

KEK 7 GeV 電子陽電子入射器におけるビーム特性管理

BEAM PROPERTY MANAGEMENT AT KEK ELECTRON/POSITRON 7-GEV INJECTOR

古川 和朗^{*A)}、榎本 嘉範^{A)}、飯田 直子^{A)}、紙谷 琢哉^{A)}、風間 慎吾^{A)}、三浦 孝子^{A)}、
宮原 房史^{A)}、夏井 拓也^{A)}、小川 雄二郎^{A)}、大西 幸喜^{A)}、佐藤 政則^{A)}、清宮 裕史^{A)}、
杉本 寛^{A)}、諏訪田 剛^{A)}、矢野 喜治^{A)}、横山 和枝^{A)}、吉田 光宏^{A)}、周 翔宇^{A)}

Kazuro Furukawa^{* A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Naoko Iida^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Shingo Kazama^{A)},
Takako Miura^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Yujiro Ogawa^{A)}, Yukiyoshi Ohnishi^{A)},
Masanori Satoh^{A)}, Yuji Seimiya^{A)}, Hiroshi Sugimoto^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)},
Yoshiharu Yano^{A)}, Kazue Yokoyama^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Xiangyu Zhou^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The electron/positron injector linac at KEK has injected a variety of beams into the electron accelerator complex of SuperKEKB collider and light sources for particle physics and photon science experiments for more than 30 years. The beam property of electrons and positrons varies in energy from 2.5 GeV to 7 GeV and in bunch charge from 0.2 nC to 10 nC, and their stability requirements are different depending on the injected storage rings. They have to be switched by pulse-to-pulse modulation at 50 Hz. The emittance control is especially crucial to achieve the goal at SuperKEKB and is under development. The beam energy management becomes more important as it affects all of the beam properties. Beam acceleration provided by 60 high-power microwave stations should be properly distributed considering redundancy and stability. Thus, the equipment controls are also restructured in order to enable the precise control of the beam properties, based on the synchronized event control system and EPICS control system. The strategy and status of the upgrade is described in this paper from the practical aspects of device controls, online simulation and operation.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構においては、電子・陽電子非対称コライダ SuperKEKB の建設が進んでいる [1]。この計画では、電流を倍増させ、また衝突点でのビームサイズを絞るいわゆるナノビーム・スキームにより、 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ という KEKB の 40 倍のルミノシティを達成し、素粒子のフレーバ物理の解明に繋げることができると期待されている。SuperKEKB は電子・陽電子入射器、7 GeV 電子リング (HER)、4 GeV 陽電子リング (LER) から構成され、また、低エミッタンスの陽電子を得るために新しくダンピング・リングも建設される。

電子・陽電子入射器は、2015 年度中に SuperKEKB に最初の入射を行い、2017 年には SuperKEKB と 2つの放射光施設を含め、4 つの蓄積リング及びダンピング・リングへそれぞれエネルギーやビーム特性の大きく異なるビームを高速で切り替えながら運転する予定である (Fig. 1)。Photon Factory (PF) へは 2.5 GeV、PF Advanced Ring (PF-AR) へは 2016 年から 6.5 GeV、さらに HER・LER へは電子 7 GeV・陽電子 4 GeV という大きく異なるビーム特性をそれぞれ求められている [2, 3]。



Figure 1: Injector linac layout and beam delivery to multiple experimental facilities.

特に SuperKEKB リングへ入射するビームについては、前の KEKB に比べ格段に小さなエミッタンス 20 mm-mrad を求められており、バンチ当たり 5 nC の大電流の下で達成することは大きな試練である。このようなビームを高精度に維持するために、新規に大電流 RF 電子銃や陽電子捕獲のためのフラックスコンセントレータ等を導入し、また、加速機器の横方向設置精度を短距離区間については 0.1 mm、600 m 全体にわたっては 0.3 mm に抑え、さらに高い安定度をもった運転を必要とする。その基礎として、各加速器装置の静的・動的な特性情報を的確に把握した上で、生成されたビームの特性を各位置で評価し、繰り返し補正することで、設計通りのビームを導くことを目指す必要がある。

これらのビーム運転管理過程について、KEKB での手法を基にして SuperKEKB に当てはめて考えてみたい。

2. 加速器装置

入射器における制御系の下位層について、KEKB 計画では入射器独自のリモート・プロシージャ・コールを基本とした古い制御ソフトウェアと EPICS 制御フレームワーク [4] を利用した部分が混在して、情報を交換していた。これは、計画当初には古いハードウェアが数種類混在して用いられていたことが主要な理由であった。SuperKEKB では、下位層においても全ての機器が EPICS によって制御されるため、運転中の機器の情報のうち主要なものは IOC (I/O Controller) の EPICS データベースに維持される。EPICS データベースは IOC の起動時に主記憶に読み込まれ、機器制御のためのデバイス・サポート及びレコード・サポート手続きによって利用されるとともに、CA (Channel Access) プロトコルによって外部から参照・更新される。

^{*} <kazuro.furukawa@kek.jp>

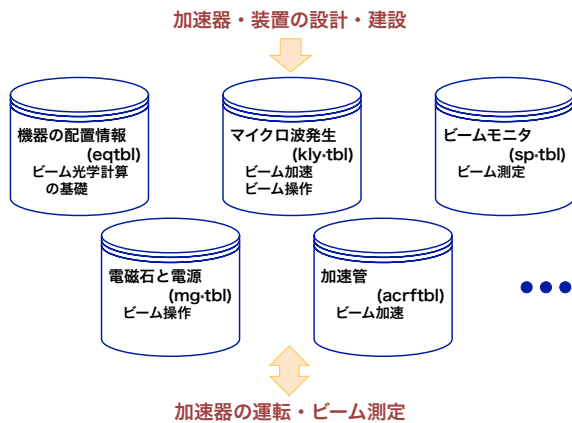


Figure 2: Construction of static database and its contribution to linac beam operation.

これらの加速ビームの特性を決定する加速器装置の静的なデータベースが Fig. 2 のように用意されており、その内容の一部を以下に説明する。

2.1 装置の配置

各装置には通常 6 文字までの 2 文字ずつをアンダースコアで区切った名前がついており、装置種類名 2 文字の後に、設置位置を表すセクタ名 (A,B,R,C,1,2,3,4,5,6 等)、セクタ内ユニット番号 (1-8 等)、加速管番号 (0-4) または偏向電磁石番号 (0-6)、区間内の番号等の 4 文字までを組み合わせて表現されている。各データベースはこの名前を鍵とした表として作られている。

まず基本情報として、各装置のグループ名、電子銃からの距離、装置の機械長、さらに装置によっては有効長、などがデータベース (eqtbl) に収められている (カッコ内はデータベースの名前)。現在のところ、CAD 図面などとは直接情報を交換する仕組みを用意していないので、ビーム光学計算に影響の小さい情報の更新は遅れがちである。

2.2 電磁石

電磁石電源に関しては、電源ハードウェアを制御するために EPICS の手続きが利用するアドレスやインターロックなどの基本情報と電流値への変換情報 (mgtbl)、電流値と磁束密度の間の変換情報 (mgbtbl)、シミュレーションコードとの磁場の整合性を取るためのファッジ情報 (mgbftbl) などが、データベースに維持されている。電磁石自体については、設置位置や、機械長、有効長さなど (eqtbl) が他の装置とともに管理されている。

このなかで、電流値と磁束密度の間の変換情報、励磁特性は基本的な情報でありながら、各加速器で様々な方法が使用されており統一されていない。例えば、精度を必要とする KEKB リングでは、さまざまな事情により 10 種類近くの交換規則がある。特に磁場の低い場合は電流と比例関係に近いものの、磁場の飽和に近づくときと急激に比例関係から外れるため、その表現が難しい。変換区間を 3 つに分けて、比例区間、2 次関数区間、3 次関数区間とし、それぞれの境界での値と微係数を合致させる方法が係数の数と精度のバランスが良さそうだが、少し手続きが複雑になる。

入射器においては簡略化するために、全ての変換式を電流から磁束密度 (または勾配) への 9 次までの多項式として、設置前に回転コイルを用いて測定している。多項式は飽和部分の表現が得意とはいえないが、入射器で要求する精度には充分と考えている。磁束密度から電流値への逆変換にはニュートン法を用いている。ちなみに、入射器においては、偏向電磁石における 4 極以上などの高次成分は、ビーム光学計算への影響が小さいと考え、オンラインでは使用していない。

また、入射器では電流値をゼロから最大値に変えていく際の励磁特性を用いているが、もしも停電や電源に障害があった際に電流が突然ゼロになるので、ヒステリシス曲線から外れてしまい、消磁操作が必要となる。このことを考慮して、KEKB のビーム・トランスポート・ラインの電磁石では、最大値からゼロに電流値を変えていく際の励磁特性を運転に使用していた。

2.3 マイクロ波源

マイクロ波発生装置においては、ハードウェア制御の基本情報 (klytbl) や印加電圧と発生マイクロ波の出力電力の関係 (acrftbl) が必要となり、通常使用電圧範囲について 2 次式で関係を表している。大電力マイクロ波発生装置は 60 台あり、後に示すように、少し余裕を持ちながら全体で 7 GeV の電子を加速することになる。

半導体の移相器については、位相を変えると振幅が変わるものもあるが、その間の関係をファームウェアに組み込み、振幅が減衰器で補正されるようになっている。逆にほとんどのマイクロ波機器は、振幅を変更すると位相が変わってしまうが、現在のところこの自動補正は行っておらず、今後の課題である。

2.4 加速管

加速管、つまり加速空洞では、設置位置や長さの情報 (eqtbl) とマイクロ波入力に対するビーム最大加速利得の関係 (acrftbl) がデータベースに維持されている。基本的にはマイクロ波入力の平方根に係数を掛けると最大加速利得となる。加速利得を算出する際には、入・出力カプラー・セルの半分で加速するとして計算されている。しかし、現実的な扱いとして、このカプラー部の加速利得は通常セルで加速されたものとして扱っているが、ビーム光学計算への影響は小さい。また、係数の数を減らすために、運転時に使用するデータベースには、マイクロ波パルス圧縮器 (SLED) での電圧利得 1.85 や導波管での減衰も掛け合わせた結果の係数だけを取っている。

SuperKEKB においては、横方向高次モードの航跡場がエミッタンスの増大をもたらす。この対策については、オンラインでの定量的な対応はまだ検討されておらず、バルクな現象論的な対応を考えているため、高次モードについてのオンライン制御情報は整理されていない。

実際のビーム加速利得は、個々の加速管におけるマイクロ波の位相とビーム・バンチで決まることになるが、これについては後で触れる。

2.5 ビーム位置モニタ

ビーム位置モニタ (BPM) についても、設置位置の情報 (eqtbl) と、設置前の測定から割り出した較正係数、及び

ビームを用いて決定した補正量をデータベース (spcaltbl) に維持している。

設置前のマッピング測定では、ビーム電流を模したワイヤを BPM 中で少しずつ移動しながら 4 つの電極の応答が測定されており、水平・垂直方向の対向電極出力差の結合項も含めた 3 次式でビーム位置が表現されるため、それだけでも 20 個の係数を持つことになる^[5]。さらに、設置時にはケーブルの減衰量を含めた 4 電極の測定較正係数が決められる。電荷量については 4 電極の和で表されるので、この 4 電極の係数が重要となる。

設置後には、ビームを用いて補正係数を決定する。電荷量については、ビーム損失が小さいと思われる区間について前後の BPM と値が滑らかにつながるように微調する。ビーム位置については、ビームを使用したアライメント測定によって、四重極電磁石の磁極中央に対する BPM 中央のずれを求め、BPM のデータベースで維持する。

KEKB の後期に用いられた読み出し機構においては、オシロスコープ上に組み込まれた EPICS IOC にデータベースを読み込ませて処理を行わせていたが、SuperKEKB 向けの高精度の読み出し機構では、IOC が処理ボードの FPGA (Field Programmable Gate Array) 上のファームウェア起動時にデータベースを読み込ませて、処理をさせる^[6]。

他にも真空機器の真空度変換係数など、多数のデータベースがあるが、ビーム特性に直接関係しないので説明を割愛する。

3. 入射器の構成

SuperKEKB に向けた入射器は Fig. 1 の構成をしている。まず、全体をセクタに分けて呼んでいるが、加速セクタは 8 つ (A-C, 1-5) あり、約 40 m のセクタ A を除き、他は 80 m の長さがある。一つのセクタには通常 10 m のユニットが 8 つのあり、セクタ番号とユニット番号を合わせて個々のユニットが指定される。

入射器全体は、ビームの運転特性で 4 つの区間に分けられる。各区間では、大電力マイクロ波発生装置が 1 台故障しても運転を継続できるように、エネルギー利得に余裕を持たせてある。また、区間終端でのビームエネルギーを規定する必要がある場合には、区間の後半にエネルギー・ノブが設けられている。エネルギー・ノブは高速移相器をもった 2 台の大電力マイクロ波発生装置から構成され、イベント制御機構を通して 50 Hz のパルス毎にエネルギーを変更可能となっている^[7]。この 2 台の移相方向を Fig. 3 のように逆にするにより、エネルギー拡がりを抑えることができる。

最初の区間は、セクタ A、B の区間となる。この区間

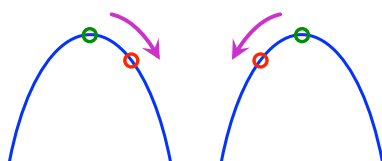


Figure 3: Energy knob to adjust energy from crest phases (green) to operation phases (red) compensating energy spread.

は入射器を延長した際に、敷地境界を避けるために 180 度偏向区間で下流と接続された。KEKB 運転時はこの区間のエネルギーを 1.7 GeV としていたが、大電流時にエネルギー余裕がなかったため、SuperKEKB 向けには 1.5 GeV とすることにした。エネルギー・ノブとしては #B5、#B6 ユニットが用いられる。

次の区間は、セクタ C からセクタ 1 の #15 ユニットにある陽電子標的までの区間となる。陽電子を生成する場合は一次電子の軌道を変えて標的に衝突させ、電子を入射する場合には標的中央から 3.5 mm 脇の孔を通して引き続き加速する。これらの軌道維持のために緩くエネルギーを管理する必要がある。

さらに、陽電子生成装置で生成された陽電子は、セクタ 1 の後半を通り、セクタ 2 の終端からエネルギー 1.1 GeV でダンピングリングに導かれる。この区間のエネルギー・ノブとしては #27、#28 ユニットが用いられる。電子については、次の区間と合わせて連続して加速される。陽電子は、ダンピングリングへのビーム・トランスポート・ライン (LTR) 上では #DN ユニットのエネルギー圧縮装置 (ECS) でエネルギー拡がりを抑え、入射器へ戻るビーム・トランスポート・ライン (RTL) 上では #DS ユニットのバンチ圧縮装置 (BCS) でバンチ拡がりを抑える。

最終区間では、4 つの蓄積リングへの入射エネルギーを達成すべく、セクタやユニットによって、減速させたり、タイミングを外して加速への寄与を止めさせたり (スタンバイ)、切り替えを行う。また、エネルギー・ノブとしては #51、#52 ユニットが用いられる。陽電子は最後に再度 ECS を通る。

4. ビーム・エネルギー管理

上に述べた各入射器区間でのビーム・エネルギーを管理し、ビーム光学計算に利用させるために、ビームと装置の調整条件を決め、さらに各ユニットでのエネルギー利得を推定し、各点でのビームエネルギーを決定する。

4.1 ビームと装置のマイクロ波源の調整

まず各ユニットでの最大エネルギー利得を得るためのマイクロ波条件を探し、EPICS データベースに覚えさせる。位相の決定のためには、KEKB の当初はビーム誘起波の位相測定から決定しようと考えたが、加速管の特性による誘起波の周波数のずれの影響が大きく、断念した。そこで、各区間終端でディスパージョン関数の大きい場所での BPM 測定を位相を横軸にしてプロットして決定することにし、この最大加速位相をクレスト位相と呼んでいる。パルス・タイミングについても、同様のプロットから最適条件を決定する。

上のクレスト位相を基点にして、縦方向の航跡場によるエネルギー拡がりを抑えるために、各区間のビーム電流に応じて位相をずらし (オフ・クレスト)、管理する。さらに、SuperKEKB リングに連続して入射可能な 96 ns 離れた 2 バンチを同じエネルギーで加速するために、マイクロ波パルスの両肩にビームを置くタイミングを決定し、管理する。

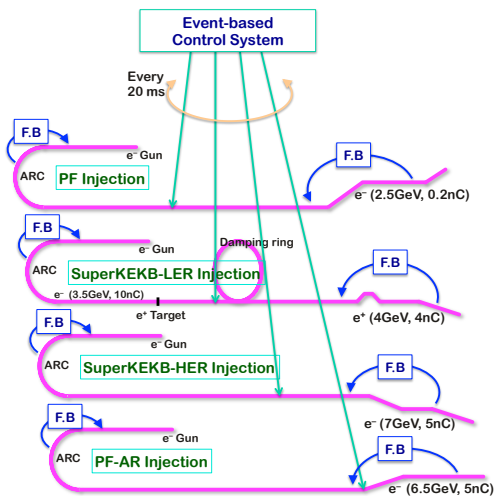


Figure 4: Each virtual accelerator (VA) would be associated with several beam feedback loops, independent of loops in other VAs.

4.2 ビーム・エネルギーの決定

上の調整と並行して、先に述べたマイクロ波や加速管のデータベースを用い、またオフ・クレストによるエネルギー減少分を換算して、各ユニットの最大エネルギー利得を計算して足し合わせる。データベースの精度の限界のため、エネルギーは合致しないが、誤差を各ユニットに比例配分して、各点でのビーム・エネルギーを決定する。

実は各ユニットでのクライストロンの高電圧は、加速管の放電頻度、フィールド・エミッション量、電源の安定度、などにより調整する必要がある。特に、加速管放電により反射 (VSWR) が大きくなると機器を守るためのインターロックにより、電源を一時停止させることになるので、週に一回は全体の見直しを行い最適化する。また、フィールド・エミッションの増大は機器の放射化を増大させるので、細かな電圧調整を行っている。

このような結果を反映させて、ビームライン上の各位置でのエネルギーを正しく評価しなければ、ビーム光学計算の精度に直接影響するので、この処理は重要である [8]。

4.3 エネルギー安定化

最後に、各区間終端でのエネルギーを固定するためにエネルギー・ノブを用いる。ビーム供給先が異なるとビーム電流やオフクレスト位相、縦方向の航跡場も異なるのでノブの動作点は異なる。また最後の区間では入射エネルギーも異なる。このため、一つの入射器を4つ (5つ) の仮想加速器と考え、イベント制御機構により 20 ms 毎に切り替えているように扱うことになる。実際、加速器装置のうち 200 ほどの動作点を仮想加速器間で変更するので、全く別の扱いをしなくてはならない [9]。

それらの仮想加速器の各区間終端に対しては、Fig. 4 のように、それぞれ独立のエネルギー安定化フィードバック・ループを働かせることになる。同様に SuperKEKB の HER/LER 入射では、パルスタイミングを調整することにより、パルス内 2 バンチのエネルギー平滑化するフィードバック・ループが必要となる。これらはデイス

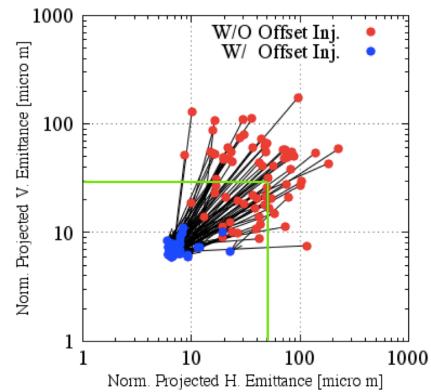


Figure 5: Recoveries (blue) of blow-up emittances (red) with adjusted initial beam positions and angles.

バージョン関数の大きい場所での BPM 測定に対して、エネルギー・ノブやタイミングを操作させることになる [10]。

5. 軌道とエミッタンスの管理

KEKB 運転時には、入射器のアライメント精度の限界があり、ビーム損失を起こさないような軌道維持に注意が払われた。特に運転開始時にはまだ安定でない機器や、空調の使い方などにより、多数の軌道安定化フィードバック・ループが必要とされた。

SuperKEKB に向けては、エミッタンスの増大を抑えるためにさらに精度の高い軌道制御が必要となる。加速管や四重極電磁石のランダムなアライメント・エラーを含めたシミュレーションによると、エラーの標準偏差を近距離で 0.1 mm、全体的には 0.3 mm に抑えることができると考えられている。その際には Fig. 5 のように、縦方向のパンチ変形を打ち消すような軌道の選択を行う [11, 12]。そのために、偏向コイルの角度精度、1 μ rad の精度が必要と考えられており、その軌道の観測のために 10 μ m 以下の精度の BPM 読み出しを準備をしている [6]。

この軌道を維持することができれば、エミッタンスも維持できる可能性がある。例えば、KEKB の際に行っていたように、入射器の複数箇所において軌道の角度と位置を固定するような軌道安定化フィードバック・ループを用意し、エネルギー安定化の場合と同様に、SuperKEKB HER 入射と LER 入射の仮想加速器それぞれに対して独立に働かせれば良いと考えられる。この機構を柔軟に運用するためにはビーム光学計算に利用するデータベースの品質向上が必要となる。

しかし、既に建物の繋ぎ目や床が日変動や年変動していることが長期の測定でわかってきているので、アライメントの連続測定機構、及び床変動を吸収し加速機器の位置を一定に保つ架台機構、そしてビーム操作技術の確立を目指している。また、これらを継続的に行うことができる運転プログラムの設計が必要となる。

また、横方向のエミッタンスだけでなく、縦方向のエネルギー拡がりの管理も必要で、ビームパンチ形状を測定して、ビーム生成とパンチ圧縮を整合性をもって実現しなくてはならない [13]。

6. データベースの実装と運転ソフトウェア

6.1 データベースの構成

KEKB 計画においては、各データベースは、列方向に機器の特性情報を並べ、行方向に機器の名前を鍵とした情報を持つ表のテキスト・ファイルとして構成されており、その最初に各特性の名前と各特性の読み方、例えば、文字列であるとか、倍精度浮動小数点数であるとか、が決められた様式で書かれている。さらに任意の行にコメントを書くことができ、単位などの関連情報や履歴などが書かれている。

これらのデータベースを扱う手続きが、いくつかのプログラミング言語に用意されており、C 言語の場合はデータベースがメモリ上のハッシュデータベースに変換され、高速に利用することができる^[14]。また、管理用にデータベースの整合性確認用のプログラム等を用意していた。データの件数が多いわけでは無く、更新の機会も頻繁では無いので、大きな不自由はなかった。しかし、データベースによって、数百から数万の件数があり、新しい言語への対応や、更新履歴の管理など、資源に余裕があるならば改善も期待されている。

既に、PostgreSQL などのデータベース管理システムを複数の目的に使用しているの、加速器特性データベースも PostgreSQL で管理することが自然と思われ、現在その実装を検討中である。しかし、リングの制御においては、最近 Oracle からテキスト・ファイルへ移行しており、その得失にも注意を払っている^[15]。

各機器の処理手続きについて、古い制御システムでは個々の機器やグループの機器をオブジェクトのように扱えるように努力していたが、EPICS では全ての機器の全ての特性が同等に扱われ、操作についての考え方の変更を求められる。しかし、EPICS 変数の名前付けの規約を統一していれば、むしろ運転操作プログラムの作製に障害は小さいと考えている。

6.2 データベースの作製と利用

データベース自体の更新は、各機器担当者が維持している情報から自動的に更新することを目標としているが、実際には運転情報から変更を求められたり、短期間だけの変更などもあり、むしろ更新履歴の管理の重要性を感じている。また、運転時に更新された EPICS データベースを永続化させる場合に、元のデータベースにも反映させる仕組みが求められている (Fig. 2)。

ビーム光学計算を行う場合には、以前は XSIF (Extended Standard Input Format) を使用するソフトウェアもあり、XSIF のラティス・ファイルを自動生成することもあった。しかし、現在は、ビーム制御に SAD/SADscript^[16]を使用することが多いので、ビームラインの幾何学的情報をデータベースから静的に作っておき、加速機器のパラメータは EPICS 変数から CA プロトコル経由で取得することが多い。

これらの計算結果を用いて、電磁石のファッジ情報 (mgfbitl) やビーム位置補正量データベース (spcaltbl)、マイクロ波やタイミングの基準値情報などが修正され、データベース上に反映される必要がある。この部分は個々の運転プログラムや手動手続きに委ねられており、さらに履歴記録や誤りを防ぐ仕組みについて、今後統合的な扱いが求められている。

7. まとめと今後

電子陽電子入射器におけるビーム特性の達成と管理について、データベースの構築を絡めて考えてみた。特に SuperKEKB については、高度なビーム品質の達成と複雑な仮想加速器 (ビーム運転モード) の実現のためには、静的なデータベース、ビーム測定を基にした較正、各仮想加速器でのビーム光学モデルの改善・確立とビームの安定化、要求されるエミッタンスとエネルギー拡がりの維持など、階層的で確実な運転管理が求められる。このような機構の構成要素は既に準備されつつあるが、具体的な実装において検討すべき課題も多い。KEKB での経験を活かしながら、今後の SuperKEKB に向けた高度化を図りたい。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A011.
- [2] X. Zhou, “Present status of the KEK electron/positron injector linac”, *these proceedings for PASJ 2015*, Tsuruga, Japan, 2015.
- [3] K. Furukawa *et al.*, “High-intensity and low-emittance upgrade of 7-GeV injector linac towards SuperKEKB”, *Proc. IPAC’13*, Shanghai, China, 2013, pp.1583-1585.
- [4] EPICS: <<http://www.aps.anl.gov/epics/>>.
- [5] T. Suwada *et al.*, “New data-acquisition system of beam-position and wall-current monitors for the KEKB injector linac”, *Proc. APAC’98*, Tsukuba, Japan, 1998, pp.531-533.
- [6] F. Miyahara *et al.*, “High position resolution BPM readout system for KEK e+/e- linac”, *these proceedings for PASJ 2015*, Tsuruga, Japan, 2015.
- [7] A. Akiyama *et al.*, “Accelerator control system at KEKB and the linac”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2013**, 2013, 03A008.
- [8] Y. Ohnishi *et al.*, “Design and Performance of Optics for Multi-energy Injector Linac”, *Proc. LINAC’08*, Vancouver, Canada, 2008, pp.413-415.
- [9] K. Furukawa *et al.*, “Beam feedback system challenges at SuperKEKB injector linac”, *Proc. ICALEPCS’13*, San Francisco, USA, 2013, pp.1497-1500.
- [10] K. Furukawa *et al.*, “Beam feedback systems and BPM readout system for the two-bunch acceleration at the KEKB linac”, *Proc. ICALEPCS’01*, San Jose, USA, 2001, pp.266-268.
- [11] L. Zang *et al.*, “KEKB linac wakefield studies of comparing theoretical calculation, simulation and experimental measurement”, *Proc. IPAC’11*, San Sebastian, Spain, 2011, pp.739-741.
- [12] S. Kazama *et al.*, “Emittance preservation in SuperKEKB injector”, *these proceedings for PASJ 2015*, Tsuruga, Japan, 2015.
- [13] M. Yoshida *et al.*, “Longitudinal manipulation to obtain and keep the low emittance and high charge electron beam for SuperKEKB injector”, *Proc. IPAC’13*, Shanghai, China, 2013, pp.1337-1339.
- [14] Tb2Lib library functions: <<http://www-linac.kek.jp/cont/libinfo.html#tb2>>.
- [15] T.T. Nakamura *et al.*, “Application of a simple text format as a device configuration file”, *Proc. ICALEPCS’09*, Kobe, Japan, 2009, pp.432-434.
- [16] N. Akasaka *et al.*, “Operation software for commissioning of KEKB linac programmed with SAD”, *Proc. APAC’98*, Tsukuba, Japan, 1998, pp.495-497.