

Transient Beam Loading in Pulsed Traveling-wave Electron Linac

M. Oyamada K. Yamada and Y. Torizuka

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

1-2-1. Mikamine, Sendai 982

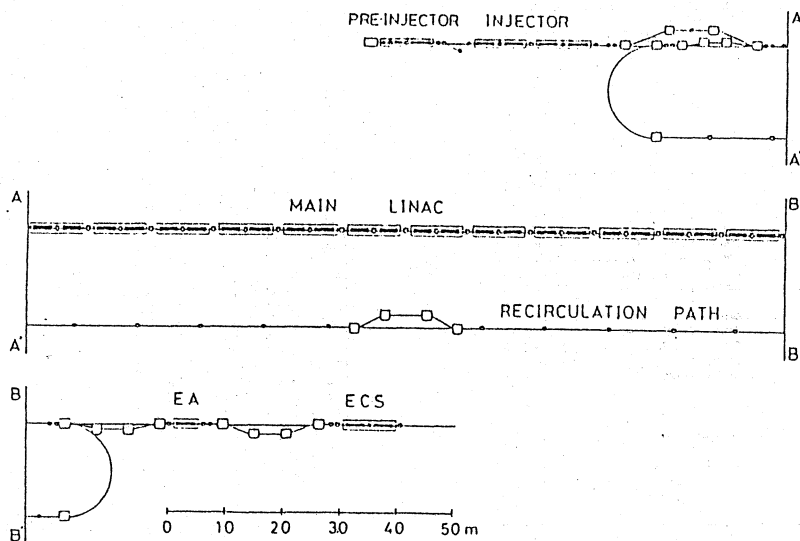
Abstract

A beam pulse recirculation system will be adopted for the Tohoku 4 GeV Linac to reduce the cost significantly. It is very important to minimize the effect of transient beam loading in this system. This report describes some methods to compensate this effect by selective timing of klystrons and varying their power.

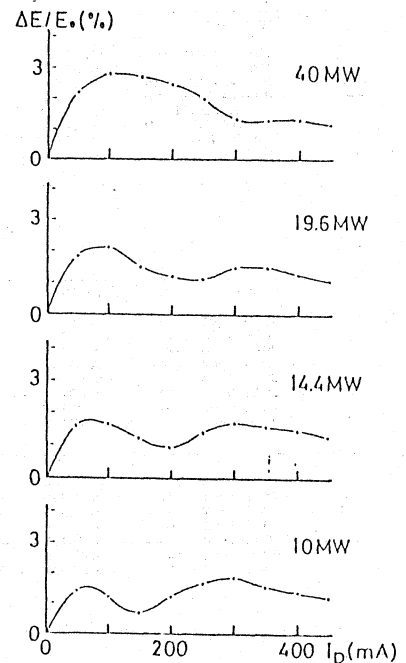
1. まえがき

東北大学の次期ライナックのエネルギーは、将来の核物理の研究課題を詳細に検討した結果、従来掲げていた1.5 GeVでは足りず、4 GeVが望ましいとの結論に達した。しかも建設費用を1.5 GeVの見積から大幅には増額せず、現在の核理研の敷地内に収める必要上、海外の建設計画にも採用されているリサーキュレーション方式を採用することとした。(1)

リサーキュレーション方式を採用することにより従来にも増して過渡現象によるエネルギーの拡がりを小さくする必要がある。即ち、入射部から主ライナックまでのビームトランスポート及び主ライナックで一度加速したあと、再び主ライナックの入口へビームを戻すリサーキュレーションシステムに於て、パンチが拡がったり、ビームの一部が途中でこぼれることは得られ



第1図 東北4 GeV電子ライナック全体配置



第2図 負荷電流によるエネルギー幅の変化

る電子ビームの性質を著しく悪化させるので、極力避けなければならない。過渡現象をどの程度まで補償できるかはリサーキュレーションシステムの経済設計にも絡んだ大きな問題である。(2)

2. クライストロンのタイミング調整による補償法

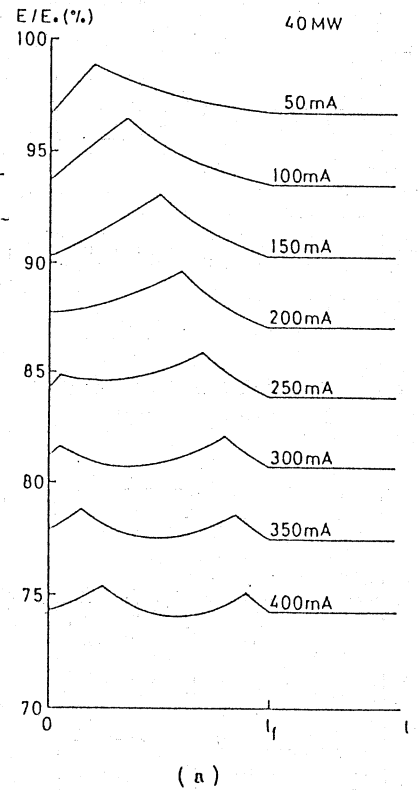
東北大4 GeVライナックの構成は第1図に示したように40 MWクライストロン24本を持つ主ライナック部、クライストロン4本の入射部、リサーキュレーション部、エネルギー調整部、及びエネルギー圧縮部から成る。

定インピーダンスの進行波型加速管における過渡的エネルギーは加速管の分散特性を無視してラプラス変換法を用いて解析的に求めることができる。最近広く用いられている定勾配型加速管については場所によって僅かに変わるシャントインピーダンスとQを一定と仮定すればやはり解析的に解が求められ、次のような式になる。(3)

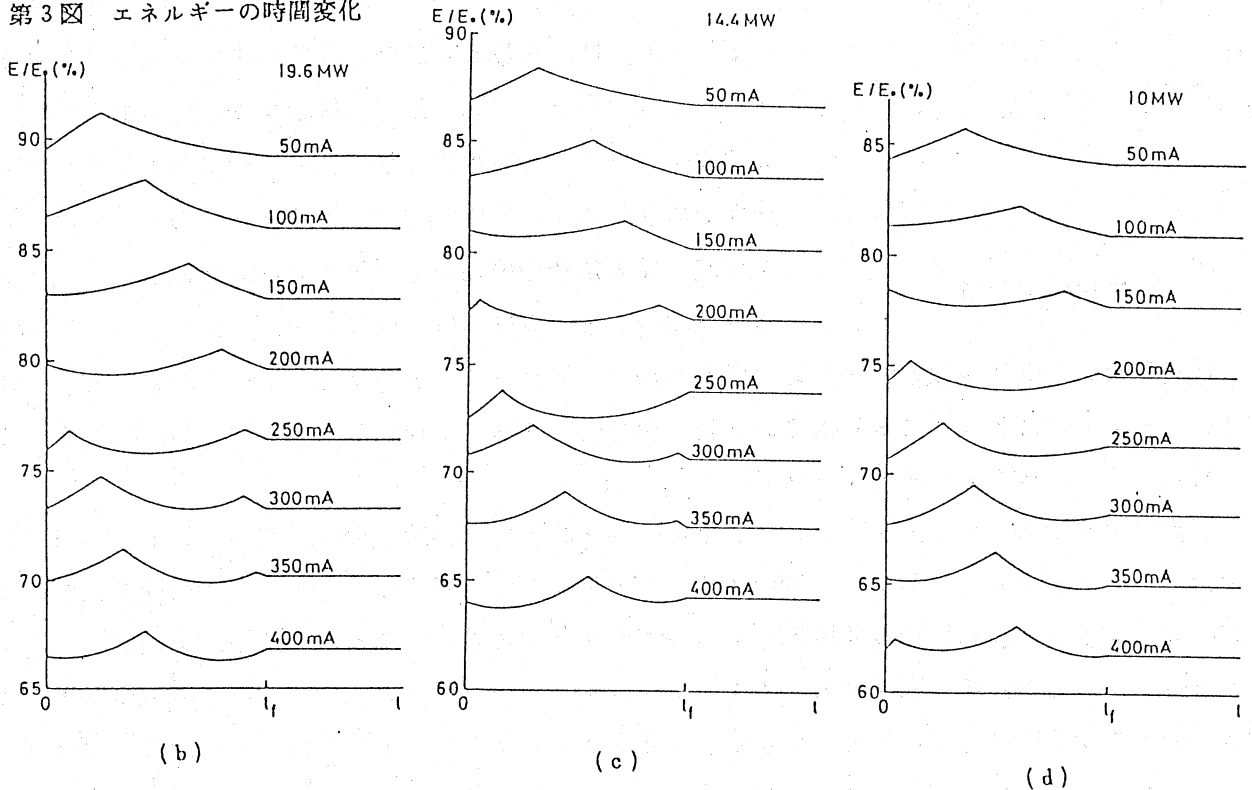
$$V(t') = [(PR_0 l) / (1 - e^{-2\tau})]^{1/2} (1 - e^{-2\tau t'}) U(t')$$

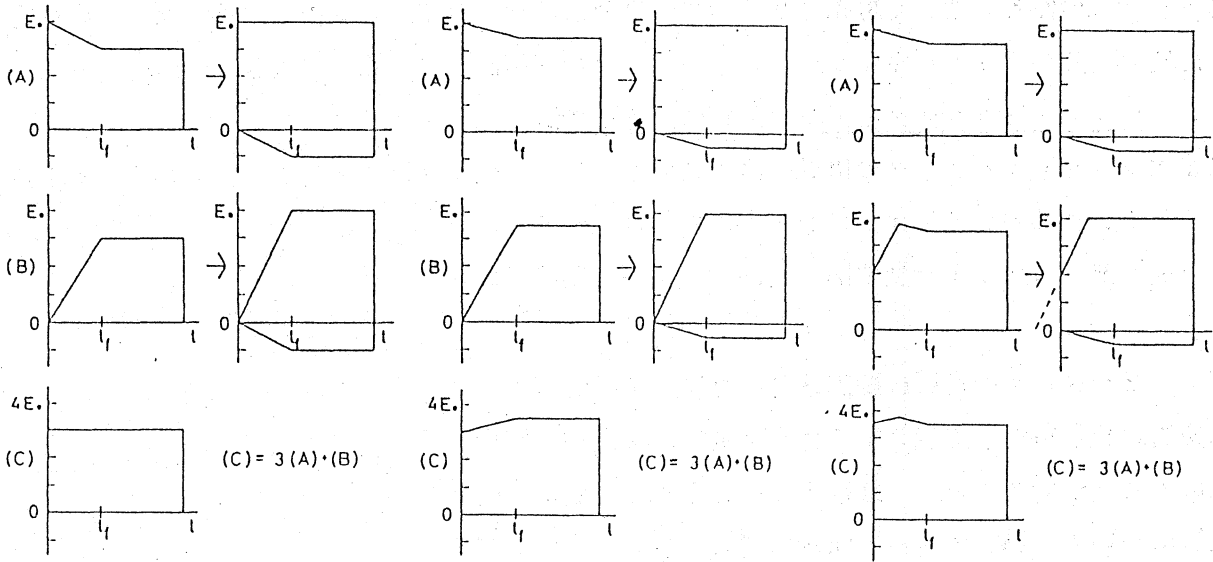
$$- \frac{i R_0 l}{2} \left[\frac{1 - 2\tau t'' e^{-2\tau} - e^{-2\tau t''}}{(1 - e^{-2\tau})} \right] U(t'')$$

ここで $t' = t / t_f$ 、 $t'' = t / t_f - 1$
 $t_f = \text{フィリングタイム}$

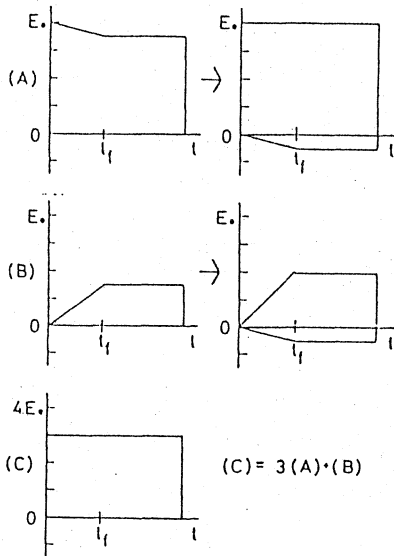


第3図 エネルギーの時間変化





(a) 負荷電流によるエネルギー低下が2.5%の場合 (b) 負荷電流を半減した場合 (c) クライストロンのタイミングによる補償



第4図

過渡現象補償の原理

P = マイクロ波の電力

R_0 = シャントインピーダンス

l = 加速管の長さ

τ = 減衰定数

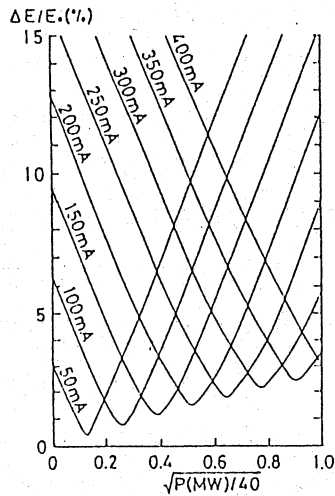
i = ピーク電流

$$U(t) = \text{ステップ関数} = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$$

t' と t'' は 1 を越えた場合には式の中では夫々 1 とおく。
 $t'' = 1$ ($t = 2$) で定常加速に移行する。式の第 1 項と第 2 項は夫々マイクロ波電力と加速電流に関するもので互いに独立であり重ね合わせになっている。ビームのパンチがマイクロ波の最大加速の位相からずれている場合には第 1 項にその余弦関数を乗じなければならない。

過渡現象の補償法を検討するためまず 4 本のクライストロンを持つライナックを考える。加速管のパラメータはここでは SLAC のと同じ値を仮定する。 $\tau = 0.57$ 、 $t_f = 0.8 \mu s$ 、 $R_0 = 57 M\Omega / m$ 、 $l = 3 m$ 、 $P = 40 MW$ 。

計算はクライストロンのタイミング調整の時間ステップを加速管のファイリングタイムの 1/20 で行った。加速電流を 400mA まで 50mA ステップで変化させた場合のエネルギーの時間変化を第 3 図 (a) に示した。%は無負荷電流のエネルギーを基準にとってある。加速電流を横軸にエネルギー幅を示したのが第 2 図である。4 本共に 40 MW の時は 300mA 以上の加速電流の処でエネルギー幅が 1% 強になっているのがわかる。1 本のクライストロンの電力だけを減少して夫々 19.6、14.4、10 MW (加速電圧では 70、60、50%) にした場合を第 3 図 (b)、(c)、(d) 及び第



第5図

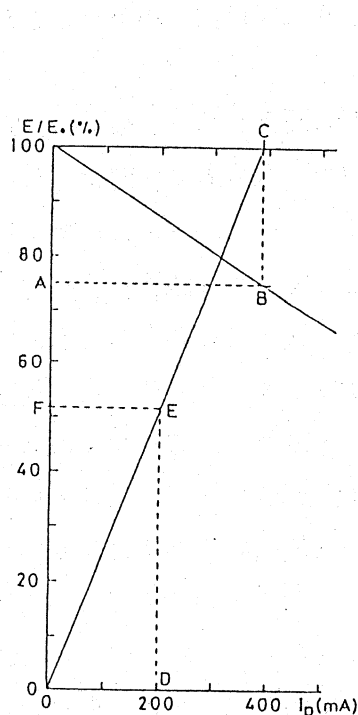
クライストロンの電力によるエネルギー幅の変化

2図に示した。例えば 200mA加速の場合にはクライストロンの電力を1本だけ14.4MWにした時が最も良く、約1%になっている。これから100~200mAの電流ではクライストロンのタイミング調整だけではエネルギー幅を1%以下には出来ないことがわかる。

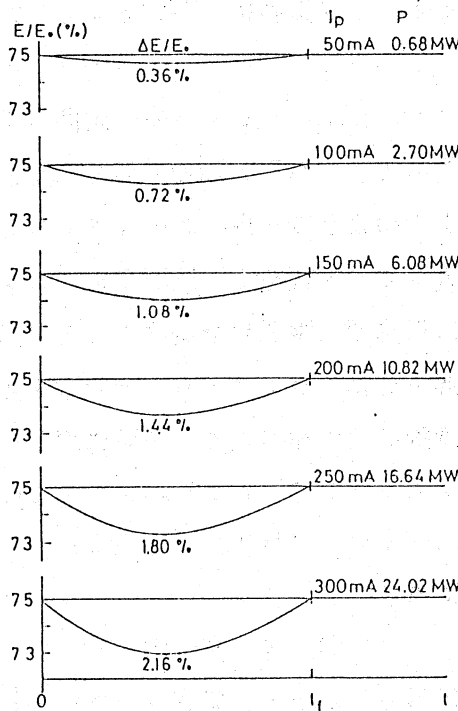
3. クライストロンの電力調整による補償法

この原理を理解するために第4図の模型的な説明図を用いる。

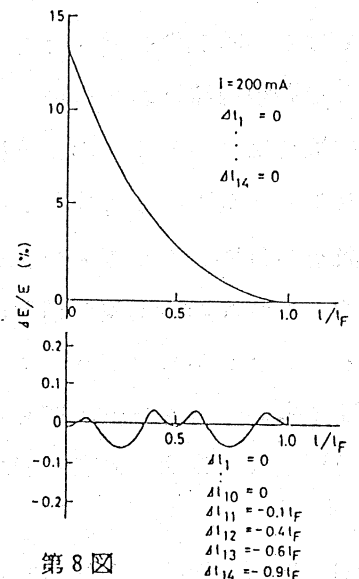
図(a)：クライストロンの本数に関連して負荷電流が25% (1/4)減少する場合について考察する。(A)はビーム入射時にはマイクロ波が加速管の終端まで達している場合で、(B)はビーム入射と同時にマイクロ波を供給した場合である。図の右側は式の第1項と第2項を独立に示したもので、第1項が正、第2項が負である。(A)を3本、(B)を1本として加算すれば(C)のように過渡現象は丁度補償されエネルギーは一直線状になる。図(b)：負荷電流を半分にした場合は補償過剰となりエネルギーが盛り上がることになり12.5%の幅になる。図(c)：(B)のタイミングをフィリングタイムの半分だけ進めることによりエネルギー幅は6.25%まで減ずることが出来る。図(d)：タイミングは(b)と同じのまま(B)の電力を1/4(加速電界では1/2)にすれば(A)と同様にエネルギーを平坦にすることが出来る。第5図はクライストロンのタイミングは第4図(A)と同じで電力を変化させた場合のエネルギー幅を示す。負荷電流に適した電力を図の上で求めるには第6図を用いる。100%から出ている斜めの直線がライナックの



第6図 クライストロンの最適電力の計算図

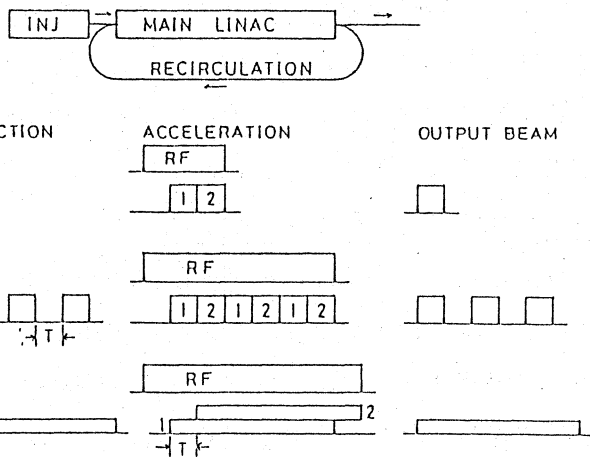


第7図 最適電力時のエネルギーの時間変化



第8図

クライストロンの本数が多い場合のタイミング調整による補償例



第9図 ビームパルス幅と一周時間の関係

電流-エネルギー特性を表している。

(タイミングを遅らせないクライストロンの本数) / (クライストロンの全数) = $3/4 = 0.75$ のA点から水平線によりB点を求める。そこから垂直線によりC点を求める。C点とO点を直線で結ぶ。加速電流(例えば200mA)のD点から垂直線でE点を求め、これより水平線でF点(0.52)を求める。補償用クライストロンの電力は $40 \times 0.53^2 = 10.82$ (MW) が最適である。負荷電流50mA毎

に最適電力を求めて、実際の式についてエネルギーを求めたのを第7図に示す。第4図に示したようには平坦にはならず、第1項と第2項の形の僅かな違いにより補償し残りがある。この方法の特徴は加速エネルギーは負荷電流によらず一定になることである。

4. まとめ

前節で述べた方法はライナックの運転方法について明確な指針を与える。東北4 GeVライナックの入射部はクライストロンを4本しか持っていないので、電力による補償方法を主とし、若干のタイミング調整を併用する予定である。主ライナック部はクライストロンの本数が多いのでタイミング調整だけでかなり補償出来ることを確かめた。クライストロン14本の例を第8図に示す。4本のクライストロンのタイミング調整によりエネルギー幅を±0.1%以内に納めることが出来る。

第9図はビームパルス幅とリサーキュレーション一周時間(T)との関係を示す。東北の計画ではこの時間を一致させてあるので、2回目の加速に於ては加速管内での電流値には変化がないので過渡現象はおきない。MITのように一周時間に比べてRFパルス(ビームパルス)幅が長い場合には(B1)のように入射ビーム幅をT、間隔Tのパルス列としてやれば議論は前に述べたことと全く同じになり2回目以降の過渡現象を避けることが出来る。又は(B2)のように電流を半分にしてタイミングを遅らせたクライストロンの半数を更に1フィリングタイムだけ遅らせてやれば過渡現象の補償の議論は前に述べたことを更に繰り返すだけである。即ち8本のクライストロンからなるライナックに於ては(B1)のケースでは2本を遅らせるが、(B2)では2本の内1本を更に遅らせればよい。(B1)と(B2)とでは平均電流の点では同じであり、実際上は(B2)の方が簡単であろう。

参考文献

- (1) 鳥塚 他 “全国共同利用電子ライナック研究センターの新設” 昭和58年6月 東北大学
- (2) 山田 他 本研究会予稿 25-p-4
- (3) J. Haimson. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-12 (June 1965) 996