

東北大学 1.2 GeV ブースターシンクロトロン復旧の現状

CURRENT STATUS OF RECONSTRUCTION OF THE 1.2 GEV BOOSTER SYNCHROTRON AT TOHOKU UNIVERSITY

日出富士雄[#], 柏木茂, 柴崎義信, 高橋健, 長澤育郎, 南部健一, 武藤俊哉, 濱広幸
 Fujio Hinode[#], Shigeru Kashiwagi, Yoshinobu Shibasaki, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa,
 Kenichi Nanbu, Toshiya Muto and Hiroyuki Hama
 Electron Light Science Centre, Tohoku University

Abstract

Recovery and reconstruction works from the Great East Japan Earthquake is in progress in Electron Light Science Centre, Tohoku University. For the booster ring, some old power supplies of magnets were replaced. Furthermore some quadrupole magnets were also replaced to the combined function magnets of which sextupole moment is included. Modifying the ring optics so as to introduce the horizontal dispersion into the position of combined magnet, this replacement will make it possible to correct the chromaticity. Although the development of new control software are still underway, beam commissioning of the booster synchrotron was started in this May and beam acceleration up to the maximum energy of about 1.3 GeV has been succeeded. Further tuning work is still conducted toward the start of planned user time in this year.

1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは、東日本大震災からの復旧作業が進行している^[1]。1.2 GeV 電子シンクロトロンにおける主な改修の内容は、1) パターン運転用電磁石電源の更新、2) 入射用パルス電磁石電源の更新及び3) 性能向上を目指した機能複合型四極電磁石による六極磁場の導入、の3点である。今回の復旧作業に際して、専用の入射器を新たに建設した^[2]。これに伴い入射エネルギーは従来の 150 MeV から 90 MeV に大きく低下する一方で、最大エネルギーは 1.2 GeV から 1.3 GeV に増加している。このシンクロトロンは震災前には主として制動放射による高エネルギーガンマ線の生成に利用されてきたが、今回の改修を契機に今後も高度化を進め、将来は光源リングとしての利用も目指している^[3]。なお、従来有していたパルスストレッチャーとしての機能は、今回の改修に合わせて除外することになった。

復旧・改修作業の状況については、昨年度末までに電源の設置・調整や電磁石のアラインメント、真空システムの再稼働が終了している^[4]。そして更新した制御システムのプログラム開発を並行して進めながら、本年 5 月よりシンクロトロンのビーム運転を開始した。その後、6 月中旬には入射エネルギー 90 MeV でのビームの RF 捕獲に、そして 7 月初旬には最高エネルギー（約 1.3 GeV）への加速に成功した。本年下半期の共同利用運転の再開を目指して、ビーム調整を進めているところである。ここでは、改修作業の概要および試験運転におけるビームの現状について報告する。

2. 復旧・改修作業の概要

2.1 機能複合型四極電磁石

直線部の既存の四極電磁石と入れ替える形で、新たに機能複合型四極電磁石を製作し、六極磁場を導入した。収束・発散 (QSF・QSD) 各 8 台の磁石を製作し、ローテティングコイルを用いた磁場測定を行った結果、4 極磁場成分は 3 次元計算の結果と良い一致を示していることを確認した。しかしながら、要求される四極磁場を励磁した際に得られる六極磁場の積分値は、収束・発散ともに当初の設計値より小さめ (QSF: -8%, QSD: -4%) の結果となっていることが分った。これについては、直線部に導入する分散関数を幾分大きくすることで、対処が可能と考えている。

2.2 電磁石電源

偏向電磁石及び四極電磁石のためのトラッキング運転用電源 (4 台) が新たに製作された。Table 1 に、これらの電源の主な仕様を示している。

Table 1: Main parameters of power supplies

	Dipole	QC	QSF, QSD
Min. current	80 A	40 A	35 A
Max. current	1400 A	800 A	700 A
Output voltage	645 V	55 V	77 V
Ramping rate	980 A/sec	665 A/sec	565 A/sec

この電源は、もとは医療用重粒子線照射施設の電磁石電源用に開発されたものを本用途に合わせて製

[#] hinode@lms.tohoku.ac.jp

作したものであり、90 MeV から 1.3 GeV 超までの広い範囲にわたって、 $\pm 1 \times 10^{-5}$ の安定度と $\pm 1 \times 10^{-4}$ 以下の追随性といった極めて優れた性能を有している^[5]。

2.3 入射用パルス電磁石電源

入射器の更新に伴ってエネルギーが大幅に低下したので、セプタムやキッカー（バンパ磁石）といった入射用パルス電源も新たに更新することにした。セプタム電源はサイリスタを用いた正弦半波パルスを、キッカー電源はサイラトロン駆動による PFN を用いた矩形パルスを出力する。出力電流の安定度はそれぞれ、2 % p-p（セプタム）と 1 % p-p（キッカー）以下の値が実現されている。

2.4 磁石のアライメント

新たに設置された機能複合型四極電磁石とともに、偏向電磁石など他の磁石についても地震により大きな変動が予想されたため、3次元レーザートラッカー（Leica, AT401）を用いたリング全体のアライメント作業が実施された。最終的には、最大で ± 0.2 mm 以下に調整されているものと見込まれている^[4]。Figure 1 は、アライメント誤差の有無に対して、ダイナミックアパーチャを評価した結果である。各々の図で3本の実線は運動量誤差 $\delta p/p = -1, 0, +1$ % の場合を示している。この評価では、分散を 0.6 m 入れ、クロマチシティを +1 程度にしている。また、真空ダクト（高さ ± 20 mm）の大きさも考慮されている。現状の配置では、バンパ軌道の内側に六極磁場が存在することが避けられないので、入射ビームに対する影響も大変に重要である。今後、入射効率やビーム寿命の測定・改善を通して、必要に応じて更に詳細なアライメント作業の実施も検討されている。

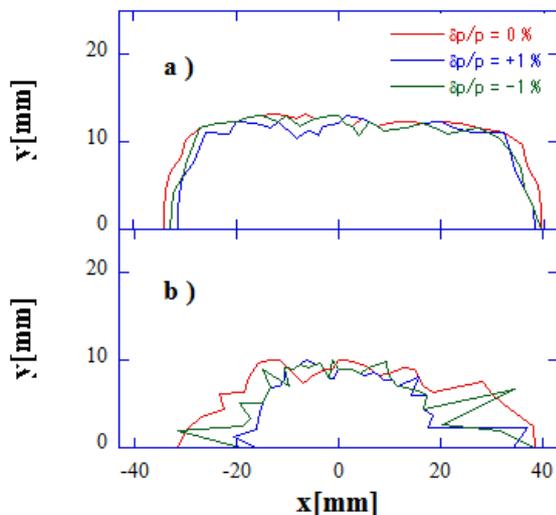


Figure 1: Estimated dynamic aperture. a): ideal case with no alignment error, b): example with alignment error of ± 0.2 mm.

2.5 真空系の改善

今回の改修作業により、ビーム取り出しがなされなくなったので、出射用セプタムなど不必要な機器の撤去に合わせて、真空ポンプの増設や真空ゲージの新設などを進めている。これには KEK の真空グループから多数の NEG ポンプ（St707, C200）を譲り受けることができたので、このうちの7個を比較的容易に作業が可能な個所に設置した。今後、真空ダクトの改造を図りながら、排気能力の増強を進めていく予定である。

3. ビーム運転の現状

3.1 経緯

本年 5 月よりシンクロトロンへのビーム入射を開始したが、当初は、チューン測定用の 2 台のストリップラインモニターと一時的にリング内に配置したロスモニターでビームを観測しながら、調整を行った。ビームがリングを 1 周できるようになると、リングの入射セプタム部にあるスクリーンモニターで周回してきたビームを観測できるようになり、軌道だけでなくビームの収束も調整できるようになった。こうして、6 月初めにはリング内に多数回の周回を観測し、中旬には入射エネルギーでのビームの RF 捕獲に、そして 7 月初旬には最高エネルギー（約 1.3 GeV）への加速に成功するに至った。しかしながら、加速後の周回電流は 1~2 mA 程度と未だ少なく、今後は周回電流の向上に努めていくところである。

3.2 ビーム入射

機能複合型四極電磁石を導入したことによる厄介な問題の一つに、入射時の振幅の大きなビームに対する六極磁場の影響がある。特に、90 MeV 程度の低いエネルギーの入射ビームに対しては、ビームの放射減衰に要する時間が 10 秒オーダーと、現状の真空度における残留ガスによるビーム寿命と同レベルとなっている。このため振動振幅の減衰したビームに対して、チューンやクロマチシティを測定することが困難な状況である。従って今のところは入射直後のビームを用いてチューンを測定しているが、振幅依存のチューンシフトがあるため、正確な情報を得ることは単純ではない。さらに振動振幅の減衰を待てないため、通常のビームのスタッキングも期待できないので、現在のところはビームの加速を入射後ただちに行っている。さらに現在の試験運転では、リング 1 周分（200 ns 弱）程度のパルス幅のビームをキッカーパルス波形の下がり始めのタイミングで LINAC から入射しているが、この状態でビームパルス幅を広くしても周回電流が増える状況にはなっていない。周回ビーム電流の増強に向けて、複数ターン分の周回を可能にする必要があるが、これについては今後の重要課題の一つと考えている。

3.3 クロマチシティ補正の確認

前述のように、入射ビームの寿命が非常に短くおかつ放射減衰に要する時間が大変長いので、まず

は加速したビームを用いて、直線部に導入する分散関数とクロマチシティとの関係を確認した。動作点としては、 $(v_x, v_y) = (3.26, 1.18)$ 程度を目安として運転しているが、これ以上近づけると水平と鉛直方向の間の結合が強くなる様子が見られており、強いスキュー成分の存在が懸念されているが、詳細は今後、調査する予定である。

Figure 2 には、900 MeV に加速したビームに対して、分散関数を測定した結果を示した。モデル計算の結果とともに示されているが、比較的の良い一致を示している。

Figure 3 は、アーク部の四極電磁石 (QC) の強度を変えることで直線部の分散関数を変化させ、これによりクロマチシティがどのように変化しているか、測定した結果である。SAD コードを用いて計算した結果も実線で示してある。測定結果とは多少の違いが認められるが、当初の目的であったクロマチシティの補正が実現できていることを確認した。

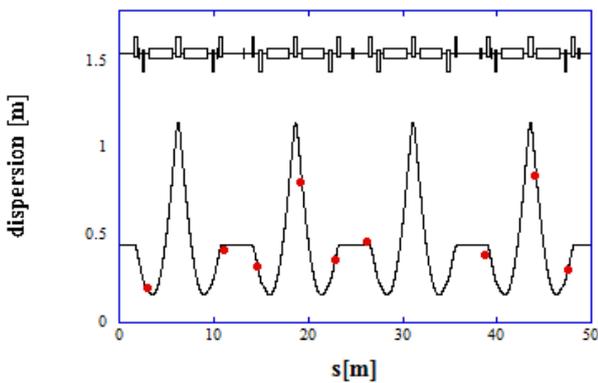


Figure 2: Result of dispersion measurement for the stored beam at 900 MeV.

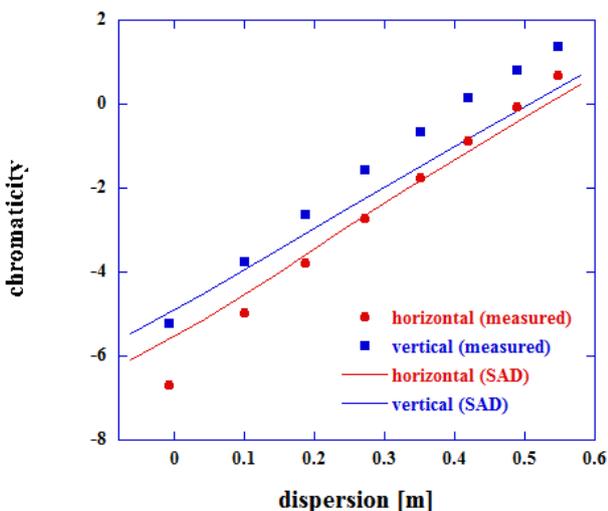


Figure 3: Measured chromaticity dependence on dispersion. Plots show the horizontal and vertical chromaticities, while solid lines show the expectation given by SAD codes.

4. まとめ

震災後2年以上にわたり復旧作業を続けてきたが、シンクロトロンについては、本年5月から本格的にビーム運転を開始し、7月には最高エネルギー(約1.3 GeV)に加速できるところまで到達するに至った。今回の復旧・改修を契機に1.2 GeV STB (ストレッチャーブースター) リングは1.3 GeV BST (ブースタストレージ) リングへと生まれ変わり、将来的には教育目的としての放射光の利用をも目指すものである。しかし、周回電流については未だ少なく、またビームの振る舞いの理解についても不明なことが非常に多い。本年後半に予定されている共同利用の開始に向けて、更なる調整作業の進展を期しているところである。

謝辞

今回の復旧作業に際しては、多くの方々のご協力を頂き、漸くビーム運転を再開する運びとなった。特に機能複合型四極電磁石の製作やアライメントに関しては SIGMAPHI に、またシンクロトロン電源の更新にあつては(株)東芝及び東芝三菱電機産業システム株式会社の、そして入射用パルス電源の更新には日新パルス電子株式会社の皆様に多大なご協力を頂いた。更に、KEK 真空グループの金澤先生をはじめ関係者の皆様には NEG ポンプの譲受けに際して大変にお世話になりました。ここに改めて感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 南部健一 他, “東北大学電子光学研究センターの加速器の現状”, 第10回日本加速器学会年会, (2013), SSFP24
- [2] 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
- [3] 日出富士雄 他, “東北大学1.2 GeV電子シンクロトロン改修計画”, 第9回日本加速器学会年会, (2012), pp915-917.
- [4] F. Hinode, et al., “Status of Upgrade Project of the 1.2 GeV Booster Synchrotron at Tohoku University”, Proceedings of the 4th International Particle Accelerator Conference, IPAC13, (2013), pp151-153.
- [5] C. Yamazaki et al., “群馬大学重粒子線照射施設用偏向電磁石電源の開発”, 第7回日本加速器学会年会, (2010), pp590-592.