論文内容要旨（和文）

2017　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　　　石澤　倫　　　印

論　文　題　目　　超重元素探索に用いられるTOF検出器の検出効率向上に関する研究

理化学研究所(理研)では原子番号Zが104番以上の超重元素に関する研究が行われており、現在、Z=119,120の新元素探索実験が新型の気体充填型反跳分離器（GARIS-II）を用いて進められている。本論文では、GARIS-IIの検出器システムとして用いられる大型飛行時間（TOF）検出器の検出効率の改善と最適化を行い、新元素の高確度核種同定を目的とした開発研究を行った。

超重元素は、天然に存在せず、加速されたビーム原子核とターゲット原子核との核融合反応により合成されてはじめて物理・化学の研究対象となる。核融合反応により合成された超重元素は、理研の気体充填型反跳分離器（GARIS）によって選別され、2台のTOF検出器と１台のシリコンボックス（Si-box）で構成されるGARIS検出器システムに輸送される。超重元素はTOF検出器を通過後、Si-boxに設置された位置有感型のシリコン検出器（PSD）に入射する。PSDに撃ち込まれた超重元素は不安定な原子核のため、連続的にα崩壊を起こし既知核に到達するか、あるいは自発核分裂事象を起こす。超重元素の核種同定は、Si-boxで測定した超重元素の入射エネルギーと位置情報、α崩壊や自発核分裂のエネルギーと位置情報、超重元素のSi-boxへの入射時間と続く崩壊事象の時間情報を得ることで行われる。その際、GARISで分離できなかったビーム粒子、ターゲット粒子、軽粒子のバックグラウンド粒子はSi-boxに入射し、その一部は非常に稀な崩壊連鎖中に偽の崩壊事象を作り出し、核種同定の信頼性を低下させる。TOF検出器は、通過する荷電粒子の飛行時間から質量を算出し、超重元素とバックグラウンド粒子の判別に用いられるほか、親核である超重元素またはバックグラウンド粒子のPSDへの入射事象と、親核の崩壊連鎖事象の判別に使用される。従って、優れた時間分解能と高い検出効率を持つTOF検出器の開発が、超重元素探索研究に強く求められている。

ニホニウム（Z=113）の発見に用いられたGARISはビーム原子核とターゲット原子核の原子番号の差が比較的近い対称反応に適した分離システムである。GARISのTOF検出器には、荷電粒子が薄膜を通過した際に放出される二次電子を静電ミラーによって90度反射させ、マイクロチャネルプレート（MCP）で検出する静電反射型のTOF検出器が用いられた。GARIS-IIはビーム原子核とターゲット原子核の原子番号の差が比較的大きい非対称反応に適した分離システムであり、119番元素（Z=119）の新元素探索実験はこの非対称反応^{51}V (^{248}Cm, xn)$^{299-x}$119を用いて進行中である。非対称反応により生成される超重元素の運動エネルギーは対称反応と比較して小さいため、GARIS-IIに充填されているHeガスにより散乱され、GARIS-II焦点面での超重元素の像は対称反応よりも大きく拡がる。そのため、GARISより大きな有効面積を持つGARIS-II検出器システムが開発された。開発したGARIS-IIのTOF検出器はGARISと同じ静電反射型で、その有効面積はGARIS-TOF検出器と比べて2.7倍大きく、世界最大となる154 cm^{2}を持つ。

これまでに行われたGARIS-II-TOF検出器の基礎特性試験から、検出器の中心領域外の有効部において、α粒子に対する検出効率が急激に低下することが示された。静電反射型のTOF検出器における荷

氏　名　石澤　倫

電粒子の検出は、荷電粒子が入射窓を通過する際に薄膜から放出される二次電子をマイクロチャンネルプレート (MCP) に導き、TOF信号を作ることによりなされる。入射窓中心から40 mm以上離れた領域を荷電粒子が通過した時、放出された二次電子の一部または全てがMCPの有感領域（120 mmφ）以外に到達する場合があるため、荷電粒子の検出効率が低下したと予測された。そこで、TOF検出器のサイドパネルの電位を独立して調整できるように改良して検出器の内部電場を改良する事により、効率低下部位から放出された二次電子のMCPへの収集効率を上げ、検出効率の改善を行う手法を考案した。まず、イオン光学系ソフトSIMION 3Dを用いてTOF検出器内の電場構造と二次電子の挙動をシミュレーションにより調べ、補正電圧に対する収集効率の依存性を調べた。その結果、TOF検出器の入射窓から放出された二次電子のMCPへの収集効率は、–350 Vの補正電圧のとき100%を達成することができた。次に、軽粒子バックグラウンドに対する検出効率を評価するために、開発したTOF検出器に5.486 MeVのα粒子を入射させ、補正電圧に対する検出効率の依存性を調べた。その結果、検出効率は補正電圧に比例して改善し、–250 V以上の補正電圧のとき、検出器の有効領域の全ての測定点において約100%を達成することができた。続いて、^{50}Ti (^{159}Tb, xn)$^{209-x}$ Fr反応を用いたビーム実験を行い、TOF検出器の検出効率を評価した。その結果、–400 Vの補正電圧のとき、Frおよび重粒子バックグラウンド粒子に対して96%以上の検出効率を得ることができた。

以上の成果により、開発したTOF検出器は^{51}V(^{248}Cm,xn)$^{299-x}$119反応を用いたZ=119の新元素探索実験に採用された。この反応実験では、^{51}Vビームの強度を2.0 pμAまで上げて119番元素探索を行った。その際、TOF検出器の検出効率が低い、高エネルギー陽子やその同位体およびHeを起源とする軽粒子バックグラウンドが観測された。そして、これらのバックグランドの一部が、119番元素の崩壊事象の判別を困難にする要因となる事が明らかになった。そこで本研究では、まずTOF検出器の荷電粒子に対する閾値の最適化を行った。そして、TOF検出器で検出が困難な軽粒子バックグラウンドに対して、Si-boxの直後に新たに設置したSi半導体検出器を用いてSi-boxを突き抜けて通過する粒子を判定する反同時計測を行い、システム全体の検出効率を最大化させた。さらに、予測される119番元素のα崩壊連鎖（119→Ts→Mc→Nh→Rg→Mt→Bh→Db）で検出される偽の崩壊事象の頻度を評価した。その結果、その頻度は十分に小さく、高い信頼度で119番元素を同定できる事が分かった。

以上の結果から、本研究で新たに開発したTOF検出器は、GARIS-IIの検出器システムに加え、2019年に完成したGARIS-IIIの検出器システムにも採用された。

論文内容要旨（英文）

2017　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　　石澤　倫　　印

論　文　題　目　　Study on improvement of the detection efficiency of a TOF detector for superheavy element search

Elements with atomic number Z ≧ 104 are called superheavy elements (SHE). The SHE is not known to exist in nature, and will be the subject of physics and chemistry research only after they are artificially synthesized. The SHE of atomic number Z = 113 (Nihonium) was successfully identified at RIKEN.
Currently, a time-of-flight (TOF) detector with a large entrance foil (140 mm diameter) was developed for the detection system of a gas-filled recoil ion separator (GARIS-II) of RIKEN to conduct new elements search (Z ≧ 119). The detection system consists of two sets of a TOF detector and a silicon semiconductor detector box (Si-box). The position, kinetic energy, and arrival time of the implanted SHE and background particles are measured by the Si-box. On the other hand, the TOF detector performs two functions in SHE identification. One is to distinguish between the implantation to the Si-box and the decay of the SHE in the Si-box. The other function is to estimate the mass of an incoming charged particle with the TOF and kinetic energy from the Si-box. To realize these functions, the detection efficiency of the TOF detector is critical.

In a previous offline test involving alpha particles from a standard alpha source, the detection efficiency was approximately 100% for the center region of the entrance foil. On the other hand, the detection efficiency decreased for particles passing through the edge region of the entrance foil. In this study, the modification of the internal electric field of the TOF detector is considered and realized to improve the detection efficiency. The validity of the modification is investigated by the simulation. Further, the detection efficiency is investigated through offline experiment by using alpha particles and beam experiment by using reaction products of ^{50}Ti(^{159}Tb, xn)$^{209\text{-}x}$Fr while modifying the internal electric field. The obtained results establish that the detection efficiency is improved by modifying the internal electric field.

However, the beam intensity being increased, the detection efficiency decreased because the accidental events of the TOF detector were increased in the new elements search. Therefore, I established a method to eliminate accidental events and succeeded in maximizing the detection efficiency. In addition, the quality of data (the accidental rate) was discussed for the 119 decay-chain which was theoretically predicted.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和３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　印

副査　亀田　恭男　印

副査　郡司　修一　印

副査　森本　幸司　印

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　石澤　倫		
論文題目	超重元素探索に用いられる TOF 検出器の検出効率向上に関する研究		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和３年　１月　22 日～ ３年　２月　５日
論文公聴会	令和３年　２月　５日	場所	理学部 14 番教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和３年　２月　５日

学位論文の審査結果の要旨（1,000 字程度）

原子番号 Z が 104 番以上の超重元素は、天然に存在せず、加速されたビーム原子核とターゲット原子核との核融合反応により合成されてはじめて物理・化学の研究対象となる。現在、日本で発見され 2016 年 11 月にニホニウム(Nh)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が理化学研究所(理研)の新型気体充填型反跳分離器（GARIS-II）を用いて進められている。本論文では、新元素の核種同定の確度向上を目的として、新元素探索研究に用いられる大型飛行時間（TOF）検出器の検出効率の改善と最適化に関する研究が行われた。

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、GARIS-II システムにおける TOF 検出器の役割と新元素の核種同定を高確度で行う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、超重核の合成と放射性崩壊過程の理論、ならびに超重核の観測に用いる機器について述べ、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。第３章では TOF 検出器の荷電粒子に対する検出効率の改善手法について、シミュレーションによる評価を行い、サイドパネルの電位を独立して調整し検出器の内部電場を改良する事で実現できることを見いだした。そして、5.486 MeV のα粒子と、^{50}Ti(^{159}Tb, xn)$^{209-x}$Fr 反応で合成された Fr を用いて検出効率を調べ、Fr および重粒子バックグラウンド粒子に対して 96%以上の検出効率が得られることを明らかにした。そして、開発した TOF 検出器は、原子番号 119 の新元素探索実験に採用された。第４章では、119 番新元素探索実験で用いられた GARIS-II 検出器システムの詳細について記している。第５章では、^{51}V(^{248}Cm, xn)$^{299-xn}$119 反応による合成実験において、導入した TOF 検出器の最適化と検出効率の最大化を行い、新元素同定の確度向上に向けて大きな貢献を果たした。第６章では以上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、筆頭著者の査読付き論文がすでに掲載され、国際会議においても口頭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

最終試験は学位論文の内容を中心とした 60 分の口頭発表、論文内容と当該分野に関連した幅広い研究内容に対する 40 分の質疑応答により実施した。口頭発表では、研究の背景と目的に続き、シミュレーションと実験による成果、そして考察と将来展望が論理的に展開され、明確な説明がなされた。口頭試問では、十分な専門的知識と研究遂行能力を伺うことができた。以上から、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。