

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す実験研究や、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) 中性子過剰な W および Re 同位体の精密質量測定による形状遷移の検証

多重反射型飛行時間型質量分析器 (MRTOF-MS) を用いて、質量数 $A = 188, 189, 190, 192$ の原子核に対する高精度質量測定を KISS 施設において実施した。本研究の主目的は、中性子数 $N = 115$ 付近における二中性子分離エネルギー S_{2n} の異常な挙動を理由に、原子質量の国際標準評価である Atomic Mass Evaluation 2020 (AME2020) から棄却されていた ^{189}W の原子質量値を再評価することである。本研究成果は Physical Review C にて公表した。

得られた ^{189}W の質量値は、 β 崩壊 Q 値測定および GSI における蓄積リング内での質量測定による先行研究結果と一致し、AME2020 で棄却されていた従来の質量値を支持する結果となった。一方、 ^{192}Re の質量値は AME2020 の評価値に対して $-148(90) \text{ keV}/c^2$ のずれを示した。その他の核種については、実験誤差の範囲内で評価値と整合した。

更新された質量値を用いて S_{2n} の系統的挙動を調べた。図 1 に、W および Re 同位体の S_{2n} 値と、Skyrme 型有効相互作用の SV-min パラメータセットを用いた HFB

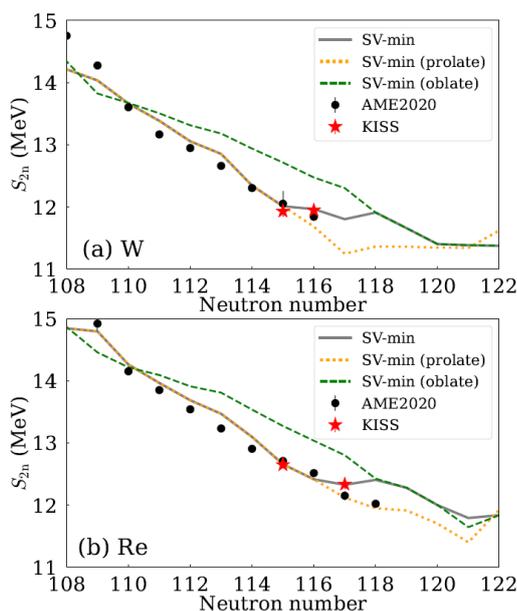


図 1 W(a)および Re 同位体(b)の、 S_{2n} の計算値と実験値の比較。オレンジ色の点線および緑色の破線はそれぞれプロレート形状およびオブレート形状に制約した計算結果である。形状制約を課さない計算結果は灰色の実線で示している。本研究で得られた質量値を用いて算出した実験値は赤い星印で示している。

計算結果を示す。HFB 計算では、いずれの同位体においても $N=117$ 付近でプロレート形状からオブレート形状への遷移が起こり、それに伴う S_{2n} の系統的变化が示された。W 同位体で実験的に観測された ^{189}W から ^{190}W にかけての S_{2n} のほぼ平坦な挙動は、形状制約を課さない理論計算値によって良く再現されており、 ^{190}W における S_{2n} の増加が原子核形状遷移と関連していることが示唆される。さらに、本研究で更新された ^{192}Re の質量値も理論計算値と良く一致しており、同様の構造変化が示唆される。一方、 $N=118$ においては、先行研究値は形状制約（プロレート形状）を課した計算結果の系統性に一致している。本原子核領域における有効な理論モデルの検証のため、さらなる追加実験が望まれる。

(2) 質量-半減期同時測定による中性子過剰ランタン同位体 ^{149}La の新たな基底状態の発見と核構造の進化への影響

原子核の形状遷移は、原子核の結合エネルギーの急激な変化として現れ、これは核構造の進化を示す重要な指標の一つである。2 中性子分離エネルギー (S_{2n}) は、これを議論する上で最も有用な指標としてこれまで使用されてきた。近年の中性子過剰ランタン同位体に対する質量測定研究（以下「JYFL」と呼ぶ）では中性子数 $N=94$ から 95 にかけての S_{2n} の系統変化において明瞭な突出構造、言い換えれば特異な核構造の存在が示された。しかし、

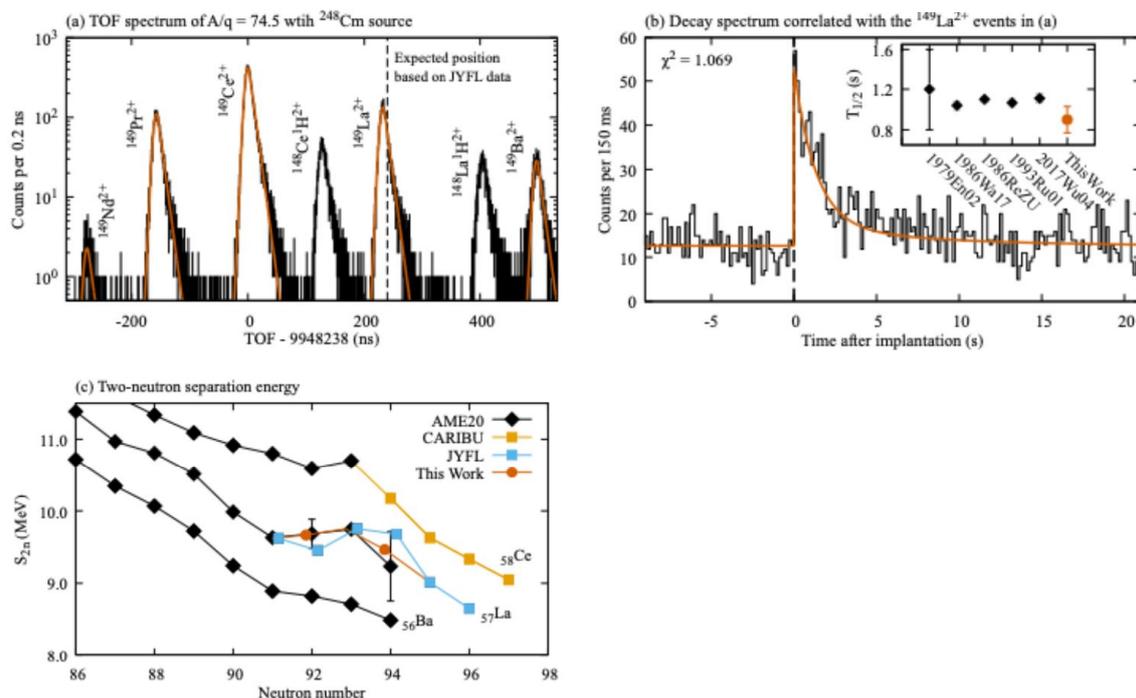


図 2 (a) ^{248}Cm 源から生成された 2 価の質量数 $A=149$ 同重体系列の TOF スペクトル。縦の破線は JYFL の結果に基づく ^{149}La の予想されるピーク位置を表す。(b) (a) の TOF イベントと相関する β 崩壊イベントの崩壊スペクトル。 ^{149}La の半減期と文献値の比較も示されている。(c) バリウム、ランタン、セリウム同位体系列の 2 中性子分離エネルギー。(a) と (b) の赤色の線はフィッティング結果を示す。

この構造の存在は、別の研究（以下「CPT」と呼ぶ）では確認されず疑問視されている。

この問題を解決するために、多重反射型飛行時間型質量分析器 (MRTOF-MS) と β -TOF(飛行時間)検出器を組み合わせた装置を用いて、 ^{149}La の質量と寿命の同時測定を行った。 ^{149}La イオンの生成は ^{252}Cf および ^{248}Cm の二つの異なる自発核分裂線源を用いて行った。各核分裂線源について 1 価および 2 価のイオン状態で測定を実施し、合計 4 種類の異なる条件下で TOF スペクトルを取得した。

すべての条件において、 ^{149}La の観測ピーク位置は、図 2(a)に示すように、JYFL の結果から予測される位置とは有意に異なっている。さらに導出された ^{149}La の質量値は CPT の結果と一致した。この結果を踏まえ TOF イベントと相関づけられた β 崩壊事象の解析を行った。図 2(b)に示す β 崩壊スペクトルから、観測されたピークは安定同位体分子ではなく、半減期 0.90(13) 秒をもつ放射性イオンに対応することが確認できた。この値は文献に報告されている ^{149}La の半減期 1.091(34) 秒よりもやや短いものであった。

これらの測定結果から観測された ^{149}La のピークは基底状態に対応すると結論づけられる。新しい ^{149}La の質量値は、図 2(c)に示すように、 $N=92$ および 94 におけるランタン同位体の S_{2n} の傾向を大きく変化させる。以前報告されていた $N=93$ 付近の明瞭な突出構造は消失し、同じ位置にキンク（折れ曲がり）構造が現れる。その結果、ランタン同位体の S_{2n} の系統は、セリウム同位体のそれと類似したパターンを示すことが確認された。

(3) KISS-1.5 計画の進捗

KISS の高度化を目的とする KISS-1.5 計画について、設置準備およびインフラ整備を中心に具体的な進展があった。KISS-1.5 設置予定エリアに存在していた既存のスペクトロメーターおよび大型散乱槽の撤去を完了し、実験室のクリーンアップを実施した。これにより、必要な設置スペースを確保した。KISS の既存測定エリアへのビーム輸送ラインを敷設するため、壁面にビームライン貫通孔の施工を行い、将来的な装置接続に向けた物理的インフラ整備が完了した。KISS-1.5 への電力供給体制を整備するため、変圧器および分電盤を設置した。本計画では、約 20 kV の高電圧ステージを設けることでイオン加速を行うため、絶縁変圧器 1 台を導入し、高電圧ステージ上に専用分電盤を設置した。制御機器の設置に対応する

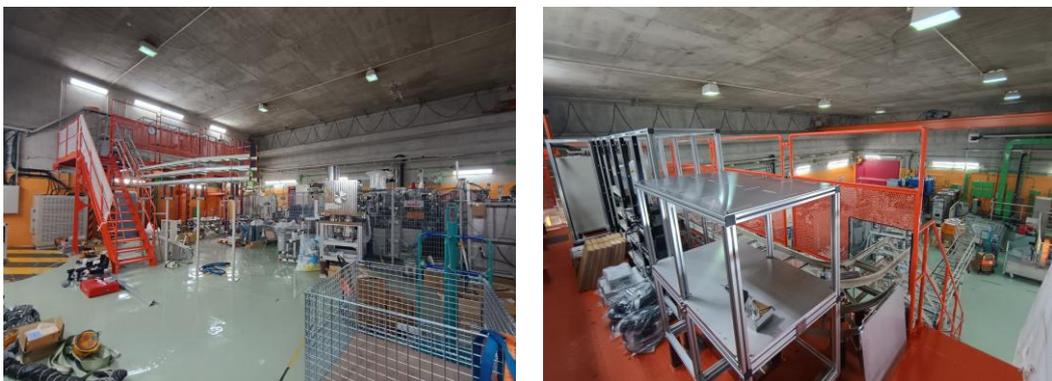


図 3 KISS-1.5 設置エリアの整備状況

ため、高電圧ステージの一部を構築し、機器ラックを設置した。また、制御系および電源系配線を安全かつ効率的に行うため、高電圧対応のケーブルラックも設置した。原子核反応により生成される RI を回収する大型ヘリウムガスセル設置に向け、標的およびガスセルを収容するハウジングチェンバーを設置し、真空系の整備を進めている。今後は、大型ヘリウムガスセル、高周波イオンガイド、ならびに MRTOF 質量分光器の設置を順次進め、オフライン試験を開始する予定である。

(4) レーザー共鳴イオン化分光に関するユバスキュラ大学との研究協力

レーザー共鳴イオン化分光技術の高度化および国際研究連携の強化を目的として、フィンランド・ユバスキュラ大学 JYFL-ACCLAB に滞在し、同研究所で開発・運用されている注入同期型 Titanium:Sapphire (Ti:Sa) レーザー (図 4) を用いたレーザーシステムの実機操作を行った。発振条件の最適化や安定運転に関する実践的な知識の習得に重点的に取り組み、レーザー性能向上に関わる技術的理解を深めた。本滞在で得られた知見は、KISS 施設において計画している高分解能レーザー分光ビームライン構築に向けた重要な技術基盤となるものである。

滞在期間中には、レーザーイオン化分光に関するオンライン実験にも参加し、測定手法およびデータ取得過程を共有した。これにより、レーザー系と実験装置全体との統合運用に関する理解を深め、将来の国際共同実験の具体的検討を進める上で有益な経験を得た。さらに、共同研究を行っている理論研究者との議論やセミナーを通じて、KISS 施設における研究活動を紹介し、意見交換を行った。本研究協力を通じて、レーザー分光技術に関する専門性の向上に加え、国際共同研究体制の強化および人的ネットワークの拡充を図ることができた。

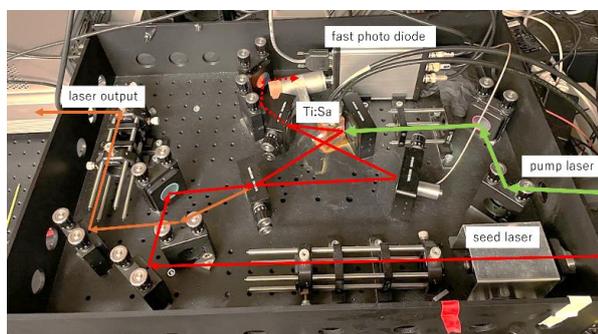


図 4 注入同期型 Titanium:Sapphire レーザー

(5) SSRI-PNS collaboration meeting 2025 の開催

理化学研究所仁科加速器科学研究センターでの停止・低エネルギー短寿命核ビームを用いた核分光実験を効率的かつ円滑に推進することを目的として、新規実験審査課題について事前に物理の議論、実験技術の評価、ユーザー間のコラボレーション構築を行う SSRI-PNS collaboration meeting 2025 を、2025 年 9 月 3 日および 4 日にオンライン形式で開催した。本ミーティングでは、WNSC が主宰する KISS 装置ならびに、WNSC と理研 SLOWRI グループ等が共同で運営する CRISSMASS (Co-operated RI Stopper and Mrtof-based Analyzer Spectroscopy System) コラボレーションに関連する計 10 件の実験課題について、活発な議論

が行われた。両日とも、国内外から大学院生や若手研究者を含む約 50 名が参加した。

ミーティング運営委員が各課題を審査を経て、5 件の実験課題が、仁科加速器科学研究センター、KEK 素核研、東京大学 CNS が 2025 年 12 月 3 日から 5 日にかけて共同開催した実験審査会に提出された。その結果、2 件の課題が採択され、来年度以降に実験を実施する予定である。