

## Injection Beam Scheduling at SuperKEKB Complex through Damping Ring

Kazuro Furukawa<sup>\*A)</sup>, Yoshihiro Funakoshi<sup>A)</sup>, Mitsuo Kikuchi<sup>A)</sup>, Eiji Kikutani<sup>A)</sup>, Tatsuro Nakamura<sup>A)</sup>,  
Katsunobu Oide<sup>A)</sup>, Masanori Satoh<sup>A)</sup>, Masaaki Suetake<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>A)</sup>, Yoshiharu Yano<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

In the SuperKEKB project, a damping ring will be constructed at the middle of the linac in order to achieve a positron beam with lower emittance, which is required by the beam optics design for the higher luminosity. The injection and extraction scheme at the damping and main rings have to be designed under several criteria, which include the RF frequencies at the linac and the rings synchronized with large integers, dual beam bunches in a single linac pulse, and rising and falling times of the kickers. The harmonic number of the damping ring was chosen to allow wider range of buckets to be filled in the main ring. In order to enable the full bucket selection, a pulse-to-pulse LLRF adjustment system will be installed at the latter half of the linac, based on the cascaded event timing system. Pulse-to-pulse injection beam modulation (simultaneous injection) between SuperKEKB LER/HER, Photon Factory (PF) and PF Advanced Ring (PF-AR) is also discussed.

## SuperKEKB の入射ビームタイミング選択システム

### 1. はじめに

現在計画されている SuperKEKB 加速器計画においては、ルミノシティ向上のためナノビームオプションが選択され、入射ビームにも低エミッタンスの要請が課される<sup>[1]</sup>。そのため、入射器の中ほどにダンピングリングを建設し、低エミッタンスの陽電子入射ビームを生成する必要がある<sup>[2, 3]</sup>。また、現在の入射器においては、すでに KEKB 向けの 8-GeV 電子、3.5-GeV 陽電子と PF 放射光リング向けの 2.5-GeV 電子の 3 種類のビームを 50Hz パルス毎に切り換えて入射できる制御機構が実現されているが<sup>[4, 5]</sup>、SuperKEKB においてはビーム寿命が短くなるため、PF-AR 放射光リングにも、4-GeV 陽電子の高速パルス切り換え入射を行う必要があると思われる。

入射効率を下げないために、これまで行われている、繰り返し 50Hz のパルス内 2 バunch 加速も継続したいため<sup>[6]</sup>、キッカーの立ち上がり時間を考えるとダンピングリング内のビームタイミングも制限を受ける。さらに、メインリング入射タイミング誤差が数十ピコ秒しか許されないため、ダンピングリングやメインリングと入射器の多数のマイクロ波周波数の整数関係を維持する必要もある<sup>[7]</sup>。これらの複雑な条件を検討すると、これまでは緩く結合させて構築していた、メインリングの周長補正システムやビームバケット選択システムなどを高速ビーム切り換え制御機構と密に結合させて動作させる必要があると思われる<sup>[8, 9]</sup>。

SuperKEKB 計画における、これらの高速ビームタイミング制御機構の課題について、現在の KEKB 計画と比較しながら検討する。

### 2. KEKB における高速ビーム切り換え制御

KEK の電子入射器を使って、効率的な同時入射を実現するためのビーム切り換えの際には、ひとつのパル

スも無駄にはできないので、約 1km にわたる機器に対して 20 ミリ秒以内に確実に操作を行わなければならない。電子入射器は、4 つのリング加速器にビームを入射しているが、切り換えるビームの性質は、エネルギーで 3 倍以上、電流で部分的には 100 倍異なり、高速に切り換える際の挑戦課題となった。

しかし、広域、高速、確実な制御機構については、これまで入射器の制御で用いてきた Ethernet と TCP/IP を基礎とした広域制御だけでは、達成が困難かと思われた。そこで、イベントシステムと呼ばれる制御機構を新しく導入し、信頼性の高いタイミング信号伝送とそれに同期した高速広域制御とを実現した<sup>[5, 10]</sup>。

この装置内では、外部クロックに同期した 1GHz から 2.5GHz のデジタル信号を、FPGA と簡易信号発生器で生成し、民生品となっている SFP (Small Form-factor Pluggable transceiver) で広域に光伝送することができる。この信号は、50MHz から 125MHz の速度 (イベントレート) で送られるイベント及び同期データと呼ばれる短く速い情報、毎秒 25~62.5 メガバイトの速度で最大 2 キロバイト送られる少し遅い情報、そしてタイミングクロックを伝達するために用いられる<sup>[11]</sup>。制御ソフトウェアは EPICS の枠組みのもとで構築している<sup>[12]</sup>。

2009 年の春から KEKB HER/LER と PF の入射について本格的な高速切り換え機構の運用を始め、次のような制御項目が実現されている。

- 1ヶ所のイベント生成ステーションと 17ヶ所のイベント受信ステーション
- 電子銃の電圧とピコ秒タイミングの制御
- 13のマイクロ波発生装置での低電力マイクロ波の制御
- 60の大電力マイクロ波のタイミング制御
- 12のパルス電磁石オンオフ、タイミングの制御
- 100の入射器のビーム位置モニタのための 24のビーム位置測定ステーションの制御
- 100のビーム輸送路のビーム位置モニタのための

\*E-mail: <kazuro.furukawa@kek.jp>

- 4つのビーム位置測定ステーションの制御
- KEKB の電子と陽電子の入射位相の制御
- KEKB の電子と陽電子のセプトムタイミングの制御
- KEKB の電子と陽電子のバケット選択の制御

これらの制御のために、20 ミリ秒のパルス毎に約 130 のアナログ・デジタルパラメータが変更され、各リングへの入射ビームを生成している。

通常の運転時には、PF リングからの入射ビームパルス生成条件はあまり変わらないが、KEKB の HER と LER の入射については、頻りに衝突条件の変更が行われることもあり、約 10 秒毎にビームモードパターンが変更される。このような頻りに条件の変更にも特に問題なく対応し、連続して 20 ミリ秒毎にビームモードを切り換えながら、同時入射を実現できている。図 1 に示すように、ひとつの入射器を仮想的に 3つの異なる加速器として扱うことができ、約 130 のパラメータについて独立の操作を行うことができる。この機構は SuperKEKB への入射においても主要な役割を果たすことになる。

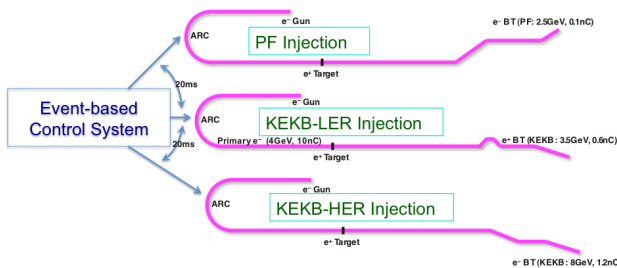


図 1: KEKB HER/LER と PF の入射には 100 を超えるパラメータを瞬時に切り換え、あたかも 3つの異なる仮想的な加速器をパルス毎に切り換えるような運転を行った。

### 3. SUPERKEKB に向けた入射器の増強

SuperKEKB 計画においては約 40 倍のルミノシティを得るために、表 1 に示すような低エミッタンス大電流のビームを入射する必要がある。電子についてはフォトカソードを用いた RF 電子銃によってビームを生成して入射する計画であるが、陽電子については生成陽電子の捕獲セクションの改造と図 2 のようにダンピングリングの新設が必要となる。

表 1: KEKB と SuperKEKB のビーム特性の違い

	KEKB		SuperKEKB	
	$e^-$	$e^+$	$e^-$	$e^+$
Beam	$e^-$	$e^+$	$e^-$	$e^+$
Energy	8GeV	3.5GeV	7GeV	4GeV
Charge	1nC	1nC	5nC	4nC
Emittance	100 $\mu$ m	2000 $\mu$ m	20 $\mu$ m	10 $\mu$ m
Bunches	2	2	2	2

ダンピングリングでの陽電子のダンピングタイムは 12ms ほどなので、50Hz で陽電子を入射する場合は、ダ

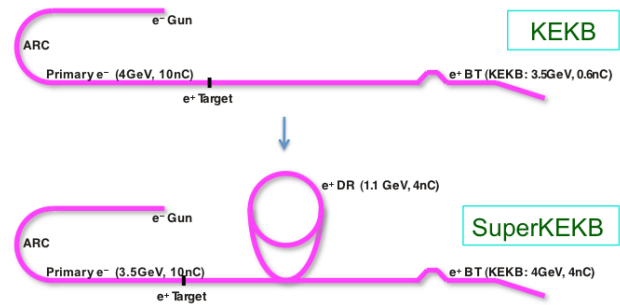


図 2: 入射器の陽電子入射。SuperKEKB への入射にはダンピングリングが必要となる。

ンピングリングにおいて、20ms 前のパルスで蓄積した陽電子ビームを次のパルスで出射しながら新しい陽電子ビームを入射蓄積する、というお手玉のようなビーム操作を行うことになる。他のビームを切り換えながら入射する場合、例えば電子 25Hz、陽電子 25Hz の場合は、陽電子をダンピングリングに入射した後、次の電子を加速するパルスでは陽電子はダンピングリングに蓄積を続け、40ms 後のパルスで出射するとともに、新しい陽電子ビームを蓄積する。

#### 3.1 RF 周波数の選択

元々入射器と KEKB リングの RF 周波数の間には歴史的事情から表 2 のような少し複雑な整数関係があるが、SuperKEKB においても資源の有効利用のため同じ周波数関係を維持することになる。そのためダンピングリングの周波数について検討してみる。

表 2: 入射器と KEKB の RF 周波数

	逡倍数	周波数
共通周波数	-	10.38546 MHz
Linac SHB1	$\times 11$	114.24 MHz
Linac SHB2	$\times 55$	571.2 MHz
Linac Main	$\times 275$	2856 MHz
KEKB Ring	$\times 49$	508.8873 MHz

入射効率を上げるために、ひとつのパルス内に 2 バンチを加速するスキームは SuperKEKB でも必要となる。ふたつのバンチの間隔は共通周波数 10.38MHz によって決定され、96.3ns となっている。このことから、効率を失わないためには、ダンピングリングの周波数との間にも少なくとも現在と同じ共通周波数を持つ必要がある。そのため、他の施設で使用されることのある 476MHz や 714MHz などは採用できない。入射器のサブハーモニックバンチャ (SHB) で使用されている 571.2MHz も選択可能ではあるが、CW クライストロン等の資源を考えると KEKB メインリングで使用されている 508.89MHz を選択することがもっとも適当であると考えられる。

### 3.2 ダンピングリングのハーモニック数

次にダンピングリングの大きさを検討してみる。ダンピングリングでは先に書いたようにお手玉のように陽電子バンチ出し入れするために、2バンチずつの2パルス、合計4バンチを図3のように置ける間隔が必要となる。ここで、パルス内の2バンチの間隔は96.3nsで、その2バンチを組としたパルスの間隔は入出射キッカーの立ち上がり・立ち下がりから決まり、現実的には100ns程度以上と考える。このことからハーモニック数は少なくとも約200以上必要となる。



図3: ダンピングリング内の2バンチ×2パルスの配置。

KEKBにおいては、メインリングのRF周波数が基本周波数の49倍であり、ハーモニック数5120と共通約数を持たないため、49周つまり約500 $\mu$ s待つ間に必ずどのバケットにでも入射が可能となる。SuperKEKBにおいては条件が厳しくなり、バケット選択の自由度が狭まる可能性があるが、50Hzパルスモジュレータ電源の安定度を考えると、少なくとも最大待ち時間2msのうちに入射を行う必要があると思われる。また、RF位相をあまり変調せずに、SuperKEKBメインリングのバケットをできるだけ自由に選択できるためには、ダンピングリングのハーモニック数がメインリングのハーモニック数5120と単純な整数関係を持たないことが好ましい。

このようなことを考慮し、ダンピングリングから2ms以内に出射し、できるだけ多数のメインリングバケットに入射できる条件を200以上のハーモニック数で探してみると、ハーモニック数230のときに5120のうち3000以上のバケットに入射できることがわかった。実は、ダンピングリングや入射器のRF位相をパルス毎に変調すれば全てのバケットを選択することが可能で、実際にはどのバケットでも選択できる必要があるためRF位相の変調は必須ではあるが、コミショニングの容易さを考えてこのハーモニック数230を選択することが適当であると考えられる。

入射器のパルス毎のRF位相変調は他のビームの切り換えのためにいずれにせよ必要であり、現在でも行っている。しかし、現在は再現性が保証されれば問題はないが、SuperKEKB向けの新しい仕組みでは360度の直線性が重要になり、低電力RF系の再較正が必要になると考えられる。ダンピングリングのRF位相を変調する

方法もあるが、陽電子バンチのお手玉を考えると、パルス間の依存関係が増え、得策でないと思われる。

### 3.3 イベントタイミング制御

KEKBにおいては、1系統のイベントタイミングシステムを用い、バケット選択システムもタイミング信号とビームの種類を交換するだけの独立のシステムであったが、上に述べたような状況に対応するために、多少複雑な構成が必要になるとと思われる。

これまでは、パルス間の依存関係は、数種類のパルスモジュレータ電源の安定度に伴う繰り返し変更についての制限だけであったが、ダンピングリングの陽電子ビームのお手玉のためにパルス間の依存関係が増えてしまう。特に、陽電子ビームの入射頻度が低い場合には、ダンピングリングの入射と出射の間で20ms×nの正確なタイミング管理が必要となる。このため、入射器の前半と後半に分けた2系統のイベント制御システムを構成することを検討している。

また、メインリングでどのバケットを選択するかによって、ダンピングリングでのバケット選択、入出射タイミングや入射器後半のRF位相制御がパルスをまたいで必要となるため、バケット選択システムはイベント制御システムと一体とする運用が必要と思われる。

## 4. PF-ARの入射

PFの入射路はKEKBと独立であったため、エネルギーが大きく異なるが、パルス偏向電磁石の増設により、高速ビーム切り換えによる同時入射が可能であった。しかし、PF-ARの入射路はSuperKEKBと共通となるため、同時入射は簡単にはできない。ところで、SuperKEKBのビーム寿命は10分程度と短いため、PF-ARへの通常切り換え入射を行うと、偏向電磁石の標準化を伴い大きな時間を必要とする。これはBelle2の衝突実験の中断を意味する。

そこで、現在のPF-ARへの3GeV電子入射の代わりに4GeVの陽電子入射の可能性が検討されている。電子のエネルギーは7GeVと高いために入射機構の改造が大規模になり現実的ではないが、陽電子のエネルギーは4GeVなので改造が小規模ですむことになる。PF-ARの実験エネルギーは6.5GeVであるためトップアップ運転はできないが、高速ビーム切り換えが可能となれば、少なくともBelle2の衝突実験の中断は避けることができる。

しかし、検討課題はいくつかあり、例えば、リングのRF周波数を決める周長補正について、PF-ARのそれはSuperKEKBのそれとは独立に行われる。PF-ARの周長補正の方が10倍ほど変化が大きく、また、入射器のRF周波数はSuperKEKBと整数関係を持つため、PF-ARとは整数関係に無い。

陽電子を使用するために、パルス偏向電磁石の増設を最低限にするためにはダンピングリングを通して入射することになる。偶然の入射タイミングを探す場合は、PF入射ではSHBの114MHzと巡回周波数の偶然の同

期を探してきたが、ダンピングリングを通して PF-AR に入射する場合は、ダンピングリングと入射器の共通周波数である 10.38MHz と PF-AR 旋回周波数の偶然の同期を探ることになり、入射確率が下がる可能性がある。さらに、これが可能となるためには、電子銃のタイミングからダンピングリングの旋回周波数との同期を考慮しなくてはならない。しかし、パルスをまたいでタイミングを作るとしたら整数関係の無い RF 間では不可能となる。PF-AR の入射時には PF-AR の周波数を固定するなどの方策があるかと思われるが、単純ではない。

また、Belle2 の実験によっては SuperKEKB の衝突エネルギーの変更が予想され、それに伴って入射陽電子のエネルギーが変更されるので、PF-AR の入射エネルギーを変更しなくてはならない。不可能ではないと思われるものの、どのような方針をとるのが適当であるか検討中である。

## 5. まとめ

SuperKEKB の入射について、ダンピングリングを含めて検討を加えた。検討結果も利用してダンピングリングの設計が進んでいる。イベントタイミング制御についてはパルスをまたがる制御についての工夫と、低電力 RF 制御についての再較正などが必要であるが、原理的な困難はなさそうである。PF-AR を含めた同時入射機構はさらに検討を進めているところである。全体として入射器運転の効率を高めながら、信頼性も失わない入射機構の設計を進めていきたい。

## 参考文献

- [1] M. Masuzawa, "Next Generation B-factories", *Proc. IPAC2010*, Kyoto, Japan, 2010, p. 4764.
- [2] T. Kamitani *et al.*, "SuperKEKB に向けた KEKB 入射ライナックの改造計画", *these proceedings*.
- [3] M. Kikuchi *et al.*, "Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB", *Proc. IPAC2010*, Kyoto, Japan, 2010, p. 1641.
- [4] M. Satoh *et al.*, "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現状報告", *Proc. 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society*, Hiroshima, 2008, p. 821.
- [5] K. Furukawa *et al.*, "New Event-based Control System for Simultaneous Top-up Operation at KEKB and PF", *Proc. ICALEPCS2009*, Kobe, Japan, 2009, THP052.
- [6] K. Furukawa *et al.*, "Beam Feedback Systems and BPM Read-Out System for the Two-Bunch Acceleration at the KEKB Linac", *Proc. ICALEPCS2001*, San Jose, USA., 2001, p. 266.
- [7] K. Furukawa *et al.*, "The Timing System of KEKB 8-GeV Linac", *Proc. ICALEPCS2003*, Gyeongju, Korea, 2003, p. 130.
- [8] E. Kikutani *et al.*, "KEKB Bucket Selection System, Present and Future", *these proceedings*.
- [9] K. Furukawa *et al.*, "Pulse-to-pulse Beam Modulation and Event-based Beam Feedback Systems at KEKB Linac", *Proc. IPAC2010*, Kyoto, Japan, 2010, p.1271.
- [10] T. Kudou *et al.*, "KEK LINAC におけるイベントタイミングシステム", *these proceedings*.
- [11] <<http://www.mrf.fi/>>.
- [12] <<http://www.aps.anl.gov/epics/>>.