

理化学研究所 RI ビームファクトリーにおける SCRIT 電子散乱施設の現状 PRESENT STATUS OF SCRIT ELECTRON SCATTERING FACILITY AT RIKEN RI BEAM FACTORY

大西哲哉 ^{*,A)}, 阿部大希 ^{B)}, 阿部康志 ^{A)}, 飯村俊 ^{C)}, 石倉悠真 ^{B)}, 石崎一志 ^{B)}, 市川進一 ^{A)}, 伊東佑起 ^{D)},
榎園昭智 ^{C)}, 小川原亮 ^{D)}, 尾原遼 ^{B)}, 栗田和好 ^{C)}, 郷家大雅 ^{B)}, 須田利美 ^{B)}, 立花万梨子 ^{D)}, 玉江忠明 ^{B)},
檀上梨花 ^{B)}, 塚田暁 ^{D)}, 永野佑花 ^{E)}, 原雅弘 ^{A)}, 堀田健悟 ^{B)}, 堀利匡 ^{A)}, 本多佑記 ^{B)}, 前原義樹 ^{D)}, 前田裕成 ^{D)},
山野翼 ^{C)}, 吉田暁 ^{D)}, 和宇慶ひかり ^{B)}, 若杉昌徳 ^{D)}, 渡邊正満 ^{A)}, Clement Legris ^{B)}

Tetsuya Ohnishi ^{*,A)}, Daiki Abe ^{B)}, Yasushi Abe ^{A)}, Shun Iimura ^{C)}, Yuma Ishikura ^{B)}, Kazushi Ishizaki ^{B)},
Shinichi Ichikawa ^{A)}, Yuki Itou ^{D)}, Akiomo Enokizono ^{C)}, Ryo Ogawara ^{D)}, Ryo Obara ^{B)}, Kazuyoshi Kurita ^{C)},
Taiga Gouke ^{B)}, Toshimi Suda ^{B)}, Mariko Tachibana ^{D)}, Tadaaki Tamae ^{B)}, Rika Danjyou ^{B)}, Kyo Tsukada ^{D)},
Yuka Nagano ^{E)}, Masahiro Hara ^{A)}, Kengo Hotta ^{B)}, Toshitada Hori ^{A)}, Yuki Honda ^{B)}, Yoshiki Machara ^{D)}, Yusei Maeda ^{D)},
Tsubasa Yamano ^{C)}, Kyo Yoshida ^{D)}, Hikari Wauke ^{B)}, Masanori Wakasugi ^{D)}, Masamitsu Watanabe ^{A)}, Clement Legris ^{B)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} Tohoku Univ. ELPH

^{C)} Rikkyo Univ., Department of Physics

^{D)} Kyoto Univ. ICR

^{E)} Yamagata Univ., Department of Physics

Abstract

The SCRIT electron scattering facility was constructed at RIKEN RI Beam factory to realize electron scattering off unstable nuclei. After the commissioning experiment, the development toward electron scattering with short-lived unstable nuclei has been carried out. As a result, the world's first electron scattering with online-produced ^{137}Cs ions has been recently conducted. In addition, the measurements of the isotope dependence of the charge density distribution have been performed using Xe isotopes. For further experiments with unstable nuclei, for example ^{132}Sn , the upgrade plan of the SCRIT facility is in progress.

1. INTRODUCTION

理論計算によると原子核は約1万種ほどあり、そのうち約300種が安定核と呼ばれる原子核、残りは有限の時間で崩壊する不安定な原子核(不安定核)である。そして約3千種の不安定核がこれまでに知られている。このような状況において、不安定核研究は、従来の安定核を対象にした研究を基盤にしつつも研究対象が大幅に広がるため、新たな原子核モデルの構築や原子核の統一的理解につながるものとして、大いに期待されている。近年、不安定核研究は盛んに行われており、従来の原子核にはなかったエキゾチックな構造(中性子ハロー、中性子スキン、魔法数の消失など)が発見されている[1]。加えて、新元素合成や宇宙における重元素合成過程ならびに中性子星における核物質の理解といった諸問題にも大きく貢献すると期待されている[2-4]。

電子散乱は、相互作用がモデル依存性なく記述できるため、精密核分光のプロブとして1950年代から安定核を対象に精力的に実験が行われてきた[5]。特に弾性散乱は原子核内の電荷密度分布が直接導出できるため、ヘリウムからウランまでの多くの安定核に対して適応されてきた。不安定核研究においても電子散乱実験が期待されてきたが、散乱実験に適切な形状・数を持つ不安定核標的の準備が困難であったり、標的自身が寿命によって崩壊していくことから、不安定核電子散乱は長年実現されてこなかった。

この様な状況を打破すべく、新しい標的技術である

SCRIT (Self-Confining RI Ion target) 法が開発された[6]。これは、蓄積リングで良く知られているイオントラップ現象を応用した標的作成技術である。SCRIT装置は3つの電極で構成され、それらの電極で作る井戸型静電ポテンシャルにより、イオンはビーム軸方向にトラップされる。横方向については、電子ビーム自身が作るポテンシャルによって、イオンはトラップ領域内に留まり続ける。その結果、イオンは蓄積リング内で静止標的として動作するようになる。特徴の一つとして、衝突実験とは違い、電子ビーム自体の位置の微調整を行う必要はなく、従来の電子散乱実験と同様の実験が行えることが挙げられる。

京都大学化学研究所における実証実験[7]が行われた後、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) に SCRIT 電子散乱施設が2009年に建設された[8]。その際、住友重機械工業株式会社より電子加速器一式 (150 MeV マイクロトロン [9] 及び放射光リング AURORA-2S [10]) が無償譲渡され、半分のコストで建設が行われた。SCRIT 実験に必要な改造を行った後、2010年から電子加速器のコミッションを開始した。その後、2013年にウラン光核分裂反応を用いた Radioactive Isotope (RI) 生成に成功し [11]、2016年に安定核 ^{132}Xe を用いた電子散乱実験から ^{132}Xe 電荷密度分布の導出に成功した [12]。そして、ついに、2022年に ^{137}Cs 不安定核を使い、オンライン生成不安定核を用いた電子散乱に世界で初めて成功した [13]。

本論文では、SCRIT 電子散乱施設の概要と最近の成果について報告する。

* oonishi@ribf.riken.jp

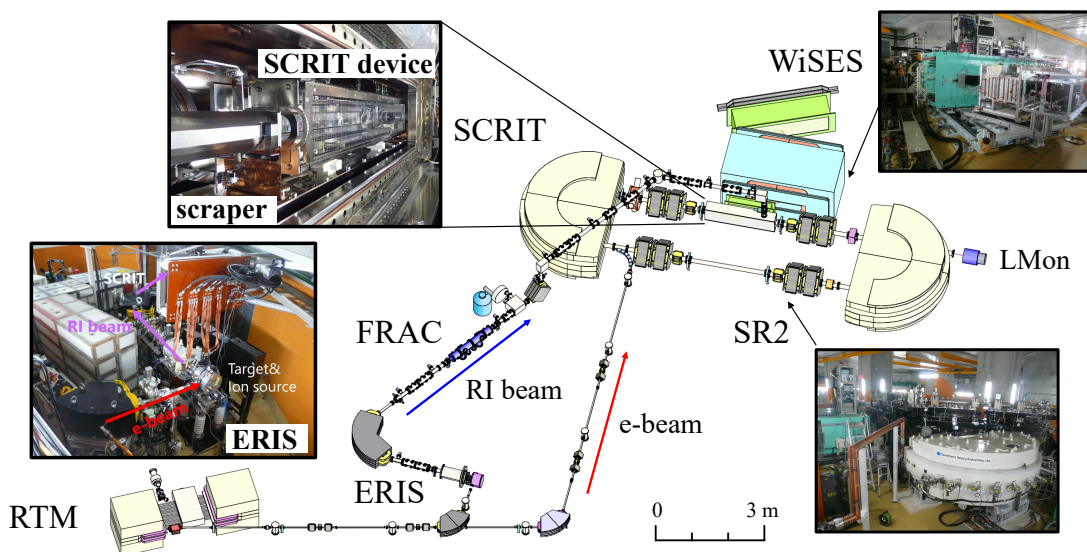


Figure 1: Schematic layout of the SCRIT electron scattering facility at RIKEN RI Beam Factory. Pictures of ERIS, SR2, SCRIT system, and WiSES are included in the figure.

2. SCRIT 電子散乱施設概要

SCRIT 電子散乱施設は、電子加速器 Rate-track Microtron (RTM)、電子蓄積リング SCRIT-equipped RIKEN Storage Ring (SR2)、不安定核生成分離施設 Electron-beam-driven RI separator for SCRIT (ERIS) [11]、及びパルスビーム変換器 Fringing-RF-field-Activated dc-to-pulse Converter (FRAC) [14]、で構成されている。SCRIT システムは SR2 直線部内に設置され、その脇に磁気スペクトロメーター Window-frame spectrometer for electron scattering (WiSES) [15] が、SR2 直線部下流出口にはルミノシテモニター LMON [15] が設置されている。Figure 1 に施設全体の模式図及び代表的な装置の写真を示した。

RTM によって 150 MeV まで加速された電子ビームは SR2 に入射され、数百 mA まで蓄積される。その後、電子ビームは ERIS 内の炭化ウラン標的に照射され、ウランの光核分裂反応により不安定核が生成される。生成された不安定核は目的とする元素に適したイオン源を用いて RI イオンビームとして供給され、FRAC で冷却・蓄積後にパルスビームとして SCRIT システムに入射される。SCRIT システム内で電子ビーム軌道周辺にトラップされた RI イオンは標的として働き、周回電子ビームが衝突・散乱し、散乱電子は、WiSES で運動量分析された後に検出器で検出される。また、測定中のルミノシテは Bremsstrahlung 反応を用いて、LMON でモニターされる。

2.1 電子加速器 RTM 及び SR2

RTM はコンパクトなレーストラック型マイクロトロンであり、蓄積リングへの電子ビーム入射及び不安定核生成に使用されている。SR2 入射時は電子ビームパワー約 0.4 W at 2 Hz (パルス幅 2 μ s) で運転し、RI 生成

時はピークカレントを増やし、約 20 W at 20 Hz (パルス幅 4 μ s) で運転している。

SR2 は電子蓄積リングで、電子散乱測定における運動量移行範囲に応じて、蓄積電子ビームエネルギーを最低 100 MeV から最高 700 MeV まで変更することが可能である。典型的な蓄積電流と寿命は 300 mA と 1 Ah である。また、SCRIT 装置位置での典型的な電子ビームサイズは水平方向 2 mm (σ)、垂直方向 0.4 mm (σ) である。

2.2 不安定核生成分離施設 ERIS

ERIS は、不安定核生成標的、イオン源及びイオン分析ビームラインで構成されている。

不安定核生成標的として、自作した炭化ウラン円板が用いられている。円板は直径 18 mm、厚み 0.8 mm であり、それらが複数枚重なった状態でグラファイトコンテナに取められている。生成された不安定核を標的から素早く取り出すために、標的はコンテナごと 2000 度近くまで温められている。標的から取り出された不安定核はイオン源まで導かれ、イオンビームとして供給される。ERIS では、現在二種類のイオン源 (電子衝突型と表面イオン化型) が目的とする元素に応じて使い分けられている。また、どちらのイオン源も、イオン源先端部にグリッド電極が備わっており、イオン源内でイオン蓄積が行えるようになっている。

2.3 RF クーラーバンチャー FRAC

SCRIT システムにイオンビームを入射するにはパルスビームが必要であり、加えて、長いイオンビームラインを輸送するために、小さいエミッタンスのビームが必要となる。そこで、ERIS と SCRIT システムの間に、FRAC が設置された。

ERIS から供給されたイオンビームは FRAC 内で冷却・蓄積され、測定に必要なイオン量が蓄積された後、短い時間幅 (300 μ s) のパルスビームとして引き出される。そのため、FRAC 内のポテンシャルは出口に向かって 45 V 程下がっており、イオンは出口付近で蓄積される。FRAC 内での冷却には微量量のネオンバッファガスが用いられ、内部真空度として $\sim 10^{-3}$ Pa が維持されている。結果として、下流ビームライン真空への影響を抑えながら、高い変換効率と冷却効率が実現された [16]。

2.4 SCRIT システム

SCRIT システムは SCRIT 装置と、その直前に設置されているイオンビーム分析用スクレーパー、及びトラップイオン分析装置で構成されている。

SCRIT 装置は 3 つの電極で構成され、ビーム軸方向に井戸型ポテンシャルが形成される。その際、中央電極のポテンシャルは、電子ビームが作るポテンシャルを考慮した上で、イオンビームの運動エネルギーよりも数 eV 低くなるように調整される。また、電子ビームの電流値に依存してポテンシャルの最適値は変化するため、測定された電流依存性に従ってポテンシャルは調整される。SCRIT 電極はなるべく物質量が少なくなるように設計され、特にビーム軸水平方向 (散乱電子が飛び出る) 方向については、0.1 mm 厚のメッシュ電極になっている。メッシュ電極のメッシュ幅は 0.1 mm、メッシュ間隔は、横方向 8 mm 縦方向 5 mm であり、中央部の縦 35 mm 幅の領域にはメッシュが張られておらず、そこを通り抜ける散乱電子への影響が最小限になるようになっている。結果として、SCRIT 装置内部におけるトラップ領域の幾何学的大きさは、99 (h) \times 115 (v) \times 500 (d) mm³ となっている。

SCRIT 装置内にトラップされたイオンは、測定後に SCRIT 装置から引き出され、トラップイオン分析装置に導かれる。トラップイオン分析装置は、全電荷量モニターと電荷分布分析装置で構成されている。電荷分布分析装置は E \times B フィルターと 43 個のチャンネルトロンから構成されており、質量と電荷の比を測定することができる。全電荷量モニターは調整可能なスリットにもなっており、入射イオンのほんの一部 (10⁸ 個入射時に 100 個程度) を電荷分布分析装置に送るようになっている。その結果、トラップイオン分析装置を使うことで、トラップ毎の全電荷量と電荷分布の同時測定が可能になっている。測定の詳細については、参考文献 [17] を参照のこと。

2.5 WiSES&LMON

WiSES は散乱電子の運動量、散乱角度及び衝突点を測定するためのシステムであり、window-frame 型のスペクトロメーターと、その前後にあるドリフトチェンバー、及び最下流のトリガー用プラスチックシンチレーターで構成されている。特徴の一つとして、WiSES スペクトロメーターの広いギャップ (1700(w) \times 290(h) \times 1400(d) mm³) による大きいアクセプタンス (80 msr) が挙げられる。これにより電子ビーム方向で 500 mm に広がっている SCRIT システムの標的領域をカバーしている。

ドリフトチェンバーは He+C₂H₆ (80:20) ガスで動作

し、2 つのドリフトチェンバー間は、スペクトロメーターも含めて 1 気圧のヘリウムガスで満たされている。これにより散乱電子への多重散乱の影響を最小限にとどめている。散乱電子の軌道はドリフトチェンバーの測定位置と、OPERA-3D 計算による磁場を用いて再構成され、運動量分解能として、 3×10^{-3} (300 MeV 時) が達成されている。

LMON は pure-CsI 検出器と、XY 分布測定用のファイバーシンチレーターで構成されている。これにより、SCRIT 装置のトラップ領域で起きた Bremsstrahlung 反応の γ 線のエネルギー、位置分布及びレートが常に測定されている。LMON は、SR2 の直線部下流の、SCRIT 装置から 7 m 下流にあたる位置に設置されており、GEANT4 によるシミュレーションと測定結果との比較から、SCRIT 装置からのアクセプタンスと通過効率が評価されている。それらの値を用いて、ルミノシティの絶対値が校正されており、測定中のルミノシティが求められている。

3. SCRIT 施設における最近の結果

3.1 SCRIT トラップ性能評価

SCRIT のトラップ性能評価に関する結果の一例を示す。Figure 2 は、SCRIT トラップ中におけるルミノシティのトラップ時間依存性である。縦軸はトラップ直後の値を 1 とした相対値でプロットしている。図中では入射イオン量及びイオン化方式の違う入射イオンのデータを 2 つ示している。¹³⁸Ba 入射イオンは表面イオン化方式でイオン化されたもので、比較的エネルギー分布が揃っている。一方、¹²⁴Xe 入射イオンは電子衝突方式でイオン化され、エネルギー分布が広がっていることが分かっている。イオンエネルギー分布が広い場合、電子ビームの周りにイオンが広く分布することになり、外側のイオンがトラップから抜け落ちやすくなるため、トラップ中のルミノシティが早く落ちてしまうと考えられる。一方、イオンエネルギー分布が狭い場合は電子ビームの周りに集まっており、トラップから外れにくくなると考えられる。ただし、トラップ中のイオンの位置分布は、トラップ中に変化するトラップイオンの荷電状態に大きく影響を受けるため、単純な解釈だけでは不十分である。さらに、電子ビームの不安定性に起因するトラップ寿命の A/q 依存性もトラップ時間依存性に影響を及ぼす。そこで、トラップ中のイオンの運動をより詳細に調べるために、トラップイオン分析装置を使ったトラップ中のイオンの荷電状態分布及び荷電状態毎の位置分布の測定といった、さらなる研究が進められている [17]。

Figure 3 は、ルミノシティの電流値依存性を示している。電子のビームエネルギーは、150 MeV であった。4 \times 10⁸ 個の ¹²⁴Xe イオンをパルス幅 300 μ s のパルスとして入射した。トラップ時間は 250 ms であり、イオン入射有りと入射無しの測定を繰り返し行いながら測定を行った。電子ビーム電流値が高いときにルミノシティが低くなっているのは、入射直後のため、電子ビーム自身が少し不安定になっているためと考えられる。数分で電子ビームが安定していき、ルミノシティが高くなっていく。その後は、電流値の減少にほぼ比例して

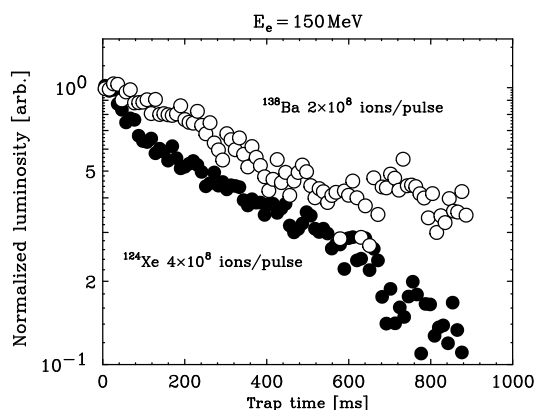


Figure 2: Injected ion property dependence of relative luminosity. Black and white circles show the results for ^{124}Xe produced by FEBIAD ion source and ^{138}Ba produced by the surface ionization type ion source, respectively.

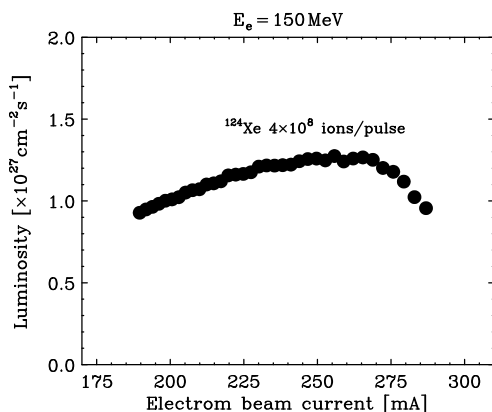


Figure 3: Dependence on electron-beam current. Black circles show the results for pulsed ^{124}Xe ion beam with 300- μs pulse width at electron-beam energy of 150 MeV.

ルミノシティが下がっている。このような傾向は前段落で述べたようなトラップイオンの状態や電子ビームの不安定性が大きく影響しているため、得られた結果を使った詳細な研究を進めていく予定である。

3.2 世界初のオンライン生成不安定核を用いた電子散乱

2016年に ^{132}Xe を用いたコミッションング実験 [12] が行われた後、不安定核電子散乱実験に向けた開発が進められてきた。そして、2022年、世界で初めてのオンライン生成した不安定核を用いた不安定核弾性散乱実験が実施された [13]。実験では、ERIS から ^{137}Cs イオンビームを供給して行った。150 MeV に加速した電子ビームを、炭化ウラン標的 (直径 18 mm, 厚さ 0.8 mm を 43 枚使用、U 28 g 相当) に約 20 W のビームパワーで照射し、表面イオン化イオン源を使い、 ^{137}Cs イオンビームを供給した。その後、FRAC を用いて冷却・パルス化し、SCRIT システムに約 2×10^7 個のパルスビームとして 4 秒周期で入射した。SCRIT システム内でトラップされた ^{137}Cs イオンと蓄積リング内の 150 MeV

周回電子ビームが衝突し、散乱電子は WiSES で運動量分析された後、検出器で検出された。測定は電子ビーム電流約 150–250 mA で行われ、トラップ時間は 2 秒間として、入射イオン有りとイオン無しの条件の測定を繰り返して行った。結果として、ルミノシティは、 $0.96 \times 10^{26} / \text{cm}^2 / \text{s}$ (入射イオン有り)、 $1.0 \times 10^{27} / \text{cm}^2 / \text{s}$ (イオン無し) に到達した。検出された散乱電子のデータにおいて、残留ガスからの寄与を差し引き、 ^{137}Cs からの弾性散乱イベントをきれいに観測することができた。これにより、世界で初めてのオンライン生成による不安定核電子散乱が実現できた。詳細については、参考文献 [13] を参照されたい。

3.3 Xe 同位体実験

陽子数 50, 中性子数 82 の二重魔法核 ^{132}Sn 周辺の原子核構造を系統的に調べるために、Xe 同位体を用いた電荷密度分布の同位体依存性の測定が行なわれている。これまでに、電子ビームエネルギー 150 MeV で、 $^{124}, ^{126}, ^{128}, ^{130}, ^{132}, ^{134}, ^{136}\text{Xe}$ の電子散乱データを取得した。得られた結果から、陽子密度分布の同位体依存性が導出され、様々な核力モデルを使った計算と比較することで、原子核構造の変化や核力について研究を進めている。今後は、他の電子エネルギーでの測定データを取得する予定である。

4. 今後の計画

世界初のオンライン生成不安定核を用いた電子散乱実験の成功をうけて、より中性子過剰かつ短寿命の不安定核を対象とした電子散乱実験、特に ^{132}Sn 実験にむけた SCRIT 施設の高度化が進められている。 ^{132}Sn は陽子数・中性子数ともに魔法数である二重魔法核であるため、原子核の構造研究において重要な原子核である。

現在進められている SCRIT 施設の高度化の一つは、不安定核の生成能力を向上するための、電子加速器ビームパワー増強である。具体的には RTM モジュレーター電源の更新による繰り返し周波数の増強、ピーク電流の増強、パルス幅の拡大などを行い、2 kW 相当までビームパワーの増強を行う。これにより、現状毎秒 10^6 個の ^{132}Sn イオンビームを毎秒 10^8 個で供給できるようになる。また、大強度化に伴う放射線遮蔽及びリモートハンドリングシステムや放射化物保管庫などの整備を進めていく予定である。

また、蓄積リングの高度化も進められている。残留ガスの影響を低減するための蓄積リング真空排気能力の増強、電子ビームの不安定性低減のための加速空洞における高次モードの低減、などの検討が進められている。

5. まとめ

2009 年から RIBF に建設を開始した SCRIT 電子散乱施設において、2022 年、オンライン生成した不安定核を用いた電子散乱実験が世界で初めて行われた。これは不安定核研究における新しい実験手法の実証であり、この手法により不安定核研究が大きく進展することが期待できる。

SCRIT 施設では、よりエキゾチックな不安定核を用

いた電子散乱実験に向けた施設の高度化計画を進めていくとともに、SCRIT法を用いたイオントラップ技術についても、より詳細に研究を進めていく予定である。

参考文献

- [1] T. Nakamura *et al.*, “Exotic nuclei explored at in-flight separators”, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 97, 2017, 53 and references therein.
- [2] E. M. Burbidge *et al.*, “Synthesis of the Elements in Stars”, *Rev. Mod. Phys.* 29, 1957, 547.
- [3] G. Wallerstein *et al.*, “Synthesis of the elements in stars: forty years progress”, *Rev. Mod. Phys.* 69, 1997, 995.
- [4] J. J. Cowan and F.-K. Thielemann, “R-Process Nucleosynthesis in Supernovae”, *Phys. Today*, 57, No. 10, 2004, pp. 47-53.
- [5] T. Suda and H. Simon, “Prospects for electron scattering on unstable, exotic nuclei”, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 96, 2017, 1, and references therein.
- [6] M. Wakasugi, T. Suda, Y. Yano, “A new method for electron-scattering experiments using a self-confining radioactive ion target in an electron storage ring”, *Nucl. Instr. Meth. A*, 532, 2004, 216.
- [7] M. Wakasugi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* “Novel Internal Target for Electron Scattering off Unstable Nuclei”, 100, 2008, 164801.
- [8] M. Wakasugi *et al.*, “Construction of the SCRIT electron scattering facility at the RIKEN RI Beam Factory”, *Nucl. Instr. and Meth. B*, 317, 2013, 668.
- [9] T. Hori *et al.*, “Improvement of 150 MeV Racetrack Microtron”, *Proceedings of PAC91*, 1991, 2877.
- [10] H. Miyade *et al.*, “INITIAL COMMISSIONING OF DEDICATED SR RIBG “AURORA-2S” FOR-X-RAY LITHOGRAPHY”, *Proceedings of EPAC98*, 1998, p. 2413.
- [11] T. Ohnishi *et al.*, “Electron-beam-driven RI separator for SCRIT (ERIS) at RIKEN RI beam factory”, *Nucl. Instr. and Meth. B*, 317, 2013, 357.
- [12] K. Tsukada *et al.*, “First Elastic Electron Scattering from ^{132}Xe at the SCRIT Facility”, *Phys. Rev. Lett.*, 118, 2017, 262501.
- [13] K. Tsukada *et al.*, “First Observation of Electron Scattering from Online-Produced Radioactive Target”, *Phys. Rev. Lett.*, 133, 2023, 092502.
- [14] M. Wakasugi *et al.*, “FRAC: Fringing-RF-field-activated dc-to-pulse converter for low-energy ion beams”, *Rev. Sci. Instrum.*, 89, 2018, 095107.
- [15] A. Enokizono *et al.*, “The performance of the SCRIT detectors for electron-RI scattering experiment”, *Proceedings of SCIENCE, INPC2016*, 2017, 092.
- [16] T. Ohnishi *et al.*, “The SCRIT electron scattering facility at RIKEN RI Beam Factory”, *Nucl. Instr. and Meth. B*, 541, 2023, 380.
- [17] R. Ogawara *et al.*, “Ion-trapping properties of SCRIT: Time evolutions of ^{138}Ba charge state distributions”, *Nucl. Instr. and Meth. B*, 541, 2023, 90.