

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Development of Isotope Selective CT Imaging Based on Nuclear  
Resonance Fluorescence  
(核共鳴蛍光散乱を用いた同位体 CT イメージングの開発)

申請者

Khaled Ali Mohammed Ali

最終学歴

令和 4 年 9 月 26 日  
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻博士課程  
研究指導認定見込

学識確認

平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
(主査) 教授 大垣 英明

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 白井 康之

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科  
教授 宮内 雄平

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Khaled Ali Mohammed Ali
論文題目	論文題目 Development of Isotope Selective CT Imaging Based on Nuclear Resonance Fluorescence (核共鳴蛍光散乱を用いた同位体 CT イメージングの開発)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、原子力エネルギー利用の安全性向上のために、レーザーコンプトン (LCS) ガンマ線を用いた核共鳴蛍光散乱 (NRF) による手法を用いて、非破壊で特定の同位体の分布を視覚化可能にする、NRF-CT イメージング技術の開発を行った結果をまとめたもので、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、本研究の背景である核燃料物質とその防護や核セキュリティの重要性及びそのための技術について述べるとともに、本論文で取り上げる NRF による非破壊検査について概略を述べ、本研究の目的と内容について整理している。</p> <p>第2章では、本研究に必要となる物質とガンマ線の相互作用について述べている。特に NRF 現象については、その物理現象から NRF-CT イメージング測定に必要な散乱断面積やその角度依存性等を詳しく述べている。第3章では核物質の非破壊検査法について既存技術のレビューを行うとともに、本研究で行う NRF を用いた非破壊検査法について、その原理を述べるとともに、関連するこれまでの研究開発状況について述べている。</p> <p>第4章では、本研究の実験手法について、まず LCS ガンマ線源の原理と、分子科学研究所 UVSOR-III の BL1U ビームラインに構築した LCS ガンマ線について述べている。本研究では NRF 測定に必要な LCS ガンマ線を、分子科学研究所の UVSOR-III 放射光施設のビームライン BL1U に、最大平均出力 50 W、レーザー波長 1.896 <math>\mu\text{m}</math> のレーザーシステムを導入して開発している。この結果、746 MeV の電子ビーム間の正面衝突により、<math>^{208}\text{Pb}</math> の 5.512 MeV の NRF レベルを励起可能な、最大エネルギー5.528 MeV の LCS ガンマ線を発生することに成功している。また、第5章以下で実験に用いる NRF-CT 測定システム及び CT サンプルについて述べている。</p> <p>第5章では、2次元での NRF-CT イメージング手法を用いた同位体識別能力についての実証実験について述べている。実証実験は鉛の同位体である <math>^{206}\text{Pb}</math> と <math>^{208}\text{Pb}</math> の 6 mm<math>\phi</math> のロッドを、直径 25mm、高さ 20mm のアルミ製 CT ターゲットに挿入し、2D NRF-CT 画像の取得を行っている。この結果得られた全吸収データから、原子吸収による成分を取り除くことで、NRF での吸収成分のみを取り出し、画像再構築を行うことで、<math>^{208}\text{Pb}</math> のみ選択的に画像化することに成功している。なお、本実証実験では 60 時間の測定時間により、画像分解能 2 mm/pixel を得ている。</p> <p>第6章では、第5章で行った 2次元での同位体選択 NRF-CT イメージング手法を 3次元に拡張した実験について述べている。3次元画像取得のために、実験条件を最適化し、測定時間 48時間にて、<math>^{208}\text{Pb}</math> のみを選択的に水平方向に 4 mm/pixel、垂直方向に 8 mm/pixel の画像分解能で画像化することに成功している。</p> <p>第7章では、3次元 NRF-CT イメージングの高分解能化及び測定時間の短縮化に関して、融合視覚化 (FV) 法による解決を提案して、実証実験を行った結果について述べている。ここでは NRF-CT 画像測定と同等の実験条件下で、3次元ガンマ CT 画像を測定し、3次元 NRF-CT 画像との FV 処理を行い、サンプル中の <math>^{208}\text{Pb}</math> の 3次元分布を垂直・水平方向に 1 mm/pixel の高分解にて得ることに成功している。</p> <p>第8章では、本論文で得られた成果について要約するとともに、本研究により得られた結果から、NRF-CT イメージング手法の実用化に向けた課題を整理し、特に複数の同位体の同定と定量化の見通しについて述べている。</p>			

以上、本論文は原子力エネルギー利用の安全性向上を目指し、非破壊で特定の同位体の視覚化を可能にすることが可能な **NRF-CT** イメージング手法について、世界で初めて実験的に実証したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士の学位審査の請求に値すると認める。また、修了に必要な単位を修得済みであることを確認した。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、原子力エネルギー利用の安全性向上のためにレーザーコンプトン (LCS) ガンマ線を用いた核共鳴蛍光散乱 (NRF) による手法により、非破壊で特定の同位体の視覚化を可能にする NRF-CT イメージング技術の開発を行った結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

まず、NRF 測定に必要な LCS ガンマ線が利用できるように、分子科学研究所の UVSOR-III 放射光施設のビームライン BL1U に、最大平均出力 50 W、レーザー波長 1.896  $\mu\text{m}$  のレーザーシステムを導入して、LCS ビームラインの構築を行っている。これにより、最大エネルギー 5.528 MeV で、 $1.6 \times 10^8$  photons/s の LCS ガンマ線を発生することに成功している。次に、このビームラインにおいて、25 mm の直径および高さ 20 mm のアルミニウムシリンダーに、鉛の濃縮同位体 ( $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ ) を挿入した試料に対して、解像度が 2 mm /ピクセルの  $^{208}\text{Pb}$  の 2 次元同位体選択的分布 (2D NRF-CT) 画像の取得に初めて実験的に成功している。更に同じ試料に対して、3 次元の  $^{208}\text{Pb}$  同位体選択的分布 (3D NRF-CT) 画像の取得に成功している。しかしながら、3D NRF-CT 画像の取得には、48 時間の長時間測定を要するために、水平面と垂直面でそれぞれ 4 mm/ピクセルと 8 mm/ピクセルの低分解能に留まっている。そこで本論文では、短時間で NRF-CT 画像の高解像度化が可能な、融合視覚化 (FV) 法を提案し、実証実験を行っている。具体的には、1 mm/ピクセルの解像度の 3 次元ガンマ CT 画像と NRF-CT の画像を、ポストマルチプル FV 法を用いることで、3 次元 NRF-CT 画像の解像度を 1 mm/ピクセルにまで高めることに成功している。

以上のように本研究では、レーザーコンプトンガンマ線の発生から、これを用いた NRF-CT の原理実証実験と、実用に向けた高解像度化の研究を行っている。このような研究はこれまでシミュレーションを用いた研究はなされているものの、実験的に CT 画像の取得を行った例は他になく、原子力エネルギー利用の安全性向上に資する研究と言える。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 4 年 6 月 20 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：           年           月           日以降