

CHARGE-STATE DISTRIBUTION MEASUREMENTS OF ^{238}U AT 11-15 MeV/NUCLEON USING GAS AND CARBON-FOIL CHARGE STRIPPERS

Hironori Kuboki #, Hiroki Okuno, Hiroo Hasebe, Shigeru Yokouchi, Nobuhisa Fukunishi, Osamu Kamigaito, Hiroshi Imao, Akira Goto, Masayuki Kase, and Yasushige Yano
 RIKEN Nishina Center Accelerator Based Science
 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

Abstract

Charge distributions of ^{238}U at 11, 14, and 15 MeV/nucleon were measured at RIKEN using a gas and carbon-foil (C-foil) charge strippers. A gas charge stripper is one of the good candidates with long lifetime. However the charge states obtained with a series of charge-state distribution measurements using a gas stripper were within 56 ± 1 , which is far smaller than the lowest acceptable charge state of 69. We measured charge state distribution changing the incident energy with the aim of searching the energy at which the charge state becomes higher than 69. It was found that the most probable charge states attained equilibrium at 56, 61, and 62 in nitrogen gas charge stripper in the case of 11, 14, and 15 MeV/nucleon, respectively. Those for C-foils at 11, 14, and 15 MeV/nucleon were 72, 76, and 77, respectively.

ガス、炭素薄膜荷電ストリッパーを用いた、11-15 MeV/nucleon における ^{238}U ビーム荷電分布測定

1. はじめに

重イオン加速器では、加速されるイオンビームの価数を上げる荷電ストリッパーが重要な役割を担っている。理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) では、1 台の線形加速器と 4 台のサイクロトロン、2 回の荷電変換を経て ^{238}U ビームを 345 MeV/nucleon まで加速する。第一荷電ストリッパーは $300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜を用い、 $^{238}\text{U}^{35+}$ から $^{238}\text{U}^{71+}$ に、第二荷電ストリッパーは $17 \text{mg}/\text{cm}^2$ の炭素膜を用いて $^{238}\text{U}^{71+}$ から $^{238}\text{U}^{86+}$ に荷電変換する^[1, 2]。荷電ストリッパーに入射するビームエネルギーはそれぞれ 11、51 MeV/nucleon である。炭素膜は有限の寿命を持ち、特に第一ストリッパーの寿命は、現状では約 5~9 時間である^[2]。今後ビーム強度を 100 倍以上増やす計画があるため^[3, 4, 5]、第一ストリッパーの長寿命化が急務である。

炭素膜ストリッパーに代わる候補として、寿命の問題がない、ガスを用いたガスストリッパーが開発中である。しかし、ガス中で得られる価数について RIBF で必要とされているような 10 MeV/nucleon 近傍ではデータがなかった。そこで我々は 11 MeV/nucleon のウランビームの窒素、アルゴン、二酸化炭素中での平衡価数を測定する実験を行った。結果は 56 価前後の価数しか得られず、後段の加速器 (fRC) では加速不可能という結論になった^[6]。

fRC で加速可能な価数は 69 価以上であるため、荷電ストリッパー上下流の加速器を改造し、入射ビームのエネルギーを上げることで価数を上げる案が検討された。この案を詳細に検討するためにはガス中で得られる価数のエネルギー依存性のデータが

不可欠であり、11、14、15 MeV/nucleon のエネルギーにおいて窒素ガス、炭素薄膜を用いて荷電分布を測定した。

2. 実験

荷電分布測定は理化学研究所加速器施設で行った。ECR イオン源^[7]で生成された ^{238}U ビームを理研線形加速器^[8]とリングサイクロトロン (RRC)^[9]により 11、14、15 MeV/nucleon まで加速する。加速周波数 (ハーモニクス) と価数はそれぞれ 18.25 MHz (h=9)、35 価、18.25 (h=8)、41 価、19.0 (h=8)、41 価である。各エネルギーについて表 1 にまとめる。

表 1: 各エネルギーと加速周波数、ハーモニクス、価数の対応

エネルギー (MeV/nucleon)	11	14	15
周波数 (MHz)	18.25	18.25	19.0
ハーモニクス	9	8	8
価数	35	41	41

実験の全体図を図 1 に示す。炭素膜ストリッパーは RRC 出口下流に位置し、ガスストリッパーは fRC の上流に位置する。双方とも各価数のビームはストリッパー下流の偏向電磁石により分析され、下流のファラデーカップ (FC) でビーム電流を測定する。

kuboki@riken.jp

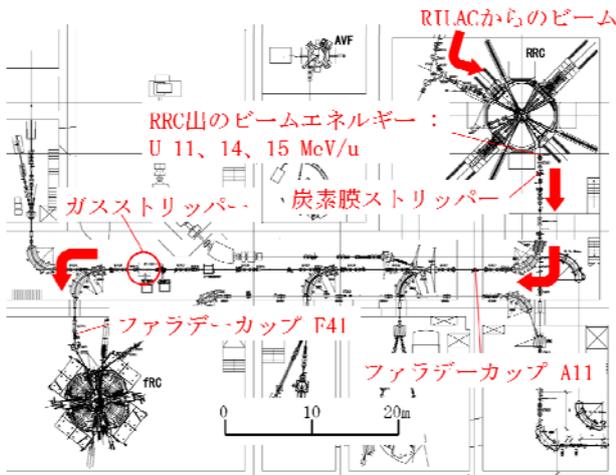


図 1: RRC から fRC までのビームライン。

2.1 ガス荷電分布測定

ガスストリッパーでの荷電分布測定概要図を図 2 に示す。RRC からのビームは FC D17 までトランスポートされ、ストリッパーに照射するビーム電流を測定する。ガスストリッパー通過後、偏向電磁石により価数を選択し、FC F41 で価数毎のビーム電流値を測定する。スポットサイズは 6 mmφ、典型的な照射ビーム電流は 11、14、15 MeV/nucleon のとき、それぞれ 4.7 (強度 1/10)、3.8 (full)、8.6 (full) p nA であった。

ガスは窒素を使用し、荷電分布のガス厚さ依存性を見るため、0.3~4.5kPa (50~750 μg/cm²) の範囲で圧力を変えながら測定した。

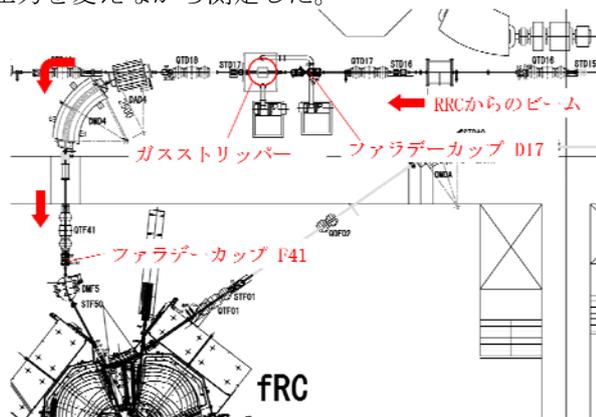


図 2: ガスストリッパー周辺図。

2.2 炭素膜荷電分布測定

炭素膜荷電分布測定概要図を図 3 に示す。FC A01a でストリッパーへの照射ビーム電流を測定し、炭素膜ストリッパー通過後、偏向電磁石により価数を選択し、FC A11 で価数毎のビーム電流値を測定する。炭素膜ストリッパー上のスポットサイズは 5 mmφ、照射ビーム電流は 11、14、15 MeV/nucleon のとき、それぞれ 5.7 (1/10)、1.4 (1/2)、1.0 (1/10)

p nA であった。

炭素膜は Arizona 製のもの^[10]を使用し、39.9、85.8、109、223、299、550、991 μg/cm² の異なる厚さについて荷電分布測定を行った。15 MeV/nucleon のエネルギーでは 7045 μg/cm² でも測定した。

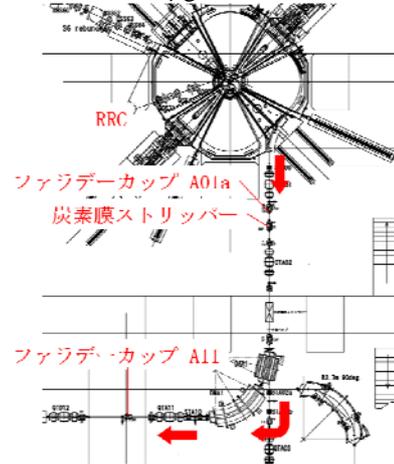
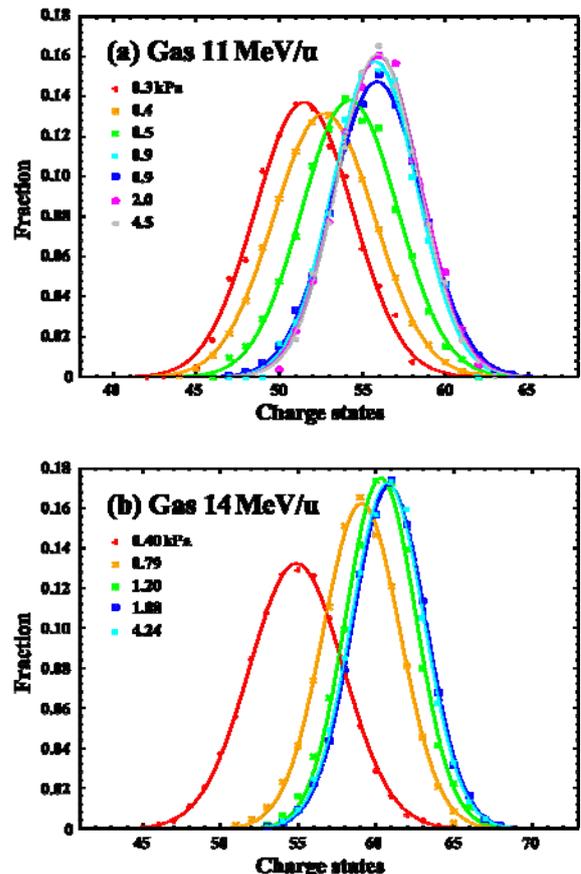


図 3: RRC から A11 までのビームライン。

3. 結果

3.1 ガスストリッパー荷電分布

ガスストリッパーでの荷電分布を図 4 に示す。



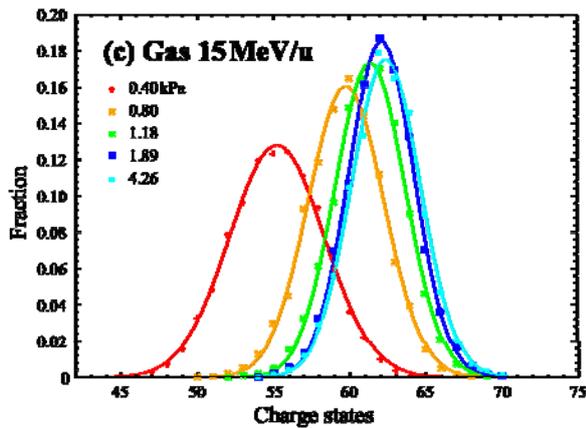


図 4: 荷電分布測定結果。(a) 11MeV/nucleon での荷電分布測定結果。赤、橙、緑、水色、青、紫、灰色はそれぞれ N_2 0.3、0.4、0.5、0.9、0.9 (2 回目)、2.0、4.5 kPa での荷電分布。(b) 14 MeV/nucleon。赤、橙、緑、青、水色はそれぞれ 0.4、0.79、1.2、1.88、4.24 kPa での荷電分布。(c) 15 MeV/nucleon。赤、橙、緑、青、水色はそれぞれ 0.4、0.8、1.18、1.89、4.26 kPa での荷電分布。

3.2 炭素膜ストリッパー荷電分布

炭素膜ストリッパーでの荷電分布を図 5 に示す。

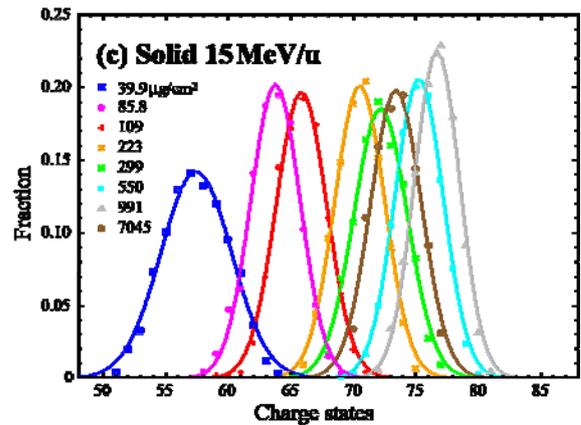
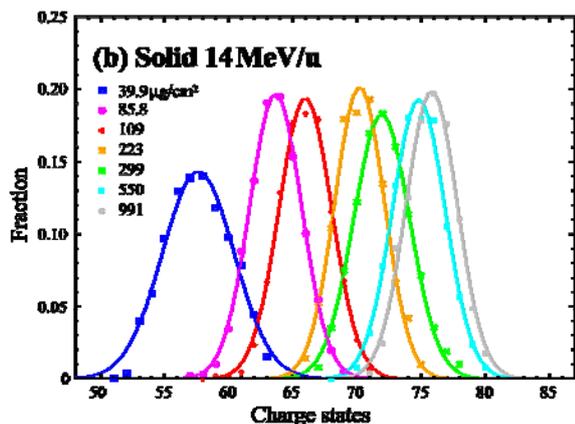
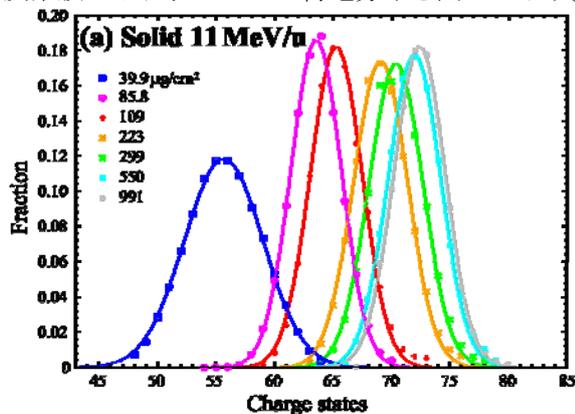


図 5: 炭素膜荷電分布測定結果。(a) 11MeV/nucleon。(b) 14 MeV/nucleon。(c) 15 MeV/nucleon。青、紫、赤、橙、緑、水色、灰色、茶はそれぞれ Arizona 炭素膜、厚さ 39.9、85.8、109、223、299、550、991、7045 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ での荷電分布。

4. 考察

荷電分布の中心値を厚さの関数としてプロットしたものを図 6 に示す。ガスでは 11、14、15 MeV/nucleon とエネルギーが上がるにつれて、平衡価数も 56、61、62 価と上がる。炭素膜は 72、76、77 価と平衡価数がシフトした。

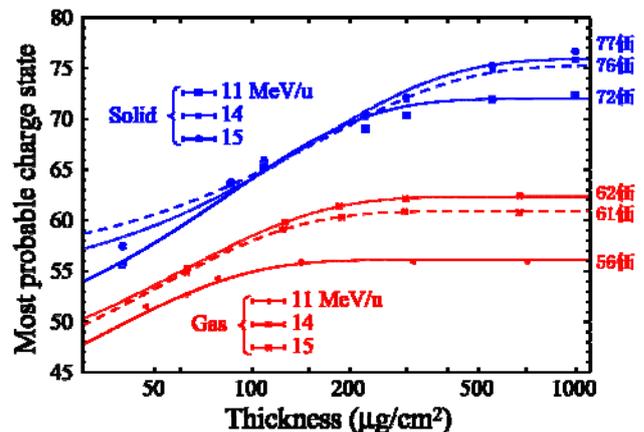


図 6: +, ×, * はガストリッパーで 11、14、15 MeV/nucleon における価数の中心値。□, ■, ○ は炭素膜ストリッパーでの値。実線、破線、点線はそれぞれ 11、14、15 MeV/nucleon のデータをフィットしたもの。

ガス中での価数を予測する経験式と比較するため、これまでに得られている経験式とデータをエネルギーの関数としてプロットした。最近得られた経験式⁹⁾と比較すると、11、14、15 MeV/nucleon における予言値が 55.7、59.7、61.1 であるのに対し、実験値はそれぞれ、56.1、60.9、62.3 であった。新経験式を用いて 69 価が得られるエネルギーを計算した

ところ、24~25 MeV/nucleon のエネルギーが必要であることがわかった。

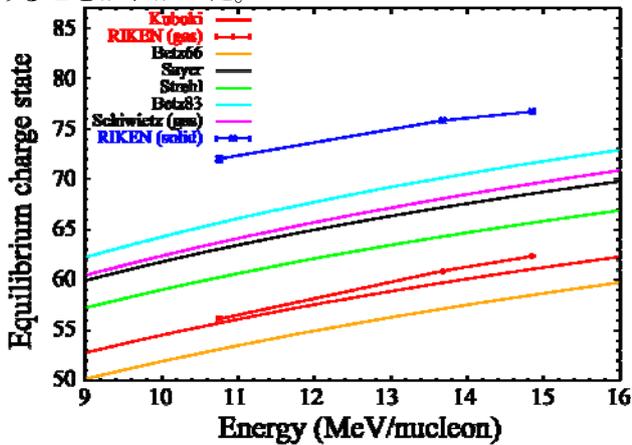


図 7: 平衡価数をエネルギーの関数としてプロットしたものと、これまでに得られている価数を予測する経験式。赤のプロットは実験データ。赤、橙、黒、緑、水色、ピンクの実線はそれぞれ Ref. [6]、[11-15]。比較のため炭素膜で得られた値もプロットしてある(青)。

炭素膜での経験式とデータをプロットしたものを図 8 に示す。データに最も近い予言値を示したのは Strehl et al.^[13]によるもので、予言値は 74、77、78 となり、実測値 72.0、75.8、76.7 と比較すると 2 価以内で一致した。

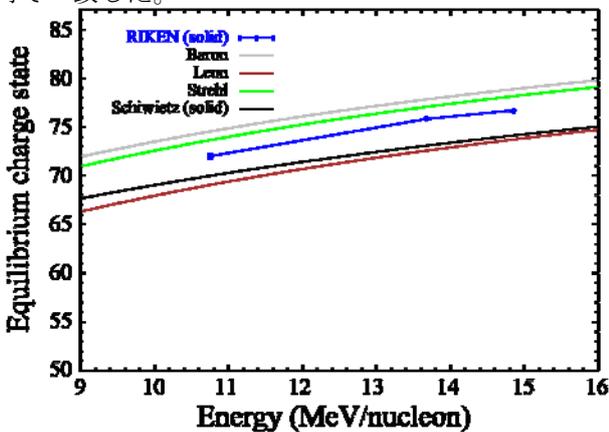


図 8: 炭素膜で得られた平衡価数をエネルギーの関数としてプロットしたものの。灰、茶、緑、黒の実線は固体で得られている経験式[16, 17, 13, 15]。

5. 結論

窒素ガスと炭素膜を用いて 11、14、15 MeV/nucleon のエネルギーについて荷電分布測定を行った。ガスでは各エネルギーに対し 56、61、62 価が得られ、fRC で加速可能な 69 価までは至らなかった。経験式によると窒素ガス中で 69 価が得られるエネルギーは 24~25 MeV/nucleon という結果になった。炭素膜では上記エネルギーにおいて 72、76、77 価が得られ、Strehl らによる経験式と 2 価以

内で一致した。

参考文献

- [1] H. Hasebe, et al., Nucl. Instr. and Meth. A **613**, 453-456 (2010).
- [2] H. Hasebe et al., in this proceedings.
- [3] Y. Higurashi et al., in this proceedings.
- [4] K. Yamada et al., in Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, (Kyoto, Japan, 2010), p. 789..
- [5] K. Suda et al., in Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference, (Kyoto, Japan, 2010), p. 3726.
- [6] H. Kuboki et al., submitted to Phys. Rev. ST Accel. Beams.
- [7] T. Nakagawa et al., Nucl. Instrum. and Methods B 226, 392 (2004).
- [8] M. Odera et al., Nucl. Instrum. and Methods 227, 187 (1984).
- [9] Y. Yano, in Proceedings of the 13th International Cyclotron Conference, (World Scientific Publishing Co., Vancouver, BC, Canada, 1992), p. 102.
- [10] ACF-Metals Arizona Carbon Foil Co. Inc., URL: <<http://www.techexpo.com/firms/acf-metl.html>>.
- [11] H. Betz et al., Phys. Lett. 22, 643 (1966).
- [12] R. Sayer, Rev. de Phys. Appl. 12, 1543 (1977).
- [13] P. Strehl, Handbook of Accelerator Physics and Engineering (World Scientific Press, 1999), p. 555, 2nd ed.
- [14] H. Betz, Applied Atomic Collision Physics (Academic Press Inc., Oak Ridge, Tennessee, 1983), vol. 4, p. 1.
- [15] G. Schiwietz and P. Grande, Nucl. Instrum. and Methods B 175-177, 125 (2001).
- [16] E. Baron, M. Bajard, and C. Ricaud, Nucl. Instrum. and Methods A 328, 177 (1993).
- [17] A. Leon et al., At. Data Nucl. Data Tables 69, 217 (1998).