

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20612014

研究課題名 (和文) 核共鳴散乱を用いた放射性同位元素の非破壊検出

研究課題名 (英文) Non-destructive detection of Radio Isotope by using Nuclear Resonance Fluorescence

研究代表者

菊澤 信宏 (KIKUZAWA NOBUHIRO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・技術副主幹

研究者番号：50354907

研究成果の概要 (和文)：エネルギー可変(2～4MeV)の準単色な逆コンプトン γ 線を用いた光核共鳴散乱による放射性同位体の新しい非破壊測定法を提案した。この非破壊検査システム設計・性能評価に必要なシミュレーションコードを開発し、コードの信頼性を検証するために既存の逆コンプトン γ 線を用いて模擬実験を行った。この模擬実験との比較により、シミュレーションコードの有用性を確認した。

研究成果の概要 (英文)：New non-destructive detection method of the radioactive isotope by nuclear resonance fluorescence using a mono-energetic inverse Compton gamma ray was proposed. The simulation code required for this non-destructive detection system design was developed. In order to verify the reliability of a code, experiments were carried out using inverse Compton gamma ray. The usefulness of the simulation code was checked by comparison with these experimental results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
H20 年度	500,000	150,000	650,000
H21 年度	500,000	150,000	650,000
H22 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：光核共鳴散乱、逆コンプトン散乱、放射性同位体検知、準単色 γ 線

1. 研究開始当初の背景

近年、MeV エネルギーを有するレーザー逆コンプトン γ 線源が、米デューク大学、産業技術総合研究所、SPring-8、ニュースバルで開発された。逆コンプトン γ 線はエネルギー可変、準単色という特徴を有し、原子核物理学の研究等に用いられてきた。2006 年に至り、

MeV 領域のレーザー逆コンプトン γ 線を用いた光核共鳴散乱法による ^{235}U の非破壊検査法が提案された。それぞれの原子核には固有の励起エネルギーが存在するため、例えば、 ^{79}Se に特有のエネルギーに合わせた γ 線を試料に照射すると励起エネルギーが一致した ^{79}Se のみが励起され、脱励起し同じエネ

ルギーの γ 線を放出する。この脱励起の γ 線の強度を測定することでSe-79の検出が可能である。照射 γ 線のエネルギーを変更することで試料中の様々な元素分析ができる。

この核共鳴散乱を用いた新しい測定法は次のような特徴を有する。

- ・ 厚さ20~30cmのコンクリート、数cmの鉄等を透過して元素検出が可能
- ・ 放射性同位体だけでなく安定同位体の検出も可能
- ・ 原子核変換を伴わない光核共鳴散乱反応を利用するため、検査対象が放射化しない

この特徴を生かして、原子炉からの放射性廃棄物処理処分、核燃料サイクルでは、長寿命核分裂生成物の非破壊検査法として有望である。この核共鳴散乱を用いた非破壊検査法の有用性を検証するために、シミュレーションコードの開発が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、核共鳴散乱を用いた非破壊検査システム設計・性能評価に必要なシミュレーションコードを開発し、逆コンプトン γ 線を用いた模擬実験をとの比較検証を行うことで、シミュレーションコードの信頼性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 核共鳴散乱計算コードの開発および並列化

シミュレーションコードの開発は、Geant4をベースにして行う。Geant4は、高エネルギー・原子核実験、宇宙科学、放射線医学などの分野における測定器シミュレーションプログラム作成のためのツールキット(C++クラスライブラリ)であり、すでにCERNの主なLHC実験では本格的な使用が開始されている。オブジェクト指向技術とC++言語によって開発されたソースコードの行数が60万行を超える巨大なソフトウェアであるが、オブジェクト指向技術によりソフトウェアの修正や機能拡張などが比較的容易であるように考慮されている。

GEANT4に核共鳴散乱を計算するためのオブジェクトを開発し、GEANT4に追加する。並列化シミュレーションコードを開発する。

(2) 模擬実験の実施

開発したシミュレーションコードの妥当性を検証するために、既存の逆コンプトン γ 線源施設を使って模擬実験を行う。ウランを扱うことは許認可の問題で現実的ではないため、ウランの代わりに鉛を用いて実験を行う。模擬実験のセットアップを図1に示す。最大エネルギーが5.6MeVの逆コンプトン γ 線を照射し、90度方向に設置したGe半導体検出器で測定する。逆コンプトン γ

線の試料での直径は実質的に2mm程度であるので、試料の位置を4mmステップで動かし、10点以上測定する。鉛がある部分に γ 線が照射されれば、鉄を貫通し鉛で(γ, γ')反応が発生して、鉛に特有の γ 線がGe半導体検出器で測定できる。この実験結果とシミュレーション結果を比較検討し、計算結果の妥当性の評価を行う。

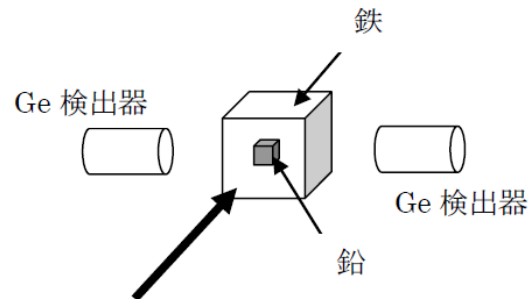


図1: 模擬実験のセットアップ

4. 研究成果

(1) シミュレーションコードの開発

Geant4のG4VDiscreteProcessを継承することで核共鳴散乱のルーチンを追加した。核データとして励起順位エネルギー、共鳴幅、断面積などをデータファイルとして与え、任意の核種について計算できるようにした。

計算速度を向上させるため、MPIを用いた並列化を行い、原子力機構のPCクラスタA(Altix350/32node、Intel Itanium2:64CPU)に移植してベンチマーク計算を行なった結果、64CPUによる並列化で約46倍の高速化を実現した。図2に並列化の計算速度結果を示す。

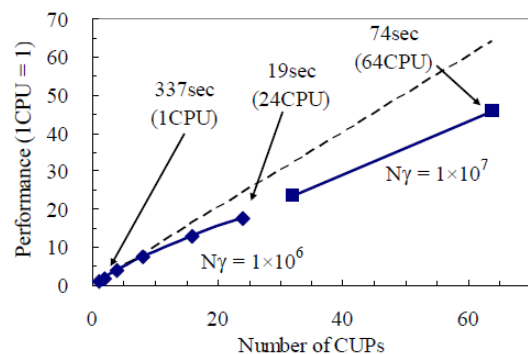


図2: 並列化による計算速度の結果

(2) 模擬実験結果との比較検証

このNRFオブジェクトを用いて、図1に示す鉛を用いた模擬実験についてシミュレーションを行った。実験では、 γ 線源に逆コンプトンで発生させた最高エネルギー5.7MeVの偏光 γ 線を 1.2×10^9 個照射した。シミュレーションではGe検出器による反応まで考慮し、Ge検出器からの出力を模擬した。比較結果を図3に示す。高エネルギー側で実験結果のほうがカウント数が多くなっているが、こ

これは加速器からの高エネルギーγ線のバックグラウンドの影響と考えられる。

シミュレーションの結果、γ線の収量は実験結果の約1.6倍であったが、Ge検出器による収量までほぼ再現できており、このシミュレーションコードによって核共鳴散乱による非破壊検出システムの設計が可能となった。

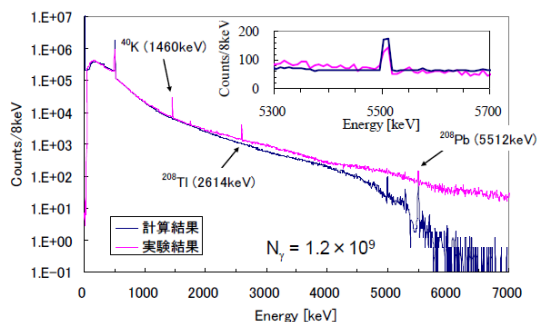


図3：実験結果とシミュレーション結果との比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① N. Kikuzawa, R. Hajima, N. Nishimori, E. Minehara, T. Hayakawa, T. Shizuma, H. Toyokawa, and H. Ohgaki. Nondestructive Detection of Heavily Shielded Materials by Using Nuclear Resonance Fluorescence with a Laser-Compton Scattering γ -ray Source, Applied Physics Express

② Takehito Hayakawa, Nobuhiro Kikuzawa, Ryoichi Hajima, Toshiyuki Shizuma, Nobuyuki Nishimori, Mamoru Fujiwara, Michio Seya, Nondestructive assay of plutonium and minor actinide in spent fuel using nuclear resonance fluorescence with laser Compton scattering γ -rays, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 621, 2010, 695-700

[学会発表] (計9件)

① 菊澤信宏、羽島良一、早川岳人、静間俊行、峰原英介、豊川弘之、大垣英明、”光核共鳴散乱による同位体イメージング法の原理検証”、第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会、2008年8月6日、広島県東広島市

② 菊澤信宏、羽島良一、早川岳人、静間俊行、峰原英介、豊川弘之、大垣英明、”Geant4によるNRFのシミュレーションコード開発”、2008年原子力学会秋の大会、2008年9月5日、高知県香美市

③ 菊澤信宏、羽島良一、早川岳人、静間俊行、”放射性廃棄物処理処分のための準単色

大強度γ線による放射性同位体検出”、2009年原子力学会春の年会、2009年3月25日、東京都目黒区

④ 菊澤信宏、早川岳人、静間俊行、西森信行、羽島良一、瀬谷道夫、”単色γ線ビームを用いた使用済燃料中Pu, U, MAの非破壊分析の提案 (III)使用済核燃料中のPu-239の非破壊分析シミュレーション”、日本原子力学会2010年春の年会、2010年3月27日、茨城県水戸市

⑤ R. Hajima, M. Sawamura, R. Nagai, N. Nishimori, T. Hayakawa, T. Shizuma, N. Kikuzawa, M. Seya, ”ERLによる高輝度X/γ線源の開発と核種非破壊分析への応用”、第7回日本加速器学会年会、2010年8月5日、姫路

⑥ 早川岳人、静間俊行、菊澤信宏、羽島良一、豊川弘之、大垣英明、”逆コンプトンγ線の核共鳴蛍光散乱による核種分析”、日本原子力学会「2010年秋の大会」、2010年9月16日、札幌

⑦ 羽島良一、早川岳人、菊澤信宏、”ERL-LCS-γ線による核種非破壊測定の実証試験の提案 -γ線発生と測定シミュレーション-”、日本原子力学会「2011年春の年会」、2011年3月29日、福井

⑧ 大垣英明、紀井俊輝、増田開、三澤毅、卞哲浩、Mohamed Omer、羽島良一、早川岳人、菊澤信宏、静間俊行、神門正城、豊川弘之、藤本信也、”中性子/γ線複合型核検知システム開発の現状；(1)全体システムの概念設計”、日本原子力学会「2011年春の年会」、2011年3月30日、福井

⑨ 早川岳人、静間俊行、菊澤信宏、羽島良一、瀬谷道夫、大垣英明、藤原守、”核蛍光共鳴散乱の非破壊測定法における核データ”、日本原子力学会「2011年春の年会」、2011年3月28日、福井

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊澤 信宏 (KIKUZAWA Nobuhiro)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・技術副主幹

研究者番号：50354907

(2) 研究分担者

豊川 弘之 (TOYOKAWA Hiroyuki)

独立行政法人 産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：80357582

静間 俊行 (SHIZUMA Toshiyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹

研究者番号：50282299

羽島 良一 (HAJIMA Ryoichi)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量
子ビーム応用研究部門・研究主幹
研究者番号：30218432

西森 信行 (NISHIMORI Nobuyuki)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量
子ビーム応用研究部門・研究副主幹
研究者番号：60354908

(3) 連携研究者
なし