

理化学研究所仁科加速器科学研究センターと
高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所との
「低エネルギー不安定核ビーム」に関する研究協力協定に基づく
研究協力5年間(2014年4月1日～2019年3月31日)の成果

目次

[1] はじめに	1
[2] 研究協力設備の開発・整備及び成果の概要	3
2-1 元素選択型質量分離装置 (KEK Isotope Separation System: KISS)	3
2-2 MRTOF と SLOWRI の開発・整備と網羅的質量測定プロジェクト	11
[3] 研究協力体制	24
3-1 KEK 共同利用による研究協力	24
3-2 外部ユーザー支援および各種共同研究	24
3-3 「低エネルギー不安定核ビーム」における将来計画への寄与	25
[4] 研究会、セミナーなどの開催	26
4-1 研究会	26
4-2 セミナー	26
4-3 SSRI-PNS collaboration meeting	27
[5] 結語と展望	28
[6] 研究協力のあゆみと成果の概要	29
6-1 研究協力のあゆみ	29
6-2 成果の概要	32
参考資料1	33
Publication List	33
Talks and Presentations	42
KEK 共同利用実験	52

[1] はじめに

理化学研究所仁科加速器科学研究センター(以下「仁科センター」という)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)素粒子原子核研究所(以下「素核研」という)は、2009 年 10 月 1 日に「仁科センターと素核研との「低エネルギー不安定核ビーム」に関する研究協力協定」を締結した。この協定は 2014 年 4 月 1 日に 5 年間延長された。本報告書は、2014 年 4 月 1 日から 2019 年 3 月 31 日までの期間における研究の成果をまとめ、さらに研究協力の今後に対する展望を述べたものである。

本協定は、仁科センターと素核研との連携・協力により互いの研究開発資源を活用して両者の円滑な研究協力を促進し、低エネルギー不安定核ビームによる基礎科学、応用科学分野の学術的研究の効果的な発展を期するものである。本協定のもと、天体における元素合成の起源を探る研究課題の遂行に向けた、元素選択型質量分離装置(KISS)の開発と仁科記念棟実験室への設置が進められた。KISS では多核子移行反応で生成した放射性同位体を引き出し、 β 崩壊核分光やレーザー核分光、質量測定などの特色ある実験課題の遂行が可能となり、その研究対象は天体核物理のみならず原子核物理にも及ぶことから、多くの研究者に有用な装置となる。そこで広範な外部ユーザーによる KISS の共同利用を可能とし、円滑に運用するための枠組、「研究連携従事者制度」が確立された。実験課題内容の審議、マシンタイム配分に対する順序付けなど、KISS 実験課題の公募と評価を RIBF 施設の他の実験装置に関わる実験課題と同一の水準で行えるように、従来の RIBF 課題採択委員会(NP-PAC)を拡大して東大原子核科学研究センター、素核研、仁科センターの三者共同運営による NP-PAC へと課題採択システムが更新された。

素核研では、KEK の共同利用制度に基づいた外部ユーザーの日常的研究活動サポート、共同利用装置の恒常的維持・管理・運転のため、2016 年度からの KISS 共同利用業務開始に先駆けて、2015 年 4 月に「和光原子核科学センター(WNSC)」を理研和光キャンパスに設置した。

本協定に基づく研究協力は、上記 KISS による共同研究の開始に加えて、仁科センターにおいて進められてきた停止低速 RI ビーム施設(SLOWRI)における、低速不安定核ビームの共同開発、多重反射型飛行時間測定式質量分析器(MRTOF-MS)の共同開発・共同実験にも及んでいる。特に後者は、素核研における短寿命核同位体の網羅的質量測定プロジェクトとして 2017 年度より強力に推し進められている。共同研究におけるハイライトとしては、KISS による高融点元素の中性子過剰同位体に対するレーザー核分光開始とそれによる中性子数 126 近傍の核構造情報(同位体シフト、核磁気モーメント)の系統的取得、MRTOF-MS による超ウラン元素同位体の直接質量測定などがあげられる。

本協定に関わる協力研究を効果的に遂行・展開するため、国際規模のユーザーコミュニティ SSRI-PNS collaboration や国際ネットワーク IGLIS-NET を組織、運営するとともに、韓国(Institute for Basic Science, IBS および Seoul National University, SNU)、中国(Institute of Modern Physics, IMP および JinNan University)、米国(National Superconducting Cyclotron

Laboratory, NSCL/MSU)、京都大学複合原子力研究所、JAEA、徳島大学、名古屋大学、金沢大学、九州大学との共同研究を新たに発足させ、国内外研究者との連携を強化している。

素核研 WNSC は、仁科センターが開催している核物理セミナーの企画協力、WNSC 独自の理研内セミナー(WNSC セミナー)や、筑波大・原子力研究開発機構(JAEA)・理科大との共同開催のつくば不安定核セミナーを通して、仁科センターとの連携研究に関連する原子核物理のトピックの紹介や茨城地区での若手研究者育成を進めている。

以下では、仁科センター-素核研の研究協力に基づく研究協力設備の開発・整備および研究の内容、研究協力体制、研究会などの具体的研究交流事業を述べ、最後に今後の研究協力を展望する。

[2] 研究協力設備の開発・整備及び成果の概要

本章では、研究協力に基づく設備の開発・整備、および研究の内容を概観する。なお、和光原子核科学センターにおける研究及び共同利用業務は下記の体制で行われている。

節	研究関連設備・施設	担当者/責任者
2-1	元素選択型質量分離装置 (KISS)	平山/宮武
2-2	多重反射型飛行時間測定式質量分析器 (MRTOF-MS) 低速 RI 施設 (SLOWRI)	Schury/和田
3-1	KISS 共同利用業務	渡邊/宮武

*KISS、MRTOF-MS の技術補佐員: 垣口、小柳津

**共同利用および WNSC ユーザー支援事務補佐: 井澤

2-1 元素選択型質量分離装置 (KEK Isotope Separation System: KISS)

2-1-1 KISS 計画

短寿命核グループでは、2009 年 7 月 16 日に素核研が行った短寿命核グループの将来計画に関する国際諮問委員会(委員長:S. Gales, 委員:T. Otsuka, T. Motobayashi, K. Imai, R. Tribble)の答申に基づき、KISS (KEK Isotope Separation System) 計画(「重元素合成過程(速い中性子捕獲過程)に関与する中性子魔法数 $N = 126$ の β 崩壊特性の研究」)を 2010 年から仁科センター内で展開している。KISS 計画の目的は、多核子移行反応で生成される $N = 126$ 近傍の短寿命核を、アルゴンガスセル内で捕集・中性化し、目的の元素のみを選択的にレーザー共鳴イオン化して高純度二次ビームとして引出した後、 β 崩壊核分光測定、質量測定、レーザー核分光測定などを行い、原子核の視点から太陽系の r 過程元素組成分布の第三ピークを形成する爆発天体環境を明らかにすることである [S.C. Jeong *et al.*, KEK Report 2010-2]。

2011 年から理化学研究所の仁科センターの E2、E3 実験室にアルゴンガスセルを用いたレーザーイオン源の設置(図1参照)、および J3 実験準備室にレーザー共鳴イオン化用の波長可変色素レーザーとその駆動用エキシマレーザーの設置を行い、それぞれの開発・運用を行ってきた。

装置開発研究の開始とともに諮問委員会の指摘に従って、2012 年にフランス GANIL 研究所で、KISS 計画で採用予定の多核子移行反応の有効性を確認する実験を行った。ここでは、KISS 計画で予定している反応系 ^{136}Xe ビーム + ^{198}Pt 標的を用いて、入射核近傍核(質量数 $A \sim 130$)の生成断面積を測定し、標的核近傍核($A \sim 200$)の生成断面積を評価することに成功した。これにより当該領域の原子核生成に対する多核子移行反応の有効性を実証できた [Y.X. Watanabe *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 172503 (2015)]。

2015 年 12 月に開催された仁科センターの NP-PAC から、KISS を用いた実験課題の受付

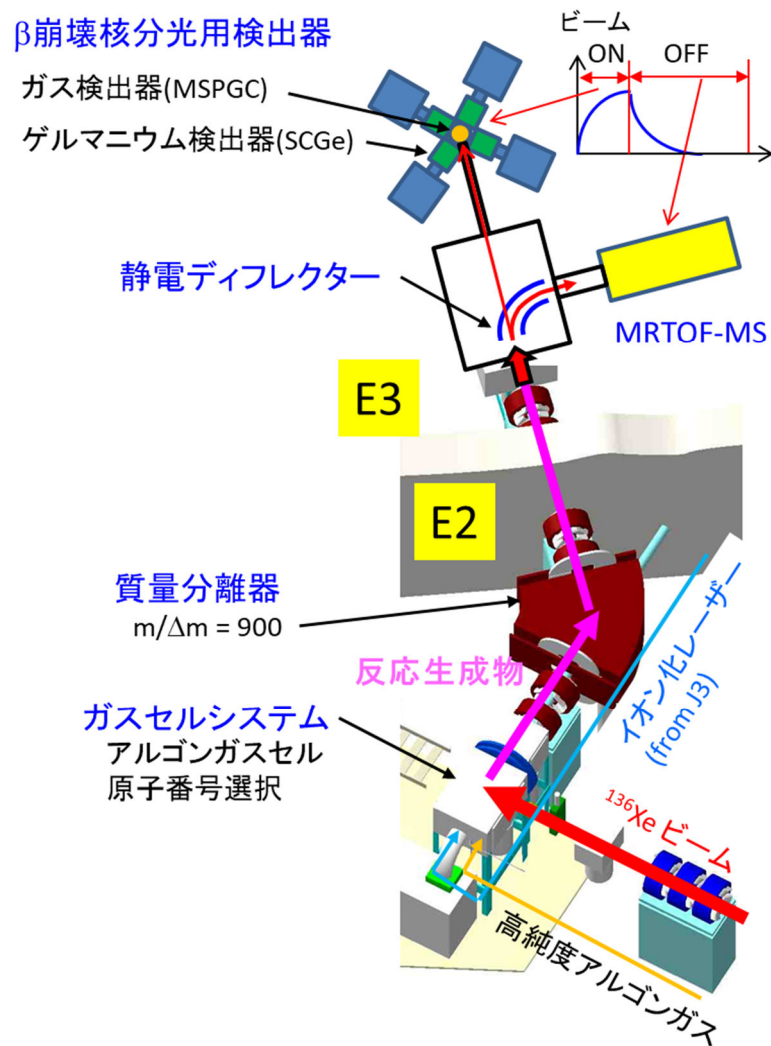


図1: KISS 装置の概略図。

を開始した。採択される KISS の実験課題は 2016 年度より KEK の共同利用実験として実施される。NP-PAC での実験課題公募に向けて 2015 年 3 月から KISS 実験の Letter of Intent (LOI) の募集を開始し、9 月に SSRI-PNS (Slow and Stopped Radioactive Ion beam for Precise Nuclear Spectroscopy) collaboration meeting を開催した。2015 年度から原則毎年 9 月に SSRI-PNS collaboration meeting を開催し、KISS の共同利用実験課題を事前に吟味し、実行可能な課題の NP-PAC への応募を推薦してきた。これまでに 23 件の LOI が提出されて、NP-PAC への応募を推薦された 8 件全てが承認されている。

2-1-2 KISS の開発状況

2011 年に KISS の設置を開始し、2012 年からオフラインで KISS ガスセルからのビーム引き出し試験を開始した。アルゴンガスセル内に設置したニッケルおよび鉄のフィラメントを用い

たオフライン試験で、ガスセル内からレーザー共鳴イオン化したニッケル、鉄イオンビームの引出しに成功した [Y.Hirayama *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 317, 480 – 483 (2013)]。

2013 年 3 月末に MT 委員会で承認された MS (Machine Study) ビームタイムにおいて、安定核 ^{56}Fe ビーム(90 MeV/核子)による KISS 装置の心臓部であるアルゴンガスセルの性能試験 [Y. Hirayama *et al.*, EPJ Web conference 66, 11017 (2014), M. Mukai *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 85, 02B906 (2014)]を行い、KISS オンライン条件下でレーザー共鳴イオン化した $^{56}\text{Fe}^+$ イオンの引出しに成功した。しかしながら、一次ビーム強度が増加するにしたがって引出し効率が低下する現象が見られ、また引出したビーム純度も 50% 程度と低く、同様なビーム強度依存性が観測された。これらを抑制するガスセル構造および不純物イオンを除去する電極を取り入れたガスセルを新たに設計・製作した。新たなガスセルで 2013 年 9 月に、安定核 ^{56}Fe ビーム(90 MeV/核子)を用いたオンライン試験を行い、この問題を解消した。更に鉄のレーザー共鳴イオン化様式を改善(効率の良い別の経路を発見)することで、引出し効率が 50 倍となる 0.25% (この分野の先駆者であるルーバン大のガスセルの引出し効率は元素に依存して 0.1 ~ 2% である。) に向上し、ビーム純度も 98% 以上に改善した [Y. Hirayama *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 353, 4 (2015), AIP Conf. Proc. 1594, 380 (2014)]。

対象となる短寿命核生成に必要な ^{136}Xe ビーム(10.75 MeV/A)を用いて KISS の動作試験を行うために 2013 年 12 月開催の NP-PAC に提出した KISS 開発実験課題(NP1312-RRC29)において 12 日間のビームタイムが承認され、2014 年から 2016 年にわたって下記の KISS 開発を行った。

2014 年 7 月には、 ^{136}Xe ビーム(10.75 MeV/核子)を KISS ガスセル中に設置した ^{198}Pt 標的に照射し、弾性散乱により標的から放出される $^{198}\text{Pt}^+$ イオンをアルゴンガスセルで捕集・中性化し、レーザー共鳴イオン化した後、引出す実験を行った。その結果、大強度 35 pA の ^{136}Xe ビームを照射しても 0.1% 以上の引出し効率で重イオンを引き出せることを実証した

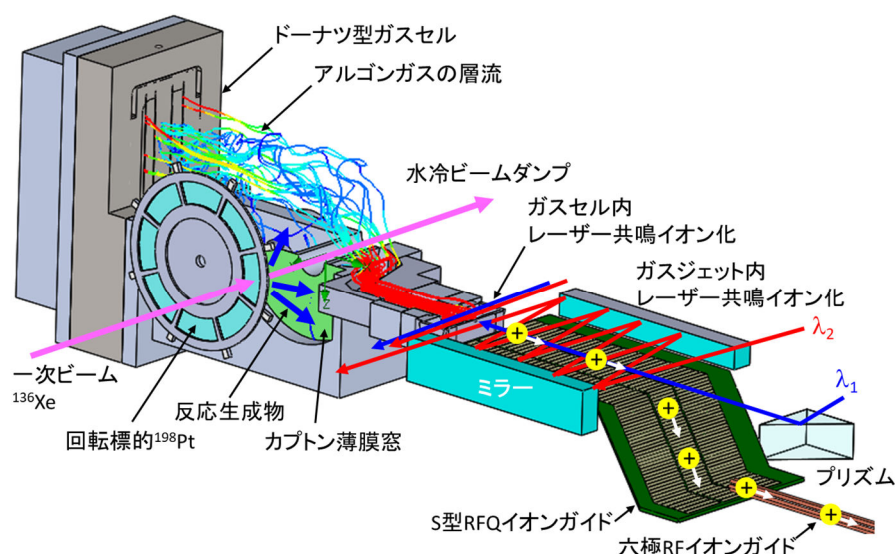


図 2: ドーナツ型ガスセルの概略図。

[Y. Hirayama *et al.*, IL NUOVO CIMENTO 39 C, 359 (2016), Nucl. Instrum. Methods B 376, 52 (2016)].

2015 年には、KISS 装置で初めて短寿命核 $^{199}\text{Pt}^+$ イオンの引出しに成功し、 β 崩壊の寿命を測定した [Y. Hirayama *et al.*, IL NUOVO CIMENTO 39 C, 359 (2016), Nucl. Instrum. Methods B 376, 52 (2016)].

外部ユーザーの要求を満たし、KISS で更に中性子過剰な短寿命核の β 崩壊寿命測定や β 遅発ガンマ線核分光を遂行するには、ガスセルの引出し効率を一桁以上改善する必要があり、2015 年から 2016 年にかけて新たにドーナツ型ガスセルを開発した(図 2 参照)。ドーナツ型ガスセルを用いることで、短寿命核の引出し効率を 13 倍程度向上できた [Y. Hirayama *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 412, 11 (2017)]. これにより、外部ユーザーの要求を満たし、KISS で本格的に β 崩壊核分光測定が展開できるようになった。

予定している重元素を高効率でイオン化するのに不可欠なレーザー共鳴イオン化様式もオフライン試験で探索しており、イリジウム($Z=77$)、レニウム($Z=75$)、タングステン($Z=73$)については高効率なイオン化様式を確立することに成功した [M. Mukai *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods B 376, 73 (2016), Y. Hirayama *et al.*, J Phys. B 47, 075201 (2014)]. 限られたビームタイム中に様々な元素をレーザー共鳴イオン化するために、単一の色素で発振できる 250 nm 近傍の波長で各元素を励起し、大強度エキシマレーザー 308 nm でイオン化する高効率なイオン化経路を $Z=72\sim 78$ の元素について確立した。これによって、オンライン実験中にわずか 10 分程度で元素の切り替えが可能となり、効率の良い実験の遂行が可能となった [Y. Hirayama *et al.*, J Phys. B 50, 215203 (2017), Phys. Rev. C 96, 014307 (2017)].

2-1-3 KISS を使った実験研究

KISS 計画では、主に 2 つのブランクスポット、 $N=126$ 近傍と $Z \geq 92$ の中性子過剰核領域の β 崩壊核分光・質量測定等による核構造研究を目的としている。戦略として、安定核領域からブランクスポットに向けて系統的な核分光測定による核構造研究を行い、この領域における寿命や質量の理論予測精度を飛躍的に向上させ、最終的にブランクスポット領域の短寿命核の寿命や質量の理論予測値から r 過程の天体環境解明を目指す。というのも、ブランクスポットの中でも特に超中性子過剰な短寿命核の全てを生成することは現在の加速器施設的能力では不可能であり、ブランクスポット領域の中性子過剰核の寿命や質量の理論予測が不可欠となるが、安定核領域から少し離れた短寿命核領域においてさえ理論モデルの予測精度が不十分なために理論予測が極めて困難なためである。

KEK 短寿命核グループが中心となって進めている核分光測定では、寿命予測において重要な β 崩壊の始状態・終状態および位相空間の広さにそれぞれ関与する親核と娘核の波動関数および質量差に重点がおかれている。具体的には KISS でベータ崩壊核分光測定による娘核の励起状態の波動関数に関与するデータ取得、原子核質量測定による β 崩壊の位相空間の広さに関与するデータ取得、レーザー共鳴イオン化核分光による電磁モーメントと荷電半

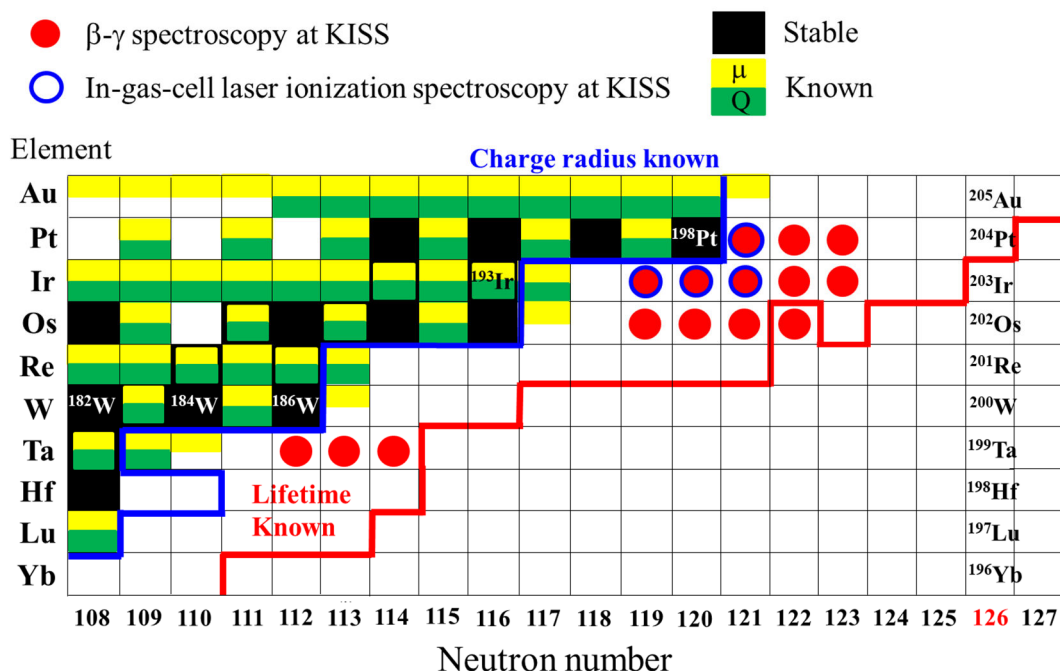


図 3: $N=26$ 近傍の核図表。KISS で核分光を行った核種と寿命測定とレーザー核分光の現状。

径測定による親核の波動関数および核構造に関するデータ取得を国内外の大学および研究所と共同研究により展開している。

2015 年度から 2017 年度までの NP-PAC において、KISS 共同利用課題として下記 8 件の実験課題が採択された。 β 崩壊核分光測定が 4 件、レーザー核分光測定が 1 件、質量測定が 1 件、KISS R&D が 2 件である。KISS で行った β 崩壊核分光、レーザー核分光の核種と現状について図 3 に示す。

1. NP1512-RRC37 (実験代表者: P.M. Walker, Univ. of Surrey)
2. NP1512-RRC40 (実験代表者: Y.X. Watanabe, KEK-WNSC)
3. NP1512-RRC41 (実験代表者: Y. Hirayama, KEK-WNSC)
4. NP1612-RRC44 (実験代表者: H. Watanabe, Beihang Univ.)
5. NP1612-RRC45 (実験代表者: Y. Hirayama, KEK-WNSC)
6. NP1712-RRC37R1 (実験代表者: P.M. Walker, Univ. of Surrey)
7. NP1712-RRC40R1 (実験代表者: Y.X. Watanabe, KEK-WNSC)
8. NP1712-RRC59 (実験代表者: J.Y. Moon, IBS)

(1) β 崩壊核分光

生成量の少ない中性子過剰な短寿命核から放出される β 線を検出し、 β 崩壊核分光測定を推進するために、高効率・低バックグラウンドの 32 チャンネルからなる比例係数管(MSPGC)

を開発した [M. Mukai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A 884, 1 (2018)]. 32 チャンネル、大立体角 80%と低物質質量物質からなる構造という利点から、従来使用していたプラスチックシンチレータに対して低エネルギー β 線の検出効率が2倍程度向上し、2次元のヒットパターン解析からバックグラウンドを0.1 cpsと一桁以上低減することに成功した [M. Mukai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A 884, 1 (2018)]. MSPGCは大立体角ゲルマニウム検出器(SCGe: Super Clover Ge detector)と組み合わせて使用可能なように、低物質質量および薄膜窓を有する構造となっている。

更に生成量の少ない中性子過剰な短寿命核(0.01 pps)の β 崩壊核分光測定を推進するために、MSPGCの3次元位置感応化に着手した。これまではアノードワイヤーとして導電性のベリリウム銅を使用してきたが、これを高抵抗カーボン線(3 k Ω /cm)に変えて両端読み出しにすることで β 線のアノードワイヤー方向の検出位置を測定できる。試作機を製作・改良した結果、バックグラウンドレート0.01 cpsの達成に必要な位置分解能2mm(半値幅)を実現した。現在は、32本の高抵抗カーボン線からなる比例係数管を組み立て、信号処理用回路(32 $\times$ 2 = 64チャンネル分)を用意して位置校正を行っている。2018年12月のオンライン実験で使用予定である。

SCGe検出器は韓国IBSとの共同研究により2016年からKISSに導入した。MSPGCの構造のおかげで短寿命核ビームの打ち込み位置から50 mmの距離に4台のSCGe検出器を配置でき、1 MeVのガンマ線に対して約10%という高い検出効率を達成できた。

MSPGC、SCGe検出器と、これまでより100倍程度高効率なオスミウム($Z = 76$)のイオン化様式 [Y. Hirayama *et al.*, J. Phys. B 50, 215203 (2017)] を新たに探索したことにより、短寿命核 ^{198}Os の β 崩壊寿命を初めて測定することに成功した [Y. Hirayama *et al.*, Phys. Rev. C 98, 014321 (2018)] (図4参照)。また ^{197}Os の β 崩壊寿命精度の向上、 $^{197}, ^{198}\text{Os}$ の β 遅発ガンマ線測定にも成功した。 $N =$

126近傍核での β 崩壊には、ガモフテラー遷移(GT)と第一禁止遷移(FF)が競合する。そのため、 β 崩壊の寿命予測が困難となっている。実際に、図4にオスミウム同位体の β 崩壊寿命の実験データと理論予測値を示しているが、実験値を系統的に再現できる理論モデルが存在しないことがわかる。理論モデルの改善に向けて、この領域における系統的な β 崩壊核分光による β 崩壊強度分布測

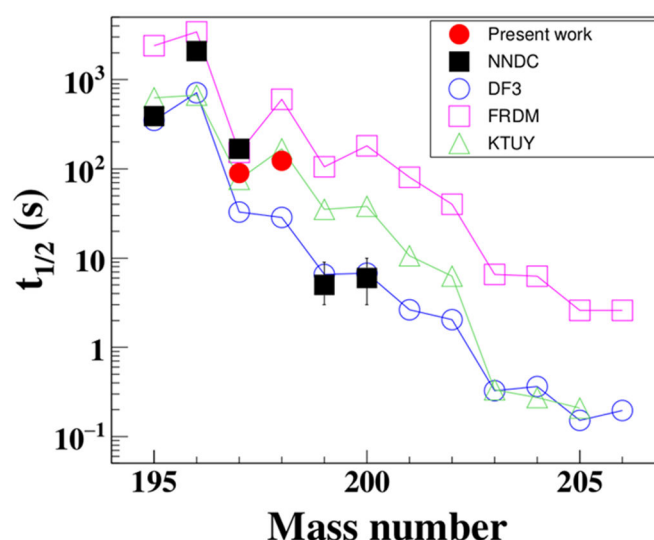


図 4: Os 同位体の半減期の測定値と理論予測値。全ての測定値を予測可能な理論モデルは無く、この領域の核分光の重要性を表している。

定などが強く望まれている。更に ^{195}Os の準安定状態を発見し、 β 崩壊寿命の測定精度を改善し、 β 崩壊強度分布の導出することができた。この結果は、現在、筑波大学の博士課程の学生が解析し、博士論文にまとめている。

この重い領域の変形核において、陽子・中性子数に応じて軌道角運動量が大きく変化することから高 K アイソマーが存在することが知られている。GSI の実験から ^{187}Ta の準安定状態が確認されており K アイソマーの存在が示唆されている。より詳細な核構造研究を目指して実験課題 NP1712-RRC37R1 (実験代表者:P.M. Walker, Univ. of Surrey)が採択されており、KISS での ^{187}Ta の収量測定が実施され、 K アイソマーの探索実験が可能ことが確認された。

(2) レーザー共鳴イオン化核分光

KISS では、2 色のレーザーを同時照射して、中性原子をイオン化してビームとして引出す。その際に、励起レーザーの波長を変えることで元素選択的にイオン化することができる。この励起レーザー光の波長を走査して原子の超微細相互作用分布(Hyperfine structure: HFS)を測定することで、原子核の電磁気モーメントおよび原子核変形に由来する荷電分布の情報を得ることができる。これらの情報は波動関数、核内相互作用を研究する上で不可欠である。KISS では、多核子移行反応を用いることで、世界で唯一、高融点元素の中性子過剰核に対して基底状態のみならず準安定状態も生成し、レーザー共鳴イオン化核分光測定が実施可能である。

ガス中のレーザー共鳴イオン化核分光法には、ガスセル内 ($P \sim 75$ kPa の高圧アルゴンガス環境下で、低繰り返し(~ 100 Hz 程度)レーザーシステムを用いる)またはガスジェット内($P \sim 75$ Pa の低圧化で音速程度の均一速度を有するアルゴ

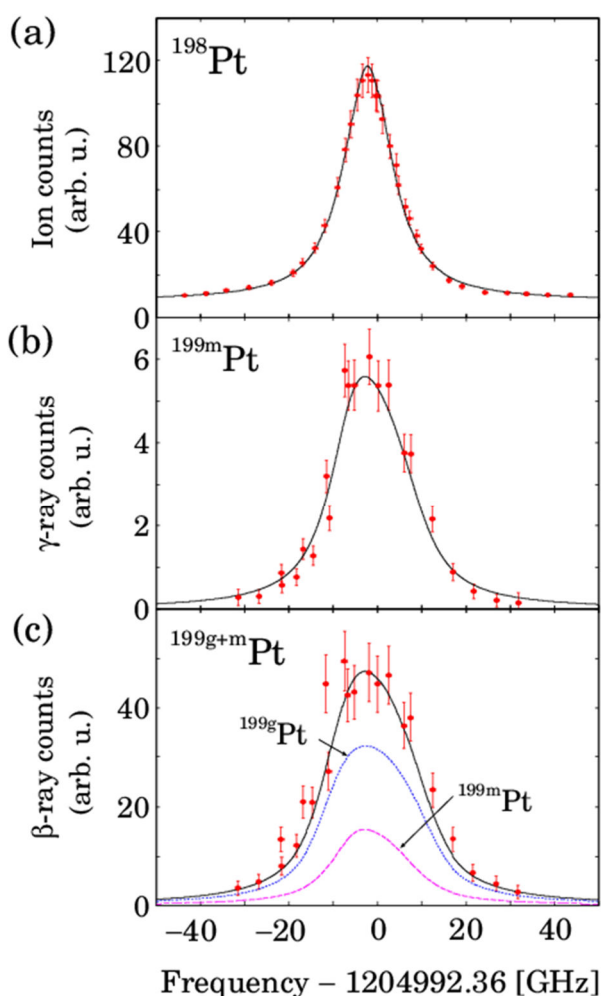


図 5: (a) ^{198}Pt による HFS 測定の応答関数。 ^{199}Pt の (b) 準安定状態($^{199\text{m}}\text{Pt}$)と、(c) 基底状態および準安定状態($^{199\text{g+m}}\text{Pt}$)の HFS。 応答関数を使って共鳴幅から磁気モーメントを、ピーク位置から荷電半径の情報が得られる。

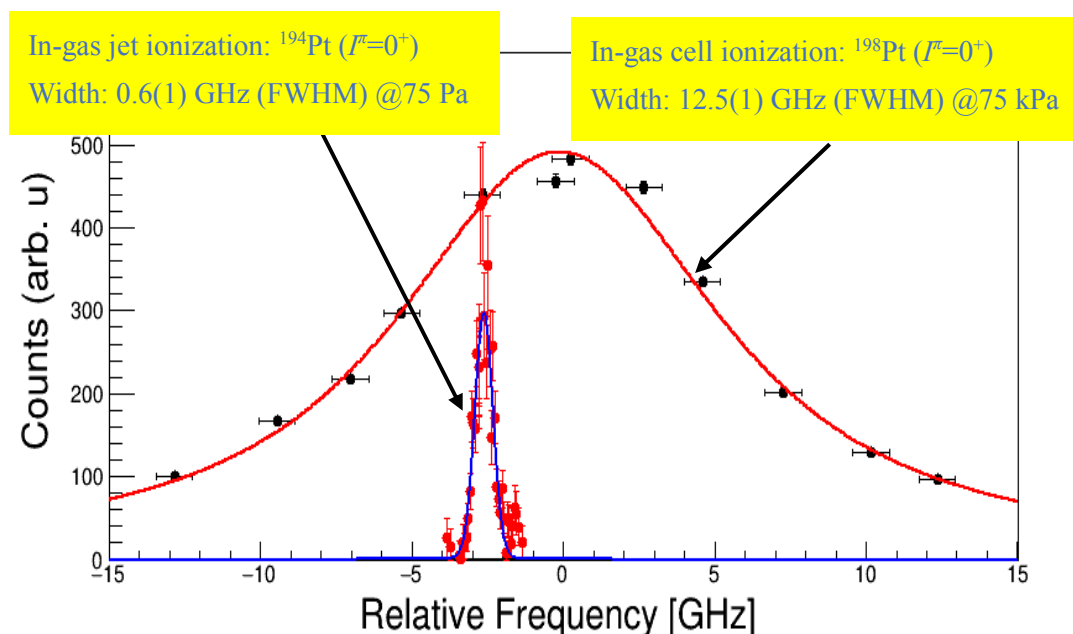


図 6: ガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光法とガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光法の場合の有効レーザー幅。

ンガスジェット下で、高繰り返し(10 kHz 程度)レーザーシステムを用いる)の 2 種類がある。これまでに KISS ではガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光法を用いて、 $^{199g}, ^{199m}\text{Pt}$ [Y. Hirayama *et al.*, Phys. Rev. C 96, 014307 (2017)] および $^{196g}, ^{197g}, ^{198g}\text{Ir}$ [向井もも, 2018 年 3 月学位取得, 筑波大学博士論文] の HFS 測定に成功し、この重い領域での波動関数についての研究を展開し始めた(図 5 参照)。 ^{199}Pt の同位体シフト測定から得られた荷電半径と β_2 変形度を HFB 計算と比較した結果、基底・励起状態がそれぞれオブレート・プロレート変形しており、異なる変形状態の低エネルギー準位における共存を示唆できた。この領域は特にオブレート変形とプロレート変形間での構造転移が知られており、イリジウム同位体の系統的な測定結果から、 ^{197}Ir で同様な形状転移が起こっていることが実験結果から示唆できた。電磁気モーメント測定からより詳細な核構造を議論したいが、理論模型の方が追い付いていないため構造議論に踏み込めていないのが現状である。

2017 年度に高繰り返しレーザーシステムを導入した。これにより KISS で、高分解能なガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光法による核構造研究を推進することが可能となった。図 6 に、ガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光法とガスジェット内レーザー共鳴イオン化核分光法の場合の有効レーザー幅を示した。後者の幅は、前者の 1/20 程度を示しており、高い分解能で、HFS 測定が可能となった。これまでオフライン試験で装置開発を進め、2018 年 12 月にオンライン試験として短寿命核の電磁気モーメント測定を実施する予定である。

(3) 質量測定

多重反射型飛行時間測定式質量分析器 (MRTOF-MS: Multi-Reflection Time-Of-Flight Mass Spectrograph)を KISS に導入することで、短寿命核の質量を高精度(10^{-6})で測定することができる [Y. Ito *et al.*, Phys. Rev. Lett. 120, 152501 (2018)]. 従来 β 崩壊寿命測定中は崩壊曲線を測定するため KISS から引出された短寿命核ビームを上流で捨てていた。効率良くビームを有効利用するために、崩壊曲線測定中にビームを MRTOF-MS に振り分ける静電ディフレクターを新たに KISS ビームラインに導入した。2017 年にその下流に MRTOF-MS に輸送するビームラインを新設し、予測通りに直径 2 mm 以下で 90%以上の効率でビーム輸送することに成功した。2016 年度から韓国 IBS との共同研究を開始し、韓国 IBS の研究者と共同で MRTOF-MS の開発を行っている(図 7)。2018 年度内にオフライン試験で性能評価を行い、速やかにオンライン試験に投入する予定である。

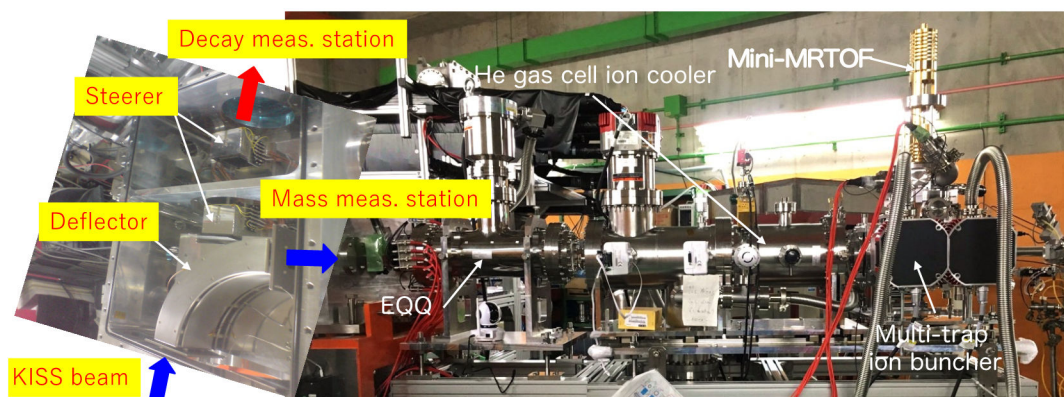


図 7: KISS に設置された MRTOF システム。

2-2 MRTOF と SLOWRI の開発・整備と網羅的質量測定プロジェクト

原子質量は、その構成物である陽子・中性子・電子をばらばらにして測定した値の和に比べて常に極僅か(1%程度)軽い。この差は質量欠損と呼ばれ、原子および原子核の全結合エネルギーに相当し、原子核の存在、安定性、崩壊様式を決定する原子核の特性のなかでもっとも重要な量である。一方、質量は核種ごとに異なる固有の値であり、核種同定の「指紋」としての役割も持つ。今日の原子核物理学の夢の一つは、現在知られている超重元素よりさらに重い領域にあると预言されている「安定の島」へ到達することである。そこへの道筋は容易ではなく、最適な標的とビームが準備でき、適切なビームエネルギーと反応断面積が予測できて生成されたとしても長寿命が予想されている重い原子核の識別法も見出さなければならない。我々は、超重元素の精密質量測定によって超重元素の質量数と原子番号を正確に同定すること、さらに将来、安定の島に相当する超重元素が生成できたときの同定法を確立することを目指している。また、原子核質量の網羅的測定は宇宙における重い元素の起源の解明に欠く

ことの出来ない実験である。

理化学研究所の加速器施設で生成可能なあらゆる原子核の質量測定を目指して新しい質量分光器を開発している。最新の質量編纂 AME2016[W.J. Huang *et al.*, Chin. Phys. Rev. C 41, 030002 (2017)、M. Wang *et al.*, Chin. Phys. Rev. C 41, 030003 (2017)]によれば、およそ 2300 核種の質量が 1 ppm 以上の精度で測定されているが、生成はされているが質量未知の原子核は未だ 1000 種類以上ある。さらにその未知核種の半減期は 10 ms~100 ms の間にも

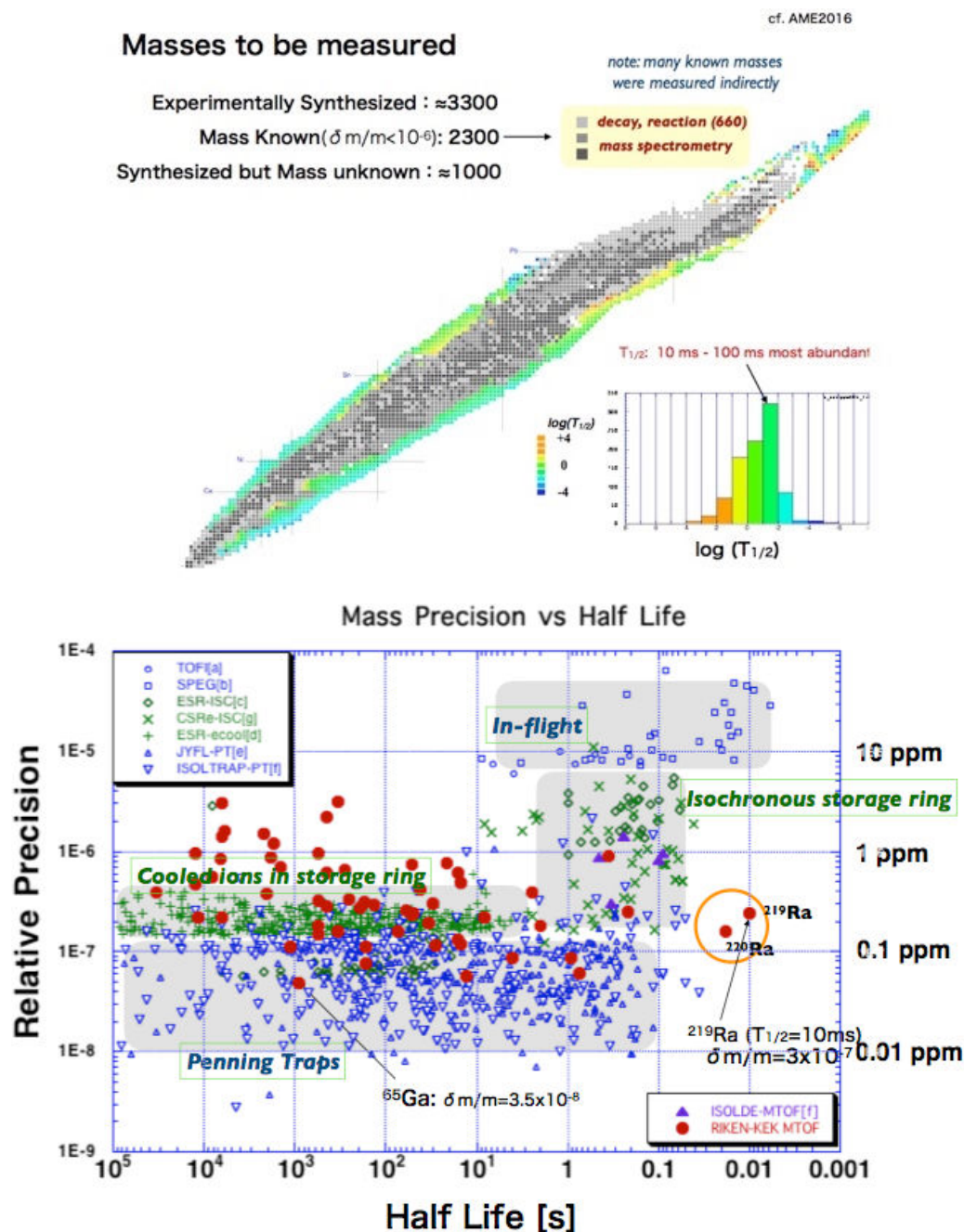


図8: 質量測定の実況と未知核種の半減期分布 (上)、および典型的な質量測定装置による質量測定精度と半減期の相関 (下)。

っとも多く分布しており、短寿命原子核を能率よく高精度で質量測定できる質量分析器の開発が必要である(図 8)。KEK 和光原子核科学センターと理化学研究所仁科加速器研究センターの共同研究として、新しい多重反射型飛行時間測定式質量分光器(MRTOF-MS)を開発してきた。これまでに、重いメンデレビウム同位体から軽いリチウム同位体まで凡そ 80 核種の質量測定に成功し、 ^{65}Ga では相対精度 3.5×10^{-8} の高精度測定を披露し、半減期 10 ms の ^{219}Ra の測定も実施した(図 8)。今後はより重い超重元素、陽子過剰核、中性子過剰核の広範囲の原子核の質量測定を完遂するべく開発を継続している。

2-2-1 低速 RI ビーム生成装置(SLOWRI)と MRTOF 開発

理化学研究所仁科加速器研究センターの RI ビームファクトリにおける主要実験施設の一つである低速 RI ビーム生成装置(SLOWRI)開発の一環として、MRTOF-MS の開発が行われてきた。SLOWRI は入射核破砕片分離器からの高速 RI ビームを用いて高周波イオンガイド法によってイオントラップに捕捉された RI イオンや低速の RI ビームを生成する装置である。その心臓部は、0.1 気圧程度のヘリウムガスを充填したガスセル内で熱化したイオンを高周波カーペットによって生成される不均一高周波電場によって高効率に真空中に低速イオンとして取り出すガスセル装置である。2015 年 9 月に上記装置の主要な開発者である和田が KEK 短寿命核グループに移動し、以降仁科との協力研究の柱として、SLOWRI 施設の開発と MRTOF 装置の開発・実験遂行が共同で行われている。

SLOWRI ガスセルの第一プロトタイプは、RIPS 施設に設置され、高周波カーペットによる初の低速 RI ビーム生成に成功し[M. Wada *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods B 204, 570 (2003)]、ベリリウムの全ての奇核同位体の精密超微細構造分光[A. Takamne *et al.*, Phys. Rev.

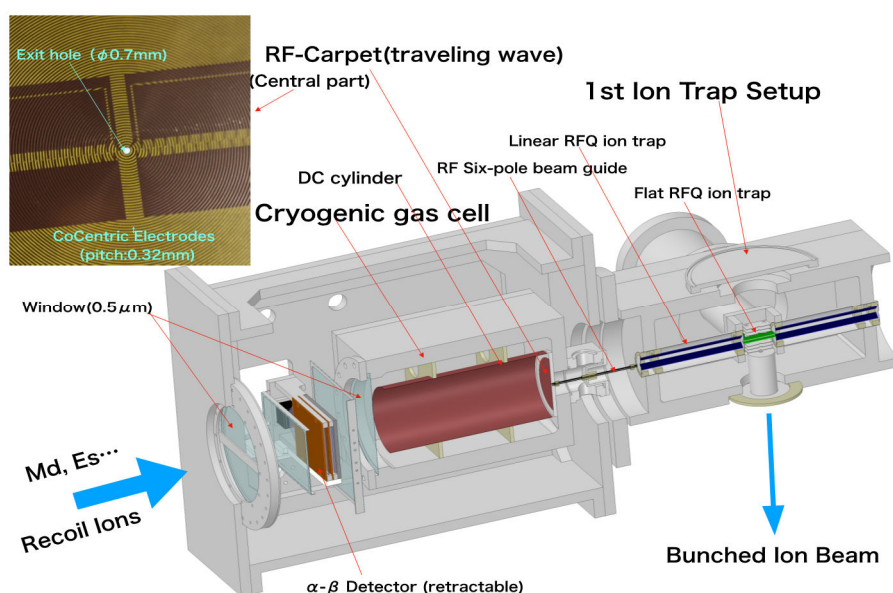


図 9: 進行波型高周波カーペットを使用した冷凍型ガスセル装置。

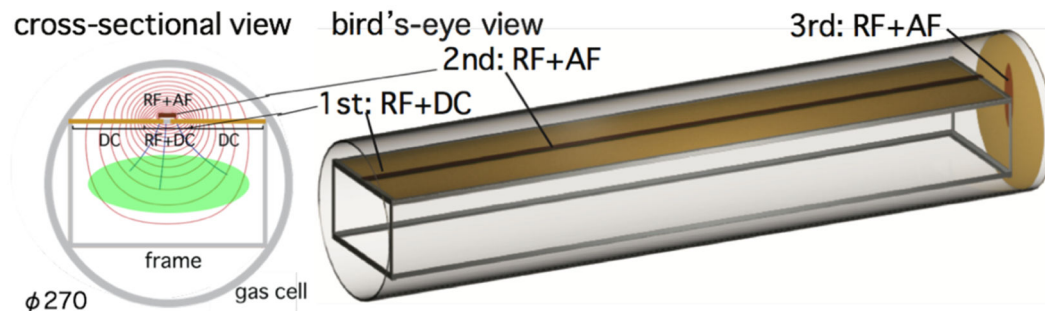


図 10: SLOWRI 施設用雨樋式高周波カーペットガスセル装置概念図。

Lett. 112, 162502 (2014)他]や MRTOF-MS による ^8Li の質量測定[Y. Ito *et al.*, Phys. Rev. C 88, 011306R (2013)]を実施した。この時期は偶然にも、独立して開発されてきた世界の他の 2 箇所(CERN-ISOLDE、ドイツ GSI)の MRTOF がオンライン質量測定を成功させた時期と重なる。

第二プロトタイプは、気体充填型反跳核分離器 GARIS 装置に設置した。このガスセルは初めて進行波型の同心円高周波カーペットを実用化し[F. Arai *et al.*, Int. Journal of Mass Spectrometry 362, 56 (2014)], 70 K 程度まで冷却することにより二価のイオン状態で高効率で引き出されることを実証した[P. Schury *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 407, 160 (2017)](図 9)。

SLOWRI 施設は、BigRIPS による質量数原子番号比(A/Z)と中性子数(N)の粗分離と、低速ビーム化後の質量分離の組み合わせにより、他の方式の RI に比べて格段に高純度の RI ビームを提供する。より高純度の RI ビームを得るために、MRTOF-MS を同重体分離器として利用する計画で整備が進んでいる。また、基本的に SLOWRI の低速 RI ビームは 20 keV の DC ビームとして実験室に提供されるが、イオントラップ実験やコリニアレーザ分光のためにバンチ化したビームも必要である。このための新しい冷却バンチ化装置としてガスセルクーラーバンチャーを開発している。

第三のプロトタイプは、後述するように、BigRIPS の後段に位置する ZeroDegree スペクトロメータのビームダンプに設置して、高エネルギー RI ビームを減速冷却してイオントラップに補修し、MRTOF 質量分光器で第一段階の網羅的質量測定を実施する計画である。ここで用いるガスセル装置は、新たに考案した「雨樋式高周波カーペット」方式(図 10)を採用し、大型ガスセルからの高速引き出しと、高強度入射ビームに対しても高効率を保つことが期待されている。このプロトタイプガスセルは SLOWRI 施設のガスセルの 3 分の 1 の長さに相当し、この結果をもとに最終的な SLOWRI ガスセル装置を完成させる予定である。

SLOWRI 施設には、高周波カーペットガスセルを用いた汎元素に対応するガスセルに加えて、BigRIPS のスリットで破棄されている RI を救出して低エネルギー RI ビームに変換する PALIS ガスセル装置が開発されている。この装置は他の BigRIPS を利用する実験のパラサイトとして常に低エネルギー RI ビームを提供することが期待されている。PALIS ガスセルは、1気圧のアルゴンガスを充填したもので、一旦中性化した RI をレーザーで共鳴イオン化して元素

選択的に RI を引き出す装置であり、KISS 装置と同様の仕組みである。PALIS ガスセルから引き出されバンチ化した RI イオンは電位変換空洞によって 20 keV の低速ビームに変換され、SLOWRI 実験室へと導かれる。この電位変換空洞は MRTOF になっており、将来ここで質量測定ばかりでなく、質量を標識とした複数同位体の同時共鳴イオン化分光も実施する計画である。

2-2-2 MRTOF 質量分離器

短寿命の重い原子核を能率よく高精度・高確度質量測定可能な装置を目指して開発が進められてきたのが多重反射型飛行時間測定式質量分光器(Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrograph, MRTOF-MS)である[H. Wollnik *et al.*, Int. J. Mass Spectrometry 96, 267 (1990)、P. Schury *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 335, 39 (2014)]。この装置はイオントラップに静止した状態からスタートする。被測定イオンを一对の静電ミラー管からなる飛行管にパルス入射し、飛行管内を 100 回程度往復させた後、外に飛び出させて検出器で総飛行時間を測定し、その値から質量を決定する(図 11)。典型的な飛行時間は 2~10 ミリ秒と短く、半減期 1 秒以下の短寿命核と整合性が高い。また、ペニングトラップと違って重いイオンに対する困難も無い。もっとも重要な特徴は、同時に多数の核種を飛ばしても飛行時間のヒストグラムに自動的にそれぞれのピークが成長することである。共鳴法で無いので何も掃引する必要が無い。そのため、同時に複数の核種を測定でき、極めて能率の良い測定が可能となる。図 12 は質量数 204 の 4 つの同重体(Fr, Rn, At, Po)と質量数 205 の 5 つの同重体(Fr, Rn, At, Po, Bi)が同時に一つの時間スペクトルで測定されている様子を示している[P. Schury *et al.*, Phys. Rev. C 95, 011305 (2017)]。多重反射型システムの宿命として、周回遅れとなったイオンが偽のピークをつくる事がある。これを避けるために必ず周回数を変えた測定を行い、対象とするピークが正しい周回数であることを保証している。

同時に多数の核種の質量測定ができるという MRTOF 質量分光器の特徴は、生成量が低

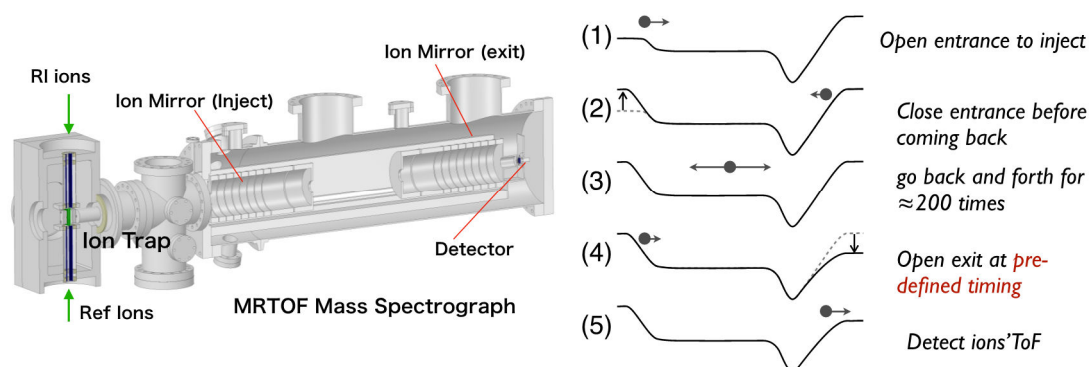


図 11: MRTOF 質量分光器の構造と測定手順。

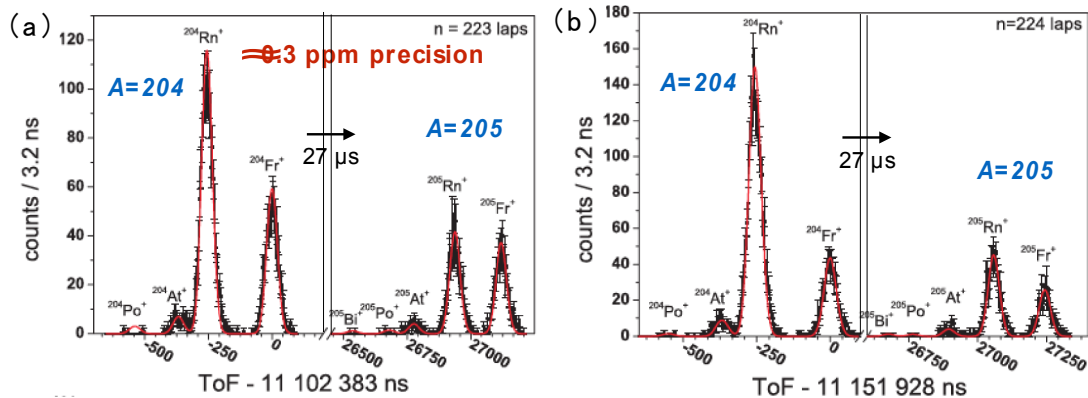


図 12: 質量数 204 および 205 の複数の同重体を単一スペクトルで同時に測定。(a)および (b)はそれぞれ周回数 223 および 224 の設定で測定したもの。

い目的の核種の測定時に、より安定核に近く生成量が大な核種は高統計(>10,000 イベント)で測定できて超高精度で質量を決定する機会を生む。例えば高統計の ^{65}Ga の測定では同時に測定された安定核 ^{65}Cu を参照して質量を 3.5×10^{-8} の高精度で測定し、質量超過 $ME = -62657.3 (2.1) \text{ keV}/c^2$ を得た[S. Kimura *et al.*, Int. J. Mass Spectrometry 430, 134 (2018)]。この値はより高確度・高精度にペニングトラップ質量分析器で $ME = -62657.5 (8) \text{ keV}/c^2$ と測定されている。我々が $2.1 \text{ keV}/c^2$ の精度で測定した値は真の値から $0.2 \text{ keV}/c^2$ しかずれていないことに相当する。これは我々の MRTOF 質量分光器が 3.5×10^{-8} という超高精度測定においても依然としてそれに相当する高確度を保っていることを意味している。これまでに約 80 核種の測定を行ったが、幾つかの例外を除いて、文献の既測定値と 1σ 以内で合致していることを確認している。例外の一つは ^{81}Br という安定核である。MRTOF の測定で 7×10^{-8} の相対精度で質量を測定したが、文献値と 2σ 以上ずれている。しかしその文献値を得た過去の測定を確認すると、 ^{82}Kr を起点にして ^{82}Br の β 線エンドエネルギーと NaI 検出器で測定した γ 線のエネルギーの積算、および、 $^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$ の反応 Q 値とから間接的に求めていたことがわかった。このように、安定核であっても古い間接測定によって決められた不正確な値が依然として残っているため、質量が既知の核を含めて網羅的に高精度直接測定することが求められている。

この実験では、安定核の同重体イオンが同時に高強度で生成され、高統計でスペクトルに入っていたため、自動的に質量参照イオンとして使うことができた。しかし、一般には必ずしも適切な参照イオンが同時測定できるとは限らない。そこで常に外部イオン源(アルカリ金属の表面電離イオン源や電子スプレー分子イオン源)からのイオンを参照イオンとして被測定イオンと同時に測定するしくみを開発した[M. Wada *et al.*, PCT/JP2017/007769]。これにより、たとえ長時間測定においてゆらぎがあったとしても常に参照イオンとの比として測定するために高精度・高確度を保つことが可能となった。

2-2-3 SLOWRI, MRTOF に関連する共同研究実験課題

2015 年度から 2017 年度までの NP-PAC において、MRTOF-MS と SLOWRI を用いた共同研究として下記の 9 件の実験課題が採択された。GARIS-II+MRTOF-MS 実験 7 件、PALIS 実験 1 件、網羅的質量測定 1 件である。以下、この課題のもとで得られた成果を中心に報告する。

1. NP1512-LINAC70R1 (実験代表者:P. Schury, RIKEN)
2. NP1512-LINAC23 (実験代表者:S. Kimura, Tsukuba Univ.)
3. NP1512-LINUAC24 (実験代表者:Y. Ito, RIKEN)
4. NP1612-LINAC24R1 (実験代表者:Y. Ito, RIKEN)
5. NP1612-LINAC07R2 (実験代表者:P. Schury, KEK-WNSC)
6. NP1712-LINAC31 (実験代表者:M. Wada, KEK-WNSC)
7. NP1712-LINAC07R3 (実験代表者:P. Schury, KEK-WNSC)
8. NP1712-RIBF166 (実験代表者:T. Sonoda, RIKEN)
9. NP1712-RIBF167 (実験代表者:M. Wada, KEK-WNSC)

(1) SHE-Mass 実験

新元素ニホニウムの合成で知られる理化学研究所の GARIS は、気体充填型の反跳イオン分離器であり、融合反応で生成された反跳イオンと一次ビームを分離し、反跳イオンの荷電状態や速度の広がりガス中の平衡荷電数と速度の相関によって補填されることによって効率よく集める装置である。この 2 号機に相当するのが GARIS-II であり、より大きな立体角で融合反応生成物を捕集できる[D. Kaji *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 317, 311 (2013)]。

この分離器からの高速核融合反応生成物をガスセルで熱化し、イオントラップに捕集して MRTOF 質量分光器で質量測定するための装置が S HE-Mass 装置である(図 13)。ガスセルには 100 mbar 相当のヘリウムガスを充填し、100 K 程度まで冷却して不純物を取り除く。実際 260 K 以下に冷えると 2 価のイオン(アルカリ金属の Fr、希ガスである Rn、ハロゲンの At であっても)が優勢であることがわかった[P. Schury *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B 407, 160 (2017)]。ガス中で熱化したイオンは静電場でガスセルの出口側の面に向かって輸送され、出口面に置かれた高周波カーペットによる不均一高周波電場によってチャンバーや電極に失われることなく、ガスセルの外側に引き出すことができる。引き出されたイオンは高周波六重極イオンビームガイドを経て線型高周波四重極イオントラップに蓄積・冷却後、平板型イオントラップに送られ、そこで再度冷却後、パルスイオンとして打ち出される。通常の構成ではここで MRTOF に入射するが、GARIS-II の焦点面箱は外壁にギリギリの狭いところに位置し、MRTOF 装置を置くことが困難であった。そこで、GARIS-II の地下室に MRTOF を置き、上から 1.7 keV のパルスイオンとして打ち出し、二台のパルスドリフト管を使って静電減速して再度線型高周波四重極イオントラップにイオンを蓄積・冷却してから MRTOF に入射する構造をとった。最初の実験

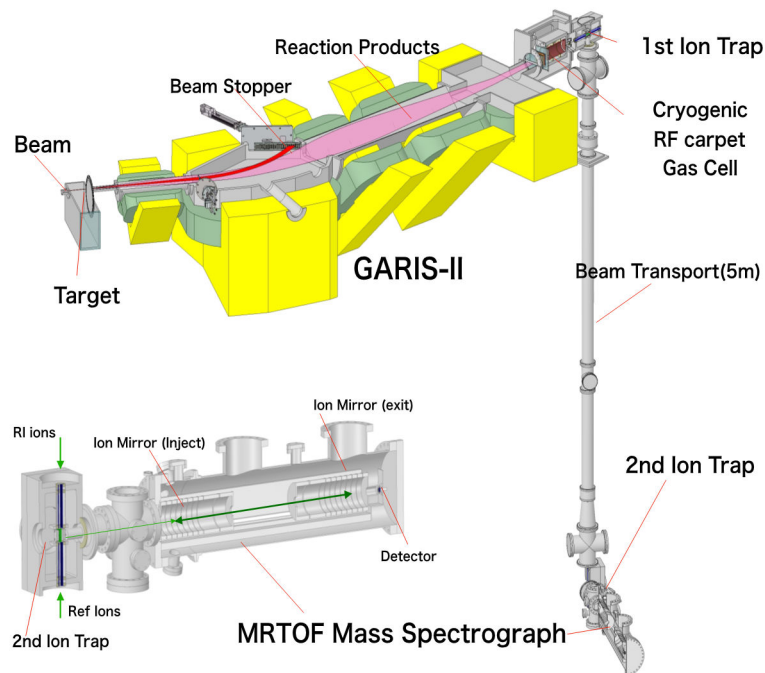


図 13:SHE-Mass 装置俯瞰図。

を行った時点でこの二段階トラップの部分の最適化が不十分で、GARIS-II から供給されるビームから MRTOF で検出されるまでの全効率として 1~2%に留まっていた。

(2) 超ウラン元素の質量測定

GARIS-IIとSHE-Mass装置を用いて、10個の超ウラン元素(^{246}Es 、 ^{251}Fm 、 $^{249-252}\text{Md}$ 、 ^{254}No)を含む 80 核種の質量測定に成功した(図 14)。測定した超ウラン元素の内、 ^{246}Es 、 $^{249, 250, 252}\text{Md}$ は初めて実験的に質量測定が成功した[Y. Ito *et al.*, Phys. Rev. Lett. 120, 152501 (2018)]。Md 同位体は β 崩壊が優勢で、 α 崩壊連鎖を止めているため、 α 線エネルギーにより重い元素の同位体質量の間接的な決定もブロックしていた。今回の $^{249, 250}\text{Md}$ の測定から、 ^{253}Lr 、 ^{254}Lr 、 ^{257}Db 、 ^{258}Db 、 ^{261}Bh 、 ^{262}Bh 、 ^{266}Mt の質量を間接的に決定できたことになる。

^{254}No は GSI の SHIPTRAP というペニングトラップ質量分析器で Mass Excess として $10 \text{ keV}/c^2$ の精度で測定された[M. Block *et al.*, Nature 463, 08744 (2010)]のに対し、MRTOF では $58 \text{ keV}/c^2$ の精度で測定された。またその質量の値(Mass Excess)の差は $8 \text{ keV}/c^2$ であり、この領域の質量測定においても高確度が検証できた。 ^{254}No は半減期 263 ms のアイソマーの存在が知られており、MRTOF の飛行時間スペクトルにアイソマーが明確に観測されている(図 15)。これも異なる粒子を同時にかつ短時間で測定できる MRTOF 質量分光器の威力である。

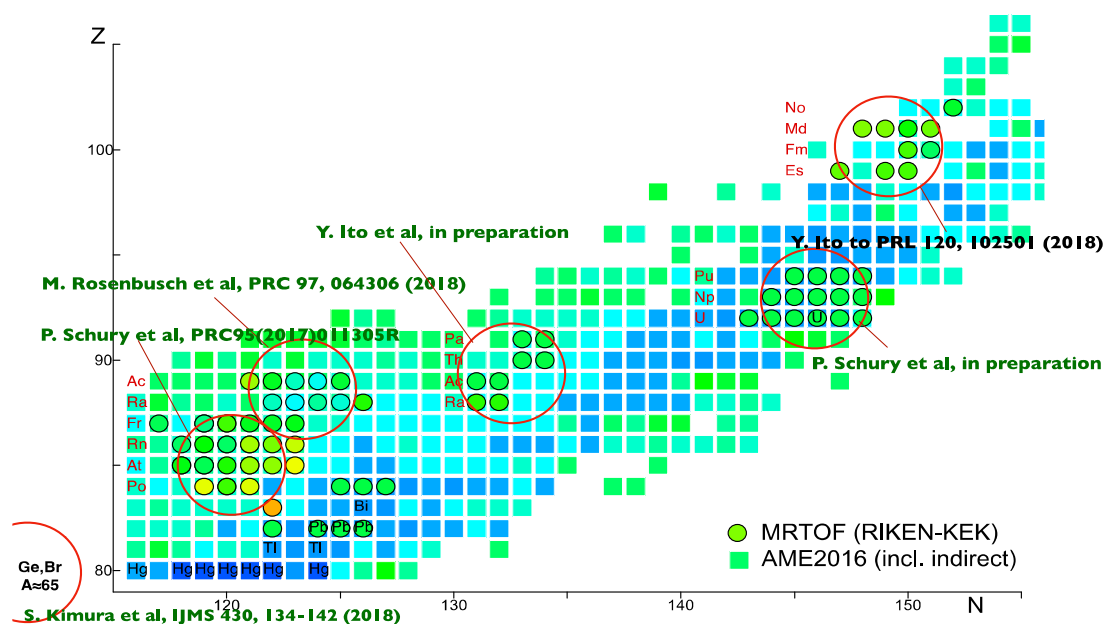


図 14: SHE-Mass 装置で質量測定された原子核。

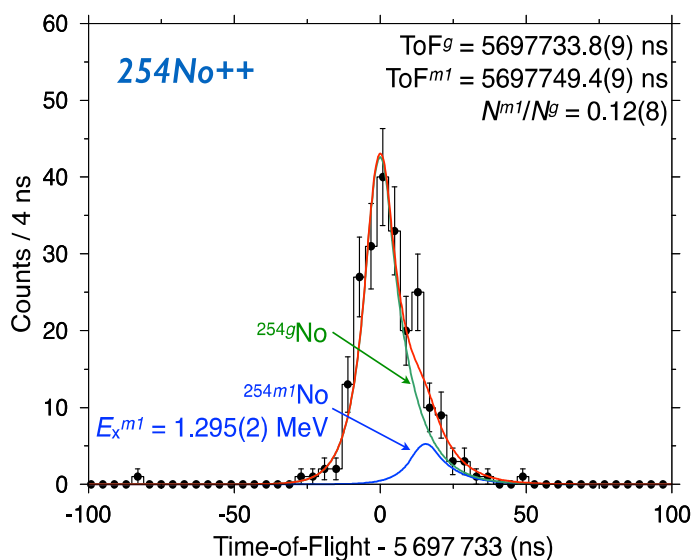


図 15: ^{254}No とアイソマーの TOF スペクトル。

(3) 超重元素の質量測定計画

原子番号が 104 番から 118 番の超重元素は核融合反応によって生成されてきた。その内 113 番の Nh までは、安定核標的を安定核ビームで照射して比較的低い励起エネルギーの「冷たい融合反応」によって生成された。理化学研究所で生成された ^{278}Nh は、 $^{209}\text{Bi} + ^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{278}\text{Nh} + n$ 反応で生成されたが、その断面積は 22 fb と極端に小さく、10 年弱の長

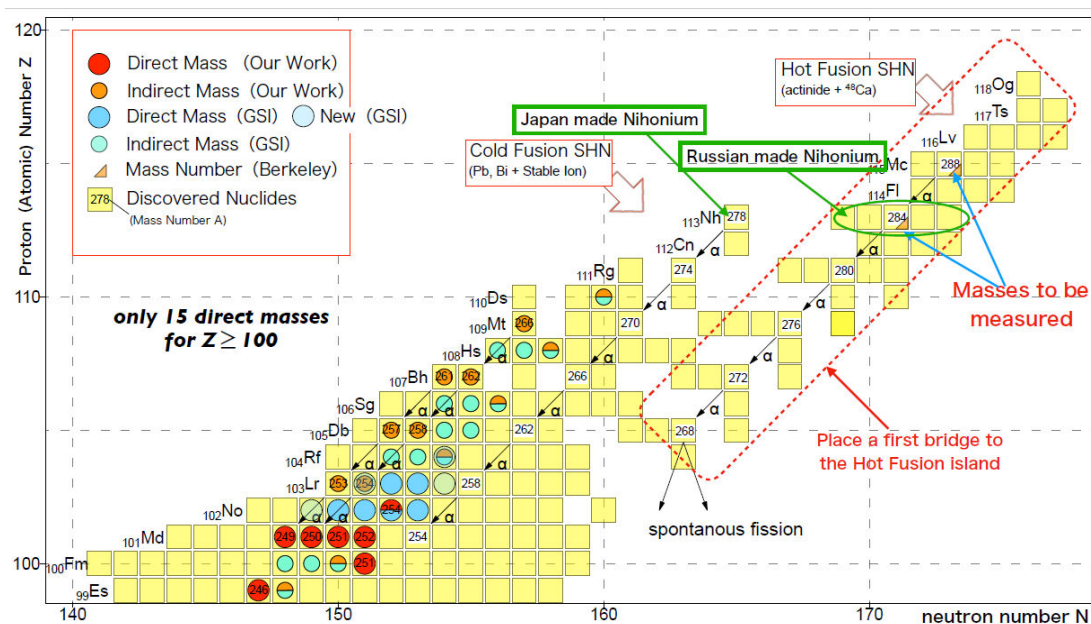


図 16: 超重元素領域の質量測定の状態。

い実験期間を経ても僅か 3 個の Nh 原子が観測されたに過ぎない。しかし、生成された ^{278}Nh は Si 検出器上の同一地点で $^{278}\text{Nh} \rightarrow ^{274}\text{Rg} \rightarrow ^{270}\text{Mt} \rightarrow ^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow ^{254}\text{Md}$ と 6 連続 α 崩壊を繰り返し α 線エネルギーがよくわかっている既知の原子核に到達している[K. Morita *et al.*, J. Phys. Soc. Japan 81, 103201 (2012)]。これによって ^{278}Nh の原子番号と質量数を正確に同定できている(図 16)。

しかしこの極端に小さい断面積の融合反応の延長で 114 番以降の元素を生成するのは現実的ではない。そこでロシアのフレロフ核反応研究所ではアクチノイド標的(U, Pu, Am, Cm, Bk, Cf)に ^{48}Ca ビームを照射し、比較的励起エネルギーの高い「熱い核融合反応」によって 112 番元素から 118 番元素まで生成した[Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 16250 (2012)]。例えば、 $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{288}\text{Mc} + 3n \rightarrow ^{284}\text{Nh} + \alpha$ 反応は 8.5 pb もの大きな反応断面積を持つ。この ^{288}Mc も $^{288}\text{Mc} \rightarrow ^{284}\text{Nh} \rightarrow ^{280}\text{Rg} \rightarrow ^{276}\text{Mt} \rightarrow ^{272}\text{Bh} \rightarrow ^{268}\text{Db}$ と α 崩壊を 5 連続するが、 ^{268}Db は自発核分裂してしまうため既知の原子核に連結していない。これは従来と同じ方法では原子番号の同定はできないことを意味する。しかし、融合反応の前後を通じて荷電粒子(陽子か α 粒子)は一切放出されないという前提が信頼に足ることを複数の同位体の励起関数測定等によって示したとされ、元素名が決定された。

これらの熱い融合反応による超重元素の原子番号をより確実に同定するための試みがある。一つは、 α 崩壊に伴う特性 X 線の測定であり[D. Rudolph *et al.*, Phys. Rev. Lett. 111, 112502 (2013)]、GSI 及びバークレーのグループによって試みられているが、まだ十分な実験データが得られていない。もう一つは、元素の化学的特性を測定して元素を同定する方法で、理化学研究所のグループ等が精力的に実験を行っている[J. Evan *et al.*, Science 345, 1491 (2014)]が現在のところ懸案の Db の同定には成功していない。ごく最近、バークレーのグループは質量

分離器を用いて、 ^{288}Mc と ^{284}Nh の質量数をそれぞれ 1 イベントから決定したとしている [J.M. Gates *et al.*, Phys. Rev. Lett., accepted]。

アクチノイド標的と ^{48}Ca や ^{51}V 、 ^{54}Cr 等の比較的中性子過剰な安定核ビームをもってしても、原子番号 114、中性子数 184 付近にあると予測されている安定の島へは容易に到達できない。いずれ中性子過剰 RI ビームの照射が必須になると考えられているが、大強度の RI ビーム開発にはまだ当分時間がかかる。一方、たとえ生成が実現したとしても予想される半減期が、理論によっては年単位になるほど長寿命であり、従来の放射線検出法では検出さえできない。

我々は、新しい元素の検出および同定法として精密質量測定による方法を提案している。まずこれは放射線に依らないため長寿命原子核とも整合する。さらに、精密質量は質量数だけでなく原子番号も識別できる量である。例えば質量数 288 の同重体の質量超過(Mass Excess)の違いの理論的予測は原子番号が1つ変わると約 4 MeV 異なる。これは 14 ppm の相対質量差に相当するため、質量を 14ppm 以上の精度で測定できれば原子番号を決定できることを意味する。

理化学研究所の 119、120 番元素合成計画のための加速器の増強に伴い、GARIS-II は、リングサイクロトロンの実験室に移動した。ここは焦点面箱付近が広く、初段のイオントラップから直接 MRTOF に接続することができるので、全効率 10%以上は確実に達成できる見込みである。不利な点としては、これまで 2 段のトラップ間のパルスビームに対して、BN ゲートと呼ばれる TOF で質量分離を行う素子を入れて、不純物イオンを大幅に削減できていた機能が失われる事がある。新しい SHE-Mass 装置では、MRTOF の TOF 検出器を α 線検出もできる Si-PIN ダイオードで構成し、イオンのタイミング検出後、 α 崩壊連鎖を起こすことを検出すること、さらに GARIS-II の焦点面箱に置かれた TOF 検出器で重い融合反応生成物の飛来を同定した事象との相関をとることでバックグラウンドを大幅に抑制できる見込みである。

実績のある $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}\rightarrow^{288}\text{Mc}+3n$ 、 $^{287}\text{Mc}+4n$ 反応によってモスコビウム同位体を生成し、それらを直接測定、さらに寿命の短い ^{287}Mc ($T_{1/2} = 32\text{ ms}$)をガスセル中で α 崩壊させた後、 ^{283}Nh の測定も可能である。 ^{288}Mc については実質1ヶ月のマシンタイムで最低 10 イベントが MRTOF の検出器で観測でき、2 ppm の精度で質量が決定できる勘定である。この質量測定計画は 2017 年 12 月の課題採択委員会で特別に優先度の高いとされている S グレードで採用され 45 日間のビームタイムが認められている。

(4) 網羅的質量測定計画

MRTOF 質量分光器の効能率性・短寿命核への適性を有効に生かして理化学研究所の RIBF で生成できるあらゆる原子核の質量測定を目指し、複数のガスセル装置と MRTOF 質量分光器の整備を進めている(図 17)。SHE-Mass 装置を設置した GARIS-II では超重元素領域の原子核に加えて、 $N = Z$ 線上および陽子過剰核の精密質量測定により天体における爆発的要素合成過程の一つである速い陽子捕獲過程(rp-process)の研究が計画されている。KEK の KISS 装置では、多核子移行反応によるある特定の領域(中性子数 $N = 126$ 近傍)の中性子過

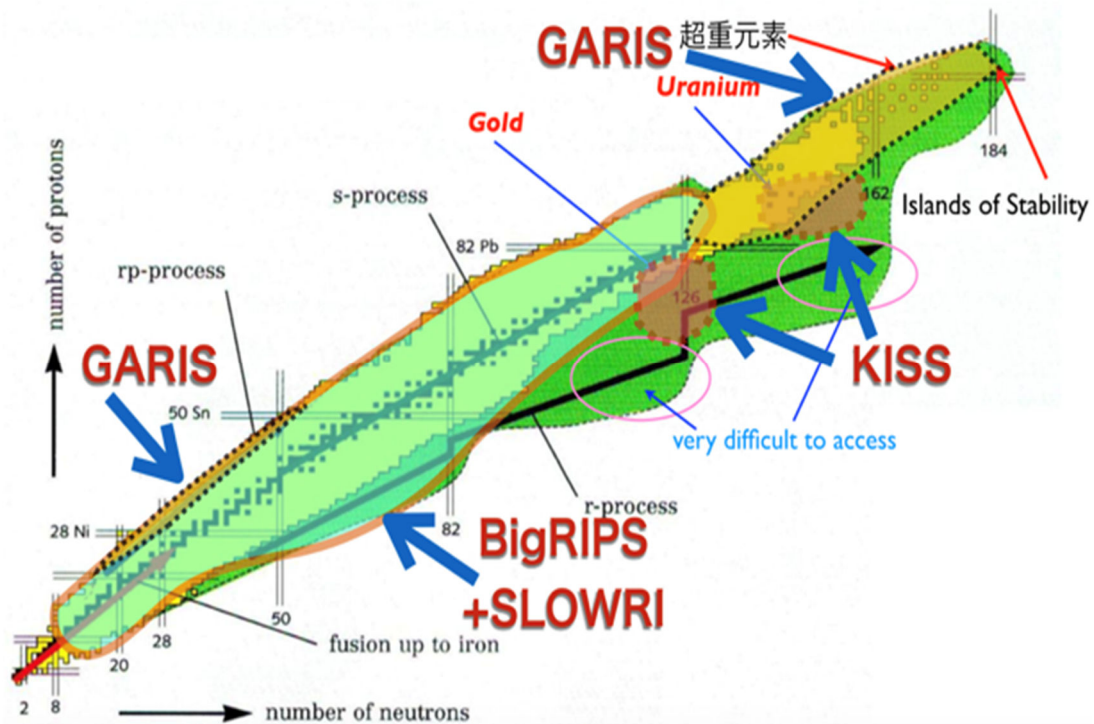


図 17: RIBF における網羅的質量測定施設の分担。

剰核の質量測定を目指して準備が進んでいる。ここでは β - γ 分光による半減期測定の際(崩壊測定のためにビームを停止している期間)で質量測定を同時に実行できるという特徴に加えて、ガスセル内での共鳴イオン化分光実験に質量の標識付けができるようになり、より高効率かつ正確に原子核を同定したレーザー分光が可能になる。

RIBF の主力 RI ビーム生成施設である BigRIPS およびそれに付随する低速 RI ビーム施設 SLOWRI の周辺には複数の装置を設置する計画である(図 18)。最初に実験を開始する計画で製作をすすめているのが ZeroDegree 分析器の末端のビームダンプに設置する SLOWRI の第 3 プロトタイプガスセルに付設する MRTOF 質量分光器である。ここでは、上流で行われる全相互作用断面積測定実験やインビーム γ 分光実験における反応生成物同定後のビームをそのまま質量測定に使用できる。上流の実験グループと互助的に実験を行えるので、Symbiotic 実験として幾つかの異なったコラボレーションの形態が提案されている。BigRIPS のような分離器は、上流実験者が目的とする原子核ばかりでなく、その周辺の原子核が多数混ざったカクテルビームとして供給するため、同時に多数の原子核の質量を測定することが可能な質量分光器にとって最適な環境である。例えば、インビーム γ 実験が ^{79}Ni を使用した場合に想定される質量スペクトルは図 19 のようになる。より強度の高い周辺の原子核は高い統計で測定することが可能で、 3×10^{-8} 程度の高精度で質量を決定できることになる。

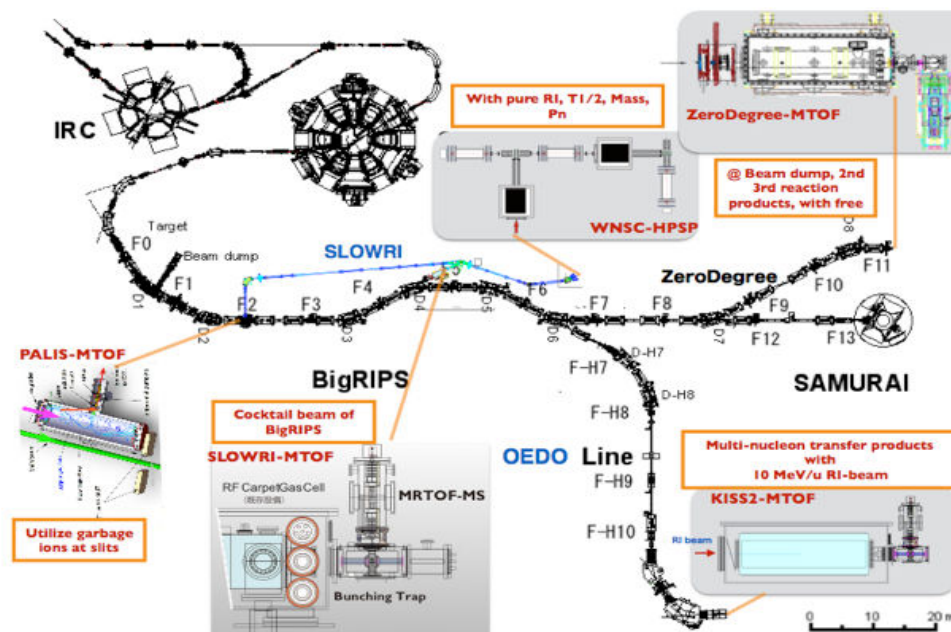


図 18: BigRIPS+SLOWRI 周辺に配置予定の MRTOF 装置群。

Expected TOF Spectrum (simulation)

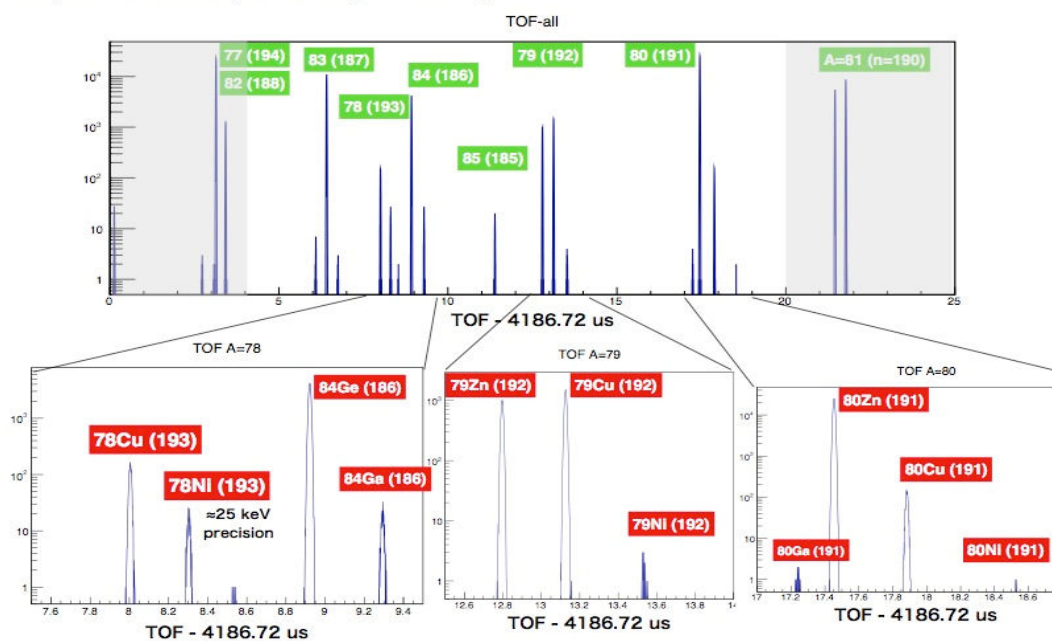


図 19: ^{79}Ni の周辺核同時測定予測スペクトル(括弧内の数字は周回数を示す)。

[3] 研究協力体制

本研究協力協定は、2005 年 7 月 27 日に調印された理研と KEK の包括的な連携・協力の推進に関する基本協定に基づいて 2009 年 10 月 1 日に締結され、2014 年 4 月 1 日に更新されたものである。

研究協力設備の開発・整備および研究内容に関する報告、研究協力体制や研究協力の実施に伴う日常的な諸問題の協議・検討を行うために、2012 年より定期的に素核研/仁科センター担当者会議を開催している。

3-1 KEK 共同利用による研究協力

KISS は KEK の共同利用制度に基づいて 2016 年度より外部ユーザーの利用を可能としている。外部ユーザーの日常的研究活動のサポート、共同利用装置の恒常的維持・管理・運転のため、2015 年 4 月に理研和光キャンパスに和光原子核科学センターが設置され、研究協力体制が強化された。本協定に基づく仁科センターと素核研との共同研究を推進するために「研究連携従事者制度」が確立しており、外部ユーザーによる共同利用装置を用いた実験課題の遂行も本制度のもとで円滑に実施されている(参考資料3を参照)。

2015 年 10 月 30 日に「原子核課題の募集・採択に関する覚書」を仁科センター、東京大学原子核科学研究センター、および素核研の三機関で締結し、2015 年 12 月より NP-PAC を三機関の連携・協力の下で運営している。研究協力設備の KISS は RIBF において活用される実験設備と位置付けられ、実験提案は NP-PAC で審議されている。三機関の連携・協力体制に関する報告・協議のために CNS/素核研/仁科センター合同担当者会議を定期的に行っている。

3-2 外部ユーザー支援および各種共同研究

KISS、SLOWRI、MRTOF-MS に共通する低速不安定核ビームによる研究分野の拡大、研究プロジェクトの意識的開拓、研究戦略の確立、若手研究者の育成などを目的として、2015 年に国際規模のユーザーコミュニティ SSRI-PNS (Stop and Slow RI - Precise Nuclear Spectroscopy) collaboration を組織し、理研 RIBF 施設での低速不安定核ビームによる核分光実験に関して NP-PAC へ申請予定、または潜在的な実験課題の議論を行うための会合を開催している。また、KISS で用いているガス内レーザーイオン化分光(In-gas laser ionization and spectroscopy, IGLIS)に関して最新技術の動向と、これを基にした研究・開発成果の効果的な情報交流を行うために 2012 年に発足した国際的ネットワーク IGLIS-NET は、現在国内外 16 機関の研究者から構成されており、ウェブやメーリングリストでの情報発信を行うとともに、各機関での研究成果をまとめたニュースの発行を 2013 年より毎年行っている。

低エネルギー不安定核ビームに関する研究を発展させるため、韓国(Institute for Basic

Science, IBS および Seoul National University, SNU)、中国(Institute of Modern Physics, IMP)、ロシア(Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Science)との共同研究をこの期間において新たに発足させた。また KEK はヨーロッパと日本の研究施設利用ユーザーに対する滞在費支援制度(略称:ENSAR2)の賛同機関となった。国内においては、京都大学複合原子力研究所、JAEA、徳島大学、名古屋大学、金沢大学、九州大学との共同研究が発足された。

3-3 「低エネルギー不安定核ビーム」における将来計画への寄与

本協力研究は、2013 年度および 2017 年度に策定・改正された KEK ロードマップ上で「元素合成過程の解明を目指した不安定核に関する研究」として位置付けられている。その具体的実行性に関して、2016 年度に開催された国際レビュー(KEK-PIP)では本協力研究に基づく将来研究プランを提案し、高評価を得るとともに競争的資金によるさらなる研究展開が推奨された。

RI ビーム科学全域に関わる将来計画として、理研、CNS、KEK、RCNP 合同で「RI ビームファクトリーの高度化による重元素科学の躍進」を学術会議第 23 期マスタープラン重点大型研究計画に提案した。残念ながら重点大型計画には選ばれなかったが、将来計画実現に向けてさらに活動が続ける。

[4] 研究会、セミナーなどの開催

4-1 研究会

KEK が主催・共催した研究会で、研究協力設備、理研との共同研究が話題の中心となったものを挙げる。

1. 第 8 回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 (理研と KEK の共催)、2016 年 3 月 4 日～5 日、理研。
2. 第 9 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」&「2017 超重元素の科学研究会」合同研究会 (JAEA と KEK の共催)、2017 年 3 月 5 日～6 日、JAEA 東海。

4-2 セミナー

KEK が主催・共催したセミナーで、研究協力設備、理研との共同研究に関わるものを挙げる。

1. つくば不安定核セミナー: 小浦寛之、「原子核を概観する ～原子核質量が支配する原子核崩壊～」、2015 年 6 月 10 日、筑波大学、つくば。
2. つくば不安定核セミナー: 西村俊二、「RIBF における不安定核の崩壊測定と重元素合成」、2015 年 9 月 2 日、筑波大学、つくば。
3. つくば不安定核セミナー: 藤田佳孝、「ガモフ・テラー遷移の研究から見える原子核物理」、2016 年 1 月 21 日、東京理科大学、野田。
4. つくば不安定核セミナー: 中田仁、「Evidence for three-nucleon interaction in isotope shifts of $Z = \text{magic nuclei}$ 」、2016 年 5 月 11 日、筑波大学、つくば。
5. つくば不安定核セミナー: 下浦亨、「RI ビームによる核応答と核反応」、2016 年 10 月 7 日、筑波大学、つくば。
6. つくば不安定核セミナー: 宇津野穰、「二核子配位のガモフテラー遷移で探る陽子中性子対相関の性質」、2017 年 3 月 7 日、筑波大学、つくば。
7. KEK WNSC seminar: P.M. Walker, “Isomers and shape coexistence in neutron-rich nuclei approaching the $N = 126$ shell closure”, Jul. 5, 2017, RIKEN.
8. つくば不安定核セミナー: 渡邊寛、「希土類中性子過剰核の崩壊特性と低エネルギー励起順位構造」、2017 年 7 月 26 日、筑波大学、つくば。
9. KEK WNSC seminar: A. Kalimov, “Geometry and potential optimization in the electrostatic TOF systems”, Nov. 28, 2017, RIKEN.

10. つくば不安定核セミナー: 久徳浩太郎、「GW170817」、2018 年 1 月 17 日、筑波大学、つくば。
11. KEK WNSC seminar: R. Ringle, “Advancing Penning trap mass spectrometry of rare isotopes at the LEBIT facility”, Jul. 2, 2018, RIKEN.

4-3 SSRI-PNS collaboration meeting

理研と KEK の共催で SSRI-PNS collaboration meeting を開催し、KISS、SLOWRI および GARIS での核分光実験に関して NP-PAC へ申請予定、または潜在的な実験課題の議論を行っている。これまでに開催した SSRI-PNS collaboration meeting を挙げる。

1. SSRI-PNS collaboration meeting, Sep. 3 – 4, 2015, RIKEN.
2. SSRI-PNS collaboration meeting 2016, Sep. 2 – 3, 2016, RIKEN.
3. SSRI-PNS collaboration meeting 2018, Sep. 4, 2018, RIKEN.

[5] 結語と展望

素核研と仁科センターの研究協力は、研究協力設備の開発・整備、それらを用いた実験の実施、当該学術領域に関する研究会の開催など、広く包括的に行われている。この5年間の研究協力において、これらの活動に関して期待された成果が得られた。2009年に研究協定を締結して以来、両者は協力して研究協力設備の開発・整備を進め、本格稼働させた設備により低エネルギー不安定核ビームによる基礎科学、応用科学分野の研究成果が得られた。

2015年には和光原子核科学センターが発足し、仁科センター、東京大学原子核科学研究センター、素核研の三機関が連携・協力してNP-PACを開催することが取り決められ、KISSの共同研究に関する実験課題が審査されるなど、協力体制がますます強化されている。

協力研究に関わる研究分野を効果的に発展させるための国際規模のコミュニティSSRI-PNS collaborationや国際ネットワークIGLIS-NETを組織・運営して情報交流・発信を行うとともに、国内外機関との共同研究を発足させ、当該研究領域の開拓を推し進めている。

国内外の研究者を対象とした研究会やセミナーを開催し、広く原子核物理研究者と連携して低エネルギー不安定核ビームによる学術研究の議論を展開している。両者の連携・協力で開催しているSSRI-PNS collaboration meetingでは、低エネルギー不安定核ビームを用いた核分光実験に関してNP-PACに先立って広く実験提案を募集し、実験内容を吟味することで実験の実現性の向上や新たな実験課題の開拓に努めている。

研究協力の実施にともなう諸問題を協議、検討する目的で、仁科センター/素核研担当者会議、および仁科センター/東京大学原子核科学研究センター/素核研担当者会議が定期的に開催されている。両機関および三機関の協議による良好な関係を継続させることは今後の更なる研究協力の発展への支えとなる。これまでの研究協力がもたらした研究成果、研究協力設備の実績に基づき、仁科センターと素核研は、今後の更なる低エネルギー不安定核ビームによる学術研究の飛躍的発展を目指して、より広範かつ密接な連携・協力を行うことが重要であり、それぞれの学術的使命の達成にも資するものである。

[6] 研究協力のあゆみと成果の概要

6-1 研究協力のあゆみ

ここでは、本研究協力全体のあゆみを一括するため、基本協定締結時からの主要な出来事をまとめる。

- 2009.10.1** 独立行政法人理化学研究所仁科加速器研究センターと大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所との「低エネルギー不安定核ビーム」に関する研究協力協定の締結。これは2005年7月27日に締結した理化学研究所と高エネルギー加速器研究機構との間における連携・協力の推進に関する基本協定書に基づく。
- 2009.12.3** 第6回 RIBF 原子核実験課題に関する採択委員会(NP-PAC:2009年12月3日～4日)にて KISS プロジェクトの概要説明と元素選択型質量分離装置(KISS)の建設を提案。了解を得る。
- 2010.3.1-2** 第6回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会を東工大で開催(東工大と共催)。
- 2010.3.8-10** The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG10)を大阪大学 RCNP で開催(RCNP、RNC、CNS、NAO、KEK、JAEA、Konan U.の共催)。
- 2010.9.22** 第1回 KISS 検討会を KEK つくばにて開催。
- 2011.2.1** 「低エネルギー不安定核ビーム科学」に関する研究連携協定書を締結。
- 2011.3.5** 第2回 KISS 検討会を仁科センターにて開催。
- 2011.4.1** 仁科センターRIBF 棟に大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所 RNB 研究拠点を設置。
- 2011.10.18** 第1回連絡協議会および「低エネルギー不安定核ビーム科学」研究連携記念式典・祝賀会を開催。「元素選択型質量分離装置(KISS)共同研究」に関する覚書を締結。
- 2011.11.14-17** The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11)を仁科センターで開催(RNC、CNS、KEK、RCNP、Konan U.の共催)。
- 2012.3** 小柳津充広専任技師が退職。

- 2012.6.6** 第1回素核研—仁科センター共同研究担当者会議(以降2～3月に一度の開催)。
- 2012.11.13** 第2回連絡協議会。
- 2012.12.2-7** The 16th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to Their Applications (EMIS2012)を松江市で開催(RNC、KEK、IMPの共催)。
- 2012.12.10-11** Workshop on Low-Energy Radioactive Isotope Beam (RIB) Production by In-Gas Laser Ionization for Decay Spectroscopy at RIKENを仁科センターで開催。
- 2013.11.18-22** The 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12)をつくば市で主催(RNC、CNS、NAO、RCNP、Tsukuba U.、Tohoku U.、IBS、CIAEの共催)。
- 2014.3.3-4** 第7回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会を仁科センターで開催(RNCとの共催)。
- 2014.6** 今井伸明助教が東大CNSに准教授として転出。
- 2014.6.1-6** 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014)を東京大学で開催(後援)。
- 2014.8.7-8** 宇宙核物理連絡協議会が主催する「宇宙核物理実験の現状と将来」研究会をRCNPで開催(後援)。
- 2015.1** 鄭淳讃教授が韓国IBSにRISPプロジェクトディレクターとして転出。
- 2015.4** 仁科センターRIBF棟にKEK和光原子核科学センター(WNSC)が発足。宮武宇也教授がセンター長に着任。
- 2015.5.20** 合同連絡協議会(仁科センター/東大CNS/KEK素核研)。
- 2015.6** 垣口豊技師が着任。
- 2015.8** 石山博恒研究機関講師が韓国IBSに研究員として転出。
- 2015.9** 井澤真知子研究支援員が着任。
- 2015.9** 和田道治教授が着任。
- 2015.9.3-4** Collaboration meeting on Stop and Slow RI-Precise Nuclear Spectroscopy (SSRI-pns2015)を仁科センターで開催。

- 2015.10.30** 「原子核課題の募集・採択に関する覚書」を締結(仁科センター、東大原子核科学研究センター、高エネ機構素粒子原子核研究所)。
- 2015.6.29** 「大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所元素選択型質量分離装置共同利用実験課題の審査について」(素粒子原子核研究所長裁定)。
- 2015.12.3-5** RIBF 第16回 NP-PAC を共催。
- 2016.2.22-24** 宇宙核物理連絡協議会が主催する「元素合成」研究会を国立天文台で開催(後援)。
- 2016.3.4-5** 第8回停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会を仁科センターで開催(RNC との共催)。
- 2016.1.1** Schury, Peter 助教が着任。
- 2016.6.19-24** 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016)を新潟市で開催(後援)。
- 2016.9.2-3** Collaboration meeting on Stop and Slow RI-Precise Nuclear Spectroscopy (SSRI-pns2016)を仁科センターで開催。
- 2016.12.1-3** RIBF 第17回 NP-PAC を共催。
- 2017.3.5-6** 「第9回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」 & 「2017 超重元素の科学研究会」合同研究会を JAEA 東海で開催(JAEA との共催)。
- 2017.7.20-21** ULIC 後援宇宙核物理連絡協議会共催「X 線天体と元素合成を中心とする宇宙核物理研究会」を仁科センターで開催(後援)。
- 2017.12.7-9** RIBF 第18回 NP-PAC を共催。多重反射型質量分離装置による網羅的質量測定プロジェクトの紹介と複数装置の製作・開発を提案し、了解を得る。
- 2018.9.4** Collaboration meeting on Stop and Slow RI-Precise Nuclear Spectroscopy (SSRI-pns2018)を仁科センターで開催。

6-2 成果の概要

本研究協力によるこの5年間の成果の発表件数・および学位取得件数は以下の通りである。
詳細は参考資料を参照のこと。

原著論文	36
国際会議等プロシーディング	17
国際会議等発表	83
日本物理学会発表 (日米合同会議を含む)	14
学位取得者	修士 1 名、博士 3 名
共同利用課題執行数 (延べ) (2018 年度の見込みを含む)	8

参考資料1

Publication List

A. Original Papers

1. J. Murata, H. Baba, J.A. Behr, Y. Hirayama, T. Iguri, M. Ikeda, T. Kato, H. Kawamura, R. Kishi, C.D.P. Levy, Y. Nakaya, K. Ninomiya, N. Ogawa, J. Onishi, R. Openshaw, M. Pearson, E. Seitaibashi, S. Tanaka, R. Tanuma, Y. Totsuka, T. Toyoda, “The MTV experiment: A test of time reversal symmetry using polarized ^8Li ”, *Hyp. Int.* 225, 193 – 196 (2014).
2. T. Shimoda, K. Tajiri, K. Kura, A. Odahara, M. Suga, Y. Hirayama, N. Imai, H. Miyatake, M. Pearson, C. D. P. Levy, K. P. Jackson, R. Legillon, C. Petrache, T. Fukuchi, N. Hamatani, T. Hori, M. Kazato, Y. Kenmoku, T. Masue, H. Nishibata, T. Suzuki, A. Takashima, R. Yokoyama, “Nuclear structure explored by β -delayed decay spectroscopy of spin-polarized radioactive nuclei at TRIUMF ISAC-1: Intruder configurations in ^{29}Mg and ^{30}Mg , the nuclei in the region of island of inversion”, *Hyp. Int.* 225, 183 – 191 (2014).
3. H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, N. Imai, H. Miyatake, M. Oyaizu, I. Katayama, A. Osa, Y. Otokawa, M. Matsuda, K. Nishio, H. Makii, T.K. Sato, N. Kuwata, J. Kawamura, A. Nakao, H. Ueno, Y.H. Kim, S. Kimura, M. Mukai, “In situ lithium diffusion measurement in solid ionic conductors using short-lived radiotracer beam of ^8Li ”, *Nucl. Inst. Meth. B* 354, 297 – 300 (2014).
4. H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, N. Imai, H. Miyatake, M. Oyaizu, I. Katayama, A. Osa, Y. Otokawa, M. Matsuda, K. Nishio, H. Makii, T.K. Sato, N. Kuwata, J. Kawamura, A. Nakao, H. Ueno, Y.H. Kim, S. Kimura, M. Mukai, “Nanoscale diffusion tracing by radioactive ^8Li tracer”, *Jpn. J. Appl. Phys* 53, 110303 (2014).
5. S.K. Das, H. Ishiyama, Y.X. Watanabe, H. Miyatake, Y. Hirayama, S.C. Jeong, K. Yamaguchi, “Energy resolution and gas gain of an active-target type Gas counter of GEM-MSTPC”, *J. Bangla. Aca. Sci.* 37, 139 – 144 (2014).
6. N. Imai, M. Mukai, J. Cederkall, H. Aghai, P. Golubev, H.T. Johansson, D. Kahl, J. Kurcewics, T. Teranishi, Y.X. Watanabe, “Isobaric analog resonances of ^{31}Mg and the border of the island of inversion”, *Physical Review C* 90, 011302 (2014).
7. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S.C. Jeong, H. Miyatake,

- M. Oyaizu, Y. Matsuo, T. Sonoda, M. Wada, “Ionization cross section measurements for autoionizing states of iridium and rhenium”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 47, 075201 (2014).
8. M. Mukai, Y. Hirayama, S.C. Jeong, N. Imai, H. Ishiyama, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y.X. Watanabe, Y.H. Kim, “In-gas-cell laser ion source for KEK isotope separation system”, *Rev. Sci. Instr.* 85, 02B906 (2014).
 9. P. Schury, Y. Ito, M. Wada, H. Wollnik, “Wide-band mass measurements with a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph”, *Int. J. Mass Spectrom.* 359, 19 – 25 (2014).
 10. F. Arai, Y. Ito, M. Wada, P. Schury, T. Sonoda, H. Mita “Investigation of the ion surfing transport method with a circular rf carpet”, *Int. J. Mass Spectrom.* 362, 56 – 58 (2014).
 11. Y.X. Watanabe, Y.H. Kim, S.C. Jeong, Y. Hirayama, N. Imai, H. Ishiyama, H.S. Jung, H. Miyatake, S. Choi, J.S. Song, E. Clement, G. de France, A. Navin, M. Rejmund, C. Schmitt, G. Polarolo, L. Corradi, E. Fioretto, D. Montanari, M. Niikura, D. Suzuki, H. Nishibata, J. Takatsu, “Pathway for the production of neutron-rich isotopes around $N=126$ shell closure”, *Phys. Rev. Lett.* 115, 172503 (2015).
 12. K. Okada, M. Ichikawa, M. Wada, “Characterization of ion crystals for fundamental science”, *Hyp. Int.* 236, 87 – 94 (2015).
 13. H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, N. Imai, H. Miyatake, M. Oyaizu, A. Osa, Y. Otokawa, M. Matsuda, K. Nishio, H. Makii, T.K. Sato, N. Kuwata, J. Kawamura, A. Nakao, H. Ueno, Y.H. Kim, S. Kimura, M. Mukai, “In situ lithium diffusion measurement in solid ionic conductors using short-lived radiotracer beam of ^8Li ”, *Nucl. Inst. Meth. B* 354, 297 – 300 (2015).
 14. Y. Hirayama, T. Shimoda, H. Miyatake, H. Izumi, A. Hatakeyama, K.P. Jackson, C.D.P. Levy, M. Pearson, M. Yagi, H. Yano, “Unexpected spin-parity assignments of the excited states in ^9Be ”, *Phys. Rev. C* 91, 024328 (2015).
 15. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S.C. Jeong, H. Miyatake, M. Oyaizu, S. Kimura, M. Mukai, Y.H. Kim, T. Sonoda, M. Wada, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. Van Duppen, “Laser ion source for multi-nucleon transfer reaction products”, *Nucl. Inst. Meth. B* 353, 4 – 15 (2015).
 16. G. Lorusso, S. Nishimura, Z. Y. Xu, A. Jungclaus, Y. Shimizu, G. S. Simpson, P.-A. Söderström, H. Watanabe, F. Browne, P. Doornenbal, G. Gey, H. S. Jung, B. Meyer, T. Sumikama, J. Taprogge, Zs. Vajta, J. Wu, H. Baba, G. Benzoni, K. Y. Chae,

- F. C. L. Crespi, N. Fukuda, R. Gernhäuser, N. Inabe, T. Isobe, T. Kajino, D. Kameda, G. D. Kim, Y.-K. Kim, I. Kojouharov, F. G. Kondev, T. Kubo, N. Kurz, Y. K. Kwon, G. J. Lane, Z. Li, A. Montaner-Pizá, K. Moschner, F. Naqvi, M. Niikura, H. Nishibata, A. Odahara, R. Orlandi, Z. Patel, Zs. Podolyák, H. Sakurai, H. Schaffner, P. Schury, S. Shibagaki, K. Steiger, H. Suzuki, H. Takeda, A. Wendt, A. Yagi, and K. Yoshinaga, “ β -Decay Half-Lives of 110 Neutron-Rich Nuclei across the $N = 82$ Shell Gap: Implications for the Mechanism and Universality of the Astrophysical r Process”, *Phys. Rev. Lett.* 114, 192501 (2015).
17. E. Strano, D. Torresi, M. Mazzocco, N. Keeley, A. Boiano, C. Boiano, P. Di Meo, A. Guglielmetti, M. La Commara, P. Molini, C. Manea, C. Parascandolo, D. Pierroutsakou, C. Signorini, F. Soramel, D. Filipescu, A. Gheorghe, T. Glodariu, J. Grebosz, S. Jeong, Y.H. Kim, J. A. Lay, H. Miyatake, M. Nicoletto, A. Pakou, K. Rusek, O. Sgouros, V. Soukeras, L. Stroe, N. Toniolo, A. Vitturi, Y. Watanabe, K. Zerva, “ $^{17}\text{O} + ^{58}\text{Ni}$ scattering and reaction dynamics around the Coulomb barrier”, *Phys. Rev. C* 94, 024622 (2016).
 18. A. Hamaker, M. Brodeur, J.M. Kelly, J. Long, C. Nicoloff, S. Ryan, B.E. Schult, P. Schury, M. Wada, “Experimental investigation of the repelling force from RF carpets”, *International Journal of Mass Spectrometry*, 404, 14 – 19 (2016).
 19. T. Sonoda, T. Tsubota, M. Wada, I. Katayama, T.M. Kojima, M. Reponen, “A gas circulation and purification system for gas-cell-based low-energy RI-beam production”, *Rev. of Sci. Inst.* 87, 065104 (2016).
 20. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, M. Oyaizu, M. Ahmed, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, J.H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Miyatake, “Doughnut-shaped gas cell for KEK Isotope Separation System”, *Nucl. Inst. Meth. B* 412, 11 – 18 (2017).
 21. H. Suzuki, L. Sinclair, P.-A. Söderström, G. Lorusso, P. Davies, L. S. Ferreira, E. Maglione, R. Wadsworth, J. Wu, Z. Y. Xu, S. Nishimura, P. Doornenbal, D. S. Ahn, F. Browne, N. Fukuda, N. Inabe, T. Kubo, D. Lubos, Z. Patel, S. Rice, Y. Shimizu, H. Takeda, H. Baba, A. Estrade, Y. Fang, J. Henderson, T. Isobe, D. Jenkins, S. Kubono, Z. Li, I. Nishizuka, H. Sakurai, P. Schury, T. Sumikama, H. Watanabe, and V. Werner, “Discovery of ^{72}Rb : A Nuclear Sandbank Beyond the Proton Drip Line”, *Phys. Rev. Lett.* 119, 192503 (2017).
 22. Y. Hirayama, M. Mukai, Y. Watanabe, M. Oyaizu, M. Ahmed, Y. Kakiguchi, S. Kimura,

- H. Miyatake, P. Schury, M. Wada, S.C. Jeong, “Ionization cross section, pressure shift and isotope shift measurements of osmium”, *J. of Phys. B* 50, 21, 215203 (2017).
23. T. Nakajima, K. Okada, M. Wada, V.A. Dzuba, M.S. Safronova, U.I. Safronova, N. Ohmae, “Visible spectra of highly charged holmium ions observed with a compact electron beam ion trap”, *Nucl. Inst. Meth. B* 408, 118 – 121 (2017).
 24. P. Schury, M. Wada, Y. Ito, D. Kaji, H. Haba, Y. Hirayama, S. Kimura, H. Koura, M. MacCormick, H. Miyatake, J.Y. Moon, K. Morimoto, K. Morita, I. Murray, A. Ozawa, M. Rosenbusch, M. Reponen, A. Takamine, T. Tanaka, Y.X. Watanabe, H. Wollnik, “Observation of doubly-charged ions of francium isotopes extracted from a gas cell”, *Nucl. Inst. Meth. B* 407, 160 – 165 (2017).
 25. Y. Hirayama, M. Mukai, Y.X. Watanabe, M. Ahmed, S.C. Jeong, H.S. Jung, Y. Kakiguchi, S. Kanaya, S. Kimura, J.Y. Moon, T. Nakatsukasa, M. Oyaizu, J.H. Park, P. Schury, A. Taniguchi, M. Wada, K. Washiyama, H. Watanabe, H. Miyatake, “In-gas-cell laser spectroscopy of the magnetic dipole moment of the $N \approx 126$ isotope ^{199}Pt ”, *Phys. Rev. C*, 96, 014307 (2017).
 26. S. K. Das, T. Fukuda, Y. Mizoi, H. Ishiyama, H. Miyatake, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, S.C. Jeong, H. Ikezoe, M. Matsuda, K. Nishio, T. Hashimoto, “New measurement of the $^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ reaction in a lower-energy region below the Coulomb barrier”, *Phys. Rev. C* 95, 055805 (2017).
 27. P. Schury, M. Wada, Y. Ito, D. Kaji, F. Arai, M. MacCormick, I. Murray, H. Haba, S. Jeong, S. Kimura, H. Koura, H. Miyatake, K. Morimoto, K. Morita, A. Ozawa, M. Rosenbusch, M. Reponen, P.-A. Söderström, A. Takamine, T. Tanaka, H. Wollnik, “First online multireflection time-of-flight mass measurements of isobar chains produced by fusion-evaporation reactions: Toward identification of superheavy elements via mass spectroscopy”, *Phys. Rev. C* 95, 011305(R) (2017).
 28. H. Kawamura, T. Akiyama, M. Hata, Y. Hirayama, M. Ikeda, Y. Ikeda, T. Ishii, D. Kameda, S. Mitsuoka, H. Miyatake, D. Nagae, Y. Nakaya, K. Ninomiya, M. Nitta, N. Ogawa, J. Onishi, E. Seitaibashi, S. Tanaka, R. Tanuma, Y. Totsuka, T. Toyoda, Y.X. Watanabe, J. Murata, “A new measurement of electron transverse polarization in polarized nuclear β -decay”, *Mod. Phys. Lett. A* 32, 1750058 (2017).
 29. K. Okada, Y. Takada, N. Kimura, M. Wada, H.A. Schuessler, “Development of a wavy Stark velocity filter for studying interstellar chemistry”, *Rev. of Sci. Inst.* 88, 083106 (2017).

30. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, M. Mukai, M. Ahmed, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, M. Oyaizu, J. H. Park, P. Schury, M. Wada, H. Watanabe, and H. Miyatake, “ β - and γ -decay spectroscopy of $^{197, 198}\text{Os}$ ”, *Phys. Rev. C* 98, 014321 (2018).
31. Y. Ito, P. Schury, M. Wada, F. Arai, H. Haba, Y. Hirayama, S. Ishizawa, D. Kaji, S. Kimura, H. Koura, M. MacCormick, H. Miyatake, J. Y. Moon, K. Morimoto, K. Morita, M. Mukai, I. Murray, T. Niwase, K. Okada, A. Ozawa, M. Rosenbusch, A. Takamine, T. Tanaka, Y.X. Watanabe, H. Wollnik, and S. Yamaki, “First Direct Mass Measurements of Nuclides around $Z=100$ with a Multireflection Time-of-Flight Mass Spectrograph”, *Phys. Rev. Lett.* 120, 152501 (2018).
32. M. Mukai, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, P. Schury, H.S. Jung, M. Ahmed, H. Haba, H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y. Kakiguchi, S. Kimura, J.Y. Moon, M. Oyaizu, A. Ozawa, J.H. Park, H. Ueno, M. Wada, H. Miyatake, ”High-efficiency and low-background multi-segmented proportional gas counter for β -decay spectroscopy”, *Nucl. Inst. Meth. A* 884, 1 – 10 (2018).
33. T. Sonoda, H. Iimura, M. Reponen, M. Wada, I. Katayama, V. Sonnenschein, T. Takamatsu, H. Tomita, T.M. Kojima, “The laser and optical system for the RIBF-PALIS experiment”, *Nucl. Inst. Meth. A* 877, 118 – 123 (2018).
34. M. Rosenbusch, Y. Ito, P. Schury, M. Wada, D. Kaji, K. Morimoto, H. Haba, S. Kimura, H. Koura, M. MacCormick, H. Miyatake, J. Y. Moon, K. Morita, I. Murray, T. Niwase, A. Ozawa, M. Reponen, A. Takamine, T. Tanaka, and H. Wollnik, “New mass anchor points for neutron-deficient heavy nuclei from direct mass measurements of radium and actinium isotopes”, *Phys. Rev. C* 97, 064306 (2018).
35. P. Schury, Y. Ito, M. Rosenbusch, H. Miyatake, M. Wada, H. Wollnik, “Improving wide-band mass measurements in a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph by usage of a concomitant measurement scheme”, *Int. J. Mass Spectrom.* 433, 40 – 46 (2018).
36. S. Kimura, Y. Ito, D. Kaji, P. Schury, M. Wada, H. Haba, T. Hashimoto, Y. Hirayama, M. MacCormick, H. Miyatake, J.Y. Moon, K. Morimoto, M. Mukai, I. Murray, A. Ozawa, M. Rosenbusch, H. Schatz, A. Takamine, T. Tanaka, Y.X. Watanabe, H. Wollnik, “Atomic masses of intermediate-mass neutron-deficient nuclei with relative uncertainty down to 35-ppb via multireflection time-of-flight mass spectrograph”, *Int. J. Mass Spectrom.* 430, 134 – 142 (2018).

B. Proceedings

1. D. Torresi, E. Strano, M. Mazzocco, A. Boiano, C. Boiano, P. Di Meo, A. Guglielmetti, M. La Commara, C. Manea, M. Nicoletto, C. Parascandolo, L. Parascandolo, D. Pierroutsakou, M. Sandoli, C. Signorini, F. Soramel, N. Toniolo, J. Grebosz, D. Filipescu, A. Gheorghe, T. Glodariu, L. Stroe, H. Miyatake, Y. Watanabe, S. Jeong, Y.H. Kim, A. Pakou, O. Sgouros, V. Soukeras and K. Zerva, “Elastic scattering of ^{17}O ions from ^{58}Ni at near-barrier energies”, EPJ Web of Conferences 66, 03087 (2014).
2. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S.C. Jeong, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y.H. Kim, M. Mukai, S. Kimura, “ β -decay spectroscopy of r-process nuclei with $N = 126$ at KISS”, AIP Conf. Proc. 1594, 02B906 (2014).
3. Y.H. Kim, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, N. Imai, H. Ishiyama, S.C. Jeong, H. Miyatake, S. Choi, J. Song, E. Clement, G. de France, A. Navin, M. Rejmund, C. Schmitt, G. Pollarolo, L. Corradi, E. Fioretto, D. Montanari, M. Niikura, D. Suzuki, H. Nishibata, J. Takatsu, “Study of the multi-nucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ for producing exotic heavy nuclei”, EPJ Web of Conferences 66, 03044 (2014).
4. Y. Hirayama, S.C. Jeong, Y.X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y.H. Kim, M. Mukai, T. Sonoda, M. Wada, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. Van Duppen, “Present Status of KEK Isotope Separation System”, EPJ Web of Conferences 66, 11017 (2014).
5. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, H. Miyatake, P. Schury, M. Wada, M. Oyaizu, Y. Kakiguchi, M. Mukai, S. Kimura, M. Ahmed, S.C. Jeong, J. Y. Moon, J. H. Park, “Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around $N = 126$ using KISS”, IL NUOVO CIMENTO 39 C, 359 (2016).
6. D. Torresi, E. Strano, M. Mazzocco, A. Boiano, C. Boiano, P. Di Meo, M. La Commara, C. Manea, M. Nicoletto, J. Grebosz, A. Guglielmetti, P. Molini, C. Parascandolo, D. Pierroutsakou, C. Signorini, F. Soramel, N. Toniolo, D. Filipescu, A. Gheorghe, T. Glodariu, S. Jeong, Y.H. Kim, J.A. Lay, H. Miyatake, A. Pakou, O. Sgouros, V. Soukeras, L. Stroe, A. Vitturi, Y. Watanabe, K. Zerva, “Elastic scattering of $^{17}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ at energies near the Coulomb barrier”, EPJ Web of Conferences 117, 08027 (2016).
7. M. Mazzocco, A. Boiano, C. Boiano, M. La Commara, C. Manea, C. Parascandolo, D. Pierroutsakou, C. Signorini, E. Strano, D. Torresi, H. Yamaguchi, D. Kahl, L. Acosta, P. Di Meo, J.P. Fernandez-Garcia, T. Glodariu, J. Grebosz, A. Guglielmetti, N. Imai, Y. Hirayama, H. Ishiyama, N. Iwasa, S.C. Jeong, H.M. Jia, N. Keeley, Y.H. Kim,

- S. Kimura, S. Kubono, J.A. Lay, C.J Lin, G. Marquinez-Duran, I. Martel, H. Miyatake, M. Mukai, T. Nakao, M. Nicoletto, A. Pakou, K. Rusek, Y. Sakaguchi, A.M. Sánchez-Benítez, T. Sava, O. Sgouros, C. Stefanini, F. Soramel, V. Soukeras, E. Stiliaris, L. Stroe, T. Teranishi, N. Toniolo, Y. Wakabayashi, Y.X. Watanabe, L. Yang, Y.Y. Yang, “ ^7Be - and ^8B -reaction dynamics at Coulomb barrier energies”, EPJ Web of Conferences, 117, 06006 (2016).
8. Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S.C. Jeong, H.S. Jung, H. Miyatake, M. Oyaizu, S. Kimura, M. Mukai, Y.H. Kim, T. Sonoda, M. Wada, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. van Duppen, “On-line experimental results of an argon gas cell-based laser ion source (KEK Isotope Separation System)”, Nucl. Inst. Meth. B 376, 52 – 56 (2016).
 9. M. Mukai, Y. Hirayama, H. Ishiyama, H.S. Jung, H. Miyatake, M. Oyaizu, Y.X. Watanabe, S. Kimura, A. Ozawa, S.C. Jeong, T. Sonoda, “Search for efficient laser resonance ionization schemes of tantalum using a newly developed time-of-flight mass spectrometer in KISS”, Nucl. Inst. Meth B 376, 73 – 76 (2016).
 10. S. Kimura, H. Ishiyama, H. Miyatake, Y. Hirayama, Y.X. Watanabe, H.S. Jung, M. Oyaizu, M. Mukai, S.C. Jeong, A. Ozawa, “Development of the detector system for β -decay spectroscopy at the KEK Isotope Separator System”, Nucl. Inst. Meth. B 376, 338 – 340 (2016).
 11. P. Schury, M. Wada, Y. Ito, F. Arai, D. Kaji, S. Kimura, K. Morimoto, H. Haba, S. Jeong, H. Koura, H. Miyatake, K. Morita, M. Reponen, A. Ozawa, T. Sonoda, A. Takamine, H. Wollnik, “Status of the low-energy super-heavy element facility at RIKEN”, Nucl. Instr. Meth. B 376, 425 – 428 (2016).
 12. H. Ishiyama, S.C. Jeong, Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, N. Imai, H.S. Jung, H. Miyatake, M. Oyaizu, A. Osa, Y. Otokawa, M. Matsuda, K. Nishio, H. Makii, T.K. Sato, N. Kuwata, J. Kawamura, H. Ueno, Y.H. Kim, S. Kimura, M. Mukai, “Direct measurement of nanoscale lithium diffusion in solid battery materials using radioactive tracer of ^8Li ”, Nucl. Inst. Meth. B 376, 379 – 381 (2016).
 13. Y. Hirayama, H. Miyatake, Y.X. Watanabe, N. Imai, H. Ishiyama, S.C. Jeong, H.S. Jung, M. Oyaizu, M. Mukai, S. Kimura, T. Sonoda, M. Wada, Y.H. Kim, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. van Duppen, “Beta-decay spectroscopy of r-process nuclei around $N=126$ ”, EPJ Web Conf. 109, 08001 (2016).
 14. M. Commara, M. Mazzocco, A. Boiano, C. Boiano, C. Manea, C. Parascandolo,

- D. Pierroutsakou, C. Signorini, E. Strano, D. Torresi, H. Yamaguchi, D. Kahl, P.D. Meo, J. Grebosz, N. Imai, Y. Hirayama, H. Ishiyama, N. Iwasa, S.C. Jeong, H.M. Jia, Y.H. Kim, S. Kimura, S. Kubono, C.J. Lin, H. Miyatake, M. Mukai, T. Nakao, M. Nicoletto, Y. Sakaguchi, A.M. Sánchez-Benítez, F. Soramel, T. Teranishi, Y. Wakabayashi, Y.X. Watanabe, L. Yang, Y.Y. Yang, “ $^8\text{B} + ^{208}\text{Pb}$ Elastic Scattering at Coulomb Barrier Energies”, EPJ Web of Conferences 163, 00032 (2017).
15. E. Fioretto¹, L. Corradi¹, F. Galtarossa, S. Szilner, D. Montanari, T. Mijatović, G. Pollarolo, H.M. Jia, D. Ackermann, D. Bourgin, G. Colucci, S. Courtin, G. Fruet, A. Goasduff, J. Grebosz, F. Haas, D. Jelavić Malenica, S.C. Jeong, P.R. John, M. Milin, G. Montagnoli, N. Skukan, F. Scarlassara, N. Soić, A.M. Stefanini, E. Strano, V. Tokić, C.A. Ur, J.J. Valiente-Dobón, Y.X. Watanabe, “Study of the population of neutron-rich heavy nuclei in the A~200 mass region via multinucleon transfer reactions”, EPJ Web of Conferences 163, 00017 (2017).
 16. F. Galtarossa, L. Corradi, E. Fioretto, D. Montanari, S. Szilner, T. Mijatović, G. Pollarolo, D. Ackermann, D. Bourgin, S. Courtin, A. Goasduff, J. Grebosz, F. Haas, H.M. Jia, D. Jelavić-Malenica, S. Jeong, P.R. John, M. Milin, G. Montagnoli, F. Scarlassara, N. Skukan, N. Soić, A.M. Stefanini, E. Strano, V. Tokić, C.A. Ur, J.J. Valiente-Dobón, Y. Watanabe, “Neutron-rich Nuclei Populated in Multi-nucleon Transfer Reactions: the $^{197}\text{Au} + ^{130}\text{Te}$ System”, Acta Physica Polonica B 48, 609 – 614 (2017).
 17. E. Strano, D. Torresi, M. Mazzocco, N. Keeley, A. Boiano, C. Boiano, P. Di Meo, A. Guglielmetti, M. La Commara, P. Molini, C. Manea, C. Parascandolo, D. Pierroutsakou, C. Signorini, F. Soramel, D. Filipescu, A. Gheorghe, T. Glodariu, J. Grebosz, S. Jeong, Y.H. Kim, J.A. Lay, H. Miyatake, M. Nicoletto, A. Pakou, K. Rusek, O. Sgouros, V. Soukeras, L. Stroe, N. Toniolo, A. Vitturi, Y. Watanabe, K. Zerva, “Discrimination of processes and optical model analysis in the $^{17}\text{O} + ^{58}\text{Ni}$ collision around the coulomb barrier”, Acta Phys. Polon. B 48, 615 (2017).

C. Theses

1. 向井もも、「KISS 実験のための高融点元素の高効率レーザー共鳴イオン化経路の探索」、修士論文、筑波大学大学院、2014 年 2 月。
2. Y.H. Kim, “The Study of Multi-nucleon Transfer Reaction of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ Above the Coulomb barrier”, PhD Thesis, Seoul National University, August 2015.

3. S. Kimura, “Precision mass measurements of neutron-deficient nuclei in $A \sim 60 - 80$ region via multireflection time-of-flight mass spectrograph”, PhD Thesis, University of Tsukuba, Nov. 2017.
4. M. Mukai, “In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of $^{196-198}\text{Ir}$ ”, PhD Thesis, University of Tsukuba, Feb. 2018.

D. Other Publications

1. 和田道治、「イオントラップ」、日本放射化学会編「放射化学の事典」III-18、朝倉書房 (2015)。
2. 宮武宇也、「反跳核分離装置」、日本放射化学会編「放射化学の事典」III-13、朝倉書房 (2015)。
3. 宮武宇也、「理研の中の KEK: KISS プロジェクトの現状と KEK 和光原子核科学センター発足」、日本加速器学会 12 巻、89 – 96 (2015)。
4. 和田道治、「超重元素の質量測定—革新的質量分光器 MRTOF-MS による—」、Radioisotopes 67, 299 – 308 (2018)。
5. 宮武宇也、「不安定核の物理; 中性子ハロー・魔法数異常から中性子星まで」、日本物理学会誌 72 巻 2 号、140 – 141 (2017)。
6. H. Miyatake, “Fusion-Barrier Distributions Will Unveil Most Probable Reaction Energies to Synthesize Isotopes of Superheavy Elements Beyond $Z = 118$ ”, JPSJ News Comments 15, 01 (2018).
7. 鄭淳讃、「リチウムイオンの拡散測定」、日本加速器学会編「加速器ハンドブック」21.5.2、丸善出版 (2018)。
8. 宮武宇也/稲辺尚人、「不安定核ビーム」、日本加速器学会編「加速器ハンドブック」9.16.5、丸善出版 (2018)。
9. 和田道治、「超重元素の質量測定 –革新的質量分光器 MRTOF-MS による–」、Radioisotopes 67 巻、299 – 308 (2018)。

Talks and Presentations

A. Conferences

1. P. Schury (oral, invited), “Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrograph for Precision Mass Measurements of Short-Lived Nuclei and More”, 23rd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, May 25 – 30, 2014, San Antonio, Texas, USA.
2. Y. Hirayama (poster), “Beta-decay spectroscopy of r-process nuclei with $N = 126$ at KEK isotope separation system”, Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), June 1-6, 2014, Tokyo, Japan.
3. 宮武宇也 (oral, invited), 「KISS による r-過程研究」, 「宇宙核物理実験の現状と将来」研究会、2014 年 8 月 7 日～8 日、大阪大学核物理研究センター、大阪。
4. 宮武宇也 (oral, invited), 「ISOL 型短寿命核ビーム」, 第 1 回レーザー駆動多価重イオン加速による原子核フロンティア研究会、2014 年 10 月 28 日、JAEA 関西光科学研究所、京都。
5. Y. Hirayama (oral, invited), “KISS to explore neutron-rich nuclei around the last r-process bottleneck”, one-day workshop on “Recent progress on r-process and nucleosynthesis”, Nov. 25, 2014, RIKEN.
6. P. Schury (oral, invited), “High-precision mass measurements of trans-Uranium nuclei by MRTOF-MS: shifting the paradigm in SHE-identification”, Sixth international conference on trapped and charged particles, Dec. 1 – 5, 2014, Takamatsu, Japan.
7. Y. Hirayama (oral), “On-line experimental results of argon gas cell based laser ion source (KEK Isotope Separation System)”, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), May 11 – 15, 2015, Grand Rapids, Michigan, USA.
8. P. Schury (oral), “Status of the Low-Energy Super Heavy Element Facility at RIKEN”, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), May 11 – 15, 2015, Grand Rapids, Michigan, USA.
9. Y.X. Watanabe (oral), “Measurements of multinucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ for production of exotic nuclei”, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), May 11 – 15, 2015, Grand Rapids, Michigan, USA.

10. H. Ishiyama (oral), “Direct measurement of nanoscale lithium diffusion in solid battery materials using radioactive tracer of ^8Li ”, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2015), May 11 – 15, 2015, Grand Rapids, Michigan, USA.
11. H. Miyatake, Y. Hirayama, H. Ishiyama, H.S. Jung, M. Oyaizu, Y.X. Watanabe, S.C. Jeong, N. Imai, S. Kimura, M. Mukai, Y.H. Kim, Y. Matsuo, T. Sonoda, M. Wada, M. Huyse, Yu. Kudryavtsev, P. Van Duppen (poster), “Beta-decay spectroscopy of r-process nuclei around $N = 126$ ”, International symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG2015), June 24 – 27, 2015, Beijing, China.
12. Y. Hirayama (oral, invited), “Present status of KISS”, SSRI-PNS collaboration meeting, Sep. 3 – 4, 2015, RIKEN, Wako, Japan.
13. H. Miyatake (oral, invited), “Present status of KEK Isotope Separation System”, RIBF Users Meeting 2015, Sep. 10 – 11, 2015, RIKEN, Wako, Japan.
14. H. Miyatake (oral, invited), “Some possibilities on measurements of nuclear astrophysical reaction rates with low energy region”, Commissioning and scientific discussion on the DIAC facility, Nov. 2 – 6, 2016, KAERI, Daejeon, Korea.
15. H. Miyatake (oral), “Summary of R&D works”, Commissioning and scientific discussion on the DIAC facility, Nov. 2 – 6, 2016, KAERI, Daejeon, Korea.
16. 平山賀一 (oral), 「KISSを用いた核分光実験」、平成 27 年度 KUR 専門研究会「短寿命 RI を用いた核分光と物性研究 II」、2015 年 11 月 4 日～5 日、京大原子炉研究所、大阪。
17. Y.X. Watanabe (oral), “Experimental study of multinucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ for KISS project”, The 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCN2015), Nov. 7 – 12, 2015, Osaka, Japan.
18. P. Schury (oral, invited), “Recent results from the RIKEN/RIBF MRTOF”, Symposium in honor of Hermann Wollnik’s 80th birthday, January 18, 2016, Geissen, Germany.
19. 宮武宇也 (oral), 「本研究会の趣旨説明」、宇宙核物理連絡協議会研究会、2016 年 2 月 22 日～24 日、国立天文台、三鷹キャンパス、東京。
20. 平山賀一 (oral, invited), 「r 過程の第三ピーク滞留核の核分光」、宇宙核物理連絡協議会研究会、2016 年 2 月 22 日～24 日、国立天文台、三鷹キャンパス、東京。
21. 向井もも (poster), 「Development of low background gas-counter for KISS」、宇宙核

物理連絡協議会研究会、2016 年 2 月 22 日～24 日、国立天文台、三鷹キャンパス、東京。

22. 木村創大 (poster)、「陽子ドリップ線近傍 $N = Z - 2$ 核の精密質量測定」、宇宙核物理連絡協議会研究会、2016 年 2 月 22 日～24 日、国立天文台、三鷹キャンパス、東京。
23. P. Schury (oral, invited)、「MTOF for r-process at SLOWRI and KISS」、第 8 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会 (SSRI)、2016 年 3 月 4 日～5 日、理研、和光。
24. S. Kimura (oral)、「Precision mass measurements of the proton-rich nuclei and its impact on the rp-process」、第 8 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会 (SSRI)、2016 年 3 月 4 日～5 日、理研、和光。
25. H. Miyatake (oral)、「Summary of SSRI meeting」、第 8 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会 (SSRI)、2016 年 3 月 4 日～5 日、理研、和光。
26. Y.X. Watanabe (oral), “Experimental study of multinucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ for KISS project”, The 8th Japan-Italy Symposium, March 7 – 10, 2016, RIKEN, Wako, Japan.
27. Y.X. Watanabe (oral, invited), “Experimental study of multinucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ for KISS project”, Koran Physical Society 2016 Spring Meeting, April 20 – 22, 2016, Daejeon, Korea.
28. H. Miyatake (oral), “RNB project on the astrophysical element synthesis”, International review of KEK-PIP, May 22 – 23, 2016, Tsukuba, Japan.
29. Y. Hirayama (oral, invited), “Spectroscopy of multi-nucleon transfer reaction products using KISS”, The 12th International Conference on Stopping and Manipulation of Ions and related topics (SMI-2016), June 8 – 10, 2016, Lanzhou, China.
30. 宮武宇也 (oral, invited)、「和光原子核科学センターの不安定核研究」、理研月例会大会、2016 年 6 月 13 日、理研、和光。
31. Y.X. Watanabe, Y. Hirayama, H.S. Jung, H. Miyatake, P. Schury, M. Wada, Y. Kakiguchi, M. Oyaizu, S. Kimura, M. Mukai, H. Ishiyama, S.C. Jeong (poster), “Production of $N = 126$ nuclei and beyond using deep inelastic transfer reactions”, 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV, June 19 – 24, 2016, Niigata, Japan.

32. P. Schury (oral), “Mass measurements of r-process nuclei at KISS and SLOWRI”, International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV, June 19 – 24, 2016, Niigata, Japan.
33. Y. Hirayama (oral, invited), “Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around $N = 126$ using KISS”, The second Sicily-East Asia Workshop on Low Energy Nuclear Physics (SEA2016), June 27 – 28, 2016, RIKEN, Wako, Japan.
34. P. Schury (oral, invited), “Status of the gas catcher systems SLWORI/PALIS, SlowSHE, and KISS”, Fragment Separator Experts Meeting, Aug. 30 – Sept. 1, 2016, Grand Rapids, Michigan, USA.
35. Y. Hirayama (oral, invited), “Spectroscopy of multi-nucleon transfer reaction products using KISS”, The RIBF Users Meeting 2016, Sep. 8 – 9, 2016, RIKEN, Wako, Japan.
36. P. Schury (oral, invited), “Nuclear physics with slow and stopped beams at RIBF”, 2016 KPS Fall Meeting, Oct. 19 – 21, 2016, Gwangju, Korea.
37. Y. Hirayama (oral, invited), “Recent spectroscopic activities using multi-nucleon transfer reaction products at KISS”, LA3NET Laser ion Source Workshop, Oct. 24 – 25, 2016, Paris, France.
38. Y.X. Watanabe (oral, invited), “Production of $N = 126$ nuclei and beyond using deep inelastic transfer reactions”, Sixth International Conference on Fission and Properties of Neutron-rich Nuclei, Nov. 6 – 12, 2016, Sanibel Island, Florida, USA.
39. P. Schury (oral, invited), “Mass measurements with MR-TOF”, 2016 IBS annual meeting: IBS-RIKEN conference on recent developments in RI physics, Nov. 17 – 18, 2016, Daejeon, Korea.
40. H. Miyatake (oral, invited), “Recent progress of the KISS project at KEK-WNSC”, 40th ASRC International Workshop “Experimental and Theoretical Advances in Fission and Heavy Nuclei”, Dec. 12 – 13, 2016, JAEA, Tokai, Japan.
41. Y.X. Watanabe (oral, invited), “Production of $N = 126$ nuclei and beyond using multinucleon transfer reactions”, First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop, Dec. 12 – 16, 2016, RIKEN, Wako, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan.
42. 宮武宇也 (oral), 「KISS、SLOWRI 施設での低エネルギー核分光研究」、平成 28 年度 KUR 専門研究会「短寿命 RI を用いた核分光と核物性研究会」、2016 年 12 月 20 日～21 日、京大原子炉研究所、大阪。

43. Y.X. Watanabe (oral), “Production of radioactive nuclei relevant to r-process by multinucleon transfer reactions for KISS”, 「第 9 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」&「2017 超重元素の科学研究会」合同研究会, March 5 – 6, 2017, Tokai, Japan.
44. P. Schury (oral), “Observation of doubly-charged ions of Pb through Pu extracted from cryogenic gas cell and mass analyzed by MRTOF-MS”, 「第 9 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」&「2017 超重元素の科学研究会」合同研究会, March 5 – 6, 2017, Tokai, Japan.
45. Y. Hirayama (oral), “Present status of KISS ~Laser spectroscopy at KISS~”, 「第 9 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」&「2017 超重元素の科学研究会」合同研究会, March 5 – 6, 2017, Tokai, Japan.
46. M. Mukai (oral), “Development of low-background gas-counter for the beta spectroscopy at KISS”, 「第 9 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」&「2017 超重元素の科学研究会」合同研究会, March 5 – 6, 2017, Tokai, Japan.
47. S. Kimura (oral), “Precision mass measurements of proton-rich nuclei in $A \sim 60 - 80$ region with the multireflection time-of-flight mass spectrometer”, 「第 9 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」&「2017 超重元素の科学研究会」合同研究会, March 5 – 6, 2017, Tokai, Japan.
48. P. Schury (poster), “Direct mass measurements of neutron-deficient isotopes of Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra and Ac at RIKEN/SHE-Mass”, Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2017), May 28 – June 2, 2017, Keystone, USA.
49. Y.X. Watanabe (oral, invited), “Production of $N = 126$ Nuclei and Beyond Using Multinucleon Transfer Reactions for KISS Project”, Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2017), May 28 – June 2, 2017, Keystone, USA.
50. H. Miyatake (oral, invited), “Recent progress of the KISS project at KEK-WNSC”, China-Japan collaboration workshop on “Nuclear mass and life for unravelling mysteries of r-process”, June 26 – 28, 2017, Tsukuba, Japan.
51. H. Miyatake (oral), “Present status of the KISS project”, International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG2017), June 27 – 30, 2017, Daejeon, Korea.
52. Y.X. Watanabe (oral), “Multinucleon transfer reactions with low-energy neutron-rich heavy ion beams”, ImPACT-OEDO workshop 2017, July 13 – 14, 2017, Wako, Japan.

53. 宮武宇也、「「はじめに」会の趣旨説明」、X 線天体と元素合成を中心とする宇宙核物理研究会、2017 年 7 月 20 日～21 日、理研、和光。
54. H. Miyatake (oral, invited), “Present status of the KISS Project”, Scientific seminar IMP, Aug. 22 – 25, 2017, IMP, China.
55. M. Wada (oral), “High Precision Spectroscopy of low-energy short-lived nuclei”, Turkish Physical Society 33rd International Physics Congress; TPS33, Sept. 6 – 10, 2017, Bodrum, Turkey.
56. Y.X. Watanabe (oral, invited), “Production of neutron-rich nuclei by multinucleon transfer reactions at KISS Project”, 3rd International Symposium on Super-Heavy Elements (SHE2017), Sep. 10 – 14, 2017, Kazimierz Dolny, Poland.
57. H. Miyatake (oral), “Present status of the KISS project”, RCNP International workshop on “Physics Opportunities using CAGRA and RCNP tracking Ge detector” (CAGRA17), Oct. 10 – 12, 2017, Osaka, Japan.
58. M. Wada (oral, invited), “Toward mass measurement of super-heavy nuclei using MRTOF”, Workshop for Einsteinium Campaign, Nov. 7 – 8, 2017, JAEA, Tokai, Japan.
59. H. Miyatake (oral, invited), “Recent KISS activities and future’s plan”, Workshop for Einsteinium Campaign, Nov. 7 – 8, 2017, JAEA, Tokai, Japan.
60. Y.X. Watanabe (oral, invited), “Nuclear production by multinucleon transfer reactions with neutron-rich heavy ion beams”, Workshop for Einsteinium Campaign, Nov. 7 – 8, 2017, JAEA, Tokai, Japan.
61. M. Wada (oral), “Mass measurements of short-lived nuclei with a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph – recent results and future plans –”, The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI’17), Nov. 13 – 18, 2017, Kanazawa, Japan.
62. S. Kimura (oral), “High precision mass measurements of intermediate-mass neutron-deficient nuclei via MRTOF-MS”, The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI’17), Nov. 13 – 18, 2017, Kanazawa, Japan.
63. M. Wada (oral), 「MRTOF 質量分光器を用いた重元素の網羅的高精度質量測定」、2017 年度核データ研究会、2017 年 11 月 16 日～17 日、東海村。
64. H. Miyatake (oral), “Present status of the KISS project”, BUAA Workshop “Impact of Exotic Nuclear Structure on Explosive Nucleosynthesis”, Nov. 23 – 24, 2017, Beijing,

China.

65. M. Wada (oral), “Precision mass measurements of short-lived heavy nuclei, present and future toward comprehensive measurement”, International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, Dec. 4 – 5, 2017, Wako, Japan.
66. Y. Hirayama (oral), “Nuclear spectroscopy of r-process nuclei around $N \approx 126$ by using KISS”, International symposium on RI beam physics in the 21st century: 10th anniversary of RIBF, Dec. 4 – 5, 2017, Wako, Japan.
67. H. Miyatake (oral), “Scientific activities of KEK-WNSC at RIBF”, KEK-TRIUMF Scientific Symposium, Dec. 14 – 15, 2017, TRIUMF, Canada.
68. 宮武宇也 (oral), 「KISS、超微細構造測定と質量測定の現状」、平成 29 年度 KUR 専門研究会 短寿命 RI を用いた核分光と核物性研究 IV、2017 年 12 月 20 日～21 日、熊取。
69. 宮武宇也 (oral, invited), 「r-過程の第三ピークと終焉領域: KEK-WNSC のアプローチ」、理研宇宙核インフォーマル勉強会、2018 年 4 月 25 日、理研、和光市。
70. Y.X. Watanabe (oral), “Experimental studies with multinucleon transfer reactions at OEDO”, International Workshop of OEDO, June 11, 2018, RIKEN, Wako, Japan.
71. 宮武宇也 (oral, invited), 「r-過程第三ピークと終焉領域 – KEK-WNSC のアプローチ」、理研 ULIC 研究会「重力波観測時代の r プロセスと不安定核」、2018 年 6 月 20 日～22 日、理研、和光市。
72. 渡辺裕 (oral, invited), 「多核子移行反応による未知核生成」、研究会「超重元素研究の新展開」、2018 年 7 月 30 日～31 日、九州大学、福岡市。
73. 宮武宇也 (oral, invited), 「r-過程終焉部、核分裂障壁」、研究会「超重元素研究の新展開」、2018 年 7 月 30 日～31 日、九州大学、福岡市。
74. 庭瀬暁隆 (oral), 「超重核質量分析へ向けた α -TOF 検出器の開発と性能評価」、研究会「超重元素研究の新展開」、2018 年 7 月 30 日～31 日、九州大学、福岡市。
75. Y. Hirayama (oral, invited), “Present status of KISS”, RIBF Users Meeting, Sep. 5 – 6, 2018, RIKEN, Wako, Japan.
76. M. Wada (oral, invited), “MRTOF mass spectrographs at RIBF”, RIBF Users Meeting, Sep. 5 – 6, 2018, RIKEN, Wako, Japan.
77. Y.X. Watanabe (oral, invited), “Production of neutron-rich nuclei by multinucleon

transfer reactions at KISS project”, IX International Symposium on Exotic Nuclei (EXON2018), Sep. 10 – 15, 2018, Petrozavodsk, Russia.

78. Y. Hirayama (oral), “Nuclear spectroscopy of r-process nuclei using KEK Isotope Separation System”, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2018), Sep. 16 – 21, 2018, CERN, Geneva, Switzerland.
79. M. Mukai (oral), “Development of a multi-segmented proportional gas counter for β -decay spectroscopy at KISS”, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS2018), Sep. 16 – 21, 2018, CERN, Geneva, Switzerland.
80. Y.X. Watanabe (oral), “Nuclear production by multinucleon transfer reactions”, 20th Northeastern Asian Symposium on “Nuclear Physics in the 21st Century”, Sep. 19 – 20, 2018, Nagoya, Japan.
81. H. Miyatake (oral), “RNB project on the astrophysical element synthesis”, Tsukuba Global Science Week 2018 (TGSW2018), Sep. 20 – 22, 2018, Tsukuba, Japan.
82. M. Wada (oral), “Mass measurements with MR-TOF at RIKEN RIBF”, NUSTAR Week 2018, Sep. 24 – 28, 2018, Milano, Italy.
83. M. Wada (oral), “Mass measurements of heavy elements at GARIS”, Shapes and Symmetries in Nuclei from Experiment to Theory (SSNET’18 Conference), Nov. 5 – 9, 2018, Gif-sur-Yvette, France.

B. JPS Meetings

1. P. Schury, “Towards identification of Super-Heavy elements by means of mass spectroscopy”, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, October 7 – 11, 2014, Waikiloa, Hawaii, USA.
2. 渡辺裕、「多核子移行反応による $N = 126$ 中性子過剰核の生成に関する実験的研究」、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 25 日～28 日、大阪市立大学、大阪市。
3. 園田哲、「RIBF におけるパラサイト低速 RI ビーム生成とガスジェットレーザー核分光の開発」、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 25 日～28 日、大阪市立大学、大阪市。

4. 木村直樹、「多価イオン精密分光に向けた冷却コンバインドイオントラップの製作」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 21 日～24 日、宮崎大学、宮崎市。
5. 和田道治、「重元素の網羅的質量測定の可能性と応用」、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日～20 日、大阪大学、大阪。
6. 伊藤由太、「MRTOF 質量分析器による八十極変形核 $^{223, 224}\text{Th}$ の精密原子質量測定」、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月 17 日～20 日、大阪大学、大阪。
7. 平山賀一、「KISS I: ^{199}Pt のレーザー共鳴イオン化核分光」、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12 日～15 日、宇都宮大、宇都宮。
8. 向井もも、「KISS II: $^{196-198}\text{Ir}$ のレーザー共鳴イオン化核分光」、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12 日～15 日、宇都宮大、宇都宮。
9. 木村直樹、「多価イオン共同冷却実験に向けたイオン生成と補足」、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12 日～15 日、宇都宮大、宇都宮。
10. M. Ahmed、「Isomeric state of ^{195}Os observed in β - γ spectroscopy at KISS」、日本物理学会 第 73 回年次大会、2018 年 3 月 22 日～25 日、東京理科大学、野田。
11. 福田直樹、「 ^{238}U の入射核破砕反応を用いた $N=126$ 近傍の中性子過剰核の生成」、日本物理学会 第 73 回年次大会、2018 年 3 月 22 日～25 日、東京理科大学、野田。
12. T. Niwase (oral), “Development of α -TOF detector for correlation measurement of atomic masses and decay properties”, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Oct. 23 – 27, 2018, Waikoloa, Hawaii, USA.
13. M. Rosenbusch (oral), “Follow-Ups on Great Achievements: New MRTOF-MS Projects at RIKEN-RIBF”, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Oct. 23 – 27, 2018, Waikoloa, Hawaii, USA.
14. S. Kimura (oral), “Atomic masses of intermediate-mass neutron-deficient nuclei with relative uncertainty down to 35-ppb via MRTOF-MS”, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Oct. 23 – 27, 2018, Waikoloa, Hawaii, USA.

C. Lectures (大学の通常・特別講義を除く)

1. 宮武宇也、「金やプラチナはどこで生まれたの?」、KEK サイエンスカフェ、2017 年 11 月 10 日、つくば総合インフォメーションセンター、つくば。

2. 渡邊裕、「金やプラチナはどこで生まれたの？ –どうやって未知原子核を生成・分離・観測するのか？」、KEK サイエンスカフェ、2017 年 11 月 17 日、つくば総合インフォメーションセンター、つくば。
3. 和田道治、「金やプラチナはどこで生まれたの？ –どうやって未知原子核の質量を測るのか？」、KEK サイエンスカフェ、2017 年 11 月 24 日、つくば総合インフォメーションセンター、つくば。

D. Seminars

1. Y.X. Watanabe, “Present status of KEK isotope separation system (KISS)”, Feb. 17, 2015, RIKEN, Wako, Japan.
2. Y. Hirayama, “KISS project and laser ionization system”, Mar. 9, 2015, RISP, Daejeon, Korea.
3. Y.X. Watanabe, “Experimental study of nuclear production by multinucleon transfer reaction”, 第 11 回 RIBF 検討会「重イオン反応と多核子移行」, Mar. 2, 2015, Tsukuba Univ., Tsukuba, Japan.
4. P. Schury, “Present status and future plans for MRTOF at RIBF”, RIBF 核物理セミナー 第 214 回, Feb. 12, 2016, RIKEN, Wako, Japan.
5. 宮武宇也、「金・白金はどこで、どのように生まれたのか –WNSC のアプローチ–」、第 7 回 KEK 機構連携コロキウム、2018 年 7 月 4 日、つくば市。
6. M. Wada, “The Multi-Reflection Time-Of-Flight Mass Spectrographs at RIBF: Present and Future”, July 31, 2018, RIKEN, Wako, Japan.

KEK 共同利用実験

A. 元素選択型質量分離装置(KISS)

A-1. 採択実験課題

1. NP1512-RRC37: “The Structure and Decay of High- K Isomers in ^{187}Ta ” (2015)
2. NP1512-RRC40: “Yield development of KEK Isotope Separation System (KISS)” (2015)
3. NP1512-RRC41: “Lifetime measurements of nuclei around $N = 126$ using KISS” (2015)
4. NP1612-RRC44: “Decay spectroscopy of long-lived isomers in $A = 192$ isobars” (2016)
5. NP1612-RRC45: “In-gas cell laser spectroscopy of the nuclei around $N = 126$ using KISS” (2016)
6. NP1712-RRC37R1: “The Structure of Decay of High- K Isomers in ^{187}Ta ” (2017)
7. NP1712-RRC40R1: “Yield developmentt of KEK Isotope Separation System (KISS)” (2017)
8. NP1712-RRC59: “Direct mass measurement of neutron-rich isotopes of Ir and Os: first step toward $N = 126$ and the r-process pathway” (2017)

A-2. 共同利用実施状況

年度	年間稼働 可能時間 (時間)	年間稼働 時間 (時間)	共同利用に 供する時間 (時間)	共同利用 件数 (延べ)	共同利用 者数 (延べ人数)
2016 年度	198	198	198	4	60
2017 年度	144	144	144	2	112
2018 年度 (見込み)	48	48	48	2	12

年度	参画研究者数			
	国立大学	公立大学	私立大学	外国機関
2016 年度	1	0	0	1
2017 年度	1	0	0	5
2018 年度 (見込み)	3	0	0	3