

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26289363
研究課題名(和文) NRFを利用した同位体3Dイメージングに関する基礎研究

研究課題名(英文) Study on 3D-CT Isotope Imaging by NRF

研究代表者
大垣 英明 (Ohgaki, Hideaki)
京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号：10335226
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：同位体3Dイメージング法の確立のために、分子科学研究所UVSOR-IIIにおいて、1.94- μm の波長のファイバーレーザーと、750MeV、300mAの電子ビームを正面衝突させ、最大エネルギー5.4MeV、最大ガンマ線収量 10 光子/s のレーザーコンプトンガンマ線の発生に成功した。
本LCSビームを用いて、鉛(208Pb)、鉄、アルミ、空気からなるCTサンプルを準備し、X方向に5mmステップで7点、回転方向30度ステップで5点にてスキャンし、NRF透過法を用いて同位体CT画像の再構成を行った結果、CTサンプル内での208Pbの分布の再現に世界で初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：To establish an isotope imaging method by using LCS gamma-ray and Nuclear Resonance Fluorescence, the LCS beamline which can generate LCS gamma-rays whose maximum energy is 5.4 MeV and maximum flux of 10 gamma/s has been developed in UVSOR-III. The CT sample consisted of lead rod, iron rod, air void embed into aluminium body with iron outer ring was tested at the LCS beamline in UVSOR-III. The transmission NRF measurement has been performed to measure the NRF absorption in the CT sample in 7 points in horizontal axis in 5 mm step and 5 rotation angles. The CT reconstruction result clearly proved that 208Pb distribution in the CT sample can be obtained by our proposed method of the isotope imaging.

研究分野：原子力

キーワード：LCS 線 NRF 同位体イメージング CT再構成 UVSOR-III

1. 研究開始当初の背景

核セキュリティや保障措置のためにレーザーコンプトン散乱(LCS) γ 線と核共鳴蛍光散乱による任意の同位体の非破壊測定技術の研究が、ローレンスリバモフ研究所(LLNL) [1]、ローレンスバークレー研究所(LBNL) [2]、日本原子力研究開発機構[3]等で進められている。個々の同位体には固有の励起エネルギーがあり、このエネルギーに等しいガンマ線を吸収する確率が高い。この特性を生かし、数MeVのLCS γ 線を照射し、核共鳴蛍光散乱(NRF)を計測することで、遮蔽された内部の任意の核種を測定することができる。

我々は先行する基盤研究(B)で、本技術を発展させ、数cm程度の厚さの金属遮蔽を透過して、任意の同位体(核種)の形状(空間分布)を非破壊測定する手法を研究してきた。産業技術総合研究所(つくば市)のLCSガンマ線を用いて、三角柱の鉛ブロックの測定による世界で初めての2次元イメージを測定した(図1参照) [4]。しかし、次にCTの原理に基づいた3次元測定技術を開発する前に、東日本大地震のためにLCSガンマ線装置が閉鎖となってしまった。そこで、本提案では3次元(3D)イメージング技術を完成させるために、分子科学研究所の極端紫外光施設(UVSOR-II)で、自由電子レーザー(FEL)によるLCS γ 線ビームラインを整備する。この γ 線を用いて、核共鳴蛍光散乱とCTの原理を組み合わせた新しい同位体3Dイメージングの研究開発を行い、実証試験を行う。

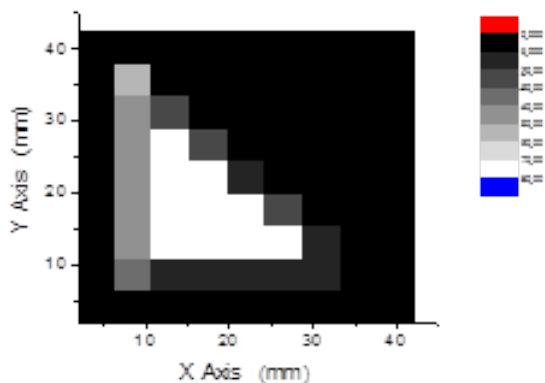


図1.LCS γ 線を用いた2D同位体イメージングの例

参考文献

- [1] J. Pruet et al., J. Appl. Phys. 99 (2006) 123102.
- [2] B. J. Quiter, et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. 58, 400 (2011).
- [3] R.Hajima et al.,J. Nucl. Sci. Tech. 45, (2008).
- [4] H.Toyokawa, H.Ohgaki, T. Hayakawa, T. Kii, T. Shizuma, et al., J. J. Appl. Phys. 50, (2011) 100209.

2. 研究の目的

核共鳴蛍光散乱(NRF)と γ 線CTを組み合わせた新しい原理による同位体3Dイメージング法を提案する。MeV領域の準単色のレーザーコンプトン散乱(LCS) γ 線を対象物(CTターゲット)に照射し、NRFで吸収された γ 線を、さらに後方に置かれた測定対象の原子核を含む物質(ウィットネスタグレット)で、NRFをおこさせ、これを計測する。これには、CTターゲットでのNRFによる、吸収量の情報が含まれており、この吸収を、角度を変えながら測定することで、通常のX線吸収と同様にCT画像が得られる。但し、NRFを用いるため、ここで得られるのは、CTターゲットの密度分布ではなく、特定の同位体のマップとなる。入射ガンマ線のエネルギーを、測定したい任意の同位体の核共鳴レベルに合わせることで、その同位体の3次元分布の計測が可能となる。

本研究では、この目的のために、測定技術の開発と、分子科学研究所の放射光施設UVSOR-IIに、LCS γ 線のビームラインを設置し、ファイバーレーザー、さらには自由電子レーザーを用いて、LCS γ 線を発生させ、原理実証試験を行う。

3. 研究の方法

核共鳴蛍光散乱(NRF)と γ 線CTを組み合わせた新しい原理による同位体3Dイメージング法を開発する。NRF γ 線を計測することで、任意の同位体の吸収量を評価する。CTと同じように角度を変えて γ 線のNRFによる吸収力を計測し、3Dイメージングを行う。分子科学研究所の自由電子レーザーによるレーザーコンプトン散乱 γ 線装置を安定化し、ビームラインを整備する。このビームを用いて、開発を行う。最後に実証試験を行うと同時に空間分解能を評価する。

4. 研究成果

本研究ではNRFと γ 線CTを組み合わせた、新しい原理による同位体3Dイメージング法を開発する。

このために、平成26年度では、試料移動台やGe検出器、LaBr₃(Ce)検出器からなる計測システムの構築を行い、²⁰⁸Pbを用いたNRF測定をUVSOR-IIIにおいて行った。

一方、UVSOR-IIIの自由電子レーザー(FEL)によるレーザーコンプトン散乱(LCS) γ 線装置の開発のために、光共振器用の超広帯域ミラーの導入を行い、発振波長領域を800nmにまで拡張する準備を完了した。

なお平成26年度ではUVSOR-IIIのマシントイムの都合上FEL用光共振器を組み込む事は出来なかったために、バックアップ用の1.94- μ mの波長のファイバーレーザーを用いてLCS γ 線の発生とそのビーム特性評価を行うとともに、²⁰⁸Pbを試料にして、5.292MeVのNRFレベルの測定を行った。この結果、UVSOR-IIIの通常ユーザーモードである、

750MeV、300mA トップアップ運転時に約 10^5 γ/s の LCS γ 線の発生に成功すると共に、LCS γ 線の最大エネルギーが 5.403MeV であることが分かった (図 2 参照)。

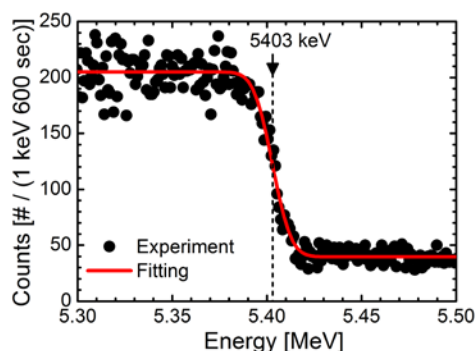


図 2. 1.94- μ m の波長のファイバーレーザーを用いて発生させた LCS γ 線の最高エネルギー付近のエネルギー分布

更に、このシステムを用いて ^{208}Pb の 5.292MeV にある NRF レベルの励起を試み、大型 Ge 検出器による NRF ピークの測定に成功した。これにより NRF 測定及び NRF-CT 測定の配置の最適化が可能になった。更に我々が開発した NRF 計算が可能な GEANT4 コードを用いて、透過吸収型 NRF-CT のシミュレーションを ^{235}U 及び ^{238}U が存在するモデルに対して行い、 ^{238}U の CT 像の取得が可能な事を示した (図 3 参照)。

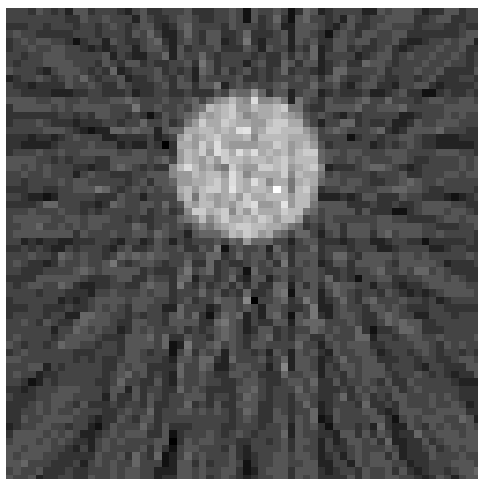


図 3. 本手法を ^{235}U 、 ^{238}U の混在するターゲットに適用した場合の GEANT4 による、シミュレーション結果。 ^{238}U のみの分布の再現に成功している。

平成 27 年度では、分子科学研究所の放射光施設 UVSOR-III において、前年度行った 1.94- μ m の波長のファイバーレーザーを用いて、5.403MeV の LCS ガンマ線を、同位体 CT 実験が行えるように、UVSOR-III に専用の

ビームライン (BL-1 U) を整備した。具体的にはガンマ線用コリメータの設置とターゲット・検出器設置用光学台の設置を行った。また、X, Y, θ 軸可動ターゲットステージを構築した。

このビームラインにおいて、 ^{208}Pb を試料にして、5.292MeV の核共鳴蛍光散乱の吸収法に関する実験を行った。この結果、異なる厚さのサンプルに比例した吸収率を得る事ができることを確認した。また、サンプルの X 軸方向スキャンおよび θ 軸回転を行い、非常にラフではあるが CT 像を測定した。

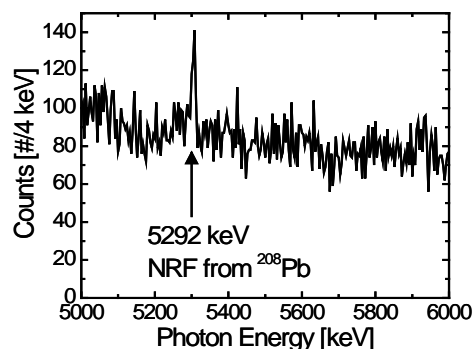


図 4. 本研究課題にて開発したビームラインにて測定した ^{208}Pb の 5.292MeV の NRF ピーク

一方、UVSOR-III での FEL の再立ち上げに関しては、ビームライン下流側のミラーチェーンを設置すると共に、ミラー駆動機構の動作テストを行った。残念ながら、この装置は 2011 年まで使用していたものであり、駆動用コントローラ/ドライバに問題が生じており、そのままの使用は困難である事が判明した。その後、本科研費予算にてミラー駆動用ステージ・アクチュエータとコントローラを整備した。

平成 28 年度では、前年度までに整備したビームラインにおいて、鉛 (^{208}Pb)、鉄、アルミ、空気からなる CT サンプル (図 5 参照) を準備し、NRF 透過法を用いて、 ^{208}Pb の NRF 吸収を測定した。更に、試料を X 方向に 5mm ステップで 7 点、回転方向 30 度ステップで 5 点にてスキャンし、CT 画像取得実験を行った。

得られた実験データに基づき、同位体 CT 画像の再構成を ART 法を用いて行った。この結果、 ^{208}Pb の試料内での分布の再現に成功した (図 6 参照)。

また、このデータ処理の過程にて、同位体 CT 画像の再構成には、通常の原子吸収の効果を検討し、これを差し引きすることで、よりコントラストの強い同位体 CT 画像が得られること (平成 27 年外国特許出願) を実証した。

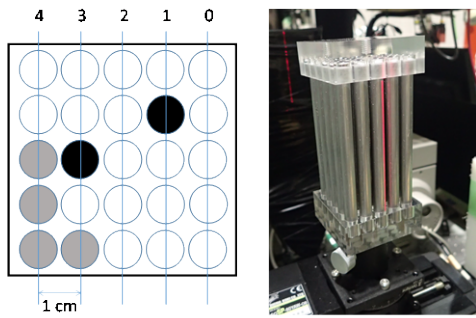


図 5. 鉛 (^{208}Pb)、鉄、アルミからなる CT サンプル ($5\text{cm}\times 5\text{cm}$) の上部からの図 (左) 及び写真 (右)

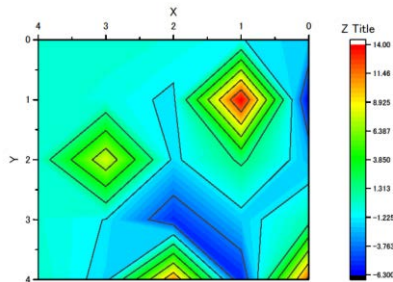


図 6. 鉛 (^{208}Pb)、鉄、アルミからなる CT サンプル ($5\text{cm}\times 5\text{cm}$) に対して、BL-1U ビームラインにて行った同位体 CT 実験の CT 画像再構成の結果。右上方にある ^{208}Pb が強調されており、 ^{208}Pb 同位体の CT 画像の取得に成功した。

一方、FEL の立ち上げに向けて、FEL 共振器ミラー駆動ステージ・アクチュエータの交換を行うなど、準備作業を着実に進めた。限られたマシンタイムを、ファイバーレーザを用いた NRF-CT 実験に最優先に振り向けたため、研究期間内に FEL の立ち上げ実験には至らなかったが、機器の整備は概ね完了した。

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 8 件)

(1) H. Negm, H. Ohgaki, I. Daito, T. Hayakawa, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, T. Hori, R. Hajima, T. Shizuma, N. Kikuzawa, “Reaction-yield dependence of the (γ , γ') reaction of ^{238}U on the target thickness”, Journal of Nuclear Science and Technology, 52-6, pp.1-10 (2014). DOI:10.1080/00223131.2014.980348

(2) Hani Hussein NEGM, Hideaki OHGAKI, Izuru DAITO, Toshitada HORI, Toshiteru KII, Heishun ZEN, Ryoichi HAJIMA, Takehito HAYAKAWA, Toshiyuki SHIZUMA, Shinya FUJIMOTO, “Study on Detector Geometry for Active Non-destructive Inspection System of SNMs by Nuclear Resonance Fluorescence”, 2015 IEEE

International Conference on Technologies for Homeland Security, pp.1 -15 (2015). 10.1109/THS.2015.7225324.

(3) I. Daito, H. Ohgaki, G. Suliman, V. Iancu, C. A. Ur, M. Iovea, “Simulation Study on Computer Tomography Imaging of Nuclear Distribution by Quasi Monoenergetic Gamma Rays with Nuclear Resonance Fluorescence: case study for ELI-NP application”, Energy Procedia, 89, pp.389-394 (2016). 10.1016/j.egypro.2016.05.051

(4) Heishun Zen, Yoshitaka Taira, Taro Konomi, Takehito Hayakawa, Toshiyuki Shizuma, Junichiro Yamazaki, Toshiteru Kii, Hiroyuki Toyokawa, Masahiro Katoh, Hideaki Ohgaki, “Generation of High Energy Gamma-ray by Laser Compton Scattering of $1.94\text{-}\mu\text{m}$ Fiber Laser in UVSOR-III Electron Storage Ring”, Energy Procedia, 89, pp.335-345 (2016). 10.1016/j.egypro.2016.05.044

(5) H. Ohgaki, I. Daito, T. Kii, H. Zen, T. Hayakawa, T. Shizuma, M. Katoh, J. Yamazaki, Y. Taira, H. Toyokawa, “Study on NRF-CT Imaging by Laser Compton Backscattering Gamma-rays in UVSOR”, Proceedings of IPAC2016, pp.2007-2010, (2016).

(6) 大垣 英明, 紀井 俊輝, 全 炳俊, 大東 出, 豊川 弘之, 平 義隆, 早川 岳人, 静間 俊行, 加藤 政博, 山崎 潤一郎, “UVSOR-III における逆コンプトン散乱ビームライン開発と NRF-CT への応用”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.1250-1253 (2016).

(7) H. Zen, Y. Taira, J. Yamazaki, T. Hayakawa, T. Shizuma, T. Kii, H. Toyokawa, M. Katoh and H. Ohgaki, “Transmission Nuclear Resonance Fluorescence Measurement of ^{208}Pb in Natural Lead Target with Laser-Compton-Scattering Gamma-Ray at BL1U”, UVSOR Activity Report 2015, 38 (2016).

(8) H. Ohgaki, I. Daito, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, T. Misawa, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, M. Kando, and S. Fujimoto, “Nondestructive Inspection System for Special Nuclear Material Using Inertial Electrostatic Confinement Fusion Neutrons and Laser Compton Scattering Gamma-Rays”, IEEE Transactions on Nuclear Science, in press (2017). 10.1109/TNS.2017.2652619

[学会発表] (計 18 件)

(1) 大東 出, 神門 正城, 静間 俊行, 早川 岳人, エンジェル クリストファー, 羽島 良一, 大垣 英明, “レーザコンプトンガンマ線による核物質非破壊検知システムの開発”, 第11回日本加速器学会年会, 2014年08月11日, リンクステーションホール青森

(2) Hideaki Ohgaki, “The Science of Nuclear Materials Detection using gamma-ray beams Nuclear Resonance Fluorescence”, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演), 2014年10月07日, the Hilton Waikoloa Village, Waikoloa, Hawaii, USA

(3) I. Daito, M. Kando, C. Angell, T. Shizuma, T. Hayakawa, R. Hajima, H. Ohgaki, “Non-Destructive Inspection System of Nuclear Material Hidden in Cargo”, IEEE NSS/MIC 2014, 2014年11月10日, Washington State Convention Center, Seattle, WA, USA.

(4) 全 炳俊, “UVSOR における逆コンプトン散乱ガンマ線発生と応用展開”, 第28回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2015年01月12日, 立命館大学くさつキャンパス

(5) Hideaki Ohgaki, “GBS applications TDR1 (Industrial Applications)”, ELI-NP Science Program and Instruments Technical Design Report (招待講演), 2015年02月19日, Bucharest, Magurele, Romania

(6) 全 炳俊, 平 義隆, 許斐 太郎, 早川 岳人, 静間 俊行, 山崎 潤一郎, 紀井 俊輝, 豊川 弘之, 加藤 政博, 大垣 英明, “UVSOR-III における 1.94 μ m ファイバーレーザーを用いた レーザーコンプトン散乱ガンマ線発生”, 日本加速器学会 2015 年年会, 2015 年 08 月 05 日~2015 年 08 月 07 日, 敦賀市

(7) 大垣英明, 全炳俊, 紀井俊輝, 許斐太郎, 山崎潤一郎, 加藤政博, 早川岳人, 静間俊行, 平義隆, 豊川弘之, “UVSOR における逆コンプトン散乱ビームライン開発の現状”, 第29回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 2016年01月09日~2016年01月11日, 柏の葉キャンパス駅前サテライト、柏市

(8) 全炳俊, 紀井俊輝, 大垣英明, 平義隆, 豊川弘之, 許斐太郎, 加藤政博, 山崎潤一郎, 早川岳人, 静間俊行, “UVSOR-III における 1.94- μ m ファイバーレーザを用いたレーザコンプトン散乱ガンマ線源の特性評価”,

日本原子力学会「2015年秋の大会」, 2015年09月09日~2015年09月11日, 静岡大学、静岡市

(9) I. Daito, H. Ohgaki, G. Suliman, V. Iancu, C. A. Ur, M. Iovea, “Simulation Study on Computer Tomography Imaging of Nuclear Distribution by Quasi Monoenergetic Gamma Rays with Nuclear Resonance Fluorescence: case study for ELI-NP application”, 12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering, 2015年06月11日~2015年06月13日, Krabi, Thailand

(10) Heishun Zen, Yoshitaka Taira, Taro Konomi, Takehito Hayakawa, Toshiyuki Shizuma, Junichiro Yamazaki, Toshiteru Kii, Hiroyuki Toyokawa, Masahiro Katoh, Hideaki Ohgaki, “Generation of High Energy Gamma-ray by Laser Compton Scattering of 1.94- μ m Fiber Laser in UVSOR-III Electron Storage Ring”, 12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering, 2015年06月11日~2015年06月13日, Krabi, Thailand

(11) H. Ohgaki, “NRF based Nondestructive Inspection System for SNM using Laser-Compton Gamma-rays”, Nuclear Photonics 2016 (招待講演), 2016年10月21日, Monterey, CA, USA

(12) H. Ohgaki, I. Daito, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, T. Misawa, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, M. Kando, and S. Fujimoto, “Neutron/Gamma-Ray Interrogation System for Hidden SNMs in Cargo Containers”, SORMA2016, 2016年05月23日~2016年05月25日, Berkeley, CA, USA

(13) 大垣 英明, 紀井 俊輝, 全 炳俊, 大東 出, 豊川 弘之, 平 義隆, 早川 岳人, 静間 俊行, 加藤 政博, 山崎 潤一郎, “UVSOR-III における逆コンプトン散乱ビームライン開発と NRF-CT への応用”, 第13回日本加速器学会年会, 2016年08月08日~2016年08月10日, 千葉県千葉市幕張メッセ国際会議場

(14) 大垣 英明, 全 炳俊, 藤本 慎也, 金井 大樹, 宮本 修治, 宇都宮 弘章, “2次元 FPD の LCS γ 線ビームプロファイルモニタへの応用に関する研究”, 日本原子力学会「2016年秋の大会」, 2016年09月07日~2016年09月09日, 福岡県久留米市久留米シティプラザ

(15) 全 炳俊, 平義隆, 静間俊行, 早川岳人, 山崎潤一郎, 大東 出, 紀井俊輝, 豊川弘之,

加藤政博、大垣英明，” LCS ガンマ線を用いた2次元同位体分布測定”， UVSOR シンポジウム 2016, 2016年10月29日～2016年10月30日，愛知県岡崎市 岡崎コンファレンスセンター

(16) H. Ohgaki, T. Kii, H. Zen, I. Daito, H. Toyokawa, Y. Taira, T. Hayakawa, T. Shizuma, M. Katoh, J. Yamazaki, “Study on NRF-CT Imaging by Laser Compton Backscattering Gamma-rays in UVSOR”, IPAC2016, 2016年05月08日～2016年05月13日, Busan, Korea

(17) 大垣英明, 全柄俊, 紀井俊輝, 早川岳人, 静間俊行, 豊川弘之, 平義隆, 加藤政博, “UVSORにおけるLCS-NRFによる同位体CT測定(1)UVSORにおける同位体CT測定システム”, 日本原子力学会 2017年春の年会, 2017年03月27日～2017年03月29日, 東海大学湘南キャンパス

(18) 全柄俊, 大垣英明, 平義隆, 早川岳人, 静間俊行, 紀井俊輝, 豊川弘之, 加藤政博, “UVSORにおけるLCS-NRFによる同位体CT測定(2)LCS-NRFによる同位体CT画像再構成のためのソフトウェア開発”, 日本原子力学会 2017年春の年会, 2017年03月27日～2017年03月29日, 東海大学湘南キャンパス

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: IMAGING APPRATUS FOR COMPUTER TOMOGRAPHY IMAGING OF NUCLEAR DISTRIBUTION

発明者: 大東 出、大垣 英明

権利者: 大東 出、大垣 英明

種類: 特許

番号: 62, 173, 997

出願年月日: 2015年06月11日

国内外の別: 外国

○取得状況(計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大垣 英明 (OHGAKI HIDEAKI)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号: 10335226

(2) 研究分担者

加藤 正博 (KATOH MASAHIRO)

分子科学研究所・UVSOR・教授

研究者番号: 30185871

静間 俊行 (SHIZUMA TOSHIYUKI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号: 50282299

早川 岳人 (HAYAKAWA TAKEHITO)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・研究員

研究者番号: 70343944

平 義隆 (TAIRA YOSHITAKA) (平成 26, 27

年度)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・研究員

研究者番号: 60635803

豊川 弘之 (TOYOKAWA HIROYUKI) (平成 28

年度)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・グ

ループリーダー

研究者番号: 80357582

(3) 連携研究者

紀井 俊輝 (KII TOSHITERU)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号: 30314280

全 柄俊 (ZEN HEISHUN)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号: 80548371

(4) 研究協力者

()