006, pp. 46-48 (2006).
- 5) 諏訪田 剛, “タングステン単結晶を利用した陽電子源”, 日本加速器学会誌, 日本加速器学会, **4**(1) (2007).
- 6) T. Suwada, E. Kadokura, M. Satoh and K. Furukawa, “New beam-charge interlock system for radiation safety at the KEKB injector linac”, Review of Scientific Instruments, **79**, 023302 (2008).
- 7) K. Furukawa, T. Suwada, M. Satoh, E. Kadokura and A. Kazakov, “TIMING SYSTEM UPGRADE FOR TOP-UP INJECTION AT KEK LINAC”, Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, 26-30 June 2006, pp. 3071-3073 (2006).