

論文内容の要旨

論文題目

Study of Initial-Beam-Loading Compensation for Electron Linacs
(電子線形加速器のための初期ビームローディング補正の研究)

氏名：佐藤 政則

本研究では、電子線形加速器のための初期ビームローディング補正システムに関する開発研究を行った。Super-SOR 計画では、光源リングの入射器である電子線形加速器（ライナック）を利用して、ロング・パルス（ビーム・パルス幅 $2\mu\text{sec}$ ）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ことが計画されている。大電流かつロング・パルスの電子ビームは、ライナックの加速管内で高周波エネルギーを大量に吸収し、加速電場を著しく減少させる。このような過渡的現象は、初期ビームローディング効果として知られ、ビーム・パルス内でのエネルギー広がりを引き起こす。このようなエネルギー広がり、深刻なビームロス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の補正が必要不可欠となる。

このような補正システムとしては、

- トリガタイミング補正方式（加速管がRF パワーで満たされる前に、電子ビームを入射する）
- スタッガード・タイミング補正方式（上の方式において、複数加速管でのタイミングを互いにずらす）
- Δf 補正方式（基本加速周波数よりも、わずかに高い及び低い周波数の補正セクションを用いる）

などが用いられてきた。しかしながら、これらの補正方法では、加速管毎に完全に初期ビームローディングを補正することは、原理的に不可能である。そのために、Super-SOR を始めとした将来の大強度ライナックにとって、従来の方法による初期ビームローディングの補正は十分とは言えない。このような理由から、振幅変調方式による新しい補正システムの開発を行った。

振幅変調方式では、加速管のフィリングタイム（加速管がRF で満たされる時間）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ゲインはパルス内で一定となり、エネルギー広がり完全にゼロに抑制することが可能である。本研究では、このような振幅変調を実現するために、励振系 RF を振幅・位相 ($\Delta\Phi$ -A) 変調する方式を採用した (図1)。本方式では、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る、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。本研究では、移相器 (Phase shifter) を二台用いた “ $\Delta\Phi$ -A 変調器” (図2) と、高速な位相検出のための “1/Q 検出器” を開発し、クライストロン出力の制御を行った。これらの装置は、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。

$\Delta\Phi$ -A 変調器・1/Q 検出器の性能評価を、ローパワー及びハイパワーで行い、満足な結果を得た。ハイパワー試験の結果と Super-SOR 低速陽電子モード (クライストロン出力 30MW, 平均ビーム電流値 300mA を仮定) のパ

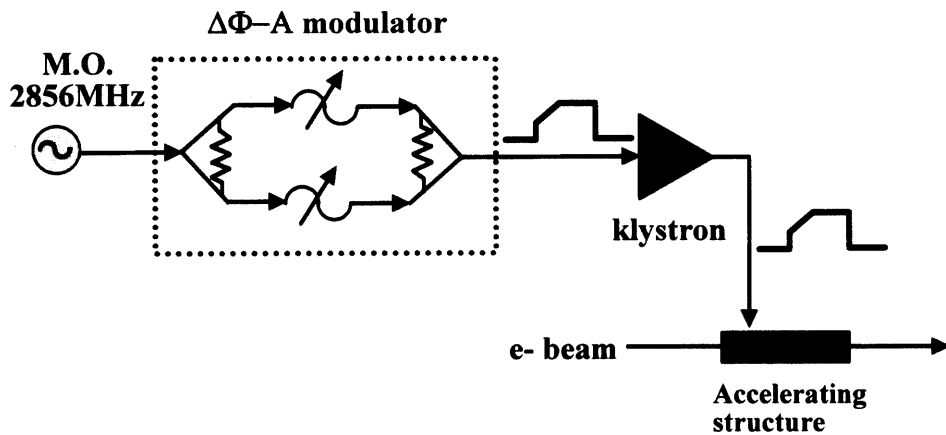


図1: 励振系 RF $\Delta\Phi$ -A 変調方式の概念図

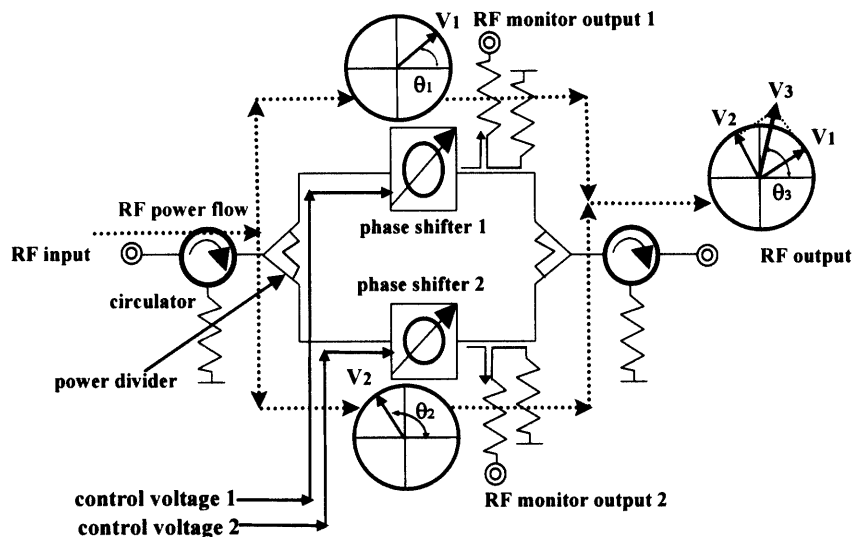


図2: $\Delta\Phi$ -A 変調器のブロック図

ラメータを用いた計算機シミュレーションも行った。この結果、補正前 27%のエネルギー広がりを、本システムを用いることにより、0.3%程度に補正可能であることがわかった。

$\Delta\phi$ -A 変調器の実用性を確認するために、日本大学原子力研究所の FEL (自由電子レーザー) 施設にてビームテストを行った。図3に示すように、本施設はクライストロン 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 I ϕ A システムの代わりに、今回開発した $\Delta\phi$ -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 1mm に設定して行ったが、これはエネルギー分解能 0.15% に相当する。ビームエネルギーの測定結果は、図4のようになった。補正前 (黒) 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

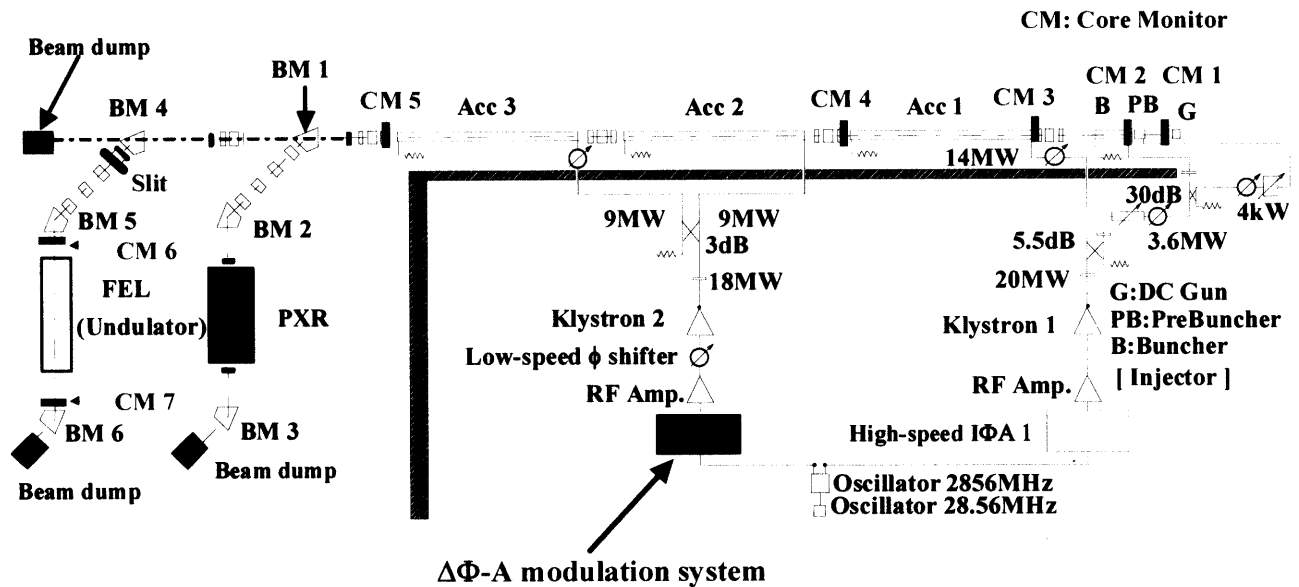


図3: ビームエネルギー測定実験セットアップ

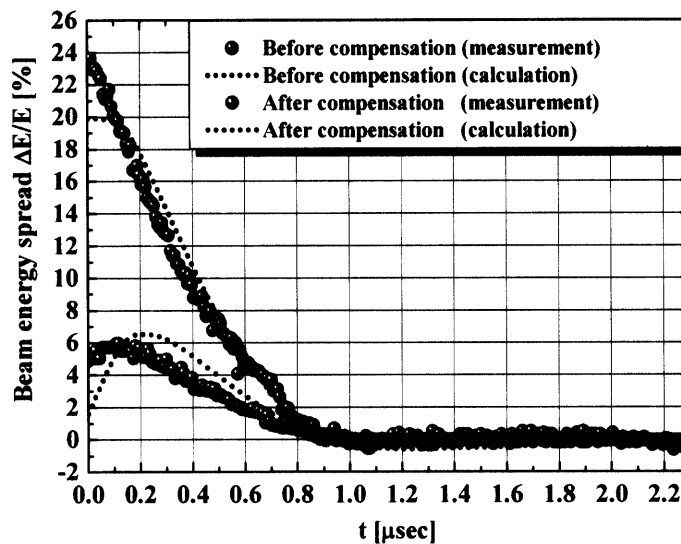


図4: 補正前後のビームエネルギーゲイン
(測定値及び計算値)

とにより、補正後（青）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。このビームテストにより、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。

本研究では、ビームエネルギーを評価するための新しい数値計算の方法も考案した。この方法では、加速管中の RF の伝搬を、マトリックス（パワーフローマトリックス）を用いた単純なアルゴリズムで計算する。そのため、高速な計算が実現できる。Super-SOR 低速陽電子モードのパラメータに対して、解析的な式を用いた計算結果と比較したところ、ほぼ完全に一致することがわかった（図5）。これにより、パワーフローマトリックスによるビームエネルギー計算は、有効な方法であることを確認できた。パワーフローマトリックスの方法を応用すれば、任意ビーム波形・任意目標ビームエネルギーに対して必要な加速管入力 RF パワーを、簡単に計算することも可能である。

以上のように、本研究の成果により、現在及び将来のライナックにおける初期ビームローディングによるエネルギー広がりを高精度で補正し、エネルギーの安定した高品質のビームを供給することが可能となる。

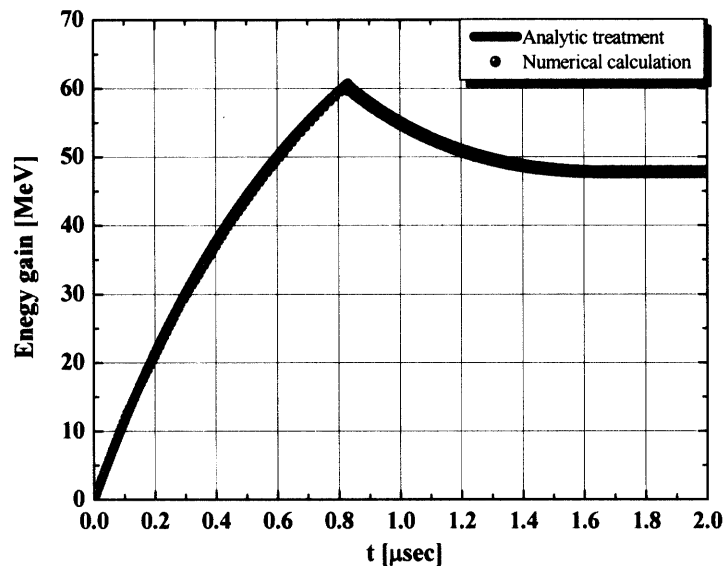


図5：ビームエネルギー計算の結果
(解析的な取り扱い及び数値計算の方法)