

# 励振系 RF -A 変調による初期ビームローディング補正

佐藤 政則<sup>\*A)</sup>、松本 利広<sup>A)</sup>、設楽 哲夫<sup>A)</sup>、福田 茂樹<sup>A)</sup>、小林 仁<sup>A)</sup>、神谷 幸秀<sup>A)</sup>、中村 典雄<sup>B)</sup>、小関 忠<sup>C)</sup>、三浦 禎雄<sup>D)</sup>、境 武志<sup>E)</sup>、横山 和枝<sup>F)</sup>、早川 恭史<sup>F)</sup>、早川 建<sup>F)</sup>、田中 俊成<sup>F)</sup>、佐藤 勇<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<sup>B)</sup> 東京大学物性研究所軌道放射物性研究施設

〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

<sup>C)</sup> 理化学研究所ビーム物理工学研究室

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

<sup>D)</sup> 三菱重工業株式会社

〒729-0393 広島県三原市糸崎町 5007 番地

<sup>E)</sup> 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>F)</sup> 日本大学量子科学研究所電子線利用施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

## 概要

電子ライナックを利用した低速陽電子利用実験においては、ロング・パルスかつ大電流の電子ビームを加速し、これを金属ターゲットに当てて、大強度かつ高輝度の低速陽電子を発生させる必要がある。このようなビーム加速技術は、電子ライナックを利用した自由電子レーザー(FEL)や将来のリニアコライダーにおいても要求されている。このためには、1RF パルス内で複数のバンチを加速するマルチ・バンチ運転が適しているが、過渡的なビームローディング(初期ビームローディング)の効果により、パルス内で大きなエネルギー広がりが生じる。このようなエネルギー広がり、ビームロスや加速管及び下流ビームラインでの深刻な放射化を引き起こす可能性がある。したがって、ビームロスを起こさない高品質の電子ビームを得るために、初期ビームローディング効果の補正が必要不可欠となる。本発表では、このような初期ビームローディング効果を補正し、パルス内エネルギー広がりを完全に抑制するための補正システムについて発表する。また、日本大学量子科学研究所電子線利用施設にて行ったビーム試験の結果について報告する。

## 1. はじめに

大電流かつロング・パルスの電子ビームでは、バンチ・トレイン後方に行くに従い、負の縦方向ウェイクポテンシャルが増大することにより、後続バン

チの受ける加速電場が先頭バンチと比較して減少する。ビームパルス幅が加速管フィリングタイムよりも長い場合には、加速管内の電場は1フィリングタイムの間減少し続け、その後定常状態となる。

このような初期ビームローディング効果を補正する方法には、トリガタイミング<sup>[1]</sup>・スタグガードタイミング<sup>[2,3]</sup>・ $\Delta f$ 補正方式<sup>[4]</sup>などがある。トリガタイミング補正では、加速管がRFパワーで満たされる前に電子ビームを入射し、パルス先頭でのビームエネルギーを意図的に下げることにより、エネルギー広がりを抑制する。また、スタグガードタイミング補正においては、複数加速管でのトリガタイミングを互いにずらすことにより、単純なタイミング補正よりも高精度なエネルギー補正が可能である。これら2つの補正方法は、トリガタイミングを調整するのみなので、システム構成が単純である。 $\Delta f$ 補正方式では、基本加速周波数  $f_0$  よりもわずかに高い( $f_0 + \Delta f$ )及び低い( $f_0 - \Delta f$ )周波数の補正セクションを用いることにより、パルス内に加えてバンチ内でのエネルギー広がりも同時に補正することが可能である。しかしながら、補正用周波数の生成・同期に高度な技術が要求され、補正システムが複雑かつ大がかりになる。また、加速管1本から構成される小規模ライナックには適用することが不可能である。

初期ビームローディング効果によるエネルギー広がりを、加速管毎に完全に抑制(ローカル補正)するためには、振幅変調補正方式( $\Delta T$ )<sup>[5,6,7]</sup>が適している。振幅変調補正方式では、加速管のフィリング

\* masanori.satoh@kek.jp

タイムの間はランプ波形で立ち上がり、その後は一定のパワーになるようなクライストロン出力を加速管に入力する。電子ビームをフィリングタイム後に入射することにより、加速管内での電場分布は、定常状態の電場分布のまま一定に保たれる。このとき、電子ビームのエネルギーはパルス内で一定となり、エネルギー広がりを完全にゼロに抑制することが可能である。我々の補正システムでは、励振系の低電力 RF を振幅・位相( $\Delta\Phi$ -A)変調することにより、振幅変調補正方式を実現する。

## 2. 初期ビームローディング補正システム

本研究の補正方法では、クライストロンをドライブするための低電力 RF の振幅・位相を同時に変調し、クライストロン出力振幅を目標の波形で出力しつつ、それと同時に位相はパルス内で一定となるように制御する。しかしながら、クライストロンは高ゲインかつ非線形デバイスであり、入力振幅を変調することによる出力制御は非常に困難であると思われ、このような変調方式は採用されることがなかった。しかし、我々は、アンプ系(クライストロン及びプレアンプ)全体の入出力特性を予め測定し、その特性を考慮することによって高精度な出力制御を試みた。

すでに、励振系 RF 変調のための" $\Delta\Phi$ -A 変調器"<sup>[8]</sup>及び高速位相検出のための" $I/Q$  検出器"<sup>[9]</sup>の開発及び試験を行い、満足な結果を得た。 $\Delta\Phi$ -A 変調器は二台の移相器(Phase shifter)、 $I/Q$  検出器は二台の DBM(Double-Balanced-Mixer)から構成されており、非常に単純な回路構成であるため高い耐久性・信頼性が期待できる。さらに、コンパクトなシステムであるため、既設のクライストロンシステムへの組み込み及び撤去も容易である。

図 1 は、補正システムのブロック図を示している。 $\Delta\Phi$ -A 変調器に入力された低電力 RF は、二分割された後に異なる移相器へ入力される。各々の移相器を、独立の任意波形発生器(FG)により制御して、目標の振幅・位相波形を持った RF 信号を出力する。クライストロン出力は、 $I/Q$  検出器及び RF 検出器(検波器)を用いてオシロスコープにより測定する。 $I/Q$  検出器を用いれば、振幅及び位相を同時に測定することが可能であるが、入力信号の位相及び振幅に依存した

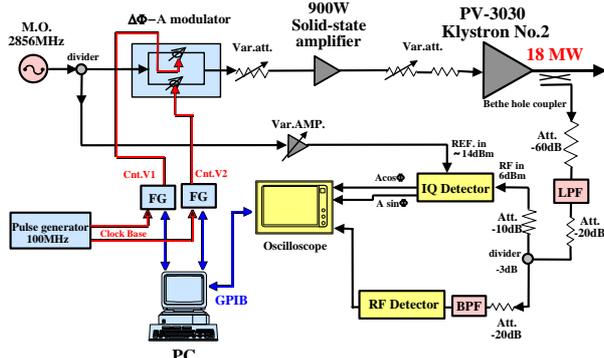


図 1 : 補正システムのブロック図

振幅測定誤差が大きいため、本実験では位相検出のみに用いた。

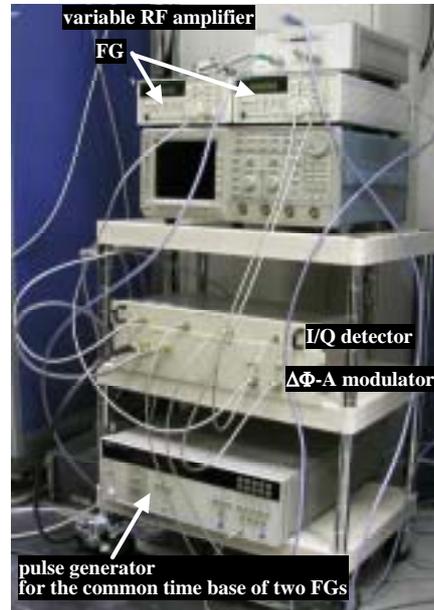


図 2 : 補正システムの写真

## 3. ビーム試験

補正システムの実用性を確認するために、日本大学量子科学研究所の電子線利用施設にてビーム試験を行った。図 3 に示すように、本施設の 125MeV 電子ライナックは、クライストロン 2 台と 4m 加速管(110 セル)3 本から構成されている。加速後の電子ビームは、偏向電磁石(BM1,BM4)によって FEL 及びパラメトリック X 線ビームラインに導かれる。本実験では、加速管 2 本をドライブしている 2 号機クライストロン上流側の IΦA システムの代わりに、 $\Delta\Phi$ -A 変調システムを設置した。ビームエネルギーの測定は、直線部下流の偏向電磁石(BM4)の励磁電流値を変化させ、ビーム波形をコアモニタ(CM7)で繰り返し観測することによって行った。本測定は、BM4 下流のスリット幅を $\pm 1\text{mm}$ (エネルギー分解能 $\pm 0.15\%$ )に設定して行った。ビーム試験の主なパラメータは、表 1 に示した。

図 4 はビームエネルギーの測定結果であり、補正前(黒)及び補正後(青)の測定値(丸印)及び計算値(点線)を表している。計算値は、コアモニタによる測定ビームパルス波形及びクライストロン出力波形より求めた。測定値と計算値の誤差は、ビームパルス先頭で特に大きくなっている。これは、パルス先頭でのビーム強度が弱く測定誤差が大きいことや、測定中のビームエネルギー変動が原因と考えられる。

図 4 の測定値が示すように、補正前 24%であったエネルギー広がり、本補正システムを用いること

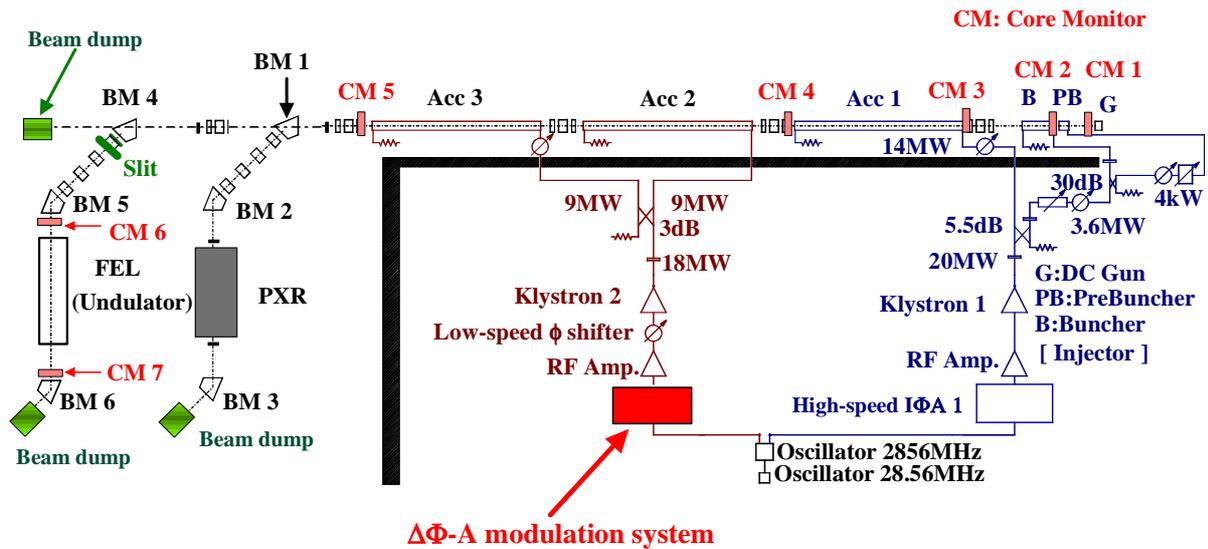


図 3 : 測定セットアップ

により、補正後には 6%程度にまで抑制することができた。この補正後に残るエネルギー広がり、一本目の加速管における初期ビームローディング効果によるものであり、1号機クライストロンにも同様のシステムを組み込めば、エネルギー広がりを完全に抑制することが可能である。このビーム試験により、本補正システムの有効性・実用性を実証することができた。

#### 4 . まとめ及び今後の課題

本研究では、励振系 RF の振幅・位相変調による初期ビームローディング補正方法を提案し、これに必要な補正システムを開発した。ビーム試験の結果から、本補正システムを用いることにより、初期ビームローディング効果を高精度に補正し、エネルギー広がりを抑制可能であることを確認した。

今後は、高速な DSP ボードを用いたパルス毎のフィードバック制御を行い、速いエネルギー変動を完全に抑制する補正システムを開発予定である。

表 1 : ビーム試験のパラメータ

ビームエネルギー	
補正後	89 MeV
補正前	100 MeV
ビームパルス幅	2.3 μsec
平均ビーム電流値	
DC gun	180 mA
Acc1	140 mA
Acc2,Acc3	100 mA
出力パワー	
クライストロン 1	20 MW
クライストロン 2	18 MW

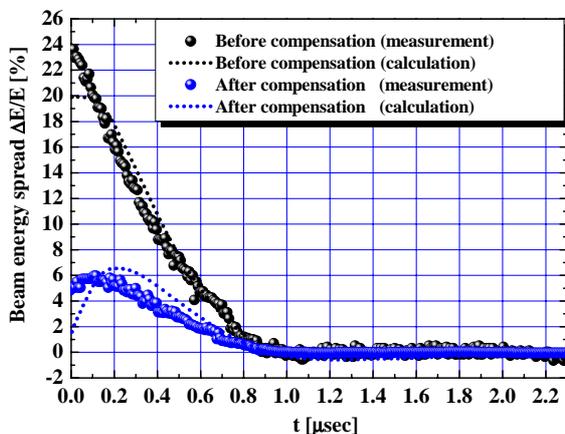


図 4 : ビームエネルギー測定の結果

#### 参考文献

- [1] J. W. Wang, "RF PROPERTIES OF PERIODIC ACCELERATING STRUCTURES FOR LINEAR COLLIDERS", SLAC-339 (1989).
- [2] R. H. Helm, H. A. Hogg, R. F. Koontz, G. A. Loew, R. H. Miller and R. B. Neal, "RECENT BEAM PERFORMANCE AND DEVELOPMENTS AT SLAC", IEEE Trans. Nucl. Sc. NS-16, No.3 pp.311-315 (1969).
- [3] I.V. Syrachev and T. Higo, "Numerical Investigation of Transient Beam Loading Compensation in JLC X-band main linac", KEK Report 96-8 A (1996).
- [4] S. Kashiwagi, H. Hayano, F. Hinode, K. Kubo, H. Matsumoto, S. Nakamura, T. Naito, K. Oide, K. Takata, S. Takeda, N. Terunuma, J. Urakawa, T. Okugi and M. Kagaya, "Preliminary Test of +-ΔF Energy Compensation System", KEK Preprint 96-110 (1996).
- [5] K. A. Thompson and R. D. Ruth, "Simulation and Compensation of Multibunch Energy Variation in NLC", Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference, p.3693 (1993).
- [6] I. V. SYRACHV and T. HIGO, "Numerical Investigation of Transient Beam Loading Compensation in JLC X-band Main Linac", KEK Report 96-8 A (1996).
- [7] S. Kashiwagi et al., "Beam Loading Compensation using Phase to Amplitude Modulation Method in ATF", ATF INTERNAL REPORT 98-27 (1998).
- [8] M. Satoh et al., "COMPENSATION OF INITIAL BEAM LOADING FOR ELECTRON LINACS", Proceedings of the Seventh European Particle Accelerator Conference, Vienna, pp. 2462-2464 (2000).
- [9] M. Satoh et al., "First Beam Test of ΔΦ-A Initial Beam Loading Compensation for Electron Linacs", Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conference, pp. 3954-3956 (2001).