

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	光核反応を用いた核物質同位体組成測定手法の理論構築及び測定可能性に係る研究
Title(English)	Theoretical analysis on photo-nuclear reactions for nuclear material isotopic composition assay and its applicability
著者(和文)	木村礼
Author(English)	Rei Kimura
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10915号, 授与年月日:2018年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:相樂 洋,小原 徹,千葉 敏,片淵 竜也,林崎 規託
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10915号, Conferred date:2018/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

博士論文「光核反応を用いた核物質同位体組成測定手法の理論構築及び測定可能性に係る研究」

隠匿・隠蔽された高濃縮ウランなどの検知・計量は内部で生成される光子・中性子が遮蔽されることや未知の情報に起因する測定結果の信頼性の低さから難度が高く、このような環境化でも同位体組成を測定出来る手法の開発が求められている。そこで本論文では近年開発の進む準単色の光子発生装置を利用した非破壊同位体組成測定技術の原理導出・検証などを行った。本手法はターゲットに対して複数のスペクトルで光子を照射した際の核分裂反応率の比から同位体組成を推定する。まず反応率の式に基づいて同位体組成の原理を導出し、数値解析により入射エネルギー、ターゲット核種、ターゲット厚さを変化させ原理検証を行った。更に、同時計数法を想定した実測定可能性の評価および計数比補正手法の考案、核データ不確かさ影響評価を行い、提案手法により実際に同位体組成を測定できる可能性がある事を明らかにした。

本論文は全 8 章から構成される。以下に各章の概要を述べる。

第 1 章 緒言

本研究の背景として、核セキュリティ・保障措置技術への要求の高まりについて触れ、遮蔽・隠匿された高濃縮ウランなど、従来法では検知が難しい核物質に対する NDA 技術の課題に付いて述べた。更に、準単色・高輝度・高エネルギー光子源の開発進展を背景とした光核反応の NDA 技術への適用可能性に触れ、光核反応の原理的特性を説明したのち、光核反応を用いて NDA 技術の持つ課題を解決出来る可能性を論じ、光核反応を用いた同位体組成推定手法の開発のうち、原理構築・測定可能性に関する部分について検討を行うという本論文の目的を

示した.

第2章 光核分裂反応を利用した同位体組成測定手法原理導出

提案する光核分裂反応を利用した同位体組成測定手法の原理導出を行った. まず, 光核分裂反応断面積が光子入射エネルギー・核種ごとに異なることで, 中性子生成量も光子入射エネルギー・核種ごとに変化する事を示した. 次に, 光核分裂反応の反応率の式を出発点に, 複数の入射エネルギーにおける核分裂反応率の式を組み合わせ, 数学的な操作により, 想定される核種数と同数の入射エネルギースペクトルにおける核分裂反応率の相対値を用いる事で, 想定される核種の数密度比を評価する式を導出した. 加えて導出した式から導かれる特性を示した.

第3章 同位体組成推定結果に対する入射光子エネルギー依存性

第2章で導出した原理に基づいて同位体組成が推定できるか否か, 厚さ 1mm の濃縮金属ウランをターゲットとして MCNP を用いた原理検証を行った. このとき, 複数の入射光子エネルギースペクトルの組み合わせに対して評価を行い, 入射光子エネルギースペクトルが同位体組成推定結果に与える影響とそのメカニズムを検討した. 検討ではターゲットの中央に光子を入射させ, その際にターゲット中で発生する核分裂を光核分裂・中性子による核分裂を問わず全てカウントし, 核分裂反応率比を求めた. 検討の結果, 本手法により, 本手法の実測定で想定される光源である逆コンプトン散乱のエネルギースペクトルよりも幅広の $\sigma = 0.5\text{MeV}$ のガウス分布を持つ 11MeV および 6MeV を用いた場合であっても 3at%以下の精度で同位体組成を推定出来る可能性を示した. このとき, 光核分裂反応率比の同位体組成比に対する傾きが大きくなるような入射光子エネ

ルギーの組み合わせ、即ち、エネルギーの差が大きくなるような入射エネルギーの組み合わせを選択する事で、光核分裂反応率比の理論値からの差異の影響を受けにくくなる事を明らかにした。

第4章 同位体組成推定結果に対するターゲット核種依存性

パッシブ法では検知されにくい核物質の一つとして、濃縮ウラン(^{235}U - ^{238}U 系)のほかに Th-U(^{232}Th - ^{233}U)系が挙げられる。本章では第3章で濃縮ウランに対して検証された光核分裂反応を用いた同位体組成推定手法の適用性について、核種の Th-U 系に対しても同様に適用可能かを評価する事で、提案手法の核種依存性の有無を検討した。検討にはターゲット物質として ^{232}Th - ^{233}U を用い、ターゲット厚さを第3章と同じ 1mm として第3章と同様の評価を行った。その結果、Th-U 系に対しても濃縮ウランと同様の精度で同位体組成を推定出来ることを明らかにし、提案手法には核種依存性は見られないことを示した。

第5章 同位体組成推定結果に対するターゲット厚さ依存性

第3章、第4章における検討は厚さ 1mm の薄いターゲットを用いて行った。しかしながら、実測定で想定されるターゲットは様々な厚さのものが考えられるため、提案手法による同位体組成比推定結果の、ターゲット厚さ依存性を検討した。厚さ 10mm のターゲットに対して第3章と同様の検討を行った結果、同位体推定精度が 2.2at%から 10at%程度へ悪化した。この原因としてターゲット中における光子吸収係数が入射光子エネルギースペクトル毎に固有の値を持ち、ターゲット中における光子フラックスの変化率が異なることと仮定した。この仮定に基づいて核分裂反応率比の光子吸収効果補正式を導出し、補正を行った

ところ、10at%程度であった精度が約2at%まで改善する事を確認した。

第6章 実測定における核物質の同位体比測定可能性評価

第3章～第5章における検討では、核分裂反応率の評価に、MCNPで得られるターゲット中で発生した全核分裂の値を用いていた。しかしながら、実際の測定ではターゲット中の核分裂を直接観測する事は出来ず、中性子検出器などを用いて中性子を検出する事で核分裂を検知する必要がある。提案手法では核分裂反応率の測定に、複数の検出器で同時に中性子をカウントした場合に核分裂をカウントする同時計数法を適用する事を想定している。本章において同時計数法の検出器を模擬したシミュレーションを実施し、提案手法に同時計数法を適用した際の同位体組成の実測定可能性を検証した。同時計数法で得られた核分裂反応率比をそのまま用いた場合、提案手法による推定値と実際の同位体組成の間に30at%以上の差異が見られた。この原因を入射エネルギーによる $\bar{\nu}$ 値の変化に起因すると仮定し、補正計数と $\bar{\nu}$ 値に基づいたパラメータとの相関式を構築する事で、5at%以下の精度で同位体組成を評価出来る事を確認した。

第7章 核データ不確かさの影響評価

第3章～第6章まで行った検討は、核データライブラリに格納されている光核反応断面積に基づいて行われている。しかしながら、光核反応断面積は概ね10%程度の不確かさを有しているため、断面積不確かさが提案手法による同位体組成評価結果に与える影響評価を行った。核データからの誤差伝播式を用いて核データによる不確かさを評価した結果、現状の核データ不確かさ10%を用いた場合、同位体組成比推定結果が約13%の不確かさを持つことが分かった。

また、核物質検知の誤判定低減に求められる精度 5at%を実現するためには少なくとも断面積不確かさを 3%以下まで低減する必要がある事を明らかにした.

第 8 章 結言

各章で得られた結果を統括し、本論文の結論とした.