

名古屋大学工学研究科 エネルギー理工学専攻
エネルギー量子工学講座（協力講座）

応用核物理学グループ

柴田理尋(教授)、小島康明(准教授)
博士前期課程 3 名、学部 3 名 (2021 年度の実績)

研究分野と研究方針

【概要】

応用核物理学グループは、核エネルギーの源である不安定原子核(放射能)が持つ多様性の解明とその応用へ向けた高品質な核データの測定を目的として研究活動を行っている。京大原子炉、原子力研究開発機構(JAEA)タンデム加速器に附置したオンライン同位体分離装置(ISOL)で得られる短半減期の原子核の崩壊に伴う放射線を計測し、高精度の崩壊核データを決定する。特に、単一の検出器としては最高の検出効率を有する 4Ge 結晶による全立体角型クローバー検出器を用いて、核分裂収率の極めて少ない質量数 150 程度の核に着目し、崩壊エネルギー、 γ 線測定や核異性体探索などの崩壊核データを決定している。また、半減期が数秒の崩壊 γ 線が報告されていない核種の同定を目指して、クローバー検出器と組み合わせる β 線検出器を開発するなど、検出器の高度化を図っている。JAEA の ISOL では、共同研究を通してアクチノイド核種を対象に、崩壊核分光や核分裂片の測定を行い核構造及び核分裂収率の測定に取り組んでいる。一方、Ge 検出器による線源が近距離での測定、高バックグラウンド条件下、体積試料に含まれる微弱な環境中の放射能測定に対して、GEANT、PHITS 等のモンテカルロ計算を併用して、検出効率の簡便な決定法や適切な解析法の開発に取り組んでいる。

【キーワード】

崩壊核データ、不安定核、核分裂生成物、重元素、加速器、研究用原子炉、オンライン同位体分離装置(ISOL)、Ge 検出器、クローバー検出器、CdTe 検出器、シンチレーション検出器、 α 線、 β 線、 γ 線、内部転換電子、ピーク効率、モンテカルロシミュレーション、GEANT4、PHITS、核構造、核異性体、コインシデンスサムの補正、漏洩 X 線、アンフォールディング、放射線防護、X 線装置の安全取扱い

【主な研究と内容】

(A) 核分裂生成物の崩壊核データ測定

質量数 150 近傍の領域は、球形から回転楕円体へと変形する遷移領域であり、その崩壊データは、崩壊熱評価として、また、核構造上も興味深い領域である。核分裂収率が小さく、崩壊核データが調べられていない核種で、京大原子炉に附置したオンライン同位体分離装置 (KUR-ISOL) で測定可能と思われる限界の核種について、その崩壊 γ 線の同定を及び近傍の核種について崩壊エネルギーの測定を目指す。崩壊エネルギーは、原子質量を決定する高精度な方法であり、全吸収型検出器と高速データ収集系を用いて決定する。また、 γ 線測定および内部転換電子の測定

によって核異性体を探索するとともに、遷移の多重極度、スピン・パリティなどの性質を決定し、詳細な崩壊核データを決定する。

(B) 重元素の崩壊核データ測定

アクチノイド元素の中には、長寿命核廃棄物として今後の処理・処分の課題となっているものや、重元素合成過程の中で重要な役割を果たしているものがある。それらを解明するには、信頼できる核反応や核構造の核データを取得することが必要であるが、この領域は線源作成が難しいため、ほとんど研究が進んでいない。重元素を対象として取り扱える JAEA のタンデム加速器施設で、Am や Bk、さらに原子番号の大きい Lr などを対象に、 α /EC 壊変核種の崩壊核分光や核分裂片の測定を行い核構造及び核分裂収率の測定に取り組む。

(C) モンテカルロシミュレーションを併用した検出器の検出効率決定法の研究

γ 線と物質の相互作用の確率に基づくモンテカルロ計算を行い、より効率的な実験体系の考案、解析方法の妥当性の検証、適当な放射線源が存在しない場合の実験が不可能な領域の補完手法としてモンテカルロシミュレーションを併用する方法に取り組む。

(D) 放射線測定技術の放射線安全取扱への適用

名大内には 150 台程度の X 線装置がある。アイソトープ総合センターにも 3 台あるが、特に、透過撮影装置は、回折装置に比べて漏洩線量が高いことが判っている。また、取扱マニュアルから外れた機器設定の場合にも思わぬ漏洩線が発生する。サーベイメーターによる漏洩線量測定に加えて、CdTe(テルル化カドミウム)検出器で測定したエネルギースペクトルをアンフォールディングすることによってエネルギーフルエンスを導出し、漏洩の物理的根拠に基づいた安全取扱を考える。

2020 年度の研究・教育の概要

【核分裂生成物の崩壊核データ測定】

質量数 150 以上の半減期が短い中性子過剰核の崩壊核データは ^{235}U の核分裂収率が小さいため詳しく調べられていない。KUR-ISOL は、目的とする核種を高強度で分離することができる数少ない装置である。昨年度、崩壊図式の作成に向けて、 $^{153,154}\text{Pr}$ を測定した。今年度は、 β 線の測定からその半減期が 1.49 秒と報告されているが、崩壊 γ 線の同定には至っていない ^{155}Pr の崩壊 γ 線測定を対象とした。 $^{153,154}\text{Pr}$ の測定結果に基づく、KUR-ISOL で測定できることが期待される。昨年度開発した貫通孔に設置する β 線検出器のプラスチックシンチレーターの厚さを 1mm に変更し、 γ 線に関する感度を落とすことで S/N を向上させて、 ^{155}Pr の崩壊 γ 線を探索した。ISOL ビームの捕集-測定の間隔を、2.5 秒-2.5 秒、5 秒-5 秒の 2 通りに設定し、それぞれ 16.5 時間、11 時間の測定を行った。崩壊 γ 線の確認のために、① β 線とのコインシデンススペクトル中の γ 線および KX 線を調べること、②KX 線とのコインシデンススペクトルを調べること、③多重極度が大きい γ 遷移の場合には KX 線の強度が強くなることから KX 線領域に着目し、X 線領域のスペクトルの時間変化から親核の崩壊を探索すること、の 3 つについて解析した。 $^{153,154}\text{Pr}$ の実験結果と質量数 153~155 の核分裂収率の文献値から予測される ^{155}Pr 質量分離ビームの強度から考えると、崩壊 γ 線が確認できることを期待したが、 γ 線は確認できなかった。その要因は、核分裂収率が予測より小さいこと、あるいは、半減期がさらに短い可能性があること、そ

の両方が考えられる。現状の実験設定では同定は難しく改良が必要であるが、今後の課題である。一方、娘、孫核 ^{155}Nd 、 Pm については、新たに γ 線が確認できた。特に、 ^{155}Nd については、新たに 7本の γ 線と 1個の励起準位を同定した。

【全吸収型クローバー検出器と高速データ収集系を用いた γ 線応答関数の測定】

全吸収型クローバー検出器は、クローバー検出器と、その周りを厚さ 3cm の BGO シンチレーション検出器で完全に覆った構造である。クローバー検出器の貫通孔の中心に置かれた線源から放射する β 、 γ 線のクローバー検出器による制動放射線や散乱線が、外部に漏れ出てくる成分を BGO シンチレーション検出器と同時計数を行い、クローバー検出器のシングルスペクトルから、その同時計数成分を差し引くことによって、クローバー検出器による全吸収成分だけを抽出するというものである。本検出器を用いた崩壊エネルギー測定実験は、既に JAEA のタンデム加速器に附置した ISOL で実験を行っているが、その際は、アナログデータ収集系を用いており、パイラップを減らすために高計数率での測定ができなかった。今後、KUR-ISOL で測定を行う場合は、炉室内の中性子によるバックグラウンドが増え、また、娘、孫核の放射線の影響も大きくなり、計数率が高くなることが予想されるため、高計数率で測定できるデジタルデータ収集系を用いる。今年度は、デジタルデータ収集系 APV8016 を用いて、比較的簡単な崩壊関式を持つ ^{137}Cs 、 ^{88}Y の γ 線の全吸収スペクトルを導出することを通して、全吸収事象を抽出するためのプログラム開発を行った。今回は、BGO 検出器の周りは遮蔽しなかったために、コンプトン散乱部分が十分に落ちなかったが、実際の測定では、鉛 10cm とポリエチレン 5cm でバックグラウンドを遮蔽する予定である。

【重元素の崩壊核データ測定】

JAEA タンデム加速器附置の ISOL を用いて、60MeV の ^7Li ビームを ^{233}U に照射し、質量数 234 の生成核を質量分離し、そのなかの $^{234\text{m}}\text{Np}$ の核異性体遷移に着目して測定した。内部転換電子及び特性 LX 線の測定のために、Si(Li)検出器と Ge 検出器、A3100 データ収集系を用いた。測定対象である内部転換電子及び X 線は 10keV 以下となるため、ノイズを十分落とすとともに、残留ガス（主に水分と思われる）が Si(Li)検出器の表面に付着することが準備段階から危惧されたので対策を取って実験を行った。今回の実験は予備実験で、ビームエネルギーが過去の実験と異なるという違いはあるが、予想される強度の $^{234\text{m}}\text{Np}$ の収率が得られず、内部転換電子の測定には至らなかったが、今回の目的の一つである同時計数測定データ解析プログラムの整備を進めた。また、Si(Li)検出器表面で予想される電子線のエネルギー損失の PHITS を用いたモンテカルロ計算、検出器校正用の低エネルギー電子放出核種の検討など、次回に向けて準備を始めた。

【モンテカルロシミュレーションの結晶幾何条件の最適化、特に、不感層の厚さの最適化に関する考察】

p 型 Ge 検出器は不感層が年数とともに厚くなることによって、特に低エネルギーで検出効率が小さくなることが知られている。昨年、近距離での ^{133}Ba 、 ^{152}Eu の測定に、モンテカルロシミュレーション (GEANT4) を併用して、p 型 Ge 検出器の幾何学条件として結晶の表面及び側面の不感層を調整することによって検出効率を決定する簡便な方法を提案した。今年度、より大きな結晶の p 型 60%Ge 検出器について、結晶表面と検出器表面の距離、結晶側面の不感層による検出効率の依存性および線源距離による側面不感層の影響を、測定及びモンテカルロシミュレーションによって調べた。その結果、当検出器についても検出効率の劣化が確認された。また、結晶

サイズが大きい場合、検出器内部の結晶表面とハウジング表面の距離の影響が大きいことがわかり、コリメーターを用いた結晶プロファイル測定によって決定した実測値を用いて、検出器と線源の距離に対して、結晶表面と側面の不感層の厚さをパラメーターにして、3%以内の精度で検出効率を決定することができた。線源-検出器が近い距離では、低エネルギー γ 線に対して表面不感層が大きく影響し、一方、遠い距離では高エネルギー γ 線に対して側面不感層が大きく影響することが判った。

【X線透過撮影装置の漏洩線のスペクトル測定とエネルギーフルエンス率の決定】

アイソトープ総合センターが所有する X線透過撮影装置(SOFTEX M-60、定格出力 60kV、5mA)は、回折装置等(例えば、RAD-II A、定格出力 50kV、40mA)と比べると、装置の使用目的と構造上、装置表面の漏洩線量が高いことが判っている。安全管理上は、NaI サーベイメーターや電離箱式サーベイメーターによる漏洩線量測定を行うが、測定スペクトルが判ればエネルギーフルエンスを導出することによって漏洩線の物理的根拠が明らかとなり、より合理的な安全管理ができると考えられる。昨年度に行ったサーベイメーターによる装置全表面の漏洩線量プロファイルに基づいて、CdTe 検出器を用いて漏洩線量の大きい場所のスペクトル測定を行った。透過撮影装置の漏洩線は、実効エネルギーが 50keV 程度で、40keV 以下の低エネルギー部分は、装置壁でほとんど吸収されていることが判った。一方、高い漏洩線量を示した溶接が不十分な箇所では、低エネルギーまで散乱線が分布しており、PHITS を用いて計算した応答関数を用いてスペクトルをアンフォールディングした結果、8keV 程度まで大きなフルエンスが存在していることが明らかとなった。回折装置についても、意図的に漏洩線を発生させる実験を行い、漏洩線は低エネルギーまで散乱成分があることが判った。今後は、線量評価へとつなげる方法を検討する。

それとは別に、試行的に CdTe 検出器で、XPS 装置のガラス製ビューワーからの漏洩線スペクトル測定、交流放電装置から発生する X線のガラス製ビューワーからの漏洩線スペクトル測定なども行った。

【本年度の研究成果発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	0	0	0	0
学生	2	0	0	0

本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

【卒業論文】

- ・ モンテカルロシミュレーションを用いた Ge 検出器の検出効率に影響する結晶不感層と線源距離に関する研究
- ・ 全吸収型検出器による崩壊エネルギー(Q_{β})の測定に向けた全吸収事象解析プログラムの開発
- ・ β - γ 同時計数のためのクローバー検出器用 β 線検出器の特性評価に関する研究

【修士論文】

- ・ ISOL と全立体角型 Ge 検出器を用いた微量核分裂生成物の崩壊核データの測定 - ^{155}Pr の崩壊 -
- ・ 放射線安全管理のための X線装置の漏洩線のスペクトルの測定