

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23244060

研究課題名(和文)r-過程重元素合成経路における中性子数126近傍核の生成分離法の開発

研究課題名(英文)Production and separation of the nuclides near to the neutron number 126 on the r-process path

研究代表者

鄭 淳謙 (JEONG, SUNCHAN)

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・教授

研究者番号：00262105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,800,000円、(間接経費) 11,340,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重イオン同士の多核子移行反応と単一原子核種分離法を組み合わせる事によって今までの測定限界を乗り越える、中性子数(N)126滞留核領域へのアクセスに特化した元素選択型同位体分離器KISS(KEK Isotope Separation System)の開発を行い、今までに、引出効率 $\sim 1/400$ 、元素選択度 $\sim 200$ 、平均引出時間 $\sim 200$ msが得られた。これにより、世界でも初めてN=126付近の未知核のベータ崩壊寿命測定が可能となった。又、反応系 $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$ における多核子移行反応チャンネルの断面積測定を行い、N=126近傍核を生成するのに有効であることを示唆する結果が得られた。

研究成果の概要(英文)：We have developed an element-selective isotope separator KISS (KEK Isotope Separator System) for direct access to the waiting nuclei with neutron number (N) of 126 on the r-process path in the chart of nuclides. The performance of the KISS was investigated by using beams from RIKEN Ring Cyclotron. The performance achieved so far for iron was about 1/400, 200, and 200ms for the overall extraction efficiency, selectivity, and average extraction time, respectively, without a significant degradation up to the beam intensity of 4pnA. In the test using the  $^{124}\text{Xe}$  beam, the target ( $^{198}\text{Pt}$ )-recoils were successfully extracted as singly charged ions with similar performance. The KISS is ready to explore beta-decaying properties of the nuclei near to N=126 not yet reached so far. In addition, from the measured cross sections of the multi-nucleon transfer (MNT) channels in the  $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$  system, we demonstrated that the MNT would be promising for producing such heavy neutron-rich nuclei.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：r-過程第3ピーク滞留核 レーザーイオン化 多核子移行反応 元素選択型同位体分離器

## 1. 研究開始当初の背景

鉄より重い元素の半分を合成すると思われる  $r$  - 過程の天体起源を解明するには  $r$  - 過程滞留核を実験室で合成し、その性質（ $\beta$ 崩壊寿命等）を調べることは重要である。しかし、 $r$  - 過程元素組成比において第 3 ピークを形成する中性数（ $N$ ）126 滞留核近傍は未だに有力な生成手法がなく、核図表の未到達域になっており、 $\beta$ 崩壊寿命は理論計算の予測に頼るしかない。元素合成に関わる滞留核に対する原子核の側面からの不確定を改善するためには、理論計算の標準となる  $\beta$ 崩壊寿命の実験値が切望されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、重元素起源天体解明に向けて原子核物理学に課せられた、速い中性子捕獲元素合成（ $r$  - 過程）経路における最後のボトルネック、 $N=126$  滞留核（質量数  $\sim 195$  近傍、中性子数=126）へアクセスする道を拓き、稀少反応チャンネルで生成される原子核のベータ崩壊などの核分光実験を可能とする。そのために、中性子過剰な Xe ビームと白金標的との多核子移行反応によって核図表上前人未到の超中性子過剰原子核（ $N=126$  近傍核）を生成し、分離する元素選択質量分離技術の確立を図り、今までの測定限界を克服する単一核種のベータ崩壊分光実験の基盤を構築する。

## 3. 研究の方法

本研究では、安定核ビーム  $^{136}\text{Xe}$  を核子当たり 10 MeV のエネルギーで  $^{198}\text{Pt}$  標的に照射、多核子移行反応により生成される短寿命な標的側反跳核（ $N=126$  近傍核）をアル

ゴンガスセル中で停止、中性化させ、ガスの層流によりセルの出口まで輸送する。出口付近で、レーザー照射により目的とする元素のみをイオン化し引き出す。更に偏向電磁石で質量分析を行い、単一核種を分離する単一核種生成・分離システムを構築する。開発試験により、全系の効率及び単一核種選択度を引き出す。実際に当反応系により生成される  $N=126$  近傍核を分離して、その生成率の定量的な評価を行い、GRAZING コードによる評価値の妥当性、ならびに他の反応の予測値と比較して多核子移行反応の有効性の実験的検証を行う。

## 4. 研究成果

本研究では、重イオン同士の多核子移行反応と単一原子核種分離法を組み合わせる事によって今までの測定限界を乗り越える、 $N=126$  滞留核領域へのアクセスに特化した実験装置の開発が行われた。具体的な目標として、「 $N=126$  近傍核の生成法として多核子移行反応の有効性を実験的検証」と「単一核種を分離する単一核種生成・分離システムを構築」を取り上げた。

項目 については、注目している反応系  $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$  における多核子移行反応チャンネルの断面積測定を行い、 $N=126$  近傍核を生成するのに有効であることを示唆する結果が得られた。ここでは入射側核破片核の実測値に基づいて 2 体反応相手となる標的側破片核の生成断面積を推測したので不確定性は残るが、今後の研究を続けていく上、重要な指針になると思われる。又、断面積実験データの解析が続けられており、入射側核破片核と同時に測定したガンマ線のデータから標的側破片核の生成断面積の下限

値が求められると思われ、今後の展開に大きな期待が寄せられる。

項目 については、各要素の製作および設置が終わり、全システムの基本的な性能テストを終了した。未だ開発要素が残ってはいるが、単一核種を分離する単一核種生成・分離システムの構築は成功裏に遂行され、今までの測定限界を超えて N=126 近傍核への実験的アクセスが可能となった。現在、Xe ビームと Pt 標的の組み合わせで標的側破片核の生成・分離・ベータ崩壊寿命測定実験が進められている。これらのオンライン試験は、項目 で述べた多核子移行反応による N=126 近傍核の生成率の実験的な検証にも繋がり、真の N=126 滞留核に到達するのに多核子移行反応がどれ程有効であるかを検証する重要な知見を与えると期待される。

#### 4 - 1. N=126 近傍の超中性子過剰核生成方法の探索

準弾性散乱における多核子移行反応過程（移行核子の数が少なく、反応断面積のおよそ7割を占める）は GRAZING によってよく記述されると思われているが、本研究で注目している多核子移行反応チャンネルについてはその予見力が著しく落ちる。その不定性を軽減するため、H24年3月にフランスの GANIL 研究所のスペクトロメーター VAMOS とガンマ線測定器アレイ EXOGAM を用いて、本測定で用いる予定の反応系における多核子移行反応チャンネルの断面積測定実験を行った。入射側破片核については、アイソトープ毎に識別ができ、各多核子移行チャンネルの断面積が求められる。又、励起レベルスキムが分かっている

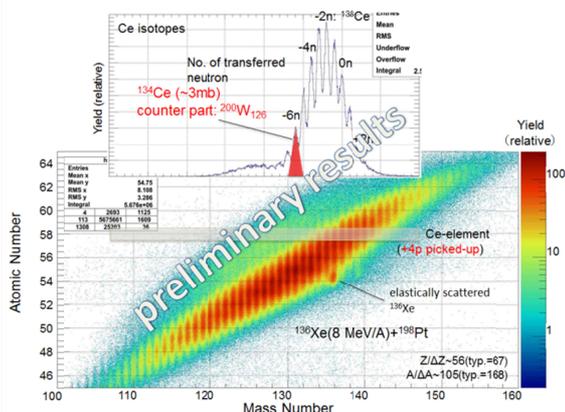


図 1.  $^{136}\text{Xe}$  (Z=54)ビームと  $^{198}\text{Pt}$  標的の反応により、標的原子核からビーム原子核に核子が移行して生成されたビーム近傍の原子核生成率マップと標的核から 4 陽子が移行した場合の Ce 同位体 (Z=58) の生成率。陽子と同時に 6 個の中性子が Xe ビームから標的核に移行した  $^{134}\text{Ce}$  の生成断面積は GRAZING の予測より二桁大きい。このとき標的核側では  $^{200}\text{W}$  (N=126) が生成されていることになる。

る TLF については、脱励起ガンマ線を測定することでその生成率の下限値を求められる。図 1 は現在解析中の結果で、多核子移行反応により生成された入射核側の原子核の生成率を質量数の関数として示している。 $^{134}\text{Ce}_{76}$  に対応して同時に生成される標的核側原子核は、当反応系によりアクセス可能な（例えば、1日のビームタイムでベータ崩壊寿命が測れる等）未知原子核の中で最も断面積の小さな  $^{200}\text{W}$  である。現在進めている解析結果によれば、生成断面積は予測値よりも二桁近く大きな値で、 $^{203}\text{Ir}$ ,  $^{201}\text{Re}$ ,  $^{202}\text{Os}$ ,  $^{200}\text{W}$  (すべて、N=126)などの未知核のベータ崩壊寿命測定実験が遂行可能である事が期待される。

#### 4 - 2. 単一核種生成・分離システムを構築

本研究により完成した単一核種生成・分離・実験装置 KISS (KEK Isotope Separation System)の模式図を図 2 に示す。(ベータ崩

壊測定ステーションは未完成) 多核子移行反応によって生成される標的側反跳核を高効率捕集し、単一核種を分離するため、KISSは、ガスセルシステム、質量分析用偏向電磁石、ベータ崩壊測定システムから構成される。ガスセルシステムの真空槽は三つの部屋に分割されており、最上流の部屋に 50 kPa の Ar ガスで満たされるガスセルが置かれる(図 3)。

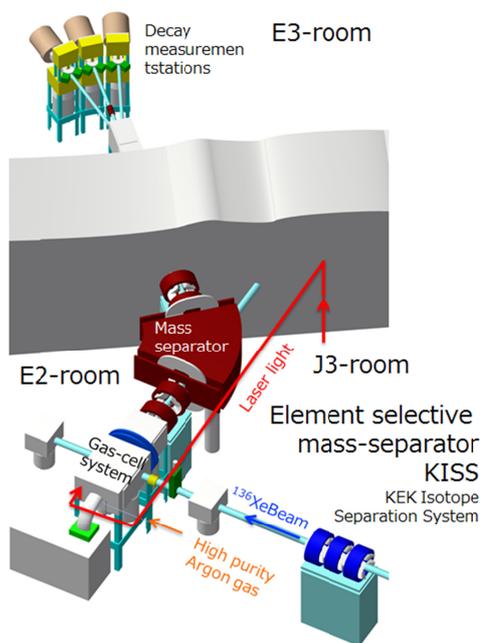


図 2. 単一核種生成・分離・実験装置KISSの模式図

ガスセルの中には、ガスセルシステムの差動排気によりガスセルの手口の方にアルゴンガスの流れ(層流)が出来ている。そこ

に、重イオンビームを入射すると、予めガスセルの中に装着しておいた標的 ( $^{198}\text{Pt}$ ) との核反応により生成される原子核がガスセル中に飛び出す。この標的からの反跳核イオンは、アルゴン (0.5 気圧) で充たされたガスセル中でほぼ 100% 捕獲後、中性原子化され、アルゴンガスの層流に乗って速やかに手口のレーザー照射部に輸送される。本研究では、先行するルーバンカトリック大学(KU Leuven)のガスセル形状を一新して、10 倍の体積を持ちながらガスの層流条件を維持することで短時間 (0.2 秒) の中性原子輸送を実現した。レーザー照射部では波長可変の 2 色のレーザーで、原子固有の励起状態を経由する元素選択的イオン化を実現する(基底 $\rightarrow$ 励起 $\rightarrow$ イオン化状態への 2 段階レーザーイオン化過程)。ガスセルと質量分離器の引出電極間には差動排気系が組み、六重極イオンガイドでほぼ 100% のイオン輸送を行う。20kV で引き出されたイオンは、質量分離器(質量分解能 $\sim 920$ )により質量分離された後、その下流に設置した可動型高速テープ輸送装置にイオンを打込み、崩壊測定器による寿命測定を行う。現在、KISS の詳細性能の試験と改良が行われているが、今までに、レーザー共鳴イオ

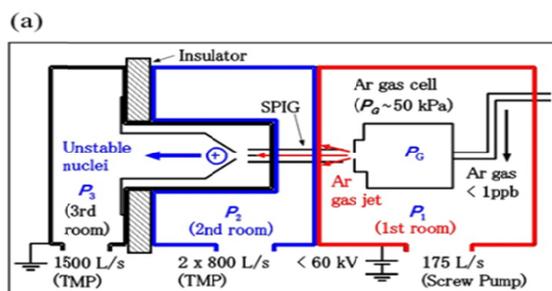
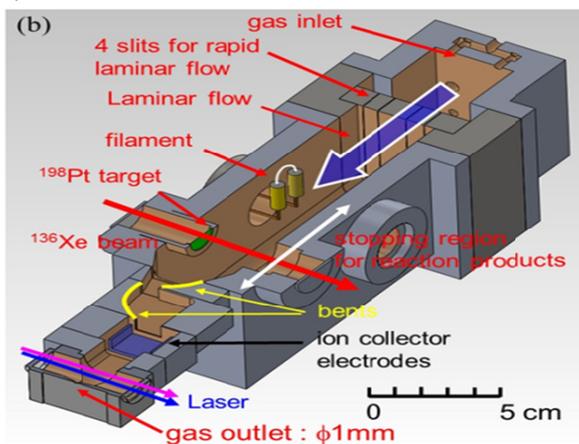


図 3. ガスセルシステム(a)とガスセル(b)の模式図



ンの引出効率 ~1%、選択度 100~500 の性能が得られている(ここでは、レーザーイオン化イオンが含まれている分子イオンも含めた)。引出し効率や選択度は、どちらも予測値の約 1/10 という段階だが、生成量の高い、中性子数 126 の未知核 ( $^{203}\text{Ir}$ 、 $^{202}\text{Os}$ 、 $^{201}\text{Re}$ ) については、測定可能である。今後、KISS の性能改善のための開発試験を進めながら、測定可能な核種についてはベータ崩壊寿命測定を進めて行く予定である。

## 5 . 主な発表論文

【雑誌論文】(すべて査読有) (計 23件)

- 1) Ionization cross section measurements for autoionizing states of iridium and rhenium  
Hirayama Y., Mukai M., Watanabe Y., Imai N., Ishiyama H., Jeong S.-C., Miyatake H., Oyaizu M., Matsuo Y., Sonoda T., Wada M.  
J. Physics B 47 (2014) 075201 (8pp).  
doi:10.1088/0953-4075/47/7/075201.
- 2) In-gas-cell laser ion source for KEK isotope separation system  
Mukai M., Hirayama Y., Jeong S.C., Imai N., Ishiyama H., Miyatake H., Oyaizu M., Watanabe Y.X., Kim Y.H.  
Rev. Sci. Instrum. **85** (2014) 02B906 (3pp)  
doi: 10.1063/1.4827112.
- 3) Study of collisions of  $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$  for the KEK isotope separator  
Watanabe Y.X., Hirayama Y., Imai N., Ishiyama H., Jeong S.C., Miyatake H., Clement E., de France G., Navin A., Rejmund M., Schmit C., Pollarolo G., Corradi L., Fioretto E., Motanari D., Choi S.H., Kim Y.H., Song J.S., Niikura M., Suzuki D., Nishibata H., Takatsu J.,

Nucl. Instrum. Meth. B **317** (2013) 752-755.  
doi:10.1016/j.nimb.2013.04.036.

### 4) Off-line test of the KISS gas cell

Hirayama Y., Watanabe Y.X., Imai N., Ishiyama H., Jeong S.C., Miyatake H., Oyaizu M., Kim Y.H., Mukai M., Matsuo Y., Sonoda T., Wada M., Mark H., Kudryavstev Y., Van Duppen P.  
Nucl. Instrum. Meth. **317** (2013) 480-483.  
doi:10.1016/j.nimb.2013.06.032.

【学会発表】(口頭: 26、ポスター: 4、計 30件)

- 1) Study of multinucleon transfer (MNT) reactions of  $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$  for production of exotic nuclei  
Watanabe Y.X.: FUSION14, New Delhi, Feb. 24-28, 2014 (招待講演)
- 2) beta-decay spectroscopy of r-process nuclei with  $N=126$  at Kiss  
Hirayama Y.: The 12th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), 17-21 November, 2013, Tsukuba, Japan (招待講演)
- 3) Present Status of KISS  
Jeong S.C.: RIBF User Meeting, 26-27 June, 2013, RIKEN, Wako, Japan (招待講演)

### 【その他】

KEK RNB group 研究施設 KISS:

<http://keknb.kek.jp>

In-Gas Laser Ionization for Spectroscopy

NETwork: <http://keknb.kek.jp/iglis-net>

当研究グループの主催でRIKEN行われた

In-Gas Laser Ionization for Decay Spectroscopy Workshopに参加した研究者を中心に、定期的に情報を交換し、共有するための国際ネットワークを立ち上げた。  
( IGLIS-NET )  
Newsletter 発行(2号)。

## 6 . 研究組織

### ( 1 ) 研究代表者

鄭 淳讚 ( JEONG Sunchan )  
高エネルギー加速器機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号 : 0 0 2 6 2 1 0 5

### ( 2 ) 分担研究者

平山 賀一 ( HIRAYAMA Yshikazu )  
高エネルギー加速器機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号 : 3 0 3 9 1 7 3 3

宮武 宇也 ( MIYATAKE Hiroari )  
高エネルギー加速器機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号 : 5 0 1 9 0 7 9 9

石山 博恒 ( ISHIYAMA Hironobu )  
高エネルギー加速器機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師  
研究者番号 : 5 0 3 2 1 5 3 4

渡邊 裕 ( WATANABE Yutaka )  
高エネルギー加速器機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師  
研究者番号 : 5 0 3 5 3 3 6 3

今井 伸明 ( IMAI Nobuaki )

高エネルギー加速器機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号 : 8 0 3 7 3 2 7

### ( 3 ) 連携 研究者

向井 もも ( MUKAI Momo )  
筑波大学大学院・物理学研究科・修士過程  
2

木村 創大 ( KIMURA Sota )  
筑波大学大学院・物理学研究科・博士過程  
1

キム ユンヒ ( Kim Yung-Hee )  
ソウル大学大学院・物理天文学科・博士過程  
2

小柳津 広充 ( OYAIZU Mchihiro )  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究支援員