

## 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

佐藤 政則\*1・IUC\*2

## KEK Injector Linac Upgrade for Fast Beam-mode Switch

Masanori SATOH\*1, for the IUC members\*2

### 1. はじめに

KEK 入射器は、180 度偏向のアーク部を持つ全長約 600 m の線形加速器である (図 1)。入射器の最大使命は、下流に控える 4 つのリング (KEKB 電子/陽電子, PF, PF-AR) へ、異なるモード (エネルギー・電荷量) のビームを安定に供給することである。

通常のビーム運転時には、PF 及び PF-AR リングへは朝夕 2 回の定時刻入射を行い、それ以外のほぼ全ての時間は、KEKB リング<sup>1)</sup>への連続入射を行っている。しかしながら、PF・PF-AR リングのマシンスタディー時においては、連続的なビーム入射を必要とする場合もあり、その様な場合には、各リングへの入射時間配分が極めて困難となる。

また、将来計画されている PF リングへのトッパアップ入射運転や、Super-KEKB での電子・陽電子同

時入射の実現を考慮すると、入射器のビームモード切り替えを高速化するためのアップグレードが不可欠となる。このため、2004 年春から活動を開始した IUC (Injector Upgrade Committee) において、入射器アップグレードに関する具体的な検討が開始された。以下に、入射器のビーム運転状況及びアップグレード計画について紹介する。

### 2. KEK 入射器のビーム運転

KEK 入射器は、PF リング専用入射器として 1982 年に運転を開始した。2003 年 3 月 3 日には、総運転時間 10 万時間を達成し、現在では、4 つのリングへビームの供給を行っている。図 2 は、2005 年の入射器ビーム運転統計を示している。毎年 2 ヶ月間 (7 月, 8 月) の夏期長期メンテナンス・2 週間に 1 度の定期メンテナンス及び年末年始の 1 週間程度を除くと、常時 24 時間体制でビーム運転を行っている。年

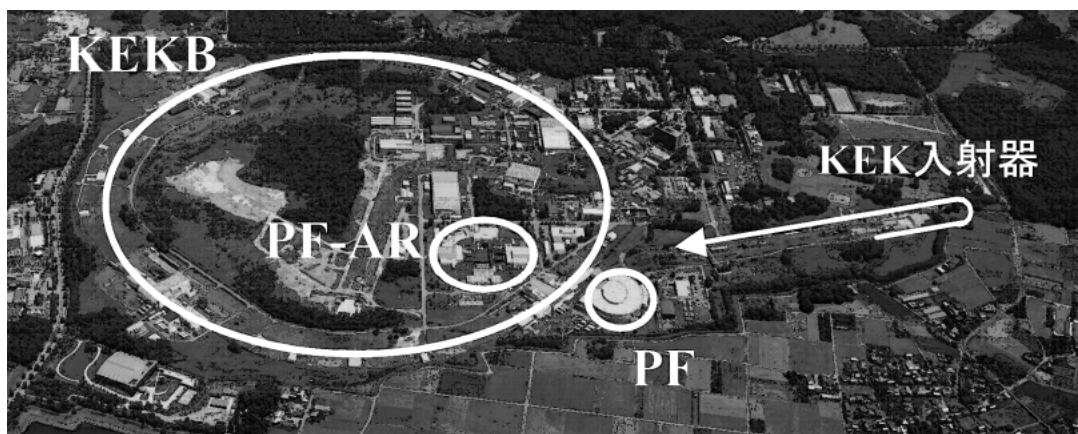


図 1 KEK 入射器及び蓄積リング群の航空写真

\*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

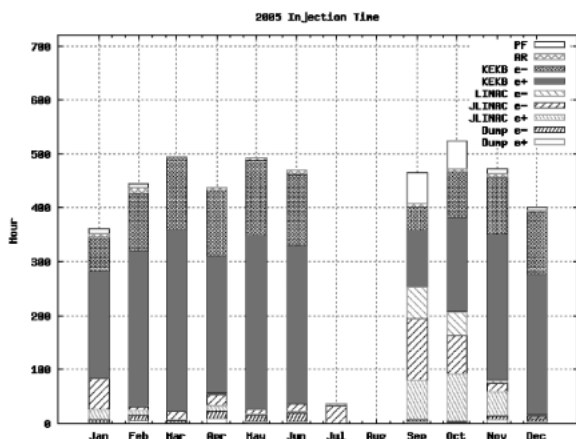


図2 入射器ビームの運転統計  
KEKB 陽電子ビーム運転が圧倒的に多くなっている

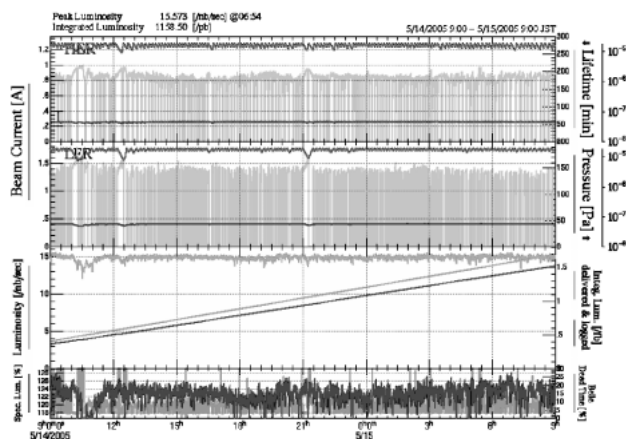


図3 KECB リングの運転状況1 (通常時)  
上段より、HER (電子)・LER (陽電子) リング蓄積電流値、ルミノシティー及びスペシフィックルミノシティーを示している。

間の総運転時間は 7000 時間を超えているが、定期メンテナンス及び長年に渡る障害対策に関する情報の集積により、機器障害によるビーム運転中断時間は年々短縮化されている。

KEKB リングへのビーム入射は、従来約 90 分毎に行われていた。ビーム入射時間の短縮化は、積分ルミノシティー向上に直結するため、各種ビームフィードバック機構の整備<sup>2)</sup>や2バンチ運転<sup>3)</sup>による陽電子ビーム強度倍増など、ビーム運転の安定化・高品質化に努めてきた。2004 年には、連続入射運転を開始し、積分ルミノシティー向上に大きく寄与した。連続入射運転モードでは、入射器のビームモードを数分毎に切り替えることにより、電子・陽電子リングへビーム入射を連続的に行う運転方式であり、入射中も物理実験のデータを取り続けることが可能である。典型的な運転例としては、電子ビームを約 1 分間、陽電子ビームを約 3 分間入射する。入射器のビームモード切り替えでは、電磁石磁場・タイミングシステム・rf 位相などのパラメータ変更や陽電子生成標的の制御などを行っているが、KEKB 電子・陽電子モード間の切り替え時間は 30 秒程度である。

連続入射運転モードでは、電子・陽電子リングの蓄積電流値をほぼ一定に保つことができるため、ルミノシティー向上のためのビーム調整を安定に行うことが可能となった。図3は、KEKB リングの典型的な運転例を表している。数ヶ所に見られる蓄積電流値の減少は他のリングへの定時入射中であり、それ以外では、蓄積電流値及びルミノシティーがほぼ一定に保たれていることが見て取れる。

図4は、PF 及び PF-AR リングがマシンスタデ

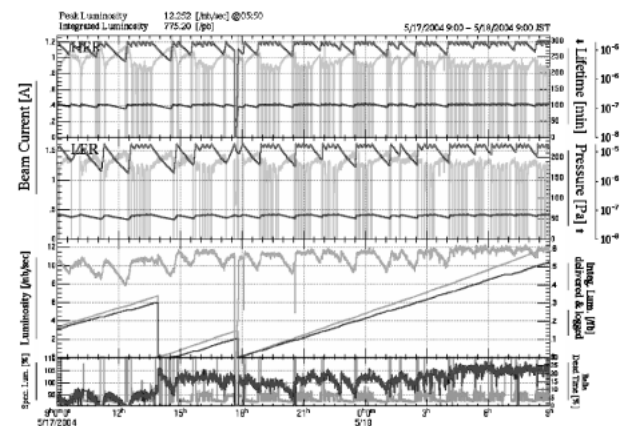


図4 KECB リングの運転状況2 (PF/PF-AR リングがマシンスタディーをっている場合)

ィーを行っている場合の KECB リング運転例を示している。これらのリングは、通常運転時には定時刻入射を行っているが、マシンスタディー時にはビーム入射を頻繁に要する場合がある。他のリングが入射器を占有した場合、KEKB の蓄積電流値は徐々に減衰し、ルミノシティーが低下する。また、電子・陽電子の蓄積電流値比率が変化するために、ビームが不安定な状態となりやすく、ビームアポートの危険性が高まる。さらに、電流依存性のパラメータが変化するため、ルミノシティー最適化のビーム調整が困難となる。一方このような事態は、PF・PF-AR リング側の運転から見ると、連続入射スタディーの実施を困難とするばかりではなく、将来計画されている PF トップアップ運転実現への高い障害となる。これらの問題を抜本的に解決するためには、入射器のビームモードを

高速に切り替えるためのアップグレードが不可欠である。

### 3. アップグレード計画

入射器アップグレードの最終目的は、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高速に切り替え、任意のリングへビームを供給することである。図 5 は、ビームモード切り替えのタイミングチャートを示している。図 5-(a) は、現在の KEKB 連続入射モードを示しており、約 30 秒要する入射器のビームモード切り替えを頻繁に繰り返すことにより、電子・陽電子ビームの入射を連続的に行っている。図 5-(b) は、入射器ビームモードを KEKB から PF (または PF-AR) へ切り替える場合を示している。KEKB モードから他リングのビームモードへ遷移する場合には、入射器下流に設置されている ECS (Energy Compression System) 用偏向電磁石の磁場を変更する必要がある、これには数分程度の時間を必要とする。

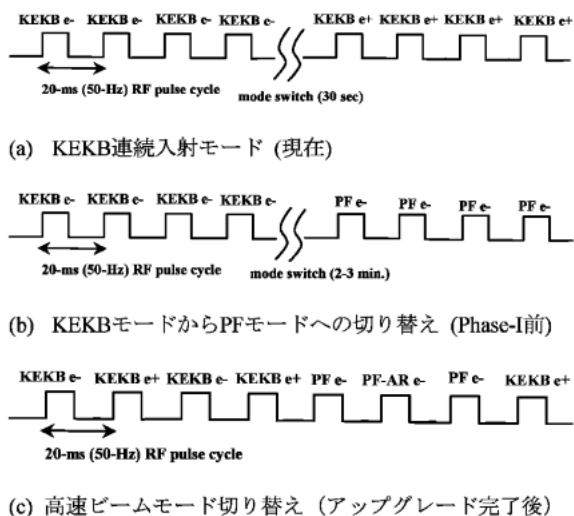


図 5 入射器のビームモード切り替え

図 5-(c) は、高速ビームモード切り替えの概念図を示している。入射器の最大ビーム繰り返しは 50 Hz (20 ms 間隔) であるが、任意パルスのビームを任意のリングへ入射するために、パルス毎に異なるエネルギー・電荷量のビームを加速する。表 1 に、入射器の各ビーム運転モードと主要なパラメータの関係をまとめた。この様な高速モード切り替えを実現すれば、各リングは他のリングの運転状態に因らず、擬似的に専用入射器を持つかのように自由なビーム入射運転が可能となる。本アップグレード計画は、下記に示す三つの段階を経て KEKB 電子/陽電子及び PF 間的高速ビームモード切り替えを実現する。これと平行して、PF-AR モードを含めた高速ビームモード切り替えを検討し、最終的には、4 リングモード間的高速切り替えを実現する計画である。

#### 3.1 Phase-I (新 PF-BT ラインの建設)

Phase-I の目的は、KEKB・PF モード間の切り替え時間を短縮化することである。このためには、PF-BT ラインの一部を新規に建設する必要がある。図 6 は、PF-BT ラインと ECS 用偏向電磁石の位置関係を示している。Phase-I 以前の PF-BT ラインは、ECS 電磁石下流に設置された振り分け偏向電磁石から分岐していた。このため、KEKB・PF モード間の切り替え時には、ECS 偏向電磁石群のパラメータ変更を要していた。これを避けるためには、ECS 上流に振り分け偏向電磁石を設置し、PF-BT ラインの一部区間を新規に建設する必要がある。このビームライン改造は、昨年 (2005 年) 夏期メンテナンス中に実

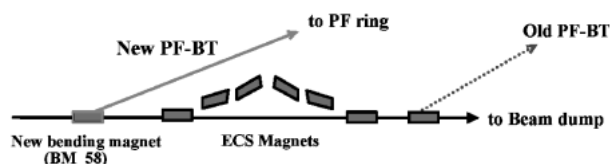


図 6 新 PF-BT ラインと ECS 偏向電磁石の配置

表 1 入射器ビームモードと主要パラメータ (アップグレード前)

ビームモード名称	KEKB 電子	KEKB 陽電子	PF	PF-AR
電荷量	1 nC	1 nC (一次電子: 10 nC)	0.1 nC	0.1 nC
入射ビームエネルギー	8 GeV	3.5 GeV	2.5 GeV	3 GeV <sup>(*)</sup>
最大ビーム繰り返し	50 Hz	50 Hz	25 Hz	25 Hz
使用電子銃	A1	A1	CT	CT
ECS 電磁石	ON (KEKB mode)	ON (KEKB mode)	OFF	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。A1, CT はそれぞれ 600 m 入射器の最上流及び 200 m 地点に設置された電子銃

施された。本工事の内容については、次章にて詳しく紹介する。

### 3.2 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 モード間の高速切り替えを実現する。現在のビーム運転では、KEKB モードは A1 電子銃（入射器最上流に設置）を使用し、PF (PF-AR) モードでは、CT 電子銃（アーク部より下流に設置）を使用している。高速モード切り替えのためには、共通の電子銃を使用する必要がある。このため、PF モードにおいても、A1 電子銃を使用するための改造を行う。また、Phase-I にて設置した振り分け用偏向電磁石をパルス化する必要がある。パルス電磁石及び電源への置き換えは、今年の夏期メンテナンス中に行う予定である。

現状のビームモード切り替えにおいては、モード毎に電磁石磁場のパラメータ変更を行っている。高速なモード切り替えを行うためには、全ての電磁石システムをパルス化することが必要であるが、膨大なコスト及び労力を考慮すると実現性に乏しい。そこで我々は、現システムを用いて実現可能な“Multi-Energy Linac”方式を採用することにした。これについては、後の章にて紹介する。

本年秋以降には、各種マシンスタディーによる問題点の発見・改善を行った後、KEKB 電子・PF モードの高速切り替え運転を、通常運用化する予定である。

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

Phase-III では、KEKB 陽電子ビームを含めた高速モード切り替えを行う。現状のシステムでは、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。そこで我々は、陽電子標的の近傍に孔をあけ、電子ビームの軌道を制御することにより、電子・陽電子モードの高速切り替えを実現する予定である。昨年夏に、試験用孔空き標的をインストールし、マシンスタディーを実施した。詳細な結果については、後の章において報告する。

### 3.4 PF-AR 入射

上記 Phase-III と平行して、PF-AR 入射を含めた高速モード切り替えを検討する。PF-AR リングへ入射するのは、3 GeV の電子ビームである。その後、メインリングにて最大 6.5 GeV まで加速する。PF-AR のトップアップ運転を行うためには、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要求され、かなりのコストが必要とな

る。

PF-AR のトップアップ入射を行わない場合には、KEKB 陽電子モードと同様に、3.5 GeV 陽電子ビームを入射する事が一つの解として提案されている。この場合、BT 部の偏向電磁石電源改造、及び BT 下流部における PF-AR・KEKB BT 振り分け用パルス電磁石が必要とされる。詳細な振り分けラインの検討は、今後進めていく必要がある。

## 4. 新 PF-BT ラインの建設

前章で既に述べたとおり、Phase-I では PF-BT ラインの一部を新たに建設した。本工事で建設したビームラインは、ECS の第一偏向電磁石上流部分から、既設の PF 用安全偏向電磁石までの約 60 m の区間である。図 7 に、新 PF-BT ラインのオプティクスを示す。新規に設置された電磁石は、偏向電磁石 3 台・四極電磁石 4 台・ステアリング電磁石 3 台であるが、コストを最小限に抑えるため、これらの磁石はすべて予備品を流用した。水平方向の分散関数が大きな場所に、エネルギー広がり計測のためのモニタを設置した。これは、ストリップライン型の 8 電極モニタ<sup>4,5)</sup>であり、将来はエネルギー広がりフィードバックに利用する。この他、通常型の 4 電極ビーム位置モニタを 3 台、スクリーンモニタ 4 台、壁電流モニタ 1 台を設置した。

入射器から PF-BT へ振り分けるための偏向電磁石は、ECS 上流に設置する必要がある。このためには、5-8 ユニットと呼ばれる入射器最下流の加速ユニット（加速管 4 本）及び導波管・冷却水配管の一部を撤去する必要がある。加速ユニット撤去により、約 160 MeV のエネルギーマージンが失われることになる。ビーム運転の安定運用を考えると、エネルギーマージンにある程度余裕を持つ必要がある。これを補うために、5-8 ユニットに使用していたクライストロン及び

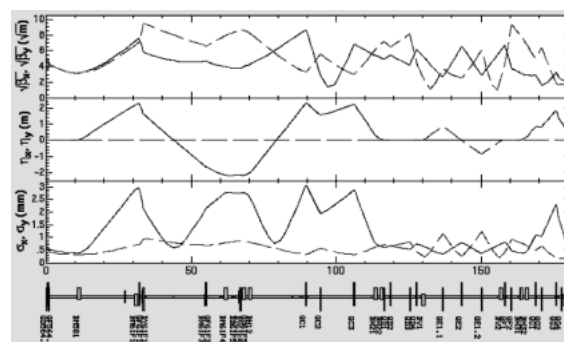


図 7 新 PF-BT ラインのオプティクス

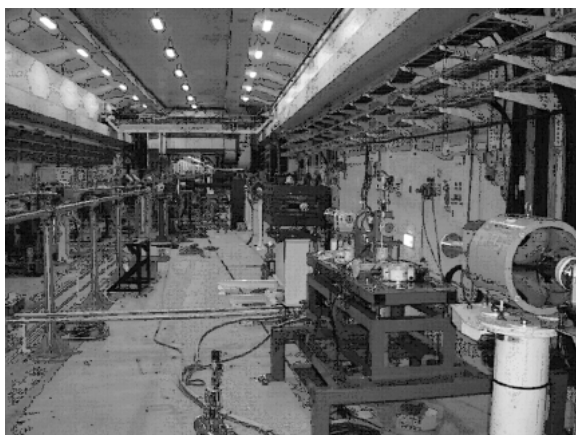


図8 新PF-BTラインの写真(建設中)

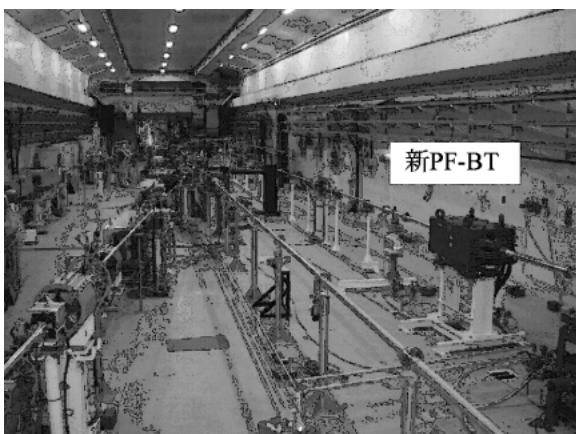


図9 新PF-BTラインの写真(建設後)

電源は、上流 (CT ユニット部) へ移設し、C-7 加速ユニットのエネルギーゲインを増強した。さらに、4-4 ユニットに設置されている C-band 加速ユニット<sup>6)</sup>の運用を考慮すれば、5-8 ユニット撤去前と比較して、入射器全体のエネルギーマージンは増加している。

例年、入射器の夏期メンテナンス期間は 8 週間程度である。新 PF-BT ラインの建設は、60 m という比較的短い区間であり、コンポーネント数もさほど多い印象ではないが、通常の保守作業と平行してビームライン建設を行うことは、かなり困難が予想された。しかしながら、各グループの堅実な仕事ぶりによって、大きなトラブルもなく、無事に工程通りのビームライン完成を迎えることができた。工事期間中・完成後の写真を、図8及び図9に示す。

夏期メンテナンス後は、いよいよ新ラインを用いた PF 入射を行った。新 BT ラインを用いた PF リングへのビーム入射は、開始直後、即座に成功した。これは、リング立ち上げの前日までに、新ライン下流まで

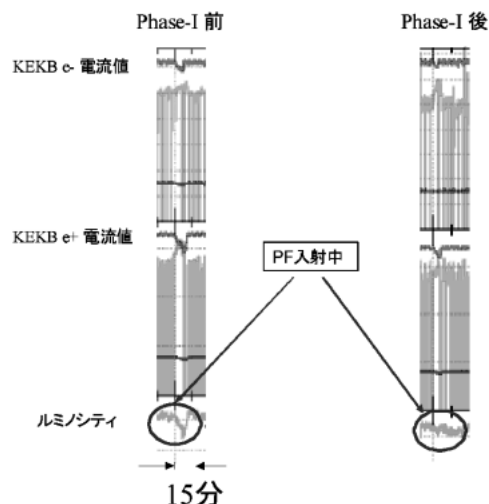


図10 KEKB リングの運転状況 3 (Phase-I 前後の比較)

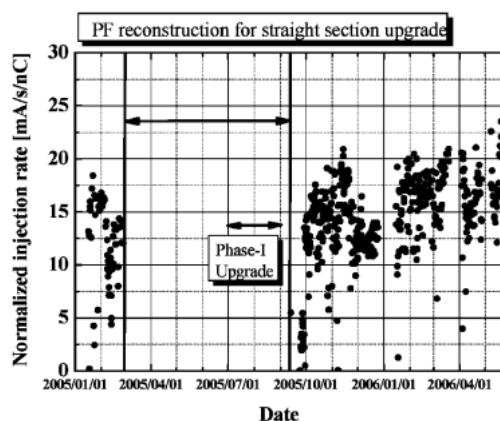


図11 PF リングへのビーム入射率 (電荷量で規格化)

のビーム調整を行い、準備万端であったことが功を奏したと思われる。

Phase-I の目的は、KEKB 及び PF モード間の切り替え時間を短縮化することであった。KEKB モードから PF モードへの切り替え後、PF 入射を行い、再び KEKB モードへ切り替え完了するまでの時間は、旧ラインでは約 5 分 30 秒要していたが、Phase-I 以降では、2 分 30 秒程度にまで短縮化された。図10は、PF 入射中の KEKB 運転状態を示したグラフである。Phase-I 前では、蓄積電流値減少によるルミノシティ低下が明らかに見て取れるが、Phase-I 後では切り替え時間が短縮化されたため、ルミノシティ低下が以前ほど目立たなくなっている。

さらにタイミングが良いことに、2005 年 3 月から 9 月の間、PF リングでは直線部増強工事が行われていた<sup>7)</sup>。このため、2005 年秋の立ち上げ時には、通

常時よりも長期にわたる真空焼きだし運転が必要とされた。この時期、KEKB リングは既にビーム運転を開始していたが、モード切り替え時間が大幅に短縮されたため、KEKB 運転への影響をかなり軽減することができた。図11は、ビーム電荷量で規格化したPFリングへの入射率を示している。新PF-BTでの運用後は、入射率が向上すると共に、入射率のばらつきも低減したことが見て取れる。

## 5. Multi-Energy Linac 方式

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・タイミングシステム及びrf位相などの運転パラメータを変更している。このうち、現行システムでは、電磁石磁場を高速制御することは不可能である。しかしながら、全電磁石システムのパルス化は、大規模なシステム変更となるため、膨大なコスト及び労力を要し、実現は困難である。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、高速モード切り替えを実現する。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る。ビームエネルギーに関しては、低電力rf位相を高速制御することにより変更する。具体的には、大電力クライストロンを励振するための、サブスタックライストロン用低電力rf位相を制御する。計算機シミュレーション及びマシンスタディーを行なった feasibility study の結果、原理的な困難はないことが検証された。

マシンスタディーでは、KEKB 入射用 8 GeV 電子と PF 入射用 2.5 GeV 電子を、同一電磁石磁場で輸送するための試験を行った。rf位相については、PF用ビームについても、5 GeV 程度まで加速した後、2.5 GeV まで減速する方式をとった。これは、オプティクスの共通部分をなるべく多くし、また、ウェイク場による軌道変動を抑えるためである。マシンスタディーの結果、両ビームともエミッタンス・プロファイル及び軌道などの大きな差異は認められなかった。

さらに、このパラメータを用いたPFリングへの入射スタディーも行った。通常オプティクスを使用した場合と比較し、ビームサイズに若干の広がりがあったものの、通常運転時に近い入射率を実現した。これらのマシンスタディー結果については、近く別の機会に詳細な報告を予定している。Multi-Energy Linac 方式を用いた KEKB リングへの入射スタディーについても、近く試験する予定である。また、4つのビームモードを同時に満足する様な軌道補正アルゴリズムも

考案され、計算機シミュレーション及びマシンスタディーを進めている。

## 6. 電子/陽電子モードの高速切り替え

現在の KEKB 電子/陽電子モードの切り替えは、陽電子標的部位を機械的に挿入或いは取り出しすることにより運用している。しかしながら、機械駆動機構の高速制御は困難であり、長期運転での耐久性確保も難しい。当初、パルス電磁石を使用し、標的部位をバイパスするためのビームライン建設を検討した。しかし、コストの問題もさることながら、現状ビームライン近傍のスペースを考えると、バイパスラインの建設は困難であると判断した。

そこで我々は、陽電子生成標的の横に孔を空け、電子ビーム軌道を高速制御することによって、電子/陽電子の高速切り替えを行う方式を用いる。本方式の実証実験のため、昨年の夏期メンテナンス中に、試験用孔空きターゲットを設置した。写真を図12に示す。陽電子標的は、直径が 5 mm のタングステン非結晶であり、電子ビーム透過用孔の直径は約 3 mm である。それぞれの中心間距離は、約 4.5 mm である。この標的を用いた場合、陽電子モードでは、上流からの電子

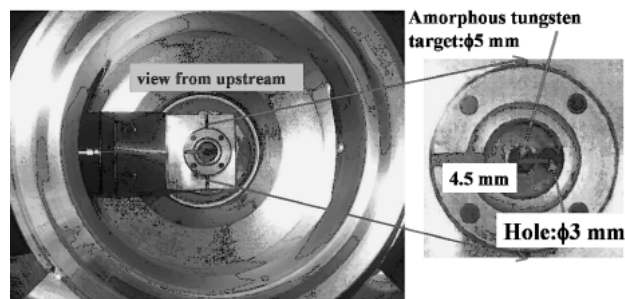


図12 孔空き陽電子生成標的の写真

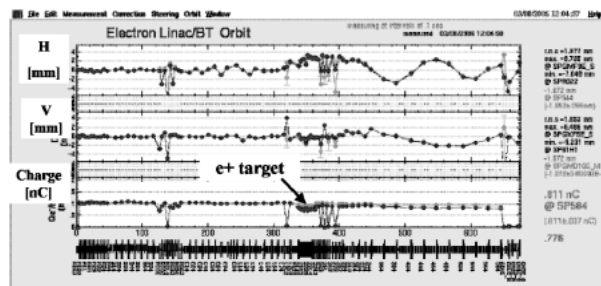


図13 孔空き陽電子生成標的スタディーの結果  
入射器からBTにかけての水平方向ビーム軌道(上段)、垂直方向ビーム軌道(中段)、電荷量(下段)を示している。

ビームを標的部分に衝突させ、電子モードでは標的横の孔部分を通過させることになる。

図13は、マシンスタディー時の入射器ビーム軌道及び電荷量を示したものである。ここでは、KEKB 用 8 GeV 電子ビームを用いて、通常運転の方法（標的をビームラインに挿入しない）及び標的横の孔を通過させる場合を試験し、通過する電子ビームの電荷量を比較した。この結果、孔を通過させた電子ビームの電荷量は、通常運転の方法と比較して、約 90% を達成した。この結果は、本方式による電子・陽電子の高速切り替え運転は、十分に実用可能であることを示している。さらに高い通過量を目指し、孔の位置や形状に関する検討を継続している。また、実運転で高速モード切り替えを行うためには、標的部の上流及び下流へ、パルス電磁石を設置する必要がある。これらの具体的な検討作業については、今後進めていく予定である。さらに、チャネリング効果による陽電子生成量増大を図るため、標的にタングステン結晶を用いる計画も並行して進めている<sup>8)</sup>。結晶標的を用いることにより、非結晶標的と比較して最大約 30% の陽電子生成量増大を見込んでいる。

## 7. ま と め

KEK 入射器のアップグレード計画の目的は、入射器のビームモードを高速に切り替えることである。これにより、各リングは他リングの運転状況に因ることなくビーム入射を行うことが可能となり、各リングのアクティビティがさらに向上することが期待できる。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が、Phase-I の新 PF-BT ライン建設は昨年無事完了し、KEKB・PF モード間の切り替え時間を大幅に短縮した。既存システムからの変更を最小限に抑えるため、共通の磁場設定値を用いて異なるエネ

ルギーのビームを輸送する“Multi-Energy Linac”方式及び孔空き標的方式による電子・陽電子モード切り替え方式を提唱し、原理実証を行った。これらのスタディーに関しては、さらに詳細な検討を継続している。また、複雑なビーム運転モードに対応するためのタイミングシステム及びモニタ用データ収集系に関する詳細検討・更新作業を進めている。

## 参 考 文 献

- 1) Edited by E. Kikutani, “KEKB Accelerator Papers”, Compiled for publication in Nuclear Instruments and Methods Series A, KEK Preprint 2001-157, 2001.
- 2) K. Furukawa et al., “Beam Feedback Systems and BPM Read-Out System for the Two-Bunch Acceleration at the KEKB Linac”, ICALEPCS2001, San Jose, November 2001.
- 3) Y. Ogawa et al., “TWO-BUNCH OPERATION OF THE KEKB LINAC FOR DOUBLING THE POSITRON INJECTION RATE TO THE KEKB RING”, APAC2001, Beijing, September 2001.
- 4) T. Suwada, M. Satoh and K. Furukawa, “Nondestructive beam energy-spread monitor using multi-strip-line electrodes”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 6, 032801 (2003).
- 5) T. Suwada, M. Satoh and K. Furukawa, “New energy-spread-feedback control system using nondestructive energy-spread monitors”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 112802 (2005).
- 6) T. Kamitani et al., “R&D Status of C-Band Accelerating Section for SuperKEKB”, PAC2005, Knoxville, May 2005.
- 7) 本田 融, 小林幸則, 「PF リングの直線部改造とコミッションング」, 日本加速器学会誌「加速器」Vol. 2, No. 4, pp. 494-501, 2005.
- 8) H. Okuno et al., “Experimental study of positron production from a W single crystal by the KEK 8-GeV electron linac beam”, NIM B 201, pp. 259-265, 2003.