

# 論文内容要旨 (和文)

平成24年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学専攻 物理学分野

氏 名 武山 美麗



論 文 題 目 核分裂に対する半導体検出器の高度検出法とその応用

本論文は、超重核の崩壊様式の一つである自発核分裂に対する検出技術の向上を目的として、シリコン半導体検出器中に打ち込まれた超重核の自発核分裂に対する検出応答について研究を行ったものである。

原子番号が104以上の超重元素(超アクチノイド元素)は天然に存在が知られておらず、加速器から供給される重イオンビームを標的に照射し核融合反応によって人工合成することではじめて物理・化学の研究対象となる。核子多体系である超重元素の強いクーロン斥力によって核融合反応が阻害されるため、反応によっては $10^{-12}$  (ピコバーン:  $10^{-12} \times 10^{24} \text{ cm}^2$ ) レベルの極めて小さな生成断面積となる場合がある。典型的な実験条件では一日(単位時間)あたりの生成量に限りがあるため、精度のよい観測を一原子レベルで行う必要がある。超重元素の主要な崩壊様式はアルファ崩壊と自発核分裂であり、核種固有な崩壊情報(崩壊エネルギー、半減期)を得ることで核種同定が行われる。その際、崩壊連鎖が既知核へ到達するか否かが重要となる。既知核へ到達する前に自発核分裂事象を起こしてしまった場合、質量分割ならびに電荷分割の多様性から核分裂片の運動エネルギーは幅広く分布するため、分裂片の運動エネルギー測定から核種同定を行う事は困難であり、励起関数測定やクロス反応等の検証が別途必要となる。実際、中性子過剰なアクチノイドを標的とした重イオン核融合反応(ホットフュージョン)による未知超重核合成実験において、既知核へ到達する前に自発核分裂が起こる例が報告されており、自発核分裂に対する高度検出技術の開発が重要な研究課題の一つとなっている。

理化学研究所(理研)におけるこれまでの超重元素研究では、箱形に配置した5台のシリコン半導体検出器(Si-box)を用いて分裂片の運動エネルギーを測定し、崩壊エネルギーと半減期に関する情報を得るだけであった。箱形の底面のみ位置有感型検出器(PSD)で、残りの4台は位置情報のとれないパッド型検出器(SSD)である。核反応によって生成した超重核はPSD内で停止し、その位置で起こる自発核分裂によって生じる2つの分裂片が互いに180度方向に飛び出すことで、PSDとSSDによって運動エネルギーが観測される。本論文では、PSD内での停止位置(埋め込みの深さ)によってPSDとSSDへのエネルギー付与バランスが変わる可能性がある事に着目し、下記に挙げる三つのモデルについての検証ならびにシミュレーションによる評価を行った。① 2つの分裂片がPSD単独で検出する場合、② 1つの分裂片がPSDで検出され片方はSi-Box外にエスケープする場合、③ 1つの分裂片がPSDで検出され片方はSSDで検出される場合である。

Si-box中での核分裂に対する応答性の研究は標準線源を用いたオフライン実験が困難であるため、自発核分裂に対する分岐比が大きく(26%)、半減期が短い( $T_{1/2} = 2.3 \text{ s}$ )  $^{252}\text{No}$ を人工合成することで行った。理研重イオン線形加速器で $^{48}\text{Ca}$ を加速し $^{206}\text{Pb}$ 標的に照射して、 $^{252}\text{No}$ を合成した。合成した $^{252}\text{No}$ は、気体充填型反跳分離装置を用いて入射ビームやバックグラウンドとなる荷電粒子からその大半を分離し、2台の飛行時間検出器とSi-Boxから構成される焦点面検出器へと収集した。親-娘核間の検出位置、崩壊エネルギー、半減期についての相関関係から、 $^{252}\text{No}$ の同定を行った。本論文で測定した $2.3 \pm 0.1 \text{ s}$ という半減期は、文献値( $T_{1/2} = 2.3 \text{ s}$ )とよく一致した。Si-box直前に1.5~5.5  $\mu\text{m}$ までの種々の厚みをもったMYLAR膜を設置し、そこを通過する $^{252}\text{No}$ の運動エネルギーを低減させることでPSDに打ち込まれる $^{252}\text{No}$ の飛程(深さ方向の距離)を調整しながら、 $^{252}\text{No}$ 由来の分裂片の運動エネルギーを測定した。 $^{252}\text{No}$ の飛程が短くなる(検出器表面に近づく)につれて、PSDとSSDへのエネルギー付与のバランスが変化

し、PSDとSSDの両方（モデル③）にエネルギー付与する割合が増加した。原子力研究開発機構で開発されたモンテカルロ計算コードPHITSを用いてSi-boxの検出器の幾何学的配置を再現し、100 MeVの $^{120}\text{Sn}$ を核分裂片として仮定して（ $^{252}\text{No}$ の対称核分裂成分）、PSD内から等方的に発射させ、シリコン半導体検出器中の核分裂に対する応答性を評価した。この計算により、 $^{252}\text{No}$ の発射位置が検出器表面に近づくにつれて変化するPSDとSSDへのエネルギー付与バランスを再現することができた。PSDおよびSSDの各検出器でのエネルギー付与の総和は、先行研究で報告されている $^{252}\text{No}$ の自発核分裂の全運動エネルギー（ $\text{TKE} = 194.3 \text{ MeV}$ ）より低い事がわかった。これは、シリコン半導体検出器に特有な波高欠損の影響（不感層、プラズマ効果等）によると考えられる。埋め込みの深さ $x \text{ }\mu\text{m}$ に対して $\text{TKE}$ 補正值（文献値との差）の変化を調べたところ、モデル①および②の場合に対して $\text{TKE}$ 補正值  $[\text{MeV}] = -9.397x + 73.31$ 、③の場合に対して $\text{TKE}$ 補正值  $[\text{MeV}] = -1.815x + 32.52$ の補正式を得た。

ホットフュージョンである $^{248}\text{Cm}(^{48}\text{Ca},\text{xn})^{296}\text{Lv}$ 反応による116番元素（リバモリウム： $\text{Lv}$ ）の合成実験において、上述のモデルに基づいて解析を行った。PSDとSSDへのエネルギー付与バランスを調べる事で、核分裂性である $^{248}\text{Cm}$ 標的起源と超重核由来の自発核分裂を明確に選別することができた。核反応における運動力学から蒸発残留核の反跳エネルギーを計算し、Si-boxに入射するまでのエネルギー損失の計算から埋め込み深さ $x = 4.7 \text{ }\mu\text{m}$ を求め、その深さにおける $\text{TKE}$ 補正值を用いて、 $^{296}\text{Lv}$ の崩壊連鎖で観測した超重核の自発核分裂における $\text{TKE}$ を求めた。その結果、 $^{284,286}\text{Cn}$ 、 $^{280,281}\text{Ds}$ に対する $\text{TKE}$ 、 $242 \pm 12$ 、 $245 \pm 14$ 、 $192 \pm 21$ 、 $224 \pm 9 \text{ MeV}$ が各々得られ、先行研究で得られている報告値と良い一致を示すことがわかった。Viola-Seaborgらによってまとめられたfissility parameter ( $Z^2/A^{1/3}$ )に対する $\text{TKE}$ の二次元分布と比較も行った。

以上の結果から、本論文で開発した自発核分裂事象の判別方法ならびに $\text{TKE}$ 値の補正方法は、今後の超重元素研究に幅広く応用できることが示された。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 30 年 2 月 9 日

理工学研究科長 殿

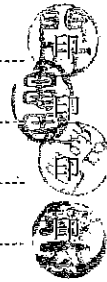
課程博士論文審査委員会

主査 門叶 冬樹

副査 亀田 恭男

副査 郡司 修一

副査 森本 幸司



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻・分野名	地球共生圏科学専攻・物理学分野	氏名	武山 美麗
論文題目	核分裂に対する半導体検出器の高度検出法とその応用			
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成 30 年 1 月 24 日～ 平成 30 年 2 月 6 日	
論文公聴会	平成 30 年 2 月 5 日	場 所	理学部 13 番教室	
最終試験結果	合格	最終試験年月日	平成 30 年 2 月 5 日	

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

本論文は、日本で発見され 2016 年 11 月にニホニウムと命名された原子番号 113 番に続く 119・120 番の新元素探索研究のために、自発核分裂に対する検出技術の向上を目的として核融合反応によりシリコン半導体検出器に打ち込まれた超重核の自発核分裂に対する検出応答について研究を行ったものである。原子番号が 104 以上の超重元素は天然に存在が知られておらず、核融合反応によって人工合成することではじめて物理・化学の研究対象となる。原子番号 118 番の元素までが合成・発見されたことで、超重元素探索の最前線は原子番号 119・120 番の新元素探索研究に移行した。目的とする新元素の生成確率の観点から 119 番以降の元素合成には露米などが先行してきた熱い核融合反応を用いる必要がある。この熱い核融合反応で合成される超重核からの崩壊連鎖の末端は自発核分裂を起こすことが報告されており、いわゆる既知核の領域に到達しないため核種同定が困難である。そのため自発核分裂に対する高度検出技術の開発がこれら新元素の核種同定を行うために重要な研究課題の一つとなっている。

第 1 章で超重元素研究の歴史的背景、新元素探索のため実験手法の詳細、シリコン半導体検出器を箱形に配置した Si-box で自発核分裂を精度良く検出するための問題点と改善すべき課題を明らかにした上で目的を述べている。第 2 章では、超重核の合成、その放射性崩壊過程ならびに超重核の観測に用いる機器の理論について述べ、本研究により期待される超重元素研究の展望が示されている。3 章では本研究を行うために用いた理化学研究所の直線加速器 (RILAC)、気体充填型反跳核分離装置 (GARIS) の詳細について記している。第 4 章では、 $^{209}\text{Pb} (^{48}\text{Ca}, 2n) ^{252}\text{No}$  により合成した  $^{252}\text{No}$  の照射実験について詳しいデータ解析とモンテカルロシミュレーションによる比較が行われ、Si-box に打ち込まれた超重核のエネルギーとその自発核分裂片事象の依存性を明らかにし、Si-box を用いた新たな自発核分裂事象の検出法を見出した。続いて、熱い核融合反応を用いた  $^{248}\text{Cm} (^{48}\text{Ca}, xn) ^{116}\text{Lv}$  反応による合成実験を行い、開発した検出法を用いて 7 個の 116 番元素 (リバモリウム: Lv) の同定に成功し、熱い核融合反応による 119 番以降の新元素探索に向けて大きな貢献を果たした。第 5 章ではこれまでの研究について総括されている。

本論文で得られた研究成果は、査読付き論文 2 報 (英文) がすでに掲載され、国際会議においても 2 件の発表がなされている。論文全体は適切に構成され、その成果は新元素探索を含む超重元素研究の発展に寄与する事が期待でき、当該専攻の審査基準を満たしているため博士 (理学) 学位論文として合格と判定した。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

本学の規定に従い、最終試験は論文内容を中心とした 60 分の口頭発表ならびに 30 分程度の質疑応答により実施した。審査委員による審議の結果、学位論文の内容について明確に説明することができ、博士の学位を授与するのに十分な専門知識と理解力を有していることが確認できたため、合格と判定した。