

Upgrade project of 1.2 GeV electron synchrotron at Tohoku University

Fujio Hinode ^{#,A)}, Toshiya Muto ^{A)}, Shigeru Kashiwagi ^{A)}, Masayuki Kawai ^{A)}, Yoshinobu Shibasaki ^{A)}, Ken Takahashi ^{A)}, Ikuro Nagasawa ^{A)}, Kenichi Nanbu ^{A)}, Nuanya Huang ^{A,B)}, Hiroyuki Hama ^{A)}

^{A)} Electron Light Science Centre, Tohoku University

1-2 Mikamine, Taihaku, Sendai, 982-0826

^{B)} Institute of Photonics Technologies, National Tsing Hua University, Taiwan

No. 101, Section 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu, Taiwan 30013, R.O.C.

Abstract

In Electron Light Science Centre, Tohoku University, the 1.2 GeV booster synchrotron had been routinely operated as a user facility until the Great East Japan Earthquake damaged the accelerator seriously. In the last year some budgets were approved to partially reconstruct the accelerator complex. For the booster ring, some old power supplies of magnets are replaced. Furthermore some quadrupole magnets are also replaced to the combined function magnets of which sextupole component 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. Since there has been no sextupole in the ring so far, thus the ring current was significantly limited due to head-tail instability. Hence this upgrade will bring the new capability into the ring as a synchrotron light source.

東北大学 1.2 GeV 電子シンクロトロンの改造計画

1. はじめに

東北大学・電子光物理学研究センターでは、今年の東日本大震災に関わる復旧計画の一貫として、1.2 GeV 電子シンクロトロン (STB リング) の復旧・改修作業が進行している。入射用線形加速器の更新に伴って、入射エネルギーが 90 MeV に下がったことにより、STB リングについても大幅な見直し作業が必要となった。

STB リングにおける今回の変更の要点は、1) 振り上げ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、3) Q電磁石の更新、の3点である。1) については、破損した偏向電磁石と4極電磁石のパターン電源を、より高性能な電源と置き換えることで、90 MeV から 1.3 GeV 程度までの広い運転領域において、高い安定度を確保するものである。2) については、もともと低エネルギーでの入射には対応できていなかったが、今回の震災で高圧制御回路も破損してしまったために更新することとなった。3) は、懸案であったクロマティシティーの補正を可能にすることを企図している。これは、直線部の4極電磁石を6極磁場入りの複合機能型電磁石に置き換えるとともに、その直線部に0.6 m 程度の分散関数を導入するものであり、これにより蓄積電流を制限してきた head-tail instability を抑制することが期待できる。これまで、STB リングは主として核物理研究における電子散乱実験のためのパルスストレッチャーとして、また近年では制動放射による高エネルギーのガンマ線生成のために利用されてきた^[1,2]。今回の STB リングの改修・改造計画は、将来の放射光源としてのあらたな利用へ向けて、道をひらくものである。

2. 複合機能型電磁石の導入

2.1 STB リングの概要

STB リングは4セルの double-bend ラティスで構成されており、その主要パラメータを表1に示した。生成されるガンマ線のエネルギーをできる限り高くするため、改造後の最大エネルギーは 1.3 GeV 以上を目指している。

表1: STB リング主要パラメータ

Circumference	49.75 m
Maximum energy	> 1.3 GeV
Injection energy	90 MeV
Betatron tune	(3.24, 1.18)
Natural chromaticity	(-5.586, -4.427)
Corrected chromaticity	(1.384, 1.232)
RF frequency	500.14 MHz
RF voltage	400 kV
Natural emittance	160nmrad (@1.2 GeV)
Momentum compaction	0.0458
Dispersion at straight section	0.6 m
Beam current	200 mA (@1.2 GeV)
Touschek lifetime	> 48 hours (@1.2 GeV)

図1に STB リングのラティス関数を示した。エネルギー分散部にはクロマティシティーを補正する

hinode@lms.tohoku.ac.jp

6 極磁石を設置するスペースが全くないので、もともとは分散関数の無かった直線部に分散関数を導入するとともに、その直線部の 4 極電磁石を 6 極磁場入りの複合機能型電磁石と入れ替えることとした。この分散関数の導入は、ビーム軌道に挿入された標的からの制動放射による高エネルギーガンマ線を利用するユーザー運転においても、散乱電子が周回後に標的部の支持具などに更に衝突するのを抑制することが期待できるため、大変に有用と考えられる^[2]。また、6 極磁場はベータ関数が最大の場所に位置するため、小さな値で効果的にクロマチシティーを補正することが可能である。この結果、広いダイナミックアパーチャの維持も期待できる。複合機能型電磁石の欠点として、基本的には 4 極磁場に対する 6 極磁場強さの比を変更することができないことがある。しかしながら、直線部の分散関数を制御することで、クロマチシティーをある程度は調整することが可能である。図 2 には、分散関数のクロマチシティー依存性を示してある。分散関数を 0.1 m ほど調整すると、クロマチシティーを 0.8 程度変化させることが可能と見込まれている。

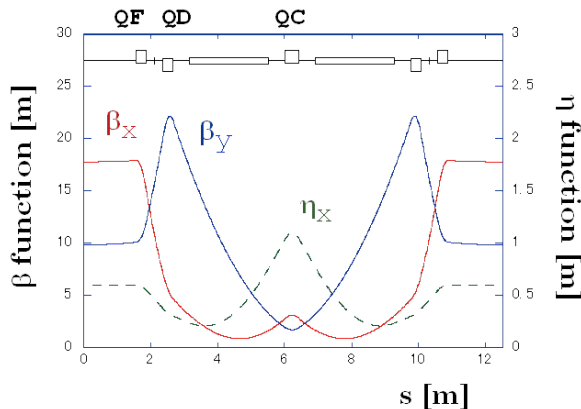


図 1 : STB リングのラティス関数

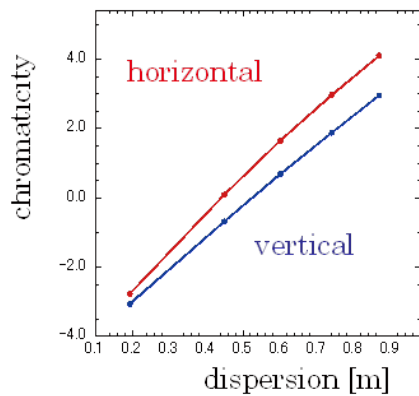


図 2 : 分散関数とクロマチシティーの関係

2.2 複合機能型電磁石

新たに導入される複合機能型電磁石は、既存の 4

極電磁石と入れ替えられるため、磁極面を除いて同一の形状となっている。4 極に対する 6 極磁場強度の比は、それぞれ 2.4 (QF) と 3.8 (QD) である。磁極面は、基本的には指定した磁場強度とボア径から決定される等ポテンシャル面により与えられる^[3]。しかしながら 3 次元磁場計算によると、6 極磁場は 4 極磁場よりも磁場有効長が 7 % 程度短いということがわかっており、このため積分磁場が設計の磁場強度比を与えるように、3 次元計算により磁極面が決定された。磁場の飽和については、6 極磁場は 4 極磁場よりも飽和の影響が大きいと評価されているが、1.3 GeV 程度までの運転においては許容範囲内と見込まれている。また現実的な運転範囲内では、両磁石とも各有効長には励磁電流の依存性は見られなかった。

この複合機能型電磁石の重要な問題として、磁極の機械的中心部における 2 極成分の存在がある。理想的には機械的中心部に 2 極成分は無いはずだが、磁極面を有限の大きさで切り出すために水平方向に磁場中心のずれが生じてしまう。また励磁電流が大きく磁場が飽和し始めると、2 極成分も急激に大きくなることが予想されている。3 次元磁場計算によると、この大きさは 10^3 Tm のオーダーと評価されており、対応するキック量は 0.2 mrad 程度となり無視できない。このため、この 2 極成分を補償するように磁石の設置位置をずらして対処することを検討している。この位置のオフセット量は、QF (QD) 磁石に対して、0.8 (2.0) mm と見積もられている。なお 2 極成分の補正方法としては、バックレグコイルを用いる手法も考えられるが、ブースターモードでの電磁石のパターン運転の立ち上がり時間が 1 秒程度と早いため、採用しなかった。

2.3 ビーム入射と設置誤差

ビームの入射効率をトラッキングシミュレーションにより評価した。バンパ電磁石は、7 周分のビーム入射をカバーするようにフラットトップを約 1.2 μ s とし、その後の 3 周分の時間をかけて磁場が零になると仮定した。S-band の線形加速器から入射されるビームは、リングの 500 MHz の RF には同期していないので、シミュレーションにおけるビームの分布はバンチビームではなく、時間的に連続な分布を持つとした。また入射ビーム電流のピーク値は 1 に規格化して評価を行った。図 3 は電磁石に設置誤差を与えた場合の最初の 20 周分の蓄積電流の推移を示したものである。設置誤差として全幅で 50、100、200、300 μ m の一様分布の誤差を与え、それぞれについて 100 個の組み合わせを作って評価した。図 3 に示した結果は、その 100 個のサンプルに対する平均値を示したものである。設置誤差 50 μ m の場合には、誤差がない場合と蓄積電流に違いは見られなかった。図 3 を見ると、誤差が小さい場合には 5 周目までは蓄積電流がほぼ線形に増加しているのがわかる。6 周目で蓄積電流が減少するのは初めに入射したビームがセプタムに衝突するようになるためであるが、7 周目からはバンパが下がり始めるため、再び電子の損失は僅かになる。設置誤差が無視でき

る場合、およそ 6 周分のビームが蓄積できるが、200 μm になると 5 周分以下まで減ってしまう。線形加速器から入射される電子ビームのマクロパルスの平均電流は 50 mA 以上は確保できるものと見込まれており、従って、この場合でもスタッキングをすることなしに、200 mA 以上の蓄積電流を得ることは十分に可能と考えられる。なお設置誤差が最大 $\pm 150 \mu\text{m}$ までになると、蓄積電流は平均で 3 周分程度まで下がってしまい、ミスアラインメントの組み合わせによっては、最悪の場合 0.1 周分しか蓄積できないケースも存在している。また、このトラッキングシミュレーションの結果からは、鉛直方向の物理的口径が $\pm 20 \text{ mm}$ と狭いため、入射効率も鉛直方向の COD に強く依存していることがわかっている。この結果、鉛直方向の設置誤差は水平方向に比べて影響は大きい。現在、アラインメント作業としては $\pm 100 \mu\text{m}$ 以下の設置精度での据え付けを目標としているが、特に鉛直方向の測定については比較的容易であることから、設置誤差に起因する大きな問題は生じないものと考えている。

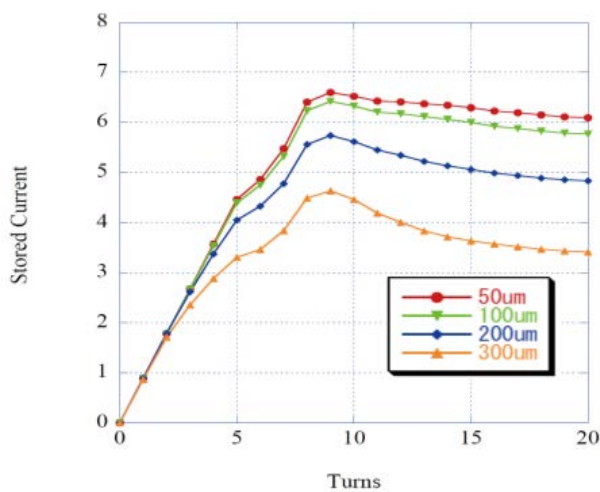


図 3 : 蓄積電流の時間推移と設置誤差依存性
上から順に、全幅で 50、100、200、300 μm のような分布の設置誤差を与えた場合の蓄積電流の減少を示す。各プロットは、各設置誤差に対してとった 100 個の組み合わせの平均値である。設置誤差 50 μm の場合、誤差がない場合と蓄積電流はほぼ同じであった。

3. 現状と今後の展望

現在、復旧と再構築のための作業が急ピッチで進められている。これまでに加速器本体の設置されている実験室内部の整備・改修がほぼ終了し、古いビームラインの撤去も、昨年度中に完了している。現在製作中の電磁石電源については、本年末に現地調整を実施する運びとなっている。また、複合機能型電磁石については現在、順調に製作が進行しており、本年秋に設置作業が始まる予定である。

今回の改造作業により期待される光源加速器の性能として、図 4 に偏向電磁石とアンジュレータからの放射光輝度を示した。曲率半径 3 m の偏向電磁石からは、1 keV 程度のピークエネルギー領域で $5.6 \times 10^{12} \text{ photons/s/mrad}^2/0.1\% \text{ BW}$ の光束密度を得ることが可能である。これは先端的な利用研究に適用されるには、必ずしも十分な値ではないが、それでも大学の放射光利用分野における教育目的の専用ビームラインとしては、十分に意味のあるものと考えている。また更には、将来の発展として、挿入光源のために 2 m の直線部を確保してあり、例として一般的なアンジュレータ (周期長=50 mm、周期数=36 周期、 $K_{\text{max}}=2.0$) を仮定すると、 $10^{16} \text{ photons/s/mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\% \text{ BW}$ に近い輝度の光が VUV 領域で利用可能になると期待されている。また平均的なベータ関数を用いて、Touschek 寿命を大まかに評価したところ約 48 時間という結果が得られており、このため現状でビーム寿命を制限する要因としては、真空容器内の残留ガスとの散乱による寄与が支配的であると予想される。現在、NEG ポンプの導入などによる排気速度の増強が検討されているが、真空システムの改善は今後の重要な課題のひとつと考えている。

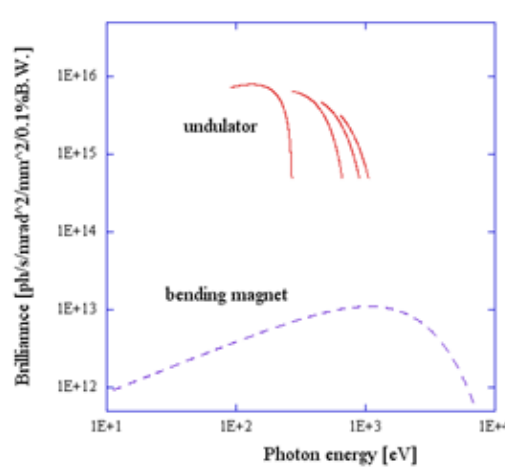


図 4 : 1.2 GeV 運転にて期待される放射光輝度
ビーム電流 : 200 mA、カップリング : 1 % を仮定。

参考文献

- [1] F. Hinode, et al., Proc. Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, pp. 106-108, 2001.
- [2] F. Hinode, et al., Proc. 21st Particle Accelerator Conference, Knoxville, USA, pp. 2458-2460, 2005.
- [3] A. Andersson, et al., Design Report for the MAX II Ring, ISSN 0284-1258 ISRN LUNTDX/NTMX-7019-SE, MAX-lab, University of LUND, 1992.