

## 解 説

理化学研究所 RI ビームファクトリーにおける  
チャージストリッパー

龍頭 啓充\*

## Charge strippers in RIKEN RI-beam factory

Hiromichi RYUTO\*

## はじめに

重イオンを高いエネルギーまで加速するためにはイオンが高い荷電状態にある事が重要である。チャージストリッパーはイオンから電子を剥ぎ取りイオンの価数を高める装置である。イオンの速度が大きいほど平衡電荷が高いので、複数の加速器を用いて重イオンを高いエネルギーまで加速する重イオン複合加速器施設においては、それぞれの加速器間にチャージストリッパーを置き電子を剥ぎ取る事により特に効率の良い加速を行う事が出来る。理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) は昨年度稼動した重イオン複合加速器施設である。RIBF は 4 台のリングサイクロトロンと、理研重イオンリニアック (RILAC) 及び AVF サイクロトロンの 2 台の入射器で構成されている<sup>1)</sup>。本レポートでは RILAC 入射に限って議論する。図 1 に RIBF の模式図を示す。4 台のリングサイクロトロンのうち理研リングサイクロトロン (RRC) は約 20 年間使用されてきたサイクロトロンであり、RILAC の直後における加速に用いられる。残り 3 台のリングサイクロトロンは新設された。それらは上流側から固定周波数リングサイクロトロン (fRC)、中間段リングサイクロトロン (IRC) 及び超伝導リングサイクロトロン (SRC) である。イオン源から引き出された重イオンビームは RILAC、RRC の順に加速され、ウラニウム等重いイオンはその後 fRC で加速され、IRC で加速された後に最終的に SRC で加速される。軽いイオンは RRC で加速された後 fRC を用いずに直接 IRC に送られる。チャージストリッパーは前半 3

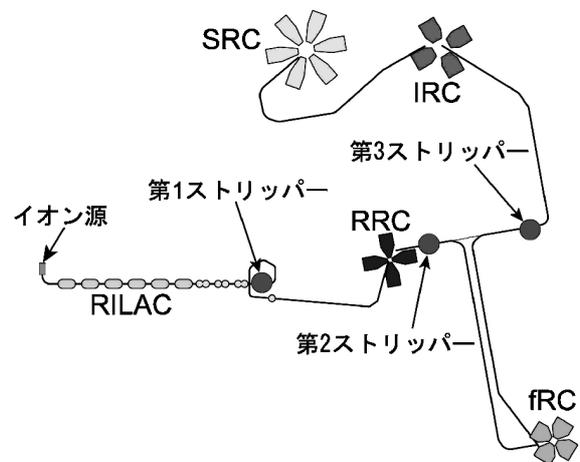


図 1 理化学研究所 RI ビームファクトリーの模式図。加速器とチャージストリッパーの配置を示す。

台の加速器である RILAC、RRC 及び fRC の下流に設置されている。以下に RIBF で加速される典型的なビームである  $^{238}\text{U}$  のチャージストリッピングに関して議論する。

チャージストリッパーに関する  
パラメーターの予測

新設されたリングサイクロトロンの設計にあたっては、加速するイオンの価数を決める必要があった。またチャージストリッパーによるエネルギー損失を考慮して入射及び取出しエネルギーを決める必要があった。このためにチャージストリッパーの厚さを決める必要があった。ところが RIBF で加速予定であった

\* 理化学研究所仁科加速器研究センター, RIKEN Nishina Center  
現所属: 京都大学大学院工学研究科附属光・電子理工学教育研究センター  
Photonics and Electronics Science and Engineering Center, Kyoto University  
(E-mail: ryuto@kuee.kyoto-u.ac.jp)

表 1 チャージストリッパーに関するパラメーターの予測値

ストリッパー位置	第 1 ストリッパー	第 2 ストリッパー	第 3 ストリッパー
エネルギー (MeV/nucleon)	0.67	11	51
厚さ (mg/cm <sup>2</sup> )	0.02	0.5	14
価数	35+	72+	88+
割合	12%	19% (data)	34% (calc.)

典型的なビームである <sup>238</sup>U に関するデータは限られていた。そこで以下に述べる種々の方法で荷電分布とチャージストリッパーの厚さを予測した。表 1 にチャージストリッパーに関するパラメーターの予測値を示す。

第 1 ストリッパーはイオン源から取り出されたウラニウムイオンの電子を RILAC による加速の後 RRC で加速可能な最小の価数である 35 価まで剥ぎ取る目的で用いられる。チャージストリッパーへの入射エネルギーは 0.67 MeV/nucleon である。このエネルギーにおける荷電分布のデータは見つからなかったが、荷電分布の表が島等<sup>2)</sup>によって与えられているのでこれを用いて予測した。またチャージストリッパーの厚さについては Baron の半経験式<sup>3)</sup>を用いて予測した。その結果厚さ 0.02 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いると 12% の割合で 35 価を得る事が出来るという予測になった。第 2 ストリッパーは RRC を用いて 11 MeV/nucleon まで加速したウラニウムイオンの電子を次の加速器である fRC で加速可能な価数まで剥ぎ取る目的で使用される。第 2 ストリッパーへの入射エネルギーにおいては幸い GSI の 11.4 MeV/nucleon における荷電分布のデータ<sup>4)</sup>が有ったのでこれを用いて予測した。炭素膜の厚さについては GSI で用いられた厚さを採用することにした。第 3 ストリッパーは fRC で加速したウラニウムイオンの電子を下流に設置された IRC と SRC の 2 台のリングサイクロトロンで加速可能な価数まで剥ぎ取る目的で使用される。このエネルギーにおけるデータは見つからなかったため、荷電分布及びそれを得るために必要なチャージストリッパーの厚さについて GLOBAL 計算<sup>4)</sup>を用いて予測した。GLOBAL 計算の妥当性については、既存加速器施設で加速可能な Kr 等のイオンの荷電分布を第 3 ストリッパーへの入射エネルギーに近いエネルギー領域において測定し、十分に厚い膜を用いた場合は計算がデータを良く再現することを確認した<sup>5)</sup>。炭素膜の寿命については Baron<sup>3)</sup>や Livingston 等<sup>6)</sup>の半経験式を用いて見積もった。以下それぞれのチャージ

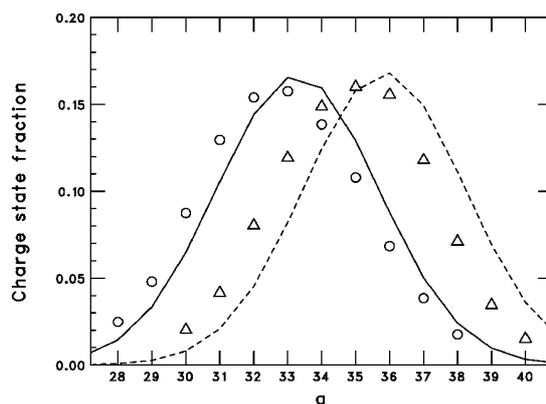


図 2 0.67 及び 0.87 MeV/nucleon における厚さ 0.02 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜による <sup>238</sup>U の荷電分布。横軸は価数、縦軸は和を 1 に規格化した時の割合を示す。丸と三角はそれぞれ 0.67 及び 0.87 MeV/nucleon における測定値、実線と破線はそれぞれ 0.67 及び 0.87 MeV/nucleon における荷電分布を文献<sup>2)</sup>中の表から求めたものを示す。

ストリッパーについて述べる。

### 第 1 ストリッパー

RRC を用いて <sup>238</sup>U イオンを 11 MeV/nucleon まで加速する場合に用いることが出来る最小の価数は 35 価である。ところが RIBF コミッショニングの初期においてはイオン源で 35 価のウラニウムイオンを生成する事が出来なかったため、イオン源からは 14 価のイオンを引き出し、第 1 ストリッパーを用いて 35 価まで電子を剥ぎ取った。最適な膜厚を決定するために厚さ 0.01 mg/cm<sup>2</sup> から 0.08 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いた場合の荷電分布を測定した。35 価は平衡電荷よりも高い価数であるため、炭素膜は十分平衡に達する厚さを持たなければならないが、厚い膜はビームの質を悪化させるため、必要十分な厚さを知る必要があった。その結果予測通り厚さ 0.02 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いると適当であることが分かった。図 2 に 0.67 及び 0.87 MeV/nucleon における <sup>238</sup>U の荷電分布を示す。0.87 MeV/nucleon は Charge state multiplier<sup>7)</sup>を

用いる場合のエネルギーに対応するがここでは詳述しない。島等の表による予想は良く測定値を再現している。ウラニウムビームが炭素膜を通過する際に失うエネルギーは上流側にある RILAC の加速エネルギーを調整することにより、チャージストリッパーの下流側で RRC の入射エネルギーになる様に補う。第 1 ストリッパーに入射するウラニウムビームは 3 箇所のストリッパーのうちで最もエネルギーが低く、最もビーム強度が大きいため炭素膜は短寿命であった。現在ではイオン源から 35 価のイオンを取り出せるようになったので、第 1 ストリッパーを用いずに直接 RRC に入射している。

### 第 2 ストリッパー

RRC を用いて 11 MeV/nucleon まで加速された 35 価のウラニウムビームは、第 2 ストリッパーを用いて fRC で加速可能な価数まで電子を剥ぎ取られる。設計時には厚さ 0.5 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いて 72 価まで電子を剥ぎ取る予定であったが、fRC の入射エネルギーがさらに厚い膜を使用できる様に余裕を持って設計されていたため、RIBF コミッシュニングの初期においては厚さ 0.6 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いた。ところが、膜によるエネルギー広がりエネルギーストラグリングの計算値<sup>8)</sup>による予測値よりも大きかった。これに対処するために炭素膜の厚さに対する荷電分布の最大値をとる価数の依存性を測定した結果、厚さ 0.3 mg/cm<sup>2</sup> の膜を用いると fRC で加速可能な最小の価数である 71 価において荷電分布が最大値をとることが分かった。図 3 に 11 MeV/nucleon における

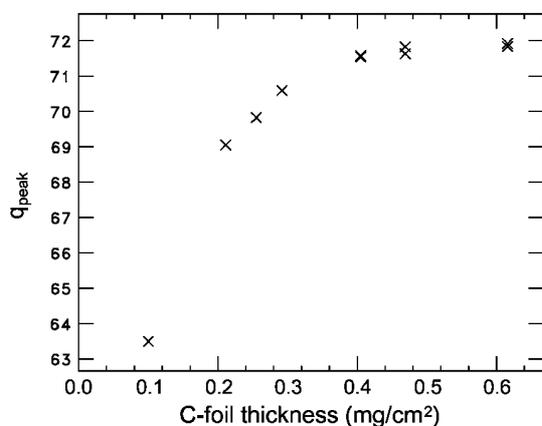


図 3 11 MeV/nucleon における <sup>238</sup>U の荷電分布で最大値をとる価数の炭素膜厚依存性。横軸は炭素膜の厚さ、縦軸は荷電分布の最大値をとる価数を示す。

荷電分布の最大値をとる価数の炭素膜の厚さへの依存性を示す。大きなエネルギー広がり原因についてはまだ特定出来ていないが、現在のところ走査型電子顕微鏡による膜断面の観察等により微視的な膜厚分布によるものだと考えている。図 4 に 11 MeV/nucleon における厚さ 0.3 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜によるウラニウムの荷電分布を示す。炭素膜は 13 pnA 程度のビーム量

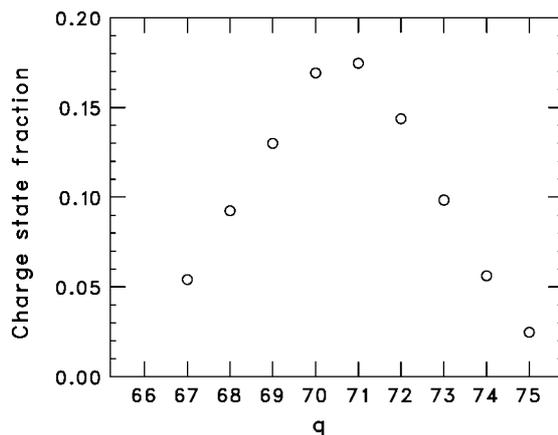


図 4 11 MeV/nucleon における厚さ 0.3 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜による <sup>238</sup>U の荷電分布。横軸は価数、縦軸は和を 1 に規格化した時の割合を示す。

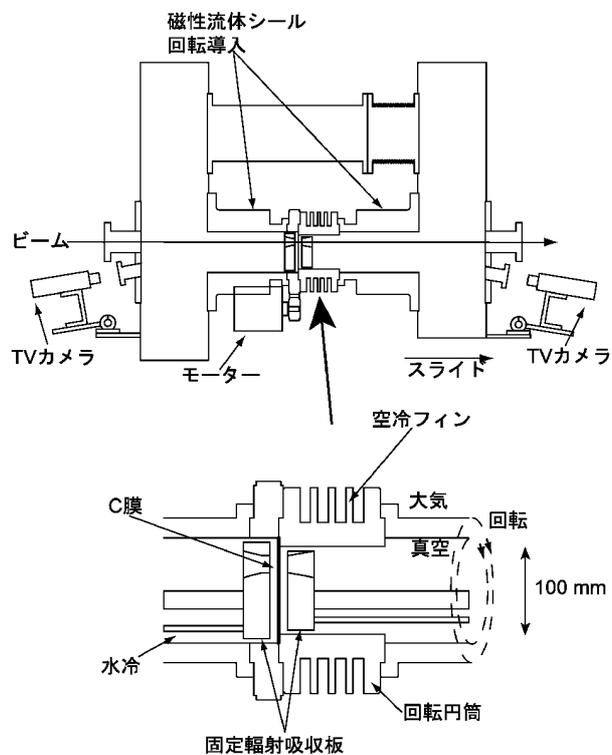


図 5 回転円筒ストリッパーの模式図。側面図と炭素膜付近の拡大図を示す。

の時約 6 から 12 時間毎に交換される。

ビーム量増強に向けて炭素膜をアルミニウム製の円筒の一端に貼り付けて回転させる、回転円筒ストリッパーを製作した<sup>9)</sup>。図 5 に回転円筒ストリッパーの模式図を示す。炭素膜は内径 100 mm 長さ 120 mm のアルミニウム製の円筒の一端に貼り付けられる。円筒の外側には空冷用のフィンが設けられている。円筒の両端は中空構造をした磁性流体シール回転導入機に接続され、回転導入機はそれぞれ角型真空槽の側面に設置されている。ビームは円筒と回転導入機の内側すなわち真空側を通過し、中程に設置された炭素膜を通過して電子を剥ぎ取られる。炭素膜上のビームスポットと回転中心軸の距離は 30 mm である。円筒は大気中に置かれたモーターにより最大 1000 rpm で回転させられる。回転する膜の近くには膜から出る熱放射を吸収するための水冷された板が設置されている。この水冷された板の表面には放射率を増すためにアルミナが溶射されている。水冷された板は固定されていて回転しない。膜の前後における圧力差による膜の損傷を防ぐために、角型真空槽はダクトで接続されている。現在のところ膜の交換に 40 分程度の時間がかかり、膜交換手順の単純化が課題となっている。厚さ 0.5 mg/cm<sup>2</sup> の膜を 500 rpm で回転し、膜に損傷が無いことを確認した。回転円筒ストリッパー以外にも液体膜ストリッパー<sup>10)</sup>の応用も検討されている。

### 第 3 ストリッパー

fRC を用いて 51 MeV/nucleon まで加速されたウランウムの電子は第 3 ストリッパーを用いて IRC 及び SRC で加速可能な価数まで剥ぎ取られる。設計時の GLOBAL 計算による予測は厚さ 14 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いてウランウムの電子を 88 価まで剥ぎ取るというものであった。ところが実際にウランウムビームを加速して荷電分布を測定してみると、平衡電荷は 86 価であった。厚さ 4 mg/cm<sup>2</sup> から 17 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いて測定した結果 10 mg/cm<sup>2</sup> ですではほぼ平衡に達している事が分かったが、厚い膜を用いる事が出来る様に fRC の取り出しエネルギーが余裕を持って高めに設計されているので、厚さ 17 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜を用いて 86 価まで電子を剥ぎ取り IRC 及び SRC で加速することにした。図 6 に 51 MeV/nucleon における厚さ 17 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜によるウランウムの荷電分布を示す。厚い第 3 ストリッパーはウランウムイオンに約 1 割のエネルギー損失をもたらす。大きなエネルギー損失をもたらすストリッパー膜は膜厚の違いによって下流側のビームエネルギー

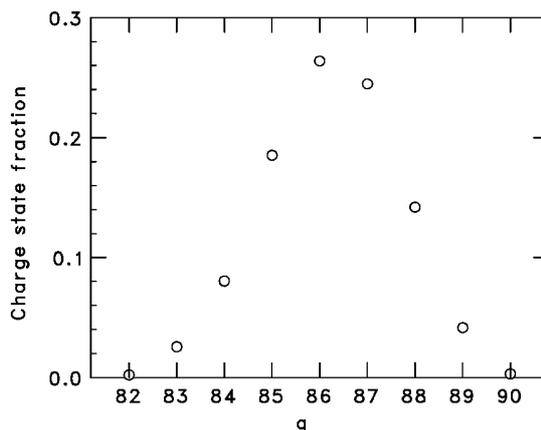


図 6 51 MeV/nucleon における厚さ 17 mg/cm<sup>2</sup> の炭素膜による <sup>238</sup>U の荷電分布。横軸は価数、縦軸は和を 1 に規格化した時の割合を示す。

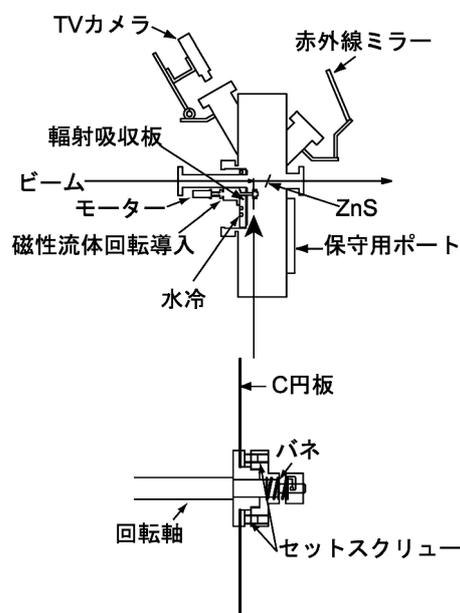


図 7 回転軸ストリッパーの模式図。側面図と炭素円板付近の拡大図を示す。

ギーに差異をもたらす。膜交換時に生じる事が予想される第 3 ストリッパー下流でのビームエネルギーの変化に対する調整を行うために、膜を最大 60 度まで傾けて通過後のビームエネルギーを微調整する機能を持った膜交換機を製作した<sup>11)</sup>。現在までのところ第 3 ストリッパーの炭素膜に交換の必要性は生じていない。

第 3 ストリッパーについてもビーム量増強のためにグラッシーカーボンの円板を回転させる回転軸ストリッパーを製作した<sup>9)</sup>。図 7 に回転軸ストリッパーの模式図を示す。内径 20 mm 外径 120 mm のグラッシーカーボン製の円板を銅製の軸に取り付ける。軸は

磁性流体シール回転導入機を介して大気中に設置されたモーターによって最大 3000 rpm で回転させられる。回転中心軸とビームスポットの距離は 52 mm である。円板の交換には 10 分程度の時間を要する。回転円板の高温部から発せられる熱放射を吸収するために、水冷された銅板に鑲付されたグラファイト板が円板の近くに設置されている。計画されている最大ビーム強度である  $3 \mu\text{A}$  のウラニウムビームを照射した時のビームスポット付近の温度は ANSYS 計算によると 1500 度強であり炭素の融点よりも十分低い。ビームスポットは円板の近くに挿入される ZnS(Ag) ビームビューアーを用いて調整される。真空槽はビームビューアー用の覗き窓の他に熱画像装置による温度測定用に BaF<sub>2</sub> 製の覗き窓を備えている。この窓と赤外線用の鏡を用いて 63 MeV/nucleon において  $0.75 \mu\text{A}$  のアルゴンビームを照射した場合の温度分布を測定し、ANSYS を用いた計算と比較して計算の妥当性を検証した。

## まとめ

理化学研究所 RI ビームファクトリーにおいて複数のチャージストリッパを用いた重イオンビームの効率の良い加速を実現するために以下の様な事を行った。加速に用いる価数とチャージストリッパの厚さを決定するために種々の厚さの膜を用いて荷電分布測定を行った。大強度ビームに対応するために 2 種類の回転ストリッパ及び液体膜ストリッパを開発した。また、エネルギー調整機能を持った膜交換機を製作した。これらによりウラニウムビームを 345 MeV/nucleon まで加速し実験に供することが出来た。

## 謝辞

理化学研究所 RI ビームファクトリーで使用中の長寿命炭素膜は主として長谷部裕雄氏によって製作され

たものです。炭素蒸着装置の導入および製作技術に関しては高エネルギー加速器研究機構の菅井勲氏にお世話になりました。チャージストリッパに関する装置の開発は長谷部氏の他、横内茂氏、千葉利哉氏と共同で行いました。福西暢尚氏、加瀬昌之氏、後藤彰氏及び矢野安重氏との議論は非常に貴重でした。これらの諸氏に感謝します。なお、膜交換機開発の一部は、農林水産省「先端技術を活用した農林水産研究高度化事業」の研究成果です。

## 参考文献

- 1) Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth. B 261, 1009 (2007).
- 2) K. Shima, N. Kuno, M. Yamanouchi and H. Tawara, At. Data Nucl. Data Tables 51, 173 (1992).
- 3) E. Baron, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, 2411 (1979).
- 4) C. Scheidenberger, Th. Stohlker, W. E. Meyerhof, H. Geissel, P. H. Mokler and B. Blank, Nucl. Instr. and Meth. B 142, 441 (1998).
- 5) 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.
- 6) A. E. Livingston, H. G. Berry and G. E. Thomas, Nucl. Instr. and Meth. 148, 125 (1978).
- 7) O. Kamigaito, M. Kase, N. Sakamoto, Y. Miyazawa, E. Ikezawa, N. Fukunishi, S. Kohara, M. Fujimaki, M. Hemmi, T. Chiba, Y. Chiba, H. Ryuto, A. Goto and Y. Yano, Rev. Sci. Instrum. 76, 013306-1 (2005).
- 8) D. Guillemaud-Mueller, M. O. Lampert, D. Pons and M. Langevin, IEEE Trans. Nucl. Sci. 33, 343 (1986).
- 9) H. Ryuto, H. Hasebe, N. Fukunishi, S. Yokouchi, A. Goto, M. Kase and Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth. A 569, 697 (2006).
- 10) H. Ryuto, T. Chiba, H. Hasebe, M. Kase and Y. Yano, Jpn. J. Appl. Phys. 43, 7753 (2004).
- 11) H. Ryuto, H. Hasebe, N. Fukunishi, T. Abe, A. Goto, M. Kase and Y. Yano, Nucl. Instr. and Meth. A 581, 586 (2007).