

話題

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 —

宮武 宇也^{*1}・鄭 淳讚^{*2}・石山 博恒^{*1}・渡辺 裕^{*1}・平山 賀一^{*1}・今井 伸明^{*3}
 Hyo Soon JUNG^{*1}・小柳津 充広^{*1}

KEK in Riken

— KISS Project and KEK Wako Nuclear Science Center —

Hiroari MIYATAKE^{*1}, Sunchan JEONG^{*2}, Hironobu ISHIYAMA^{*1}, Yutaka WATANABE^{*1}, Yoshikazu HIRAYAMA^{*1}
 Nobuaki IMAI^{*3}, Hyo Soon JUNG^{*1} and Michihiro OYAIZU^{*1}

Abstract

Aim of the KEK KISS project is to understand an astrophysical origin of the rapid neutron capture process through the decay studies of unknown nuclei having the mass number around 195 and the neutron number around 126 in so called blank spot region, where has been hard to access experimentally, so far. We have developed a new experimental method consisting of multi-nucleon transfer reactions of neutron-rich heavy-ion beams and a mass separator combined with an element selective laser resonance ionization. This device is named as KEK Isotope Separation System (KISS). After the success of the developments, KISS will be open for users in this year as one of experimental apparatuses in the RIBF facility of Riken Nishina Center. And a KEK new branch, Wako Nuclear Science Center (WNSC) has been launched at Riken Wako campus from this April for supporting the scientific activities of KISS users.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構、素粒子原子核研究所の短寿命核グループでは、速い中性子捕獲過程 (Rapid neutron capture process, 以降 R-過程と呼ぶ) についての研究を進めるため、2009 年度に KISS プロジェクトを立ち上げ、必要となる実験装置の理化学研究所、仁科加速器センター内への設置・開発を行ってきた。本年度から課題公募が始まるこの装置の共同利用に伴い、4 月より理研における KEK のブランチとして和光原子核科学センター (Wako Nuclear Science Center, WNSC) が発足した。本稿では、KISS プロジェクトの概略と実験装置を紹介し、最後に WNSC の紹介を行う。

2. KISS プロジェクト

地球上に存在する 300 種類ほどの元素の由来は、1950 年代にノーベル賞受賞者を含む Burbidge 夫妻, Fowler, Hoyle ら (B2FH と呼ぶ) の宇宙物理学者により、宇宙の歴史や星の一生の物理プロセスと関連付けられた¹⁾。そこで分類された様々な元素生成過程についての解明は、宇宙物理、天文観測そして原子核物理の発展により、目覚ましい進展を遂げている。

R-過程では、高温・高中性子数密度の爆発的天体環境において、鉄よりも重い元素の約半分を生成したと考えられている。この過程の起源天体は特定できてないものの、今世紀の物理における中心的研究課題の一つとして進展著しい研究領域となっている²⁾。

我々のグループでは、実験的原子核物理の立場

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
 (E-mail: hiroari.miyatake@kek.jp)

^{*2} RISP project, Institute for Basic Science, Korea

^{*3} 東京大学, 原子核科学研究センター

から R-過程の謎に迫るため、KISS プロジェクトを立ち上げた³⁾。このプロジェクトでは、R-過程で生成されたとされる元素の中の、特に金・白金などを生み出した天体環境条件の特定を目指している (図 1 参照)。

これらの元素は、太陽系で観測される元素分布上で、質量数 195 近傍の存在比ピークを形成する。B2FH らによれば、これらの元素は急激な中性子捕獲が進んだのちに、その経路上に生成された原子核が β 崩壊を繰り返して生み出されたとされる。構成する中性子数 (N) が 126 の魔法数からなる、原子番号 (Z) 70 前後の同中性子体は、殻構造という原子核特有の性質により、周囲の原子核よりも比較的安定 (β 崩壊の寿命が長い) で、滞留核と呼ばれる。さらに中性子を捕獲した N=127 の原子核では中性子束縛エネルギー (Sn) が小さくなり光分解しやすくなるため、滞留核領域の原子核は、R-過程が進む間その寿命に比例して残存し、最終的な存在比ピークを形成する。このことから、滞留核の寿命や N=127 の Sn の値から、金・白金ピークの起源となった R-過程の天体環境 (温度と中性子数密度など) を導くことができる。

2.1 KISS プロジェクトの研究手法, 多核子移行反応

安定な原子核から 20 近く中性子過剰な滞留核近傍未知原子核の半減期や質量測定に向けて、我々のグループでは下記の研究手法を提案した³⁾。

- 短寿命原子核の生成に中性子過剰な重イオンビームによる多核子移行反応を用いる。
- 質量数 (A) と原子番号 (Z) で核反応生成物を分離、観測するために KISS (KEK Isotope Separation System) を開発する。

はじめに多核子移行反応について簡単に紹介する。核子あたり 10 MeV 程度の重イオン同士の原子核反応では、入射核と標的核間で構成核子の相互移行が頻繁に起こり、大半の入射エネルギーが内部エネルギーへと転換する。二核が最終的に融合しない場合、入射核様、標的核様の破砕片となって、不安定な原子核を生み出す多核子移行反応が起こる⁴⁾。この手法による未知原子核の研究は、80 年代に盛んに行われたが、その後高速重イオンビームを用いた入射核破砕反応による研究が活発になった。この反応を利用した世界最強の施設が、理化学研究所の RIBF 施設である⁵⁾。

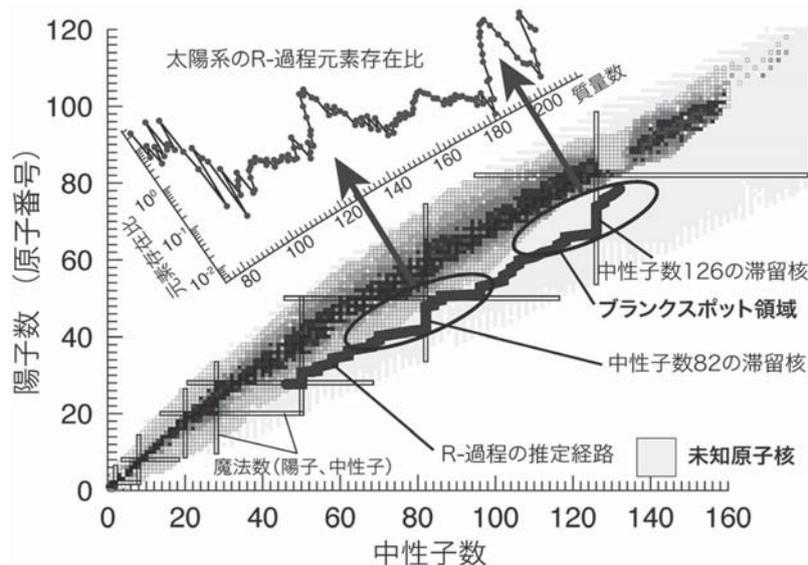


図 1 原子核を陽子数と中性子数で分類した核図表。寿命をグレー階調で分けている。黒枠は RIBF や KISS の主な測定対象領域。KISS 測定領域は、到達困難なブランクスポット領域とも呼ばれて来た。太線は R-過程の推定経路。左上挿入図は太陽系で観測される R-過程の元素存在比。経路上に生成された極端に中性子過剰で短寿命な原子核は β -崩壊を繰り返して、安定な原子核を生み出した。

残念ながら、重い質量数領域の中性子過剰未知原子核生成において、入射核破碎反応の生成断面積は小さい。他方で、中性子過剰な重イオンビームによる多核子移行反応で、さらに中性子過剰な未知原子核生成が可能であるとの指摘がなされてきた⁶⁾。そこで我々はフランスの国立重イオン加速器研究所 (GANIL) において、これを確認するための予備実験を行った⁷⁾。得られた結果から推定した $N=126$ の未知原子核の生成断面積を入射核破碎反応の場合と共に示したのが、**図 2** である。測定対象となる $N=126$ 未知同中性子体の生成断面積は、実験で得られた入射核様破砕片の断面積を元に、2 体反応であること、反応における内部エネルギーの即時平衡化、蒸発中性子数は統計モデルに従うなどの仮定により求めている。

図から明らかなように、断面積の比較から、 $N=126$ の滞留核近傍未知原子核を生成する上で、多核子移行反応の有効性が分かる。用いた入射核は、最も中性子過剰なキセノン安定同位元素 (^{136}Xe)。今後、高強度の中性子過剰なキセノン不安定核ビームの利用が可能となれば、さらに大きな断面積が期待できる。

ところで、入射核破碎反応では、生成された未知原子核は入射核とほぼ同じ速度で前方に放出さ

れるため、標的核の下流に磁石などを配置することで目的核種を高効率で捕集・分離できる。この反応が未知原子核研究に多用される所以である。他方、多核子移行反応で生成された未知原子核は大きな速度分布を持って広い空間に散乱されるため、効率良い捕集・分離のために新たな装置が必要となる。それが元素選択型質量分離装置、KISS である。

2.2 元素選択型質量分離装置, KISS

理研に設置した KISS の概要を **図 3** に示した¹⁰⁾。装置は 0.5 気圧のアルゴンガスで充たされたガスセルおよびイオンガイドを差動排気環境中に組み込んだガストッパー系と、加速電極、アインツェルレンズ、双極電磁石などからなる質量分析系 (Isotope Separator On-Line: ISOL)、未知原子核を測定する低バックグラウンド測定器系から成っている。ガスセルには核反应用標的、ppt (parts per trillion, 10^{-12}) レベルに高純度化されたアルゴンガスの流入路や、共鳴イオン化用のレーザー光導入窓などが配置されている。

原子核反応で生成された未知原子核は、ガスセル中で単体の中性原子としておよそ 300 K に熱化される (**図 4** 参照)。その後、層流状態のアルゴンガスとともに直径 1 mm の出口孔まで輸送さ

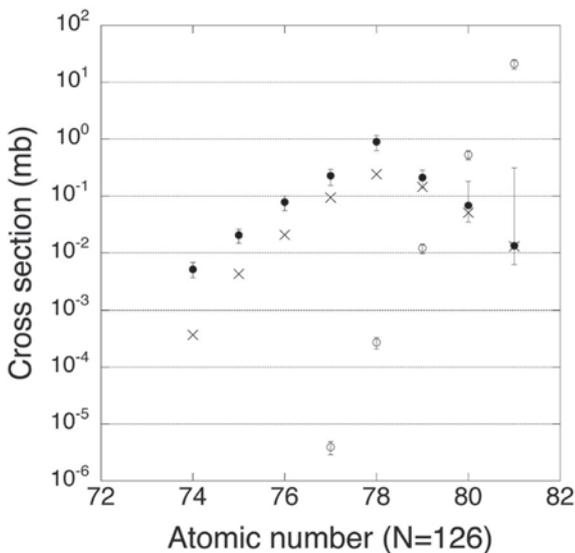


図 2 ^{136}Xe 入射核 (8 MeV/核子) と ^{198}Pt 標的核による多核子移行反応での $N=126$ 未知同中性子体の生成断面積 (黒丸)。×印は理論値⁸⁾、白抜き丸は ^{208}Pb 入射核 (1 GeV/核子) と ^9Be 標的核による入射核破碎反応で得られた生成断面積⁹⁾。

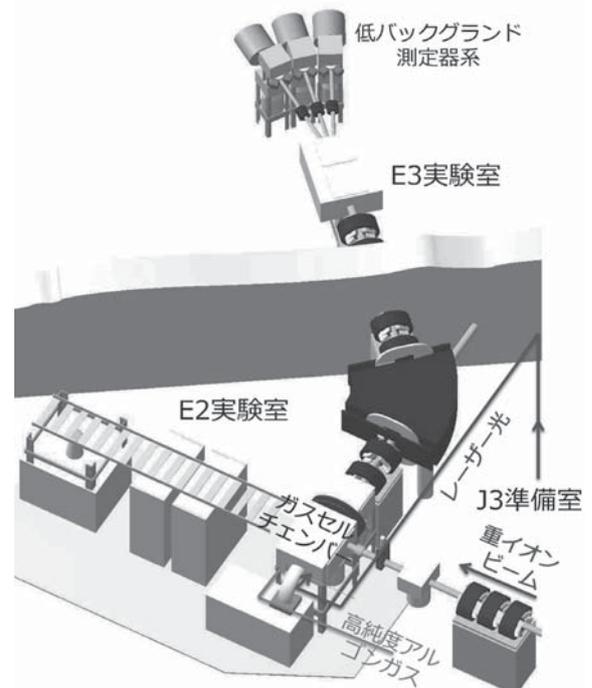


図 3 理化学研究所に設置した元素選択型質量分離装置, KISS.

れ、差動排気環境へジェット状に放出される。出口孔直上流にはレーザー照射エリアがあり、レーザー共鳴イオン化によって特定の原子番号(Z)を持つ中性原子だけがイオン化される。

原子番号を選択された未知原子核イオンは、直列2段に組まれた六極高周波イオンガイド(SPIG)の作る半径方向の電氣的井戸ポテンシャルにトラップされながら 10^{-4} Pa 台の高真空領域まで輸送される。その後 20 kV 程度の引出電場で均一な速度に加速され、双極磁場で質量分離(A)される。こうして特定の A, Z を持つ未知原子核イオンが測定器系に輸送される。

レーザー共鳴イオン化と質量分離を組み合わせた実験手法は In-Gas Laser Ionization and Spectroscopy (IGLIS) と呼ばれ、ルーバンカソリック大学の研究グループが世界に先駆け開発し

た手法である¹¹⁾。本プロジェクトでは、この手法を多核子移行反応による生成核の捕集に適用するため、従来の約5倍(480 cc)の大容量ガスセルをデザインした。特徴は、ガスセル内輸送時間短縮のために、層流形成用スリット(図4(a)参照)を配置した点にある。図4(b)に理論⁸⁾で得られた核子移行反応の運動学情報に基づくガスセル中での²⁰²Os₁₂₆停止位置分布を示した。約90%の²⁰²Osがガス中で停止する。ガスセル壁面への吸着を考慮すると、生成量の3割がレーザー照射エリアに輸送されることになる。

ガスセル内輸送時間は、セル内の鉄フィラメントから熱拡散させた鉄中性原子を用いて確認した(図5)。一次ビーム位置で、短パルス化した共鳴レーザーを照射し、出口孔までの輸送時間を測定している。結果は流体シミュレーションとよく一致した。

レーザー共鳴イオン化には、対象となる原子の励起状態(波長 λ_1)を経由して自動イオン化状態(AIS:波長 λ_2)を生成するために、2色のレーザー光を用いている。測定対象元素の共鳴イオン化経路は報告例がなかったため、テストベンチをレーザーシステム脇に設置し、恒常的に効率の高い共鳴イオン化経路の探索を行っている¹²⁾。図6(a)はレニウム元素でのAIS探索状況である。この例では中間励起状態を $\lambda_1=208.6265$ nmに固定している。中間励起状態への転移とともに、観測された2本の強いAIS転移に対して、検出イオン数のレーザー光強度依存性を調べた(図6(b), (c), (d))。基底、励起、AIS準位にある原子数

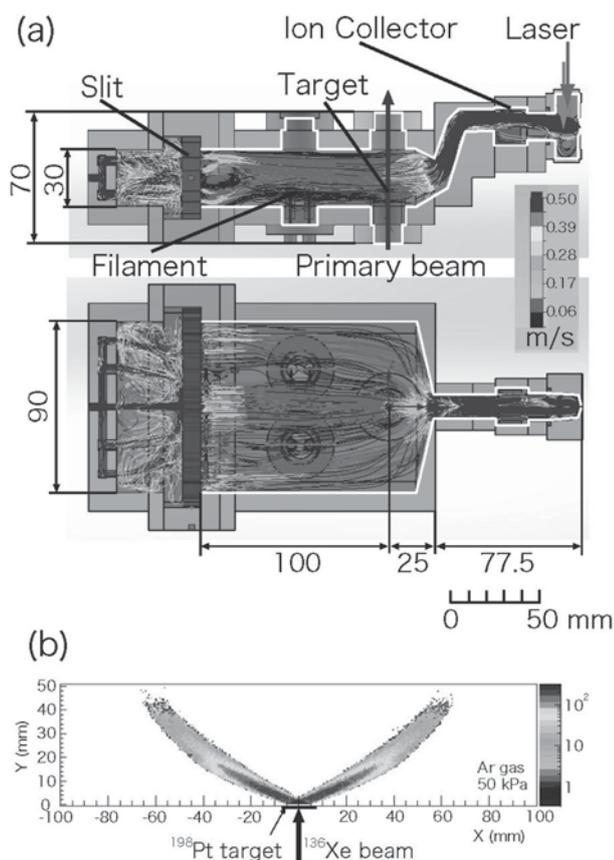


図4 ガスセル正面及び側面断面図(a)と標的核様破砕片のガス中での推定停止位置(b)。(a) アルゴンガスは左方向から流入する。ガス流速をグレーの階調で示している。(b) ¹³⁶Xe と ¹⁹⁸Pt との反応で生成された ²⁰²Os の停止位置分布を生成量とともに示している。

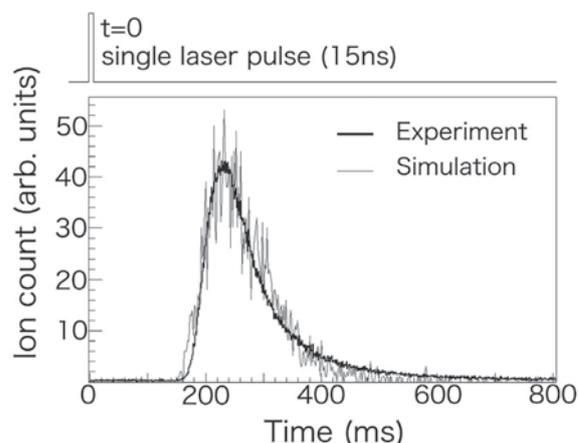


図5 鉄イオンのガスセル引出し時間分布。太線は実測値、細線は計算値。

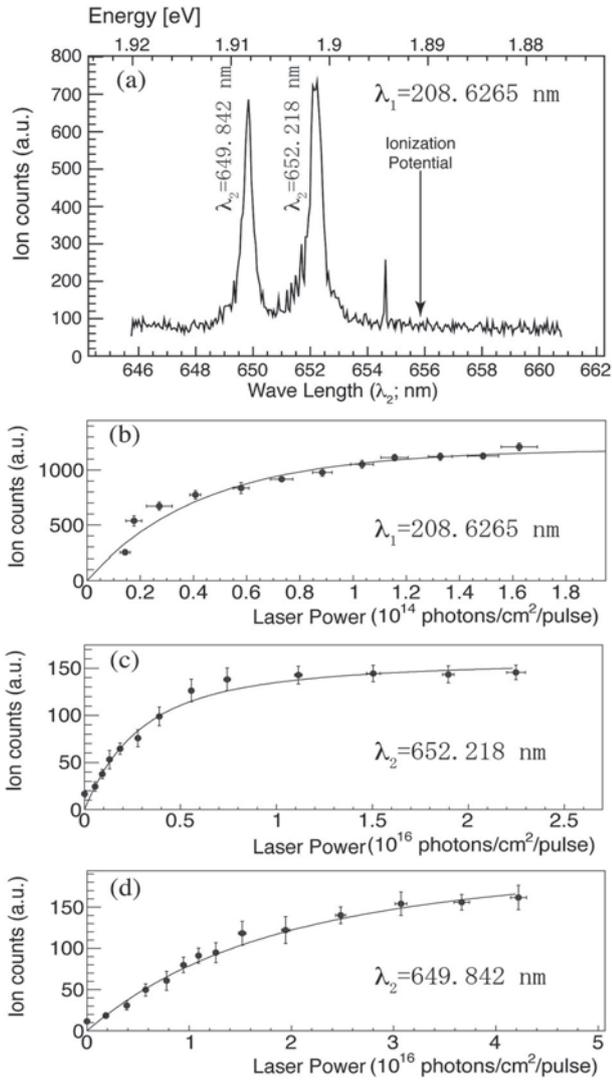


図6 レニウムの共鳴イオン化経路探索。
 (a) 励起状態 ($\lambda_1=208.6265$) を固定して探索した自動イオン化状態 (AIS, λ_2)。
 (b), (c), (d) 共鳴イオン数のレーザー (λ_1 (b), λ_2 (c, d)) 強度依存性. (b) では λ_2 強度を固定し, (c), (d) では λ_1 強度を固定して測定した.

に対するレート方程式を測定結果に当てはめて、真空中でのレーザー共鳴イオン化効率を得られる。これまでに、タンタル、タングステン、レニウム、イリジウム元素についての探索が一通り終了した。

ガスセル内でのイオン化効率は、さらに圧力広がり、ドップラー広がり、レーザー強度広がりなどを考慮した有効エネルギー準位幅を用いて推定する。目標は約 20% だが、推定値は、最も効率の高いレニウムやイリジウム元素に対してでも約 10% で、残念ながら目標に達してない。基底状態

の微細構造準位への分岐なども原因として考えられるが、主要な問題はレーザーシステムのパワー不足にある。光強度が弱いため、ガス中での有効エネルギー準位幅を覆うようにレーザー光を加工できてないため、真空中での効率から 1/3 ~ 1/8 に減少した値となっていると考えられる。再利用で運転している 20 年以上昔のレーザーシステムの更新が、強く望まれる。

ガスセル中のアルゴンが理想的高純度ならば、セル内の短寿命原子核は高い確率で単一の中性原子になる¹¹⁾。他方で、水素、水分子、炭化水素分子などの不純物がある場合、優先的に不純物との分子状イオンを形成するため、イオン引出し効率は低下する。開発初期段階では、不純物除去が課題となった。

アルゴンガス純化システムは、純度 99.9999% 以上のアルゴンガスと O₂, N₂, H₂, CO, CO₂, 炭化水素分子、水などの不純物を ppb レベルまで除去する純化器¹³⁾、ゼオライトフィルターおよび流量計、ベーキング可能なクォーツ管で構成されている。図 7 (a) は、ゼオライトフィルターなしで、系のベーキング以前に得た引出しイオンの質量分布である。線源からの α 線を用いてセル内のアルゴンガスをイオン化している。不純物由来の大量の分子イオンが見られる。ガスセル本体を 390 K でベーキングし (b)、さらに N₂ 以外の不純物を ppt レベルまで除去するゼオライトフィルターを投入して、水分子との分子状イオン除去に成功した (c)。最後まで残ったアルゴンの二原子分子イオン、および水との分子状イオンは、レーザー照射エリア直上流に設置した単純な平行電極板からなる Ion Collector (ICE : 図 4 参照) で、ほぼ完全に除去できた。

図 7 (d), (e) は、加速器からの鉄イオンを直接ガスセルに打込んで測定したイオンの質量分布である。(d) はレーザーオフ、(e) はレーザーオンに対応する。共鳴イオン化によって鉄元素を選択的に引き出している事がわかる。両方ともに ICE はオン状態なので、アルゴン分子イオンなどのバックグラウンドは、ICE からレーザー照射エリアまでの短区間においてビーム由来のプラズマで電離されたアルゴンイオンによるものと考えられる。また水分子やアルゴン分子を伴う鉄分子状イオン (図 7 (e)) は、共鳴イオン化後の単一鉄原

子イオンが、ガスセル出口孔から差動排気領域を輸送される際に、周囲のアルゴンガスなどとの衝突で形成されたものと考えられる。

このように共鳴イオン化後に形成された分子状イオンは質量数が分散し、見かけのイオン化効率低下を招く。そこで、効率向上のため、分子状イオンを解離させる開発を進めている。仕組みは上流と下流の二段に分かれた SPIG の組み合わせ部分に分子解離用電圧をかけるというもの。図 8 に予備的な結果を示した。セル内のフィラメントから蒸発させたイリジウム原子を用いて、解離用電圧の有無による違いを示している。ご覧のように、水分子やアルゴンと結合していた分子状イオンが綺麗に解離した。約 2 倍の効率向上に繋がるものと期待している。

2.3 KISS の総合性能

KISS の装置性能を知る上で、イオン引出し効

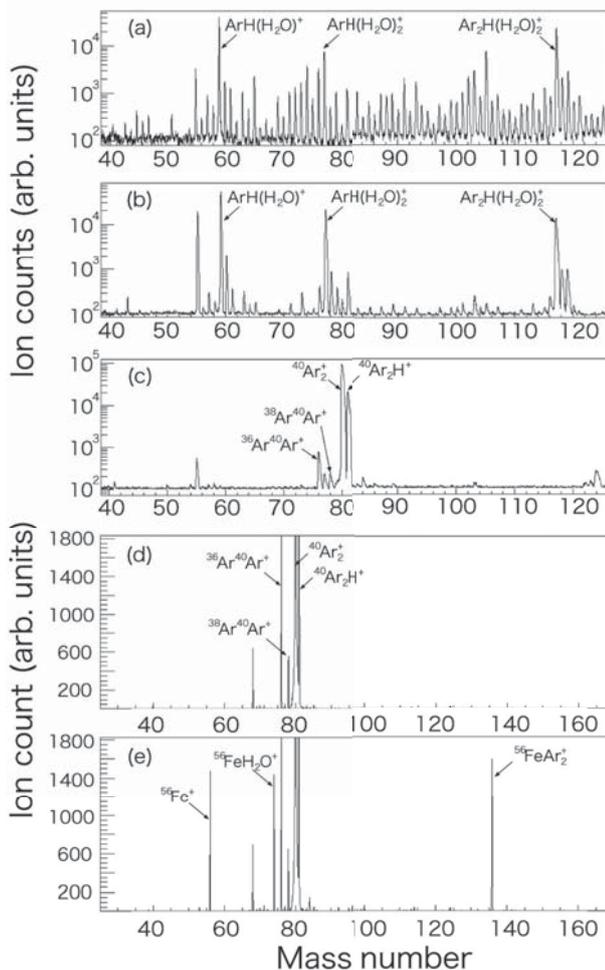


図 7 KISS ガスセルから引出されたイオンの質量分布(説明は本文参照)。

率の一次ビーム強度依存性も重要な確認項目である。そこで本実験と同じ条件で加速器からの ^{136}Xe ビームを ^{198}Pt 標的に照射し、ガスセル中に弾性散乱された ^{198}Pt の共鳴イオン引出し効率を測定した。上記の 2 段 SPIG による分子状イオン解離開発以前の測定のため、検出には $^{198}\text{PtAr}_2$ イオンを用いている。結果は標的の融解上限である 20 p nA までの一次ビーム強度に対し、ほぼ一定の引出し効率を持つことが確認できた(図 9)。

この時の $^{198}\text{PtAr}_2$ イオンにおけるレーザーオン/オフにより求めた S/N 比は 300。純度 99.7% での単一同位元素分離を意味する。この試験では、多核子移行反応により生成された短寿命核 (^{199}Pt) の分離・同定にも成功した。

残念ながら ^{198}Pt の場合の引出し効率は 0.2% で、目標値よりも一桁小さい。しかし、測定範囲が限られるものの N=126 の未知中性子過剰原子

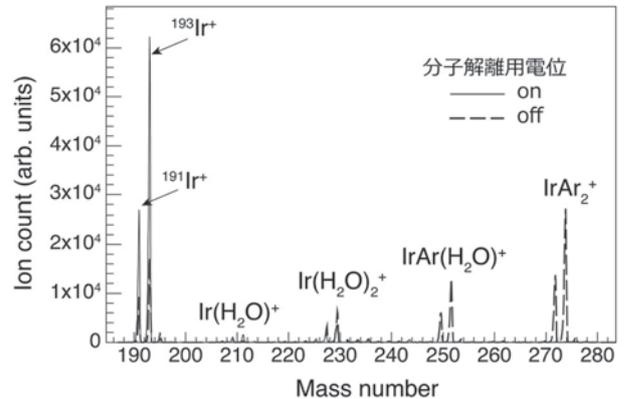


図 8 二段階 SPIG によるイリジウム分子状イオンの単一原子イオンへの解離。SPIG 間の分子解離用電位差は 30 V。破線が印加前、実線が印加後。

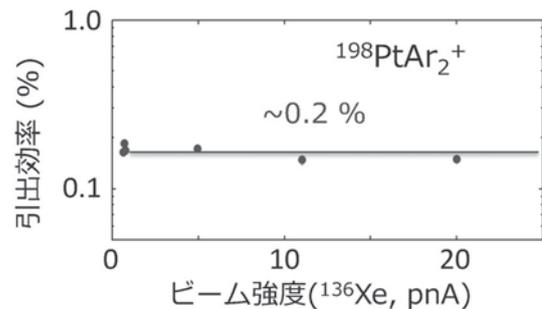


図 9 $^{198}\text{PtAr}_2^+$ の KISS 引出し効率についての ^{136}Xe ビーム強度依存性。 $^{198}\text{PtAr}_2^+$ は、弾性散乱によって標的からガスセル中に放出され、レーザー共鳴イオン化されたのちに、アルゴン分子と結合したイオンである。

核の観測は可能である。今後分子状イオン解離技術の確立とともに、高強度レーザーシステムへの更新を進めながら、本測定を開始する。ちなみに性能試験結果は、参考資料として文献 14) にまとめられている。

3. 和光原子核科学センター

プロジェクトの測定対象と関連させて KISS 装置の解説を行ってきたが、ここまで述べてきた装置の特徴を改めてまとめると、下記の 2 点になる。

- (1) 大きな角度広がりを持つ核反応生成物の高効率な捕集・分離
- (2) 原子番号と質量数の同時分離による高純度低エネルギー短寿命核ビームの生成

これらの特徴は、多核子移行反応のみならず、核融合反応や核分裂反応を用いた重質量領域の短寿命原子核研究にも有効である。そこで KISS の共同利用を見越して、国内的な検討会を適宜開催し、国際的には 9 カ国 15 研究所 (大学) からなる研究情報ネットワーク : IGLIS-net¹⁵⁾ を開設し、研究の促進を図ってきた (図 10 参照)。検討を始めたユーザーからの主な要望としては、天体核物理分野では中性子過剰未知重原子核の寿命測定に加えて精密質量測定のプロポーザルがあり、原子核物理では同領域での崩壊核分光実験などが提案されている。

装置の開発・試験にあたっては、これまで理化学研究所、仁科加速器センターと高エネ機構・素粒子原子核研究所との連携研究として進めてきた。今後 KISS の共同利用実験課題については、理研・仁科センター、東大・原子核科学研究センター、高エネ機構・素核研が共同運営する実験課題採択委員会 (RIBF-PAC) で審議する予定である。また、共同利用におけるユーザーサポート、研究活動における安全の確保を行う高エネ機構の組織として、本年 4 月理研和光キャンパス内に KEK 和光原子核科学センター (KEK Wako Nuclear Science Center: WNSC) が発足した。

4. ま と め

天体における元素合成過程、速い中性子捕獲過程 (R-過程) の起源天体解明に向けた実験的原子核物理のプロジェクト KISS を立ち上げた。このプロジェクトは、中性子過剰な重イオンビームによる多核子移行反応と、レーザー共鳴イオン化と質量分離を組み合わせた元素選択型質量分離装置 KISS からなる。

KISS については、これまでの開発試験で所期の性能をほぼ確認できた。レーザー共鳴イオン化の効率については、高強度レーザーシステムへの更新が強く望まれるところだが、当面は高効率なイオン化経路探索を続けながら本測定を行う予定である。



図 10 2012 年 12 月に理研で開催した第 1 回 IGLIS workshop 時の集合写真。

測定対象となる原子核の原子番号及び質量数を同時分離できる KISS の特徴を生かした様々な原子核実験課題に応えるため、装置は今年度から共同利用装置として国内外のユーザーに解放される。並行してユーザーのサポート、日常的研究活動を支える部署として KEK 和光原子核科学センターが、この 4 月理研和光キャンパスに発足した。

5. 謝 辞

2009 年度に素核研で開かれた KISS プロジェクト国際レビュー委員会（委員長 Sydney Gales, GANIL 研究所所長）からは、プロジェクト遂行の上で貴重な意見をいただいた。特に GANIL で行った多核子移行反応の予備的実験のアイデアはここで生まれた。この実験は大口径スペクトログラフ VAMOS の開発スタッフをはじめ、韓国ソウル大、イタリアのパドワ大、トリノ大、LNL 研究所、フランス IPN 研究所、理研、大阪大メンバーの共同研究によって遂行することができた。また KISS 装置の開拓研究においては、IGLIS 法の生みの親であるベルギー、ルーバンカソリック大のスタッフや、理研 SLOWRI チーム、韓国ソウル大、筑波大からの大学院生の協力が大きな研究基盤となっている。数度にわたる KISS オンライン試験では理研仁科センターの加速器クルーの支援を受けている。この場を借りて感謝を捧げるとともに、今後の協力・連携をお願いする次第である。

KEK の短寿命核グループでは、旧東京大学原子核研究所低エネルギー部の時代に、野村亨教授のもとで、当時の研究情勢に先駆けた ISOL ベースの再加速型短寿命核ビーム施設の開拓を行ってきた。この施設は、その後日本原子力研究開発機構東海キャンパスにおいて TRIAC (Tokai Radioactive Isotope Accelerator Complex)¹⁶⁾ の共同利用として実を結んだ。さらに TRIAC で生

み出された天体核物理研究の成果は、本稿で解説した KISS project となって、新たな低エネルギー短寿命核科学分野の一翼を担っている。最後に、この間にいただいた原子核物理ソサエティからの強いサポートと叱咤・激励、KEK、理研をはじめとする多くの関係者からの有形無形な日常的協力があつたことを記しておきたい。

一連の研究・開発の一部は、JSPS 科研費 20244036, 24740180 および 26247044 の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, and F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.* 29, 547 (1957).
- 2) 和南城伸也ほか, “r プロセス特集”, *天文月報*, 107 巻, 1, 2 号 (2014).
- 3) S.C. Jeong et al., KEK Report 2010-2 (2010).
- 4) V.V. Volkov, Chap.2, *Treatise on Heavy-Ion Science*, Vol. 8, Plenum Press (1989).
- 5) 矢野安重, *加速器 Vol. 2*, 170 (2005) および吉田光一, *加速器 Vol. 10*, 93 (2010).
- 6) C.H. Dasso et al., *Phys. Rev. Lett.* 73, 1907 (1994).
- 7) Y.X. Watanabe et al., *Nucl. Instrum. Meth.* B317, 752 (2013).
- 8) A. Winther, *Nucl. Phys.* A572, 191 (1994) および 594, 203 (1995).
- 9) T.K. Nieto et al., *Phys. Rev.* C89, 024616 (2014).
- 10) Y. Hirayama, et al., *Nucl. Instrum. Meth.* B317, 480 (2013) and *ibid.* B 353, 4 (2015).
- 11) Yu. Kudryavstev et al., *Nucl. Instrum. Meth.* B114, 350 (1996).
- 12) Y. Hirayama et al., *J. Phys.* B47, 075201 (2014) および M. Mukai et al., *Proc. 2nd Int. Conf. on Adv. Rad. Iso. Sci. (ARIS)*, to be published in JPS Conference Proceedings.
- 13) MonoTorr Phase II 3000, SAES Pure Gas, Inc.
- 14) http://kekrnb.kek.jp/KISS_outline.pdf
- 15) <http://kekrnb.kek.jp/iglis-net/>
- 16) 新井重昭ほか, *加速器 Vol. 4*, 196 (2007) および “TRIAC Progress Report”, *KEK Progr. Rep.* 2011-1 (2011).