

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 11 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540316

研究課題名（和文） シリコン30とキュリウム248の融合反応による原子番号110の新同位体合成

研究課題名（英文） Production of an isotope with element 110 in the fusion reaction between silicon-30 and curium-248

研究代表者

西尾 勝久（KATSUHISA NISHIO）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：70343928

研究成果の概要（和文）：

アクチノイド原子核を標的核とした核融合反応は超重原子核を合成するために世界的に利用されているものの、その反応機構は明らかにされておらず生成断面積を予測する上で障害となっていた。本研究は、重イオン入射核分裂過程を実験的および理論的に調べることで融合確率を決定する方法を見出すとともに、核融合反応におよぼすアクチノイド原子核の変形効果を明らかにすることにより、サブバリヤエネルギー反応で超重元素の新同位体を合成できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Fusion-evaporation reaction using actinide target nuclei is extensively used to produce super-heavy nuclei (SHN). The fusion reaction itself, however, has not been fully understood, which makes it difficult to predict the production cross sections of SHN. We proposed a method to determine the fusion probability by measuring heavy-ion induced fission. Effect of nuclear deformation on fusion was investigated, and it was shown that SHN can be produced at sub-barrier energies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超重元素、重イオン融合反応、核分裂

1. 研究開始当初の背景

超重原子核を合成し、その性質を理解することは鉛208に次ぐ閉殻構造を理解し、また元素の存在限界を知る上で核物理分野のみならず学術的な意義は極めて大きい。超重原子核は、原子核どうしの核融合反応を用いて合成される。近年、世界の大型加速器を用いた実験ではアクチノイド原子核を標的核に用いた反応が利用されている。これは、（1）

鉛やビスマス標的を利用する冷たい核融合反応に比べて生成断面積が大きい傾向にあること、（2）生成原子核の中には寿命の長い原子核があり、超重元素の化学的な性質を調べる実験に有用であること、（3）比較的中性子数の多い原子核が生成されるため、中性子閉殻（中性子数 $N=184$ ）近傍の原子核構造を知ることができるためである。これまでの実験では、従来の実験データを外挿する

ことで実験条件（例えばビームエネルギー）を決定していた。一方で、核融合反応機構を解明することにより、信頼ある生成断面積の評価方法を確立することが望まれていた。特にアクチノイド原子核は、ラグビーボール型に変形しており、原子核の変形が融合過程に影響を及ぼすことが議論されていたものの、明確な効果については未知であった。

2. 研究の目的

^{238}U や ^{248}Cm などのアクチノイド原子核はラグビーボール型に変形している。本研究は、この変形が重イオン核融合過程に及ぼす影響を明らかにするとともに、融合確率を決定する手法を見出すことを目的とした。

核融合反応によって生じた複合核は高励起状態にあり、複数の中性子を蒸発することにより、蒸発残留核として超重原子核が生成される。蒸発残留核の生成断面積の励起関数を取得することが理想であるが、超重原子核の生成断面積は一般に極めて小さく（ピコ・バーン程度）、この手法は適切ではない。本研究では、重イオン反応で生成される核分裂片の質量数分布を測定することで融合確率を決定することにした。

3. 研究の方法

超重元素の生成断面積を以下の3つの物理量の積として表す。(1)原子核どうしが衝突し、クーロン障壁を超えて接触する断面積、(2)接触点から原子核が融合して複合核を生成する確率（融合確率）、および(3)生成された複合核が中性子を蒸発し、蒸発残留核として生き残る確率。(1)と(3)は、それぞれチャンネル結合法による計算、および統計モデル計算によって評価する方法が確立されている。本研究では、これまで明らかにされなかった(2)の融合確率を決定することを課題とした。

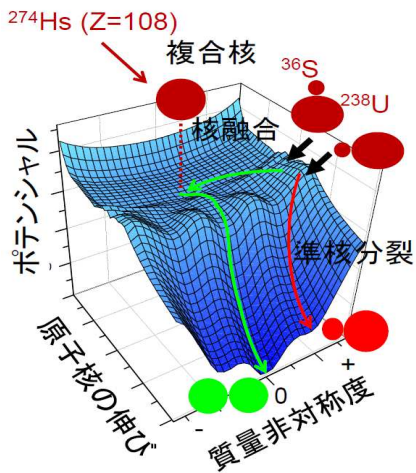


図1 核融合と準核分裂の競合。反応が始まる2つの点を示した。

融合確率の決定方法を図1で説明する。図は $^{36}\text{S}+^{238}\text{U}$ による複合核 ^{274}Hs の生成過程を、ポテンシャルエネルギー曲面上で例示している。核融合が起きて複合核が生成されても、その多くは核分裂によって崩壊する（融合-核分裂）。複合核に至らなければ、準核分裂として崩壊する。ポテンシャルエネルギー曲面の構造から、前者は質量対称に核分裂し、後者は質量非対称に分裂する。すなわち、核分裂片の質量数分布を測定することで核融合と準核分裂を分離することができ、この比率から融合確率を決定することができる。また、図1から反応に及ぼす ^{238}U などアクチノイド原子核の変形効果が現れると推測できる。赤道面に衝突する場合、原子核はコンパクトな配位から反応が進むため、核融合が起こりやすい。一方、先端部から衝突する場合、離れた点から反応が起こるため準核分裂に流れやすい。この変形効果は、衝突エネルギーを変えることによって調べることができる。先端部衝突ではクーロン障壁が低く、赤道面衝突では障壁が高い。このため、ビームエネルギーの低い反応実験では、先端部衝突を選択的に観測することになる。衝突エネルギーを上げると、赤道面からの反応が寄与する。

アクチノイド原子核を用いた核分裂実験は、原子力機構のタンデム加速器施設を用いて行った。標的原子核として、半減期が長く取扱いが容易な ^{238}U を用いた。入射核の変化に対する融合確率の変化を測定することにより、未開拓の元素合成に対応できるモデルの構築を目指すこととした。このため、入射核を ^{30}Si , ^{31}P , $^{34,36}\text{S}$, ^{40}Ar , $^{40,48}\text{Ca}$ と変化させて測定を行った。これにより、 $^{30}\text{Si}+^{248}\text{Cm}$ など、任意のアクチノイド標的核を用いた反応の生成断面積を包括的に評価することを目指した。

^{238}U の薄膜標的は、 $0.1\mu\text{m}$ のニッケル箔上に硝酸ウラニルを電着することで作製した ($50\mu\text{g}/\text{cm}^2$)。重イオン反応で生成された2つの核分裂片を、位置検出可能な多芯線比例計数管 (MWPC: Multi-Wire Proportional Counter) で検出し、飛行時間分析を行った。核分裂片の質量は、質量数と運動量保存則を用いて運動学的に決定した。MWPCは、3 Torr程度のイソブタンガスで動作させるガス検出器であり、得られる信号パルスの立ち上がり時間が高速(数ナノ秒)である。また、有感面積を広くとることができる。本実験で開発した MWPC の有感面積を $200(X)\times 120(Y)\text{mm}^2$ とした。高速応答による高計数率条件での測定が可能となり、核分裂断面積が極めて低くなる (0.1mb 程度) 領域までの核分裂測定を可能にし、先端部衝突から始まる反応の核分裂特性を測定できるようにした。

4. 研究成果

得られた核分裂片の質量数分布の実験結果を図2に示す。図は、左から $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$, $^{31}\text{P}+^{238}\text{U}$, $^{36}\text{S}+^{238}\text{U}$, $^{40}\text{Ar}+^{238}\text{U}$, $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ の結果を示す。それぞれの反応ごとに衝突エネルギーを変化させてスペクトルを得た。図中の数字は、複合核が生成された場合の複合核の励起エネルギーを表す。最も下の図は衝突エネルギーが極めて低い場合の結果であり、右の模式図に示すように反応は先端部への衝突に限られる。

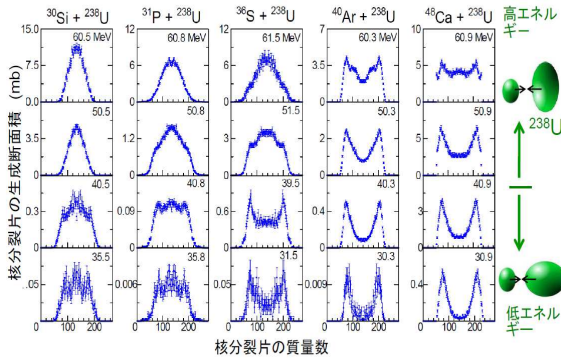


図2 核分裂片の質量数分布

$^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ 反応を見ると、高エネルギー側でガウス型の分布を示しているのに対し、低エネルギー側では質量非対称な成分が現れている。 $^{31}\text{P}+^{238}\text{U}$ でも同様の傾向が見られ、 $^{36}\text{S}+^{238}\text{U}$ ではエネルギーに対して分布が激しく変化している。この傾向と図1から、準核分裂では質量非対称に核分裂し、反応に及ぼす標的原子核の変形効果を明らかにした。重い入射核の ^{40}Ar と ^{48}Ca を用いた場合、全エネルギー領域にわたって質量非対称分布が支配的となる。このことは、原子核どうしの強いクーロン斥力のため、核融合が起こりにくくなることを示している。一方、衝突エネルギーの増大に伴って質量対称成分が成長していることがわかる。このことから、反応に及ぼす変形効果は入射核によらない普遍的な現象であることが分かった。

実験データから融合確率を決定するため、理論モデルを開発した。このモデルは、揺動散逸理論を用いて原子核の形状を時間に対して追跡するものである。反応が始まる接触点からの原子核の形状の変化をランジェバン方程式によって計算した。方程式の中にはランダム力が含まれているため、原子核の軌道に揺らぎと分布が現れる。原子核の形状は、質量非対称度、電荷中心距離および変形度を用いて原子核の形状を記述した。計算結果を図3に示す。図には $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ および $^{36}\text{S}+^{238}\text{U}$ の結果を示しており、反応エネルギーは図2の最下部に相当するもので先端部からの衝突を計算している。原子核どうしの衝突直後

($t < 5 \times 10^{-21}$ 秒) では、両反応はともに複合核の形状に向かっている。一方、次の時間帯で両者に変化が現れる。 $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ の多くのイベントは、準核分裂に向かって崩壊が始まり、複合核に向かうものはわずかである。一方 $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ では多くの軌道が複合核に到達しているのがわかる。この後、 $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ では 30×10^{-21} s 以降に複合核からの核分裂が起こり始めている。本理論は、任意の反応に適用可能な汎用性の高いものである。

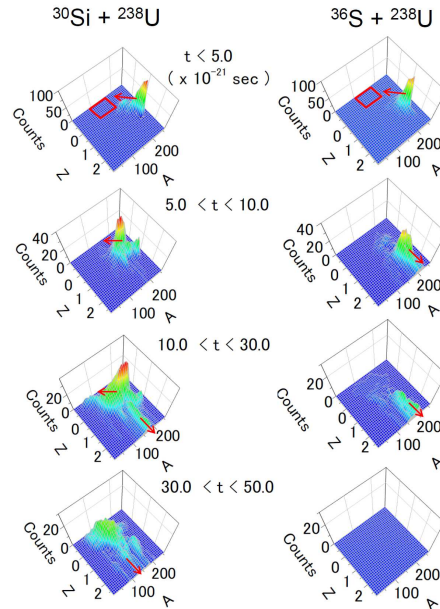


図3 時間に対する原子核形状の時間発展。原子核形状の確率分布を、質量数(A)と電荷中心距離(Z)の関数として与えている。最上部の図に示した口は、複合核の領域を表す。

実験結果を理論計算と比較した結果を図4に示す。図は、 $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ および $^{34}\text{S}+^{238}\text{U}$ で得られたもので、理論は実験値をよく再現している。前述のように、本理論では複合核に到達してから核分裂するイベントを取り出すことができる。この核分裂片質量数分布を図4の塗りつぶしたスペクトルで示す。複合核の核分裂は質量対称な分布を示し、これら反応で生成される複合核 (^{268}Sg と ^{272}Hs) に共通である。一方、複合核に到達する割合は、 $^{34}\text{S}+^{238}\text{U}$ 反応では少ない。全核分裂事象に占める融合-核分裂の割合から、融合確率を決定した。この結果を図4に数値として示した。 $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ ではエネルギーに対して 29% から 46% に変化し、 $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ では 3.6% から 15% に変化し、核融合反応に及ぼす標的の変形効果を定量的に明らかにした。

図4に示す下の2つのエネルギー領域はサブバリアーに相当する。従来のアクチノイド原子核を用いた反応実験ではこのエネルギー領域が注目されることはなく、超重元素

が合成された例はなかった。本結果は、融合確率が低下するものの、このエネルギー領域でも超重原子核が合成可能な融合確率を有していることを示した。本研究では、図4に○として示す4つのエネルギー点でそれぞれ ^{263}Sg (5n), ^{264}Sg (4n), ^{267}Hs (5n), ^{268}Hs (4n) を実際に合成することに成功した。その結果、 ^{263}Sg で 67pb, ^{264}Sg で 10pb, ^{267}Hs で 1.8pb, ^{268}Hs で 0.54pb を得た。統計モデル計算による解析から、図4に示した融合確率の値が適切な評価を与えていることがわかった。なお、 ^{268}Hs は新同位体の合成となった。

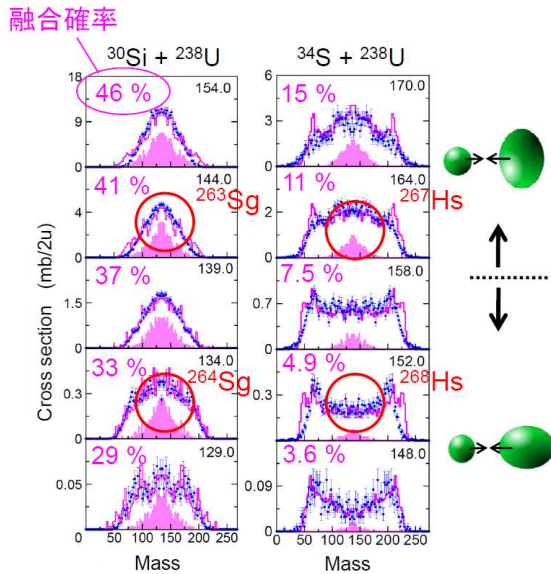


図4 核分裂片質量数分布の実験値と計算値の比較。図中の数字は融合確率と、重心系での衝突エネルギーを示す。

^{30}Si より重い原子核である ^{34}S を用いた反応において、サブバリアエネルギー領域で超重原子核が生成できることを示した。また、標的原子核が ^{238}U から ^{248}Cm に変化した場合の融合確率の低下は硫黄ビームで 40%であることが分かった。このような考察から、 $^{30}\text{Si} + ^{248}\text{Cm}$ のサブバリアエネルギー反応において 110 番元素の新同位体 ^{270}Cn (コペルニシウム) を 4n チャンネルで合成可能であることを明らかにした。 ^{270}Cn は娘核 ^{270}Hs に遷移する α 崩壊が主たる崩壊チャンネルであると予測される。理論は、原子番号 108 に変形閉殻が存在すると予測しており、このため α 粒子のエネルギーが周囲の原子核に比べて大きいと期待できる。このエネルギーの観測によって変形閉殻が明らかになるとともに、閉殻の強さを与えることになり、超重原子核の構造理論へのインパクトが期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

- ① K. Nishio, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, H. Makii, Y. Wakabayashi, H. Ikezoe, K. Hirose, T. Ohtsuki, Y. Aritomo, and S. Hofmann
Fusion probabilities in the reactions $^{40,48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ at energies around the Coulomb barrier,
Physical Review C, **86**, 034608 (1-6) (2012). 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevC.86.034608
- ② J. Khuyagbaatar, K. Nishio, S. Hofmann, D. Ackermann, M. Block, S. Heinz, F. P. Heßberger, K. Hirose, H. Ikezoe, B. Kindler, B. Lommel, H. Makii, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, T. Ohtsuki, Y. Wakabayashi, and S. Yan
Evidence for hindrance in fusion between sulfur and lead nuclei
Physical Review C, **86**, 064602 (1-6) (2012). 査読有
DOI : 10.1103/PhysRevC.86.064602
- ③ Y. Aritomo, K. Hagino, K. Nishio, S. Chiba,
Dynamical approach to heavy-ion induced fission using actinide target nuclei at energies around the Coulomb barrier,
Physical Review C, **85**, 044614(1-15) (2012). 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevC.85.044614
- ④ K. Nishio, H. Ikezoe, I. Nishinaka, S. Mitsuoka, K. Hirose, T. Ohtsuki, Y. Watanabe, Y. Aritomo, and S. Hofmann,
Evidence for quasifission in the sub-barrier reaction of $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$
Physical Review C, **82**, 044604 (1-5) (2012). 査読有,
DOI: 10.1103/PhysRevC.82.044604
- ⑤ K. Nishio, S. Hofmann, F.P. Heßberger, D. Ackermann, S. Antalic, Y. Aritomo, V.F. Comas, Ch.E. Düllmann, A. Gorshkov, R. Graeger, K. Hagino, S. Heinz, J.A. Heredia, K. Hirose, H. Ikezoe, K. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, B. Lommel, R. Mann, S. Mitsuoka, Y. Nagame, I. Nishinaka, T. Ohtsuki, A.G. Popeko, S. Saro, M. Schädel, A. Türler, Y. Watanabe, A. Yakushev, and A.V. Yeremin
Nuclear orientation in the reaction $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ and synthesis of the new isotope ^{268}Hs
Physical Review C **82**, 024611, (1-9) (2010). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.82.024611

〔学会発表〕（計 18 件）

- ① K. Nishio
Fission research program at JAEA
The 10th ASRC International Workshop on
Nuclear Fission and Decay of Exotic Nuclei”
(招待講演)
2013年03月21日～22日
Tokai, Japan
- ② K. Nishio
Fusion-fission study at JAEA for
heavy-element synthesis
Scientific workshop on Nuclear Fission
Dynamics and the Emission of Prompt
Neutrons and Gamma Rays (Theory-2)
(招待講演)
2012年11月28日～30日
Biarritz, France
- ③ K. Nishio
In-beam fission study at JAEA for
heavy-element synthesis,
International Conference on Recent Trends
in Nuclear Physics 2012
(招待講演)
2012年11月19日～21日,
Chandigarh, India
- ④ K. Nishio
Fusion-fission study at JAEA for heavy
element synthesis
VIII Tours Symposium on Nuclear Physics
and Astrophysics
(招待講演)
2012年9月2日～7日,
Lenzkirch-Saig, Germany
- ⑤ K. Nishio
Nuclear orientation in fusion and synthesis of
heavy element at sub-barrier energy
7th. International Conference on Dynamic
Aspects of Nuclear Fission
(招待講演)
Oct. 17-21, 2011
Smolenice, Slovakia
- ⑥ K. Nishio
Fission dynamics in heavy ion collisions on
 ^{238}U
Scientific Workshop on Nuclear Fission and
Dynamics and the Emission of Prompt
Neutrons and Gamma Rays
27-29 Sep, 2010.
Sinaia, Romania
- ⑦ K. Nishio
Effects of nuclear orientation on fusion
and fission process for reactions using
 ^{238}U target nucleus,
24th International Nuclear Physics
Conference 2010,

(招待講演)
4-9 July, 2010.
Vancouver, Canada

6. 研究組織

(1)研究代表者

西尾 勝久 (NISHIO KATSUHISA)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
先端基礎研究センター・研究主幹
研究者番号:70343928

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

光岡 真一 (MITSUOKA SHIN-ICHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
先端基礎研究センター・研究主幹
研究者番号:40354881

西中 一朗 (NISHINAKA ICHIRO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
先端基礎研究センター・研究副主幹
研究者番号:70354884