

短寿命核グループでは爆発的天体における重元素合成過程解明を研究の柱として、おもに理研 RIBF 施設での短寿命な原子核（短寿命核）による実験的研究を進めている。研究基盤は KEK が理研に設置した和光原子核科学センター(WNSC)。ここで元素選択型質量分離装置(KISS)の共同利用および多重反射型飛行時間測定式質量分光器(MRTOF-MS)による原子核の網羅的原子核質量測定プロジェクトを推進している。

2018年度の理化学研究所 RI ビーム実験施設では、KISS や MRTOF-MS による実験(NP1712-RRC40R1, NP1712-RRC41 および NP1712-LINAC31)が、全て年末に予定されている。そのため、本年はこれまでの研究・開発成果の出版、KISS, MRTOF-MS 装置の高度化と実験準備に重点が置かれた。

[I] KISS 高度化：高精度レーザー分光システム開発、低温ガスセル導入、 β 線検出器改良

・高精度レーザー分光システムの開発

原子核構造の実験的研究では、レーザー共鳴イオン化による超微細構造の観測から、原子核の荷電半径の変化率（アイソトープシフト）や核モーメントを調べる手法が威力を発揮する。KISS 実験においても、アルゴンガスセル中で熱化され中性原子化された短寿命同位元素をレーザーでイオン化する手法(In-gas-cell レーザーイオン化法と呼ばれる)で、 ^{199}Pt の基底状態とアイソマー状態、 $^{196-198}\text{Ir}$ 基底状態などのレーザー分光を初めて行い、 $^{195-198}\text{Os}$ (^{6}g)や $^{199-201}\text{Pt}$, $^{196-200}\text{Ir}$, $^{185-187}\text{Ta}$ の崩壊核分光研究とともに、この質量領域における変形自由度の系統的変化に対する先駆的成果を挙げた。

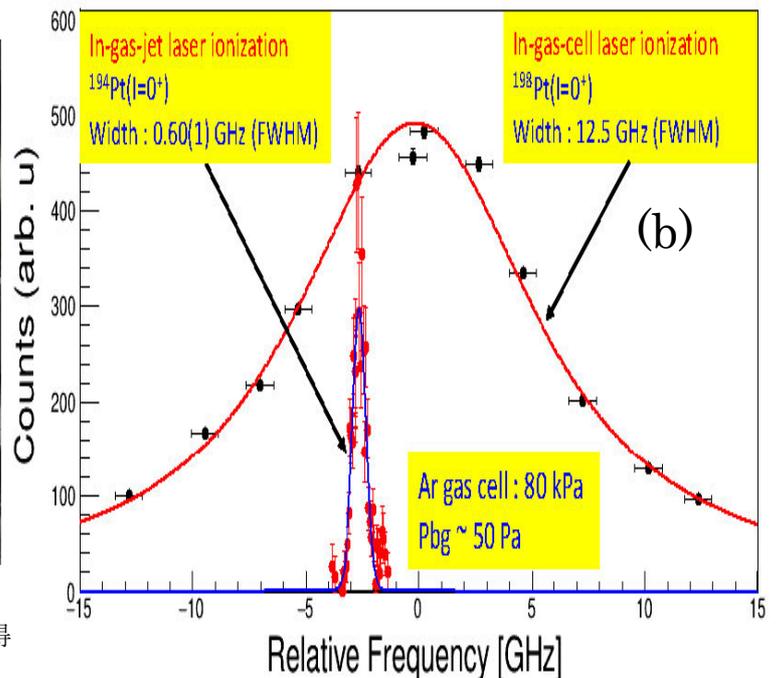
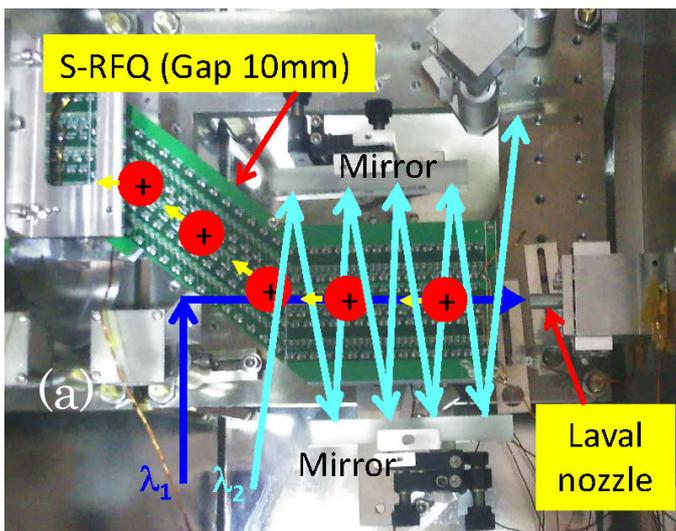


図1 (a) In-gas-jet レーザーイオン化用セットアップ。
(b) In-gas-jet および In-gas-cell イオン化法によって得られた $^{194}, ^{198}\text{Pt}$ の共鳴波長分布。

今後さらに精密な超微細構造観測を行うため、昨年度より In-gas-jet レーザーイオン化法と呼ばれる手法に適したガスセル-レーザーシステムの改造が行われてきた (図1(a))。ガスセル出口に新たに組込まれたラバールノズルから、音速で左方向に吹出したアルゴンガスとともに運ばれる放射性同位元素は、均一速度で低ガス圧のレーザーイオン化領域を通過する。二色のレーザー(λ_1 , λ_2)によって元素選択的にイオン化された同位元素は、S字状のプリント基板間に生成された高周波四重極イオンガイド場に沿って左端に輸送され、差動排気系によって順次高真空化されている空間を質量分析系へと輸送される。イオン速度が均一化されたことなどにより、共鳴波長分布は、従来の In-gas-cell 法に比べ 1/20 程度に狭くなった (図1(b))。高精度化した超微細構造観測手法の確立によって、従来よりも詳細なアイソトープシフト、核磁気モーメント測定が可能となり、核変形度を直接プローブできる電気四重極モーメント測定の可能性も拓けてきた。

・低温ガスセルの導入

現在のドーナツ型アルゴンガスセルからの中性原子引き出し効率は 0.1%程度と小さな効率でとどまっ

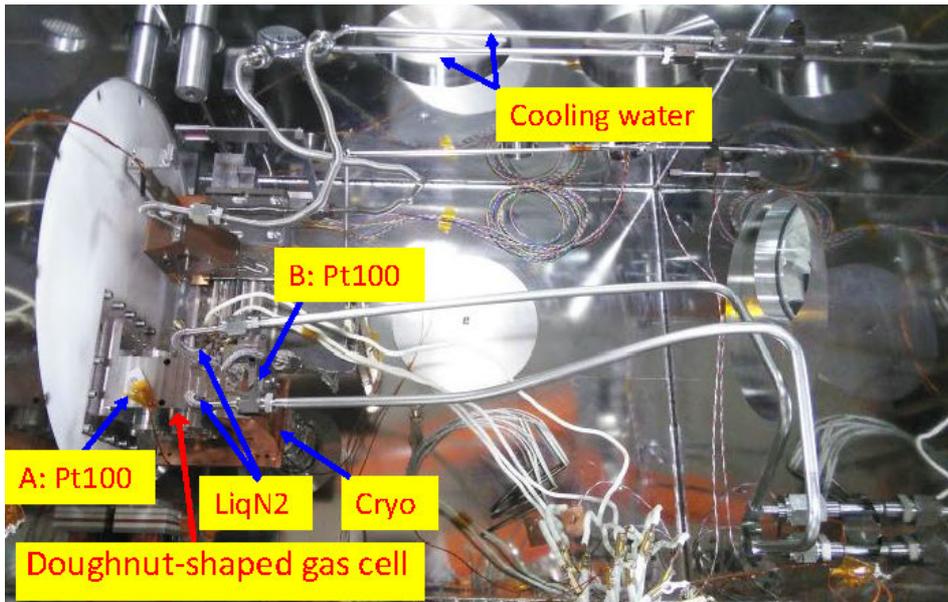


図2 低温アルゴンガスセルのセットアップ写真。左側の白い円盤は、冷却されたドーナツ型ガスセルと真空チェンバー外壁との断熱用テフロン板。0.5気圧のアルゴンガスをフローさせた通常の実験条件で、A, B 両位置で 120 K までの冷却を実現した。

ている。原因としては、熱化した短寿命核中性原子のアルゴンガス内不純物との分子化や、ガスセル内壁への吸着が考えられる。

そこで 100 K 程度の壁面温度となるガスセルでガス中の不純物除去およびガス中での短寿命核中性原子の平均自由移動距離を下げることで、引き出し効率の向上を目指している。仕組みはガスセル外壁に液体窒素の循環用配管をつけ、同時にセル底面からクライオで冷却する(図2)。質量スペクトルから不純物の減少率を調べた上で、年末の実験に用いる予定。

・β線検出器改良

多核子移行反応により生成された希少な放射性同位元素の崩壊核分光を可能とするために開発された、100 keV 以上のβ線を80%の絶対効率で検出する多重セグメント比例計数管(MSPGC)を改良している。各計数管(32本)のアンノド芯線を抵抗線(10μmφ, 3kΩ/cm)に置き換えて、両端の電荷読み出しによって検出位置を特定する。実機よりもさらに一桁低い0.01 cpsのバックグラウンド計数率を目指している(図3)。専用の前置増幅器、主増幅器によって得られた位置分解能は2mm以下となり、条件を満たす性能であることが確認できた。年末の実験に投入する。

[II] MRTOF-MS 高度化：高精度質量校正法、超重核質量測定、α-TOF 検出器開発、IBS 共同研究

・高精度質量校正法の確立

ガス充填型反跳イオン分離器(GARIS-II)焦点面に設置されたMRTOF-MSでは、約80に及ぶ核融合蒸発反応後の残留生成核の高精度質量測定を実現した。図4に測定された原子核の半減期と質量決定精度の相関を代表的質量測定器の結果とともに示している。MRTOF-MSは10msという短寿命な放射性同位体に対しても、ペニングトラップと同等の精度(Δm/m~10⁻⁷)で質量決定ができることを示している。精度及び確度の高い質量測定を可能としている校正手法は、独自に開発したconcomitant法である。この手法では、MRTOF入射部のMulti-trap ion buncher両翼から未知イオンと既知イオンを、各測定ごとに同一条件で入射

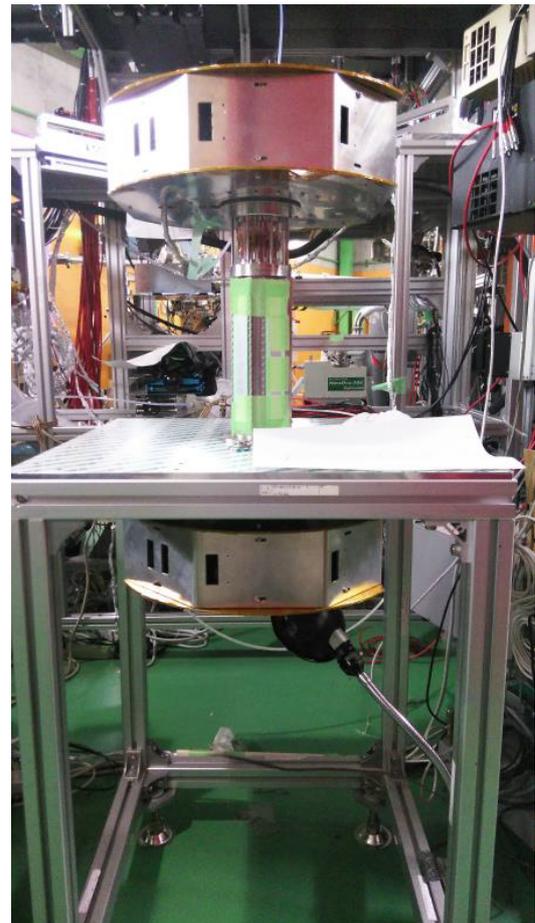


図3 3次元位置感応型多重セグメント比例計数管(3D-MSPGC)。上下のボックスはPre-Amp.収納用。

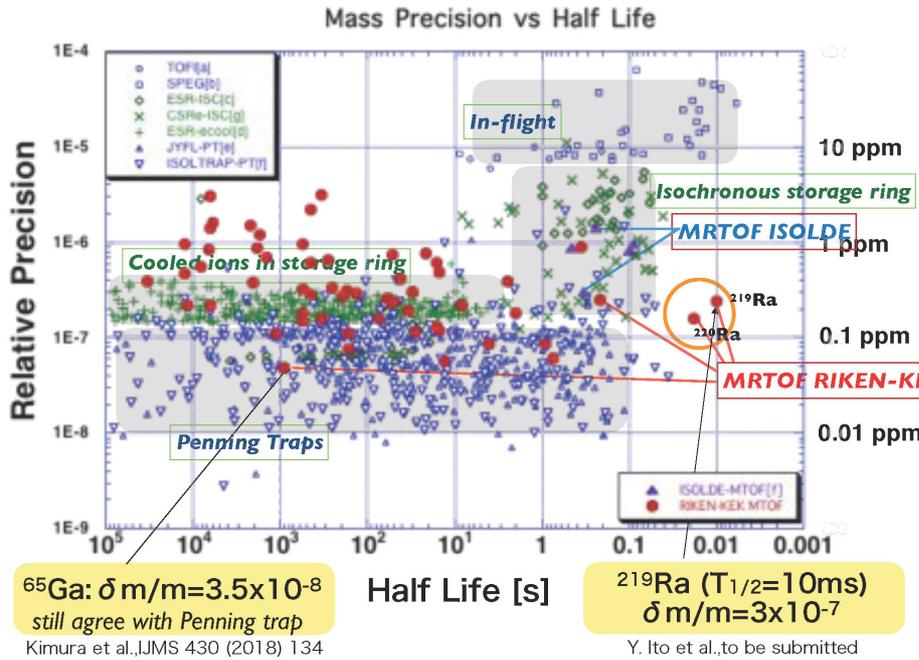


図4 質量測定された原子核の半減期と質量決定精度の相関。Isochronous storage ring, Cooled ions in storage ring, その他の In-flight 型測定器と Penning trap, MRTOF などの trap 型測定器の実績値が示されている。KEK の測定データは赤丸。ペニングトラップの分解能に迫っており、かつペニングトラップでは測定できない短寿命領域の放射性同位元素測定を実現している。

させ、約 10ms の測定周期ごとに既知質量イオンの飛行時間マーカーが測定される。これにより飛行時間の系統的シフトの詳細な補正がなされている。

・超重核質量測定

119 番以降の超重元素探索に向けた GARIS-II の実験室移動に対応して既存の MRTOF-MS も移動・再組立を行った (図 5 (a))。移設に際して、ガスセルと MRTOF 本体間のビーム輸送ライン (~5 m) を廃棄し、2 組から 1 組のイオントラップにイオン輸送系を合理化できたので、輸送効率は画期的に向上 (~10%) するものと期待される。システム全体は、床面に設置した移動用レールに載せてあり、実験課題に応じて簡便に退避できる。

現在、光学系を調整して質量分解能の最適化を行っている。図 5(b) に等時性最適化の様子を示している。¹³³Cs イオンを用いたオフラインの調整で、従来どおりの約 115,000 の質量分解能が得られた。年末の実験に投入する。

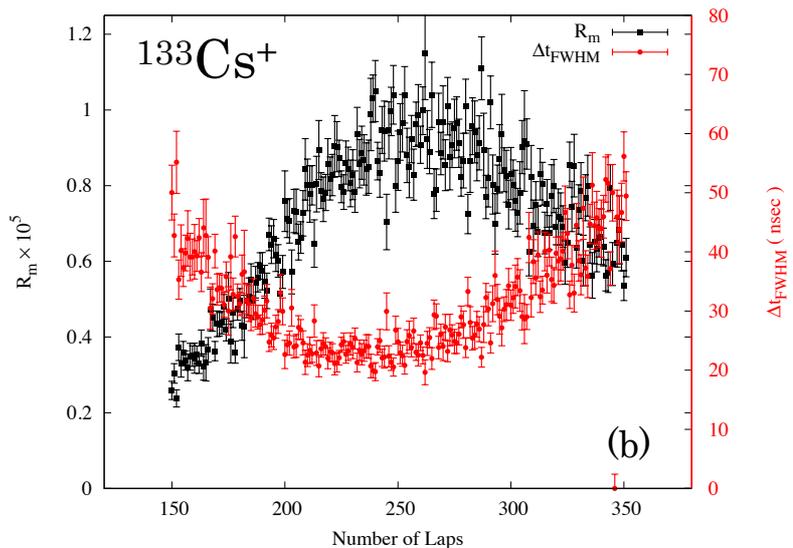


図 5 (a) 移設後の GARIS-II に設置されたコンパクトな MRTOF-MS システム (写真)。(b) MRTOF 内イオンの飛行周回数(Lap)の関数で測定したイオン光学的等時性の系統的変化。赤が飛行時間ピークの半値幅、黒がそれをもとに求めた質量分解能。250 Lap 付近で分解能約 10 万を達成している。

・ α -TOF 検出器開発

重核・超重核領域では、その核構造によって低エネルギーアイソマー状態から直接 α 崩壊する場合があります、基底状態からの崩壊と分離して観測できれば、それぞれの状態の核構造に関する知見が得られるとともに、超重核同定の決定打となりうる。そこで飛行時間の測定と同時に α 崩壊を測定するための α -TOF 検出器の開発を始めた。GARSI-II を用いた質量測定実験課題 (NP1712-LINAC31, NP1712-LINAC07R3) から投入する計画である。

従来の TOF 測定には、ETP 社製の MagneToF と呼ばれるイオン衝撃により発生した二次電子利用のタイミング読出専用装置を用いてきた。この装置のイオンインパクト面を Si-PIN ダイオードに置き換えることで、MRTOF からのイオン到着シグナルと打ち込まれた後に放出される α 粒子のエネルギーを同一の検出器セットアップで測定する (図 6 (a,b))。TOF 情報と α 粒子エネルギー情報に相関が取れば、TOF 測定だけでは分離の難しい 100 keV 程度以下の励起状態と基底状態の分離が可能となる。図 6 (b, c) では、 α 線源を用いた性能試験のセットアップと測定結果を示している。この測定で得られた α -TOF 検出器の時間分解能は 251(7) ps で、典型的 MRTOF-MS の飛行時間(10ms)に対して十分な性能である。他方エネルギー分解能は、141(1) keV となり、改良の余地がある。

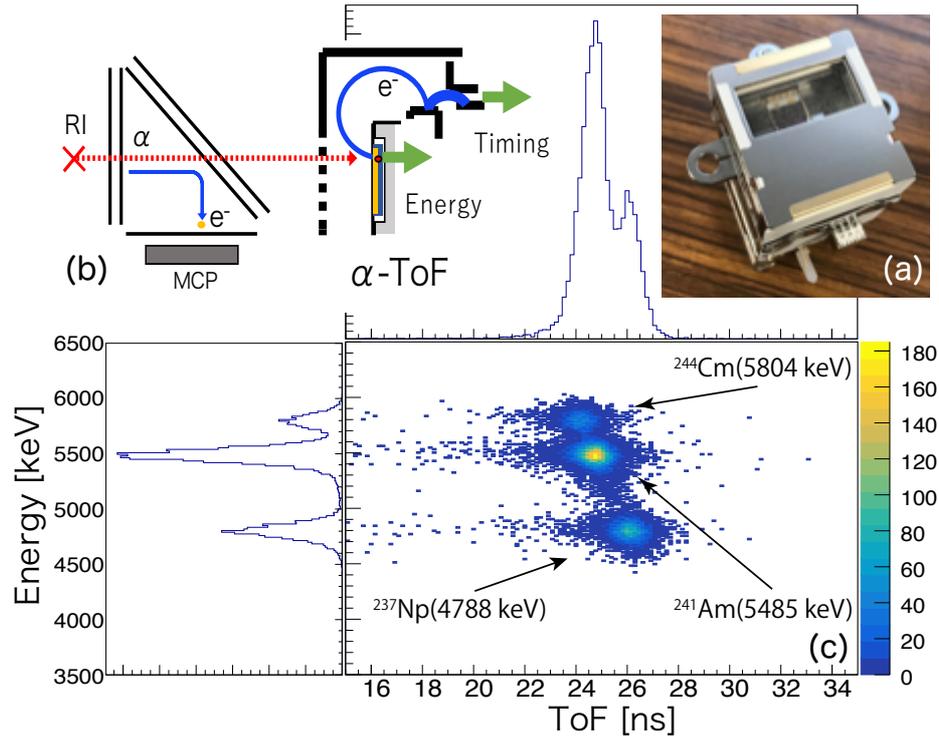


図 6 (a)イオン入射側からみた α -TOF 検出器の写真。(b) α 線源による性能試験のセットアップ。(c) α 粒子の飛行時間(ToF)とエネルギーの相関。

・ IBS 共同研究

韓国 IBS との共同研究で製作中の MRTOF-MS は KISS の専用ビームラインに設置・調整されている(図 7)。KISS ビームライン上に設置したビーム偏向電極によって、崩壊分光システムへの KISS ビーム Off と同時に質量測定システム側にビームがスイッチされる。その間、He-gas cell ion cooler に打ち込まれた短寿命核は、熱化され、1 価のイオンとして引き出され、Multi-trap ion buncher に輸送される。その後バンチ状に整形された短寿命核が mini-MRTOF-MS に打ち込まれ、その飛行時間から質量を高精度で測定する。

システムの性能試験とともに N=126 近傍核の初の質量測定が NP1712-RRC59 として採択されており、加速器の状況によっては、2019 年初頭に実験を行う可能性がある。

図 7 KISS に設置され、調整中の MRTOF システム。20 keV に加速された短寿命核を He ガス中で捕獲した後、低速でバンチ化されたビームとして mini-MRTOF-MS に打ち込み、質量測定を行う。質量測定と従来の崩壊分光は、KISS ビームのスイッチングによって効率的に行う計画である。

