「加速器」Vol. 17, No. 3, 2020（169–173）

話　題

# KEK 電子・陽電子入射器による5リング同時トップアップ入射

佐藤 政則 *

## Simultaneous Top-Up Injection into Five Rings at KEK Electron/Positron Injector Linac

Masanori SATOH*


### Abstract

The 600-m-long KEK injector linac has delivered electron and positron beams for collider rings and light sources. It was upgraded for aiming at a low emittance beam with a high bunch charge towards the SuperKEKB project based on the nano-beam scheme. In this upgrade, many new components have been newly developed, such as a flux concentrator, a large aperture S-band accelerating structure, a pulsed magnet, a low emittance photo-cathode rf gun, a fast rf monitor, a fast BPM module, and so on. After many long years of upgrade work and beam commissioning, simultaneous top-up injection into five independent rings was successfully achieved in 2019.


## 1. はじめに

KEK の電子・陽電子入射器は，1982 年の運転開始当初，フォトンファクトリ（PF）専用電子入射器として運用されていた．その後，衝突型加速器である TRISTAN や KEKB の電子・陽電子入射器[1]として40 年近く運転を続けている．現在では，KEK つくばキャンパスの電子・陽電子加速器複合施設における入射器として，5 つの異なるリングにビームを供給している（**図1**）．ここで，5 つのリングとは，放射光源である PF, PF-AR と SuperKEKB の電子リング（HER），陽電子リング（LER），陽電子ダンピングリング（DR）である．それぞれのリングには，異なるエネルギーおよびバンチ電荷量のビームが入射される．

入射器は，2 つの直線部が180 度偏向アーク部（J-ARC）により接続された，全長約600 m の線形加速器である（**図2**）．最大ビーム繰り返しは50 Hz であり，これを5 つのリングの入射に振り分けている．KEKB 運転開始当初，リングへのビーム入射は，約1 時間半から2 時間ごとの時間間隔でおこなっていた．入射終了後は，蓄積電流値が減少する中で衝突パラメータ調整をおこなうことになる．蓄積電流値減少にともない電流依存パラメータが変化するため，ルミノシティ最適化の調整が困難であった．一方，放射光源である PF, PF-AR への入射は，1 日数回の定時刻入射で

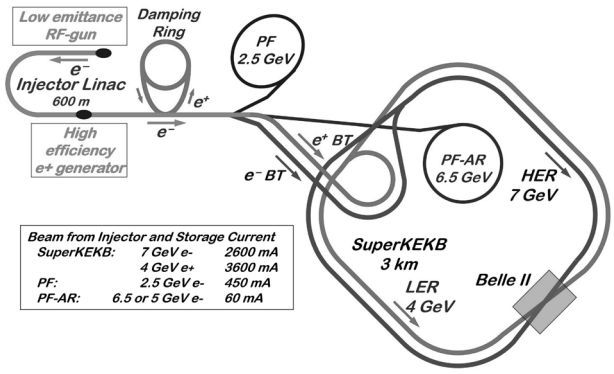


**図1**　KEK つくばキャンパスの電子・陽電子加速器複合施設の概略図．1 台の入射器から，5 つの異なるリングへ電子および陽電子ビームを供給している．

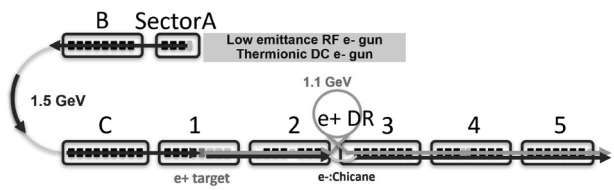


**図2**　KEK 電子・陽電子入射器の概略図．セクター A, B およびセクター C から5 の2 つの直線部と180 度偏向アーク部から構成されている．

* 高エネルギー加速器研究機構　KEK, High Energy Accelerator Research Organization

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

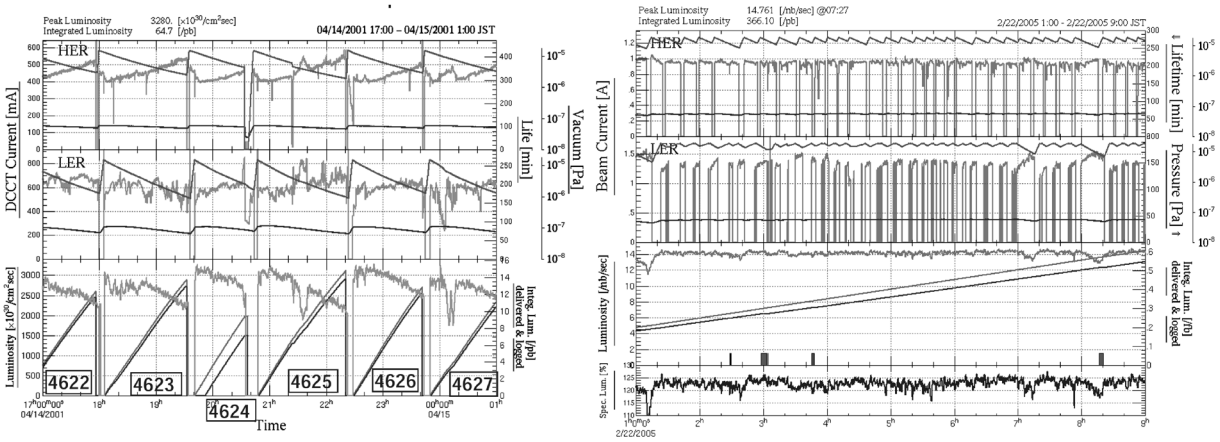


**図3** KEKB 加速器における1シフト（8時間）の運転状況を示すグラフ．各グラフの上段と中段は，それぞれ，HER, LER の蓄積ビーム電流値を示す．下段はピークルミノシティおよび積分ルミノシティを示す．左の図は，連続入射運転以前（2001 年4 月）の例，右の図は，連続入射運転中（2005 年2 月）の例を示している．

あった．当時の入射運転方式では，入射先リングごとに入射器の運転パラメータ（電磁石，タイミング，RF 位相など）をそれぞれの最適値に変更する必要があり，パラメータ変更には5 分程度の時間を要していた．

その後，KEKB の積分ルミノシティ向上のため，入射器運転パラメータ切り替え時間の短縮化や2 バンチ入射などの改善をおこなってきた．さらに2004 年には，連続入射運転を開始した[2]．**図3** に，KEKB 連続入射運転以前および以後の蓄積電流値およびルミノシティの例を示す．連続入射運転とは，入射器運転パラメータを頻繁に切り替え，HER, LER へのビーム入射を数分ずつ交互におこない，両リングの蓄積電流値をほぼ一定に保つ運転である．連続入射運転の採用以後は，衝突パラメータの調整が容易になり，積分ルミノシティが飛躍的に向上した．しかしながら，連続入射運転中は KEKB が入射器を専有することになり，PF, PF-AR 入射と両立しない．とくに，放射光源のマシンスタディ時やトラブル時に，4 つのリングが入射ビームを取り合うこともしばしばであった．このような事態を避けるため，入射器運転パラメータをパルスごとに切り替え，全リング同時トップアップ入射をおこなうための入射器アップグレードを開始した[3,4]．

## 2. 入射器アップグレード

### 2.1 新規 PF ビーム輸送路の建設

入射器最下流の第3 ビームスイッチヤードにおいて，入射器ビームラインは各リングのビーム輸送路へと分岐する．KEKB 運転当初は，第3 スイッチヤードにおいて KEKB および PF のビーム輸送路の一部区間が共通であった．とくに，PF ビーム輸送路への分岐点は ECS 用偏向電磁石下流にあるため，KEKB 入射との切り替えには ECS 電磁石のパラメータ変更が必要であった．このパラメータ変更は，KEKB/PF 入射切り替え時間の大半を占める状態であった．

これを改善するため，2005 年の夏期保守期間中に約60 m にわたる新規 PF ビーム輸送路を建設し，入射器から PF ビーム輸送路への分岐点を ECS 上流部に変更した．この結果，KEKB/PF 入射パラメータ切り替えの高速化に成功した．従来の切り替え時間は約5 分30 秒であったが，これを約2 分30 秒まで短縮化することができた．2008 年初頭には，PF と KEKB ビーム振り分け用の DC 偏向電磁石をパルス偏向電磁石と置き換え，同時入射の実現に一歩近づいた．

### 2.2 電子・陽電子ビーム高速切り替え

LER 入射には陽電子ビームの生成が必要である．入射器では，タングステン標的に10 nC の1 次電子ビームを衝突させることにより陽電子ビームを生成している．当初は，陽電子標的部位を機械的に挿抜することにより，電子・陽電子ビーム運転を切り替えていた．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問題であった．同時入射検討開始当初は，パルス電磁石を使用した標的部のバイパス運転方式を検討して

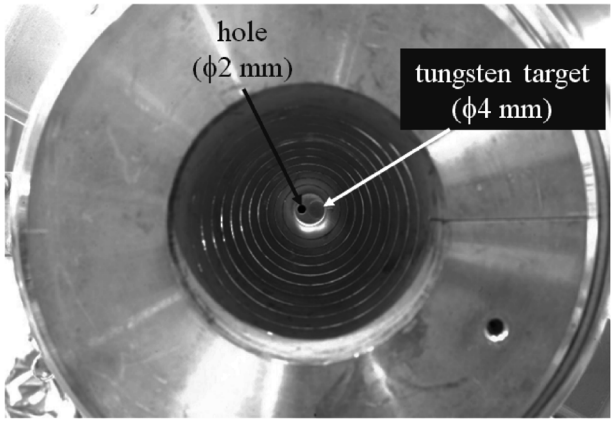


**図4**　陽電子生成タングステン標的の写真．電子ビームは中央の孔を通過する．

いたが，コストおよびビームライン近傍のスペース不足から断念した．

そこで我々は，陽電子生成標的横に孔を開け，標的上流の電子ビーム軌道を高速制御することにより，電子・陽電子の高速切り替えをおこなう方式を採用した．電子ビーム軌道の高速制御にはパルスステアリング電磁石を使用している．**図4**に，孔空き陽電子生成標的の写真を示す．

### 2.3　3リング（KEKB HER/LER, PF）同時トップアップ入射

ビームラインの改造，孔空き陽電子生成標的にくわえて，パルスステアリング電磁石の追加，イヴェント駆動型高精度タイミングシステムの導入を経て，2009年，KEKB HER/LER, PFの3つの異なるリングへの同時トップアップ入射に成功した[5,6]．異なるエネルギーのビームを輸送するために，十分に最適化された共通DC電磁石パラメータ[5]を使用した．3リング同時トップアップにより，各リングの蓄積電流値安定度は0.1%以下を実現した．従来の継ぎ足し入射時は，蓄積電流値の変動が50%程度であったため，大幅に改善したことになる．さらに，本成果によりKEKBおよびPFリングでの実験効率を飛躍的に高めることができた．

### 2.4　PF-AR 直接入射路

3リング同時トップアップ入射は成功したが，依然としてPF-AR入射は他のリング入射と排他的なままであった．これは，PF-AR入射路の大部分がHERビーム輸送路と共有していることに起因する．また，PF-AR専有入射路部の電磁石磁場によって，PF-ARの入射ビームエネルギーは3 GeVに制限されていたため，HER入射のビームエネルギーである8 GeV用運転パラメータとは両立が不可能であった．

PF-AR入射は，パラメータ切り替えを含めて最短20分ほどの時間を要しており，その間は他のリングに入射できないことになる．ナノビーム方式に基づくSuperKEKB運転においては，ビーム寿命が10分以下になることが見込まれるため，20分間の入射中断はSuperKEKB計画にとって致命的な障害となる．

そのため，2012年にPF-AR直接入射路の設計検討を開始し，その後のトンネル建設，機器設置を経て，2017年2月にビームコミッショニングに成功した[7,8]．これにより，PF-ARについても，6.5 GeVフルエネルギー入射によるトップアップ運転の準備が整った．

**表1**　KEKBおよびSuperKEKBにおける入射ビーム主要パラメータ．

| | KEKB (e−/e+) | SuperKEKB (e−/e+) |
|---|---|---|
| エネルギー（GeV） | 8/3.5 | 7/4 |
| バンチ電荷量（nC） | 1 | 4 |
| 規格化エミッタンス（水平，垂直）（mm·mrad） | 310/1400 | (40, 20)/(100, 15) |
| エネルギー広がり（%） | 0.125 | 0.07/0.16 |

### 2.5　SuperKEKB へ向けて

2010年，KEKBからSuperKEKBへのアップグレードが開始された．SuperKEKBリングへの入射には，大バンチ電荷量，低エミッタンスビーム，かつ小エネルギー広がりの高品質ビームが要求される．**表1**にKEKBおよびSuperKEKBにおける入射ビーム主要パラメータを示した．

陽電子バンチ電荷量増強には，陽電子生成捕獲部を改造し，新規開発のフラックスコンセントレータ[9]および大口径Sバンド加速管[10]を用いる．その後，下流にある1.1 GeV DRにより，低エミッタンス陽電子ビームを得ることができる．

また，**表1**から見て取れるように，電子ビームにかんしては，KEKBと比較して4倍のバンチ電荷量かつ1/10以下の低エミッタンスビームを実現する必要がある．電子ビーム用のDRはないため，低エミッタンス電子生成のための光カソー

**図5**　入射器電子銃部ビームラインの概略図．上部は熱電子銃からのビームライン，下部がRF電子銃のビームラインを示している．合流部は，2台の垂直方向パルス偏向電磁石および3台の4極電磁石から構成されている．

ドRF電子銃およびレーザーシステムが開発された[11,12]．

一方，陽電子生成のためには1次電子ビームとして10 nCの大バンチ電荷量が必要である．RF電子銃による大バンチ電荷ビームの生成は開発に時間を要するとの判断から，当面の間，熱電子銃も継続して使用することにした．このため，RF電子銃および熱電子銃からのビームをパルスごとに切り替える必要がある．入射器最上流のビームラインを改造し，**図5**のように電子銃部を2階建て構造とした．2つの電子銃からのビームは，2台の垂直方向パルス偏向電磁石を用いて合流させる．

KEKB時代の3リング同時トップアップ入射には，異なるエネルギーのビームにたいして，共通のDC電磁石磁場を用いていた．しかしながら，SuperKEKBに求められる低エミッタンスビームの輸送には，電磁石のパルス化が不可欠の課題となっていた．そのため，2017年に，28台のパルス4極電磁石および36台のパルスステアリング電磁石が，DR下流部である入射器のセクター3から5に設置された[13]．その後も，J-ARC上下流部などの重要箇所にパルス電磁石の増設をおこなってきた．

さらに，DRを含めた複雑なビーム運転を実現するため，従来のイヴェント駆動型タイミングシステムの大幅な改良[14]や新しいバケットセレクションシステムの開発もおこなわれた．また，5リング同時トップアップ入射に必要とされる高度な運転ツール群の開発も進めてきた．

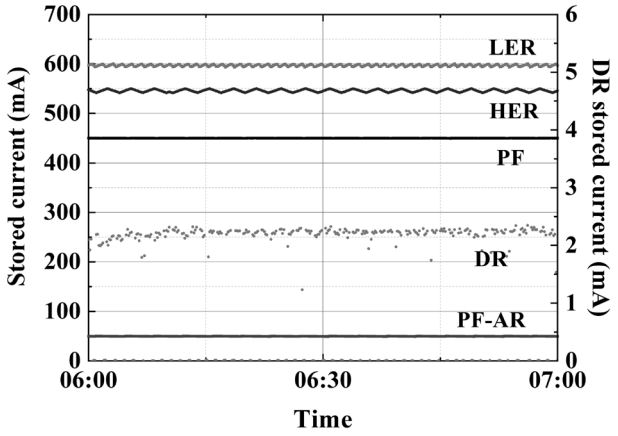


**図6**　5リング同時トップアップ入射運転における各リングの蓄積電流値安定性．

## 3. 5リング同時トップアップ入射

数多くの機器開発やビームラインの改造[15]にくわえて，多くの時間をビーム開発に費やした後，2019年，5リング同時トップアップ入射に成功した．**図6**に，5リング同時トップアップ入射時の蓄積電流値を示す．全てのリングが，あたかも専用入射器でトップアップ運転をしているかのように見て取れる．各リングの入射ビームエネルギーは，1.1 GeV（DR）から7 GeV（HER）であり，また，バンチ電荷量も0.3 nC（PF, PF-AR）から10 nC（陽電子生成1次電子）と非常に幅広い．このように，性質が大きく異なるビームの同時トップアップ入射の実現は，世界的にも稀な事例であり，長年の継続的な研究開発の賜といえる．本稿では主に入射器アップグレードの視点から5リング同時トップアップ実現への道のりを述べた．しかしながら本成果は，入射器のみならず，加速器運転員を始めとした業務委託の方々，KEKB/SuperKEKBおよびBelle/Belle2グループ，放射光源およびビームラインググループ，放射線科学センターの多くの方々が奮闘してこられた結果成し得たことを強調したい．

今後は，安定な同時トップアップ運転を継続しつつ，SuperKEKBの最終目標性能を達成すべく，入射器ビームのさらなる高品質化に注力していく．

## 4. ま と め

2004年春，全リング同時トップアップ入射を目指して，KEK電子・陽電子入射器アップグレードの検討を開始した．2009年4月にはKEKB HER/LER, PFの3リング同時トップアップ入射に成功し，積分ルミノシティの向上および放射光実験の高効率化に大きく貢献した．その後，PF, PF-AR入射を継続しつつ，SuperKEKBに向けた機器開発，ビームライン改造，およびビーム開発を進めてきた．2019年，最初の検討より15年の歳月を経て，入射器による5リング同時トップアップ入射に成功した．これは，SuperKEKB計画にとっても大きなマイルストーンといえる．

## 謝　　辞

KEK電子・陽電子入射器による5リング同時トップアップ入射実現にあたり，KEK内外の研究者・技術者，多くの方々より多大なご協力を頂きました．この場をお借りし改めて御礼申し上げます．

## 参 考 文 献

1) I. Sato and PF Injector group: Proc. of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 21–23 July 1993, 44 (1993).
2) 榎本收志ほか：加速器**6**, 69 (2009).
3) 佐藤政則：加速器**3**, 171 (2005).
4) 佐藤政則：加速器**5**, 144 (2008).
5) 菊池光男ほか：加速器**6**, 231 (2009).
6) M. Satoh: Proc. of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan, Sept. 12–17, 703 (2010).
7) N. Higashi et al.: Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, May 14–19, 2678 (2017).
8) 東直ほか：加速器**14**, 134 (2017).
9) T. Kamitani et al.: Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, May 15–20, 579 (2014).
10) S. Matsumoto et al.: Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, May 15–20, 3872 (2014).
11) T. Natsui et al.: Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, May 12–17, 1117 (2013).
12) R. Zhang et al.: Proc. of IPAC2019, Melbourne, Australia, May 19–24, 3663 (2019).
13) Y. Enomoto et al.: Proc. of LINAC2018, Beijing, China, Sept. 16–21, 609 (2018).
14) H. Kaji et al.: Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, May 15–20, 1829 (2014).
15) 明本光生ほか：加速器**15**, 229 (2018).