

BEAM POSITION FEEDBACK AND AUTOMATIC PHASING OF SPring-8 LINAC

Kenichi Yanagida*, Takao Asaka, Hideki Dewa, Hirofumi Hanaki, Toshiaki Kobayashi,
Akihiko Mizuno, Shinsuke Suzuki, Tsutomu Taniuchi, Hiromitsu Tomizawa,
Japan Synchrotron Radiation Research Institute
1 - 1 Kouto 1 chome, Mikazuki-cho Sayo-gun, Hyogo-prefecture, 679-5198

Abstract

Application programs for automatic operation were developed in the SPring-8 linac. They correct or tune the linac parameters automatically. One program controls current of steering magnets to stabilize beam positions in a non-dispersive section. This also controls a phase shifter of energy compression system to stabilize a beam position in a dispersive section. The other program searches the optimum phase of each klystron to maximize beam energy at a chicane dispersive section.

SPring-8 線型加速器の自動ビーム位置補正及び自動位相調整

1. はじめに

SPring-8 線型加速器では、平成 12 年度に 30 台の非分散部用ビーム位置モニタ (BPM)、信号処理回路及びデータ収集を行う制御系機器を設置し、制御室からビーム位置を観測することが可能となった。非分散部用 BPM の断面形状は $\phi 32\text{mm}$ の円形で、ピックアップはストリップラインである。ストリップライン長は 27mm で、加速 RF 周波数 (2856MHz) の $1/4$ 波長に近い値としている^[1]。信号処理回路には検波素子として対数検波増幅器 (AD8313、ANALOG DEVICES) を使用しており、信号をデジタルデータに変換した後、制御系機器へ出力している^[2]。

平成 15 年度には 11 台の分散部用 BPM、信号処理回路及び制御系機器を増設し、分散部でのビーム位置が観測可能となった。分散部用 BPM の断面形状は $62 \times 30\text{mm}$ の楕円である。さらに同年度には、高速で且つビームショットと同期してデータ収集を行うデータベースの運用が開始された。これ以降、若干の取りこぼしはあるが、原則として全ショットのビーム位置データがデータベースへ蓄積されることとなった。

SPring-8 蓄積リングに於いて、平成 16 年 5 月以降利用運転はトップアップ運転で行なわれている。そのため、線型加速器では様々な対応・取り組みが成されてきた^[3]。本研究ではトップアップ運転への対応として開発された、軌道安定化・運転自動化のプログラムとその成果について報告する。

プログラムの一つは、自動ビーム位置補正であり、1ヶ月以上に亘る長期連続運転中のビーム位置変動(ドリフト)を抑制することが主目的である。もう一つは、自動位相調整で、長期連続運転中に各クライストロン移相器位相を最適化することが目的である。勿論、双方共にマシン立ち上げ時のビーム調整に使用することも可能である。

2. 自動ビーム位置補正

2.1 配置

線型加速器に於いてビーム位置を補正するため、1 台の BPM に対しその直近上流に少なくとも 1 台のステアリング電磁石が配置されている。1 台のステアリング電磁石では 1 台の BPM でのビーム位置補正のみが行なわれ、ビーム角度は補正出来ない。そこで、ビーム位置及びビーム角度双方を補正出来るように、ドリフトスペース中に 2 台の BPM を置き、その上流に 2 台のステアリング電磁石が置かれるセクション(軸調整セクション)が線型加速器設計当初から 3 カ所設定されている。それらは、ビームエネルギー 60MeV 程度の入射部セクション、シンクロトロン (Sy) へ振り分ける偏向電磁石手前の LSBT セクション、ニュースバル蓄積リング (NS) 施設側との境界付近側である L4BT セクションである(図 1 参照)。LSBT セクションと L4BT セクションの間にはビーム電流調整用に垂直方向スリットが設置されている^[3]。スリット幅は $\pm 0.5\text{mm}$ である。このスリット間隙からビームが外れないように固定するため、LSBT セクションの軸補正は必要不可欠となっている。

2.2 軸補正

2.2.1 補正の手法 2 台の BPM で測定されたビーム位置が目標ビーム位置からずれている場合、ずれが小さくなるように、2 台のステアリング電磁石位置でのキック角を計算し、励磁電流値を設定する(図 2 参照)。3 カ所の軸調整セクションの内、LSBT セクションは 2 台の BPM 間に四極電磁石が設置されているが、四極電磁石を Thin レンズ近似で扱い補正を成立させている。

2.2.2 プログラム 自動ビーム位置補正を行っているプログラムは制御室のワークステーション上で動作しているグラフィック・ユーザ・インターフェイス (GUI) である(図 3 参照)。通常、GUI の使用者(例

* E-mail: ken@spring8.or.jp

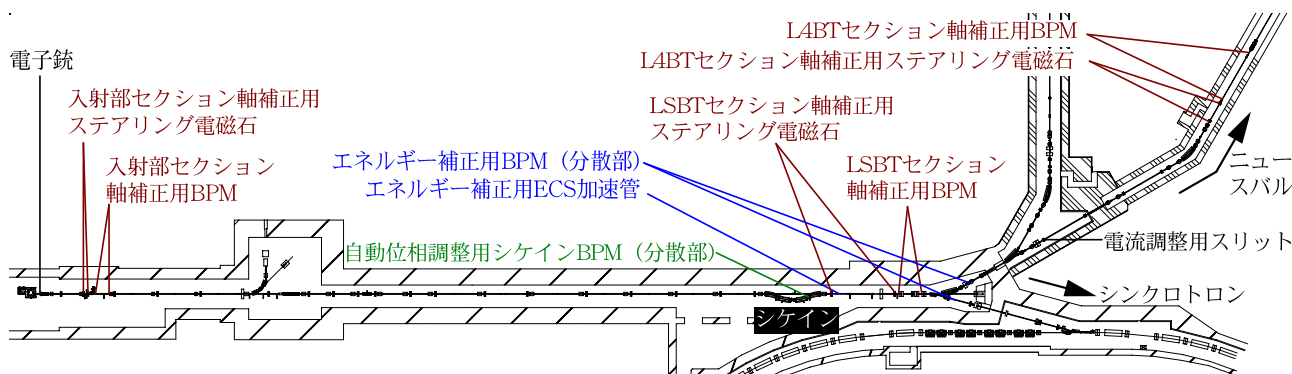


図 1: 自動ビーム位置補正及び自動位相調整の機器配置

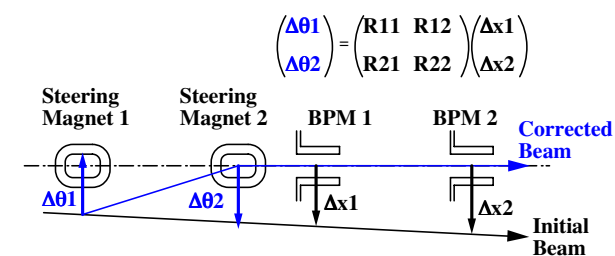


図 2: 軸調整セクションに於ける各機器の位置関係

例えば運転員がマシン立ち上げ時に「自動(開始)」のボタンを押し、運転サイクル終了時に「手動(停止)」ボタンを押す。使用者は目標ビーム位置、目標ビーム位置からの許容範囲(トレランス)、補正の周期等のパラメータが設定可能であるが、最適に設定されているため変更することは殆ど無い。それ以外のパラメータ(レスポンス係数等)はパラメータファイルからロードされ、表示のみである。

| BPM/ST Pair | FB Operation | Monitor Pos | Pos. Daily Btm | Target Pos | ST U R.C. Set | ST D R.C. Set | ST Mon Curr | V Orientation | Err/Par/Tole | U ST mA/A | D ST mA/A |
|-----------------|--------------|-------------|----------------|------------|---------------|---------------|-------------|---------------|--------------|-----------|-----------|
| HL_2V_HL_1 X | STOP | 0.084 mm | -0.001 mm | 0.000 mm | -1.200A | -1.200A | -0.242 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| HL_2V_HL_2 Y | STOP | -0.000 mm | 0.000 mm | 0.000 mm | -0.242A | -0.242A | -0.499 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| HL_1V_HL_1 Y | STOP | -0.005 mm | 0.000 mm | 0.000 mm | 1.200A | 1.200A | -0.165 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| HL_1V_HL_2 Y | STOP | 0.061 mm | 0.000 mm | 0.000 mm | -0.242A | -0.242A | 0.159 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| LSBT_U/MO_2 X | STOP | -0.031 mm | -0.003 mm | 0.000 mm | 16.500A | 16.500A | 10.037 A | 0.000V | 0.45mm/0.30 | 0.10 | 0.10 |
| LSBT_U/LSBT_2 X | STOP | 0.757 mm | 0.753 mm | 0.000 mm | -1.200A | -1.200A | -5.317 A | 0.000V | 0.45mm/0.30 | 0.10 | 0.10 |
| LSBT_U/MO_2 Y | STOP | -2.244 mm | -2.231 mm | 0.000 mm | 16.500A | 16.500A | -13.342 A | 0.000V | 0.45mm/0.30 | 0.10 | 0.10 |
| LSBT_U/LSBT_2 Y | STOP | 0.002 mm | 0.000 mm | 0.000 mm | -1.200A | -1.200A | 5.404 A | 0.000V | 0.45mm/0.30 | 0.10 | 0.10 |
| L4BT_U/L4BT_5 X | STOP | -0.392 mm | 0.000 mm | 0.000 mm | 14.500A | 14.500A | -1.059 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| L4BT_U/L4BT_6 X | STOP | 0.076 mm | 0.000 mm | 0.000 mm | -1.200A | -1.200A | -4.087 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| L4BT_U/L4BT_5 Y | STOP | -1.005 mm | -1.003 mm | 0.000 mm | 14.500A | 14.500A | -4.959 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| L4BT_U/L4BT_6 Y | STOP | 1.103 mm | 1.000 mm | 0.000 mm | -1.200A | -1.200A | -1.998 A | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| LSBT_U/ESS_P X | STOP | 0.026 mm | 0.000 mm | 0.000 mm | 400.000mA | 400.000mA | 244.536 deg | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |
| LSBT_U/ESS_P Y | STOP | 4.882 mm | 5.000 mm | 0.000 mm | 400.000mA | 400.000mA | 244.536 deg | 0.000V | 0.30mm/0.20 | 0.10 | 0.10 |

図 3: 自動ビーム位置補正プログラム(GUI)

プログラムは二つのタスクに分かれている。一つはビーム位置データをデータベースに照会し、もし有効ビームショットがあればフラグを立てて、無ければフラグを下げて位置データと共にプログラム中の静的記憶領域に保存する。有効ビームショットの判断(自動位相調整と共通)は4つの電極から出力され、演算された4つの独立した数値が設定値範囲内であることが条件である。各電極からの信号処理回路出力電圧をA(右

上電極)、B(左上電極)、C(左下電極)、D(右下電極)とすると、それらは1. 平均電圧($\propto A+B+C+D$)、2. 水平方向位置($\propto A-B-C+D$)のずれ、3. 垂直方向位置($\propto A+B-C-D$)のずれ、4. 位置のエラー($\propto A-B+C-D$)の4つである。保存の深さは500レコード、保存の周期は7秒であり、最新のデータが加われば最古のデータが順次削除される。

もう一つのタスクは10秒毎に静的記憶領域の500レコードを監視し、フラグが5個以上になった場合にビーム位置補正を行うものである。5発の有効ビームショットのうち中間値が測定ビーム位置として採択される。この時、もし測定ビーム位置と目標ビーム位置の差がトレランスより大きければ補正が行われ、トレランスより小さければ補正は行われない。トレランスの設定値は $\pm 30\mu\text{m}$ である。一度補正が行われると500レコードの全データが消去される。

2.2.3 運用実績 プログラム動作に関しては昨年報告を行っているので参照されたい^[4]。図4はLSBTセクションにおける水平方向軸補正の結果である。横軸は時間で、2005年5月21日から6月11日までの3週間である。データ統計によると、上流側BPM(左縦軸、赤丸)の平均測定ビーム位置は -0.009mm (目標ビーム位置は -0.008mm)、標準偏差が $48\mu\text{m}$ である。一方、下流側BPM(右縦軸、青四角)での平均測定ビーム位置は 0.754mm (目標ビーム位置は 0.753mm)、標準偏差は $29\mu\text{m}$ である。上流側と下流側で標準偏差に差があるのは、ベータ関数値の違いによる。

2.3 エネルギー補正

2.3.1 補正の手法 SPring-8線型加速器はエネルギー圧縮システム(ECS)を有しており、ECS加速管へ入力するRF電力の位相を変化させることによりビームエネルギーを変化させることが可能である。ECSの下流にはSy方向とNS方向とでそれぞれ分散部になっており、ビームエネルギーが測定可能である。そこで、分散部でのビーム位置(エネルギー)を一定に保つように、ECS移相器位相を自動的に調整する。この場合、偏向電磁石への入射位置と入射角度を担保する必要があり、LSBTセクションでの軸補正が正常に動作している場合のみエネルギー補正が動作する。

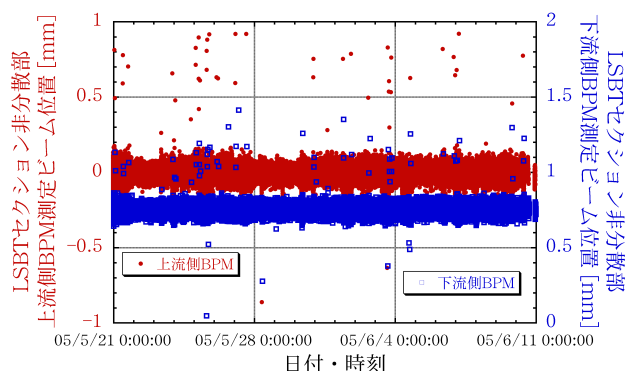


図 4: LSBT セクションに於ける軸補正

ビームエネルギーを測定する BPM は Sy 方向若しくは NS 方向に各 1 台ずつ設定され、単独で各リングへ入射している場合は各々の BPM が使用される。Sy 方向と NS 方向へビーム振り分けを行っている場合は、Sy 方向の BPM が使用される。この判断はプログラムが自動で行う。目標ビーム位置からのトレランスは Sy 方向で $\pm 0.3\text{mm}$ 、NS 方向で $\pm 1\text{mm}$ (エネルギーで $\pm 0.03\%$) である。

2.3.2 運用実績 図 5 はエネルギー補正の結果である。データ統計によると、Sy 方向 BPM (左縦軸、赤丸) の平均測定ビーム位置は 0.05mm (目標ビーム位置は 0.00mm)、標準偏差が 0.28mm である。一方、NS 方向 BPM (右縦軸、青四角) での平均測定ビーム位置は 4.90mm (ビーム振り分けのため目標ビーム位置は無し)、標準偏差は 0.50mm である。Sy 方向と NS 方向とで標準偏差が異なるのは主に分散関数値の違いである。

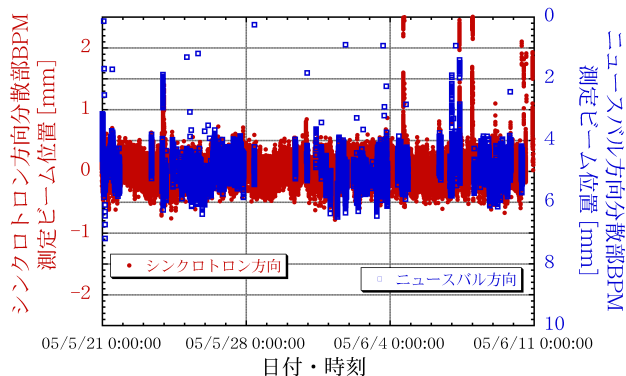


図 5: LSBT セクションに於けるエネルギー補正

3. 自動位相調整

SPring-8 線型加速器主加速部後方には ECS 用のシケインが設置されており、ビームエネルギーの測定が可能である。そこで、各クライストロン移相器位相を自動的に変化させながら、シケイン分散部でのビーム位置を測定する事により位相調整を行うプログラム (図 6 参照) を開発した。使用者は調整するクライ

ストロン「号機」を選択し、「開始」ボタンを押すだけである。通常、一巡調整すれば停止するが、「繰り返し」ボタンが押されていると「停止」ボタンが押されるまで何回も繰り返す。使用者は移相器位相変化量や測定ステップ数等を入力可能である。それ以外のパラメータは必要に応じて変更可能であるが、最適に設定されているため変更することは殆ど無い。

図 6 は 2005 年 3 月 22 日に M16 クライストロンの自動位相調整を行った結果である。この時、各位相 5 点のデータを取得するモード (チューニング OFF) で 3 分 30 秒ほどの時間がかかっている。グラフ中、正弦曲線の極小を示している (青) 点がビーム位置で、値が小さいほどビームエネルギーが高い。一方、ビーム位置の極小付近でゼロクロスしている (赤) 点はビーム位置の微分に相当するものである。このプログラムでは、微係数相当 (赤点) をリニアフィットしてゼロクロス点を求めている。リニアフィットした結果、位相の最適値は初期値 (0°) から $+0.7 \pm 0.3^\circ$ と計算された。但し、常にこの精度が得られるものではなく、チューニング OFF モードで $\pm 1^\circ$ 程度である。

このプログラムを使用して、トップアップ運転中でも 1 日に数回、自動位相調整を行う予定であった。しかし、現在、シケイン分散部 BPM で測定されたビーム位置の時間的变化は小さく、トップアップ運転中には使用していない。

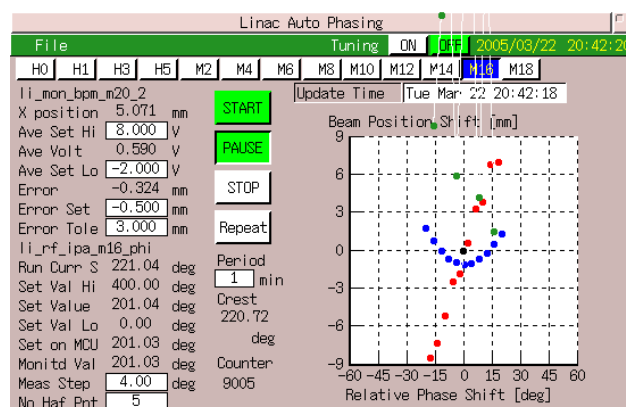


図 6: 自動位相調整プログラム (GUI)

参考文献

- [1] K. Yanagida, et al., "A BPM System for the SPring-8 Linac", Proc. of the 20th Int. Linac Conf., Monterey USA, Aug. 2000, pp. 190-192.
- [2] K. Yanagida, et al., "Signal Processor for SPring-8 Linac BPM", Proc. of the 5th European Workshop on Diagnostics and Beam Instr., Grenoble France, May 2001, pp. 162-164.
- [3] S. Suzuki, et al., "SPring-8 Top-up 運転に向けた線型加速器の対応," these proceedings.
- [4] K. Yanagida, et al., "Beam Instrumentation Using BPM System of The SPring-8 Linac," Proc. of the 22th Int. Linac Conf., Lubeck Germany, Aug. 2004, pp. 438-440.