

# 制御システムと加速器運転

古川 和朗\*<sup>A)</sup>、上窪田 紀彦<sup>A)</sup>、佐藤 政則<sup>A)</sup>、諏訪田 剛<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1 - 1

## 概要

次世代の高エネルギー実験や放射光実験においては、超高輝度、高安定の粒子ビームの加速が重要になり、特にリニアコライダーや大強度陽子加速器、高輝度 X 線 SASE FEL 装置などでは、線形加速器の重要性が高まってくる。線形加速器においては、円形加速器のように自己安定化の機構が存在しないために、加速器の構成要素の性能がそのままビームの質、ひいては実験結果の精度に影響するようになる。そのような中で、KEKB 入射器の制御運転システムを例にして、加速器の制御システムが果たす役割を考える。

### 1. はじめに

KEK の電子陽電子入射器では、600m にわたって分散配置された装置約千台 (信号数約一万点) を総合的に監視・制御することで高品質なビームを生成し、KEKB リングへは 8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を、PF リング及び PF-AR リングへ 2.5 GeV または 3 GeV の電子をそれぞれ入射している<sup>[1]</sup>。リングにおける実験効率を向上させるために、入射ビームにも高い安定度が要求され、長期間にわたる高安定なビーム加速を実現するためのさまざまな機構が導入されている<sup>[2]</sup>。

このような大型加速器は寿命が長い上に、運転開始後も極限まで性能を高める必要があるために、制御系にも機能拡張が可能となるような柔軟性が求められる。また、加速器モデルと現実の加速器を対比しながら運転できるような仕組みも必要となる。もちろん、加速器を長期間安定に運転するために、その信頼性・可用性も重要である。

### 2. 加速器の制御

加速器の制御は加速器の特性によって大きくは変わらないが、その構成技術が、一般の加速器構成機器に比べて進歩の激しい技術に依存している部分が多い。また、技術の進歩に伴って加速器制御に対する考え方も変わるため、過去に大きな変化を遂げてきた。そして、その重要度は増してきていると思われる。

加速器の制御の目標は、信頼性が高く、かつ柔軟な制御処理の機構を‘道具’として加速器に提供するところにある。通常、そのために複数のサブシステムを統合して、全体の制御システムを構成することになる。このような制御システムの概略の構成は例えば図 1 のようなものとなり、また、基本的な機能としては次のようなものが挙げられる。

- グラフィカルオペレーターインターフェース
- 実時間処理により加速器の性能を高める機能
- 加速器のモデリングやシミュレーションを行える環境
- 問題解決のための制御処理の迅速な追加機構
- 個々の機器の間や時間との間での情報の相関解析
- 予期しない事態に対するアラームの機能

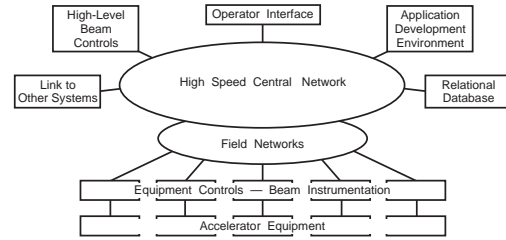


図 1: 典型的な制御システムの構成

- 関連施設設備との適当な情報交換共有の手段

線形加速器の制御を考える際には、リング型加速器のようなビームの自己安定化の仕組みがないために、制御システムは必ず必要になる。また通常、線形加速器はパルス運転されるので、パルス毎の処理の可能性も考慮しておかなくてはならない。直線的に長いということが、装置に対して制限を与える場合もある。リング型加速器ではひとつの電源が複数の電磁石に接続されるなど、装置と名前の対応が複雑になりがちだが、線形加速器ではそれぞれの場所でエネルギーが異なることもあり、名前付けは比較的単純となる。しかし、そのエネルギーの測定が困難であることから、正確なモデリングも困難になる場合が多い。

### 3. KEK 電子入射器の制御の概要

KEK 電子入射器の制御システムでは、1993 年に更新が実施されて<sup>[3]</sup>、その後毎年改善されてきている。Unix 計算機をサーバとして現場の装置コントローラを統括するシステムになっており、それらの間の通信に TCP や UDP を元にした独自開発の RPC (Remote Procedure Call) を使用している。全体の模式図を図 2 に示す。

その設計においては、前節に述べたような要求を満たすように、簡単な条件をおいた。つまり、

- できるだけ国際標準や業界標準の規格を採用する。
- 現場の装置コントローラは TCP/IP ネットワークに接続できることとする。

前者は、柔軟性や拡張性を維持するために重要と考えられ、また将来の更新を容易にすると期待される。後者は、以前は重視されていた統一された装置コントローラをやめることを意味するが、あとで述べるようなソフトウェア構成によって、装置に応じて、また最新の技術を利用しながらコントローラを選択できることになる。

### 4. 運転ソフトウェアとビーム制御

#### 4.1 運転用アプリケーションソフトウェア

このような制御システムを基礎として、1997 年に KEKB 入射に向けたコミッショニングが開始されてからは、さまざまな運転用アプリケーションソフトウェアが構築されてきた<sup>[4]</sup>。それらの運転用ソフトウェアは主に、Tcl<sup>[5]</sup> または SADscript<sup>[6]</sup> というスクリプト

\* <kazuro.furukawa@kek.jp>

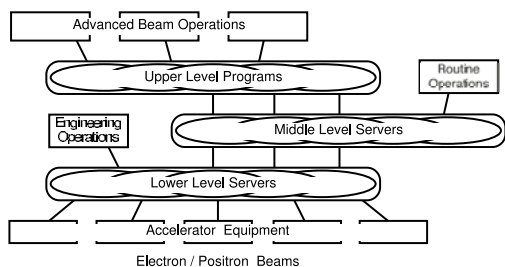


図 2: 入射器制御システムの処理の論理的な構成

言語で記述され、X-Window の画面上で操作が行なわれている。その数はビームスタディや測定用のソフトウェアを含めて登録されているものだけで 150 ほどになっている。それらの例を図 3 に示す。

- ビーム位置モニタのビームによる較正
- ビーム位置モニタのビームによる精度評価
- 加速装置との対応付けをしたビーム軌道表示
- ワイヤスキャナ上のビームの表示
- ビームロス表示
- エネルギーアナライザでのエネルギー分布の表示
- エネルギー安定度の表示
- 能動的または受動的な相関プロットと統計解析
- 能動的及び受動的な各種パラメータの相関プロット
- バンチャ部シミュレータ
- ビームオプティクス表示
- Q-スキャンやワイヤスキャナによるエミッタンス測定及びオプティクスマッチング
- Isochronous で Achromatic な Arc 部の評価と補正
- 繰り返しによるビーム軌道補正
- ローカルバンプによるウェイク場の補正
- ビームモード切り替え
- Arc 部や終端部でのビームエネルギー安定化
- 多数の場所での軌道安定化
- Downhill Simplex によるビームの最適化

## 4.2 KEKB 入射器の安定化

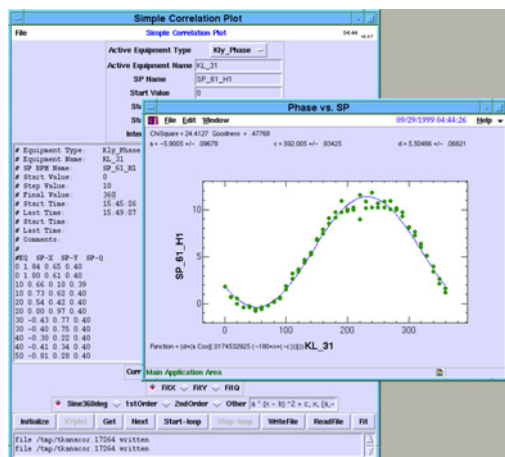


図 3: 相関プロットの例。さまざまな機器の情報の中でプロットを作ることができ、また、関数を選んで最小二乗法によるフィットが行える。

KEKB 入射器の定常運転が始まると、高品質のビームの再現性の問題が重要となってきた。場合によって微妙な運転パラメータの調整を必要とし、時間がかかる上、だれでも調整できるわけではなかった。解析を進めるうちに、気温、水温などの環境の変化、ビームモード間で 10 倍以上異なるビーム特性の切り替え、意識的に変化させた他の運転パラメータ、などの要因に対して、各機器のパラメータの設定値からのずれが設計したときの許容値よりも大きい場合があることが指摘された。そこで、各パラメータの、ビームに対する変動の許容度が詳しく調べられ、パラメータ設定の際にその許容値を満足させるための方法が検討された。

例えば、コミショニングは当初、通常運転とは別に部分的に行なわれたため、一部の電磁石は初期化が行なわれなかったり、消費時間を無視して消磁が行なわれたりした。しかし、実際の切り替え運転では限られた時間内に許容値内の磁場の設定が必要となるので、効率的な初期化の方法が開発されることになった。また、数多くの操作の中での単純な操作誤りに気付かず、問題の解析を困難にしている場合もしばしば見受けられたので、ソフトウェアで自動化することによってできるだけ避けることにした<sup>[7]</sup>。個々の機器の再現性の向上で対処できずに残ったビームの変動は、ビームを使ったエネルギーや軌道の安定化フィードバックで対処することとした<sup>[8]</sup>。

## 4.3 ビーム運転ソフトウェアの効果

これらのソフトウェアはスクリプト言語で記述されているため、更新が容易で、しばしば運転中にも更新が行なわれる。また、他の運転用ソフトウェアと基本操作部分をライブラリルーチンとして共通化し、統一された操作環境が提供されている。

ビームモード切り替えソフトウェアによる自動化によって、一日あたり約 50 回のビーム切り替えも問題無く対応できるようになった。KEKB の蓄積ルミノシティに対して重要な切り替え時間も通常 1 分程度になっている<sup>1</sup>。

また、ビームフィードバックループを使用することによって、ビームの変動を長期間(6 時間程度)のものは 5 分の 1 程度に、短期間(1 分程度)のものは約半分に減少させることが可能になり、また、加速器の異常を発見するための指標にもなっている。

## 5. 今後

### 5.1 ビームオプティクス

現在の入射器においてもまだまだ解決すべき問題は多く、特に大電流であることによるウェイク場の効果もあって、ビームオプティクスはなかなかモデルと一致しない部分も多い。しかし、加速勾配や磁場強度に使われる較正係数などの誤差の積み重ねも影響している可能性も否定できない。これらの誤差を押さえ込むために、入射器の部分ごとにビームを使った評価を今まで以上に進める必要があると思われる。

### 5.2 EPICS 環境の利用

さまざまな加速器制御のための機構が実装されてきたが、特に蓄積情報などの高速処理についてはまだまだ

<sup>1</sup>主に電磁石の初期化の時間

要求が多い。このような分野については、他の加速器においてもいくつかの実装が進んでおり特に EPICS のコミュニティにおいて協力して環境を作ろうとする動きが活発である。そのような状況をふまえて、EPICS について考えると、入射器の制御システムも徐々に EPICS の利用領域を増やしていく必要がある。それを補強する要因は他にもある。

- 既設の EPICS 環境に対するゲートウェイ<sup>[9]</sup>
- ゲートウェイの活用により、アプリケーションからは入射器全体が EPICS に見える
- KEKB リングとの現在以上の緊密な運転体制
- 履歴表示ソフトウェアなどの共通化
- EPICS による入射器内ワイヤスキャナの運用実績
- 入射器内と同種コントローラの EPICS ドライバの開発<sup>[10]</sup>

このように制御システムの最上位のアプリケーションソフトウェアと下位層の装置コントローラのソフトウェアは部分的に EPICS に移行することが可能となっている。これを進めることで、EPICS コミュニティで開発されたアプリケーションソフトウェアがそのまま利用できる。当面、このような仕組みによって、蓄積情報の処理の高速化を期待している。

### 5.3 高速同期処理

KEK の電子入射器の将来計画として期待されているのが、現在の KEKB のルミノシティを 10 倍引き上げる SuperKEKB 計画である。その計画では現在以上に入射器の役割が重要になる。制御システムとしても新しい装置に対応するなどのこれまで同様の機能拡張の他に、いくつか検討しておくことがある。

現在の入射器では、主にビームポジションモニタ (BPM) の読み出しシステムの制限から、ビームフィードバックなどは一秒に一回しか動作できない<sup>[11]</sup>。しかし、試験的なビームの安定度の評価からは、50Hz まで重要かどうかはわからないものの、10Hz 付近に変動要因があることが見つかっている。入射器の安定度を高めるためには、より長期の変動への対策とともに、このような高速のビームフィードバックが重要になると思われる。もしダンピングリングが導入された場合には、大電流のビームの入射、出射のために、50Hz のフィードバック動作も必要になると思われる。

このような高速のエネルギー、軌道のフィードバックシステムは、上流から下流に向かって干渉するので、その相互作用を正しく評価しなくてはならない。そのため、入射器全体のビームフィードバックシステムをビーム繰り返しの 50Hz で同期して動作させる必要がある。さらに、50Hz で動作する低レベル rf システム、キッカー、データ収集システムなどを用意する必要もある。

そのようなシステムは SuperKEKB だけでなく、現在の入射器にも有効であると思われるので、その試験も始まっている。可能であれば、軌道やエネルギーだけでなく、エミッタンスやエネルギー幅の安定化も最終的な実験の効率には寄与が大きいと思われ、検討しているところである mycitesatoh-daq。

### 5.4 間欠ビーム測定

現在は、項目によって一日から一週間に一度、入射の無い時間帯に、rf のフェージングや、ビームオプティク

スの再マッチングなどといった調整作業を行って、入射器の長期安定性を維持している。しかし、SuperKEKB においては連続入射が行われるため、このような作業の時間が確保できなくなる。

そこで現在検討しているのは、ビームパルスのうち一部だけ、例えば、1 秒に 1 パルスだけを選び、測定や調整に使用する方法である。そのように選ばれたビームパルスはリングに入射されないように、ビームトランスポートの最後でビームダンプにけり出す必要がある。パルスを区別して加速器を多重に運転することになるので、パルスモジュレーションとか仮想加速器と呼ぶこともできる。

このような測定のためにも前項で上げた高速同期処理が使われ、また、調整の対象となる装置は 50Hz で動作する必要がある。連続入射が現在の KEKB でも有効なので、このような間欠測定システムも早くから導入できた方が好ましい。

## 6. 終わりに

加速器の制御システムは、加速器内の装置、ビーム物理、ビーム運転など、全ての要素と関わりを持っているために、今後高度になる加速器ではさらに重要性が高まると思われる。それに伴って解決しなくてはならないことが多く現れると思われるが、加速器の要求仕様を見失わず、ひとつひとつ問題を解決できるような制御システムを構築して、要求に答えていきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] I. Abe, *et al.*, “The KEKB Injector Linac”, Nucl. Instrum. Meth. A **499**, 2003, p.167.
- [2] T. Suwada *et al.*, “Present Status and Beam-stability Issues of the KEKB Injector Linac”, Proc. PAC2001, Chicago, USA., 2001, p.4083.
- [3] N. Kamikubota *et al.*, “New Control System with VME and Workstations for the KEK  $e^-/e^+$  Linac”, Nucl. Instrum. Meth. A **352**, 1994, p.131.
- [4] K. Furukawa *et al.*, “Accelerator Controls in KEKB Linac Commissioning”, Proc. ICALEPCS99, Trieste, Italy, 1999, p.98.
- [5] <URL: <http://www.tcl.tk/>>
- [6] <URL: <http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>>
- [7] K. Furukawa *et al.*, “Beam Switching and Beam Feedback Systems at KEKB Linac”, Proc. LINAC2000, Monterey, USA., 2000, p.633.
- [8] K. Furukawa *et al.*, “Energy Feedback Systems at the KEKB Injector Linac”, Proc. ICALEPCS99, Trieste, Italy, 1999, p.248.
- [9] K. Furukawa *et al.*, “Integration Feasibility of the Existing Linac Control System and Ring EPICS System at KEKB”, Proc. ICALEPCS95, Chicago, USA., 1995, p.863.
- [10] K. Furukawa *et al.*, “Implementation of the EPICS Device Support for Network-based Controllers”, Proc. ICALEPCS2001, San Jose, USA., 2001, p.197.
- [11] 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.
- [12] M. Satoh *et al.*, “非破壊型ビームエネルギー広がりモニタのデータ収集システム”, *these Proceedings*.