

同時トップアップ入射のための KEK 電子陽電子入射器の加速モード切替の高度化

ADVANCED ACCELERATION MODE SWITCHING FOR SIMULTANEOUS TOP-UP INJECTION AT KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

古川和朗^{*A)}、明本光生^{A)}、荒川大^{A)}、荒木田是夫^{A)}、飯田直子^{A)}、池田光男^{A)}、岩瀬広^{A)}、恵郷博文^{A)}、榎本收志^{A)}、榎本嘉範^{A)}、大越隆夫^{A)}、大沢哲^{A)}、大西幸喜^{A)}、岡安雄一^{A)}、小川雄二郎^{A)}、柿原和久^{A)}、梶裕志^{A)}、片桐広明^{A)}、紙谷琢哉^{A)}、川村真人^{A)}、菊池光男^{A)}、佐武いつか^{A)}、佐藤政則^{A)}、周翔宇^{A)}、白川明広^{A)}、杉村仁志^{A)}、諏訪田剛^{A)}、清宮裕史^{A)}、染谷宏彦^{A)}、竹中たてる^{A)}、田中窓香^{A)}、張叡^{A)}、邱丰^{A)}、峠暢一^{A)}、中島啓光^{A)}、夏井拓也^{A)}、東保男^{A)}、肥後寿泰^{A)}、船越義裕^{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)}、三増俊弘^{A)}、宮原房史^{A)}、矢野喜治^{A)}、横山和枝^{A)}、吉田光宏^{A)}、王迪^{B)}

Kazuro Furukawa^{*A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Yoshio Arakida^{A)}, Naoko Iida^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Hiroshi Iwase^{A)}, Hiroyasu Ego^{A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Takao Oogoe^{A)}, Satoshi Ohsawa^{A)}, Yukiyoshi Ohnishi^{A)}, Yuichi Okayasu^{A)}, Yujiro Ogawa^{A)}, Kazuhisa Kakihara^{A)}, Hiroshi Kaji^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Masato Kawamura^{A)}, Mitsuo Kikuchi^{A)}, Itsuka Satake^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Xiangyu Zhou^{A)}, Akihiro Shirakawa^{A)}, Hitoshi Sugimura^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Yuji Seimiya^{A)}, Hirohiko Someya^{A)}, Tateru Takenaka^{A)}, Madoka Tanaka^{A)}, Rui Zhang^{A)}, Feng Qiu^{A)}, Nobukazu Toge^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Yoshihiro Funakoshi^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Takako Miura^{A)}, Katsuhiko Mikawa^{A)}, Toshihiro Mimashi^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Kazue Yokoyama^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Di Wang^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

The electron positron injector linac at KEK continues to deliver electrons up to 7 GeV and positrons up to 4 GeV into four storage rings and a positron damping ring for elementary particle physics and photon science. It started the simultaneous top-up injections in May 2019 into those four rings of SuperKEKB HER/LER, PF and PF-AR at various beam properties. This injection scheme requires high-speed switching to match the complex parameters of these rings, and all top-up injections have been successfully achieved for the first time. As the beam lifetime of the SuperKEKB rings are less than ten minutes, this scheme is indispensable for the higher integrated luminosity. It also contributes to those experiments with stable stored beams.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の電子加速器群の入射器は、素粒子物理実験や放射光科学実験に向けて40年にわたってそのビームを供給してきた[1]。1998年から2010年まで行われたKEKB電子陽電子衝突Bファクトリー実験の時期においては、以前から実施されていたフォトンファクトリー(PF)放射光実験に加えて、TRISTAN実験においては入射シンクロトロンとして用いられたARもPF-ARとして放射光実験が行われるようになり、バランスの取れた入射操作が重要となった。KEKB計画は、同じ目的を持ち半年早く開始したSLACのPEP-II計画との競争が激しく、特にSLC実験での実績を持つSLAC線形加速器に比べてKEKの入射器の能力が心配された。そのため、KEKBの運転開始後も、入射器においては、ビームの安定化機構、パルス内2バンチ加速、実験

中の連続入射というようにさまざまな実験効率向上のための工夫を凝らしてきた[2]。

そして、さらに実験効率を高めるために、2008年には、PF-ARを除いたPFリング、KEKB電子高エネルギーリング(HER)、陽電子低エネルギーリング(LER)の3つの蓄積リングに対して同時トップアップ入射を成功させた。同時入射とは、入射器の加速パルス毎に入射先を切り換え、3つの蓄積リングにあたかも同時にビームを入射し続けることである。入射器の大電力パルスマイクロ波源は50 Hzの運転能力があるので、50 Hzのパルス毎、つまり20ミリ秒以内にビーム特性と電子・陽電子を切り換えることになる[3]。

この同時入射によって、PFリングの蓄積電流が一定に保たれ、実験効率と実験データ精度を向上させるとともに、HERとLERの蓄積電流を一定に保つことにより、既に始まっていたクラブ空洞による正面衝突モードの繊細な衝突調整に大きく貢献した[4]。また、双方のビーム開発研究においても、他の実験

* kazuro.furukawa@kek.jp

への影響が小さくなった。

一つの入射器を素粒子物理実験と放射光科学実験の双方に利用する考え方は、ほぼ同時期に始まった、放射光専用加速器と TRISTAN 衝突型加速器の建設に合わせた入射器の建設時期から想定されていたと思われる。なお、このような素粒子実験と放射光実験などの複数実験の干渉は他の加速器研究所でも生じており、実際 SLC 実験の際には SLAC では SSRL 放射光リングを長期間停止させたり、専用の入射器を建設したりという対策を行った。また、CERN の PS 複合加速器は、1.2 秒毎にビームを切り換える能力を持っており、パルス毎変調や仮想加速器と呼ばれていた [5]。LEP 実験の時期には、電子、陽電子、陽子、反陽子、重イオンの切り換え加速も可能であった。しかし、KEK 入射器の 20 ミリ秒の高速切り換えにおいては、さらにさまざまな技術的挑戦を必要とした。

2. SUPERKEKB と同時トップアップ入射

KEKB 計画の成功を受けて、数十倍の衝突性能向上を狙って設計された SuperKEKB 計画においては、入射器のビームに対しても厳しい要件が課せられているが、特に蓄積リングのビーム寿命が 10 分以下となることが予想され、最終的な設計性能を得るためには、全ての蓄積リングに対する同時トップアップ入射の実現が必須であることが指摘されていた [6, 7]。これらの複合加速器の模式図を Fig. 1 に示す。

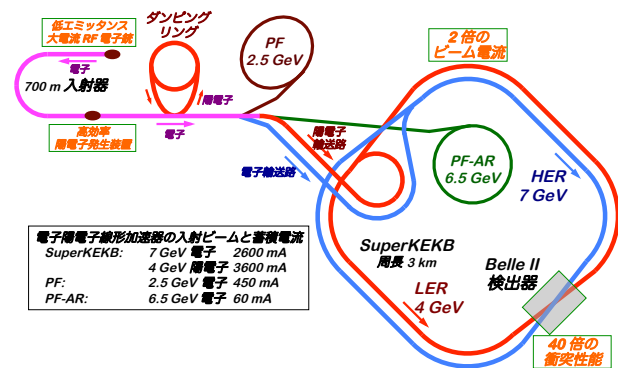


Figure 1: Layout of KEK electron/positron accelerator complex with beam properties from the injector linac to four storage rings.

2.1 バケット選択設計 1

TRISTAN 計画時の歴史的経緯¹から、電子陽電子衝突リングと入射器の間のマイクロ波周波数は、単純な整数関係を持たなかった。一方、KEKB や SuperKEKB では、入射器と衝突リングの間に 30 ピコ秒の同期精度が求められたため、マイクロ波周波数を少しかだけ変更し、275:49 という大きな整数関係を設定し、共通周波数 10.39 MHz を基に精度の高い同期を可能とすることになった。

¹ 電子陽電子の他に PS から陽子を入射する計画があった。

KEKB と SuperKEKB の主リング (HER と LER) は同じ 5120 というハーモニック数を持っているが、上の整数 49 と互いに素である特性をもっているため、入射器から直接に蓄積リングに入射する場合には、共通周波数の 5120 倍、つまり 492 マイクロ秒待つことによって入射器から蓄積リングの全てのバケットにビームを入射することができる。実際の衝突実験においては、5120 バケットのうち、蓄積リングの状態や実験条件により、予め並びを決めた 1000 バケットから 2500 バケット程度にビームを蓄積することになるが、そのうちのどのバケットにもビームを入射をすることが重要である。この並びのバケットのうち一番電流が少なくなったバケットに次のビームを入射することにする。これをバンチ電流均等化 (BCE) と呼ぶ。

先に書いたように入射器の大電力パルスマイクロ波源は 50 Hz の運転能力があるが、パルス毎に 492 マイクロ秒以内に入射条件を整えられるのであれば、電源の充電を最小約 19.5 ミリ秒で終え、ビーム入射に備えれば良いことになり、それぞれのパルスは独立であり依存関係を持たない。KEKB 計画はこのような状況で入射運転が行われた。

ところが、SuperKEKB 計画では少し事情が異なる。SuperKEKB 計画はルミノシティ向上のためのナノビーム方式によって、設計された衝突点口径が小さくなり、入射ビームのエミッタンスに対する要求も、特に陽電子に対しては 100 分の 1 と大幅に厳しくなった。そこで、電子については光陰極 RF 電子銃の導入によって、陽電子についてはダンピングリング (DR) の導入によって、性能の向上を図ることになった。SuperKEKB HER への電子入射については、ほぼ KEBB と同様に最大 492 マイクロ秒待つという戦略でバケット選択を行うことが可能であるが、DR を経由する LER への陽電子入射については、パルス間の依存関係が生じ、設計によっては入射ができない可能性もある。つまり、KEKB 計画では、ビームパルスのタイミングはパルス毎に独立であり、前後のパルスとは依存関係が無かったが、SuperKEKB 計画では、全てのビームパルスのタイミングには依存関係が生じてしまい、格段に慎重な設計と制御が重要となる。

2.2 マイクロ波と周長

ところで、PF、PF-AR、及び SuperKEKB のリング加速器のマイクロ波周波数は、主に歴史的事情から、それぞれ、499.9 MHz、508.5 MHz、508.9 MHz となっている。

PF、PF-AR、SuperKEKB のリング加速器の深度は、地表から地下 11 メートルの間に分布しているために、気圧、気温、潮汐から蓄積リング周長への影響が 100 倍以上異なり、PF リングの周長が年に 2×10^{-5} 程度まで変動することに対し、SuperKEKB の両リングについては 4×10^{-7} 程度だけ変動する。それぞれの蓄積リングについて周長と加速マイクロ波との関係を補正するために、蓄積リングのマイクロ波周波数は独立に管理されており、閉軌道の観測によって連続的に変更されることになる。

先に述べたように、入射器と SuperKEKB リングのマイクロ波は完全同期運用の必要があったため、PF リングと PF-AR については、それぞれのマイクロ波は入射器と非同期とならざるを得なかった。幸い、縦方向入射口径が大きいこともあり、偶然の同期タイミングを(後で述べる条件 2 ミリ秒以内に)探すことによって入射を行っている [8]。

2.3 ダンピングリングの設計

SuperKEKB 陽電子ダンピングリングのマイクロ波周波数としては、入射器のマイクロ波と簡単な整数関係を持たせることも検討されたが、むしろ、バケット選択に関しては共通周波数 10.39 MHz の整数倍としないと不利になり、また、メインリングと異なる装置群を維持することの欠点も大きいことがわかり、メインリングと同じ周波数 508.9 MHz を選択した。

入射器の中ほどでタングステン標的を用いて生成した陽電子の大きなエミッタンスについて、入射器の 1 パルス 20 ミリ秒以内に、ダンピングリングによって十分小さくすることは難しいと思われた。そこで、次に 2 パルス 40 ミリ秒を目指して、ダンピング時間を約 10 ミリ秒とし、逆方向偏向電磁石も組み合わせ (Reverse-bend FODO) 設計が行われた。

陽電子ビームパルスをダンピングリング内に 40 ミリ秒留め置いた上で、最大 50 Hz でビームパルスを提供し続けるためには、ビームパルスを 2 パルス分ダンピングリング内のいずれかのバケットに配置できる必要がある。一方、ビーム電流を増倍させるために、パルス内 2 バンチ加速を行う場合には、その 2 バンチはリングとの共通周波数の間隔 96 ナノ秒で並ぶ。それぞれのビームパルスはキッカー電磁石で排出する必要があるため、パルスの間隔を現実的なキッカー電磁石の立ち上がり・立ち下がり時間 100 ナノ秒以上離す必要がある。結局、周長は Fig. 2 のように 392 ナノ秒以上、ハーモニック数で 200 以上必要となる。

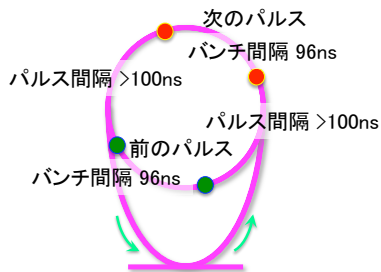


Figure 2: Typical beam bunch arrangement in the damping ring for two bunches of two pulses.

ハーモニック数がちょうど 200 ではバケット選択の自由度がなくなってしまい、ある程度の自由度が必要だが、周長を大きくすれば費用も掛かり、設計によってはダンピング時間も長くなってしまいます。周長が小さめで、主リングの多くのバケットを短い時間内に選択できるという観点でハーモニック数を探すと、230 以上で比較的良い数字が見つかる。この

うち、ハーモニック数 230 は主リングのハーモニック数 5120 との間で 10 という適度な最大公約数を持ち、さらにダンピングリング内の適切なバケット選択を行う場合の検討してみると、1 バンチ加速の場合は 2 ミリ秒以内に全ての主リングのバケットに、2 バンチ加速の場合には 2 ミリ秒以内に 5120 バケットの内 2887 バケットに、それぞれ入射が可能であることがわかる [9]。2009 年にこの 230 を決断し、詳細の設計が進められた [10]。

バケット番号を区別すると、 $5120 \times 230 \div 10 \times 96 \text{ ns} = 11.34 \text{ ms}$ で全ての組み合わせが繰り返すことになり、この時間を待てば必ず全てのバケットに入射が可能であるが、電源装置を 50 Hz で動作させ続けるためには、実際にはこの長い時間を単純に待つことはできない。しかし、主リングに入射する 40 ミリ秒以上前のダンピングリングへの入射時に、予め適切なバケットを選ぶように条件を整えておけば、特に 1 バンチ加速では、予定時刻から 2 ミリ秒以内に全てのバケットに入射が可能となる。このことは、さまざまな装置の準備が万全ではないかも知れない加速器の立ち上げ時期には、重要と考えられる。そうであっても、KEKB 運転時には 19.5 ミリ秒で充電を終えればよかった大電力パルスマイクロ波電源に、18 ミリ秒で充電を終えるように要請する必要が生じた。容易では無い改造ではあったが、SuperKEKB 向けの建設時期にこの改造を終了させることができた。

2.4 バケット選択設計 2

コミッショニング初期には前節の戦略で運転が可能であることわかり、実際に問題なく入射を行っている。しかし、上に述べたように、蓄積電流が大きくなった際には 2 バンチ入射においてリング内のバケットの全てが選択できないことが性能の制限となってしまう可能性がある。その対策としては、設計時には 3 つの対策を用意していた。

1. ダンピングリングと主リングに整合したビームバンチに入射器下流のマイクロ波を同期させる。
2. 主リングの選択バケット候補を複数用意する。
3. ダンピングリングの蓄積中に周波数・位相を変更しバケット番号をずらす。

この 3 つの選択肢にはそれぞれ得失があるが、それぞれ可能なように準備を進めており、まずは最初の選択肢の試験運転を始めている [11]。

先に、ビームパルスの間隔を 18 ミリ秒以上にするという条件を課すことにした、と述べたが、それとは独立に、ビームパルスの商用周波数との関係にも注意が必要である。さまざまな電源が電源周波数に同期した影響を受けられると思われるが、特に、クライストロンのヒーターが交流駆動となっており、その電流が作る磁場がクライストロンの電子ビームに変調を与え、マイクロ波出力に影響を及ぼす。これを避けるためには、商用周波数のできるだけ同じ位相でビームを生成する必要がある。ところが、商用周波数は負荷によって大きく変動し、0.1% 以上の割合でずれる場合もあり、対策が必要である。

3. 4 蓄積リングへの切り換え入射

入射器とダンピングリングから、4つの蓄積リング SuperKEKB HER、LER、PF、PF-AR へビームを切り換え入射するためには、他にも考慮することがあった。

3.1 放射光施設ビーム輸送路の再構築

KEKB 入射と PF 入射を高速に切り換えるために 2005 年には PF リングへの輸送路が再構築された [12]。この改造を基にして、2008 年の 3 リング同時トップアップ入射が可能となった。

一方、PF-AR は、当時 KEBK HER とビーム輸送路を共用しており、入射電子エネルギーが異なるために、高速切り換えが困難であった。SuperKEKB 計画では、PF-AR の入射を開始するとその入射中に SuperKEKB の蓄積ビームが消失してしまうことが予想された。そこで、PF-AR 向けの直接入射路を建設することを決断し、この輸送路の分離によって輸送路での入射エネルギーの制限も無くなり、PF-AR の 6.5 GeV トップアップ入射も可能となった [13]。

3.2 エネルギーの切り換え

ビームエネルギーが入射先によって異なるため、マイクロ波の加速条件をパルス毎に変更する必要がある。そのために 180 度偏向部 (J-ARC)、ダンピングリング接続部、入射器終端部など必要な箇所に、低電力マイクロ波のパルス毎変調器が存在する。現在のところ、振幅は変更せず、連続する 2 つのユニットのマイクロ波位相を Fig. 3 のように逆向きに変更し、エネルギー幅の広がりを抑えている。

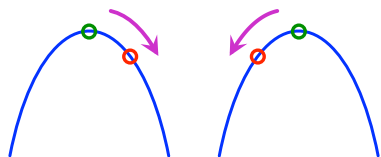


Figure 3: Energy change with rf phases (red) from crest phases (green) compensating energy spread at adjacent units.

高速のビーム切り換えを行わなかった以前は、全体で 60 台の大電力マイクロ波源に対して、マイクロ波位相変調は中電力のドライバクライストロンで行って、8 台までの大電力クライストロンに分配していた。同時入射のための高速切り換えに対応するために、一部の電力マイクロ波源では専用の低電力制御と半導体増幅器を持たせることにした。また、安定度を高めるために、伝送路を更新し安定化フィードバックループを設置している [14]。

3.3 独立のビーム品質管理

KEKB 時期には放射光施設も含めて、それぞれの蓄積リングについての横方向・縦方向のビームエミッタンスについての要求が厳しくなかったため、パルス毎に収束電磁石の磁場勾配は変更せず、場合によっては入射器内では曖昧な Twiss パラメータのビームを通した上で、それぞれの蓄積リングへの

ビーム輸送路においてビーム光学整合を適用する場合があります、それでも入射は可能であった。

しかし、SuperKEKB 計画においては先に述べたように入射ビームのエミッタンスが厳しく制限されるので、入射器内でのエミッタンス増大は許されなくなり、ビーム光学関数や軌道をできるだけ正確に管理する必要が生じた。つまり、収束電磁石やビーム補正電磁石の磁場も、パルス毎に正確に切り替える必要がある。そこで、ビーム電流が小さいコミッションング時期には、まず入射先によってエネルギーが大きく異なる入射器の後半部に 30 台ほどのパルス収束電磁石と 40 台ほどのパルス補正電磁石を設置した [15]。このパルス電磁石システムは、約 1 mH のインダクタンスに対して、330 A、220 V、2 ミリ秒幅という電力パルスを供給し、0.01% のパルス毎設定の再現性を持ち、コイルに送った電力を次のパルスのために 70% 回収することができる。また、電磁石毎、パルス毎の運転状態を記録管理している。

他にも多数の機器がパルス毎の動作をするように改造されたが、モニタについても、ビーム位置モニタやビーム・ワイヤスキャナなどが、パルス毎に別のビームとして測定を行えるようにデータ収集機構が改造された [16]。同様にマイクロ波モニタも加速管の前後を含めて各加速ユニットの複数点でマイクロ波のパルス毎の挙動を観測している。

3.4 光陰極 RF 電子銃

電子銃は、実績のある熱電子銃と光陰極 RF 電子銃を併用しており、現在のところ、低エミッタンスビームの発生を必要とする SuperKEKB HER 入射には RF 電子銃を使用し、大電流を必要とする陽電子生成用の一次電子ビームと低エミッタンスを必要としない放射光施設の入射には熱電子銃を使用している。電子銃についても複数のパラメータをパルス毎に切り換えるが、光陰極向けのレーザーには注意が必要となる。レーザーの安定度がビームの安定度に大きな影響があるので、パルス毎の切り換えがレーザー用のマイクロ波位相を変動させないように細心の注意を払っている。

4. 広域高速同期制御

このように準備された装置群を実際に動作させるための仕組みに関して、KEKB 計画の当初からいざいこのような制御機構が必要になるかも知れないと考え、開発を始めていた。約 1 km の範囲に広がって設置された数十 (SuperKEKB 向けには数百) の装置を 20 ミリ秒毎に設定を確実に変更し測定を行う必要がある。このような制御はパルス毎変調 (PPM, Pulse-to-pulse Modulation) とも呼ばれることがある [5]。FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた高速制御機構の開発も検討されたが、十分な機能を持たせるためには困難が予想された。

4.1 イベントタイミング制御

一方、入射器を含めた加速器の機器制御に用いている EPICS ソフトウェアツールキットには、イベ

ントコードを発生させ、そのコードに応じて加速器全体に、予め決められた値の設定や動作を行わせる、という考え方とソフトウェアが用意されている。当時民生用に普及してきた FPGA と SFP (Small Form-factor Pluggable transceiver) を組み合わせ、この EPICS イベント制御に適合させるモジュールがスイス放射光施設 (SLS/PSI) で開発され、DIAMOND 放射光にも採用された [17]。当初このモジュールでは、高速に動作を切り替えることは想定されていなかったが、FPGA のファームウェアに対する指示をパルス毎に書き換えることによって、我々の要求を満たして、自由度も高いことがわかった。

この制御機構は製造している会社名から MRF イベントシステムと呼ばれる [18]。イベントジェネレータ (EVG) で発生させた情報を、論理的には Fig. 4 のようにスター型に接続された多数のイベントレーバ (EVR) が受け取り、必要な機器に制御情報やタイミング信号を伝達する。確実に同期させる必要のある制御情報とタイミングはイベントシステム接続を通して送られるが、動作に必要な制御情報は事前に EPICS のチャンネルアクセス通信によって送っておくことになり、協調した二階層動作となる [19]。

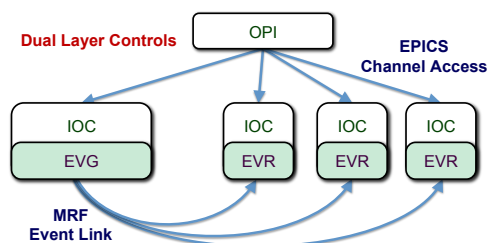


Figure 4: Dual-tier controls with EPICS CA client/server at the top and fast event synchronized controls at the bottom.

同期クロックとして、入射器のサブハーモニックバンチャと電子銃レーザーにも使用される 114.24 MHz が選ばれた。1 クロック 8.8 ナノ秒毎に 20 のビット列が SFP を通して連続的に伝送され、8 ビット 2 バイトの情報列と、2.3 GHz の同期クロックとして扱われる。2 バイトの内 1 バイトは、レベル信号の出力や、共有メモリの転送に用いられ、もう 1 バイトはイベントコードの転送に用いられる。イベントコードはそれぞれの EVR において、タイミング信号の送出や、制御機能の起動に使うことができる。タイミング信号は、32 ビットの遅延と幅の指定が可能である。分解能は機能により、イベントクロック 8.8 ナノ秒かビットクロック 440 ピコ秒で、精度は 10 ピコ秒以下である。イベントコードは 1 バイトなので、250 種類ほどを区別することとなるが、対応する制御機能もパルス毎に動的に変更可能であるし、共有メモリも含めた情報で条件を変えることも可能なので、その数は大きな制限にはならない。

現在入射器では EVG は VME 計算機に制御されているが、EVR は VME、PXI、組み込み FPGA カードなどの形態が使用されている。EVG 用計算機には加速器全体のビーム運転制御を統括させ、その指示で動作する EVR 計算機は接続された機器に応じた動

作を別々に管理することになる。

4.2 ビームモード

入射先の 4 つの蓄積リング HER、LER、PF、PF-AR に応じて、ビーム制御内容が異なるので、それぞれをビームモードと呼び、当初プログラム内の内部コード名であった 3 文字を使い、KBE、KBP、PFE、ARE と呼んでいる。試験用のものを含めて 10 のビームモードと、ビームを伴わずクライストロン等の装置だけを動作させるモードがある。ビームモード毎に、さまざまな機器の電圧電流やタイミング遅延などの制御をパルス毎に行うため、制御量毎にビームモードの数の制御変数が伴う。

一つのビームパルスに一つのビームモードが対応し、そのそれぞれに約 10 のイベントコードが伴っており、典型的には一つ前のパルスの終わりに次のビームモードを指示するイベントコードが送られ、さらにビームの直前にさまざまな装置の動作を決定するイベントコード群が送られる。ほとんどのイベントコードは多数の EVR 計算機を経由して多数の装置に使用されるが、一部のイベントコードは入射キッカーなどの特定の装置だけに使われる。

電子を加速する場合は、入射器全体を通してビームを通過するが、陽電子を加速する場合には上流部と下流部は別のビームパルスであり、そのため、EVG 計算機内で、EVG を 3 つ用意し、一つは全体の連続スケジュールリング用、残りは上流と下流用として独立に動作する [20]。

ここに記述した制御動作を実現するための、特に EVG 計算機でのプログラムは複雑になり、信頼性や自由度の向上など検討の余地がある。また、先に述べたように商用周波数が当初考えていたよりも大きく変動しており、現在はビームを停止させることで対処しているが、できれば根本的な対策を講じたいと考えている。さらに詳細についてはこれまでの会議等で報告されており、それらのまとめを参照していただきたい [21]。

4.3 ビーム運転と仮想加速器概念

ビーム運転においては、オペレータや自動プログラムからのビーム線り返しなどの要求を、インジェクション・パターンというプログラムが整理した上で EVG 計算機に送り、EVG 計算機が実時間動作を統括することになる。

広域高速同期制御によって各ビームモードを独立に操作できるようになったことにより、Fig. 5 のように一つの実加速器に対してあたかも複数の仮想的な入射器が存在して、操作者はそのうちの一つの仮想入射器だけを操作することを可能にしていることになる。エネルギーなどビーム特性についての安定化機構も、それぞれの仮想入射器に対して動作させることになる。

5. まとめ

さまざまな準備・試験を行った後、2019 年 5 月 15 日から 4 リング同時トップアップ入射を開始した。それぞれのリングの蓄積電流の変動は典型的に

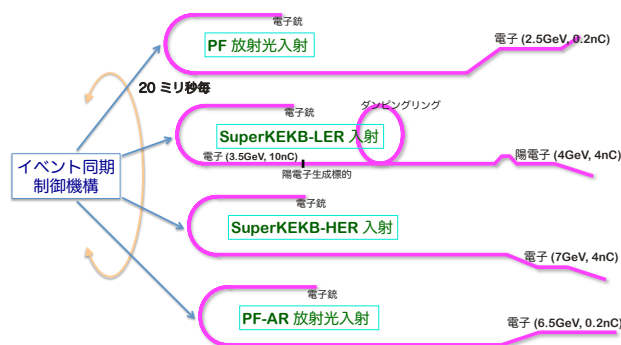


Figure 5: Single injector linac behaves as four virtual accelerators (VAs) to inject their beams into four separate storage rings.

は 0.4% 程度で運転している (PF リングについては 0.02% 程度)。これによって、導入の直前と直後を比較すると、例えば Fig. 6 のように SuperKEKB の積分ルミノシティが 237% 飛躍的に増大させることができた。以降も順調に同時トップアップ入射を続けており、一定の蓄積電流によって衝突調整が進み 6 月の世界最高ルミノシティ 2.4×10^{34} の達成にも繋がった。関係者に感謝するとともに、さらに素粒子物理と放射光科学の双方への貢献に努めたいと考えている。

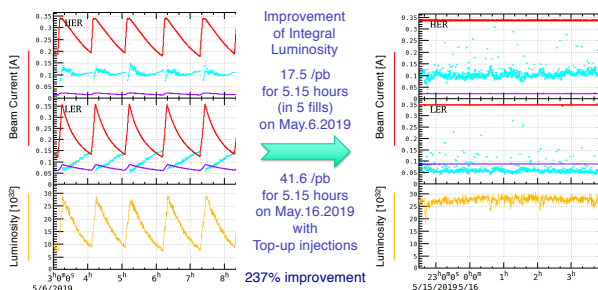


Figure 6: The experimental performance of SuperKEKB was improved by 237% employing the simultaneous top-up injections.

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “The KEKB injector linac”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2013, p. 03A002, 2013; <http://doi.org/10.1093/ptep/ptt011>
- [2] K. Furukawa *et al.*, “KEKB Injection Developments”, in *Proc. eeFACT2018*, Kowloon, Hong Kong, 2018, pp.121–125; <https://doi.org/10.18429/JACoW-eeFACT2018-TUPAB01>
- [3] M. Satoh *et al.*, “First Simultaneous Top-up Operation of Three Different Rings in KEK Injector Linac”, in *Proc. LINAC2010*, Tsukuba, Japan, 2010, pp.703–707; <http://epaper.kek.jp/LINAC2010/papers/we203.pdf>
- [4] K. Oide *et al.*, “Compensation of the Crossing Angle with Crab Cavities at KEKB”, in *Proc. PAC2007*, Albuquerque, USA, 2007, pp.27–31; <http://doi.org/10.1109/PAC.2007.4440328>

- [5] J.P. Potier *et al.*, “Pulse to Pulse Modulation of the CERN PS Complex”, in *Proc. PAC1977*, Chicago, USA, 1977, pp.1518–1520; http://epaper.kek.jp/p77/PDF/PAC1977_1518.PDF
- [6] K. Akai *et al.*, “SuperKEKB collider”, *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 907, pp.188–199, 2018; <http://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.017>
- [7] K. Furukawa *et al.*, “Beam Property Management at KEK Electron/Positron 7-GeV Injector Linac”, in *Proc. ICALEPCS2015*, Melbourne, Australia, 2015, pp.1123–1126; <http://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2015-THHC2001>
- [8] F. Miyahara *et al.*, “Timing System for Multiple Accelerator Rings at KEK e+/e- Injector LINAC”, in *Proc. PCaPAC2018*, Hsinchu, Taiwan, 2018, pp.207–209; <https://doi.org/10.18429/JACoW-PCaPAC2018-THP19>
- [9] K. Furukawa *et al.*, “Injection Beam Scheduling at SuperKEKB Complex through Damping Ring”, in *Proc. PASJ2010*, Himeji, Japan, 2010, pp.293–296; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/SH_6AM_1/FRSH04.pdf
- [10] M. Kikuchi *et al.*, “Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB”, in *Proc. IPAC2010*, Kyoto, Japan, 2010, pp.1641–1643; <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tupeb054.pdf>
- [11] H. Sugimura *et al.*, “Bucket selection with RF phase modulation at SuperKEKB”, presented at *PASJ2020*, 2020, paper WEOT10.
- [12] M. Satoh *et al.*, “The KEK Injector Upgrade for the Fast Beam-Mode Switch”, in *Proc. EPAC2006*, Edinburgh, UK, 2006, pp.855–857; <http://epaper.kek.jp/e06/PAPERS/MOPLS124.PDF>
- [13] N. Higashi *et al.*, “Construction and Commissioning of Direct Beam Transport Line for PF-AR”, in *Proc. IPAC2017*, Copenhagen, Denmark, 2017, pp.2678–2680; <http://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPAB044>
- [14] T. Matsumoto *et al.*, “Low-level RF System for the SuperKEKB Injector LINAC”, in *Proc. IPAC2018*, Vancouver, Canada, 2018, pp.2131–2133; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPAK017>
- [15] Y. Enomoto *et al.*, “Pulse-to-pulse Beam Modulation for 4 Storage Rings with 64 Pulsed Magnets”, in *Proc. LINAC2018*, Beijing, China, 2018, pp.609–614; <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-WE1A06>
- [16] F. Miyahara *et al.*, “Operational Performance of New Detection Electronics for Stripline-Type Beam Position Monitors at the SuperKEKB Injector Linac”, in *Proc. IBIC2019*, Malmö, Sweden, 2019, pp.522–525; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2019-WEPP006>
- [17] T. Korhonen *et al.*, “Timing System of the Swiss Light Source”, in *Proc. ICALEPCS2001*, an Jose, USA, 2001, pp.638–640; <https://epaper.kek.jp/ica01/papers/FRAT004.pdf>
- [18] <http://www.mrf.fi/>
- [19] A. Akiyama *et al.*, “Accelerator control system at KEKB and the linac”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2013, p. 03A008, 2013; <http://doi.org/10.1093/ptep/pts081>
- [20] H. Kaji *et al.*, “Construction and Commissioning of Event Timing System at SuperKEKB”, in *Proc. IPAC2014*, Dresden, Germany, 2014, pp.1829–1832; <https://epaper.kek.jp/IPAC2014/papers/tupri109.pdf>
- [21] <https://www-linac.kek.jp/cont/epics/event/>