

CHARGE STRIPPER SECTION IN THE INS HEAVY ION LINAC COMPLEX

Kazuaki NIKI, Heavy Ion Linac Working Group

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo,  
Midori-cho, Tanashi-shi, Tokyo 188

ABSTRACT

We are constructing the heavy ion linac complex composed of a 25.5-MHz split-coaxial RFQ linac and a 51-MHz interdigital-H linac. The former linac can accelerate ions with a charge-to-mass ratio ( $q/A$ )  $\geq 1/30$ , and the latter with  $q/A \geq 1/10$ . For the beam matching between the linacs, a charge stripper section is necessary. However, the charge stripping causes various effects on the beam profiles. We have studied such effects as the increase of the charge state, the energy loss, the straggling and the multiple scattering in the stripper, and carried out a beam trace by taking account of these effects.

核研重イオン複合線形加速器での荷電変換部

1. はじめに

核研では大型ハドロン計画 E-arena の準備研究として不安定核用線形加速器系を建設中である。この加速器系は、荷電対質量数比 ( $q/A$ ) が  $1/30$  以上のイオンを  $2 \text{ keV/u}$  から  $170 \text{ keV/u}$  まで加速する分割同軸型 RFQ と  $q/A \geq 1/10$  のイオンを最大約  $1 \text{ MeV/u}$  まで加速する IH 型ライナックからなる。この二つのライナックは  $q/A$  の最小値が違うのでこの間に荷電変換部を置かなければならない。この荷電変換部は、荷電質量数比を増加させるためのストリッパー、リバンチのための  $25.5 \text{ MHz}$  の RF 空洞 (リバンチャー)、そして二組の四重極電磁石ダブレットからなる [1]。ストリッパーには、厚さが  $10 \mu\text{g/cm}^2$  のカーボン薄膜を用いるが、ストリッパーに付随する問題点として、ビームイオンの荷電数、エネルギー損失、ストラグリング、多重散乱などがあり、これらがビームプロファイルに影響を与える。本報告ではわれわれのデザインに用いる  $170 \text{ keV/u}$  領域でのこれらの効果をまとめ、ビームトレースのプログラム TRACEP [2] にインストールしてビームマッチングに対する影響を調べたので報告する。

2. 荷電変換部

ストリッパーを通過した後のイオンの電荷数は複数の値に分布する [3]。ストリッパーが十分に厚くて、電荷分布が平衡状態に達していれば、分布は近似的にガウス分布で与えられる。例えば  $170 \text{ keV/u}$  の  $^{12}\text{C}^+$  イオンが  $10 \mu\text{g/cm}^2$  のカーボン薄膜に

入射するときには、薄膜は十分に厚いと考えられることができる [4]。従ってビームがストリッパーを通過した後では、荷電数の分布は 1.7% (1価)、23% (2価)、57% (3価)、18% (4価)、0.7% (5価) となる。

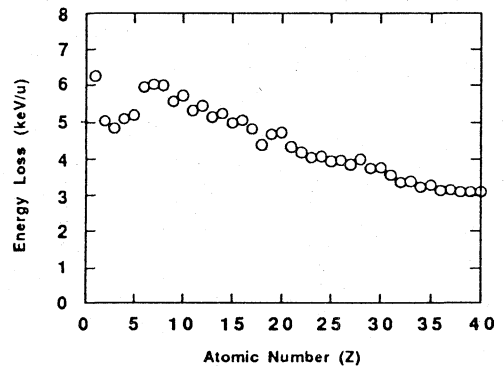


図1 エネルギー損失  $\Delta E$   
( $10 \mu\text{g/cm}^2$  のカーボン薄膜)

エネルギー損失の平均値  $\Delta E$  (核子当たりの値) は文献 [5] の値をフィットして求めた。運動エネルギーが  $170 \text{ keV/u}$ 、原子番号が  $Z$  のイオンにおける  $\Delta E$  は図 1 のようになる。核子当たりのエネルギー・ストラグリング ( $\delta E$ ) は文献 [6] によれば、

$$\delta E = \frac{2}{3} \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \Delta E \quad (1)$$

ここで $M_1$ 、 $M_2$ はそれぞれ入射イオンとターゲット原子（ここではカーボン原子）の質量である。図2に170 keV/uのイオンに対する核子当たりのエネルギー・ストラグリングを示す。個々のイオンのエネルギー損失は $\Delta E$ のまわりに $\delta E$ の幅（分散）でガウス分布させて求めた。

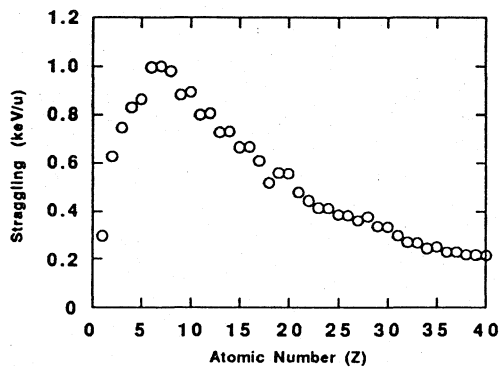


図2 ストラグリング $\delta E$   
( $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ のカーボン薄膜)

最後に多重散乱であるが、散乱角（plane angle）がガウス分布をしているものとした。分散は次のような簡単な式で表すことができる[7]。

$$\theta_\sigma = \sqrt{\frac{Z_2(Z_2+1)t}{8A_2} \frac{z_1}{A_1 T}} \quad (2)$$

ここで $\theta_\sigma$ はrmsのplane angleで単位はmrad、 $A_2$ 、 $Z_2$ 、 $t$ はそれぞれストリッパー薄膜の質量数、原子番号、厚さ（ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）、 $z_1$ 、 $A_1$ 、 $T$ は、入射イオンの電荷、質量数、核子当たりの運動エネルギー（MeV/u）である。

この式を使うことが妥当であることを確認するために、実験データとの比較を行なった。実験データでは、いろいろな薄膜の厚さ（ $10.0 - 13.6 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）と入射イオンの種類（ $^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}$ 、 $^{20}\text{Ne}$ 、 $^{35}\text{Cl}$ 、 $^{56}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Ni}$ ）に対する散乱角（plane angle）のHWHM値が与えられている。実験データと（2）式を比較するために、次のようなReduced  $\bar{\theta}_2^1$ を定義する。

$$\bar{\theta}_2^1(T) = 1.18 \times \frac{A_1}{z_1 \sqrt{t}} \theta_\sigma \quad (3)$$

ここで1.18はrmsからHWHMへの変換のパラメ

ーターである。図3に実験データ[8,9,10,11]との比較の結果を示す。但し $z_1$ として対応したエネルギーでの平衡電荷を用いた[3]。横軸は核子当たりのエネルギー（MeV/u）である。この図から分かるようにエネルギーが200keV/u以上ではよく合っているが、低いエネルギーでは必ずしも合っていない。Bohr速度（24.8keV/u）以下では電荷で受けるStopping Powerだけではなく原子全体で受ける効果を考慮しなければならないと思われる。170keV/uは比較すべきデータもなく微妙な値であるが、我々はこの式に基づいて計算しビームトレースを行なうことにした。

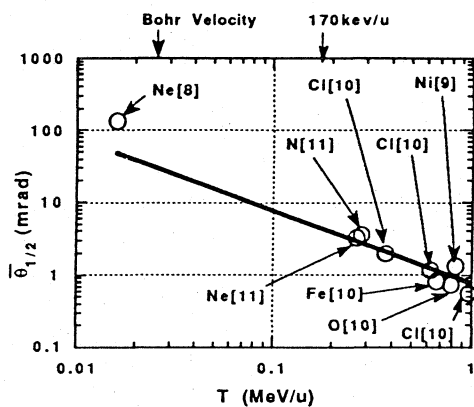


図3 Reduced  $\bar{\theta}_2^1$ 。 [ ]内は文献#

### 3. ビームトレース

2章でまとめたストリッパーのさまざまな効果をビームトレースのプログラムTRACEPの中に組み込んでトレース結果を見た。ビーム輸送系のデザインのためにトレースするイオンの例として $^{12}\text{C}^+$ を採った。他のイオンについても調べたが、 $^{12}\text{C}^+$ がほかのイオンと比べて核子あたりのエネルギー損失やストラグリングが大きく、また多重散乱の効果も大きいのでマッチングの結果を見るのに最も適している。ビームエネルギーが170 keV/uの場合、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となる。

SCRFQ出口でのビームのプロファイルを図4(a)に示す。またIH入口でのトレース結果を図4(b)と図4(c)に示す。これらの図の基準エネルギーは172 keV/uである。四重極電磁石やバンチャーの強さは3価のイオン（ $^{12}\text{C}^{3+}$ ）に対して最適化した。図4(b)は全電荷に対するトレースの結果で、図4(c)はそのうち3価のイオンだけを取り出したものである。実線はIHのアクセプタンスで $x-x'$ 、 $y-y'$ 平面では $93\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $\Delta\phi - \Delta T$ 平面では $200\pi \text{ keV/u} \cdot \text{deg}$ である。ストラグリング、多重散乱がな

いときは、 $\Delta\phi$ - $\Delta T$ 平面のビームプロファイルにはSCRFAQからの出射プロファイルにある構造がよく反映するがストラグリング、多重散乱を入れると構造がかなりはやける。 $x$ - $x'$ 、 $y$ - $y'$ 平面および、 $\Delta\phi$ - $\Delta T$ 平面でのエミッタンスの増大は、3価のイオンの場合、それぞれ約1.6倍、約1.2倍、約1.5倍となっている。結果としてビームトレースプログラム PARMTEQで1000粒子をトレースして918粒子が SCRFAQを透過し、この918粒子をTRACEPでトレースし約50%が3価のイオン( $^{12}\text{C}^{3+}$ )になりそのうちの97%以上がIHのアクセプタンスの中に入った。

この輸送系の問題点はビームサイズがかなり大きいことである。四重極電磁石やバンチャーのポア直径がそれぞれ80mm、60mm必要である。また、ストリッパーでのビーム直径が10mm強となっているので、カーボン薄膜の直径が15mm以上でなければならない。しかし、要求される厚さが $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ と薄いために、このように大きな薄膜を製作するには困難が伴う[12]。厚くすると軸方向、横方向のエミッタンスの増大が大きくなりマッチングが難しくなる。ストリッパーでのビームサイズを小さくすることは横方向のエミッタンスの増大を小さくするという意味でも重要である。しかし現状のデザインでは、ストリッパーの前にレンズが無いので、ビームサイズの制御はできない。

#### 4. まとめ

SCRFAQとIHライナックの間の荷電変換部のデザインのために、1) 170keV/uのイオンがカーボンストリッパーに入射したときのいろいろな効果について調べた。2) その結果を用いてプログラムTRACEPで $^{12}\text{C}^{+}$ イオンやその他の重イオンをトレースした。その結果設計した輸送系の透過効率は目的の価数になったイオンに対して97%以上を得た。3) 今後の課題としてストリッパーでのビーム径を制御できるようなデザインでの検討がある。

#### 参考文献

- [1]K. Niki *et al.*, Proc. of the 17th Linear Accelerator Meeting in Japan (Sendai,1992) p.237
- [2]S. Yamada, *Private Communications*.
- [3]K. Shima *et al.*, NIFS DATA-10, Jan.1991.
- [4]島邦博、日本原子力学会誌、Vol.128、No.7 (1986)580.
- [5]L. C. Northcliffe *et al.*, Nuclear Data Tables,

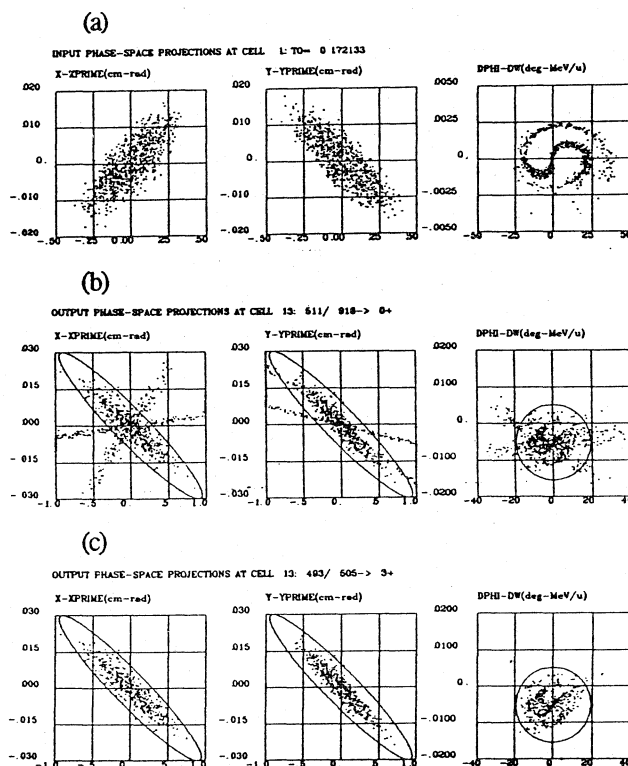


図4  $x$ - $x'$ 、 $y$ - $y'$ 平面および、 $\Delta\phi$ - $\Delta T$ 平面でのビームプロファイル。  
(a) SCRFAQ出口、(b) IH入口 (全電荷)  
(c) IH入口 (3価のみ)

A7(1970)233.

- [6]J. Linhard *et al.*, Mat.-Fys. Medd., 33(1963)14.
- [7]A. Zucker, Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions (1970), p.583.
- [8]H. Geissel *et al.*, Nuclear Instruments and Methods, B12 (1985) 38.
- [9]G. Frick *et al.*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-23-2(1976)1137.
- [10]B. W. Hooton *et al.*, Nuclear Instruments and Methods, 124(1975)29.
- [11]G. Spahn *et al.*, Nuclear Instruments and Methods, 123(1975)425.
- [12]I. Sugai, *Private Communications*.