

## 素粒子原子核研究所活動報告(1) 和光原子核科学センター 2024年12月3日

和光原子核科学センター(WNSC)は、天然には存在しない短寿命の原子核を人工的に合成し、宇宙における重元素合成過程の解明を目指した実験研究や、全原子核領域にわたる網羅的質量測定を推進している。理研 RIBF 施設内に設置した元素選択型質量分離装置 KISS(KEK Isotope Separation System)は、原子核同士の多核子移行反応により合成される短寿命核をビームとして供給する共同利用施設として運営されており、合成された短寿命核の核分光実験を実施している。KISS では現在その高度化を目指した KISS-1.5 計画を推進しており、実験室の整備、ドーナツ型ヘリウムガスセルの開発、ビームラインのデザインなどを進めている。また、KISS および RIBF 施設の他の装置(GARIS-II、BigRIPS-SLOWRI)において、様々な原子核反応により合成された短寿命核に対して多重反射型飛行時間測定式(MRTOF)質量分光器による精密質量測定を実施している。

### (1) 新規開発した大型ドーナツ型ヘリウムガスセルによる精密質量測定

KISS では多核子移行反応を用いることで、これまで生成困難であった中性子数  $N = 126$  周辺やウラン周辺の中性子過剰な短寿命核を効率良く生成し、ガスセル内に捕集してイオンビームを生成し、核分光実験を実施してきた。この研究を更に発展させ、多くの短寿命核について実験を行うために、大強度の重イオンビーム  $^{136}\text{Xe}/^{238}\text{U}$  を利用可能な大型ドーナツ型ヘリウムガスセル (DSHeGC、図 1(a)参照) を開発している。ヘリウムの第一イオン化ポテンシャルは他元素に比べて非常に大きいので、重元素の短寿命核は中性化せずにイオンとして生き残ることができる。そのため様々な元素の質量数の異なる短寿命核(原子核の種類としては 100 種類以上) を同時にイオンビームとして利用可能となる。ガスセル内の短寿

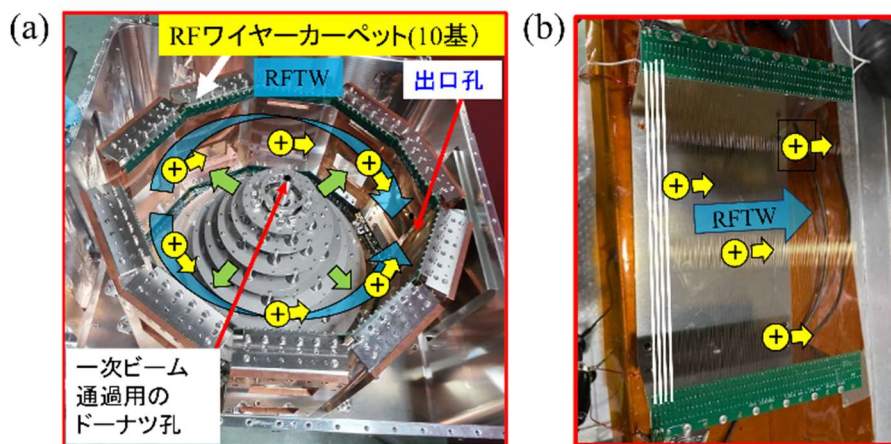


図 1 (a)ドーナツ型ヘリウムガスセル内構造。短寿命核イオン輸送効率を上げるために、一次ビームはガスセル中心にあるドーナツ孔を通過する工夫を施している。(b) RF ワイヤーカーペット。白線に沿って約 200 本のワイヤーが取り付けられており、RF 進行波を印加することでイオンを効率良く輸送可能。

命核イオンの運動は、図 1 (a)に緑矢印で示した DC 電場でガスセル周辺部に円形に配置した 10 基の RF ワイヤーカーペット (図 1 (b)参照) 表面に輸送されて、その後、時計回りと反時計回りの RF 進行波 (青矢印、RF traveling wave: RFTW)で出口孔まで約 0.1 秒で輸送し、これまでの 10 ~100 倍の量の短寿命核イオンビームを生成できる。このガスセルは KISS-1.5 でも短寿命核イオンビーム生成の心臓部として使用される。

この DSHcGC と MRTOF 質量分光器を組み合わせ、短寿命核イオンビーム生成試験を実施した。ガスセルを低温 (120 K) に冷却することで不純物イオン生成を抑制し、RF ワイヤーカーペットで効率良くイオン輸送することで短寿命核イオンビーム生成に成功した。図 2 はイ

オンビームを MRTOF 質量分光器で粒子識別した結果である。これまでに質量が測定されていない  $^{198}\text{Ir}$  と  $^{198}\text{Os}$  を識別できた。この他にも質量が未測定である  $^{197,199}\text{Os}$  も識別できた。次回の実験では統計量を 10 倍以上に増やし、 $10^{-6}$ の精度で質量を決定する。

## (2) MRTOF 質量分光器を用いた $N=Z$ 線近傍陽子過剰核の精密質量測定

MRTOF 質量分光器を用いた不安定原子核の精密質量測定に関わる実験計画の一つとして、I 型 X 線バーストと呼ばれる爆発的天体現象を駆動する速い陽子捕獲過程(rp 過程)の解明を目的とした  $N=Z$ 線近傍、陽子過剰核の精密質量測定実験を推進している。2024 年 7 月に理化学研究所の RIBF 施設、超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS の ZeroDegree スペクトロメーター下流に設置されている MRTOF 質量分光器セットアップ(ZD-MRTOF)を用いた  $N=Z$ 核  $^{84}\text{Mo}$  近傍の陽子過剰核についての精密質量測定実験を行なった。測定対象の陽子過剰核の生成は核子当たり 345 MeV の  $^{124}\text{Xe}$  ビームの核破碎反応によって行ない、同時に生成される不要粒子から BigRIPS によって分離・精製され ZD-MRTOF まで運ばれる。運ばれてきた高エネルギーイオンを ZD-MRTOF の低温ヘリウムガスセルを使用し低エネルギーイオンに変換する。ガスセルから引き出されたイオンは MRTOF 質量分光器の射出トラップまで輸送され、その後 MRTOF 質量分光器において飛行時間スペクトルの測定を行う。

図 3 に今回の実験で測定した飛行時間スペクトルを示す。実験では質量数 88、84、83、79、および 78 の 2 価イオンについて測定を行い、12 種のイオン種を確認した(等しい質量

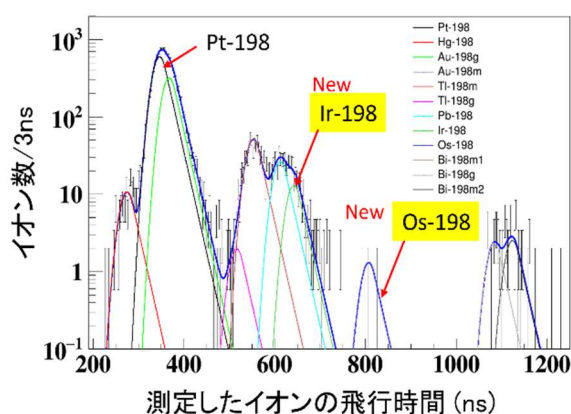


図 2 MRTOF 質量分光器で測定した質量数  $A=198$  を持つ原子核の飛行時間スペクトル。質量が既に精密に測定されている  $^{198}\text{Pt}$  イオンで、飛行時間スペクトルの応答関数を決定し、その他の短寿命核イオンのスペクトルを解析することで系統誤差を低減している。今回の 2 時間程度の測定で、これまでに質量が測定されていない  $^{198}\text{Ir}$  と  $^{198}\text{Os}$  を識別できた。

電荷比を持つ1価イオンを含む)。また目的核の質量の決定には single reference 法を用いた。結果として  $N=Z$  核  $^{88}\text{Ru}$ 、 $^{84}\text{Mo}$ 、および  $^{78}\text{Y}$  の核異性体状態の質量を初めて実験的に決定した。また  $^{83}\text{Nb}$  および  $^{79}\text{Y}$  についてはその質量値の不確かさをそれぞれ 162 keV と 80 keV から 10 keV 程度まで低減した。この実験により rp 過程の終端の一つと考えられている ZrNb サイクルが成立する天体環境をより厳密に決定することが可能となった。

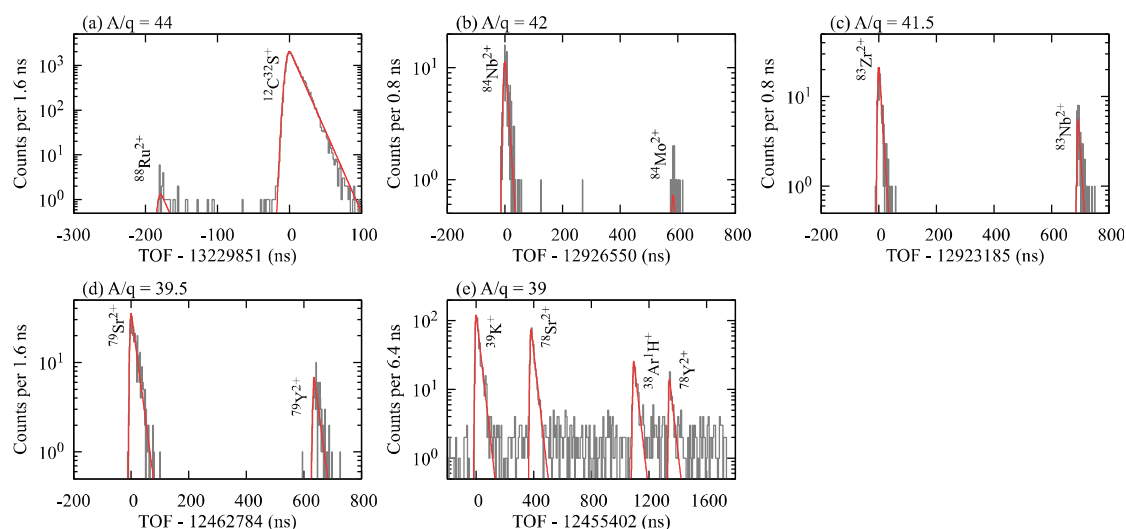


図 3 MRTOF 質量分光器で測定した質量数電荷比  $A/q = 44$  (a),  $42$  (b),  $41.5$  (c),  $39.5$  (d),  $39$  (e) に対する飛行時間スペクトル。

### (3) ドブニウム同位体の精密質量測定

GARIS-II の SHE-Mass 施設では、 $^{257}\text{Db}$  の核異性体の準位と励起エネルギーの決定を目指して MRTOF 質量分光器を用いたドブニウム同位体の精密質量測定実験を継続して実施している。MRTOF 質量分光器のイオン検出器として、検出イオンからのアルファ崩壊を測定する「 $\alpha$ -ToF」検出器を導入することで、精密質量測定の目的の放射性核種の同定精度が高まったが、アルファ粒子のエネルギー分解能が約 200 keV と大きいことが問題となっていた。これは飛行時間検出器内のツェナーダイオード・アレイのノイズによるものであった。飛行時間検出器が粒子を検出した際に高電圧バイアスを 10 秒間オフにする高電圧シャットダウン・システム回路を新たに開発して導入することでアルファ粒子測定時のツェナーダイオード・アレイからのノイズを除去した。これにより、アルファ粒子のエ

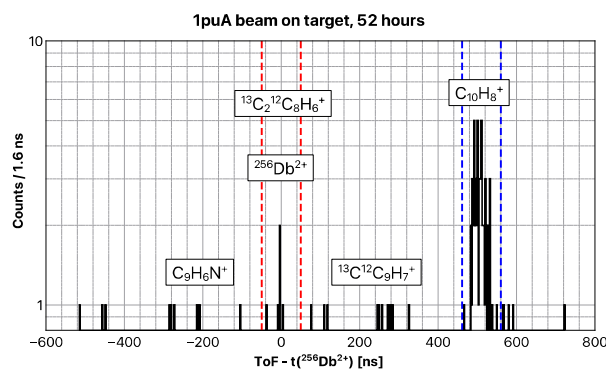


図 4 MRTOF 質量分光器で測定した  $^{256}\text{Db}$  の飛行時間スペクトル。6 事象の  $^{256}\text{Db}$  が観測された。

エネルギー分解能が劇的に向上して 20 keV 以下とすることができ、観測されたイオンの原子核のエネルギー状態を識別することが可能となった。

2024 年 7 月に実施したビーム照射実験において 12 事象の  $^{257}\text{Db}$  と 6 事象の  $^{256}\text{Db}$  が観測された(図 4)。 $^{256}\text{Db}$  はこの MRTOF 質量分光器で測定された 3 番目のドブニウム同位体であり、初めてその原子質量を実験的に決定した。現在、過去 2 年間に収集した  $^{256-258}\text{Db}$  のすべてのデータを解析しており、近い将来に論文にまとめる予定である。

MRTOF 質量分光器による精密質量測定とアルファ粒子のエネルギー測定により、アルファ崩壊を介した重い原子核からより軽い原子核までの超重元素領域の原子質量に関する知見が得られることで、多数の未知核種の原子質量をより正確に推定できるようになり、超重核の安定性に寄与する核構造の理解が向上すると期待できる。

#### (4) 国際研究会 MNT2024 の開催

2つの原子核の衝突による原子核反応はエネルギーや衝突する原子核の種類によって多彩な様相を示す。核子当たり十数 MeV 以下の重イオン同士の衝突で起こる多核子移行(MNT、Multinucleon Transfer)反応は、天然には存在しない原子核を合成する手法として従来使用されてきた融合反応や核破砕反応では到達できない原子核を合成する手法として近年注目されている。共同利用施設 KISS は MNT 反応で合成した短寿命核をビームとして供給する世界で唯一の施設であり、現在その高度化として KISS-1.5 計画を推進している。現在、世界でも同様の施設の計画や開発が進められており、MNT 反応の研究が実験・理論両面から精力的に行われている。MNT 反応に関する世界的な研究状況を俯瞰し、当反応によって拓かれる新たな研究領域を詳細に検討、議論するために、MNT 反応とその関連分野に焦点を当てた国際研究会「MNT2024 – Exploring the heavy exotic neutron-rich nuclides via multinucleon



図 5 国際研究会 MNT2024 の参加者。



transfer reactions」を7月2日から5日にかけて理化学研究所で開催した。本研究会は素核研和光原子核科学センター、ヨーク大学(イギリス)、理化学研究所仁科加速器科学研究センター、日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターで共催し、国内外から約70名の参加があった。

#### **(5) SSRI-PNS コラボレーションミーティング 2024 の開催**

共同利用施設 KISS の実験課題は毎年12月に開催される RIBF 施設の実験課題審査会において審査される。実験課題審査会に提出される KISS および GARIS、BigRIPS-SLOWRI における停止低速 RI を用いた精密核分光の実験提案を議論するために SSRI-PNS(Stop and Slow RI for Precise Nuclear Spectroscopy)コラボレーションミーティングを事前に開催している。9月4日、5日の2日間に Zoom で SSRI-PNS コラボレーションミーティングをオンライン開催し、両日ともに国内外から40名以上の参加があった。ミーティングでは KISS、SLOWRI、GARIS、MRTOF 質量分光器に関する現状と KISS-1.5 の進捗について報告が行われ、11件のプリプロポーザルと1件の LoI について実験提案者からの説明後、議論を行った。