

N. Tokuda, S. Arai, T. Hori, T. Nakanishi and N. Ueda  
Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

### ABSTRACT

An RFQ linac is under development at INS, aiming at a preaccelerator in the NUMATRON. A model linac is in course of construction and designed to accelerate an ion beams with a charge to mass ratio not less than  $1/7$  from  $5 \text{ keV/u}$  to  $140 \text{ keV/u}$  with  $1.2 \text{ m}$  vane length. This paper describes the beam dynamics design with computer simulation for the model linac.

### § 1. はじめに

東京大学原子核研究所では、ニューマトロン計画の準備研究として、高周波四重極型線型加速器(RFQ)の加速モデルの製作を進めている。RFQは、高周波四重極電場を用いて加速と集束を同時に行うので、集束用の電磁石が不用であること、また、four-vane型では構造が簡単になるという特長がある。更に、セルの長さを短くすることが可能なので通常のドリフトキューブ型では使用が困難な低速領域にも適用できるという特徴も併せ持っている。<sup>1,2)</sup> このモデルは、ニューマトロンの前段加速器として、RFQを採用する可能性を追求するために建設するものである。

本稿では、計算機シミュレーションによって行ったビームダイナミクス上のデザインについて述べる。なお、RFQに関する種々のパラメータの記号は、参考文献(2)に従った。

### § 2. モデルの仕様

イオン源は、現在手持ちの物に若干の改良を加えたものを使用する。最大加速電圧は  $40 \text{ kV}$ 、安定性は  $\pm 0.1\%$  である。イオンは、荷電数対質量数比が  $1/7$  以上のものが得られ、規格化エミッタンスの実測値は  $\sim 0.5 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  である。

以上のようなイオン源の性能から、 $N^{2+}$  ( ${}^7\text{Li}^+$ ) イオンの加速を想定してデザインを行った。入射運動エネルギーは  $5 \text{ keV/u}$ 、運転周波数は  $100 \text{ MHz}$  である。ヴェイン間電圧は、Kilpatrickの放電限界<sup>3)</sup> の  $1.8$  倍の  $61.8 \text{ kV}$  を採った。この時の表面電界強度は、最大の箇所  $205 \text{ kV/cm}$  となる。アクセプタンスは、規格化エミッタンスが  $0.6 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  の入射ビームの  $90\%$  以上を捕獲できるようにした。ヴェインの長さは、工作上的規制から、全長  $1.2 \text{ m}$  とし、この範囲で出来るだけ高い最終エネルギーが得られるようにデザインを行った。なお、イオン源からの電流値が低いことを考慮して、空間電荷の効果は無視してパラメータの最適化を行った。

### § 3. デザインの方法

RFQの性能は、平衡位相( $\phi_0$ )とヴェインのモジュレーション( $m$ )を、セルが進むに従って変化させていく時の変化のさせ方により決定される。 $\phi_0$ と $m$ のセル番号に対する関数形は、RFQを次の6つの部分に分けて決定した。(1) radial matcher, (2) shaper, (3) prebuncher, (4) buncher, (5) booster, (6) accelerator.

(1) radial matcher

この部分は、捕獲効率の増加に大きな効果を持つ。RFQの中では、ビームのエミッタンスの形は入射時の位相によって変化するので、アクセプタンスが充分大きくない場合には、アクセプタンスからはみ出す部分が出てきて、捕獲効率が低下する。Radial matcherを設け、その中で、集束と発散を繰り返すことにより、radial matcherを出た時のエミッタンスの形がアクセプタンスに一致するようにする。ここでは、セルの数を10に採り、この間で、集束力(B)が直線的に増加するようにした。

(2) shaper

$\phi_s$ と発散力( $\Delta$ )を直線的に僅かだけ変化させる。 $\phi_s$ は $-90^\circ$ から $-88^\circ$ まで、 $\Delta$ は0から $\Delta_0$ まで変化させる。 $\Delta_0$ の値は次段のprebuncherの所で求められ、最終値の0.175倍下ある。セル数は10とした。

(3) prebuncher

ゲインの長さを短くして加速効率を高めるのに重要な働きをする。セパラトリクス(面積(実際の計算においては、バンクの位相長とセパラトリクスの高さの積が十分に良い近似となるので、これを代用した。))を一定に保ちなから、 $\Delta$ の大きさを粒子の速度の増加に伴って増やす。ここでは、 $\Delta$ と $\beta$ (速度/光速)の関係を図1のように放物線になるように変化させた。Prebuncherの出口での $\phi_s$ 、位相振動の数、 $\Delta$ の値( $\Delta_0$ )を決めると、 $\Delta_1$ 、 $\beta_2/\beta_1$ が求められ、prebuncherでの $\phi_s$ と $m$ の関数形も求められる。ここでは、出口での $\phi_s$ を $-60^\circ$ とし、位相振動数と $\Delta_0$ の値は最適化の結果、各々0.5と $-0.11$ に取った。

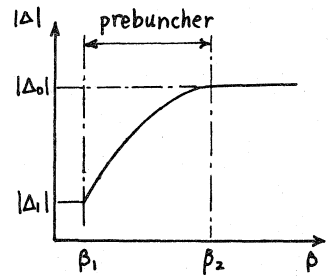


図1

(4) buncher

セパラトリクスの面積と $\Delta$ の値を一定に保ちなから、 $\phi_s$ が $-30^\circ$ になるまで、 $\phi_s$ と $m$ を増加させる。

(5) booster

$\phi_s = -30^\circ$ 、 $\Delta = \Delta_0$ の条件の下で $m$ を増加させる。ゲインの最小口径( $a$ )は、 $m$ の増加と共に減少するので、ビーム半径に近くなつた所で $m$ の増加を止める。ここでは、 $a$ とビーム半径の比を1.1に取った。

(6) accelerator

$\phi_s$ 、 $\Delta$ 、 $a$ を一定に保つ。 $a$ が一定という条件から、 $m$ は速度の増加と共に減少する。

#### §4. 結果

図2にセル数に対する種々のパラメータの変化を示す。全セル数130で、ゲイン長が122 cm、最終エネルギーは138 keV/uである。捕獲効率97%であった。

図3は位相振動、図4はエネルギー振動、図5は横方向の振動の様子を示したものである。図6、7は各々入口と出口でのエミッタンス(横方向と縦方向)を示す。

図8は、入射エネルギーと捕獲効率の関係を示したものである。イオン源の引出電圧の変動により、ビームの入射エネルギーが変化すると捕獲効率は低下する。使用する電源の電圧安定度が±5%位としても、90%以上の捕獲効率を得られる。

図9は、ゲイン間電圧の変動が捕獲効率に与える影響を示したものである。電圧が下がった時は、セパトリクスの高さが落ちるので、縦方向の運動の不安定性からビームが失われる。電圧が高い時は、集束力が大きくなり過ぎて、横方向の運動が不安定になり損失が生じる。この結果から、高周波電源の安定性には、殊に注意を払う必要はない。

図10は、空間電荷の効果による捕獲効率の低下を示す。N<sup>2+</sup>イオン電流が8 mA以下であれば、90%以上の捕獲効率を得られる。

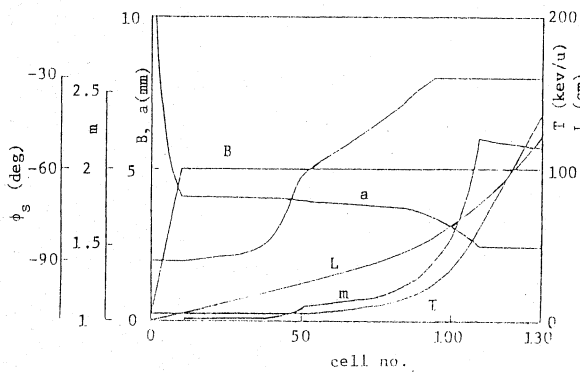


図2

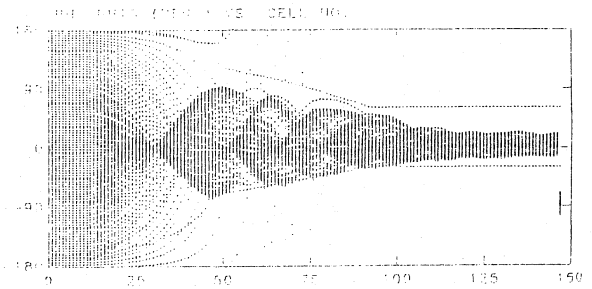


図3

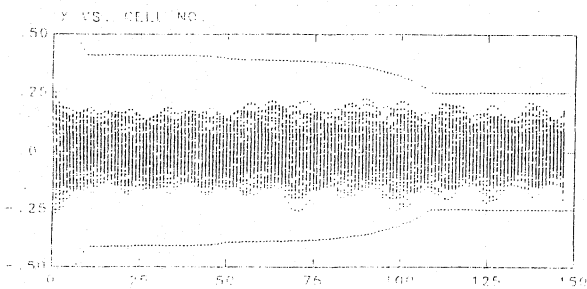


図5

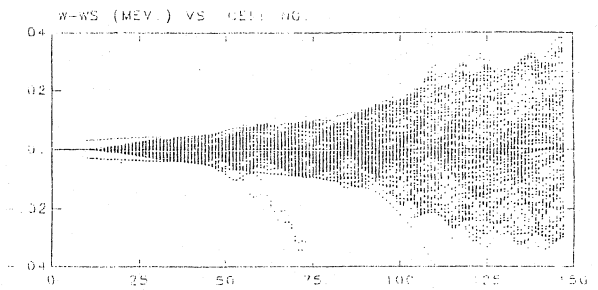


図4

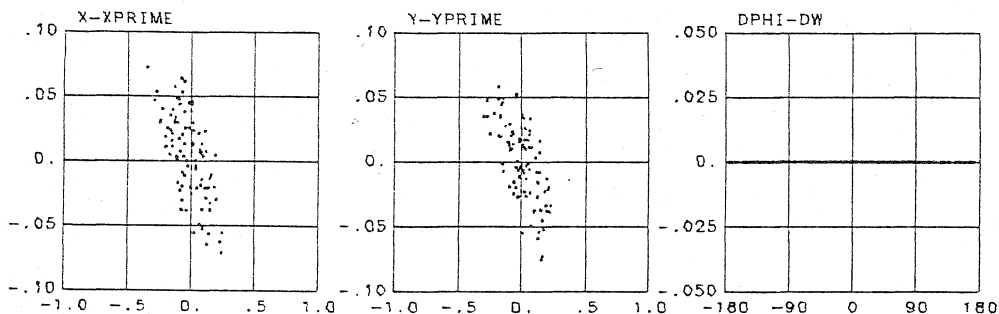


図6

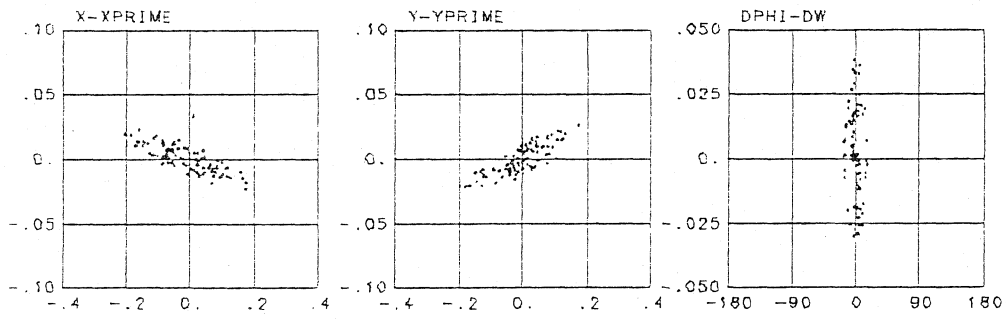


図 7

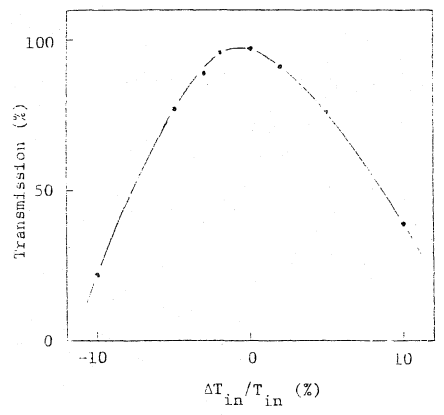


図 8

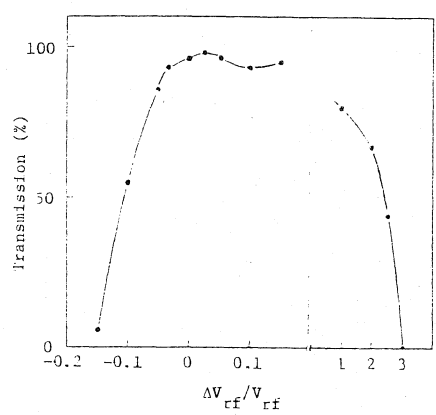


図 9

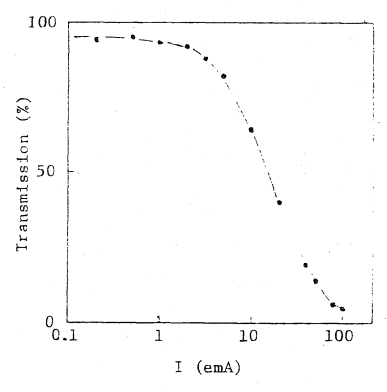


図 10

§ 5. 今後の課題

以上の計算機シミュレーションで得られた性能を、実験的に得るためには、現実のRFQで計算に用いた電場を実現しなければならない。この点で最も問題になるのは、radial matcherの部分である。ここは、ヴェインの末端であるために、キャビティの壁やエンドキューナーの影響によって電場の崩れが大きく、アクセラテンスが十分に大きくないRFQにおいては、捕獲効率の低下に深刻な影響を及ぼすであろう。ここでの計算では、radial matcherでのBの変化は直線的であるとしたが、Bの関数形について更に検討を進める必要がある。すなわち、実際のキャビティで、計算に乗るようなBを実現しなければならない。そのためには、キャビティの壁やエンドキューナーによって大きく電場分布が崩れることのないヴェインの形状を求める必要がある。ロスアラモス研究所のRFQでは、radial matcherの入口の口径を大きく取っているため、四重極以上の高次の電場の影響が無視できないうであろう。実測の捕獲効率を計算値と比較すると、ビーム電流が30 mA以上の時は一致が良いが、1 mAの時は、計算値の96%に対して72%と低い。<sup>4)</sup>これは、radial matcherが不完全であることに原因があると考えている。Radial matcherについては、理論的な検討と並んで、実験的にも電場分布を測定して、ヴェインの形状を決定する必要がある。

§ 6. 謝辞

LBL滞在中の山田聡氏に対しては、種々の有益な助言を戴いたことに感謝します。また、この仕事を進めるに当り、色々便宜を与えて下さった平尾泰男、H. Grunder (LBL)、吉田勝英各氏に感謝致します。

参考文献

- 1) I. M. Kapchinskii, N. V. Teplyakov, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-26, No. 3, (1979, p 3462)
- 2) K. R. Crandall et al., Proceedings of 1979 Linear Accelerator Conference, p 205.
- 3) S. W. Williams et al., ibid., p 144.
- 4) R. W. Hamm et al., Proceedings of Int. Conf. on Low Energy Ion Beams 2, Bath, 1980.