

## 東北大学 1.3 GeV BST リングにおけるビーム性能の改善

### IMPROVEMENT OF BEAM PERFORMANCE IN 1.3 GEV BST RING AT TOHOKU UNIVERSITY

日出富士雄<sup>#</sup>, 柏木茂, 小林恵理子, 柴崎義信, 高橋健, 東谷千比呂, 長澤育郎, 南部健一,  
武藤俊哉, 濱広幸

Fujio Hinode<sup>#</sup>, Shigeru Kashiwagi, Eriko Kobayashi, Yoshinobu Shibasaki, Ken Takahashi, Chihiro Tokoku,  
Ikuro Nagasawa, Kenichi Nanbu, Toshiya Muto and Hiroyuki Hama  
Research Center of Electron Photon Science, Tohoku University

#### Abstract

Since the restart of user machine time on late in 2013, the approved beam time have been consumed smoothly as scheduled in Research Center of Electron Photon Science, Tohoku University. Currently, the 1.3 GeV Booster Storage (BST) ring has been utilized to generate the high energy gamma-rays as well as before the disaster on March 2011, in which the high energy gamma-rays were produced via Bremsstrahlung by inserting an internal target wire to the beam orbit after the acceleration. There were some improvements in this year, i.e. realignment of synchrotron magnets, improvement of orbit correction in energy ramping process by updating the control of power supplies for steering magnets etc., which improved an injection and acceleration efficiency and thus brought an increase of the beam current in the maximum energy. Present operational status and recent improvements in the BST ring are reported.

#### 1. はじめに

東北大学電子光学研究センターにおいて、1997年に完成した 1.2 GeV 電子シンクロトロンは東日本大震災からの復旧を経て、2013年12月より新たに 1.3 GeV BST (Booster Storage) リングとして共同利用運転が再開されている。BST リングの利用実験では、主に震災前と同様に加速した蓄積ビームの軌道にラジエータを挿入して高エネルギーの制動放射ガンマ線を生成し、これによりクォーク核物理の研究や対生成からの 2 次ビームを用いたテストビーム実験などを実施している。BST リングでは、これまでに六極磁場入りの機能複合型四極電磁石の導入によるクロマティシティ補正や 1.3 GeV へのビームエネルギーの増強などを実現している<sup>[1]</sup>。さらに今年に入ってから、リング電磁石の再アラインメントやステアリング電磁石電源の制御システムの改善、ビーム調整の進展などにより、入射エネルギーが 150 MeV から 90 MeV に下がったにもかかわらず震災前よりも多い 30 mA 以上の周回電流が加速後に得られるようになった。また制動放射ガンマ線の利用可能なエネルギー範囲を広げる目的で、1 GeV や 0.8 GeV 運転モードの整備なども進められている。以下に運転の現状や最近の改善点、今後の課題などについて報告する。

#### 2. 電磁石の再アラインメントの実施

震災復旧後の運転再開時より、リングに 4 台しかないステアリング電磁石のみでは補正できない程の非常に大きな生 COD のあることが問題となっていた。このため 8 台ある偏向電磁石の内の 2 台をリン

グ内側に 15~20 mm 移動して COD 補正に充てていた。その後、複合型四極電磁石の磁石設置に際してのビーム軸周りの傾斜 (roll) の取り扱いが正しくないことに起因するミスアラインメントが原因であることが明らかとなり、本年 2 月にリング全体の再アラインメントを実施した。再アラインメントに際して、磁石設置時と同じく測量にはレーザートラッカー (Leica AT401) を用いた。測量環境下でのその位置分解能は 10  $\mu\text{m}$  以下である。また今回は、磁石の roll 方向の傾斜の測定にはデジタル傾斜計 (精度  $\pm 0.02$  mrad) を用いて、レーザートラッカーによる測量データとの確認を随時行いながらアラインメントを実施した。再アラインメント前の測量の結果、16 台ある複合型四極電磁石の内の約半数で水平方向に 1 mm 前後、最大で 1.5 mm 程のミスアラインメントがあることを確認し、測定された生 COD と矛盾のない結果を得た。またわずかながら実際にはリング全体が本来の基準水平面より約 50  $\mu\text{rad}$  傾いて設置されていたことも確認し、この再アラインメントにおいて修正が行われた。再アラインメントに際して BPM の測量も合わせて実施したが、作業に充てられる日数の制約などから、大気解放しなくて済むようにビームダクト自体はできるだけ移動しない方針とし、事前にビームダクトと電磁石磁極のクリアランスを測定してにおいて基準座標系の設定に際して考慮した。今回の再アラインメントの結果、全ての四極電磁石で水平・鉛直方向ともにほぼ  $\pm 0.1$  mm 以内の範囲に磁場中心を揃えることができた。roll 方向の設置精度は  $\pm 0.05$  mrad (rms) 以下である。入射ビームの生 COD を再アラインメントの前後で測定した結果を Figure 1 に示した。水平方向に 20 mm 以上、鉛直方向にも 10 mm 程あった大きな COD が、水平・鉛直ともに 5 mm ほどに収まり、この結果、

<sup>#</sup> hinode@lms.tohoku.ac.jp

ステアリング電磁石を全く使用しなくても、ある一定量のビームを入射・加速できるまでに改善された。再アライメント前に見られていた大きなカップリングによる放射光プロファイルの異常な傾きも解消され、また COD 抑制のために移動していた偏向電磁石も本来の位置に戻されている。

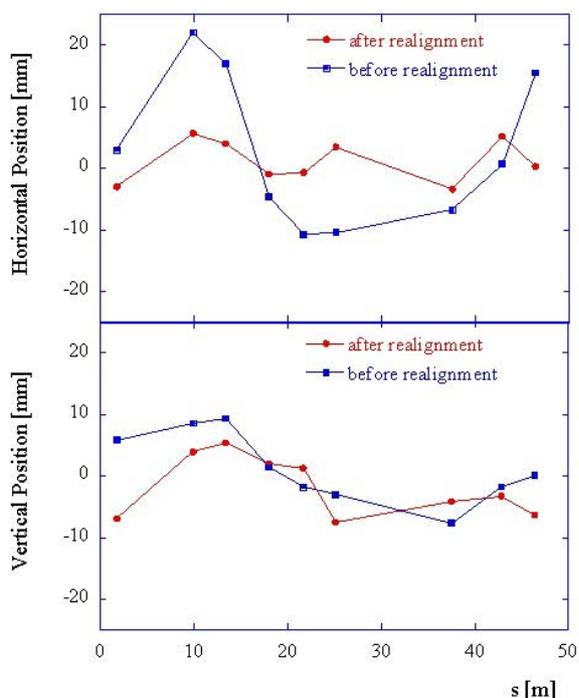


Figure 1: Horizontal (upper) and vertical (lower) bare CODs for injection beam. Blue (red) lines show the bare CODs measured before (after) the realignment.

### 3. ステアリング電磁石電源の制御方式の変更とこれによる応答速度の改善

#### 3.1 アナログ入力による制御方式の導入

これまで使用してきたステアリング電磁石電源は、出力電流は最大 5 A と大きくはないが、シンクロトロンの動作に合わせて数秒サイクルでパターン運転を繰り返せるメモリー内蔵型のシーケンス機能を搭載した電源である。既に 10 年以上稼働しているが経年劣化による故障が心配されているが予備がないため、万が一故障した際には、新しく入手した電源に依存した制御プログラムを開発する時間も必要であり、迅速な対応が難しいという問題がある。また、このシーケンス機能ではスタティックモードという負荷変動に対応できるモードでしか使用できないため、シーケンス動作の立上り/立下り時間は電源内部の応答速度で決まる値 (約 50 ms) に制限されてしまっていて、ビーム加速時のダイナミックな COD の補正も困難であった。今回、このための対応策として、電源を外部からのアナログ信号により制御する

る構成に変更することを考えた。従来のシーケンス機能を利用した構成では、電流出力の時系列パターンがプログラマブルな電源でなくては導入できない上、異なる電源を導入するたびに電源に依存した新たなプログラムの開発が必要となるが、この新しい構成では、アナログ信号による出力電流の制御が可能で応答性能が満たされているものであれば、異なる電源であっても迅速に交換可能となる。幸いにも現在用いているステアリング電磁石電源 (KIKUSUI PBX20-5) は、シーケンスモード以外にも、このような外部のアナログ信号によるダイナミックな制御にも対応可能なパワーブースタ機能を有したものであり、またこのようなダイナミックな制御に対応した電源も現在では複数のメーカーで市販しており、価格的にも技術的にも比較的導入しやすい状況である。今回は、アナログ信号の出力には National Instruments の CompactRIO というシステムに FPGA と DAC モジュールを組み込み、FPGA に DAC モジュールの出力電圧の時系列パターンを設定して、トリガに応じてこの出力電圧を電磁石電源に供給することで出力電流を制御するシステムを構築した (Figure 2 参照)。

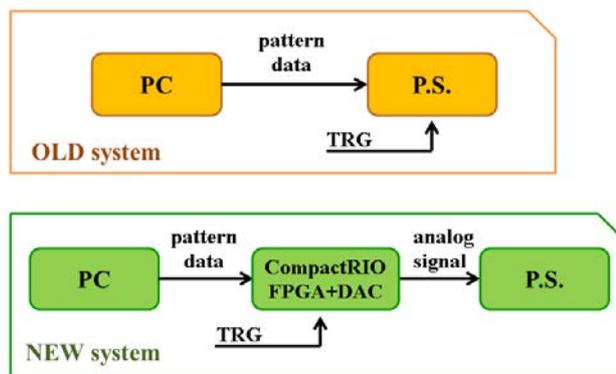


Figure 2: Configuration of old and new control system.

#### 3.2 電流出力パターンの記憶方式

DAC に出力パターンを指示する FPGA の制御方式としては、理想的には出力チャンネルは並列で、かつすべてのタイミングでの出力レベルを設定できるべきであるが、FPGA の回路を構成するスライスが足りないため、可能な限り回路規模を縮小して作成する必要があった。具体的には、20 μsec 周期のクロックで 10 秒のパターンを作成するためには、ひとつの電流値に 4 Byte 必要な場合では、“電磁石電源 8 台分に必要な記憶容量” = “必要なクロック数 (10 / 20 × 10<sup>-6</sup>) × “4 Byte” × “8 台” ≃ “16 MByte” の記憶容量が必要となる。しかし使用している FPGA (Spartan-6 LX45) の記憶容量はせいぜい 260 kByte しかないので、記憶容量を削減するために運転パターンは直線の変化のみに制限し、変曲点までのクロック数と傾きを記憶する方式を採用することにした。この方式では、“必要な記憶容量” =

“変曲点数 (～1000)” × “4 Byte” × “8 台” × “2 (傾き保存用+クロック数保存用)” ≒ “60 kByte” となり、十分に FPGA 内に記憶可能である。

また DAC 出力の同期の点から、出力パターンを制御する回路は 8 台の電源について並列化する必要があるが、FPGA の回路規模の不足によりこれが不可能であったため、制御回路を共有化することになった。しかしこれによる出力のタイミングのずれはせいぜい  $\mu\text{s}$  オーダーであるため、ステアリング電源制御の用途には問題とならない。

### 3.3 応答性能改善

制御方式の変更により、トリガからの応答が早くなり、より設定された運転パターンを忠実に再現できるようになった。Figure 3 に電源出力の応答の違いを示した。上の図が従来のシーケンス動作の場合の出力電流で下の図が変更後のパワーブースタ機能の結果である。この例では、どちらも電源の仕様範囲以上となるトリガ入力後 1 A/ms の傾きを出力するように設定したが、従来のシーケンス動作では立ち上がりが 50 ms に制限されているうえ、トリガか



Figure 3: Comparison of output response between old (upper) and new control method (lower). (vertical : 100mA/div., horizontal : 4ms/div.)

ら動作開始までの時間が約 8 ms 以上もかかっているが、新方式ではトリガ入力から応答を開始するまでの時間が 2 ms 以下と早く、また立ち上がりも電磁石の負荷 ( $L = 400 \text{ mH}$ ,  $R = 3.5 \Omega$ ) と電源定格で決まる傾き (1 A/ 20 ms) 程度で応答できていることが分かる。この結果、加速開始直後に渦電流の影響で生じていたダイナミックなビーム軌道の変動を緩和することができるようになり、そこでのビーム損失を大きく改善することができた。従来はビーム入射・加速の効率が 30 %程度であったが、先の実アライメントの修正の効果などと合わせて、現在は 50 %以上に改善され加速後のビーム電流も 30 mA 以上が得られるようになっている。

## 4. 運転の現状

### 4.1 運転モードの整備

現在の主な運転形態は、加速した蓄積ビームの軌道以上に直径 10  $\mu\text{m}$  のカーボンファイバーをラジエータとして挿入することで高エネルギーの制動放射ガンマ線を生成し、クォーク核物理の実験やテストビーム実験に供している。このためのガンマ線ビームラインは 2 本用意されている。またビーム電流や入射・加速の頻度は、利用されるガンマ線の強度に応じて調整されており、通常は約 10 秒から 1 分程度のサイクルで運転されている。今年になって、制動放射ガンマ線の利用可能なエネルギー範囲を広げる目的で、1 GeV や 0.8 GeV の運転モードを整備した。Table 1 に各運転エネルギーでの測定パラメータを示した。ラジエータで散乱され、わずかにエネルギーを失った電子が再びラジエータやその固定部に衝突することで発生するバックグラウンドを抑制するために、ラジエータ部に大きなエネルギー分散関数を導入しており、この結果直線部に 1 m の分散関数が設定されている<sup>[2]</sup>。

### 4.2 ガンマ線ビームの安定度

Figure 4 は 1.3 GeV 運転時のビーム電流とそのときのガンマ線のエネルギー同定用タガー検出器の信号強度を示している。90 MeV でビーム入射後ただちに加速を開始し、2.5 秒程度後から 1.3 GeV に加速されたビーム軌道上にラジエータを挿入して約 8 秒間で 30 mA のビームを消費し、17 秒後に再びビームを入射している。Figure 4 に見られるように入射毎のビーム電流の変動は小さく、震災前と比べて極めて安定している。また長時間のドリフトも、調整なしでも  $\sim 20\%$  / 8 時間程度に収まっており、

Table 1: Parameters of BST Ring

Beam energy [GeV]	1.3	1.0	0.8
tune ( $\nu_x / \nu_y$ )		3.26 / 1.18	
chromaticity			
natural ( $\xi_{x0} / \xi_{y0}$ )	-7.5/-4.9	-6.3/-5.2	-7.2/-5.8
corrected ( $\xi_x / \xi_y$ )		$\sim +6 / \sim +6$	
dispersion@S.S.[m]	0.93	1.02	1.00

かつてに比べて格段に改善されている。しかし、ビーム電流が 20 mA 程度以上になると、取り出されたガンマ線の時間構造に入射毎のばらつきが大きくなる傾向が見られており、何らかのビーム不安定性が発生しているものと考えられるが、詳細は今後調査していく予定である。

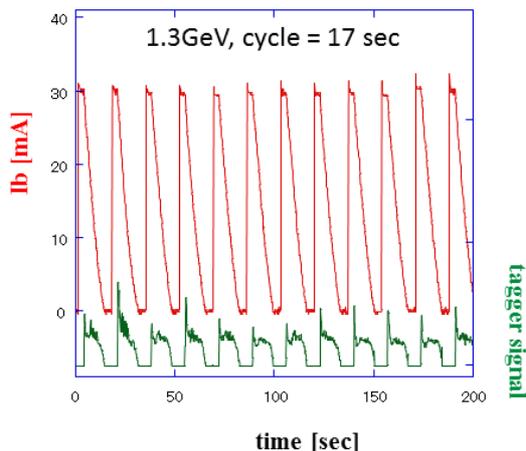


Figure 4: Example of a typical 1.3 GeV operation with 17 second cycle. (red: beam current, green: tagger signal)

1.3 GeV 運転時にラジエータから 20 m 下流の検出器でガンマ線ビームの中心位置を観測した結果を Figure 5 に示す。このときの運転では毎朝 9 時に運転を再開し、夜間は電源類の低圧のみ稼働する待機状態で保持していた。水平方向（青プロット）については、ラジエータの挿入位置を掃引するにつれてガンマ線の放出角もわずかに変化するため、検出器において位置は 1 mm 弱変動している。これはガンマ線の広がりとしては大きく見せる効果を持つが、重心位置のばらつきには寄与しないの筈なので、水平方向に中心位置のばらつきが大きい原因は、未だ良くわかっていない。しかし安定度としては、そのばらつきの範囲内では安定している。一方、鉛直方向については、運転はじめと終わりごろで 1 mm 近い系統的なドリフトが見られている。運転開始から 8 時間ほどするとこの位置変動は収まることも確認されている。10 mm 以上あるガンマ線の広がりに対

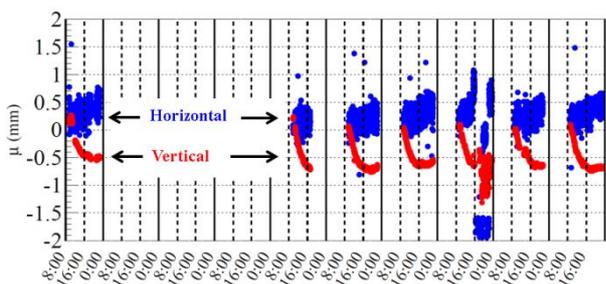


Figure 5: Gamma-ray position observed at the 20 m downstream from the radiator in the 1.3 GeV operation. (blue: horizontal, red: vertical)

してこの変動量は許容範囲内にあるため、現在は安定化するような対処を行っていないが、より精密なビーム制御にも対応できるように、今後、変動要因の調査やフィードバックの導入による安定化なども検討している。

## 5. まとめと今後の課題

2013 年 12 月の共同利用の再開以降、安定に利用運転が実施されている。特に BST リングに関しては、今年になってからリング電磁石の再アライメントやステアリング電磁石電源の制御システムの改善、ビーム調整の進展などにより、入射エネルギーが 150 MeV から 90 MeV に下がったにもかかわらず、震災前よりも多い 30 mA 以上の周回電流が加速後に得られるようになっている。

しかしながら 1997 年の建設当初から更新されずに稼働中の機器が未だ多くあり、これらの故障や劣化が顕在化し始めている。今のところ長期の運転停止を引き起こすトラブルは生じていないが、共同利用運転を着実に実施できるよう、地道に更新・改善作業を進める必要がある。特にイオンポンプの経年劣化の影響は深刻で、運転時のリングの真空度が悪い所では約  $1E-5$  Pa になっており、この結果イオントラッピングの影響でビーム電流に依存してビームが鉛直方向に大きく広がってしまっている。これまでに段階的に更新してきてはいるが、それでも 23 台ある内の 16 台が 1997 年当時から使用し続けているものであり、排気能力の低下が極めて顕著である。これに関しては、長期の停止期間中にイオンポンプのベキングやセル交換などを実施して改善を図る予定である。また最近の電気代高騰の影響も深刻で、従来の運転時間の確保が非常に厳しくなっている。リングの大電力高周波源をクライストロンから半導体アンプに更新することで省エネルギー化を図り、運転経費を抑制することも検討している。

## 参考文献

- [1] 日出富士雄 他, “東北大学 1.2 GeV ブースターシンクロトロン復旧の現状”, 第 10 回日本加速器学会年会, (2013), SUOS01.
- [2] 武藤俊哉 他, “電子蓄積リングにおけるラジエータワイヤによるクーロン散乱が制動放射高エネルギーγ線に与える影響”, 第 12 回日本加速器学会年会, (2015), WEP003.