

## Design of Low-energy Ion-Decelerator

T. Honma, Y. Sakamoto, S. Hojo, M. Muramatsu, N. Miyahara, T. Okada, K. Komatsu and S. Yamada

NIRS: National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, JAPAN

### Abstract

A simple method for ion deceleration system has been studied to adopt an axial-injection beam line at NIRS-930 cyclotron. An advantage of the method utilizing the decelerator is to allow high-current ion beam extracted from an ECR-ion source due to operate high potential difference between the source and extractor. The decelerator is operated by DC-voltage consists of appropriate electrode assembly. Electric field for the decelerator is carefully designed with the aid of 3D-field simulation code. Some properties of the decelerator as well as the design studies and simulation results are presented.

### 1. はじめに

放医研の930型サイクロトロン<sup>[1]</sup> (NIRS-930) の外部イオン入射系で用いられるイオン減速器の特性について述べる。一般に ECR イオン源から引き出されるビーム電流の強度は、その引出し電圧に大きく依存し、その電圧の  $3/2$  乗に比例する関係にあると言われている。この引出し電圧は一方ではイオンのサイクロトロンへの入射エネルギーを支配しているため、Inflector の仕様及びサイクロトロンの加速条件との整合性を考えればその自由度は殆どないとも言える。ビーム電流の強度を多くし、且つサイクロトロンへのマッチングを最適にするためには入射系の途中に減速器を入れることが有効な一つの手段と考える。これはイオン引出し時の電圧差を高くとり、その後減速器でサイクロトロンへの入射エネルギーに整合性をとるという方法である。

### 2. イオン入射系

入射系は、水平部としてイオン源からのイオン引出し系、その直後の Einzel-lens、減速器、イオン分析系、2連及び3連型の静電型四重極レンズ、また垂直部として垂直

偏向用電磁石、ビームバンチャー、4組のソレノイドレンズ、及び静電型の Spiral-Inflector、がその光学要素となって構成されている。入射系の Acceptance は約  $270\pi$  mm-mrad で、これは静電型四重極レンズのボーア半径 ( $r_a = 40$  mm) 及びビームバンチャー電極径の  $\phi 30$  mm によって制限されている。イオン源は放医研で開発された永久磁石型 ECR-IS<sup>[2]</sup> を移設し使用する。これまでのテスト結果では  $^{12}\text{C}^{4+}$  ビームは取り出し電圧 25kV (パルス運転時) で最大約  $180\text{e}\mu\text{A}$  のピーク電流が得られている。イオン源から引き出されるビーム電流強度(I)と引き出し電圧(V)とは  $I \propto V^{3/2}$  の関係式<sup>[3]</sup>で表される。我々も実用上最も注視している  $^4\text{He}^{2+}$  及び  $^{12}\text{C}^{4+}$  の2種類のイオンについてこの関係式検証した。結果は Fig.1 に示すように引き出し電圧 (V) の、ある範囲内においてはこの関係式が成り立っていることが確認でき、またこの関係が目的としているサイクロトロンへの入射電圧の範囲(3kV~20kV)を満たしていることが分かる。

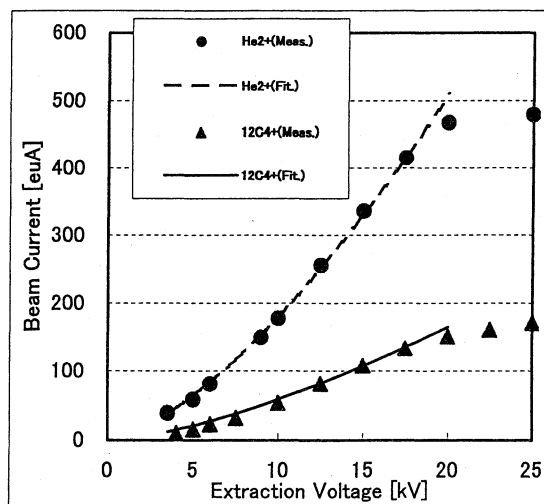


Fig. 1 ECR-IS からの引き出し電圧とイオン電流強度の関係。(Meas.): 測定値、(Fit.):  $I \propto V^{3/2}$  に Fitting した場合を示す。

### 3. 減速器の設計

入射系の中での減速器の役割は、イオン源から高い引出し電圧で引き出されたイオンのエネルギーをサイクロトロンでの加速条件に合うイオンエネルギーに最適化することである。Fig.2 には ECR-IS からイオン引出し系と減速器の概略図、及び各部電極の電位配置を示す。

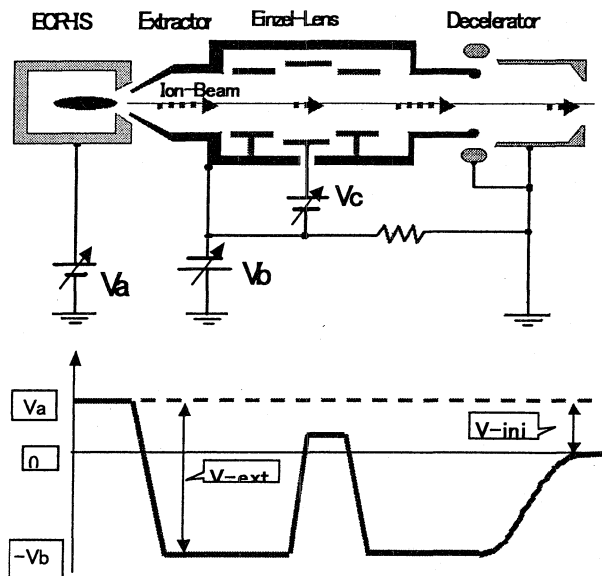


Fig.2 (上): イオン引き出し後の集束レンズとイオン減速器の概略図、及び (下): イオン引き出し電位差とサイクロトロンへの入射電圧の関係。

一般に減速器の特性として、その入り口部でイオンに対して強い発散力が働く、この影響を抑えるためには減速器入り口部の発散電場成分が出来るだけ小さい電極構造にすること、また上流側に集束レンズを配置しイオンビームを集束状態で減速器に入射させることが重要である。減速器の設計に於いては3次元コード MAXWELL-3D を使い、電極構造の異なる3種類の例について電場分布のシミュレーションを行った。結果として上記 Fig.2 に示すような電極配置を採用した。

### 4. シミュレーション

イオン光学のシミュレーションは運動方程式： $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$  を直行座標系 (x, y, z) で表し、独立変数を時間にとった数値積分 Runge-Kutta-Gill 法をプログラム化した

ものを開発した。ここでは座標軸 z をイオンの進行方向に対応づけ、また問題としている系全体が軸対称を形成するためシミュレーションの結果は全て (r, z) の座標系で表した。

a) 初期条件: イオン種:  $^{12}\text{C}^{4+}$ 、引出し電位差: 20 kV、またエミッタンスについては ECR-IS での測定結果及び第2章で述べた入射系の Acceptance を考慮し、入射電圧 10 kV について  $\epsilon_1 = 245\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  に設定した。これは規格化エミッタンスでは  $\epsilon_N = 0.66\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  となり、イオン源からの引き出された時点でのエミッタンスは  $\epsilon_{\text{ext}} = 175\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  となる。この値を基にして引き出し電極の入り口部で正立楕円の Phase-Space を仮定し、そこから更に下流の適当な位置 (18 cm 下流) を初期条件とした。また引き出し系が軸対称であることから x, y 両面で同一形状の Phase-Space を仮定した。

b) Space-Charge: ビームを構成する各イオンは自身の創る電場  $E_r$  によって発散力を受ける。この電場の強さはビーム形状を Gaussian 分布とした場合、以下の様に表される<sup>[4]</sup>。

$$E_r = (\lambda_q / 2\pi\epsilon_0 r) \cdot \left[ 1 - e^{-0.5(r/\sigma)^2} \right],$$

ここで、 $\epsilon_0$ : 真空の誘電率、 $\lambda_q$ : ビームの線電荷密度、及び  $\sigma$ : ビームサイズ (1- $\sigma$ , rms) である。また  $\lambda_q$  はイオンの速度 (エネルギー) の関数で与えられたため、加・減速を含む系ではその場所によって変化することに注意が必要である。従って Space-Charge 効果を考慮したシミュレーションでは  $\lambda_q$  及び  $\sigma$  は進行方向 z に対する関数として与えなければならない。

c) シミュレーション: 上記の初期条件で減速器出口までの個々のイオン軌道、及び Phase-Space の変化について計算を行った。前者では初期エミッタンス内の代表的な 20 点のイオンについて、また後者では 2000 点のイオンについて、それぞれシミュレーションを行った。同様に Space-Charge の効果を含んだ計算も行った。それらの結果を Fig.3 に示す。シミュレーションにおいては減速器出口部で正立楕円の Phase-Space になる様に集束レンズ (Einzel-lens) の強さを調整した。これは後方の入射系の光学計算に合わせるためである。

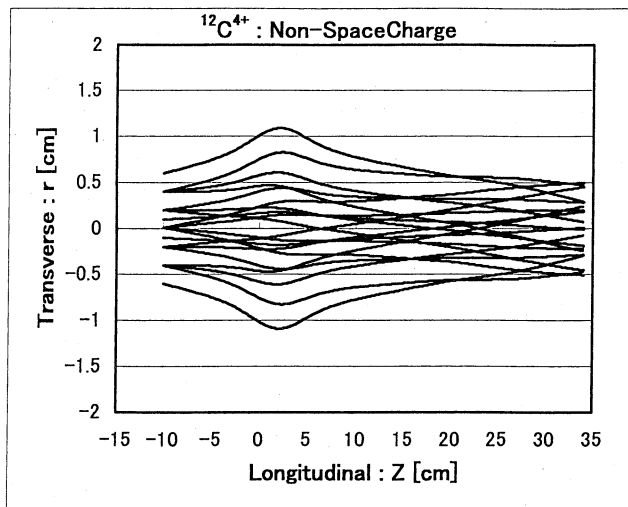


Fig. 3-(a)

Fig. 3 引き出しビーム ( $^{12}\text{C}^{4+}$ ) ,80keV から減速後 40keV のシミュレーション結果。

- (a) : イオンラジエクリ (空間電荷効果無し)、
- (b) : 減速器出口のエミタンス (空間電荷効果無し)、
- (c) : 同上で空間電荷効果を考慮したエミタンス。

ここで、(b) 及び (c) のエミタンスは、横軸 : mm  
縦軸 : mrad で表し、初期条件の  $175\pi$  mm-mrad に対して、  
共に約  $245\pi$  mm-mrad となる。

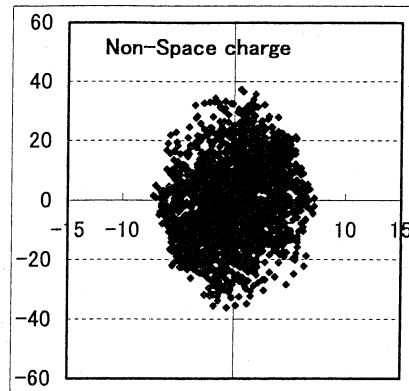


Fig. 3-(b)

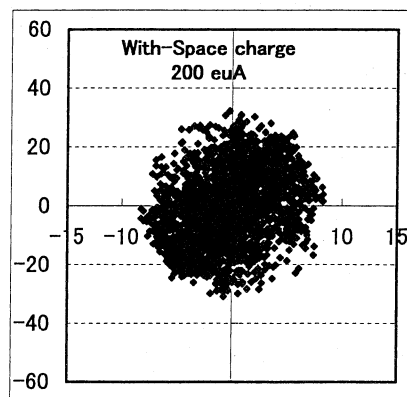


Fig. 3-(c)

## 5. まとめと今後

この報告書では、減速器の最適な電極構成を基に電場分布を求めイオン光学のシミュレーションを行い、その特性について述べた。結果的には減速器特有の入り口付近のイオンに対する強い発散効果も上流側に集束レンズ (Einzel-lens) を配置することでその効果が解消でき、また減速器内での個々のイオンに対する光学的収差も少ないことが分かった。但しこの系に於いて収差が生ずる主要因はビームサイズに対する Einzel-lens の電極径が問題になることには注意を要する。シミュレーションではビーム強度による Space-charge 効果も考慮した。これは特に Einzel-lens 部でのイオンに対する大きな減速現象に伴う影響を調べるためである。結果的には例えば  $^{12}\text{C}^{4+}$  ビームでは 200euA 程度の強度までは、その後方の輸送系に対

しても影響は少ないと言える。

この方法は更にパルス化ビーム引出しへの応用としても有効であると考えている。現在 ECR-IS 及び入射系の設置をほぼ完成しビーム調整を開始している。減速器効果が待たれる。

## 参考文献

- [1] H. Ogawa, et al, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, No2, (1978) 1988.
- [2] M. Muramatsu et al, Rev. Scientific Instr. Vol.73, No2 (2002) 573-575.
- [3] イオン源工学、アイオニック社。
- [4] T. Honma et al, Nucl. Instr. and Meth. A 490 (2002) 435-443.