BEAM SWITCHING AND BEAM FEEDBACK SYSTEMS AT THE KEKB INJECTOR

K. Furukawa*, and N. Kamikubota
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
Oho 1 – 1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The KEK electron linac provides beams to four downstream rings with quite differnet beam characteristics. For KEKB injections, fast, as well as reliable, switching between electron and positron beams is crucial for physics experiment results, In order to switch linac beam modes reliablly a flexible software was build. About 20 beam feedback loops per a beam mode were also installed to stabilize each beam mode. These software systems are used to switch beams about 50 times a day, and are indispensable to achieve high quality beams.

KEK 電子リニアックのビーム切り替えとビームフィードバックシステム

1. はじめに

高エネルギー物理学研究所の電子・陽電子線形加速器は 1997 年秋から KEKB リングのコミッショニングのための運転を行なっている。その運転においては、高電荷、高エネルギーのビームをリングに入射しなければならないが、大きく異なる主な 4 つのビームモード (KEKB e^+, KEKB e^-, PF-Ring, PF-AR) それぞれの再現性と安定性がたいへん重要であることが、しだいに認識されるようになってきた。

そのため、ビーム切り替えとビームフィードバックのためのソフトウェアが KEKB 入射器コミッショニングの中で開発されてきた。

2. KEKB 入射器と制御系

KEK 電子入射器では、KEKB 計画のために 8-GeV (1.28-nC/bunch) 電子及び 3.5-GeV (0.64-nC/bunch) 陽電子の直接入射、という厳しい条件を満たすために改造が行なわれ [1]、1997 年から始まったそのコミッショニングにおいても数々の困難を克服しながらデザインを上回るような成果を達成している [2]。その結果、B-Factory 物理実験のルミノシティも日々向上している。

このような大強度、高性能な入射器の運転を支えるために、制御系にも改善が施されている。入射器の制御系は、基本的には 1993 年の制御系の更新時の方針に従って、階層化された多数の要素から構成されているが [3]、KEKB で導入された新しい装置のための拡張が行なわれ、さらに安定した信頼性の高い運転を実現するために、制御機器や計算機、ネットワーク、ソフトウェアの質を高める努力が払われてきた [4, 5]。

1997 年にコミッショニングが開始されてからは、この制御系の上にクライアントソフトウェアとして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 [6]。それらの運転用ソフトウェアは主に、Tcl 言語 [7] または SADscript[8] というスクリプト言語で記述され、X-Window 上の Tk ウィジェットを用いて画面上で操作が行なわれる。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 100 を超えている。

3. KEKB 入射器のコミッショニング

KEKB 入射器のコミッショニングを開始したころは、3.5 GeV 陽電子発生に使われる 10 nC の一次電子の安定な加速のために努力が払われ、数々の技術改良により、これを達成することができた。

しかし、さらに実際の運転が近づいてくると、高品質のビームの再現性の問題が重要となってきた。同じビームを別の時間に再現しようとすると、 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、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、コミッショニングは当初、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た。具体的には、励磁特性を測定したときと同じ、ゼロと最大値の間の電

* kazuro.furukawa@kek.jp

流設定ループを一度だけ回るように設定を行なうこととした。

これらの他に、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。それらは、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。

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フィードバックで対処することとした [9]。

4. ソフトウェア

このように、運転を自動化するためのコミッショニング・ソフトウェアの必要性が高まり、それまで主にスタディ用に個々の機能ごとに用意されていたソフトウェアをできるだけ統合し、常時使用できるような形に整えてきた。

4.1. ビーム・モード ・スイッチ

上に述べたように、4 つのビームモード間の切り替えにおいては、各加速器機器のパラメータの再現性と信頼性が重要である。パラメータ切り替えのために用

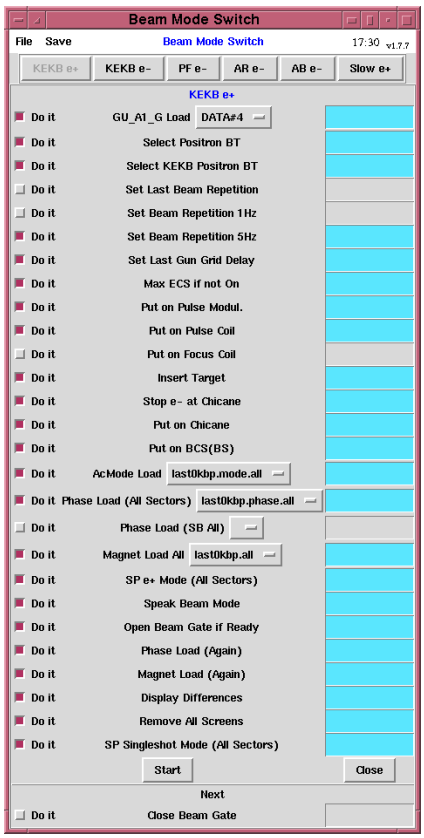

図 1: ビームモード スイッチパネルで、KEKB e^+ がを指定した状態。左の Check-button で項目の選択、非選択を変更でき、また Pull-down menu でパラメータファイルを選ぶことができる。右端は実行状態を表す。

意されたソフトウェアは、現在では以下のような切り替え項目を持っている。

- 電磁石の簡易初期化
- 電磁石のパラメータ (主に電流値) 設定
- rf のパラメータ (主に位相値) 設定
- トリガのパラメータ (主にタイミング) 設定
- 電子銃のパラメータ設定
- 陽電子ターゲットとシケインの操作
- ビームモニタの測定モードとダイナミックレンジ切り替え
- ビームプロファイルモニタの操作
- 初期ビーム繰り返しの設定
- ビームトランスポートラインの選択
- 下流の加速器の制御系への通知
- 制御室での音声の発生
- 機器の状態、パラメータの差分表示と記録
- 各ビームモードのフィードバックの再起動

各項目は、オペレータの判断でいつでも画面上で選択、非選択を変更でき、さらにその状態を保存しておくことができる。また、新しい項目の追加は簡単なデータベースの変更によって行なうことができる。もしも制御系を通しては回復不可能な障害が起こった場合には、その旨が画面上に表示、記録され、障害が取除かれた時にオペレータが再試行することができる。

パラメータ設定と記した部分は、直前の同じビームモードで使用したパラメータを通常使用するが、固定のパラメータをオペレータの判断で選択することも可能になっている。これらのパラメータはフィードバックや手動の調整で毎回異なっており、全て記録を残しており、また再使用が可能である。

電磁石の初期化については磁場の再現性、急激な変化に対する電磁石電源の許容度、AC 電源容量、通信時の誤り率と制御系の下位層、上位層での再試行、切り替えソフトウェア側での再試行、などについて繰り返し試験が行なわれ、改良されてきているが、もっとも時間を消費する部分でもあるので、現在も改善が進められている。

4.2. フィードバック

現在使用されているフィードバックは、ビームには直接依存しない加速器機器 (もちろんビームはその機器に依存する) のフィードバック、ビームエネルギーのフィードバック、そしてビーム軌道のフィードバックに分類される。それらの基本的なソフトウェアは共通になっていて、以下のような部分から構成されている。

- ビームモードやビーム電流などの条件の確認

- モニタ値の取得、時間移動平均、許容範囲の確認、その他の特別に指定された後処理
- 変換係数とフィードバックゲインを適用したフィードバック量の計算、許容範囲の確認
- 許容範囲の確認、特別に指定された前処理を施した値のアクチュエータへの設定
- 全体の制御とグラフ表示、記録、他のプログラムとのインターフェース

例えば、エネルギーフィードバックでは、分散の大きい場所でのビーム位置をモニタとして使い、(エネルギー幅を増大させないように) 2 台のクライストロンの rf 位相を逆方向に変更する操作をアクチュエータとして利用する。また、軌道フィードバックでは、1 ベータトロン波長内でのビーム位置の重み付き平均をモニタ値として使用する。

ビームのフィードバックはビーム位置モニタが 1Hz で読み出し可能なので、ソフトウェアの繰り返しはほぼ 1Hz で、振動を避けるためにゲインは低めで動作させている。

現在では、エネルギーフィードバックが 6 ヶ所、軌道フィードバックが 30 ヶ所、機器のフィードバックが 6 つ、常時使用されている。また、多数のフィードバックを管理するために、フィードバック状態表示やフィードバック記録のビューワなどのソフトウェアも用意されている。

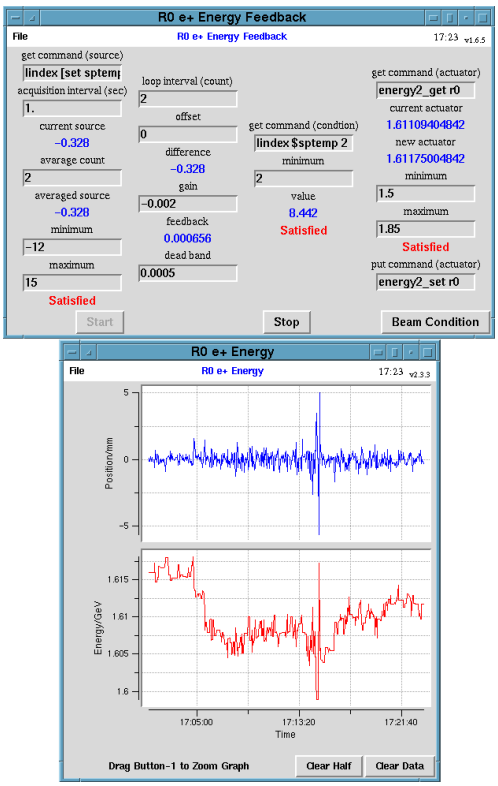

図 2: フィードバックの例として、R セクタのエネルギーフィードバックの設定パネルとグラフ。運転時であってもフィードバックの設定パラメータは簡単な前処理、後処理を含めて変更可能で、また、ソフトウェアのほとんどの部分は他のフィードバックと共通となっている。

5. 考察とまとめ

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は開発当初は毎日のように、また現在でも頻繁に改良が加えられ、信頼性が高まっている。この自動化によって、一日あたり約 50 回の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 2 分以下になっている。

また、上記のフィードバックを使用することによって、加速器の状態や場所などにもよるが、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できた。また、オペレータの操作を必要とせずにモード切り替え後も高品質なビームの維持が可能になった。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。

これらのシステムによって、下流の加速器、特に KEKB Belle の実験効率に大きく寄与している。

参考文献

[1] A. Enomoto, “Upgrade to the 8-GeV Electron Linac for KEKB”, Proc. LINAC’96, Geneva, Switzerland, 1996, p.633.

[2] Y. Ogawa and Linac commissioning group, “Commissioning Status of the KEKB Linac”, Proc. PAC’99, New York, U.S.A., 1999.

[3] K. Furukawa *et al.*, “Upgrade Plan for the Control System of the KEK e^-/e^+ Linac”, Proc. of ICALEPCS91, Tsukuba, 1991, p.89.

[4] K. Furukawa *et al.*, “Improvement of the KEK Linac Control System towards KEKB”, Proc. of 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokyo, 1996, p210.

[5] T. Obata *et al.*, “Reliable Controls with Diskless VME Computers at KEK Linac”, these proceedings.

[6] K. Furukawa *et al.*, “Accelerator Controls in KEKB Linac Commissioning”, Proc. of ICALEPCS99, Trieste, Italy, 1999, p.98.

[7] URL:http://dev.ajubasolutions.com/

[8] URL:http://www-acc-theory.kek.jp/sad/sad.html

[9] K. Furukawa *et al.*, “Energy Feedback Systems at the KEKB Injector Linac”, Proc. of ICALEPCS99, Trieste, Italy, 1999, p.248.