

原子衝突学会誌「しょうとつ」  
2022年11月15日発行  
第19巻第6号

原 子 衝 突 学 会 誌

# しょうとつ

Journal of Atomic Collision Research

Vol.19 Issue6

2022

## 解説

理研 RIBF における He ガスストリッパーと荷電変換リング計画

今尾浩士

## 新しい風

ドイツでのポストドク生活を振り返って

森本裕也

原子衝突学会賛助会員（五十音順）

アイオーピー・パブリッシング・リミテッド（IOP 英国物理学会出版局）

Institute *of* **Physics**

<https://iopscience.iop.org/>

アドキャップバキュームテクノロジー株式会社



<http://www.adcap-vacuum.com>

有限会社イーオーアール



**Electronics Optics Research Ltd.**

<https://www.eor.jp/>

イノベーションサイエンス株式会社



<https://www.innovation-science.co.jp/>

株式会社オプティマ



<https://www.optimacorp.co.jp/>

クリムゾン インタラクティブ・ジャパン



<https://www.enago.jp/>

<https://ulatus.jp/>

<https://www.voxtab.jp/>

コスモ・テック株式会社



<https://www.cosmotec-co.jp/>

株式会社サイエンス ラボラトリーズ



**株式会社 サイエンス ラボラトリーズ**

<https://www.scilab.co.jp/>

真空光学株式会社



<https://www.shinku-kogaku.co.jp/>

スペクトラ・フィジックス株式会社



A Newport Company

ソーラボジャパン株式会社

<https://www.spectra-physics.com/>



<https://www.thorlabs.jp/>

株式会社東京インスツルメンツ



<https://www.tokyoinst.co.jp/>

株式会社ナバテック

真空機器の未来と歩む



<http://www.navatec.co.jp/>

仁木工芸株式会社



<http://www.nikiglass.co.jp/>

伯東株式会社



<https://www.g5-hakuto.jp/>

フォトテクニカ株式会社



<https://www.phototechnica.co.jp/>

原 子 衝 突 学 会 誌

# しょうとつ

第 19 卷 第 6 号



THE ATOMIC COLLISION  
SOCIETY OF JAPAN

## 目 次

---

解説 理研 RIBF における He ガスストリッパと荷電変換リング計画	今尾浩士 ... 95
原子衝突の新しい風 ドイツでのポストク生活を振り返って	森本裕也 ...106
原子衝突学会第 47 回年会報告	行事委員会 ...109
第 47 回年会優秀ポスター賞の選考結果	顕彰委員会 ...111
原子衝突若手の会第 42 回秋の学校開催報告	三上力久 ...111
第 24 回原子衝突学会若手奨励賞募集要項	顕彰委員会 ...113
2022 年度原子衝突学会学生発表奨励賞募集要項	顕彰委員会 ...114
公益財団法人山田科学振興財団 2023 年度研究援助募集	顕彰委員会 ...115
「しょうとつ」原稿募集	編集委員会事務局 ...115
ユーザー名とパスワード	...115

---

## 理研 RIBF における He ガスstripperと荷電変換リング計画

今尾浩士

国立研究開発法人理化学研究所 〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

imao@riken.jp

令和 4 年 9 月 16 日原稿受付

理研 RI ビームファクトリー (RIBF) では継続的にウランビームの大強度化に取り組んでおり、この 10 年で 200 倍以上の強度増強に成功している。He ガスを用いた荷電stripper (He ガスstripper) の実現はその大強度化の大きなターニングポイントであった。また荷電変換効率を飛躍的に上げるために現在提案している荷電変換リング (CSR) は更なる大強度化の大きな鍵となる装置である。He stripper と CSR 計画について関連する物理の話題や問題を織り交ぜながら紹介する。

### 1. はじめに

理研 RI ビームファクトリー (RIBF[1]) のように複数の加速器を用いた重イオンの多段階加速において、加速価数の選択性は特徴的な自由度の一つである。加速器の始点となるイオン源からの生成イオンの価数の選択、そして加速途中の価数も「荷電stripper」と呼ばれる装置によって制御選択される。なるべく多価の方が加速器での加速や偏向は効率的であるが、イオン源で多価イオンを大強度で得るのは一般に難しく、stripper で多価にするためには十分加速されている必要がある。価数をどの段階でどこまで上げるのか、その加速戦略の最適化は重イオン加速器設計の肝

である。特にstripperの性能(得られる価数・変換効率・耐久性・均一性など)は加速器全体の性能(加速可能ビーム強度・加速効率・安定性など)を決める最重要因子といえる。stripperには様々な技術的な難しさはあるが、イオン原子衝突の物理そのものを体現した装置であり、畢竟、重イオン加速器の性能は原子衝突過程に支配されているといっても過言ではない。

本稿では私が中心となって開発を行っている理研 RIBF における He ガスstripper[2-4]と将来計画の一つ荷電変換リング (CSR[5-7])について、関連する物理の話題や問題を織り交ぜながら紹介する。いずれも最も加速の難しいウランビー

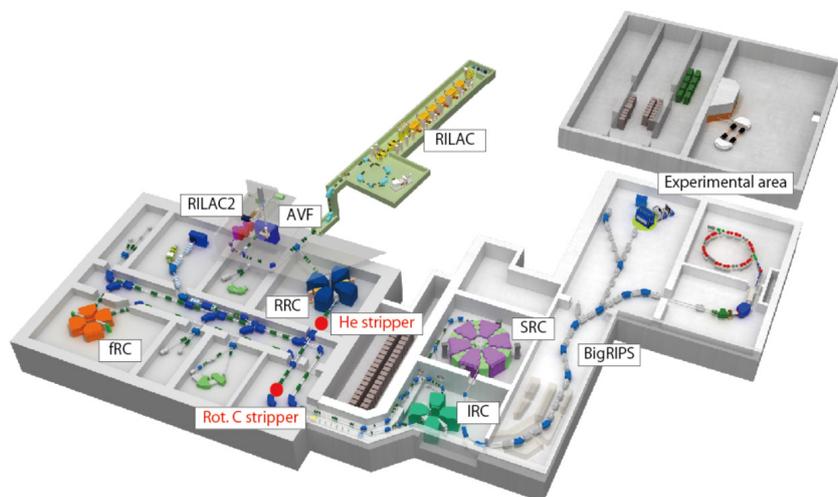


図 1: 理研 RIBF 鳥瞰図。3 台の入射 (RILAC, RILAC2, AVF) と 4 台のリングサイクロトロン (RRC, fRC, IRC, SRC), 及び RI ビーム分離装置 BigRIPS と種々の実験装置群から構成される。

ムへの適用を主眼としたものであり、先ず RIBF におけるウランビーム加速について概観する。

## 2. RIBF におけるウランビーム加速

理研 RIBF(図 1)は 2007 年の本格始動以来、いわゆる「元素変換科学」の世界的な拠点となっており、文字通り放射性同位元素「RI」を「ビーム」として「工場」のように生成供給する施設である。その加速器では 3 台の入射器と超電導リングサイクロトロン(SRC)を含む 4 台のリングサイクロトロンを駆使し水素からウランまでの全元素を最大 345 MeV/u 以上まで加速する能力を持つ。特に大強度のウランビームを生成できることは最大の強みであり、これを利用した飛行中核分裂反応によって幅広い質量数(80~160 領域)において圧倒的な強度の中性子過剰 RI ビームを生成し、原子核物理に関する様々な基礎及び応用研究を展開することができる。

RIBF におけるウランビームの加速スキームを図 2 に示す。28 GHz の超伝導 ECR イオン源で生成・選別された  $^{238}\text{U}^{35+}$  は、入射器 RILAC2 と 4 つのリングサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)を用いて 345 MeV/u まで加速される。ストリッパーは RRC での加速後、11 MeV/u と fRC 加速後の 51 MeV/u において 2 回使用される。1 段目は He ガスストリッパーを使用しており、 $\text{U}^{35+}$  から  $\text{U}^{64+}$  へと 20% の効率で変換する。2 段目は回転グラフィートシートディスクストリッパー[8,9]であり、 $\text{U}^{64+}$  から  $\text{U}^{86+}$  へと 25% の効率で変換する。

サイクロトロンでは  $K$  値と呼ばれる加速能力を表し、磁石の偏向能力で決まる固有のパラメータがある。例えば超電導磁石を用いた SRC の  $K$  値は 2600 MeV と世界最高性能である。核子当りのエネルギー  $E/A$  はこの  $K$  値を用いて  $E/A = K(q/A)^2$  と書ける。つまり、サイクロトロンに関しては  $K$  値が同じなら到達エネルギーは価数の 2 乗に比例する。 $K$  値を増やすコストや労力を考えるとストリッパ

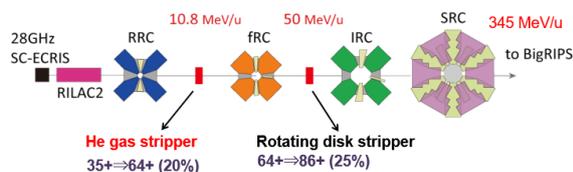


図 2: RIBF におけるウランの加速スキーム。

ーは多段サイクロトロン加速において不可欠な装置といえる。

さて、ウランビームの加速の難しさは電子束縛エネルギーが大きく、中性子数も多いため価数質量比( $q/A$ )を上げることの難しさと、電荷が大きくなることによるエネルギー損失  $dE/dx$  の大きさに起因している。それぞれの加速器で加速可能な価数質量比は決まっており、ウラン加速ではどうかその下限値へマッチさせるために 28-GHz 超電導 ECR イオン源から  $\text{U}^{35+}$  という多価イオンを生成し、更に加速途中で 2 回のストリッパーを使用して価数を上げている。当然強度が犠牲になり、ビームのエミッタンス(ここではビーム進行方向  $z$  を基準とした 3 方向  $x, y, z$  の運動を独立として、それらの 2 次元位相空間の面積を指す)も悪くなる。電荷が上げられないためにサイクロトロンでの加速において周回辺りのエネルギーゲインが少なくなり、ターンの分離が悪くビーム取出しが困難になる。更にエネルギー損失の大きさはストリッパーの耐久性の問題、サイクロトロンの入射取出し機器への損傷などの問題を引き起こす。例えば中重イオンである Zn の加速ではイオン源での負担も少なく、ストリッパーも一回の使用でフルストリップに近い状態までいくため、現状でウランの 10 倍近い強度での運転が可能となる。

しかしながら、2010 年には最大 0.4 pnA (particle nA; 重イオン特有の単位で 1 pnA は 1 価で 1 nA の電流と同じ粒子の流れを表し、 $6.24 \times 10^9$  /s のビーム強度となる)であったウランビームの供給強度はこの 10 年で飛躍的に向上し、約 100 pnA にまで達している。これは、28-GHz 超伝導 ECR イオン源の継続的な性能向上、ストリッパーの耐久性と品質の向上、大強度ビーム運転技術の洗練化、その他様々な加速器機器の着実な改良によるものである。特に従来の炭素膜ストリッパーから He ガスストリッパーへの転換はウランビーム大強度化の大きなターニングポイントであった。

## 3. He ガスストリッパー

ウランの第1ストリッパーで固体を使用する限り、 $1 \mu\text{m}$  程度以下の薄膜を使用せざるを得ず、脆弱性、不均一性との戦いで、熱伝導も期待できない。実際、ウラン照射における第1ストリッパーでのダメージは深刻で固定型の炭素膜では 20 pnA 程度

(現状の 1/100 以下)の照射強度においても使用時間は半日程度であった[10].

我々はガスstripperを用いることでこの問題を解決した. ガスstripperは固体膜stripperに比べ, 耐久性(循環性), 厚さ均一性と可変性, 薄い標的作成の容易さにおいて優れる. しかしながら, 一般にガスは固体に比べ密度が 3 桁程度低く, 衝突の平均自由行程が長いため, 残留励起衝突過程[11]とオージェ過程[12](密度効果)が強く抑制される. そのため, 得られる価数が低く荷電変換は非効率的である. 更にその利用においてはガスの窓なし蓄積が必要で, 厚い標的作成に限界があり, 標的長さは固体薄膜に比べ長くなる.

ガスstripperのデザインにおいては得られる価数と価数分布, 必要厚さを評価しガスの窓なし蓄積に関わる工学的なデザインと共に最適化することが重要である.

一般にstripper中のイオンは電離と電子捕獲, 励起, 脱励起過程を繰り返しながら電荷を変える. 電荷  $q$  を持つイオンの分率  $F(q)$  の物質深さ  $x$  に伴う変化は電荷  $q'$  から  $q$  への電荷交換断面積  $\sigma_{q'q}$  を用いて,  $dF(q)/dx = n \sum_{q' \neq q} (\sigma_{q'q} F(q') - \sigma_{qq'} F(q))$  と書ける.  $n$  は標的密度である.  $\sigma_{q'q}$  について  $q' > q$  なら電子捕獲断面積  $\sigma_c$ ,  $q' < q$  なら電子損失断面積  $\sigma_l$  を表す. 平衡状態では  $dF_{eq}(q)/dx = 0$  である. ガス中での残留励起衝突を無視すれば  $\sigma_{q'q}$  が  $x$  に依らず, 上式で非平衡状態も記述できる. 電荷交換においては一般に  $|q' - q| = 1$  の 1 電子移行が主である.

$\sigma_l$  と  $\sigma_c$  には様々な理論式やスケール式があり, それらを用いることでstripper通過後の平均電荷  $\bar{q} = \sum_q q F(q)$  と必要厚さ  $t$  (または平衡厚さ  $t_{eq}$ ) を評価することができる. 我々はイオン化断面積の計算には, binary-encounter model (二体衝突近似[13]) を使用し, 電子捕獲断面積には Schlachter らのスケール式[14],  $\sigma_c = 1.1 \times 10^{-8} q^{3.9} Z_2^{4.2} / E^{4.8}$ , を使用している. Schlachter の式は  $Z_2$  依存性を考慮する際に有用である. また, ガスに限らず利用可能な計算コードとして, CHARGE (3 電荷モデル), GLOBAL (電子 28 個, 80 MeV/u ~ 1 GeV/u) [15], ETACHA (電子 28 個, < 30 MeV/u) [16], ETACHA4 (電子 60 個) [17],

などがある. 一般に正しい価数を計算だけで導出するのは困難であり, 近い系の実験結果を集めたり, 可能であれば直接的に断面積測定や荷電変換測定を行ったりして, 実験的な裏付けをとりながら進める必要がある. 例えば, RIBF の炭素膜第 2 stripper のウラン荷電変換で GLOBAL を用いた計算で予測された最も収量が高い価数は 88 価であったが, 実際は 86 価であり 2 価の違いがあった[18]. また, FRIB では液体 Li stripper [19] を用いているが必要価数を得るためには ETACHA4 で計算された値より厚い標的が必要となっている.

ガス(一般には窒素やアルゴンなどが使いやすい)の平衡電荷が固体に比べて低いのは既に述べた通りだが, 我々は少しでも平衡電荷の高いガスとして  $Z_2$  の小さい低原子番号ガスの利用について計算, 実験の両面から検討してきた[3,4]. 電子捕獲確率は始状態と終状態が相対速度  $v$  で走っているときの運動量分布の重なりで決まると考えられる. 第一stripperにおけるウランの入射速度  $v = 0.15c$  であり,  $Z_2 \alpha c$  (ここで  $\alpha$  は微細構造定数  $1/137$ ) よりも十分に速い場合は内殻電子からの捕獲がドミナントとなる. よって, 定性的には  $Z_2$  が小さいほど運動量マッチングが悪くなり電子捕獲過程が抑制され価数上がる. RIBF では取扱い性と蓄積性を考慮して He ガスを用いており, 11 MeV/u の  $^{238}\text{U}$  における平衡電荷は 65 価である (図 3). 炭素膜の 72 価には及ばないものの, 窒素ガスよりも 10 価程度高い値となっている (図 4).

関連する話題として GSI においても Low-Z ガスstripperの導入に成功している. GSI ではガ

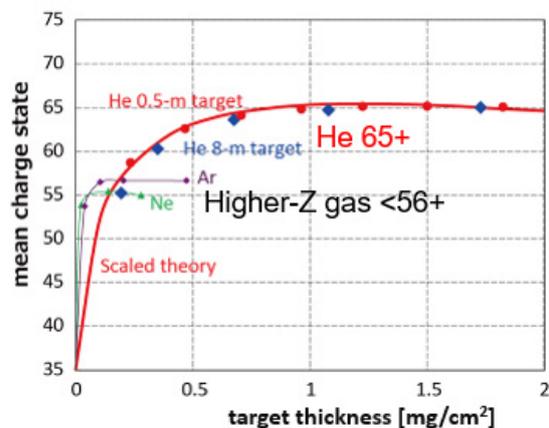


図 3: 厚さを変えたガス通過後の  $^{238}\text{U}^{35+}$  (10.8 MeV/u 入射) の平均電荷. 実験値がプロットされており, He ガスについての実線はスケール式によるフィットを示している[3].

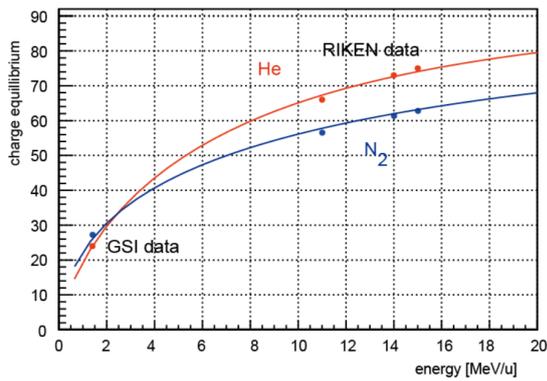


図 4: N<sub>2</sub> ガスと He ガスにおける <sup>238</sup>U の平衡電荷のエネルギー依存性. 理研[2,21]と GSI[20]のデータ. 実線は論文[21]に従い  $a, b, c$  をフリーパラメータとして  $q = Z[1 - a \exp\{- (v/v_0)^b Z^{-c}\}]$  でフィットしたもの. ただし,  $v_0$  はボーア速度.

スジェット標的と 3 段階の差動排気系を組み合わせる事で口径 $\phi 22$  mm 以上, 厚さ数  $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  までのガスストリッパが実現されている. 近年, ビームに同期したパルス運転 ( $\Delta t \sim 400 \mu\text{s}$ ) による真空負荷の軽減に成功している. これにより, 水素ガスでの運転が実用化され,  $1.4 \text{ MeV}/u$  の <sup>238</sup>U<sup>28+</sup> ビームの強度増強に成功している[20]. その過程で He ガスのデータも取得されているが窒素ガスより低い平衡電荷となっており, 一つのパズルとなっている(図 4).

価数分布に関して, エネルギーが高くなり  $\bar{q}/Z_1$  が 1 に近づかない限りは, ガス中での電荷は有限の分布幅  $d = \{\sum_q (q - \bar{q})^2 F(q)\}^{1/2}$  を持つ.  $\sigma_l$  と  $\sigma_c$  はイオンの電子殻で飛びを持つため, 電荷分布の幅も殻構造の影響を受ける. また, Low-Z ガスにおいて幅が狭くなる効果が観測されており, 多電子移行過程抑制の寄与があると考えられている[20,21]. 実際のストリッパ使用において, 荷電分布が狭くなるような条件を積極的に利用する事は重要である.

He ガスストリッパではウランの M 殻と N 殻の境目にあたる 64 価を価数選択している. 63 価と 64 価では電子の束縛エネルギーに 3 keV 程度の違いがあり速度マッチングの変曲点(ウランの入射速度は M 殻電子と N 殻電子の速度の間にある)となる. 平衡電荷ではない平均電荷である 64 価を選ぶことで荷電分布の幅が狭まり, 荷電変換効率は増大し(図 5), 炭素膜使用時の 72 価に比べて荷電変換効率は約 40%上がる.

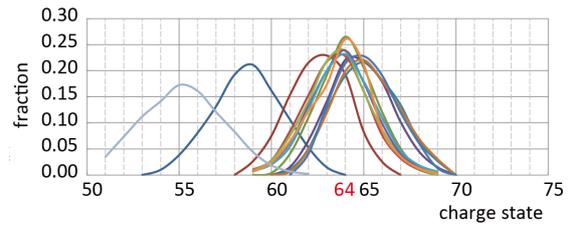


図 5: He 標的厚さを変えた時 ( $0.2 \sim 1.8 \text{ mg}/\text{cm}^2$ ) の <sup>238</sup>U<sup>35+</sup> ( $10.8 \text{ MeV}/u$  入射) の荷電分布の変化.

ストリッパは加速途中で使用されるものであり, その利用に際し, ビームのエネルギー変化, エネルギーストラグリング, 多重散乱などによるエミッタンスグロースを正確に理解し, 後段加速器のアクセプタンスに収める必要がある. 裸の点電荷  $q$  において, H. Bethe の阻止能公式より  $dE/dx$  は  $q^2$  に比例する. 重イオンに対しては束縛電子の遮蔽効果, 荷電変換に伴うエネルギー損失を考慮する必要がある[22]. エネルギー広がりについては, 衝突ストラグリング, 荷電交換ストラグリング, ストリッパ厚さの非均一性からの寄与がある. 荷電変換ストラグリングは電荷履歴の違いにより生ずるもので, 特に重イオンで重要となる. 電荷分布幅とも関係付けられ, 電子殻構造の影響も受ける. 分布幅が狭くなれば荷電交換ストラグリングの影響は小さくなるため, He ストリッパでは厚さの均一性と合わせて, 炭素膜に比べ, 通過ビームの運動量広がりには約半分に抑えられている.

ビーム強度が上がった場合の問題点として, 熱負荷により He が状態方程式に従って膨張し厚さが減少するだけでなく, ガス流れとビーム強度分布(すなわち熱負荷分布)の釣り合いによって定常的な密度分布が生じ, 通過後のビームにエネルギー分布を生む可能性がある. 特に Low-Z ガスにおいては循環質量流量が小さくなるため熱除去が難しく, 影響が大きい.

He ストリッパではウランビーム  $1 \mu\text{A}$  に対し, 80 W 程度の入熱が He 標的部にある. 実際 RIBF ではウランビームの強度を上げると, 強度に比例して, 通過ビームのエネルギーは上がり, He ガスは薄くなったように見える.

図 6 にビーム強度と標的温温度上昇の関係を示す. ストリッパ通過後のエネルギー損失のビーム強度依存性から, 標的厚さの変化を求めて, 状態方程式を使って He ガスの温度上昇を導出している. 1%程度の低強度ビームとフル強度ビーム

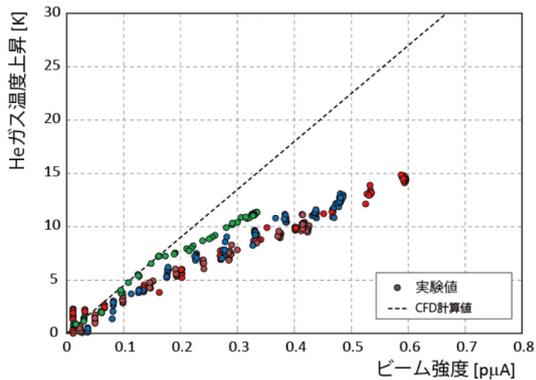


図 6:  $^{238}\text{U}$  ビームによる He ガス温度上昇の実験値と計算値の比較. 実験値は輸送条件の異なる幾つかの RUN のデータをプロットしている.

では現在 10%程度までのガス圧力の補正によってエネルギーを調整する(すなわちフルビーム時は 10%程度標的の圧力を高くする). 圧力の補正量は測定された温度上昇とコンシステントな量である.

ただし, 実験的に得られた温度上昇はエネルギー損失が全てその場で熱に変わったとして行った Computational Fluid Dynamics (CFD) 計算 (flow-3D 及び solidworks flow simulation を使用) から予想される温度上昇より低い傾向がある. ビームのガス中でのエネルギー散逸過程を理解することは今後の重要な課題であり, 様々な原子衝突過程の寄与がある. 希ガス放電とのアナロジーからエネルギーの一部が光 (特に真空紫外光) などになって, 照射領域内から持ち出されるはずで, その理解と積極的利用 (例えば外場による効果や不純物のコントロールによるペニングイオン化抑制など) が検討されている.

#### 4. He ガスの窓なし蓄積

ガストリッパーの実現にはビームライン真空と繋ぐためにガスの窓なし蓄積技術が必須である. 技術的な話になってしまうが, 幅広い科学分野と共通の技術と言えるのでここで少し紹介する. 特に He ガスのような軽いガスは拡散性が高く, その窓なし蓄積は困難であり, 様々な工夫がなされている.

He ストリッパーでは 5 段階の大規模差動排気系により He ガスについて  $0.7 \text{ mg/cm}^2$  までの定常蓄積が実現されている (図 7). 各部屋は現在口径  $\phi 12\text{mm}$  以上のチューブ型のオリフィスで仕切られており, 局所的に 27 台の真空ポンプを使用している. 特に大型メカニカルブースターポンプ 10

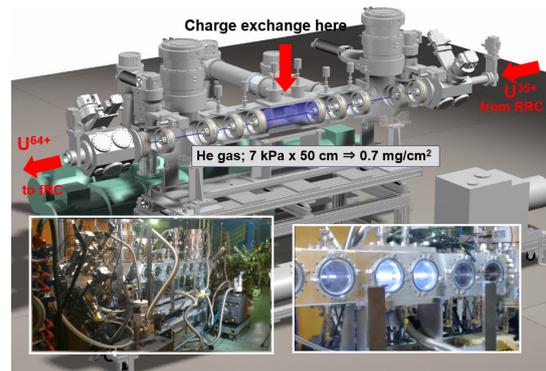


図 7: He ガスストリッパーの断面図と実際の写真 (左下), 及びビーム通過時の発光の様子 (右下).

台 (総排気量  $16000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) を多段式に使い,  $\sim 300 \text{ SLM}$  の He ガスを専用にデザインした熱交換器との組み合わせで安定に約 99.5%の効率で循環している. 循環量の約 0.5%は放射化物の蓄積を抑えるために排気され, 新しいガスが圧力フィードバックをかけながら供給されている.

差動排気性能を上げる工夫の一つとして, 粘性流領域でのオリフィス間の連結を乱すため, すなわちオリフィスから噴出した He ガスが後段の部屋へなるべく流出しないようにするためにガスかく乱板というオリジナルのピース (穴の開いた円盤) をオリフィス間に設置している (図 8 上).

実験的に得られた, かく乱板の効果を図 8 下に示す. かく乱板の効果には強い位置依存性が見られ, 設置位置は最適化されている. かく乱板のある部屋 (U1) やその隣の U2 でなく, 2 つ隣の部

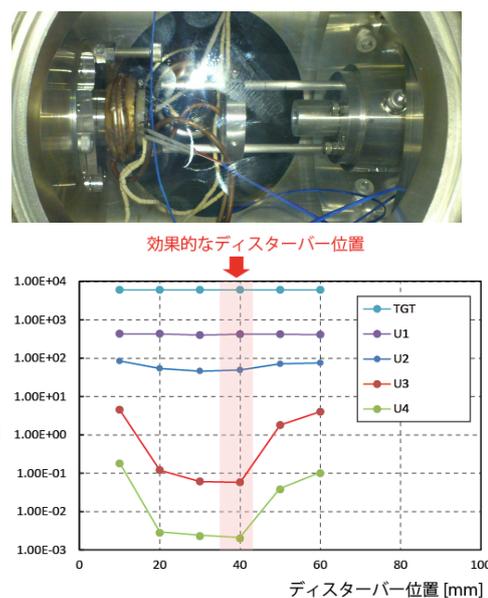


図 8: かく乱板の写真 (上) と真空度へ与える効果の位置依存性の実験値 (下).

屋(U3)の真空度が大きく変わる。U3 はターボポンプを用いており流量に敏感というものもあるが、ディスターバーの有無で2桁程度真空度が変わる。僅か 10 mm の位置の違いで真空度が1桁以上変わることがあり、位置にとっても敏感である。ポンプの排気量を10倍や100倍にすることを考えると非常に繊細で重要なピースと言える。

チューブ型オリフィスから噴出する He ガスの CFD 計算の結果を図9に示す。噴出流はオリフィスの出口圧力が背圧よりも高い不足膨張噴流と呼ばれるものであり、背圧分子との干渉により、たる型衝撃波(パレルショック)とマッハディスクと呼ばれる円盤状の垂直衝撃波が周期的に発生しているのが分かる。かく乱板の激しい位置依存性はこのマッハディスクの発生位置と関連があると考えられる。位置依存性の結果はマッハディスクに重なるように板を置くのが効果的である事を示している。

もう一つの工夫としてガスジェットカーテン法という新しい独自の技術開発を行ってきた。大強度化に伴い差動排気性能への要求は大きくなり、サイクロロンへの僅かな He ガスの漏れ込みがダイナミックバキューム(ビームロスと真空度悪化が雪崩式に起こる現象)を引き起こし、短時間でビームが失われ深刻な加速器損傷の原因となる。He ガスストリッパーの運転と共に RRC の真空度が徐々に上昇するという問題があり、2015年に実際にビームが急激に失われるということが起こった。ダイナミックバキューム問題は価数変化の起こる重イオンビーム加速特有の問題であり、今後の大強度化にとっても深刻な問題であった。

図10にガスジェットカーテン法のコンセプトを示

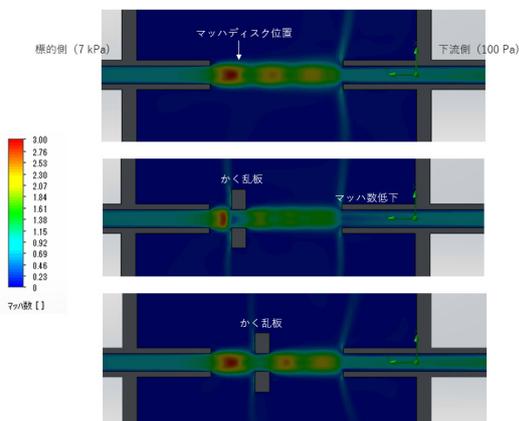


図9: オリフィスから噴出する He のマッハ数の CFD 計算 (Solidworks flow simulation を使用)。

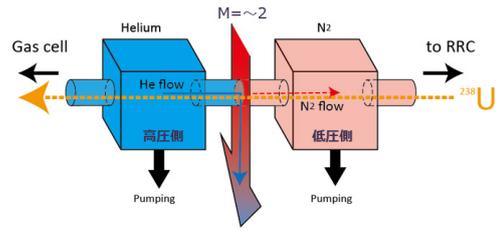


図10: ガスジェットカーテン法のコンセプト。

す。差動排気系の高圧側と低圧側の部屋の間にはビームと垂直方向に流れる窒素ガスのジェットを導入し、これを He ガスの流れを遮るカーテンとして働かせてガスの流れを窒素へ変えろと共に He ガス封止能を向上させる。窒素ガスに変換してしまえばターボ分子ポンプや RRC 内のクライオポンプで容易に排気されダイナミックバキュームの心配は大幅に軽減される。

CFD 計算に基づいて装置を設計・製作・導入した。オフライン試験を行い、シール効果によって圧力差を最大 10 倍にでき、ガスもうまく置換されることを確認出来た。更に好ましい効果として、現条件の窒素ジェットでは He ガスで  $70 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  程度の荷電変換がジェット中で起こるため、He ガスとしては 10%程度圧力を下げられ蓄積は容易になる。現状の設置位置(He ストリッパーの上流側にのみ設置されている)において適切な流量値( $\sim 7$  SLM)では窒素ガス逆流による価数低下も起こらない。窒素ガスジェットカーテンは「He ガスシール」、「窒素へのガス置換」、「窒素プレストリッパー」という3つの役目を果たし、差動排気性能を上げられる。手法に関して特許(特許番号:7019141)を取得している。

2015年より段階的に導入され、オリフィス径を $\phi 10$  mm から $\phi 12$  mm に増大させて、横方向の4次元アクセプタンス(通過可能な  $x, p_x, y, p_y$  位相空間の体積)を 1.5 倍にすると同時に、He ガスの RRC への漏れ量を 1/10 程度まで下げる事に成功し、RRC での真空度上昇もなくなった。2017年以降の MT では実効荷電変換効率(通過効率 $\times$ He 荷電変換効率)として、2016年より2割以上高い、20%程度での長期運転に成功しており、ビームの大強度化に貢献している。

窒素ガスジェットカーテン法は近年超重元素探索研究のための気体充填型反跳分離器 GARIS における He ガス蓄積にも応用された。そこではノ

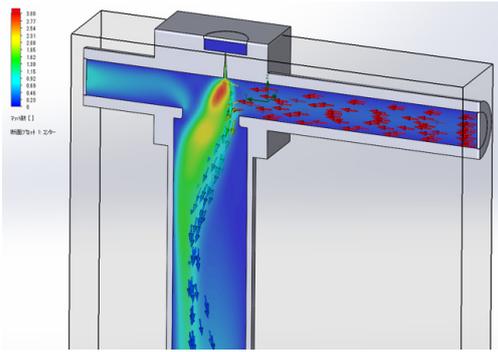


図 11: 2 次元ラバールノズルによるガスジェットカーテン計算例 (Solidworks flow simulation). 図はマッハ数のプロットであり, 矢印の色はガス種 (赤:He, 青:N<sub>2</sub>) 向きが流速を表す.

ズルを 2 次元ラバール型にし, 拡張部で生成した膨張波をうまく出口部で相殺する構造となっている (図 11). ガスジェットのマッハ数を上げ, He ストリッパーに取り付けた装置より大口径化と性能増強に成功している. He ストリッパーや次章で述べる荷電変換リングにおいても同様のテクノロジーを組み込むことを検討しており, 準備を進めている.

## 5. 荷電変換リング

現在, RIBF のウランビームは他の現行施設に比べて 2 桁以上高い強度を誇る. しかし 2022 年 5 月に稼働を開始した FRIB[23] (米国) を筆頭に 2020 年代の内に, FAIR[24] (ドイツ), RAON[25] (韓国), HIAF[26] (中国) などの次世代重イオン加速器施設の運転開始が予定されており, アジア

を中心とした世界規模の研究競争の中, 大強度ウランビームの開発も次のステージへと進んで行く.

RIBF でもウラン強度を飛躍的に増強させるためさまざまな開発と準備が進んでいる. 現在の加速方式において, ウランビームの大強度化を阻む大きな問題の一つは 2 回の荷電変換の変換効率の低さ ( $20\% \times 25\% = 5\%$ ) である. 2 回の荷電変換で約 95% のビーム損失があることになり, この問題を克服すべく検討を進めているのが荷電変換リング (Charge Stripper Ring: CSR) である.

図 12 に設計中の CSR1 の俯瞰図を示す. 59+ から 66+ までの 8 価分の周回ウランビームに対して, 同じ設計周長 37.2 m (入射ビームバンチ間隔の 15 倍) を持つコンパクトな等長リングとなっている. CSR1 は, ガスストリッパー (He ストリッパーと N<sub>2</sub> ストリッパー), 8 台の主偏向電磁石 (BM1~8), 2 台の加速空洞, リバンチャー, 4 基の荷電独立四重極電磁石ステーション (QS1~4), 入射電磁石 (IBM と入射四重極トリプレット), 取出し偏向電磁石 (EBM1 と EBM2), 複数のビーム診断用真空箱から構成されている.

現行の加速方式では RRC で加速された U<sup>35+</sup> ビーム (11 MeV/u, 18.25 MHz) は約 0.7 mg/cm<sup>2</sup> の厚さの He ガスストリッパーを通過し, U<sup>64+</sup> ビームのみが偏向電磁石によって選択され, 荷電変換効率は約 20% となる. 一方, CSR を使う場合, 選択

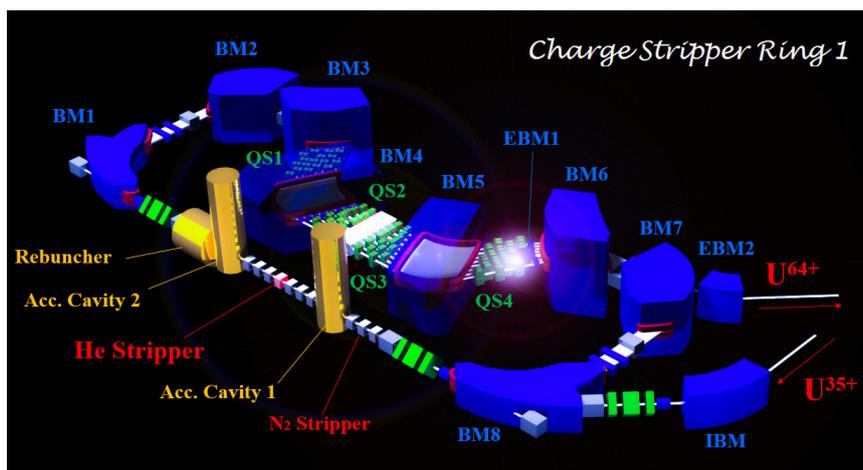


図 12: CSR1 のデザイン図. U<sup>35+</sup> を荷電変換入射し U<sup>64+</sup> を連続的に排出する. 8 価分 (59+~66+) のウランビームを U<sup>64+</sup> になるまでエネルギーを回復しながら周回・ストリッパーへ再突入させ, バンチ構造を保つため全ての価数で設計周長 37.2 m を持つ等長リングとなっている. CSR1 は, ガスストリッパー (He ストリッパーと N<sub>2</sub> ストリッパーの 2 段階), 8 台の主偏向電磁石 (BM1~8), 2 台の加速空洞, リバンチャー, 4 基の荷電独立四重極電磁石ステーション (QS1~4), 入射電磁石 (IBM と入射四重極トリプレット), 取出し偏向電磁石 (EBM1 と EBM2), 複数の診断用真空箱から構成されている.

された  $U^{64+}$  以外のビームについて、ストリッパーで失われたエネルギーを回復して周回し、ストリッパーに再入射する。  $U^{35+}$  ビームは、周回周期と同期して荷電変換入射法によって CSR へと連続的に入射される。周回と荷電変換を繰り返し、  $U^{64+}$  ビームのみが取出用偏向電磁石 (EBM1) を用いて水平方向へ曲げられ、連続的に取出される。

先に述べたように CSR は周回する全価数のビームに対して同じ軌道長を持つリング (等長リング) で構成され、後段サイクロトロンに合わせてビームのバンチ構造 (RIBF のウラン加速では 18.25 MHz のビームの塊を加速してサイクロトロンの加速高周波は常にその整数倍) を保持する。横方向に関しては、ストリッパー位置で全価数のビームの形状を一致させる。すなわちリングの固有楕円 (周回によって形状を変えない 2 次元位相空間上の楕円) を一致させることで、価数の入れ替わりに起因するエミッタンス増大を抑制する。図 13 はパラメータを調整して得られた、全価数のビーム包絡線を重ね合わせたものであり、ビーム形状が一致 (固有楕円の形状に一致) していることが分かる。

荷電独立なビームの収束は四重極電磁石ステーションで行われ、隣接ビーム間隔は 10 cm 程度であり、コンパクトで強力かつ漏れ磁場を抑えた Q 磁石の実現は鍵であった。

我々は砂時計型 Q 磁石という独自デザインの Q 磁石を開発した。図 14 の様にポールの先端が折れ曲がっており、コイルはポールのストレートネックに巻かれている。この形状により、サイドヨークの両側にビーム経路を確保しつつ、十分なコイルスペースを確保し、必要な起磁力を発生させるこ

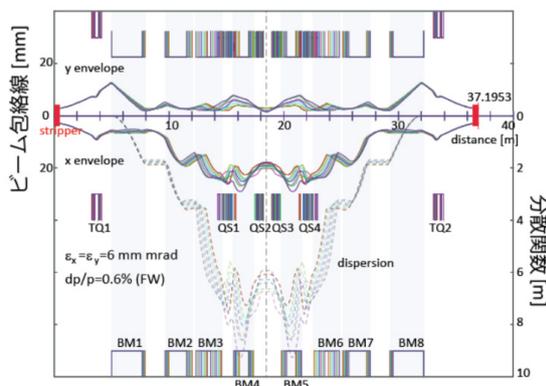


図 13: CSR1 における全価数のビーム包絡線 (実線) と分散関数 (ドット線) の重ね書き。

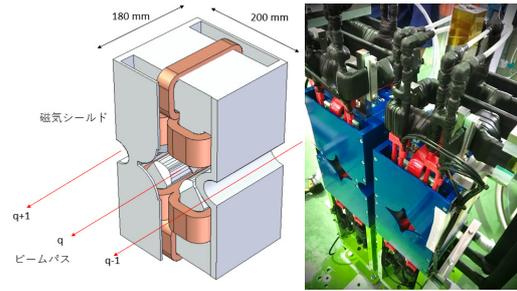


図 14: 砂時計型 Q 磁石のデザイン図と写真。

とができる。サイドヨークは隣接軌道への漏れ磁場を減らすためにも重要である。構造に関して理化学研究所と日立エンジニアリング株式会社で共同の特許を出願している (出願番号: JP2020-056540)。

既に Q 磁石の実機 2 台の製作を行い、必要磁場勾配の生成、漏れ磁場、クロストークなどに関する磁場測定が行われ、要求性能を満たすことが確認された。

その他、取出用 EBM1 や主偏向電磁石などの重要機器の要素技術開発が進み、より詳細な軌道計算と全体の機械設計を行う段階に入っている。また、CSR の実現と共に既存加速器の様々な改良を含む将来計画が進行しており、イオン源やサイクロトロン改造、各種機器の大強度運転への対応なども合わせて検討が進んでいる。

## 6. CSR1 における 2 段階ストリッパー

ここから CSR のストリッパーに関する話題をいくつか紹介する。CSR1 内のストリッパーは、最大約 38 kW のウランビームに耐え得るストリッパーでなければならないが、連続的な荷電変換入射を実現するため 1 回の通過で荷電変換を行うのに十分な厚さが必要で、高密度電子プラズマや電子ビームの使用は、現在の技術では難しい。

我々は CSR1 に関して、  $N_2$  ガスストリッパー ( $0.1 \text{ mg/cm}^2$ ) と  $He$  ガスストリッパー ( $0.3 \text{ mg/cm}^2$ ) を直列に配置した 2 段階ガスストリッパーの使用について検討を進めている (図 15)。ストリッパーの厚さの選択は、エミッタンスグロス、平均周回数、エネルギー回復量などに直結する重要なパラメータである。荷電変換断面積が大きく平衡厚さが薄い  $N_2$  ストリッパーで周回毎に荷電分布をリセットし (~55 価)、続けて  $He$  ストリッパーで価数を高める

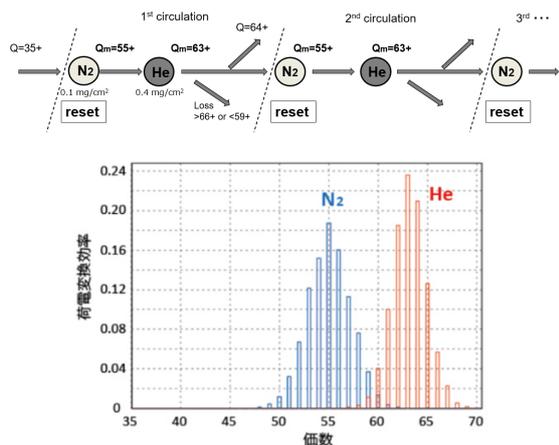


図 15: N<sub>2</sub> と He の 2 段階ストリッパーによる周回スキーム (上) とそれぞれの標的での価数分布計算 (下).

(~64 価) ことで、荷電分布を固定し、周回による荷電分布のドリフトを抑制することができる。これにより価数が設計範囲 (59+~66+) から外れる事による損失が低減される。実際計算してみるとビームの排出効率 は He ストリッパーのみを用いた場合は 8 価のアクセプタンスから外れる成分が多く 5 割以下にとどまるが 2 段階ストリッパーを用いた場合 8 割を超える効率が実現できることが分かっている。

ストリッパーの影響に関して通過の度にエネルギーストラグリングによってビームエミッタンスが大きくなることは不可避であるがストリッパー前後に 2 台のリバンチャーを置き全ての価数で縦方向の固有楕円も一致させ、更に元々エネルギー広がり大きい状態でストリッパーを通過させることでストラグリングの影響を軽減することが出来る。そのような配置の最適化も行っている。

## 7. CSR2 におけるストリッパー

RIBF の第 2 ストリッパーの置き換えである CSR2 は入射 <sup>238</sup>U<sup>64+</sup> のエネルギーを 50.7 MeV/u として、CSR1 と同様の手順で設計することができる。

現状使用している回転グラフィートシートディスクストリッパー[8,9]は CSR2 における利用では耐久性に問題が生じると考えられている。その高度化と共にガスや液体リチウムストリッパーの利用も検討されている。

第 2 ストリッパーでは U<sup>86+</sup> を作る必要があるが、図 16 に示すようにガス中での平衡電荷は 86 価に届かない。第 2 ストリッパーにおいては Low-Z ガスを使用したくても平衡厚さが厚すぎてエネルギー

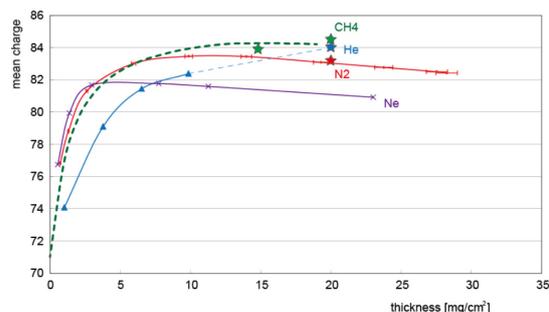


図 16: ガス通過後の <sup>238</sup>U<sup>64+</sup> (50.7 MeV/u) の平均電荷。星印のデータは 5 μm のカプトン箔窓を用いたガスセル標的、それ以外は窓なし蓄積のガスを標的としている。カプトン膜での変換の補正は行っておらず参考データとして示した。

ギー損失が大きく、電荷が低下し、エミッタンスグロースも大きくなってしまふ。更に厚いガスの蓄積も困難である。CSR のスキームであれば例えば窒素ストリッパーを用いた場合でも少しずつ 86 価を切り出し、20 周程度の周回が可能なら 8 割程度の効率で荷電変換を行える。しかし、もう 1 価でも平衡価数が高ければ周回数を減らせてエミッタンスグロースなどの問題も少なくなるため、最適な媒体と利用方法の模索が続いている。

## 8. 荷電変換冷却やその他の可能性

CSR の場合、ビーム周回時間はサブ μs 程度であり、従来の重イオンビームの冷却方法 (電子冷却、確率冷却、レーザー冷却、イオン化冷却) は適用できない。しかし CSR を用いた場合、短時間でのビーム冷却の可能性があり、その原理について簡単に述べる。

図 17 は CSR によるビーム冷却の概念的な例である。まず、ビームの位相空間内の領域を異なる平均電荷でタグ付けすることがスタートとなる。空間的広がりに関してはビームを 2 つ以上のストリッパー (ハイブリッドストリッパー) にまたがって入射させればタグ付けができて、場所によって異なる平均電荷となる。十分に異なる平均価数を持った

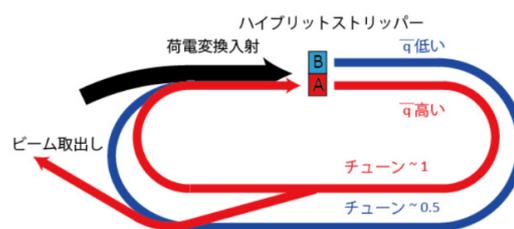


図 17: CSR を用いた荷電変換冷却の概念図。

2つのビームは、独立した光学系を介して輸送することができる。チューン(一周当たりの横方向微小振動つまりベータatron振動の振動数)を調整し、片方のビームのみが取り出されるようにCSRを設計すれば、取出されたビームのエミッタンスは減少し、ストリッパーによるエミッタンスグロスより効果が大きければ、出射ビームが冷却されたように見える。これが本質的な原理であり、別の自由度のビーム冷却系を設計することもできる。

CSR2でビームサイズを制限するための使用を検討しており、予備的な計算ではビームロスは多少増えるものの効率的なスリットとして動作することが示されている。

他にもCSRは価数のばらける重イオンビームに対する内部標的リングとみなすことができ、ストリッパーを反応・生成標的に置き換えてみれば様々な応用が考えられるかもしれない。バンチ構造が保たれることが特徴であるが、ビームファンネリングや周波数変更の用途も可能である。RIBFの次々期計画の技術基盤となる可能性も秘めており検討が進んでいる。

## 9. まとめ

理研RIBFにおけるHeガスストリッパーと将来計画の一つCSRについて、関連する物理や鍵となっている装置開発の話題を織り交ぜながら紹介した。

RIBFのここ10年の重イオンビームの大強度化、特にウランビームでは200倍以上の強度増強に成功している。途中様々なボトルネックを打ち破る必要があったがHeストリッパーの実現は大きなターニングポイントであった。今まさに世界各国で次世代型のin-flight型RIビーム施設が立ち上がり、RIBF含め重イオンビームに関する国際研究開発競争は激化する。CSRの開発はRIBFの更なる飛躍の大きな鍵である。

CSR1ではウラン以外のイオン種も周回させる拡張計画についても検討しており、そのデザインにおいて様々なイオン種について価数分布予測のための知見を深める必要がある。CSR2でも大強度ビームに対応するためには流体ストリッパーを用いざるを得ないがガスでも液体リチウムでも価数が足りなさそうである。1価でも平衡価数を上げ

られるなら大きなインパクトがあり、特殊な標的の形態の模索や密度効果など理解は最重要課題の一つである。また、扱うビーム強度が大きくなるにつれてストリッパーへの熱負荷は益々重要なトピックとなり、微視的に原子衝突過程を整理して、エネルギー散逸機構を解明することが重要である。

重イオン加速器の設計と原子衝突物理分野は密接な関係にある。本稿をきっかけにストリッパーやCSR開発について広く知っていただき、原子衝突分野の研究者と交流を深められる機会になれば大変幸いである。

## 謝辞

本稿に示した研究はすべて仁科加速器科学研究センター加速器基盤研究部及び関連する方々に様々にご協力いただき議論しながら進めているものであり、改めてここで感謝申し上げます。ガスカク乱板のアイデアは永田祐吾博士との酒席議論に端を発しておりここに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **261**, 1009 (2007).
- [2] H. Okuno *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 033503 (2011).
- [3] H. Imao *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 123501 (2012).
- [4] H. Imao *et al.*, CYC2013, 265 (2013).
- [5] H. Imao *et al.*, CYC2016, 155 (2016).
- [6] H. Imao, JINST **15**, P12036 (2020).
- [7] H. Imao *et al.*, IPAC2022, TUIYGD2 (2022).
- [8] H. Hasebe *et al.*, AIP Conf. Proc. **1962**, 030004 (2018).
- [9] H. Hasebe *et al.*, EPJ Web Conf. **229**, 01004 (2020).
- [10] N. Fukunishi *et al.*, PAC09, MO3GRI01 (2009).
- [11] N. Bohr and J. Lindhard, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. **28** No.7 (1954).
- [12] H. D. Betz and L. Grodzins, Phys. Rev. Lett. **25**, 211 (1970).
- [13] J. H. McGuire and P. Richard, Phys. Rev. A **8**, 1374 (1973).

- [14] A. S. Schlachter *et al.*, Phys. Rev. A **27**, 3372 (1983).
- [15] C. Scheidenberger *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **142**, 441 (1998).
- [16] J. P. Rozet *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **107**, 67b (1996).
- [17] E. Lamour *et al.*, Phys. Rev. A **92**, 042703 (2015).
- [18] T. Kanemura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **128**, 212301 (2022).
- [19] H. Ryuto *et al.*, CYC2007, 314 (2007).
- [20] P. Scharrer *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **20**, 043503 (2017).
- [21] H. Kuboki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 053502 (2011).
- [22] H. Geissel *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **195**, 3 (2002).
- [23] J. Wei *et al.*, NA-PAC'13, 1453 (2013).
- [24] FAIR Baseline Technical Report, vol. 2 (2006).
- [25] D. Jeon, IPAC2013, 3898 (2013).
- [26] J. C. Yang *et al.*, IPAC2013, WEOBB103 (2013).

---

## 2022 年度 役員・委員会

### 会長

田沼肇（東京都立大学）

### 幹事

木野康志（東北大学）〔副会長〕

金安達夫（九州シンクロトロン光研）

酒井康弘（東邦大学）

間嶋拓也（京都大学）

的場史朗（高エネルギー加速器研究機構）

### 運営委員

東俊行（理化学研究所）

岡田邦宏（上智大学）

小田切丈（上智大学）

加藤太治（核融合科学研究所）

金安達夫（九州シンクロトロン光研）

木野康志（東北大学）

高口博志（広島大学）

酒井康弘（東邦大学）

高峰愛子（理化学研究所）

土田秀次（京都大学）

中村信行（電気通信大学）

古川武（東邦大学）

間嶋拓也（京都大学）

的場史朗（高エネルギー加速器研究機構）

山崎優一（東京工業大学）

山下琢磨（東北大学）

### 常置委員会

編集委員会

委員長：間嶋拓也（京都大学）

行事委員会

委員長：金安達夫（九州シンクロトロン光研）

広報渉外委員会

委員長：酒井康弘（東邦大学）

顕彰委員会

委員長：木野康志（東北大学）

庶務委員会

委員長：的場史朗（高エネルギー加速器研究機構）

---

編集委員 加藤太治, 歸家令果, 久間晋, 熊谷嘉晃, 永田祐吾,  
中野祐司, 間嶋拓也, 山下琢磨, 渡邊昇



原子衝突学会誌しよとつ

第 19 卷 第 6 号 (通巻 109 号)

Journal of Atomic Collision Research

©原子衝突学会 2022

<http://www.atomiccollision.jp/>

発行: 2022 年 11 月 15 日

配信: 原子衝突学会事務局 <[acr-post@bunken.co.jp](mailto:acr-post@bunken.co.jp)>