

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2名、学部2名(2022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が持つ多様性の解明と高品質な崩壊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(KUR)、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4つのGe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、崩壊エネルギーの測定、 γ 線測定、核異性体探索などを行っている。また、クローバー検出器と組み合わせる β 線検出器を開発して、半減期が数秒で、崩壊 γ 線が報告されていない核種の同定を目指して実験している。JAEAのISOLでは、アクチノイド核種を対象に、崩壊核分光および核分裂片測定の研究に取り組んでいる。大学では、Ge検出器による近距離での測定、高バックグラウンド条件下での測定、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、 α 線、 β 線、 γ 線、内部転換電子、検出効率、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、放射線防護、安全管理

【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、崩壊熱評価として重要であり、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、 γ 線および内部転換電子の測定によって崩壊図式を作成し、遷移の多重極度、スピン・パリティなどを決定するとともに、核異性体の探索などを行っている。

(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 GEANT や PHITS 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

X 線装置を含み、放射線業務時の装置および管理区域の線量測定を通して、安全な取扱および管理方法を提案する。

2022 年度の研究・教育の概要

【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、質量数 234 の生成核を質量分離し、 ^{234m}Np の核異性体遷移($T_{1/2}=8.51$ min)に着目して測定した。生成核の収量を増やすため、 $^{232}\text{Th}(^7\text{Li},5n)^{234m}\text{Np}$ 反応を利用(^{232}Th の電着ターゲット、 $300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)し、ターゲットの厚さを考慮して、 ^7Li の加速エネルギーを 51MeV とした。内部転換電子、特性 LX 線および低エネルギー γ 線の測定のために、Si PIN ダイオード検出器($3.6\times 3.6 \text{ mm}^2$ 、厚さ $80 \mu\text{m}$)と Ge 検出器、タイムスタンプ式リストモードデータ収集装置(A3100)を用いた。内部転換電子は 10keV 以下となるため、PIN ダイオードは冷却してノイズを落とし、さらに、ノイズ源を減らすために手動式ビーム捕集装置を新たに作成して、20 分ごとに捕集-測定を繰り返して 14 時間測定した。Si PIN ダイオードでは、前回と比べてエネルギー分解能の良い内部転換電子のシングルスペクトルが測定できた。半減期の結果から核異性体転移と考えられる 33.4keV の遷移について、内部転換電子と同時に測定した γ 線の強度比から内部転換係数を求め理論値と比較し、多重極度を M1(+E2)と決定した。22 keV の遷移は、転換電子の半減期は 33.4keV の遷移とほぼ一致したが、 γ 線が観測されなかったことから、大きい内部転換係数を持つことが予想された。PHITS を用いて、理論値に基づいた強度比とエネルギー分解能から内部転換電子の計算スペクトルをそれぞれ作成し、測定スペクトルと比較した。その結果、多重極度を、実験値をより良く再現した M3(+E4)と決定した。近傍核の Nilsson 軌道の系統性から、奇-奇核 ^{234}Np の基底状態は $0^+\{\pi 5/2[642] - \nu 5/2[633]\}$ 、核異性体準位は $5^+\{\pi 5/2[642] + \nu 5/2[633]\}$ と推定されているが、今回の結果も以前の結果を強く支持する結果となった。

【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。2021 年度、 ^{155}Pr を測定したが、 γ 線は確認できなかった。2022 年度は、収率および半減期がほぼ ^{155}Pr と同程度である ^{157}Nd の崩壊に伴う γ 線を、クローバー検出器の貫通孔にプ

ラスチックシンチレーターによるβ線検出器を設置した ¹⁵⁵Pr 測定時と同じセットアップで探索した。ISOL ビームの捕集-測定の時間サイクルを、3 秒-3 秒に設定し、約 1 日測定した。β-γ、X-γ 同時計数およびスペクトルマルチスケール解析によるγ線と KX 線の崩壊曲線から、崩壊に伴うと考えられるγ線を 1 本確認した。現在詳細な解析を進めている。

【環境中の微弱放射能 ⁷Be の放射能強度決定のための井戸型 Ge 検出器の検出効率決定】

南極でガラス濾紙に補修した空気中エアロゾルに含まれる数 Bq 程度の ⁷Be(T_{1/2} = 53.2d)の微弱放射能強度決定のために、井戸型 Ge 検出器の検出効率を決定した。本研究はアイソトープ総合センター利用者に協力して行った研究である。⁷Be は、477keV の単一γ線を放出する核種であり、井戸型 Ge 検出器で測定することが適当であるが、標準線源を入手できないため、^{134,137}Cs の液体線源を同じガラス濾紙に染みこませてアイソトープ協会製の面線源(直径 5cm)と比較測定することで放射能強度を値付けした後、対象試料と同じアクリル試験管に詰めて校正用線源とした。校正用線源作成の際、アイソトープ協会製面線源を検出器に近い距離で測定する際には線源の均一性が問題となる。イメージングプレートで線源の強度分布を求め、その線源強度で PHITS を用いて検出効率を計算し、校正用線源を値付けした。検出効率を決定した結果、井戸型 Ge 検出器での ⁷Be の検出下限は、1 日測定で 0.05Bq 程度であることが判った。環境試料はおよそ 1 日測定で優位な統計が得られることが判った。

【高速データ収集系を用いたγ線測定における不感時間およびパイルアップによる計数ロスの補正に関する研究】

スペクトルマルチスケール法でγ線ピークの時間変化から β 半減期を決定する際には、データ収集系の不感時間およびパイルアップによるピーク面積の数え落としの計数率依存性が問題となる。データ収集系(テクノ AP 社製 APV8008)の数え落としを調べるために、クローバー検出器の中心部分においた ⁶⁰Co、¹³⁷Cs、¹⁵²Eu とパルサーに対し、周囲に置いた ²²⁶Ra の全計数率を 0.3~12.5kcps に変化させて、γ線のピーク効率の全計数率に対する依存性を調べた。その結果、計数率に比例して数え落としが起こり、10kcps では 80%程度になることが判った。それは、γ線とパルサーでほぼ一致した。APV8008 データ収集系については、補正量が大きすぎないように、数 kcps 程度までの計数率に抑えて測定することがのぞましいと考えられる。

【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	1	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】

- ・ 微弱放射能測定のための井戸型 Ge 検出器の検出効率決定に関する研究
- ・ タイムスタンプ式データ収集系を用いた短寿命核のβ半減期測定における補正法に関する研究

【修士論文】

- ・ オンライン同位体分離装置を用いた ^{234m}Np の核異性体転移に関する研究