

BEAM TESTS ON THE INS 170-keV/u SCRFQ

Niki K., Arai S., Imanishi A., Okada M., Takeda Y., Tojyo E. and Tokuda N.
 Institute for Nuclear Study, University of Tokyo
 3-2-1, Midori-cho, Tanashi, Tokyo 188, Japan

ABSTRACT

A 25.5-MHz split coaxial RFQ has come into operation at INS. This linac was designed so as to accelerate ions with a charge-to-mass ratio (q/A) greater than $1/30$ from 2 to 172 keV/u. The intervane voltage so far achieved is 107 kV with a duty of 3%. This voltage is near by 109 kV, which is the nominal value for $q/A = 1/30$ ions. We have conducted acceleration tests by using Ne^+ and N^+ ions. Through N^+ acceleration we obtained the following results. The output-beam emittances are well in the design ellipses of $0.06 \pi \text{ cm}\cdot\text{mrad}$ (normalized). The data of transmission efficiency vs intervane voltage agree well with PARMTEQ results. The transmission at the nominal voltage is measured to be 90%.

核研 170 keV/u 分割同軸型 RFQ リニアックの加速試験

1. はじめに

東大核研では大型ハドロン計画 E-アレーナの開拓研究として不安定核用線形加速器を建設中である [1]。この線形加速器は荷電対質量数比 (q/A) が $1/30$ 以上のイオンを 2 keV/u から 170 keV/u まで加速する分割同軸型 RFQ リニアック (SCRFQ) と q/A が $1/10$ 以上のイオンを最大 1053 keV/u まで加速するエネルギー可変型の IH リニアックからなる。この SCRFQ は直径 0.9m、全長 8.6m で、12 のモジュール空洞で構成されている。1994 年春に実験室に据え付けた後、共振周波数や電場分布等の測定を行ってきた [2, 3]。1995 年 3 月の中旬にハイパワーを入れてエージングを行い、3 月 22 日に初加速に成功した。加速したイオンは Ne^+ であった。引き続き 4 月に、 N^+ を用いて、伝送効率と出射ビームのエミッタンス・プロファイル調べた。実験結果はシミュレーション (PARMTEQ) の結果とよく一致した。本報告では、高電力試験と加速試験について述べる。

2. 高電力試験

EIMAC 4CW150,000E を用いた高周波電源は、デューティー 30% で 350 kW の最大出力が得られる。低い出力レベルでもっと高いデューティーで運転することができる。例えば 100 kW 以下では 100% デューティーで運転可能である。高周波電源からは出射波及び反射波モニター用の方向性結合器、約 6 m 長の 50 Ω 同軸導波管 WX-120D、そしてループ・カプラーを通して SCRFQ の空洞に電力を供給する。3 月の段階ではベーン間電圧が 80 kV 程度までは安定した運転条件が得られ、この時のデューティーとピーク電力はそれぞれ 20%、130 kW であった。そこで Ne^+ イオンを用いた初加速試験を、さらに 4 月に N^+ イオンでの試

験を行なった。

4 月の N^+ イオンを用いた加速試験の時に、SCRFQ の第 12 モジュールに取り付けたモニター・ループの電圧 (V_{ML}) とベーン間電圧 (V_{VV}) との間の較正を行なった。具体的には、ベーン間で加速された電子から発生する X 線のエンド・ポイント・エネルギーをゲルマニウムの半導体検出器で測定した。ゲルマニウム検出器自身の較正は X 線源 ^{57}Co (122.6 keV、136.47 keV) で行なった。測定点は 44 kV から 73 kV の間の 4 点で行ない、較正定数 V_{VV}/V_{ML} の平均値と rms 誤差は 10,388 と 73 であった。

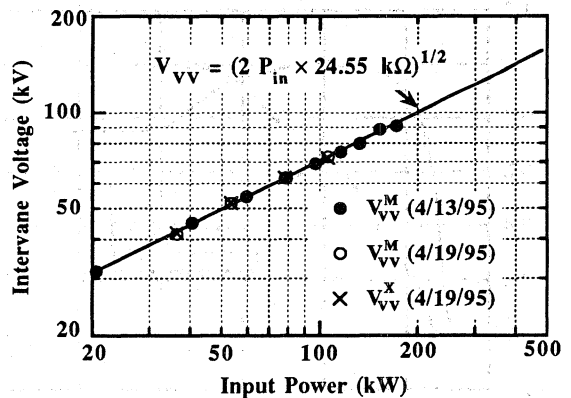


図 1: ベーン間電圧 vs 空洞への供給電力

図 1 に空洞に供給するピーク電力 (P_{in}) とベーン間電圧の関係を示す。 V_{VV}^M (○, ●) はモニター・ループの電圧から求めた値である。また V_{VV}^X (×) は X 線のエンド・ポイント・エネルギーの測定点を示している。 V_{VV}^M から共振抵抗 R_p ($\equiv V_{VV}^2/2P_{in}$) は $24.55 \pm 0.44 \text{ k}\Omega$ とする。これは低電力試験の時に得られた共振抵抗 22

kΩよりも大きい [2, 3]。これはエージングによって空胴の Q 値が増加したためと考える。

高電力運転の最終目標は、 q/A が $1/30$ のイオンに対する V_{vv} の設計値 109 kV 以上 (P_{in} では 240 kW 以上)、デューティー 30% 以上で空胴を励振することである。4 月の加速試験の時は、デューティーを 20% で 80 kV ($P_{in} = 130$ kW) までは安定に運転することができた。また、デューティーを 1.5% に下げれば、91 kV ($P_{in} = 170$ kW) まで到達することができた。高電力供給の障害になっているのは、カプラーのセラミック窓の大気側での沿面放電である。6 月に入ってカプラーのセラミック窓にガラス・エポキシの絶縁リングを取り付けて、デューティー 3% で 107 kV ($P_{in} = 233$ kW) のピーク電力まで達成した。しかし、この絶縁リングでは、これ以上の高デューティー運転に耐えることができなかった。そこで、カプラーの構造を改良することを検討している。沿面放電を防ぐには、セラミック窓の付近で、表面電界強度が局所的に高くないようにする必要がある。内導体の形状を変えたり、誘電体を挿入したりした時に、電界分布がどのように変化するかを MAFIA プログラムを用いて調べている。

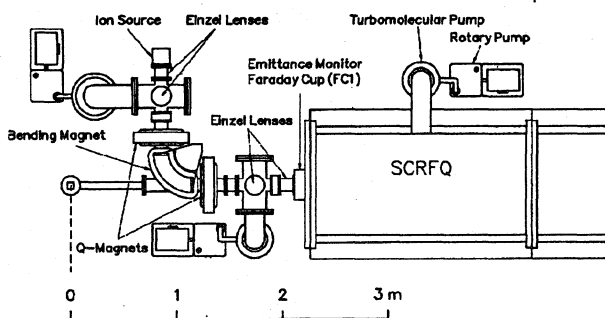


図 2: LEBT の配置図

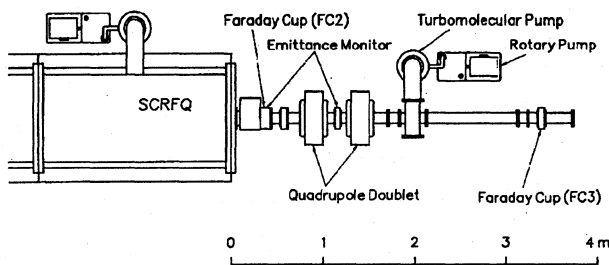


図 3: HEBT の配置図

3. 加速試験

テストベンチ

図 2 に LEBT の配置図を示す。この LEBT は 2.4-GHz ECR イオン源、 90° の偏向電磁石、2 台の四重極電磁石、4 台のアイツェル・レンズからなる [4]。偏向電磁石は質量分析用で、第 2 四重極電磁石と第 3 ア

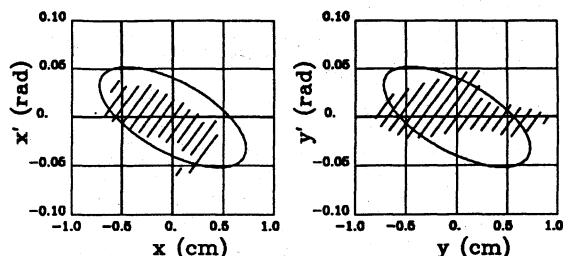


図 4: 入射ビームのエミッタンス・プロファイル

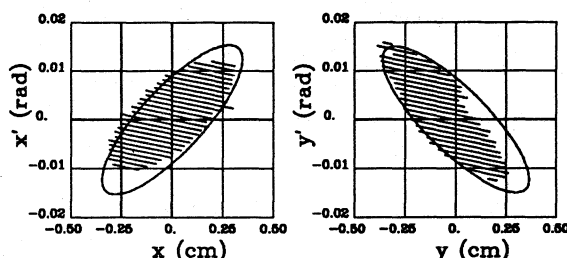


図 5: 出射ビームのエミッタンス・プロファイル

インツェル・レンズの間に集束点をつくる。この集束点に半径 0.65 cm のコリメーターを置いて、質量分解能が約 $\pm 1\%$ となっている。SCRFQ の入口にはエミッタンス・モニターとファラデー・カップ (FC1) が設置されている。

HEBT の配置図を図 3 に示す。SCRFQ の出口に設置したファラデー・カップ (FC2) で全透過粒子 (加速されなかった粒子も含む) のビーム電流を、その下流に置いたファラデー・カップ (FC3) で加速された粒子 (運動エネルギーの設計値は 172 keV/u) のビーム電流を測定した。2 台のファラデー・カップの間には二連四重極電磁石が置かれている。この電磁石により、加速されなかった粒子は吹き飛ばされる。シミュレーションによれば、FC3 に到達する確率は 1% 以下である。またエミッタンス・モニターの前段スリットが SCRFQ の出口に、後段スリットが二連四重極電磁石の間に設置されている。

測定結果

図 4 に SCRFQ への入射ビームのエミッタンス・プロファイルを示す。斜線は測定した N^+ イオンビームのプロファイルである。また設計アクセプタンスに似た $29.1 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ ($\epsilon_n = 0.06 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$) の大きさをもった楕円を同時に示す。入射ビームの整合は不完全で、水平面内 (x) では 0.19 cm ほどビーム中心が軸からずれている。また、垂直方向の位相空間上ではビームの集束が不十分である。LEBT の調整をさらに行なう必要があるが、一応この状態で測定を続けた。図 5 は SCRFQ からの出射ビームのエミッタンス・プロファイルを示す。SCRFQ のペーン間電圧は N^+ イオンに対しての設計値 50.68 kV に設定してある。測定した出射ビームのプロファイル (斜線) は PARMTEQ のシミュレーションから期待される $3.11 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$

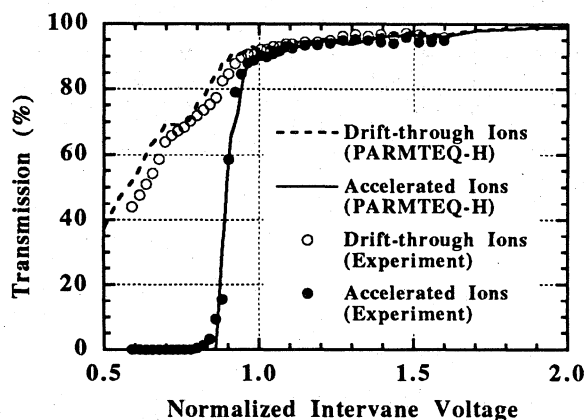


図 6: 伝送効率の規格化ベーン間電圧依存性

($\epsilon_n = 0.06 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$) の大きさをもった楕円とほぼ合っている。

伝送効率の規格化ベーン間電圧 ($V_n = V_{vv}/50.68 \text{ kV}$) 依存性を図 6 に示す。SCRFQ は 25.47 MHz、デューティ 5% ($0.53 \text{ ms} \times 95 \text{ Hz}$) で運転した。FC1 で測定した入射ビームのピーク電流値は 0.21 ~ 0.22 mA であった。全透過粒子 (○) に対する伝送効率は $I(\text{FC2})/I(\text{FC1})$ で定義される。ここで $I(\text{FC}i)$ は FC*i* で測定されたビーム電流を表す。また加速された粒子 (●) に対する伝送効率は $I(\text{FC3})/I(\text{FC1})$ で定義される。シミュレーションに用いた PARMTEQ は、Crandall による高次の多重極を含む電場を考慮した PARMTEQ-H バージョンである [5]。シミュレーションに用いた入射ビームのエミッタンス形状は、図 4 の測定プロファイルに近い楕円に合わせた。加速されなかった粒子の中で、10% 程度以下が FC2 (口径 3.4cmφ) に届かないが、シミュレーションにはこれも考慮した。

ベーン間電圧が設計値 ($V_n = 1$) の時の伝送効率は 90% であった。これは規格化エミッタンス $\epsilon_n = 0.06 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ の整合された入射ビームに対する計算値 91.4% とよく合っている。入射ビームの整合が不完全であったにもかかわらず高い伝送効率が得られた。これは SCRFQ のアクセプタンスが $0.06 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ より大きいためである。PARMTEQ-H では、 $\epsilon_n = 0.09 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ の整合されたビームに対して伝送効率が 90% となる。

4. まとめ

加速試験では、出射のエミッタンス、伝送効率ともほとんど設計通りの結果が得られた。しかし高電力運転に関しては、ベーン間電圧 109 kV 以上 (P_{in} では 240 kW 以上) でデューティ 30% 以上という最終目標をまだ達成していない。これまでに、107 kV (デューティ 3%)、118 kV (0.16%) を得ているが、デューティが低い。デューティを上げるために、ループ・カプラーの改良を検討している。高電力・高デューティ運転では、温度変化にともなう共振周波数の時間的変動などが問題になる [6]。共振周波数を一定に保つために、8 台の可動インダクティブ・チュー-

ナーを空洞に取り付けてある。フルパワーでの運転が可能になったら、 N_2^+ イオンを用いた加速試験を行なって、SCRFQ の性能評価を行なう予定である。

謝辞

本研究を進めるに当たり数々のサポートをしてくださった野村教授に感謝の意を表します。X 線のエンド・ポイント・エネルギーの測定及び較正では、今村、柴田の両氏に、空洞のエージングでは富澤氏に大変お世話になりました。SCRFQ 空洞は住友重機で、高周波電源は電気興業で製作されました。ビーム・シミュレーションは核研・計算機室の FACOM M780 と VP2100 によって行なわれました。

参考文献

- [1] S. Kubono *et al.*: "Low-Energy Radioactive Nuclear Beam Project at INS", 3rd INS-RIKEN Symp. on Heavy Ion Collisions, Shinrin-Koen, Saitama, Japan, 1994, INS-Rep.-1084, 1994.
- [2] S. Arai *et al.*: "Cavity Construction and Low Power Tests of the INS Split Coaxial RFQ for Radioactive Nuclei", Proc. 1994 International Linac Conference, Tsukuba, Japan, 1994, p. 689.
- [3] Y. Takeda *et al.*: "Low Power Tests of the INS 25.5-MHz SCRFQ", presented in this meeting.
- [4] K. Niki *et al.*: "Beam Transport Design for the Linac System in the INS Radioactive Beam Facility", Proc. 1994 International Linac Conference, Tsukuba, Japan, 1994, p. 725.
- [5] K. Crandall: "Effects of Vane-Tip Geometry on the Electric Fields in Radio-Frequency Quadrupole Linacs", Los Alamos Technical Report, LA9695-MS, 1983.
- [6] N. Tokuda: "Progress in Low Beta, Low q/A RFQ's at INS", Particle Accelerators, Vol. 47, p. 171, 1994.