

MULTI-BUNCH BEAM ENERGY COMPENSATION FOR ATF LINAC

S. Kashiwagi, ¹H. Hayano, ¹F. Hinode, ¹K. Kubo, ¹H. Matsumoto, ²S. Nakamura, ¹T. Naito, ¹K. Oide, ¹K. Takata, ¹S. Takeda, ¹N. Terunuma, ¹J. Urakawa, ³T. Okugi, ⁴M. Kagaya, ⁵S. Morita

The Graduate University for Advanced Studies
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305, Japan

¹National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305, Japan

²Department of Physics, Faculty of Education, Yokohama National University
156 Tokiwadai, Yokohama, Kanagawa, Japan

³Department of Physics, Tokyō Metropolitan University
1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyō, Japan

⁴Tohokugakuin University
1-13-1 Chuo, Tagajo, Miyagi, Japan

⁵E-CUBE Co., Ltd
5988-8 Hino, Hino-shi, Tokyo, 191, Japan

Abstract

The 1.54 GeV S-band linac for the Accelerator Test Facility (ATF) accelerates multi-bunch beam. The beam has 20 bunches of 2×10^{10} electrons with 2.8 ns bunch spacing. As multi-bunch beam is accelerated in the linac, the beam has the energy deviation by the transient beam loading. The 1.54 GeV S-band Linac is an injector of the damping ring (DR), and the energy acceptance of the DR is $\pm 0.5\%$. This means that the beam loading compensation system is necessary in ATF for a successful operation of multi-bunch scheme. The system consists of compensating section in addition to regular accelerating section. The accelerating structures of compensating section are operated with slightly different RF frequencies of 2856 ± 4.327 MHz. This paper describes the principle of the beam loading compensation system and the results of this compensating experiment.

ATF リニアックにおけるマルチバンチビームエネルギー差補正

1. はじめに

次世代リニアコライダーで高いミノシティーを得るためには、マルチバンチビームによる運転が必要不可欠である。しかし、ビームのパルス長が加速管のフィーリングタイムよりも短いマルチバンチビームを、定加速勾配型の加速管で構成されたリニアックで加速した場合、先頭のバンチから後方のバンチに行くにしたがって、加速管内での過渡モードにおけるビームローディングにより、エネルギー利得がほぼ線形に減少してしまう。このマルチバンチビームの過渡モードにおける加速管内のビームローディング電圧 (E_b) は、先頭バンチが加速管に入射したときを $t=0$ とすると以下のように表せる。

$$E_b(t) = \frac{r_0 i_0 L}{2} \left[\frac{2\tau e^{-2t}}{1-e^{-2t}} \frac{t}{t_f} - \frac{1-e^{-2t/t_f}}{1-e^{-2t}} \right]$$

ここで r_0 , t_f , L , τ は、それぞれ加速管のシャントインピーダンス、フィーリングタイム、加速管全長である。また電流 i_0 は

$$i_0 = \frac{e N_e}{t_{sp}}$$

であり、バンチ間隔 t_{sp} と1バンチ当りの電子数 N_e 、素電荷 e より求まるバンチトレインの平均電流値である。

このように、ビームローディングによって生じるマルチバンチビーム内のエネルギー差を補正する方法にはいくつかあるが、ATFでは基本周波数 (f_0) とは異なる周波数 ($f_0 \pm \Delta f$) の加速管をリニアックの途中に入れることによって、エネルギー差を圧縮する補正方法を採用した。このエネルギー差補正の原理は、バンチ間隔が一定のマルチバンチビームが異なる周波数 ($f_0 \pm \Delta f$) の加速管を通過する際、RFの周波数が基本加速周波数 (f_0) と

異なるために先頭のバンチから後続のバンチにいくにしたがってずれた位相で加速され、加速(減速)のされ方に差が生じる。そして、先頭のバンチが最も減速され、最後尾のバンチが最も加速される位相にマルチバンチをのせることによって、マルチバンチビームローディングによってできたエネルギー差を補正することができる(図1)。この方法は、クライストロンやパルス圧縮器(SLED)からのrf出力を最大限に活用してマルチバンチを加速し、その結果生じたエネルギー差を、リニアックの途中にある、 $\pm \Delta f$ エネルギー差補正ユニットでエネルギー差を圧縮することができるため、ビームのRFに対する入射のタイミングを変えることによってエネルギー差補正をする方法よりも、リニアックでの加速効率が高い。そして、補正用加速管内で加速正弦波のスロープの部分でビームを加速することによってできる、シングルバンチ内のエネルギー差は、2つのずれた周波数 ($\pm \Delta f$) を用いることによって打ち消すことができる。また、この補正方法はマルチバンチビームの電流量が変化した場合もRFの出力パワーの調整のみで柔軟に対応できる。

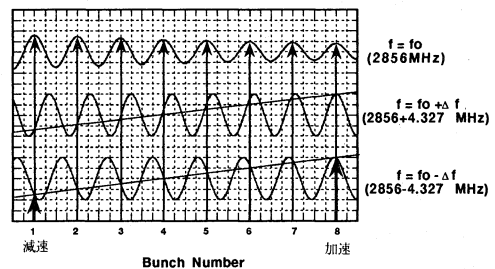


図1 $\pm \Delta f$ エネルギー差補正原理

2. ATFにおけるエネルギー差補正システム (ECS)

ATFではバンチ数; 20バンチ、バンチ間隔; 2.8nsの大電流マルチバンチビームの加速を行っている。そして、マルチバンチビームをリニアックで1.54GeVまで加速した後、超低エミッタンスビームを作り出すダンピングリング (DR) にビームを入射するが、このダンピングリングのエネルギーアクセプタンスが $\pm 0.5\%$ と小さい。マルチバンチビームの加速管への入射タイミングを調整することによって行うエネルギー補正などを行わなかった場合、1バンチあたりの電子数が 2.0×10^{10} 個で20バンチのマルチバンチビームを加速すると、加速管での過渡的ビームローディングによってリニアック全体で約8%のエネルギー差ができてしまう (図2)。そのためビームを損失なくDRへ入射するためには、過渡的ビームローディングによって生じるマルチバンチビーム内のエネルギー差を圧縮するためのエネルギー差補正システムが必要である。

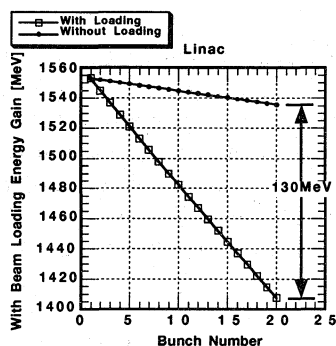


図2 リニアック全体でのエネルギーゲイン (レギュラーユニットでSLEDを使用し、加速管のフィリングタイム後にビームを入射した場合)

エネルギー補正実験セットアップ

ATFリニアックは、S-band(2856MHz)のレギュラー加速管16本と補正用の加速管2本 (2856 \pm 4.327MHzが各1本) が図3の様に配置されている。この補正用の加速管へのRFパワーの供給には、SLAC5045クライストロンを使用し、RFのパルス幅は1.0 μ sとした。

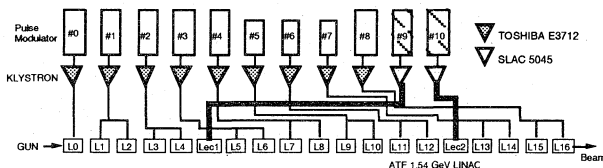


図3 ATFリニアック加速管の配置 (L01-L16 regular sections, LEC1,2 compensating section)

タイミングシステム [1][2]

ATFにおける全てのリファレンス信号は1つのmaster oscillatorによって作り出された信号 (1428MHz-CW) から分配されており、そのうち加速周波数 (2856MHz) のリファレンス信号は、master oscillatorからの1428MHzの信号を2逡倍することによって作られ、他のリファレンス信号もまた分周器によって作り出されているため、全てのコンポーネントで同期がとれている。そして、エネルギー差補正用周波数 ($f_0 \pm \Delta f$) は、714MHzの信号を1/165倍に分周して作られるサイドバン

ド信号 ($\pm \Delta f$) と加速周波数 (2856MHz) のリファレンス信号の2つの信号を特別な変調器内で合成することによって作られる。このサイドバンド信号の周波数はDRの周回周波数 (2.16MHz; 714MHzの1/330) と同期をとるため、および加速するマルチバンチのバンチ数から4.327MHzに決められた。また、エネルギー差補正セクションでは加速正弦波のスロープ部分の位相でバンチを加速するため、エネルギー差補正のためのリファレンス信号のゆらぎはエネルギー補正に大きく影響する。今回使用した、補正用のリファレンス信号のphase jitterは全幅で1.7 ps ($\sigma=0.8$ ps)であった。

エネルギー測定システム

マルチバンチエネルギー差補正後の各バンチの相対的なエネルギー関係は、ビームトランスポートライン (BT) 入口付近に設置してあるストリップライン型ビーム位置モニター (BPM) で、偏向電磁石で曲げられたビームのエネルギーの違いによる、基準軌道からの各バンチの水平方向のずれ (Δx) の大きさを測定し、そのずれ (Δx) の大きさとBPMの設置してある位置でのdispersion function (η) から求めた。

また、シングルバンチのエネルギー分布の測定も同じくビームトランスポートライン入口で行った。測定方法はプロファイルモニターのスクリーンにSUS板を使用し、ビームがスクリーンに衝突した時に真空とスクリーンとの境界で生じるOTR光 (Optical Transition Radiation Light) を高速ゲートカメラで3ns程度のゲートをかけ光を観測することによって測定した。

3. マルチバンチビームエネルギー差補正実験

補正用RFのタイミング及び位相調整

補正用クライストロンからのRF出力とビームの間のタイミング調整は、リニアック下流のプロファイルモニターを使い、OTR光を観測することによって行った。最初に、測定に使用するカメラのゲートのタイミングは、バンチレインの中央付近のバンチに合わせ、プロファイルモニターのスクリーン上に基準位置を決めておく。そして、補正用電源 (9,10号機) のRFのタイミングをそれぞれ100nsステップで変化させ、RFのタイミングを1ステップ変えるごとにビームの中心が基準位置にくるように偏向電磁石の電流値を変えて調整し、その時の電流値からビームのエネルギーを測定した。この操作を繰り返し行い、タイミングを1.8 μ sスキャンをした時の、ビームのエネルギーとRFタイミングの関係をプロットすると図4のような結果になった。

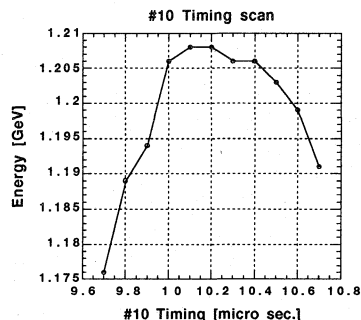


図4 補正用RFのタイミング調整

また同様に位相調整はOTR光を観測しながら、補正用加速管に供給するRFの位相を20度ステップで変化させた。この時のビームエネルギーとRF位相の関係は図5のようになった。この2つの測定結果より、補正用RFのタイミング及び位相を決定した。

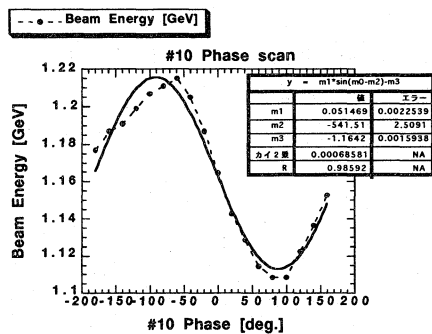


図5 補正用RFの位相調整

マルチバンチビームエネルギー測定 [3]

ビームのエネルギー測定はBPMの水平方向の電極から検出される信号を、850MHzガウシアンローパスフィルターを通してデジタルオシロスコープ(2.5GHzサンプル)を用いて測定し、そのデータを GPIB でパソコンに取り込んだ。今回の測定の位置分解能は、オシロスコープを使用したことによって制限され、測定レンジ、信号振幅およびBPMの位置感度係数などから位置分解能は約22.5 μmであった。この位置分解能をBPMの設置位置での dispersion function ($\eta=68.5$ cm) を用いてエネルギー分解能に換算すると0.003%に相当する。この値は、DRのエネルギーアクセプタンス±0.5%より十分小さいため補正後の各バンチのエネルギー差を測定するのに、十分な分解能であると考えられる。先に示した dispersion function の値 ($\eta=68.5$ cm) はSADの計算結果であるが、まえもって実際にビームを用いて、今回測定に使用したBPMの位置での dispersion function (η) の校正を行った。その結果、SADの計算値とビームを用いて測定された値 ($\eta_b=58.82$ cm) とは約14%の差が生じた。しかし、1%以下のエネルギー差を評価するのに、この差は十分許容範囲と考えられるため、今回の実験では、SAD計算値の dispersion function を採用した。

マルチバンチビームエネルギー差測定結果

今回加速したマルチバンチビームのリニアック下流での全電荷量は約 3.2×10^{10} (electrons / train) であった。電荷分布は図6の様になっていた。

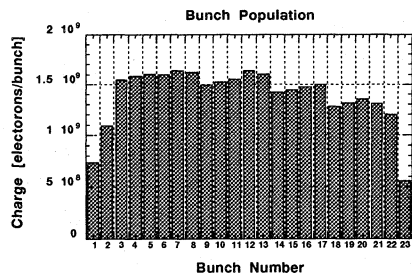


図6 各バンチの電荷分布

この各バンチの電荷量は、リニアック中の積分型電流モニターで測定された1つのバンチトレインの総電荷量

を、壁電流モニターから検出されるマルチバンチビームの信号振幅の比で分配することによって求めた。そして、補正を行った場合と行わなかった場合の、マルチバンチ内の各バンチの相対的なエネルギー関係を、前に述べたビームトランスポートラインのBPMを用いて測定した結果は図7のようであった。先頭の方のバンチのエネルギーが下がってしまっているのは、ビームがBPMの直前にあるコリメータによって削られてしまったためと思われる。

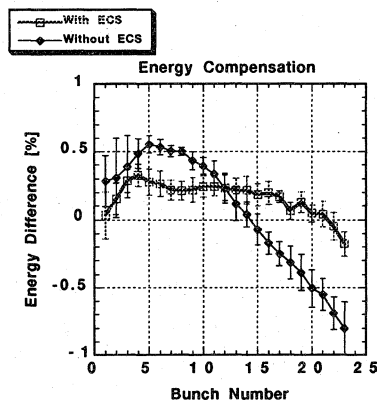


図7 補正後のマルチバンチビームエネルギー分布

4. まとめ

今回、20バンチ (全電荷; 3.2×10^{10} electrons / train) のマルチバンチビームを約1.16 GeVまで加速し、ビームローディングにより~2.0%のエネルギー差が予想される場所を、ダンピングリングのエネルギーアクセプタンスである±0.5%以下に補正することに成功した。これによって、異なる周波数 ($f_0 \pm \Delta f$) の加速管を用いたエネルギー差補正の原理が実際に可能であることを確認することができた。今後、補正用RFの位相調整及び各バンチのエネルギー測定の方法などを自動的にできるように開発していきたいと考えている。またエネルギー補正が、dispersionやchromaticな効果から生じるエミッタンス増大へ、どのような影響を与えているかをビーム実験などを行い詳細に調べる必要があると思われる。

謝辞

今回のビーム実験を行うにあたり、終始助言とご協力を頂いた高エネルギー物理学研究所ATFグループの方々へ深く感謝いたします。また、高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の設定氏、本間氏には、ECS用のクライストロン変調器を快く貸し出して頂き、本実験が実現できました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T.Korhonen et. al. R&D of the ATF Timing System. Proc. Int. Linac Conference (LINAC94)
- [2] T.Korhonen et.al.:Energy Compensation System in ATF Linac; Proc. of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan (1995)
- [3] HHayan o : ビーム診断(ハードウェア編); FFIR Workshop at Atami (1994)