

## 東北大学 1.3 GeV 電子シンクロトロン の 運 転 状 況

### OPERATIONAL STATUS OF THE 1.3 GEV ELECTRON SYNCHROTRON AT TOHOKU UNIVERSITY

日出富士雄<sup>#</sup>, 柏木茂, 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, Yoshinobu Shibasaki, Ken Takahashi, Chihiro Tokoku,  
Ikuro Nagasawa, Kenichi Nanbu, Toshiya Muto and Hiroyuki Hama  
Electron Light Science Centre, Tohoku University

#### Abstract

A recovery work from the Great East Japan Earthquake on March 2011 has been done so far in Electron Light Science Centre at Tohoku University. The pre-service inspection for radiation facility was successfully passed, and then the operation for user machine time was formally restarted on December in the last year. In the recent beam operation for user application, the 1.3 GeV booster synchrotron (BST ring) has been utilized to generate the high energy gamma-rays as well as before the earthquake disaster, in which the high energy gamma-rays were produced via Bremsstrahlung by inserting an internal target wire to the circulating beam orbit after the acceleration. Operational status and improvements of the BST ring are reported as well as the problems which currently limit the ring performance.

#### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは、これまで東日本大震災からの復旧作業を進めてきたが、昨年の12月に放射線施設検査に合格し、正式に共同利用運転が開始されたところである<sup>[1]</sup>。ブースターシンクロトロン (BST リング) の当面の利用運転としては、震災前と同様に、加速した蓄積ビームの軌道上にラジエータを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て、クォーク核物理の実験や対生成からの2次ビームを用いたテストビーム実験などが実施されている。ビームの入射・加速の頻度は利用されるガンマ線の強度に依存して、10秒から1分程度のサイクルで運転されている。既に今回の復旧に際して新たに導入した六極磁場入りの機能複動型四極電磁石により、クロマティシティをほぼ期待通りに補正できていることが確認されている<sup>[2]</sup>。またビームエネルギーについては、震災前の1.2 GeV から 1.3 GeV への増強がなされている。加速後の電流については震災前と同程度の 20 mA の周回電流が得られているが、当初の目標性能には未だ不十分な状況である。最も深刻な問題として電磁石ミスアライメントによる大きな閉軌道歪みがあり、これによってダイナミックアパーチャが収縮し、長パルスビームの多重周回入射ができないため、周回ビーム電流の増大を困難にしている。現在、共同利用運転の合間を縫ってマシンスタディーや改修作業を進めているが、これらの現状や運転上の課題、改善策などについて報告する。

#### 2. ビーム入射

設計方針では入射器から長いパルスビームをリン

グに入射し、リング複数ターン分のビームを周回させる予定であったため、入射ビームのマクロパルスあたりのピーク電流は 20~30 mA 程度あれば、十分に 100 mA 以上の電流を加速後に得られると見込まれていた。また今回の復旧で新たに建設した 90 MeV 入射器には、これまで開発を行ってきた熱陰極高周波電子銃を導入した<sup>[3]</sup>。この熱陰極高周波電子銃では、逆流電子による back-bombardment 現象の制約があるため、カソードの放出電流をあまり大きくすることができない。従って、蓄積電流の増強には長パルスビームの多重周回入射を実現する必要がある。ビームコミショニングの当初は、バンプ電磁石の台形波形の立下りのごく狭い領域でしかビームが入射できなかったものが、調整が進むにつれて次第にフラットトップの終端近傍で入射したビームでも周回できるようになった。しかしながら、入射ビームのタイミングに従って、入射ビームのベータトロン振幅を小さくするようにバンプの大きさや入射ビームの軌道を調整しないとビームロスが多いということが早い段階から問題となっていた。この点に関しては、現時点でも通常のパンプ入射は実現できていないが、後述するように磁石のミスアライメントが当初の予想より極めて大きいことが判明し、現在、共同利用の合間を縫って磁石の再アライメントを実施し始めており、ダイナミックアパーチャの回復を図っているところである。ところでパンプ入射の実現を目指す一方で、年度内の共同利用再開とそのために必須となる放射線施設検査の早期の実施のために、最低限必要な蓄積電流を確保するための入射手法の確立が急務であった。入射エネルギーが 90 MeV と低いと放射減衰に要する時間がビーム寿命と同程度以上あり、通常のパンプスタッキングも困難な状況であった。そこで、このための解の一つとして見いだされたものが、Figure 1 に示され

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

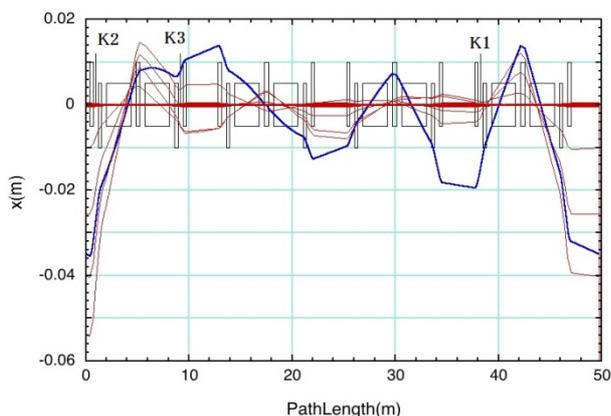


Figure 1: Horizontal orbit of injection beam. LINAC beam is injected with  $x = -54$  mm with  $x' = -0.4$  mrad at  $s = 0$  m. It is clearly shown that the amplitude of the injected beam is quickly damped after five turns. Blue solid line shows a bump orbit at the injection.

るような特殊な入射である。入射ビームは、3 台のバンプ磁石の磁場が 4 ターン目に消えるようなタイミングで入射されている。ここでは青の太線で示されるように入射時のバンプ軌道は通常のバンプ入射とは異なり入射部で閉じていない。しかし入射ビームについてみると、リングを 5 周した時にはそのベータatron 振幅は、ほぼ完全に減衰している様子がわかる。Figure 2 は入射ビームに対するトラッキングシミュレーションを行った結果である。1 % のエネルギー偏差のある場合でも 30 ターン後の損失は僅か 1.5 % に抑えられている。実際のビーム運転においては、この特殊なバンプ磁石の設定を基に入射電流を増やすように種々の調整を行うことで、入射器からの一回のマクロパルス入射のみで 50 mA 程度の入射電流が得られるようになった。LINAC のマクロパルスの電流値が 30-40 mA なのでリング 1 周以上のビーム入射ができていくことになるが、最終的な入射・加速効率は 30 % 程度に留まっている。ビーム損失の大きな要因の一つに、この後に述べる加速開始時の渦電流による不正磁場があり、加速パターンを調整することで一定の改善が図られている。

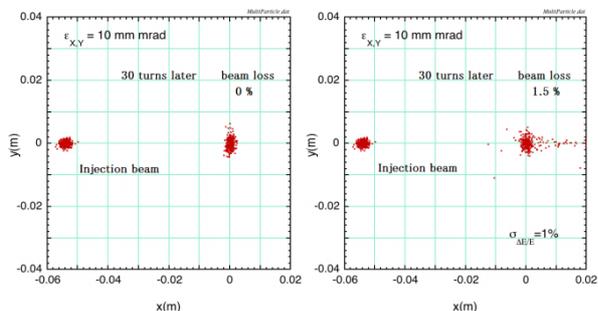


Figure 2: Result of tracking simulation for the special injection scheme with and without the energy deviation. In spite of the energy deviation of 1 %, small beam loss can be expected.

### 3. 偏向部真空ダクトの渦電流の影響

ビームコミッショニングの当初には想定していなかった問題として、偏向電磁石部の真空ダクトによる渦電流の影響があった。これにより加速開始直後にステアリング磁石の応答を超える早さで大きな COD が発生してしまい、ビームの著しい損失を招いていた。またこの一方で、入射時のビーム軌道にも水平方向に 20 mm 以上、鉛直方向にも 10 mm 以上の生 COD が存在していて、リングに 4 台しかないステアリング磁石だけでは完全に補正することができない状態であった。またこの生 COD の形が加速時の軌道の変位と極めて良く類似していることも判明した。その後、この COD を発生している不正磁場の原因が 8 台ある偏向電磁石の内、BM4 と BM5 にあると説明できることがわかった。Figure 3 は測定された生 COD と、BM4 と BM5 にキックがあるとして評価した COD を示している。BM4 と BM5 の磁場がそれぞれ 0.5 % と 1 % 弱いとすると良く測定値を再現できていることが分かる。実は、この BM4 と BM5 の真空ダクトは他と著しく異なっており、高エネルギーのガンマ線を取り出すためのビームポートが設けられている関係で、他のダクトよりも水平方向に幅広の形状をしている。さらに、制動放射によりエネルギーを失った電子のタギングを行う都合上、電子を取り出すチタン窓を設置するための枠などが磁極内側に溶接されており、これらが渦電流の違い以外にも不正磁場を生み出す原因になっているものと推測された。

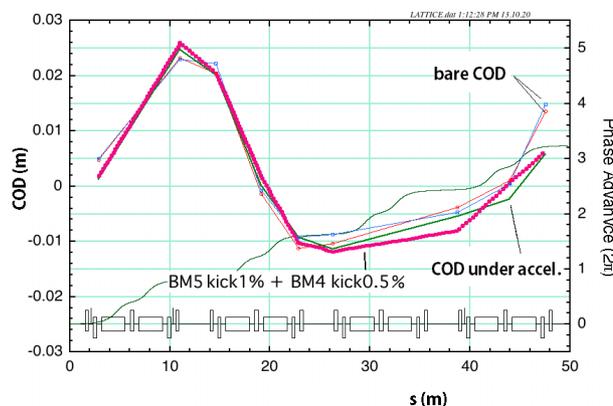


Figure 3: Measured and estimated bare-COD.

Figure 4 は、25 ms の間だけ励磁の勾配を 680A/sec に設定した際の、各偏向電磁石の磁場の立ち上がり時のばらつきを測定した結果である。BM7 の磁場を基準にした比率で表してあるが、真空ダクトで発生した渦電流の影響で磁場の立ち上がりの応答が遅れているため、BM5 と BM4 の磁場が弱くなっているのが明らかに見られる。BM5 のダクトは BM4 よりも更に幅広の構造をしており、その分渦電流の影響も大きい。このため本来は、抜本的な対策として真空ダクトを製作し直すなどして渦電流の影響を全ての偏向部で同一にすることが必要と考えられるが、コストの点から現実的ではない。実は、BM4 と

BM5 は前述したタギング検出器を偏向電磁石内部に装着するために、磁石全体を 20 cm 以上リング内側に移動できるようにレールの上に設置されており、こうして磁石を積極的に移動することで積分磁場をパーセントのオーダーで大きくすることが可能であった。最終的には BM4 と BM5 を 15~20 mm 移動して生 COD を小さくするように調整した結果、水平方向に最大 20 mm 以上あった COD を 10 mm 以下に抑えることができた。なお入射エネルギー付近でビーム寿命が短いことを考慮すると、加速勾配は電源の最大定格 (978 A/sec) 近くまで大きくしたいところであるが、ステアリング磁石の磁場応答が全く追従できないため、現状ではビーム損失の兼ね合いで加速初期の勾配は 600 A/sec 程度にして運転を行っている。また偏向電磁石と四極電磁石間でもミリ秒のオーダーで磁場応答の違いはあるが、これについては各電源の立ち上がりタイミングや加速パターンを調整することで対処を行っている。

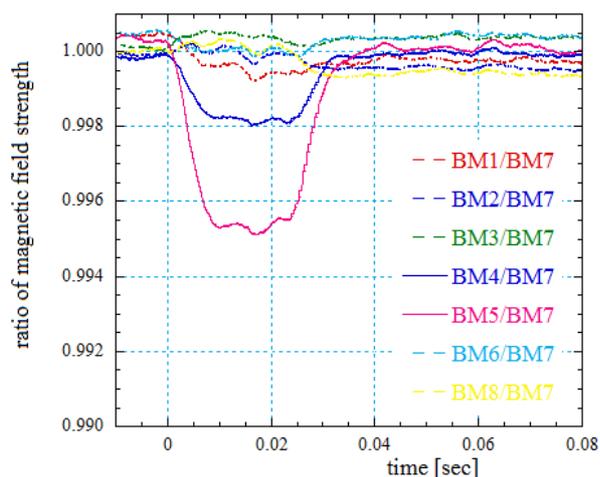


Figure 4: Ratio of measured magnetic field strength with respect to the BM7 magnet. Slope of excitation current was set to 680 A/sec, which corresponds to 70% of the maximum slope.

#### 4. ミスアラインメントの補正

ビームコミッション前に 3 次元レーザートラッカーを用いて実施したアラインメント作業の結果では、全ての磁石は水平・鉛直方向ともに 0.2 mm 以下の暫定的な目標値内で設置されているはずであった。しかしながら BM4 と BM5 の不正磁場だけでは説明ができない大きな COD の存在や放射光のプロファイルに甚だしい大きさの X-Y カップリングが見られていたことから、再度の測量を開始したところである。その結果、少なくともビーム軸周りの回転（ロール）については、半数以上の複合機能型磁石について 2 mrad 以上、最大で 3 mrad 以上ものミスアラインメントがあることが判明した。Figure 5 は観測された放射光のプロファイルを示しているが、ロールの調整前にはチューンの動作点に依存して多少の違いはあるものの、極めて大きな傾斜が存在し

ていたが、調整の過程で図に見られるような正常な形状に回復してきている。詳細については解析中だが、今後は残りの磁石についてもロールの調整を行い、その後鉛直方向と水平方向のミスアラインメントの補正を早期に実施する予定である。

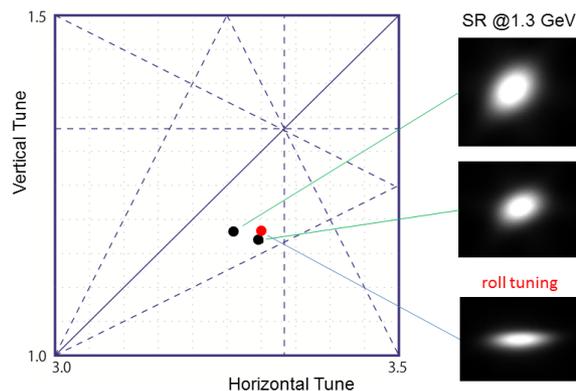


Figure 5: Observed SR profile before and after roll tuning.

#### 5. まとめと今後の課題

1.3 GeV BST リングの当面の利用運転としては、震災前と同様に、高エネルギーの制動放射ガンマ線を用いたクォーク核物理の実験やテストビーム実験などが予定されている。1.3 GeV に加速後のビーム電流は昨年夏の時点では 2 mA 程度に止まっていたが、入射スキームの変更や偏向磁石の移動による COD の改善、加速パターンの調整など種々の寄与により震災前と同じ 20 mA 程度のビーム電流が得られるようになった。しかしながら想定した性能には未だ不十分な状況であり、多くの課題が残されている。最も深刻な問題と考えられるのが、電磁石ミスアラインメントや渦電流の影響の違いからくる大きな COD であり、これにより十分なダイナミックアパーチャが確保できないため、周回ビーム電流が制限されてしまっている。ミスアラインメントを補正したうえでどの程度ダイナミックアパーチャが回復されるかは現時点では予見できないが、今年中には結論を得たいと考えている。またビームの安定性についても、共同利用時のガンマ線ビームの位置にドリフトが見られることやガンマ線の強度に入射スピル毎の変動があり、今後、更なる安定化に向けた改善を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] 南部健一 他, “東北大学電子光物理学研究センターの加速器の現状”, 第 11 回日本加速器学会年会, (2014), FSP022
- [2] 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
- [3] 柏木茂 他, “東北大学電子ブースターシンクロトロン入射用 90MeV リナックの開発状況”, 第 10 回日本加速器学会年会, (2013), SAOT02