

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20526

研究課題名（和文）稀少不安定原子核反応研究のための静止不安定核標的の開発

研究課題名（英文）Development of fixed unstable nuclear targets for nuclear reaction studies of rare radioactive nuclides

研究代表者

若杉 昌徳（Wakasugi, Masanori）

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：70250107

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、不安定核(RI)同士の核反応研究と準運動学による精密なRI反応研究の実現を目指して、汎用的で実用的なRI静止標的を開発することを目的とする。本標的を蓄積リングに挿入することで、全人未踏のRI同士の衝突実験を可能にして新しい研究領域を拓くとともに、準運動学を用いた研究の実現は、圧倒的な高分解能でのRI核反応実験を可能にする。本研究では、生成量の少ないRIを効率よく標的とするために、電子ビームイオントラップの原理を用いたプロトタイプを開発した。さらに、実践的に利用可能な標的とするために、標的の純度向上に着目して宿命的に共存する残留ガスイオンの排除方法を新たに開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不安定原子核(RI)は、原子核研究のみならず天文、宇宙、医学、薬学など、幅広い分野における重要な研究対象である。しかし加速器を用いたRIは、生成量が限られている上に有限な寿命で壊変してしまうため、精密な構造や性質の研究は容易ではない。また学術的に非常に重要なRI（例えば安定の島同位体など）の多くは安定核を用いた反応では決して生成できない。本研究での汎用型RI静止標的に開発はこれらの課題を解決する必要な手段である。大強度プローブビームを用いた準運動学による精密RI核反応研究を可能にし、RI同士の核反応による未到のRI生成を可能にすることが期待させる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop a versatile and practical RI stationary target to realize nuclear reaction studies between unstable nuclei (RIs) and precise RI reaction studies using normal kinematics. Insertion of this target into the storage ring will open up a new research area by enabling collision experiments between RIs, which are unexplored by all, and the realization of research using normal kinematics will enable RI nuclear reaction experiments with an overwhelmingly high resolution. In this study, a prototype based on the electron beam ion trap principle was developed to efficiently target RIs with low production rate. Furthermore, in order to make the target practically usable, a new method for eliminating fatally coexisting residual gas ions was developed with a focus on improving the purity of the target.

研究分野：不安定核物理

キーワード：不安定核標的 電子ビームイオントラップ 精密核反応

1. 研究開始当初の背景

(1) 不安定核反応研究における精密化の要請

近年の不安定核(RI)反応研究の多くは、RIを標的とする技術が無いため本来プローブとなる安定核を標的とした逆運動学による研究が行われている。例えば個体水素を標的とした(陽子+RI)反応は、核子分布、励起構造、反応プロセスなど、不安定原子核に関する多くの情報を提供する。逆運動学反応における大きな問題は、通常の準運動学反応に比較して圧倒的な分解能の不足である。入射核破碎反応や飛行核分裂反応で生成されるRIビームは、エネルギー幅が広く、エミッタンスも大きい上に標的中のエネルギー拡散も無視できない。半世紀に渡る不安定核研究の進展につれて、実験データの精密化と高精度化が要求される時代となってきたが、現状のままではそれに応えられない。理想的には、静止したRI標的に単色性が高く低エミッタンスの良質なプローブビームを衝突させる仕組みが待望されている。

(2) RI核反応研究の効率化の要請

高エネルギーRIビームは上記のように質的に劣る上に生成量も小さい。核反応実験においては、薄い標的と衝突してもその多くは反応しないまま通過してそのまま捨てられてしまう。この大きな無駄を解消する有望な手法が、重イオン蓄積リングを利用するビームリサイクルである。ビームリサイクルでは、内部標的を挿入した蓄積リングにRIビームを蓄積して、たとえ標的をすり抜けても周回して再び標的に入射する。これを繰り返し核反応が起きるまで回し続ける。京大化研、理化学研究所、および放医研の共同研究としてビームリサイクル技術開発に取り組んでいる。京大化研が所有する重イオン蓄積リング(sLSR)を理研仁科センターへ移設してR&D研究を実施するため、Recycled-Unstable-Nuclear Beam Accumulator (RUNBA)として再建している。この研究において、入射、加速システム、ビーム冷却、フィードバックシステムなどの開発要素は多々ある中で、RI内部標的は最も重要な要素であり先ず取り組むべきキーアイテムである。

(3) RI静止標的形成技術の開発状況

RI静止標的を作る研究を始め実用化したのは我々が世界で最初である。その実績として理研仁科センターにSelf-Confining RI Ion Target (SCRIT)を搭載した電子蓄積リングを用いたRI電子散乱実験施設を世界に先駆けて建設した。この施設はすでに稼働しており、RIの電荷密度分布を正確に決定するための電子弾性散乱実験を進めている。静止RI標的に電子ビームという高品質で大強度のプローブを衝突させる仕組みである。SCRITというRI標的では、電子蓄積リングを周回する200~300mAの電子ビームによる収束力を利用して標的RIイオンをビーム軸上の狭い領域に効率よくトラップする。衝突する電子ビーム自身が標的イオンを捕獲しているので、衝突確率が高い。直径数百 μm の狭い領域に標的を集中させているので、 10^7 個という僅かな標的イオンで $10^9\sim 10^{10}/\text{cm}^2$ の標的厚を実現した革新的RI標的技術である。しかし、この技術は電子蓄積リングに特化したものであり、この原理によるRI静止標的の汎用化が求められている。

2. 研究の目的

(1) 新しい核反応研究領域の開拓

重イオン蓄積リングを用いたRI同士の核反応研究の実現のため、蓄積リングに挿入するRI内部標的を開発することが本研究の目的である。RIを蓄積リングの内部標的とする技術の確立は、世界で初めてRI同士の衝突実験を可能にし、圧倒的な高分解能での核反応実験、RI-RI融合や多核子移行反応によって安定核では決して望めないRIの合成など、新しい研究領域を拓く。例えば ^{132}Sn 同士の衝突による「状態方程式」の研究、 $^{244}\text{Pu}+^{57}\text{Ca}$ 融合反応による「安定の島」への挑戦、 $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Be})^4\text{n}$ を拡張した中性子ドリップラインより外側のRI生成、安定核を用いた反応では合成できない超中性子過剰核の生成など、本研究は今後不安定核科学が挑戦して行く多くの研究領域を開拓する原動力となる。

(2) 稀少RIの核反応研究の精密化

核反応研究の精密化は、統計量と分解能がキーとなる。非効率な現状での核反応研究の問題を解決するための蓄積リングを用いたビームリサイクルでは、標的を何度も通過させるために生じるエネルギー分散とエミッタンス拡大を防ぐ必要がある。このためビームの運動を補正する仕組みが必要である。我々が考案した手法は、内部標的としてアクティブ標的を用いて、RIイオンが通過した位置とタイミング情報を標的から取り出し、それを基に周回中のビームに個別に適切な高速の補正を加える手法である。この手法の確立のため、本研究の中でビーム情報を取り出せるアクティブ標的を開発する。

(3) RI 核反応研究の精密化のための汎用型 RI 標的の開発

RI 静止標的として蓄積リングに挿入する内部標的に留まらず、これを可搬で汎用的にする。これまでの RI 核反応研究に革新をもたらす汎用型の高純度 RI 静止標的の開発によって準運動学による精密核反応研究を可能にする。物理学上の重要課題に答えるための RI 研究は精密で定量的議論に耐える測定が求められる。現状唯一の方法である低品質の RI ビームを使った逆運動学による、原子核同士のクーロン衝突法ではその域には達しない。RI 静止標的の実装は、高品質で大強度なプローブビームを用いた順運動学による RI 核反応研究は精密化のための唯一の方法である。

3. 研究の方法

(1) EBIT 原理の汎用型 RI トラップ標的

我々が開発した SCRIT というトラップした RI イオンを標的とする技術を基にして、汎用的でトラップ力がさらに強い RI 静止標的を開発する手段として、Electron-Beam Ion Trap (EBIT) の原理を採用する。ソレノイド磁場の中で、細く絞った数十 keV の DC 電子ビームを走らせ発生する強い収束ポテンシャル中にイオンを線状に蓄積する。これにより RI のように少ないイオン数でも軸方向から見れば厚い標的となる。本研究では既存のソレノイド電磁石を利用して、イオンを軸方向にトラップするためのポテンシャルを形成する。ポテンシャル形状を任意に整形できるように工夫した電極を制作して、トラップイオンが標的として機能するための最適化を行う。また、標的として重要な性質は純度である。EBIT 型トラップでは宿命的に残留ガスイオンが共存してしまうことで純度が低下する難点がある。これを克服するためにトラップ内から残留ガスのみを排除し、標的イオンを残すという技術開発を実施する。

(2) ビームリサイクル技術のためのアクティブ内部標的

アクティブ標的は、蓄積リング内でのビームリサイクルの原理を実証するための開発であり、稀少 RI の効率的な精密核反応研究を可能にする。そこで本研究において、標的として薄膜を用いて、周回する RI イオンビームの通過位置とタイミング情報を取り出すことのできる内部標的のプロトタイプを制作する。薄膜通過に伴って発生する二次電子を適切な電磁場構造を与えて位置と時間情報を失わないように検出機へ輸送する仕組みを制作する。その信号を元に速いフィードバックのための補正信号形成の仕組みを試作する。

4. 研究成果

(1) EBIT 型汎用型 RI トラップ標的の試作

図1は本研究で制作した汎用型静止標的のプロトタイプである。ソレノイド磁場の環境下でイオンをトラップするための大強度連続電子ビームを安定して供給するための要素である電子銃、真空チャンバー、真空内構造物、およびビームモニター装置等を製作し、イオントラップポテンシャルを与える電極システムを実装した。数十 keV の連続電子ビームを用いた EBIS 型イオン蓄積装置を開発制作した。直径 100 μm 程度の電子ビームを、縦方向井戸型ポテンシャルを形成する電極を通し、その中に重イオンをトラップし、高密度イオン標的とする。これによりイオントラップ試験を実施し、残留ガスをイオン化してトラップすることに成功している。本システムを用いて得られた電子ビーム電流は 20 mA で、トラップしたイオン数は約 10^8 個であった。またトラップイオンを取り出し、価数分布等を評価するための偏向電磁石を用いた分析ビームラインを構築し、その価数分布の測定にも成功している。

新規の縦方向イオン運動のマイクロ

波共振を利用して残留ガスイオンを排除する仕組みを開発した。トラップ領域を定義する電極によって発生するイオンをトラップする縦方向ポテンシャルを二次関数的に整形することで、イオンの軸方向運動を調和振動とすることができる。これによって各イオンの振動数は質量電

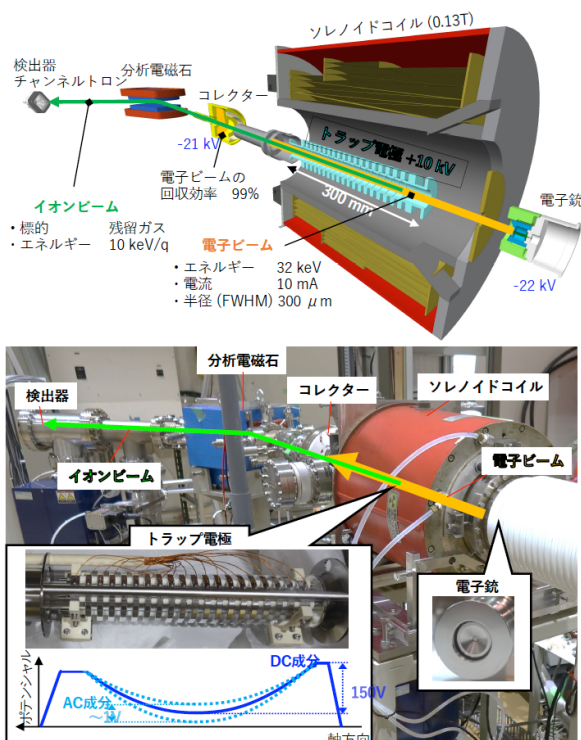


図 1. 本研究で制作した RI 静止標的のプロトタイプ

荷比に比例する。この性質を利用してポテンシャルを特定の振動数で振動させることで特定のイオン運動を共鳴的に増幅させると、やがてポテンシャルの壁を超えてトラップ領域から排除させることになる。図2はこの原理を実証したデータである。図は、多くのイオン種がトラップされている中で、73kHzでポテンシャルを振動させることで、 C^{4+} のみを取り出せていることを示している。トラップ領域の真空度を向上させるために、念入りのベーキング処置を行うことで、残留ガスイオン種をH, C, Oに限定することが可能である。したがってこれらのイオンに共鳴する振動数でポテンシャルを揺さぶることで残留ガスを排除する目処がたった。すなわちRI標的の純度を向上させることが可能であることを実証した。

(2) ビームリサイクルのためのアクティブ標的の試作

ビームリサイクル技術に必要なリング内における運動補正のための信号をビームの標的通過によって発生させる薄膜を用いたアクティブ標的のプロトタイプを試作した。これを図3に示す。ビームが標的通過時に生じるエネルギー分散と角度分散は、ビームをリング周回軌道から逸脱させる。これを補償するため、ビームが通過したタイミングと位置情報を標的から取り出すことに成功した。一様磁場中に設置し薄膜標的をビームが通過した瞬間に発生する二次電子に電場を掛け加速し、磁場による偏向によって隣接して設置したMCP検出機に入射する仕組みである。MCPで増幅された出力電子は自作の遅延ライン電極によって検出されMCPに打ち込まれた時刻からの信号の遅れによって位置情報を読み取る仕組みである。図3下に示すように、まだ不完全なところもあるが、薄膜標的の前に置いたピンホールを規則的に空けたマスクイメージをMCP上で観測することができている。本研究ではこの試作機によって、タイミング信号と位置信号が利用可能であることが実証された。またこれらの信号が加工、増幅、伝送される時間を計測した結果、標的通過から200ns以内で補正信号が補償装置に到達できることがわかった。これは、ビームが標的から補償装置まで輸送される約300nsに比べ十分速いので、その信号を用いた個別的な運動補正が可能であることが実証された。

(3) 今後の発展

高純度RI静止標的の制作、ビームリサイクルのための内部標的のプロトタイプの制作によって基本的な特性が実践的に利用可能であることが実証できた。これを基に次のステップとして標的イオンの外部入射システムを製作して接続するとともに、現在制作を進めている化研電子加速器を用いたRI生成システムを接続する。また、RI静止標的は、蓄積リングに挿入するためにEBITのための電子銃とその輸送系を改良して垂直入射型とする。これらの改良により実践的装置として利用可能なシステムに仕上げてゆく予定である。

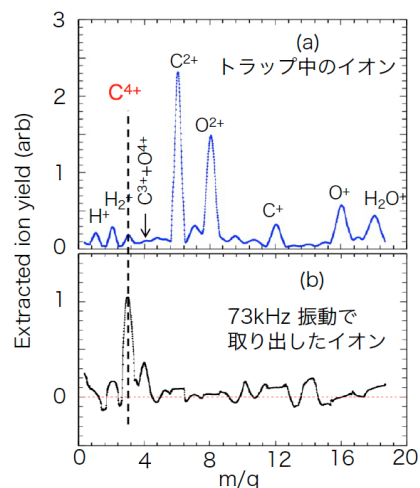


図 2. 残留ガスを排除する共鳴型イオン取り出しの実証

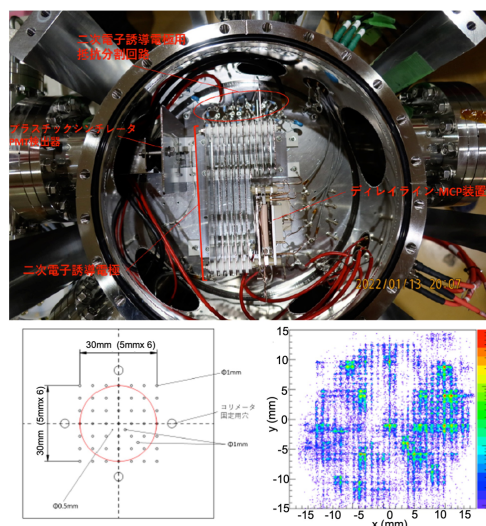


図 3. 試作したアクティブ標的システム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 若杉 昌徳
2. 発表標題 蓄積リングによる不安定核研究
3. 学会等名 日本物理学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木 周
2. 発表標題 共鳴取出型チャージブリーダー原理実証機開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川原 亮
2. 発表標題 RI-RI反応実験を目的としたビームリサイクル技術開発用蓄積リング(RUNBA)の動作原理
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木周、小川原亮、久世啓太、栗山靖敏、塚田暁、頓宮拓、若杉昌徳
2. 発表標題 共鳴取り出し型チャージブリーダーの原理実証機開発と現状
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究に掛かる開発研究に関する報告として、京都大学・理学研究科・物理学宇宙物理学専攻・物理学第二分野における修士論文3編を下記に示す。
令和2年度：高木 周：「共鳴取出し型チャージブリーダーの原理実証機開発と性能評価」
令和3年度：久世 啓太：「重イオン蓄積リングにおけるビームリサイクリングのための内部アクティブ標的の開発」
令和4年度：前原 義樹：「RUNBAにおけるビームダイナミックスの研究と補償装置ADC・EDCの開発」
本研究に掛かる技術開発について、RUNBA実験に向けた要素技術開発として下記URLで紹介している
<https://pbs.kuicr.kyoto-u.ac.jp/research-fields-ja/element-technology-development-ja>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小川原 亮 (Ogawara Ryo) (00807729)	京都大学・化学研究所・助教 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------