

## ACCELERATION TESTS ON THE INS 25.5-MHZ SPLIT COAXIAL RFQ

\*S. Shibuya, S. Arai, A. Imanishi, T. Morimoto, E. Tojyo, and N. Tokuda

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo  
Midoricho 3-2-1 Tanashi Tokyo 188, Japan

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

### ABSTRACT

The acceleration tests of the INS 25.5-MHz Split Coaxial RFQ (SCRFFQ) are now going on with a  $N_2^+$  beam. The SCRFFQ can accelerate ions whose charge to mass ratio are greater than 1/30 from 1 to 45.4 keV/u. This paper describes the acceleration test stand, and results of the preliminary tests : the in- and output beam emittances, the output beam energy and its spread, and the beam transmission efficiency.

### 25.5-MHz SCRFFQ ビーム加速テスト

#### 1. はじめに

東京大学原子核研究所の25.5-MHz分割同軸型RFQ(SCRFFQ)は、内径90 cm 長さ70 cm の単位空洞3台で構成されており、荷電数対質量数比1/30以上のイオンを変調ヴェインによって1 keV/uから45.4 keV/uまで加速できる。低電力及び高電力試験は順調に終了し<sup>1), 2), 3)</sup>、1991年1月にテストスタンドが完成、現在 $N_2^+$ ビームを用いて加速テストを行なっている<sup>4)</sup>。今回予備テストとして、入射及び、出射ビームエミッタンス、出射ビームのエネルギー及びエネルギー幅、透過電流比等を測定した。

#### 2. ビーム輸送系とその周辺機器

図1にビーム輸送系の構成を示す。ECRイオン源から引き出されたエネルギー1 keV/uの $N_2^+$ ビームは、4台のアイツェルレンズを通してRFQ入口に達する。この時ビームのエミッタンス楕円が、RFQのアクセプタンスと相似になるようにアイツェルレンズの電圧を調整する。これらのレンズの配置は、計算プログラムMAGICでアイツェルレンズを薄肉レンズとして取り扱った近似計算によって決定した。また、計算コードSUPERFISHでアイツェルレンズ中の電場分布を計算し、更に計算コードTRACEP<sup>5)</sup>を用いて、その電場内を通る粒子のシュミレーションを行なうという手法を用いることにより、レンズの収差の影響をみながら個々のアイツェルレンズにかける電圧を適正化した。またRFQ入口には、ファラデーカップ(FC1)と、エミッタンスモニターが取付けてある。

出射側のビーム輸送系は、1組の四重極電磁石ダブレットと偏向角45°のエネルギー分析用偏向電磁石で、構成されている。偏向電磁石出口より約1.9 m下流にある集束点でのエネルギー分解能は、10%である。そこにはビームスリットがついており、水平垂直両方向のビームサイズ及びビームのエネルギー幅が測定できるようになっている。RFQ出口とビームスリット直後、輸送系末端にはファラデーカップが付いており(FC2, FC3)、エミッタンスモニターは、RFQの出口にも取付けてある。

#### 3. ビームエミッタンスの測定

$N_2^+$ 入射ビームエミッタンスの測定結果を図2に示す。図中の線分は、測定データのうちピーク電流の2%以上の部分であり、楕円はRFQ入口でのアクセプタンス(規格化エミッタンス $\varepsilon_n = 0.6\pi$  mm·mrad)から計算した、スリット位置(RFQ入口より6.7 cm 上流)でのエミッタンスを示している。また、点は実験と同じ条件で行なったTRACEPによるシュミレーションの結果を示す。TRACEPでの計算結果は、測定結果と非常によく一致している。測定データは、ビームが軸からずれていることを示している。これを改善するために、静電ステアラーを取り付ける予定である。

図3に $N_2^+$ 出射ビームエミッタンスの測定結果を示す。図中の線分は、測定データのうちピーク電流の2%以上の部分であり、楕円はRFQ出口でのビームエミッタンスの計算値から求めた、スリット位置(ヴェイン終端から71.3 cm)でのエミッタンスを示している。この時RFQは、ヴェイン間電

圧 102 kV(規格化ヴェイン間電圧  $V_n=1.0$ )で運転していた。規格化ヴェイン間電圧 $V_n$ とは、実際のヴェイン間電圧を加速粒子の設計電圧で割ったものであり、 $V_n=1.0$ の時のヴェイン間電圧は、 $N_2^+$ に対して 102 kVであり、 $N^+$ に対して51 kVとなる。鉛直方向のエミッタンス測定値は、設計値の楕円とよく一致していたが、水平方向の測定値は、楕円と相似であるものの、ビームサイズで約7 mm楕円より大きかった。この楕円は、単一イオンの加速に対して成り立つものであるが、実際に測定されたビームエミッタンスには、それ以外の粒子( $N^+$ や $H_2O^+$ 等)も混ざっているためにこのようなことが起こったと考えられる。

#### 4. エネルギースペクトル測定

引出電圧を28 kV、RFQがヴェイン間電圧112 kV( $V_n=1.1$ )で運転されているとき、加速されたビームに含まれている各イオンのエネルギーとFC3でのビーム電流を測定した。加速イオンのエネルギーを、偏向電磁石の磁場強度より計算した所、 $N_2^+$ が45.1 keV/u、 $N^+$ が45.6 keV/uであった。また、FC3に到達した加速イオンのFC1に対する電流値の百分比は、 $N_2^+ : N^+ : N^{++} : H_2O^+ = 60:7:1:2$ であった。この時、FC2のFC1に対する電流比は75 %であり、またRFQを加速せずに透過してきた粒子は、2.5 %であった。よって、入射ビームの約72.5 %が加速されてRFQを透過し、このうち97 %がFC3に到達したことになる。但しここで、FC3で得られた $N^{++}$ は、RFQで加速されたものではなく、RFQから出た $N_2^+$ が偏向電磁石に至る間にビームパイプ内の残留ガスと衝突して、出来たものと考えた方がよい。 $N^{++}$ の持つ入射エネルギーは、4 keV/uである。このエネルギーを持った粒子が、RFQを透過する確率を計算コードPARMTEQで計算したところ0であった。これは、粒子の横方向の運動の不安定性により、加速の途中で粒子がすべて消滅してしまったことによる。即ち $N^{++}$ は、エミッタンス0でRFQに入射しない限りは透過することは出来ない訳である。

$N_2^+$ のエネルギー幅は、FC3の直前にある水平スリットを、運動量分散を考えない時のビームサイズと同じ全幅で6 mmにして測定した。図5に測定結果を示す。右側のスペクトルは、ヴェイン間電圧112 kV( $V_n=1.1$ )の時のもので、エネルギー幅は $\pm 3.5$  %、左は、102 kV( $V_n=1.0$ )の時のもので、エネルギー幅は、 $\pm 3.1$  %であった。これらはPARMTEQによる計算値とほぼ等しい値である。

#### 5. 透過電流比の測定

1 keV/uの $N_2^+$ をRFQで加速した時、 $V_n=0.8\sim 1.1$ の範囲で、透過電流比 $I(FC3)/I(FC1)$ を測定した。これをPARMTEQの計算結果で規格化したものを図5に黒丸で示す。同時にPARMTEQの計算結果を図5の実線で示す。図の縦軸は、規格化電流比(透過効率と考える)で、横軸は、規格化ヴェイン間電圧 $V_n$ である。同様に、1 keV/uの $N^+$ をRFQで加速した時、 $V_n=0.8\sim 2.2$ の範囲で透過電流比を測定した。これをPARMTEQの計算結果で規格化したものを図5に白丸で示す。これらの結果から、PARMTEQの助けをかりて、透過効率を推定すると、およそ75 %以上であることが分かった。

測定結果とPARMTEQの計算結果と比べると、測定値は、計算値に比べて、立ち上がりの部分が鈍くなっているのが分かる。この理由としてヴェインを2次元加工したことが考えられる。このRFQでは、ヴェイン先端部横方向の曲率半径が $r_0=0.946$  cmになるように加工したが、このように加工をすると、軸方向の電場強度が、Kapchinskij-Teplyakov(K-T)の電位関数から導かれる電場強度(PARMTEQではこの式を用いている。)よりも小さくなる。この度合は、ヴェインのモジュレーションが小さくセルが短い所、即ちビームをバンチングする段階で大きい。従って、ビームをバンチする所でセパトリティクスが小さくなり、その結果捕獲効率が下がっているのではないかと考えている。

#### 6. まとめと今後の予定

予備テストを行なって、入射ビームのマッチング条件は、TRACEPによって決められる事が分かった。加速イオンのエネルギー及びその拡がりについては、計算通りの結果が得られた。出射ビームのエミッタンス及び、規格化透過電流比は計算結果と一致しなかったが、これについては、入射側にイオン弁別用の偏向電磁石(偏向角 $22.5^\circ$ 、エッチ集束機能付)を取り付けて、再度精密な測定を行なう予定である。現在そのための準備を行なっている。

#### 参考文献

- 1) N.Tokuda et al., Structure and RF Characteristics of the INS 25.5-MHz Split Coaxial RFQ,

7th Symp. on Accelerator Science and Technology, Osaka, Japan, Dec., 1989.

- 2) S. Shibuya et al., RF Tests on the INS 25.5-MHz Split Coaxial RFQ, 1990 Linear Accelerator Conference, Albuquerque, NM, U.S.A., Sept., 1990.
- 3) N. Tokuda et al., Progress Report on the INS 25.5-MHz Split Coaxial RFQ, Int. Symp. on Heavy Ion Inertial Fusion, Monterey, CA, U.S.A., Dec., 1990.
- 4) S. Arai et al., Acceleration Tests of the INS 25.5-MHz Split Coaxial RFQ, IEEE 1991 Particle Accelerator Conference, San Francisco, CA, U.S.A., May, 1991.
- 5) S. Yamada, Private communications, 1990 - 1991.

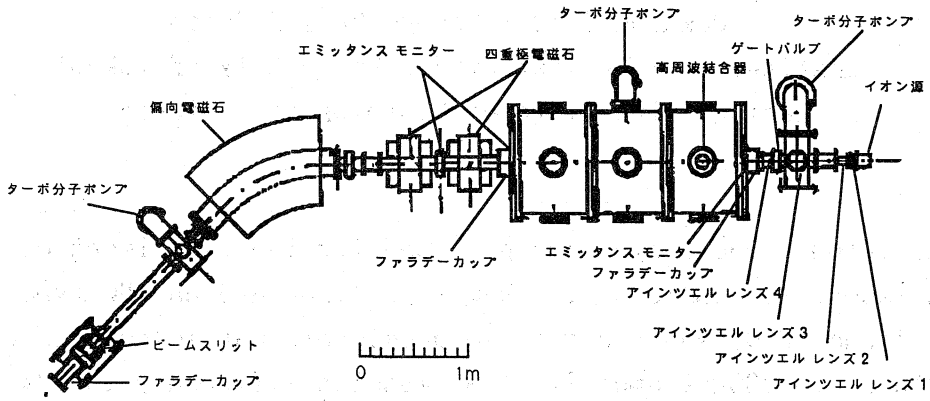


図1. ビーム輸送系の構成。

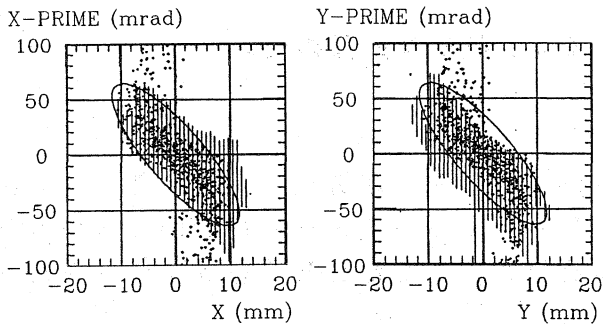


図2.  $N_2^+$ 入射ビームエミッタンス。左が水平方向、右が鉛直方向。線分は測定値。楕円はRFQアクセプタンスより求めたエミッタンス計算値 ( $\epsilon_n = 0.6\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ )。点は、TRACEPによるシュミレーション結果。

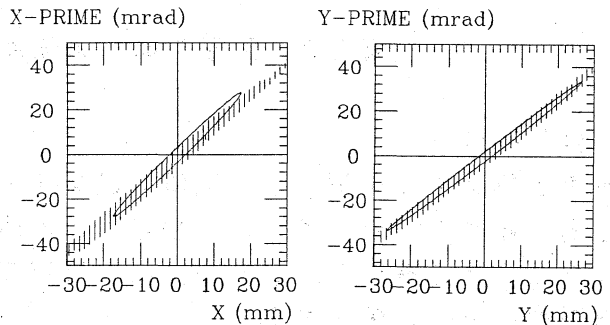


図3.  $N_2^+$ 出射ビームエミッタンス。左が水平方向、右が鉛直方向。線分は測定値。楕円はRFQ出射ビームエミッタンスの計算値 ( $\epsilon_n = 0.6\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ )。

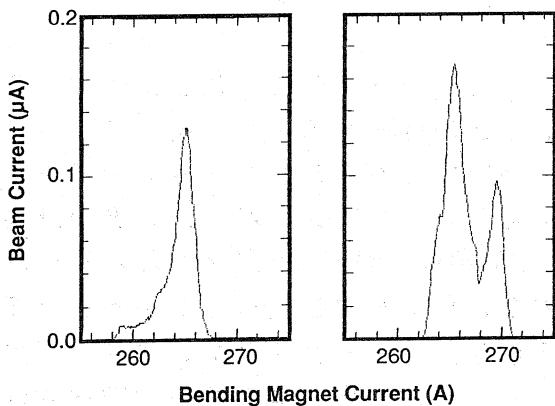


図4. FC3で測定した $N_2^+$ エネルギースペクトル。左は $V_n=1.0$ の時、右は $V_n=1.1$ の時。

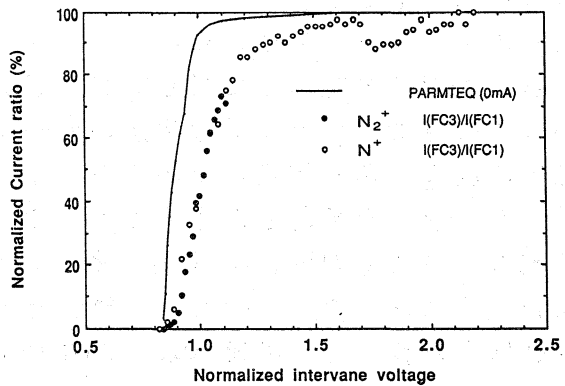


図5. PARMTEQの計算値(実線)で規格化された $N_2^+$ (黒丸)及び $N^+$ (白丸)の電流比 $I(\text{FC3})/I(\text{FC1})$ 。