

CHARGE DISTRIBUTION MEASUREMENTS OF ^{238}U AND ^{136}Xe AT 10.75 MeV/NUCLEON USING A GAS CHARGE STRIPPER

Hironori Kuboki^{1,A)}, Hiroki Okuno^{A)}, Shigeru Yokouchi^{A)}, Takashi Kishida^{A)}, Hiroo Hasebe^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Hiromichi Ryuto^{B)}, Masayuki Kase^{A)}, Akira Goto^{A)}, Yasushige Yano^{A)}

^{A)} Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

^{B)} Kyoto University

Katsura, sakyou-ku, Kyoto, 615-8510

Abstract

Charge distributions of ^{238}U and ^{136}Xe at 10.75 MeV/nucleon were measured at RIKEN using a gas charge stripper. We have developed a gas charge stripper with differential pumping system which enabled us to obtain gas thickness up to 865 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in the case of nitrogen. The most probable charge state of uranium and xenon ions reached the equilibrium state of 56.0 and 40.5 at the nitrogen thickness of 138 and 171 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, respectively. The thickness at which charge states come to equilibrium depends on gas materials. The thicknesses for equilibrium charge state of uranium were 96 and 137 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, using Ar and CO_2 , respectively.

ガス荷電ストリッパを用いた、10.75 MeV/nucleonにおける ^{238}U 、 ^{136}Xe ビーム荷電分布測定

1. はじめに

複数の加速器を用いて重イオンを多段式に加速する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が必要不可欠である。図1に示すように理化学研究所RI Beam Factory (理研RIBF)では1台の線形加速器と4台のサイクロトロン、2回の荷電変換を用いて ^{238}U 、 ^{136}Xe ビームを345 MeV/nucleonまで加速する^[1]。 ^{238}U の場合、第一荷電ストリッパは $^{238}\text{U}^{35+}$ から $^{238}\text{U}^{71+}$ に、第二荷電ストリッパは $^{238}\text{U}^{71+}$ から $^{238}\text{U}^{86+}$ に荷電変換する。現在では双方の荷電ストリッパとも炭素膜を用いており^[2]、厚さはそれぞれ279 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、14 mg/cm^2 である。荷電ストリッパに入射するビームエネルギーはそれぞれ10.75 MeV/nucleon、50 MeV/nucleonである。2箇所の荷電ストリッパのうち、第一荷電ストリッパが特に問題点を抱えており、1) 熱負荷により寿命が12~24時間と短い、2) 炭素膜の厚さの非一様性によるエネルギー広がり大きい、という2点である^[3]。この2つの問題を克服するものとして、ガスを用いた荷電ストリッパが有力な候補である。

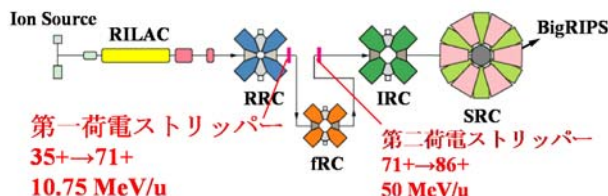


図1：理研RIBFでの ^{238}U ビーム加速モード。イオン源で生成された $^{238}\text{U}^{35+}$ ビームを、1台の線形加速器と4台のサイクロトロンで345 MeV/nucleonまで加速する。fRC^[4]の前後に荷電ストリッパを用いて荷電変換を行っている。

しかし、これまで10 MeV/nucleon近傍のエネルギーの重イオンビームを用いたガス荷電ストリッパの荷電分布データは少なく、かつ ^{238}U 、 ^{136}Xe のような高い原子番号を持つ重イオンでの実験例は皆無であるため、得られる価数が予想できなかった。経験式から導出された ^{238}U の価数の予言値も53~63の範囲ではらつきがあり^[5-8]、理論的にも未完成なため信頼性が低い。そこで我々は既存のガス標的システム^[9]を荷電ストリッパとして使用し、荷電分布測定を行った。

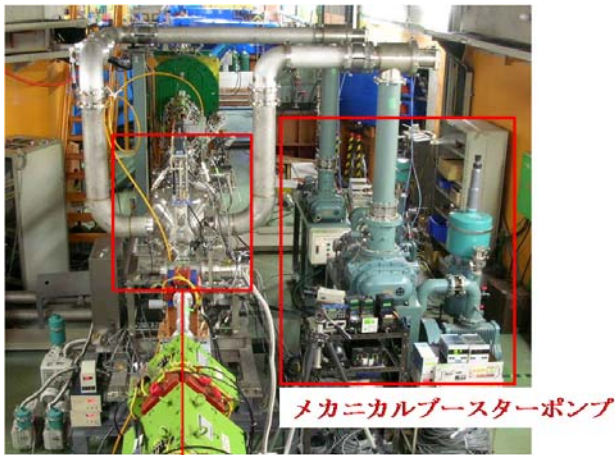
2. 実験

2-1. ガス荷電ストリッパ

ガス荷電ストリッパの鳥瞰を図2に、ガス荷電ス

¹ E-mail: kuboki@riken.jp

トリッパーの構造と、各差動排気システムの概要を図3に示す。ガス荷電ストリッパーはstage1~stage6の部屋に区切られており、ガスセル内部をstage1として、外側にいくにしたがってstage2-6となっている。それぞれのstageを真空ポンプで差動排気することにより、ガスセルを膜等で仕切ることなく、かつビームラインの真空を悪化させずに、セル内部のガス圧力を数kPaに保つことが可能である。ビームライン上の圧力の上限はビームライン真空度のインターロックのリミットで決まっており、 4×10^{-3} Paである。窒素を用いた場合の各stageの圧力分布を図4に示す。オフライン測定ではビームラインの真空度をリミット以下に保てる範囲で、stage1の圧力を7.7 kPaまで上げることができた。これはガスセルの長さが10 cmであることを考慮すると、厚さ865 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ に相当する。炭素膜の場合は約500 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ で価数が平衡に達したことより^[10]、平衡価数の探索には十分な厚さであると言える。



ガス荷電ストリッパー

図2：ガス荷電ストリッパーと、差動排気のためのメカニカルブースターポンプ鳥瞰図。

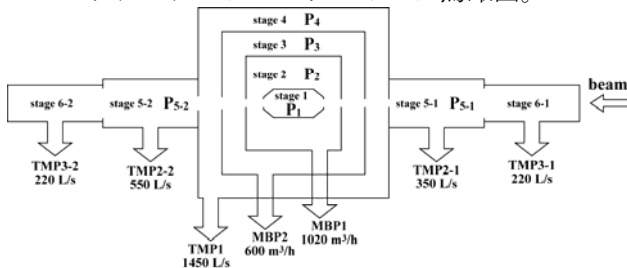


図3：ガス荷電ストリッパー差動排気システム。ガスセルをstage1として、セルの外側にいくにしたがってstage2~stage6となっている。各stage1~stage5間はオリフィスでつながれており、オリフィス径は入射側の4つと出射側の上流2つが6 mmφ、出射側の下流2つがそれぞれ8、10 mmφである。ガスセルの物理的な長さは10 cmである。

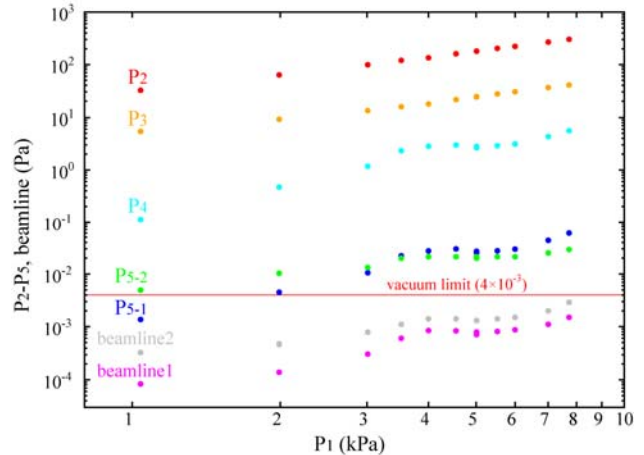


図4：オフラインでの圧力分布。P1はガスセル内の圧力、P2~P5は図3のstage2~stage5までの圧力。beamline1、2はガスセルからそれぞれ上下流に2 m、5 m離れたビームライン上での圧力。beamline1、2ともに 4×10^{-3} Pa以下に抑える必要がある。

2-2. 荷電分布測定

荷電分布測定は理化学研究所加速器施設で行った。実験概要を図5に示す。18 GHz ECRイオン源^[11]で生成された $^{238}\text{U}^{35+}$ ビームを理研線形加速器^[12]とリングサイクロトロン(RRC)^[13]により10.75 MeV/nucleonまで加速する。RRCより出射されたビームはビーム分配室に設置されたガス荷電ストリッパーまで輸送される。ガス荷電ストリッパー下流には双極電磁石が設置されており、荷電変換されたビームを価数別に振り分けることができる。双極電磁石のさらに下流F41に設置されたファラデーカップF41により、価数毎の電流値 I_{F41} を測定する。ガス荷電ストリッパー上流D16のファラデーカップD16での測定電流値 I_{D16} との比を取ることに、価数 q の割合 F を次のように定義した。 $F = \frac{I_{F41}/q}{I_{D16}/35}$ 。ここでF41、D16

で測定された電流値を粒子数単位に直している。

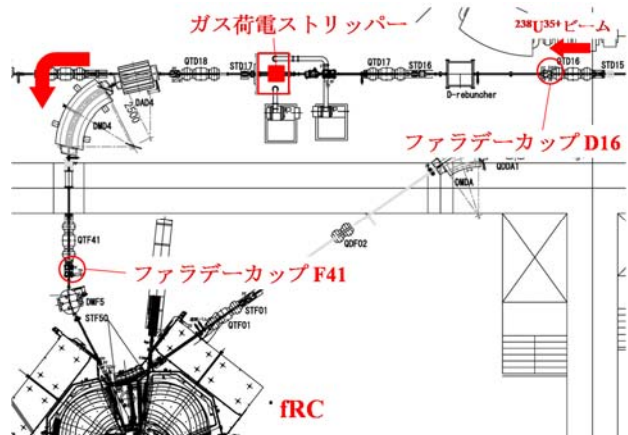


図5：荷電分布測定セットアップ。

3. 結果

^{238}U ビーム荷電分布測定結果を図6に示す。Heは0.68 kPaの1点のみ、窒素は0.3~4.5 kPaの範囲で圧力を変化させながら測定した結果である。Stage1の圧力上昇と共にピーク位置も価数が高い側にシフトし、2 kPa弱でピーク位置の移動はなくなり平衡に達する。そのときピークとなる価数(平衡価数)は56.0価であった。同様に ^{136}Xe ビームの結果を図7に示す。平衡価数は40.5価であった。図8に荷電分布の中心となる価数を厚さの関数としてプロットしたものを示す。 ^{238}U についてはガス種をAr、 CO_2 と変えて測定した結果も示す。平衡に達する厚さは窒素、Ar、 CO_2 でそれぞれ、138、96、137 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ となった。

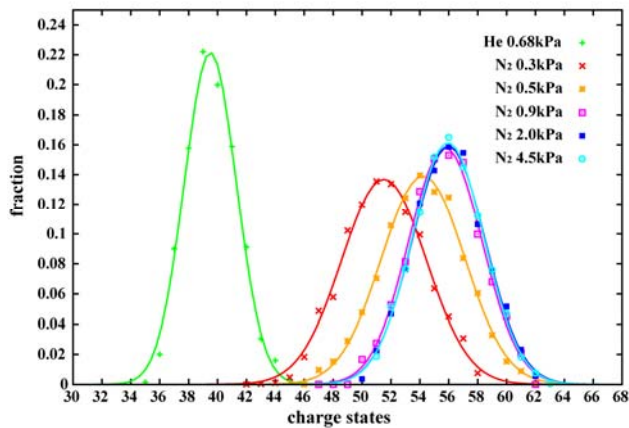


図6：U荷電分布測定結果。緑、赤、橙、紫、青、水色はそれぞれHe 0.68、 N_2 0.3、0.5、0.9、2.0、4.5kPaでの荷電分布。

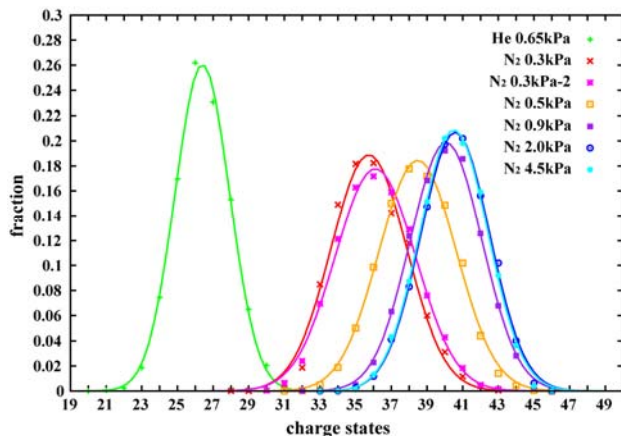


図7：Xe荷電分布測定結果。緑、赤、桃、橙、紫、青、水色はそれぞれHe 0.68、 N_2 0.3、0.3(2回目)、0.5、0.9、2.0、4.5kPaでの荷電分布。

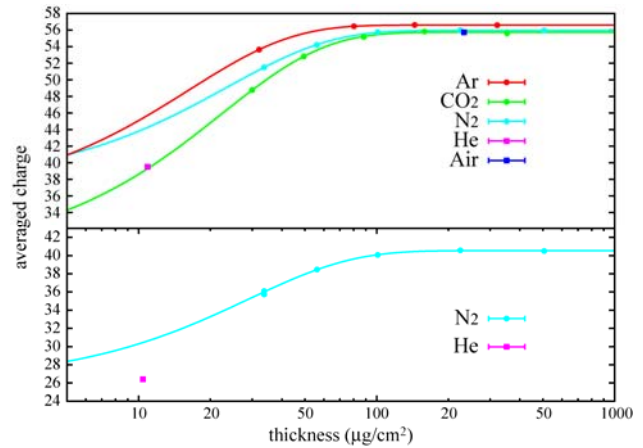


図8：荷電分布の中心値と荷電ストリッパ厚さの関係。上段、下段はそれぞれ ^{238}U 、 ^{136}Xe のもの。 ^{238}U についてはAr、 CO_2 、空気の結果も示す。

4. 結論

^{238}U 、 ^{136}Xe ビーム10.75 MeV/nucleonの荷電分布測定を行った。得られた平衡価数は ^{238}U では56.0価、 ^{136}Xe では40.5価が得られた。平衡に至る厚さにはガス種依存性があり、 ^{238}U では窒素、Ar、 CO_2 でそれぞれ、138、96、137 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。ガスの物性の違いと平衡に至る厚さの関係についても考察予定である。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth. B 261, (2007) 1009-1013.
- [2] H. Hasebe, H. Ryuto, N. Fukunishi, A. Goto, M. Kase, Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth. A 590 (2008) 13-17.
- [3] N. Fukunishi et al. RIKEN Acc. Prog. Rep. 2008.
- [4] T. Mitsumoto et al., Proc. 17th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications 384 (2004).
- [5] H.D. Betz et al., Phys. Lett. 15 (1966) 643.
- [6] R.O. Sayer Phys. Rev. App. 12 (1977) 1543.
- [7] P. Strehl, Handbook of Accelerator and Engineering, World Scientific Press.
- [8] A.N. Perumal, V. Horvat, R.L. Watson, Y. Peng, K.S. Fruchey, Nucl. Instr. and Meth. B 227, (2005) 151-260.
- [9] T. Kishida, Y. Gono, M. Shibata, H. Watanabe, T. Tsutsumi, S. Motomura, E. Ideguchi, X.H. Zhou, T. Morikawa, T. Kubo, M. Ishihara, Nucl. Instr. and Meth. A 438 (1999) 70-72.
- [10] H. Ryuto, N. Fukunishi, H. Hasebe, N. Inabe, S. Yokouchi, O. Kamigaito, A. Goto, M. Kase, and Y. Yano, Proc. 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, USA, 2005, p.3751.
- [11] T. Nakagawa, Y. Higurashi, M. Kidera, T. Aihara, M. Kase, and Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth. B 226 (2004) 392-400.
- [12] M. Odera, Y. Chiba, T. Tonuma, M. Hemmi, Y. Miyazawa, T. Inoue, T. Kambara, M. Kase, T. Kubo, and F. Yoshida, Nucl. Instr. and Meth. A 227 (1984) 187-195.
- [13] Y. Yano, Proc. 13th Int. Cyclo. Conf. 102 (1992).