

## Beam Test of the Charge Stripper Section in the Heavy Ion Linacs for Unstable Nuclei

Niki K., Arai S., Arakaki Y., Imanishi A., Okada M., Takeda Y., Tojyo E. and Tomizawa M.  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK) Tanashi Branch  
3-2-1, Midori-cho, Tanashi, Tokyo 188, Japan

### ABSTRACT

The heavy ion linac complex composed of a 25.5-MHz split coaxial RFQ and a 51-MHz interdigital-H linac has come into operation at KEK-tanashi. The former 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, and the latter with  $q/A$  greater than  $1/10$  upto 1.05 MeV/u. Due to the difference of the minimum value of  $q/A$ , the charge stripping system using a carbon foil was installed. We have conducted the first beam test using the foil, and studied the effects on the increase of the charge state, the energy loss, the stragglings and the scattering. The measurement results were almost consistent with the effects which were taken into account in the beam trace simulation.

### 不安定核用重イオン複合線形加速器での荷電変換部のテスト

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構田無分室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し [1]、97年3月に $^{19}\text{Ne}^{2+}$ の初加速に成功した [2]。この複合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 172 keV/u まで加速する分割同軸型 RFQ (SCRFFQ) と  $q/A$  が  $1/10$  以上のイオンを最大 1.05 MeV/u まで加速できる IH 型ライナック (IH) からなる。 $q/A$  が  $1/10$  以下のイオンを加速するためには、この二つのライナックの間で荷電変換しなければならない。二つのライナックの間のビーム輸送系 (MEBT) の概略を図 1 に示す。SCRFFQ

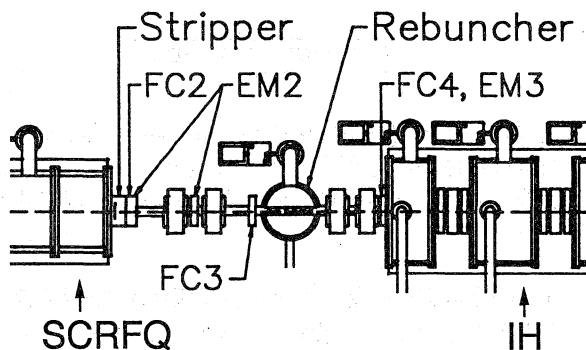


図 1: MEBT の概略図

直下のストリッパー (Stripper) は荷電変換のためのカーボン薄膜である。円錐台形のシリンダーの斜面

に薄膜を取り付け、真空をやぶることなく 8 枚迄交換できるシステムを製作した。今回窒素イオンを用いてビームテストを行ったので、その結果を報告する。

#### 2. 荷電変換部のシミュレーション

ストリッパーに付随する問題点として、ビームイオンの電荷数が複数の値に分布すること、エネルギーの損失、ストラグリング、多重散乱などがある。これらがビームプロファイルに影響を与えるため、ビームトレースのプログラム TRACEP にこれらの効果をインストールして MEBT 設計のために用いた [4]。シミュレーションの結果をみると、窒素イオンビーム (172 keV/u) が厚さ  $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  のカーボン薄膜に入射した場合、電荷数の分布は 0.4% (1 価)、10.1% (2 価)、43.9% (3 価)、37.8% (4 価)、7.8% (5 価) となる。さらにエネルギー損失 ( $\Delta E$ ) は約 6 keV/u、ストラグリング ( $\delta E$ ) は約 1 keV/u、また多重散乱は約 4 mrad となる。結果として  $x-x'$ 、 $y-y'$  平面および、 $\Delta\phi-\Delta T$  平面でのエミッタンスの増大は、それぞれ約 1.6 倍、約 1.2 倍、約 1.5 倍となる。今回これら MEBT 設計のために用いたシミュレーションで見積もった値とビームテストの結果の比較を行った。

#### 3. 荷電変換部のビームテスト

##### 3.1 テストベンチ

SCRFFQ の上流には 2.4-GHz ECR イオン源、 $90^\circ$  の偏向電磁石、2 台の四重極電磁石、4 台のアイツェル・レンズからなるビーム輸送系があり、SCRFFQ の

入口にはファラデー・カップ (FC1) が設置されている。イオン源から引き出したデューティー 10% の  $N^{2+}$  イオン (2 価) ビームの平均電流は、FC1 で約 100 nA であった。SCRFAQ の透過効率は約 80% 程でこれは通常のビームテストに比べてかなり悪い。これは SCRFAQ 入口の偏向電磁石を用いた質量分析用のシステムの集束点に半径 0.65 cm のコリメーターをいれなかったため、SCRFAQ 入射のエミッタンスプロファイルが設計のものに比べて悪かったためと考えられる。

ストリッパーとしてアリゾナ社製と KEK 田無分室製 [5] の厚さがそれぞれ 10、15  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  のものを用いた。直径は 10 mm であった。このストリッパーの直下に FC2 があり、SCRFAQ の出射ビーム電流を測定する。荷電変換した場合は電荷が増加するので実質的に電流値が増える。ファラデーカップ (FC4) は IH の入射ビーム電流を測定する。FC2 と FC4 の間には 2 式の四重極電磁石ダブレットとリバンチャーが SCRFAQ と IH の間の横方向及び、軸方向の整合をとるために設置してある [3]。この他 SCRFAQ 出口、及び IH 入口にはエミッタンスモニター EM2、EM3 が設置されている。

更に IH 出口にはファラデーカップ (FC5) が設置されている。ストリッパーと FC5 の間には MEBT の 4 台の四重極電磁石とリバンチャー、そして 4 台の IH 空洞と IH 空洞間にある 9 台の四重極電磁石があり、それらすべての強さをある価数のイオン用に最適化すると FC5 にはそのイオン以外はほとんどこない。また IH の下流にはエネルギーを測定するために 2 台の四重極電磁石、偏向電磁石、そして集電プレートからなるアナライザーシステムがある。

### 3.2 エネルギーの測定

エネルギー損失、ストラグリリングを測定するために、SCRFAQ のみを運転し、リバンチャー、IH はオフとするモード (RFQ モード) で出射エネルギーをアナライザーで測定した。リバンチャー、IH はオフであるがすべての四重極電磁石はビームを輸送するために運転している。荷電変換後は 3 価の窒素イオンの強度

Table 1: エネルギー損失とストラグリリング

厚さ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )	0	10	15
エネルギー (keV/u)	172.0	164.3	160.2
エネルギー損失	0.0	7.7	11.9
幅 (FWHM)	2.9	3.9	4.2

が一番強いが、ストリッパーの有無でなるべく条件を変えないように、四重極電磁石の強さは 2 価のイオンに調整した。測定結果を Table 1 に示す。エネルギー損失は厚さ 10  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  で 7.7 keV/u で、シミュレー

ションで見積もっていた 6 keV/u より少し大きい値であった。エネルギー損失と厚さは比例している。ストラグリリングは見積もっていた値にほぼ合っていた。

### 3.3 ビーム電流の測定

電荷が複数に分布するようすをみるために、各ファラデーカップで測定した電流値をシミュレーションと比較した。測定は RFQ モードで、ストリッパー (厚さ 10  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) 下流の四重極電磁石の強さを 2 価、3 価、4 価用にそれぞれ調整して行なった。シミュレー

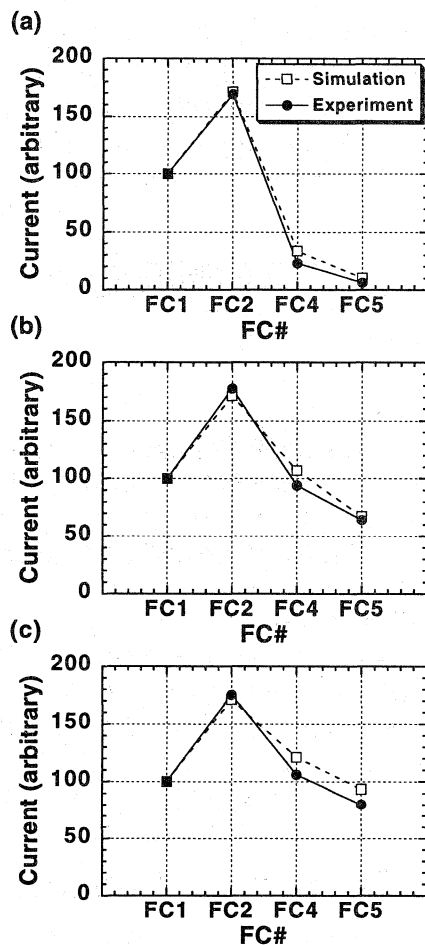


図 2: 各 FC での電流値 (単位: arbitrary)。 (a), (b), (c) は四重極電磁石の強さをそれぞれ  $N^{2+}$ 、 $N^{3+}$ 、 $N^{4+}$  用に調整。ストリッパー無しときの電流値で規格化している。

ションの電流値は透過したイオンの個数に電荷を掛けたものをたし合わせて求めた。ストリッパー無しでの電流値を使って測定とシミュレーションのそれぞれを規格化した。その結果が図 2 である。FC2 は荷電変換後、価数が増加したイオンの総電流であり、測定結果とシミュレーションの結果が良く一致している。FC5 で測定しているのはほとんどが目的の価数のイオンの電流値だけであり、結果として電荷が複数に分布す

る数はシミュレーションとほぼ合っていると見える。SCRFQ、リバンチャーそしてIHのすべてを運転するモード（IHフルモード）で約1.05MeV/uまで加速した場合の測定も行った。シミュレーションでは荷電変換後最も数の多い3価( $N^{3+}$ )はイオンの数で約40%がIH出口まで透過するはずであるが、結果は約23%程度であった。MEBTおよびIHの透過効率を改善する必要がある。

### 3.4 エミッタンスの測定

IHフルモードでIH入口でのビームのプロファイル測定した。(図3(a))四重極電磁石やリバンチャーの強さは3価のイオン( $N^{3+}$ )に対して最適化した。図3(b)はシミュレーションの結果である。ダブルスリット型のエミッタンスモニターを用いているが、IH入口の狭い空間に設置されているためスリット間隔が長くとれない。そのためエミッタンスを測定する分解能があまりよくない。それでも最適化した価数のイオン以外のプロファイルが見えているようである。多重散乱の効果を見るためには、エミッタンスの増大の効果を見る必要があるが、IH入口での測定は適当でない。IH出口でエミッタンスの増大をみるのがよいが、そのためには透過効率のよい状態で測定する必要がある。

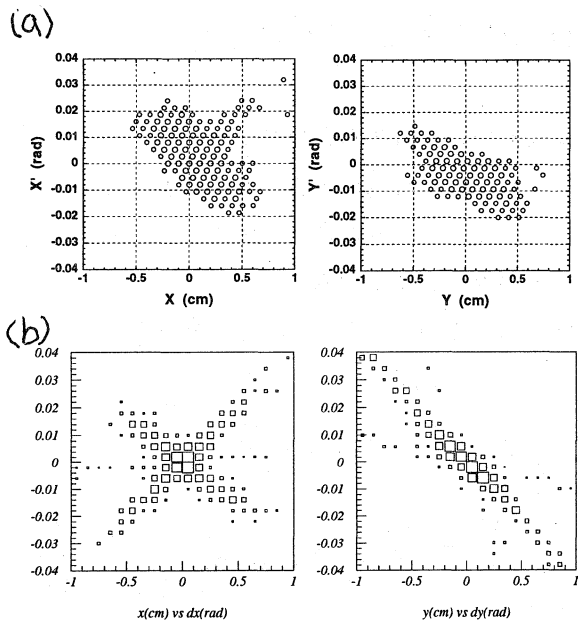


図3: 荷電変換後のIH入口でのエミッタンス。(a)測定結果。(b)シミュレーション

### 4. まとめ

カーボン薄膜を用いた荷電変換のシステムを製作し、SCRFQからの172 keV/u、 $N^{2+}$ ビームを使ってテストした。(a)電荷数の分布、エネルギー損失、スト

ラグリングはMEBT設計のために用いたシミュレーションで見積もった値と大きな違いはなかった。(b)IHフル加速の透過効率は荷電変換後、最も数の多い3価( $N^{3+}$ )に合わせた場合23%程度(3価のうちの58%程)であった。

今後はSCRFQの上流にコリメーターを設置し、透過効率のよい条件で、エミッタンスの増大等を測定する。またカーボン薄膜の径や厚さを変えてエネルギー損失、薄膜の寿命などを測定する予定である。

### 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。カーボン薄膜の製作にあたっては菅井氏に大変お世話になりました。ビーム・シミュレーションはKEK 田無・計算機室のSun-4/1000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] M. Tomizawa *et al.*: Proc. 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, B.C., Canada, 1997.
- [3] 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.
- [4] K. Niki *et al.*: Proc. the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tukuba, 1993, p. 725.
- [5] I. Sugai, *Private Communications*.