

6 MeV/u における荷電変換効率：膜厚及びイオン種依存性

景山 雄生^{A)}、石川 盛^{A)}、藤本 哲也^{A)}、小林 千広^{A)}、佐野 悦信^{A)}、仲伏 廣光^{A)}
小川 博嗣^{A)}、上田 和宏^{A)}、村松 正幸^{B)}、北川 敦志^{B)}、村上 健^{B)}、佐藤 幸夫^{B)}

^{A)}加速器エンジニアリング株式会社

〒263-0043 千葉県千葉市稲毛区小仲台 2-13-1

^{B)}放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

1. はじめに

放医研 (NIRS) HIMAC では、イオン源で生成したビームを線形加速器で 6 MeV/u まで加速した後、カーボンフォイルストリッパーで電子を剥ぎ取ってシンクロトロンに供給している。現在まで全てのイオン種に対してカーボンフォイルの厚さを $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ に統一させ、供給を行っていた。今回、イオンビームの価数が平衡状態に達するフォイルの厚さを求める目的でこのフォイルの厚さを $50\sim 350 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ まで変化させ、H~Xe のイオン種に対して、それぞれ価数分布測定を行った。その結果、イオン種と価数に最適な厚さのフォイルを選ぶことで供給ビームの電流値を増加できることが分かった。今回は、これらの 6 MeV/u での測定結果と理論値との比較について報告する。

2. 価数分布測定方法

図 1 に価数分布測定方法を示す。カーボンフォイル通過後のビームをスイッチング電磁石にて中エネルギー実験 (MEXP) コースまで輸送し、磁場分析されたイオンの電流値をファラデーカップ 2 で測定する。NIRS HIMAC の入射器システムでは、2 つの偏向電磁石の磁場を一定の刻み幅で自動的に掃引してビームトランスポートにおける全ての関係機器 (四極電磁石、ステアラー、DBC) のパラメータを最適化させる。上記を厚さ $50\sim 350 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ までの範囲で 7 種類のカーボンフォイル厚さの組み合わせを使用し、価数スペクトルの測定を行った。Ar に対する測定例を図 2 に示す。

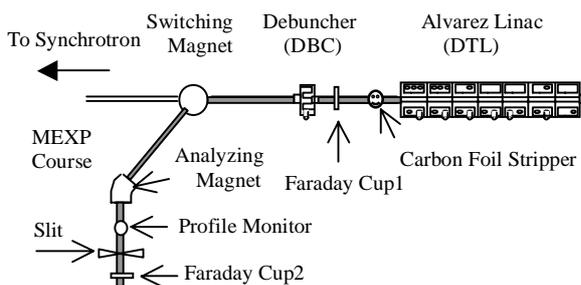


図 1：測定系レイアウト

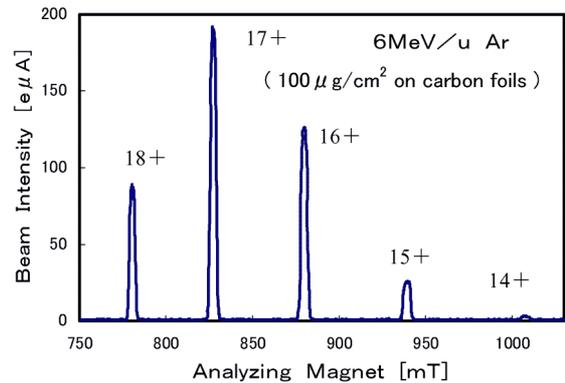


図 2：価数分布スペクトルの例

3. 測定精度

3.1 輸送効率

まず、カーボンフォイル下流 25cm に設置されているファラデーカップ 1 と、MEXP コース設置のファラデーカップ 2 とを用いてビーム輸送効率を測定した。図 3 はカーボンフォイルを使用せず、 C^{4+} をファラデーカップ 2 まで輸送し双方のファラデーカップ電流値を比較したものである。ファラデーカップ 1 から 2 までの輸送効率は 90% と評価できる。これよりトランスポートの輸送ロス率の基準値を 10% とする。一方、各イオン種でのファラデーカップ 1 と 2 での価数毎の電流値の総和の差は 12~15% 程度であった。これらの値から基準となる 10% のロス分を引くと 2~5% が価数分布測定での追加ロスである。これはエミッタンス悪化及び運動量幅増加に起因するものと思われる。

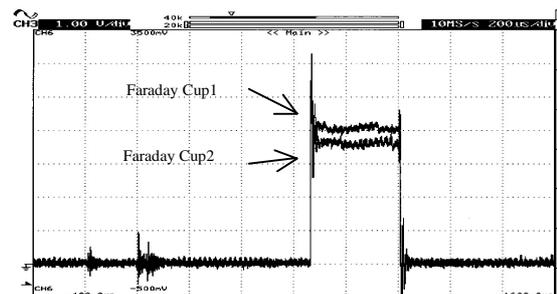


図 3：輸送効率比較

3.2 膜厚測定

膜厚は商品のカタログ値としての表示はあるが、ビームのエネルギーロス実測値から算出したものをここでは用いた。表1に膜厚のメーカー測定値と算出値を示す。エネルギーロスからの膜厚の算出はstopping powerのTABLE^[2]を使用した。エネルギーロスについてはファラデーカップ2の直前にあるプロファイルモニタによって評価した。Cのエネルギーロスは $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ で $18\text{KeV}/\text{u}$ である。モニタでの位置検出精度は 0.1mm で $0.6\text{KeV}/\text{u}$ に相当し、膜厚分解能は $3.3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ となる。

表1：膜厚のメーカー測定値と算出値

商品値	メーカー測定値	算出値
50	53.2	52
75	75	69
100	98	100
200	192	182
300	317	325
300	322	346

単位： $\mu\text{g}/\text{cm}^2$

3.3 電流値の読み取り誤差

価数分布測定グラフから各価数のイオン電流値の高さを読み取った。この読み取り誤差は $\pm 1\%$ 以内である。イオン源強度の変動に伴う誤差は支配的であり長時間的には $\pm 10\%$ 程度あるが、本測定(40分/スペクトル)はこの変動が数%以内の時に行われた。

4. データと理論値との比較

価数分布結果から各価数のビーム電流値を読み取り、それらを合計した値を基に各価数の生成率を割り出し、各カーボンフォイルの厚さとそのイオン種の荷電変換効率を求めた。(図4-1～4-5)この時、各価数のビームの輸送効率は一定とみなした。

ここでJ.P.Rozetらの各荷電状態計算^[1](図中線)と今回の測定データ(図中マーカー)をイオン種ごとに比較した。

図4-1のCについてはフォイル厚さ $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度で平衡状態に達している。また、荷電分布では平衡状態に達した6価の理論値は98.1%である。一方実験値は平衡に達した実測6点の平均を求めたところ96%であった。つまり、実験値は理論値より2.1%程度低い。同様に5価は2.0%程度高い。

図4-2のNeについてはフォイル厚さ $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 程度で平衡状態に達している。また、荷電分布では平衡状態に達した10価の理論値は86.8%である。一方実験値は平衡状態に達した実測4点の平均を求めたところ82.9%であった。つまり、実験値は理論値より3.9%程度低い。逆に9価は3.6%程度又、8価は0.7%程度高い。

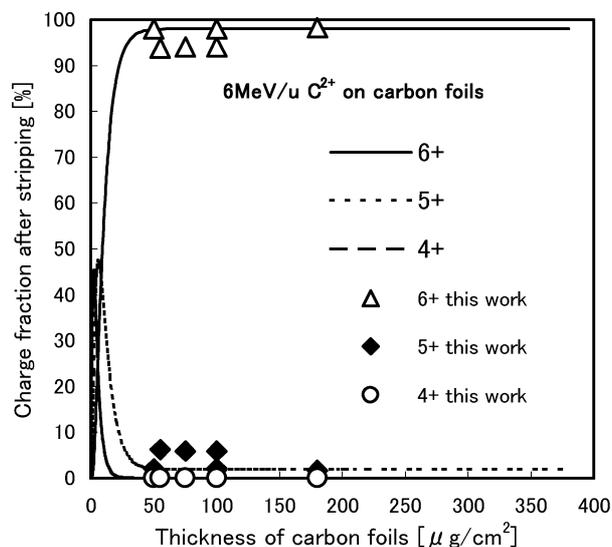


図4-1：荷電変換効率の測定

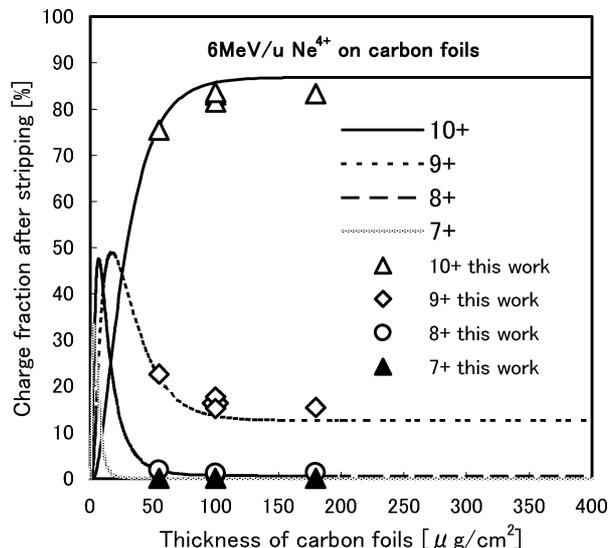


図4-2：荷電変換効率の測定

図4-3のSiについてはフォイル厚さ $180 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ で平衡状態に達した。また、荷電分布に関する理論値に対しては $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ までは良く一致するがフォイルが厚くなるにつれて差が大きくなる傾向を示している。平衡状態に達した14価の理論値は71%である。一方実験値は平衡に達した実測3点の平均を求めたところ54.8%であった。つまり実験値は理論値より16.2%程度低い。逆に13価は12.7%程度又、12価は3.6%程度高い。

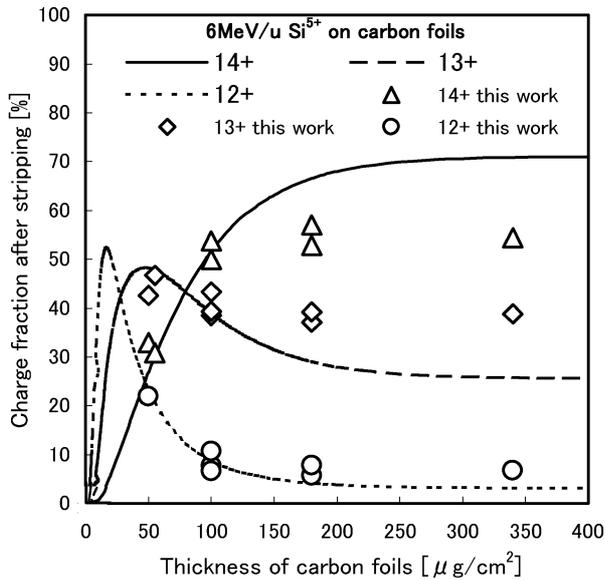


図 4-3 : 荷電変換効率の測定

図 4-4 の Ar については理論値も実測もフォイル厚さ $350 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上でも平衡状態に達しない。また、荷電分布に関する理論値との差は、特に 16 価と 18 価はフォイル厚さが増すごとに差が大きくなっていく傾向を示している。例えばフォイル厚さ $320 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ では 18 価の理論値は 45.4% である。一方実験値は 33.4% であった。つまり実験値は理論値より 12% 程度低い。逆に 17 価は 3.9% 程度、16 価は 7% 程度、15 価は 1.3% 程度、14 価は 0.1% 程度高い。

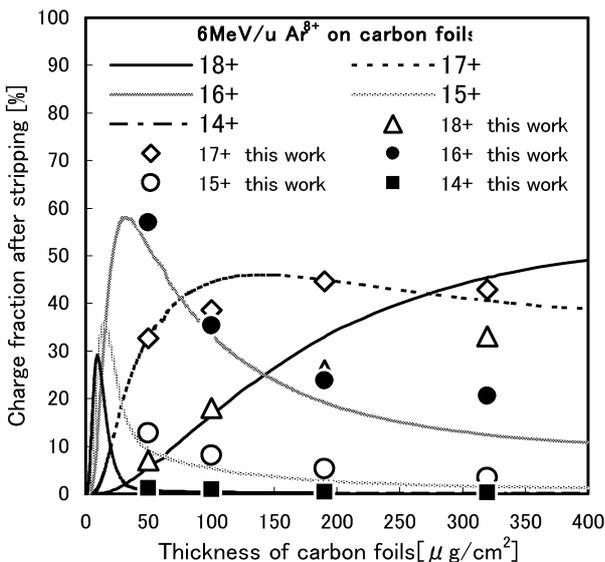


図 4-4 : 荷電変換効率の測定

図 4-5 の Fe については実測値のみを示す。最大の強度が得られる価数は 23 価であることが分かった。理論値は無い。

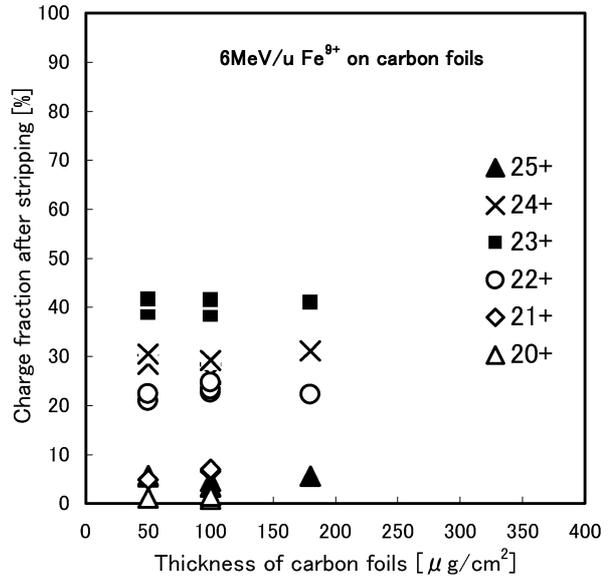


図 4-5 : 荷電変換効率の測定

5. まとめ

C や Ne については実測値、理論値共に $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ より薄いフォイル厚さで平衡状態に達した。しかしそれより重いイオン種である Si や Ar については平衡状態に達するまでフォイル厚さは $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上必要で且つ $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ でも輸送効率を悪化させないことが今回の測定より分かった。また、C、Ne より重いイオン種では現在までフォイルの厚さを $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ に固定して供給を行っていたが、これが最適なフォイル厚さではなかった。Ar の 18 価を例にするとフォイル厚さを $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ から $350 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ にする事により変換効率が 15% 増加、Si の 14 価ではフォイル厚さを $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ から $180 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ にする事により 5% 変換効率が増加した。以上のことからイオン種ごとに最適なフォイル厚さを選ぶ事により供給強度の向上が可能ということが分かった。

J.P.Rozet らによる各電荷状態計算と今回の実験データとを比較すると、重いイオン種になるに従いその差が大きくなる。例えば、全電離イオンの割合は実測値の方が理論値より小さい傾向がある。

今後はさらに精度向上を考慮して系統的測定を行う予定である。

参考文献

- [1] J.P.Rozet, C.Stephan, D.Vernhet. ETACHA: a program for calculating charge states at GANIL energies, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B107, (1996) 67-70.
- [2] HAND BOOK of STOPPING CROSS-SECTIONS FOR ENERGETIC IONS IN ALL ELEMENTS Volume 5 of The Stopping and Ranges of Ions in Matter, edited by J.F.ZIEGLER, IBM-Reserch, Yorktown Heights, N.Y.10598, pp.93 (1980)