

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04003

研究課題名（和文）融合ダイナミクスに起因する殻構造の変化を利用した未知超重元素生成の理論研究

研究課題名（英文）Theoretical study of synthesizing superheavy element using changes in shell structure caused by fusion dynamics

研究代表者

有友 嘉浩 (Aritomo, Yoshihiro)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：90573147

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、動力学模型を用いた軌道解析により、変形領域における準安定な状態を経由して球形領域の複合核を形成できるメカニズムの検証、および超重元素生成の蒸発残留核断面積の評価を行うことである。新元素合成のために新しい実験手法の提案を目標とし、標的核・入射核の選択、最適入射エネルギーと生成断面積を提案すること、系統的に蒸発残留核断面積を計算し、原子番号119番以上の元素の合成実験の可能性を示すことである。超重元素領域で重要となる殻構造に対し、軌道計算を繰り返し行い検証することで、融合過程で起こる「動的な殻構造の変動」の現実な利用の提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙に存在できる最も重い元素の探求（人工的な合成）のため、ここでは次の新元素である原子番号119番以上の元素および安定な島の中心の二重魔法核の合成の成功を目指す。そのために、画期的な新しい反応機構を見つけ出し、新機構を利用した実験手法を提案する。現在計画されている実験手法は、従来の手法の延長線上の方法であり、加速器や検出器の性能の向上を図っても、将来にわたる長期的な新元素合成の成功に高い望みは持てない。理論研究の目的としては、融合過程における「動的な殻構造の変化」を最大限に利用した特異で新規な反応メカニズムを追求し明らかにすることである。

研究成果の概要（英文）：In this study, by trajectory analysis using a dynamical model, we verified the mechanism by which complex nuclei in the spherical region can be formed via metastable states in the deformation region, and evaluated the cross section of the evaporation residue nucleus for superheavy element formation. The goal was to propose new experimental methods for new nucleosynthesis, and to propose the selection of target nuclei and incident nuclei, the optimal incident energies, and the generation cross sections. We performed the systematic calculation for the evaporative residual cross section and showed the feasibility of synthetic experiments for elements with atomic numbers of 119 and above. By repeating trajectory calculations and verifying the shell structure, which is important in the superheavy element region, we proposed the practical use of the "dynamic shell structure variation" that occurs in the fusion process.

研究分野：原子核理論

キーワード：新元素合成 二ホニウム 120番元素 動力学模型 殻構造 散逸揺動定理 ランジュバン方程式 中性子過剰核

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2016年11月の終わりに、周期表に新たに4つの元素が加わった。その一つが日本で合成に成功したニホニウム(113番元素)である。日本初の日本に由来する元素であり、国内外のニュースでは大きく取り上げられ話題となった。この時、同時に118番元素であるオガネソンも名前が確定し周期表の第7周期の元素がすべて埋まった段階であった。次の新元素である119番元素は前人未踏である第8周期元素であり、高い話題性を伴う研究となっていた。ニホニウム合成に成功した日本の理化学研究所をはじめ、ロシア、ドイツなどの国が119番元素合成実験に乗り出していた。

ところが従来の実験手法では原子番号の増加とともに生成確率が非常に小さくなり、すでに118番元素では、現在の実験装置で1週間に1個程度、119番元素では理論予測として1年から2年に1個程度の合成が成功するか否かと言った状況であった。当時行われていた合成実験は、重イオン融合反応であり、特に119番元素以降の原子核の実験手法として標的核にアクチノイド原子核を用いる「熱い融合反応」という手法である。2019年の段階で、標的にPu,Cm,Bkなどを用いる実験がすでに実行されている段階であった。また標的核の安定性の制約から、119番元素以降の原子核を生成するためには、入射核として従来使用してきた48Caより原子番号の大きい原子核を使用する必要があると、Ti,V,Cr,Feなどの利用が考えられ、すでに実験で利用されている段階であった。しかし48Caより中性子数比が小さくなるために、生成核は安定な島から離れていくという不利な点も指摘されていた。

また核子移行反応による新元素合成も提案されており、反応メカニズムを理解するために準核分裂の実験的研究も盛んに行われるようになっていた。

このような状況のもと、理論計算による生成確率の評価が行われ、最適な入射ビームのエネルギーも合わせて議論されていた。ただし、理論模型の精度は低く、多くの不定性やパラメータを含んでいる状況であり、またそのメカニズムも詳細には解析されていなかった。特に核子移行反応による生成核の評価や、準核分裂の取り扱いなども多くの不明な点が存在していた。融合分裂過程の反応メカニズムを解析できる理論計算が必要であり、そのため理論模型の再構築や検証を行うことが不可欠な状況であった。さらに、従来の実験手法とは異なる新しい反応メカニズムの提案が望まれている状況であった。

2. 研究の目的

宇宙に存在できる最も重い元素の探求(人工的な合成)のため、ここでは次の新元素である原子番号119番以上の元素および安定な島の中心の二重魔法核の合成の成功を目指す。そのために、画期的な新しい反応機構を見つけ出し、新機構を利用した実験手法を提案する。現在計画されている実験手法は、従来の手法の延長線上の方法であり、加速器や検出器の性能の向上を図っても、将来にわたる長期的な新元素合成の成功に高い望みは持たず、また実験で使える安定な標的核・入射核では「安定な島」への到達も完全に不可能である。理論研究の目的としては、融合過程における「動的な殻構造の変化」を最大限に利用した特異で新規な反応メカニズムを追求し明らかにすることである。今後、世界で行われる超重元素合成実験に対し、融合を増幅させるような殻構造を利用する手法を、一つの大きな流れとすることを目的とする。

3. 研究の方法

揺動散逸定理に基づいた動力学模型を用いて蒸発残留核断面積を評価する。具体的には、二中心間模型を用いて、原子核の形状を表すパラメータ空間におけるポテンシャルエネルギーを計算し、そのポテンシャル空間内を移動する軌道(すなわち原子核の形状の時間変化)を、ランジュバン方程式を用いて軌道追跡し、反応のダイナミクスを解析する。準安定領域に到達した軌道や、球形領域に入った軌道から等から融合確率を求める。次に統計模型コードから生き残り確率を計算し、最終的に蒸発残留核断面積を求める。

4. 研究成果

(1)

超重元素合成の新しい反応機構の解明および新元素の合成確率の評価を行うために、「動力学模型コード」の開発を行った。入射核と標的核の距離が無限遠から離れた地点から計算をスタートし、接触、さらに複合核形成を行うまでの過程について、既存の動力学模型をさらに改良・修正し、融合分裂機構の解明を試みた。この結果、diabatic potential から adiabatic potential への移行時間、さらにネックパラメータと呼ばれるパラメータの緩和時間が、反応のダイナミクスに大きな影響を与えることを突き止めた。この緩和時間は、実験で測定されている分裂片の質量分布(準核分裂の質量分布)と分裂片の運動エネルギー分布(TKE)に反映され、実験値と計算値を比較することで、緩和時間の影響を解析することが可能である。また、パラメータの緩和時間を表す関数についても、どのような関数を採用するかで計算結果が大きく影響を受けることが分かった。

(2)

殻補正エネルギーの動的効果を検証するために、ポテンシャルエネルギーの計算を系統的に行い、変形領域に現れるセカンドポケットを探し出した。傾向として、標的核が球形核の場合は、軌道のターニングポイントと呼ばれる変形領域にセカンドポケットが現れ、我々が提案している反応機構が利用できることが分かった。

(3)

開発したプログラムコードを用いて、新元素合成に対する生成可能性について系統的に調べた。特に未知原子核である 120 番元素の合成を中心に、融合確率、融合過程の軌道解析とその反応メカニズムの解析、および残留核断面積の計算を行い、その妥当性を評価した。変形空間でのポテンシャルの状況を詳細に解析し、殻補正エネルギーによる準安定な形状を見つけ出し、動力学モデルにおける融合軌道が、準安定な状態、すなわちポテンシャル上のポケットにトラップされるかどうかについて、入射条件を様々に変化しながら解析を行った。融合過程における準安定な状態は、原子核の比較的大きく変形した地点に存在する。超重元素領域における融合反応過程では、標的核と入射核の同士の大きなクーロン反発により、大きく変形すると考えられ、軌道も同様に変形領域に向かう。この時、変形領域に存在するポテンシャルのポケットにトラップされる現象が見られた。このような軌道の存在確率や、どのような条件(入射核と標的核の組み合わせ、入射エネルギーなどの初期条件)の場合、より多くこの領域に到達できるのか、またトラップされるのかを系統的に調べた。原子番号 120 番元素を生成する場合、標的核による中性子過剰な核を使用するほうが、変形領域のポケットの地点と軌道の到達点が一致することを見出した。

(4)

未知原子核である原子番号 120 番原子核に対し、様々な入射核と標的核のコンビネーションを選び、また入射エネルギーを変えて融合確率の計算、軌道分析を行った。融合過程において、変形領域に現れるセカンドポケットに軌道がトラップされると、軌道が一時的に停滞した後、その位置から球形領域に向かう軌道が確認できた。このような軌道は、融合確率を増加する効果があると考えられる。このことから、セカンドポケットの位置と、軌道の到達領域の関係が重要であることが分かった。またセカンドポケットにトラップされる軌道数や球形領域に到達できる軌道数をカウントし、それぞれの確率を導出し、定量的に評価を行った。

(5)

蒸発残留核断面積を計算するのに必要な生き残り確率の計算について、改良を行った。生き残り確率の計算は、一般に統計モデルが利用される。我々が開発してきた統計モデルコードは、超重元素領域に特化したコードであり、現在までにいろいろな計算で利用し、成果を上げてきた。しかし、今回の研究課題である中性子過剰核を扱う際、計算結果が不安定となるため、その原因を追究し、改良を行った。その結果、統計モデルコードを使用する際に利用する質量テーブルに問題があることが分かった。超重元素領域における中性子過剰核の質量テーブルのデータは、実験値が存在しない原子核において、非常に不定性が大きく、これを直接統計モデルコードに利用すると、異常な生き残り確率が出力される。この問題を解決するために、two-center shell model からポテンシャルマップを作成し、高励起複合核からの崩壊過程を想定し、球形付近の基底状態を特定しながら、中性子過剰核での質量テーブルの改良を行った。これらの改良により「新元素合成の生成評価を行うための統計モデルに適した質量テーブル」が得られた。

新元素合成の生成確率の計算に対し、精度の高い評価を行えるようになったと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Y. Aritomo, A. Iwamoto, K. Nishio, and M. Ohta	4. 巻 105
2. 論文標題 Fission mechanism inferred from nuclear shape fluctuation by the Langevin equation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 0346041-034648
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S. Tanaka, K. Hirose, K. Nishio, K. R. Kean, H. Makii, R. Orlandi, K. Tsukada, and Y. Aritomo	4. 巻 105
2. 論文標題 Angular momentum transfer in multinucleon transfer channels of $^{180+237}\text{Np}$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 216021 -216025
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Amano, Y. Aritomo, M. Ohta	4. 巻 6
2. 論文標題 Fusion cross section and total kinetic energy of fission fragments by the dynamical dissipative surface-friction model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Eurasian Journal of Physics and Functional Materials	6. 最初と最後の頁 6-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yoshihiro Aritomo, Shota Amano, Mizuki Okubayashi, Baku Yanagi, Katsuhisa Nishio, and Masahisa Ohta	4. 巻 83
2. 論文標題 Estimation of synthesizing new superheavy elements using dynamical model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Atomic Nuclei	6. 最初と最後の頁 545-549
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 M. J. Vermeulen, K. Nishio, K. Hirose, K. R. Kean, H. Makii, R. Orlandi, K. Tsukada, I. Tsekhanovich, A. N. Andreyev, S. Ishizaki, M. Okubayashi, S. Tanaka, and Y. Aritomo	4. 巻 102
2. 論文標題 Measurement of fission-fragment mass distributions in the multinucleon transfer channels of the $180+237\text{Np}$ reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 0546101-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Amano, Y. Aritomo, Y. Miyamoto, S. Ishizaki, M. Okubayashi	4. 巻 84
2. 論文標題 Modeling of Nuclear Reactions with Langevin Calculations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics	6. 最初と最後の頁 1034-1038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shota Amano, Yoshihiro Aritomo, and Masahisa Ohta	4. 巻 106
2. 論文標題 Modes of massive nucleon transfer appearing in quasifission processes for collisions of superheavy nuclei	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 0246101-0246108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 有友嘉浩, 高木慎弥, 津野大海, 前川北斗, 西村絃志, 西尾勝久, 西村信哉
2. 発表標題 アクチノイド領域における原子核の構造と反応ダイナミクスに与える影響
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木慎弥, 天野翔太, 山本匠真, 有友嘉浩
2. 発表標題 融合ダイナミクスに起因する殻構造の変化を利用した未知超重元素生成の理論研究
3. 学会等名 基研研究会 核力に基づいた原子核の構造と反応
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木慎弥, 天野翔太, 宮堺渉, 山本匠真, 有友嘉浩
2. 発表標題 融合過程における殻構造変化を利用した新元素生成可能性の評価
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎僚太, 田中翔也, 有友嘉浩, 西尾勝久
2. 発表標題 Neutron emission during fission process by dynamical model
3. 学会等名 2020年度核データ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 天野翔太, 有友嘉浩, 石崎翔馬, 奧林瑞貴, 奥川誠也
2. 発表標題 The origin of correlation between mass and angle in quasi-fission
3. 学会等名 2020年度核データ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 天野翔太, 有友嘉浩, 石崎翔馬, 奧林瑞貴
2. 発表標題 核子移行反応による超重元素生成過程のダイナミクスの解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有友嘉浩, 高木慎弥, 泉拓実, 天野翔太, 太田雅久, 西尾勝久
2. 発表標題 超重元素合成に関する系統的な生成確率評価手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎僚太, 田中翔也, 有友嘉浩, 西尾勝久
2. 発表標題 核分裂過程での中性子放出を考慮した動力学模型の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Aritomo
2. 発表標題 Nuclear reaction in superheavy mass region with Langevin calculation
3. 学会等名 Focus Program: A quest for exotica in rare-earth elements (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有友嘉浩
2. 発表標題 動力学模型による核分裂ダイナミクスの解析と今後の展望
3. 学会等名 理研RIBFミニワークショップ「理論と実験で拓く中性子過剰核の核分（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinya Takagi, Shota Amano, Shoma Yamamoto, Yoshihiro Aritomo
2. 発表標題 Evaluation of synthesizing new superheavy element based on dynamical shell structure during fusion process
3. 学会等名 the 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hokuto Maekawa, Shota Amano, Shinya Takagi, Yoshihiro Aritomo, Tathagata Banerjee
2. 発表標題 Evaluation of capture cross-sections for synthesis of superheavy elements using dynamical model
3. 学会等名 the 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Itoshi Nishimura, Nobuya Nishimura, Shoya Tanaka, Wataru Miyasakai, Shynya Takagi, Masahisa Ohta, and Yoshihiro Aritomo
2. 発表標題 Fission fragment distributions of neutron-rich nuclei based on Langevin calculations in the r-process region
3. 学会等名 Nuclear Physics in Astrophysics -X (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nobuya Nishimura, Shoya Tanaka, Itoshi Nishimura, Wataru Miyasakai, Shinya Takagi, Yoshihiro Aritomo, Masahisa Ohta
2. 発表標題 The impacts of dynamical nuclear fission for neutron-rich actinoids on r-process nucleosynthesis
3. 学会等名 Nuclear Physics in Astrophysics X (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有友嘉浩, 芝田啓悟, 浅見明宏, 西川勝麻, 高木慎弥, 前川北斗, 天野翔太
2. 発表標題 超重元素領域における中性子過剰核の生成確率の評価
3. 学会等名 原子核におけるクラスター物理の新展開
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木慎弥, 天野翔太, 有友嘉浩
2. 発表標題 新元素合成における中性子過剰核を利用した融合反応機構の評価
3. 学会等名 原子核におけるクラスター物理の新展開
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.Nishikawa, Y.Aritomo, S.Takagi, H.Maekawa, S.Amano, K.Shibata, A.Asami
2. 発表標題 Theoretical estimation of synthesizing neutron rich nuclei in superheavy mass region
3. 学会等名 Symposium on Nuclear Data 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wataru Miyasakai, Yoshihiro Aritomo, Shinya Takagi
2. 発表標題 Theoretical study of low-excitation fission phenomena in unstable thorium isotopes
3. 学会等名 Symposium on Nuclear Data 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有友嘉浩, 天野翔太, 高木慎弥, 岡崎玲也, 太田雅久, 西尾勝久, 岩本昭
2. 発表標題 超重元素領域における中性子過剰核の生成確率の理論的評価
3. 学会等名 中性子捕獲反応で迫る宇宙の元素合成
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有友嘉浩, 高木慎弥, 前川北斗, Chang-hoon Song, Ik Jae Shin, Youngman Kim, Chang-Hwan Lee
2. 発表標題 超重元素領域における中性子過剰核生成の理論的評価
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木慎弥, 天野翔太, 山本匠真, 有友嘉浩
2. 発表標題 新元素合成に向けた中性子過剰核を利用した融合反応機構の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前川北斗, 天野翔太, 高木慎弥, 有友嘉浩, Tathagata Banerjee
2. 発表標題 動力学模型を用いた超重元素合成の捕獲断面積の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
韓国	CENS/IBS	Pusan National University	