

## SCRIT 電子散乱施設の現状と展望

### —オンライン生成不安定原子核の電子散乱に初成功—



大西 哲哉

Ohnishi Tetsuya

#### 1 はじめに

2023年、最初のアイデアから20年近くに及ぶ開発・研究期間を経て、筆者ら研究グループは、原子核物理学で長年待望されてきた“オンライン生成不安定核を使った電子散乱実験”<sup>1)</sup>を実現した。この成果は、本プロジェクトに関わってこられた大勢の方々の努力がようやく実を結んだものであると同時に、不安定核研究における新しい測定手法の幕開けとも言える。本稿では、この古くて新しい測定手法について紹介する。

電子顕微鏡は加速した電子を物体に当て、原子や分子の微細な構造を明らかにする装置である。原子核に適応するには、波長を短く、つまり高い運動エネルギー（100 MeV 以上）の電子が必要となり、必然的に加速器を用いた散乱実験となる。電子散乱の特徴としては、1) クーロン力のため、相互作用に関する不定性がない。2) 散乱した原子核を大きく乱さない。3) 電子自身が構造を持たない等が挙げられ、原子核構造の情報を信頼性高く引き出すことができる。一方、反応における散乱断面積が核力の場合と比べて小さく、大きなルミノシティが要求される。ここでルミノシティは、単位面積当たりの標的数とビーム電流の掛け算で定義される量であり、電子ビームと静止標的を用いた弾性散乱実験では、約  $10^{28}[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$  で実験が行われてきた。このような特徴を持つ高エネルギー電子散乱実験は、原子核研究における様々なテーマに対し、古くは1950年

代から、今に至るまで実施されている。特に、電子弾性散乱は原子核内の電荷分布を精度良く直接測定することができるため、安定核では徹底的に行われてきた<sup>2)</sup>。

近年の原子核研究では、ある時間で崩壊する原子核（不安定核）を対象とした研究が活発に行われており、特に中性子過剰核についてはハローやスキンといったエキゾチックな構造が発見されている。その一方で、不安定核の大きさ（原子核半径）や形（密度分布）といった基本的物理量については、反応断面積、アイソトープシフト、陽子弾性散乱等による研究があるものの、限られた不安定核でしか荷電半径は決定されておらず、電荷密度分布に至ってはほとんど測定例がない。そのため、中性子分布半径や中性子密度分布等を求める際に、モデルによる不定性が大きく残ってしまっている。これを解決するために、不安定核の電子散乱実験が長年待望されてきた。しかし、これまで測定例としては、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{41}\text{Ca}$ 等の長寿命不安定核を標的とした例があるものの、短寿命不安定核での測定は実現していない。これは、前述のような大きいルミノシティに必要な量の静止標的を不安定核で用意するのが困難なためである。

不安定核電子散乱実験を実現する方法として、古くからコライダー実験が考えられてきた。例えば、ドイツでは不安定核蓄積リングと電子蓄積リングを使ったコライダー実験（ELISE）<sup>3)</sup>が提案された。2000年当時は、ELISEは既に計画段階にあり、建設費用がかかるものの、技術的には特に問題なく実

現できると考えられていた。このような逆境の中、理研の若杉、須田、矢野らが、全く新しいアプローチでの不安定核電子散乱の実現方法を提案した。それが、画期的な不安定核標的作成法、Self-Confining-Radioactive isotope-Ion-Target (SCRIT) 法<sup>4)</sup>である。この手法は電子蓄積リングではよく知られたイオントラッピング、すなわち電子ビームの周りに残留ガスの陽イオンが集まってくる現象を利用する。その残留ガスを不安定核に置き換えることで、電子ビーム周りにトラップされた不安定核を静止標的とすることができる。その原理を図1に簡単な模式図で示した。SCRIT電極は3つの電極で構成され、電子ビーム軸方向に井戸型ポテンシャルが形成される。電子ビーム軸に対し横方向は、周回電子ビームがイオンを引き付けるので、イオンはあたかもポテンシャルの底にあるかのように運動する。その結果、イオンが電子ビームの周りに三次元的にトラップされることとなり、電子ビームの軌道を微調整をすることなく、イオンと電子ビームが衝突、つまり電子散乱が自動的に起きる。

SCRIT法を実証すべく、2004年から京都大学化学研究所の電子蓄積リングにて様々な開発を行い、2008年に実証実験に成功した<sup>5,6)</sup>。この結果をふまえて2009年から理化学研究所仁科加速器科学研究センターRIビームファクトリー(RIBF)にSCRIT電子散乱施設<sup>7,8)</sup>が建設され、不安定核を用いた電子散乱実験に向けた開発が開始された。2016年には、コミッション実験<sup>9)</sup>にて新施設でのSCRIT法を実証すると同時に、安定な<sup>132</sup>Xe原子核の電荷密度分布の初測定に成功した。

次節からSCRIT電子散乱施設の紹介と今回のオンライン生成不安定核を使った電子散乱実験について述べる。

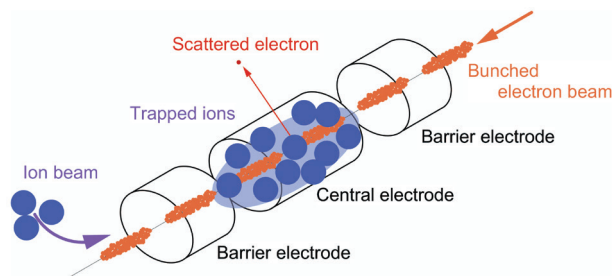


図1 SCRIT原理の模式図

## 2 SCRIT 電子散乱施設及び測定手法

SCRIT電子散乱施設はRIBF内E21室に設置され、主装置として、電子加速器 Race Track Microtron (RTM) と電子蓄積リング SCRIT- equipped RIKEN Storage Ring (SR2) で構成されている。加えて、不安定核を生成するための Isotope Online Separator (ISOL) 施設 の Electron-beam- driven Radioactive isotope separator for SCRIT (ERIS)<sup>10)</sup> と、クーラーバンチャーの Fringing-RF-field-Activated dc-to-pulse Converter (FRAC)<sup>11)</sup> が設置されている。SR2直線部の真空チャンバー内にはSCRIT装置がインストールされており、その脇にはBe窓を介して散乱電子測定用スペクトロメータ Window-frame spectrometer for electron scattering (WiSES) が設置されている(図2参照)。実験は、まずRTMを使って電子ビームを150 MeVまで加速し、SR2に入射、蓄積するところから始まる。蓄積電流が200~300 mA程度に到達した後、電子ビームの入射先をERISに切り替え、イオン源内ウラン標的に照射する。ERISは理研で本格的に整備された初めてのISOL施設であり、電子ビームによるウランの光核分裂反応を用いた不安定核生成を行っている。生成標的は、筆者ら自身で作成した厚さ0.8 mm、直径18 mmの炭化ウラン円盤を数十枚重ねたものである。実験中は約2000℃に熱せられ、生成された不安定核は熱拡散によって標的から抜けてくる。そして、不安定核はイオン化室に導かれ、元素に応じたイオン化方式でイオン化後、不安定核ビームとして供給される。質量分析後にFRACに入射されるが、この時ERISでもイオン蓄積を行い、ERISとFRACのイオン蓄積を同期させることで、高効率のパルスビーム変換が行われる。つまり、FRAC内に入射されたイオンが冷却される間(数十ms) ERIS内でイオンを蓄積する。冷却されたイオンがFRACから逃げ出さなくなった後、FRAC内のイオンを保持しつつERISで蓄積されたイオンを新たに注ぎ足し、一連の動作を繰り返すことで、最終的に大強度パルスビームとしてSCRIT装置に供給する(図3参照)。

SCRIT装置はSCRIT電極とモニターシステムで構成されている。SCRIT電極はメイン電極(Central electrode)と2つのバリア電極で構成されており、より滑らかなポテンシャルを形成するために、バリ

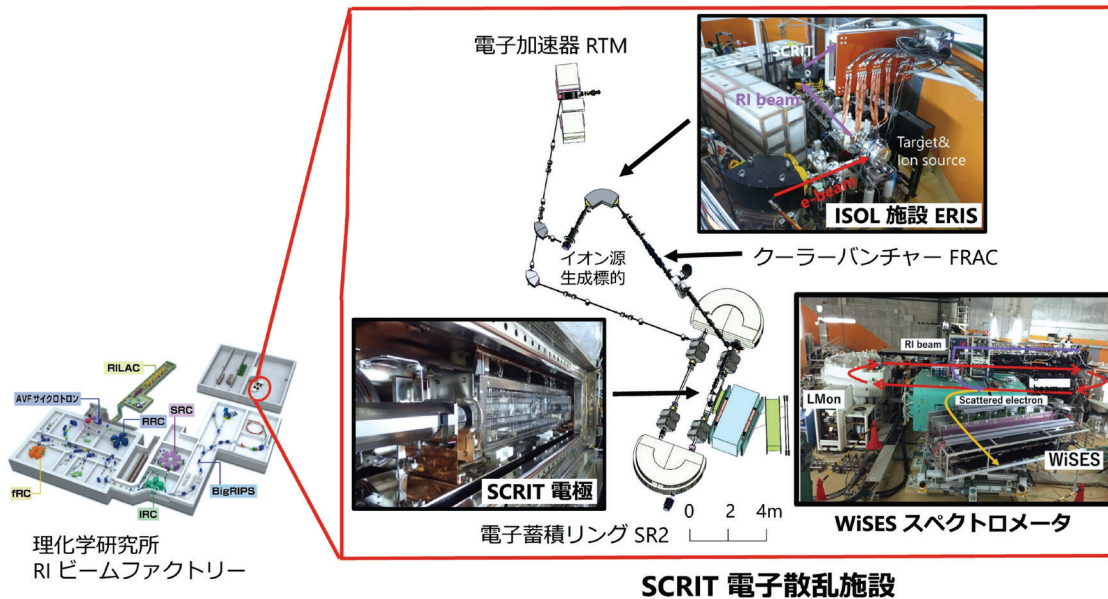


図2 SCRIT 電子散乱施設の模式図

SCRIT 電子散乱施設は理化学研究所 RI ビームファクトリー内にあるものの、独立に運転している

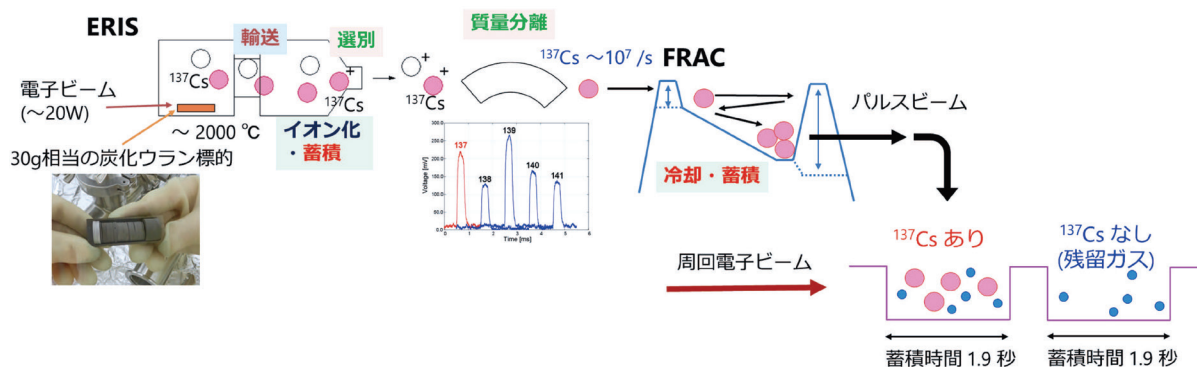


図3 実験のスキーム

ERIS 内で生成した不安定核を FRAC で蓄積し、パルスビームとして、SCRIT 装置に入射する。測定は不安定核有りとなしの条件を繰り返して行う

ア電極はメイン電極内に組み込まれている。蓄積リング内は、周回電子ビームのハロー成分や制動放射等による二次電子や X 線が多く発生しており、SCRIT 電極と衝突してバックグラウンドを発生させる。そのため、SCRIT の各電極はメッシュ構造を基本として物質量を減らし、散乱電子が通過する部分についてはメッシュを張らない構造とした。様々な R&D を通じて、この電極構造に至るまでには都合 6 回ほど電極を作り直し、バックグラウンドや電子ビームの不安定性の影響の軽減に努めた。トラップ後の不安定核は総電荷モニターと電場×磁場速度フィルターによる荷電状態モニターに導かれ、トラップ効率や荷電状態等のトラップ時間依存や電子ビーム蓄積電流依存性を調べた。そうして分かっ

た特性の 1 つに荷電状態の制限がある。トラップ時間が長くなるにつれ、電子ビームによるトラップイオンの多価化が進むが、ある価数を超えるとトラップできなくなるのが明らかになった。これは、同じ電子ビームを使ったトラップ技術である EBIT<sup>12)</sup> とは違う特性であり、周回電子ビームがバンチ構造を持つことと、ペータロン振動等の電子ビーム自身の不安定性に起因する。また、入射したイオンの内、約 10% 程度が電子散乱に寄与することが判明した。この値はイオンの入射時初期空間分布やトラップ中の荷電状態ごとの SCRIT 内空間分布等に大きく依存する。よって、更なる効率向上のためには SCRIT 装置内部のイオン運動の理解が重要になる。今後、新しいモニターシステムを導入し、SCRIT 内トラッ

パイオンの状態をより詳細に調べていく予定である。

SCRIT 電極内にトラップされた不安定核は、静止標的として働き、周回電子ビームと散乱を起こす。散乱した電子は Be 窓を通過後、WiSES によって運動量分析される。WiSES は、SCRIT の 50 cm に及ぶ標的長さや広い散乱角度範囲 (30~60 度) に対応しており、大きい立体角 (80 msr) を有している。WiSES 内は He ガスで満たされ、その前後に設置されたドリフトチェンバーで、散乱電子の軌道を再構成し、散乱角度と運動量を精度良く求めることができる。運動量分解能としては、 $\Delta P/P \sim 10^{-3}$  (電子エネルギー 300 MeV) を達成している。

測定は、チェンバー内に存在する残留ガスからの寄与を差し引くために、不安定核イオンを入射しない状態での測定も同じトラップ時間で行う (図 3 参照)。この時の、不安定核イオンの有り・無しにおける制動放射の X 線個数の差からルミノシティを導出する。そのために、SCRIT 装置の直線下流約 7 m のところに、CsI 検出器を用いたモニターシステムが設置されている。

### 3 世界初のオンライン生成不安定核電子散乱実験

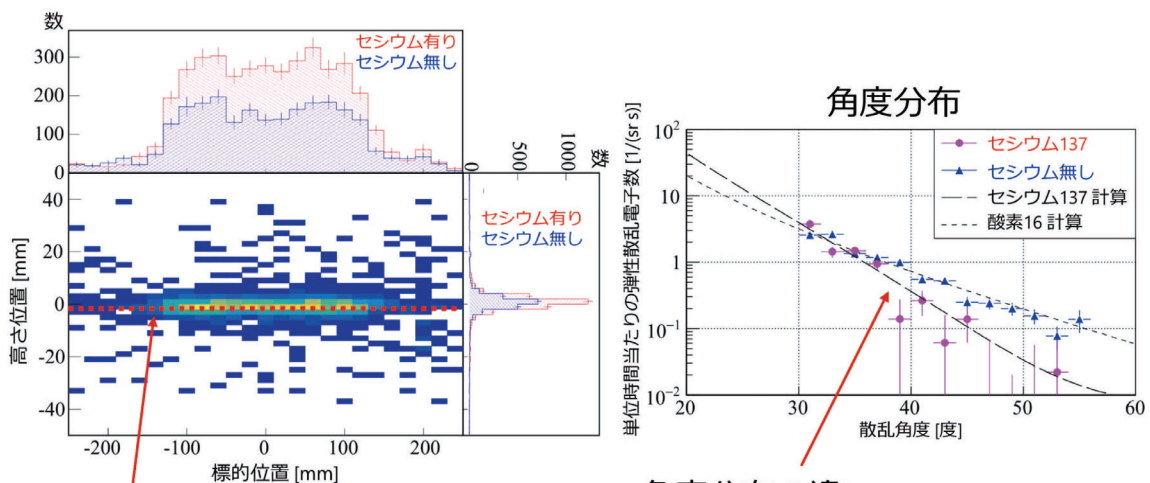
2021 年の冬から 2022 年の春にかけて、世界初のオンライン生成不安定核を用いた電子散乱実験が行われた。今回の実験では、不安定核標的として  $^{137}\text{Cs}$  が選ばれた。理由としては、 $^{137}\text{Cs}$  の生成効率とイオ

ン化効率が高く、現状の RTM のパワー (~20 W) でも測定に必要な量 (~ $10^7$  個/pulse) のイオンビームを供給できること、更に、 $^{137}\text{Cs}$  の寿命が長いこと、測定中の標的の崩壊を考慮しなくても良いことが挙げられる。

実験では、43 枚に及ぶ炭化ウラン標的 (ウラン総量約 30 g) に平均 15 W の電子ビームを照射し、表面イオン化イオン源を用いて  $^{137}\text{Cs}$  イオンビームを供給した。主な不純物である  $^{137}\text{Ba}$  の量については、実験で得られた Cs と Ba の同位体依存性を、他施設での測定結果<sup>13)</sup>と比較し、筆者らの実験では、 $^{137}\text{Ba}$  の量が、 $^{137}\text{Cs}$  の 0.5% 以下であることを確認した。最終的に、ERIS 40 Hz、FRAC 0.25 Hz の条件で運転し、 $4 \times 10^7$  個/pulse のパルスビームを SCRIT 装置に供給した。

測定は不安定核標的有り・無しの測定をそれぞれ約 2 秒ずつ行い、その 4 秒を 1 サイクルとして行った (図 3 参照)。150 MeV、約 250 mA の周回電子ビームと約  $10^7$  個の SCRIT 標的により、ルミノシティは約  $10^{26} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$  になり、その条件で合計 3 日間の測定を行った。

解析では散乱された電子の軌道を再構築し、散乱位置と角度及び運動量を詳細に求めた。図 4 左は、散乱地点分布を示したもので、電子ビームの周囲にトラップした不安定核からの散乱であることを示している。残留ガスからの寄与を考慮し、得られた  $^{137}\text{Cs}$  と残留ガスからの弾性散乱事象角度分布を図 4 右に示した。 $^{137}\text{Cs}$  と残留ガスの角度分布の明



角度分布の違い  
= $^{137}\text{Cs}$  から散乱された証拠

図 4  $^{137}\text{Cs}$  電子散乱実験の結果

確な違いが、 $^{137}\text{Cs}$ からの散乱電子であることの証拠である。

## 4 今後について

研究グループは次のマイルストーンとして、 $^{132}\text{Sn}$ の電子弾性散乱実験を目指している。 $^{132}\text{Sn}$ は陽子、中性子共に魔法数 ( $Z=50, N=82$ ) の二重魔法核であり、原子核構造研究において、シンボリックな不安定核として知られている。したがって、この原子核の電荷分布は様々な研究における基礎的な物理量として待望されている。実現に向けては、電子加速器のパワーを現状の 20 W から 2 kW 近くに増強する計画が進められている。同時に ISOL 施設も大強度ビームへの対応が進められている。また、高効率の安定したトラップに向けた、SCRIT 中のイオンダイナミクスの研究や蓄積電子ビームの安定化に向けた開発も並行して進められている。

今回のオンライン生成不安定核の電子散乱の成功により、本格的な不安定核電子散乱実験の幕が開いた。加えて、不安定核の静止標的の作成にも成功したと言える。これにより安定核で用いられている精密研究の手法を不安定核研究に適応することができ、更なる研究の広がりが期待できる。

最後に、本研究は多くの方々の御尽力によって、今回の成果にたどり着くことができた。ここで、厚

く御礼を申し上げたい。SCRIT 法による電子散乱は、当初思い描いていた成果にはまだ届いていないが、研究グループ一同、より一層精進していく所存である。引続きの御支援をいただけたら幸いである。

## 参考文献

- 1) K. Tsukada, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **131**, 092502 (2023)
- 2) T. Suda, *et al.*, *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **96**, 1-31 (2017)
- 3) A. N. Antonov, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A*, **637**, 60-76 (2011)
- 4) M. Wakasugi, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A*, **532**, 216-223 (2004)
- 5) M. Wakasugi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 164801 (2008)
- 6) T. Suda, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 102501 (2009)
- 7) M. Wakasugi, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, **317**, 668-673 (2013)
- 8) T. Onishi, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, **541**, 380-384 (2023)
- 9) K. Tsukada, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 262501 (2017)
- 10) T. Ohnishi, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, **317**, 357-360 (2013)
- 11) M. Wakasugi, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 095107 (2018)
- 12) M. A. Levine, *et al.*, *Phys. Scr.*, **T22**, 157 (1988)
- 13) S. Essabaet, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B.*, **317**, 218-222 (2013)

(理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 実験装置開発部)