

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2009～2012  
 課題番号：21360467  
 研究課題名（和文） 逆コンプトン  $\gamma$  線を用いた原子核共鳴蛍光散乱同位体イメージングに関する基礎的研究  
 研究課題名（英文） Study on Isotope Imaging by using Nuclear Resonance Fluorescence induced by Laser Compton Scattering Gamma-ray Beam  
 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

研究成果の概要（和文）：遮蔽された任意の物質を測定する手段として、原子核共鳴蛍光散乱（NRF）を利用した非破壊同位体の 2 次元並びに 3 次元イメージングを、産総研のレーザーコンプトン  $\gamma$  線を用いて行った。15mm 厚の鉄遮蔽体中に隠匿した 30mmx30mmx10mm の矩形の鉛（対象とする同位体は 208Pb）に対して、最大エネルギー 5.6MeV、エネルギー幅約 5% で、5mm の直径を有するガンマ線を照射し、高純度 Ge 検出器により、5.512MeV の NRF  $\gamma$  線を観測した結果、空間分解能 5mm にて 208Pb の 2 次元イメージング像を取得する事に成功した。更に、得られる NRF  $\gamma$  線の収量より、深さ方向の情報を取得し、3 次元イメージングを行った。

研究成果の概要（英文）：Experiments on non-destructive 2D and 3D isotope imaging based on the Nuclear Resonance Fluorescence have been performed. A wedge shape (30mmx30mmx10mm) of Lead was sealed inside a 15mm thick iron box and was shot by the Laser-Compton back-Scattering gamma-ray beam whose top energy was 5.6 MeV and energy width of about 5%. A large volume HPGe detector was employed to detect the NRF gamma-ray scattered from 208Pb (5.512MeV). The target material was scanned by 10 mm step in horizontal and in vertical direction and we successfully obtained the 2D isotope image. We also succeeded to extract the thickness information of target isotope from numerical evaluation. Consequently, we succeeded to obtain a 3D isotope (208Pb) image destructively by using our proposed method (NRF method).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：放射線工学・ビーム科学

1. 研究開始当初の背景  
 現在、税関等における検査では、X線を用いた X 線透過画像等が広く用いられている。し

かし、貨物内部、あるいは高密度の物質の陰にある不正薬物や爆発物等は、従来の手法では識別が非常に困難であり、非破壊での同位

体分析技術が必要になっている。一方、次世代の透過型の同位体測定法として、MeV 領域の  $\gamma$  線による原子核共鳴蛍光 (Nuclear Resonance Fluorescence; NRF)  $\gamma$  線の測定法の研究が開始されている。すなわち、高単色度のエネルギー可変  $\gamma$  線であるレーザー逆コンプトン散乱 (Laser Compton Scattering; LCS)  $\gamma$  線を用いた核燃物質等及び、爆発物の主要物である窒素や炭素の測定を提案し、遮蔽物中の炭素の疑似爆発物の検出に成功した。更に、15mm 厚の鉄に囲まれた 20x20mm の鉛 (模擬核物質) に対して、1 次元イメージの取得に成功した。この手法は原理的には 2 次元及び 3 次元のイメージも可能であるが、成功した例はこれまでに無い。

## 2. 研究の目的

本研究は、原子核共鳴蛍光散乱を利用した非破壊同位体イメージングについて研究を行う。このために逆コンプトン  $\gamma$  線を用いて、2・3 次元のイメージングの実証を行う事を目的とする。更にイメージング手法に関しても研究を行う。

## 3. 研究の方法

産業技術総合研究所 (産総研) の準単色 LCS  $\gamma$  線を用いて、鉄等の遮蔽体中に隠された核物質や危険物 (模擬物質) を原子核共鳴蛍光法による 2 次元イメージング、3 次元イメージングを試みる。具体的には厚さ 10mm の鉄に覆われた試料を用意し、産総研の LCS  $\gamma$  線を入射する。この入射軸に対して、90 度方向に大型 Ge 半導体検出器を設置し、LCS  $\gamma$  線により特定の同位体から放射される NRF 散乱  $\gamma$  線を観測する。この時、LCS  $\gamma$  線軸上に対象とする同位体が存在すれば、検出器に NRF 散乱  $\gamma$  線に起因するピークを観測でき、同位体が存在しなければピークは存在しない。この原理により 2 次元のイメージングを行うために、X-Y ステージを用意して 2 次元のスキャンを行う。なお、LCS  $\gamma$  線の直径は約 2mm であり、空間分解能は数 mm 程度を目標とする。更に 3 次元イメージングに関しては、CT 法を用いることが通常考えられるが、NRF 法は反応断面積が非常に低いため、膨大な時間が必要となる。このため、新たな手法として、NRF 散乱  $\gamma$  線の収量を用いて実効的な厚みを算出する方法をイメージング手法に関する研究として試みる。

## 4. 研究成果

産総研の準単色 LCS  $\gamma$  線を用いて、鉛 2 次元の NRF イメージングを試み、画像の取得に成功した。具体的には、15mm 厚の鉄遮蔽体中に隠置した 30mmx30mmx10mm の矩形の鉛 (208Pb、52.4%、図 1) に対して、産総研の準単色  $\gamma$  線施設の LCS ガ

ンマ線ビームを照射した。照射したガンマ線は最大エネルギー 5.6MeV でありエネルギー幅約 5%で、5mm の直径を有する。このガンマ線を 10mm のステップで水平、垂直方向にスキャンを行い、高純度 Ge 検出器 (GEM-120-225-P) により、208Pb から共鳴散乱される 5.512MeV のガンマ線を測定した。この結果、鉛が存在する照射点において、有為な 5.512MeV のレベルの信号を検出するとともに、図 2 に示すような 2 次元画像を得る事ができた。

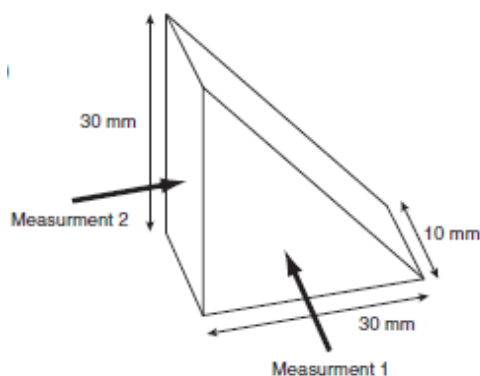


図 1. 研究に用いた鉛試料 Measurement1 は 2 次元イメージング実験時の  $\gamma$  線入射面であり、Measurement2 は 3 次元イメージング実験時のガンマ線の照射面である。

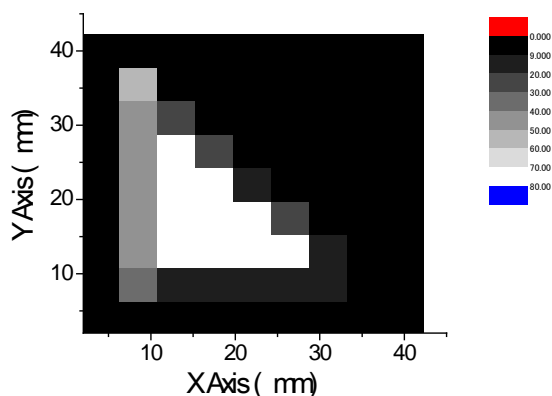


図 2. 鉛 208 の 2 次元イメージ

この時の空間分解能は 5mm であり、これは試料前に置いたコリメータの直径 5mm によって決まっている。

更に産総研の準単色 LCS  $\gamma$  線を用いて、3 次元の NRF イメージングを試み、画像の取得に成功した。具体的には、2 次元イメージング取得実験と同様の 15mm 厚鉄遮蔽体中に 30mmx30mmx10mm の矩形の鉛 (208Pb、52.4%) を配置し、最大エネルギー 5.6MeV、エネルギー幅約 5%で、5mm の直径を有するガンマ線を、やはり 10mm のステップで水平、垂直方向にスキャンを

行った。この時入射 $\gamma$ 線に対して 90 度方向に設置した高純度 Ge 検出器 (GEM-120-225-P) により、 $^{208}\text{Pb}$  から共鳴散乱される 5.512MeV のガンマ線を測定した。この結果、鉛が存在する照射点において、有為な 5.512MeV のレベルの信号を検出するとともに、その核共鳴散乱 $\gamma$ 線の収量から、図 2 に示すように、深さ方向の情報を同時に得る事に成功し、3次元画像を得る事ができた。

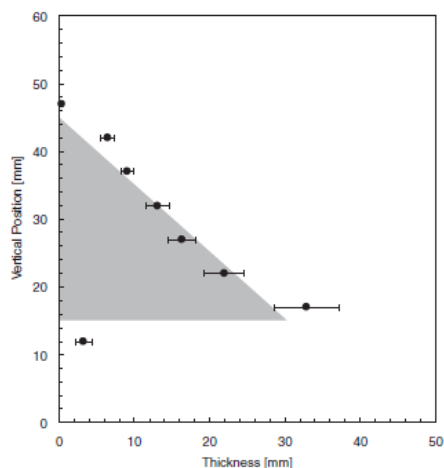


図 3. 鉛 208 の深さ方向のイメージ取得結果

これらの結果より 2 次元 (x-y 平面) イメージングと深さ方向 (z-方向) イメージングを組みわせることで、鉛 208 の同位体 3 次元イメージング画像が所得できる事がわかる。一方、イメージング手法として考えられる、NRF 散乱 $\gamma$ 線による CT 画像取得に関しては、2 次元イメージングの取得のみでさえ、総計で 24 時間以上必要であったため、産総研の $\gamma$ 線では現実的な実験時間では不可能と考えられる。よって、1 桁以上強力な、 $\gamma$ 線源が必要であり、今回行った深さ方向同時計測法が、現時点で現実的な手法と結論できる。

## 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 14 件)

(1) M. Omer, H. Negm, R. Kinjo, Y.-W. Choi, K. Yoshida, T. Konstantin, M. Shibata, K. Shimahashi, H. Imon, H. Zen, T. Hori, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, Analysis of SNIP Algorithm for Background Estimation in Spectra Measured with LaBr<sub>3</sub>:Ce Detectors, Proceedings of Zero-Carbon Energy Kyoto

2012、2013、245-252、  
DOI:10.1007/978-4-431-54264-3\_27 (査読有)

(2) H. Negm, M. Omer, R. Kinjo, Y.-W. Choi, K. Yoshida, T. Konstantin, M. Shibata, K. Shimahashi, H. Imon, H. Zen, T. Hori, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, Monte Carlo Calculations of  $\gamma$ -Rays Angular Distribution Scattering from  $^{11}\text{B}$  in ( $\gamma, \gamma$ ) Interaction, Proceedings of Zero-Carbon Energy Kyoto 201、2013、197-204、  
DOI:10.1007/978-4-431-54264-3\_21 (査読有)

(3) T. Shizuma, T. Hayakawa, R. Hajima, N. Kikuzawa, H. Ohgaki, and H. Toyokawa, Nondestructive identification of isotopes using nuclear resonance, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 83, 2012、15103、

DOI:10.1063/1.3673002 (査読有)

(4) R. Hajima, LINAC-BASED LASER COMPTON SCATTERING X-RAY AND GAMMA-RAY SOURCES, Proceedings of LINAC2012, Tel-Aviv, Israel, ISBN 978-3-95450-122-9、2012、734-737

DOI:無し (査読無し)

(5) M. Omer, M. Bakr, R. Kinjo, Y. W. Choi, K. Yoshida, N. Kimura, K. Ishida, T. Komai, M. Shibata, K. Shimahashi, H. Imon, T. Sonobe, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, H. Toyokawa, Assessment of LaBr<sub>3</sub>(Ce) scintillators system for measuring nuclear resonance fluorescence excitations near 2 MeV, Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE, 2011、1627-1630、  
DOI:10.1109/NSSMIC.2011.6154648 (査読無し)

(6) H. Toyokawa, H. Ohgaki, T. Hayakawa, T. Kii, T. Shizuma, R. Hajima, N. Kikuzawa, K. Masuda, F. Kitatani, and H. Harada, Two-Dimensional Isotope Imaging of Radiation Shielded Materials Using Nuclear Resonance Fluorescence, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 50, 2011、100209-1, 100209-3、

DOI: 10.1143/JJAP.50.100209 (査読有)

(7) H. Toyokawa, T. Hayakawa, T. Shizuma, R. Hajima, K. Masuda, and H. Ohgaki, Nondestructive inspection of explosive materials using linearly polarized two-colored photon beam, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A, vol. 652, 2011、21-24、

DOI: 10.1016/j.nima.2011.01.158 (査読有)

(8) H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, M. Omer, T. Misawa, C. H. Pyeon, R. Hajima, T.

Hayakawa, T. Shizuma, M. Kando, I. Daido and H. Toyokawa, Proposal of a Non-Destructive Detection System for Hidden Nuclear Materials Based on a Neutron / Gamma-ray Hybrid System, Journal of the Korean Physical Society, vol. 59, 2011, 3155-3159, DOI : 10.3938/jkps.59.3155 (査読有)

(9) H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, T. Misawa, C.-Ho PYEON, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, K. Kawase, M. Kando, H. Toyokawa, Conceptual Design of a Nuclear Material Detection System Based on the Neutron / Gamma-ray Hybrid Approach, Proc. of IEEE Intl Conf. on Technologies for Homeland Security 2010, 2010, 525-529 DOI: 10.1109/THS.2010.5654977 (査読有)

(10) H. Toyokawa, H. Ohgaki, T. Hayakawa, T. Kii, T. Shizuma, R. Hajima, N. Kikuzawa, K. Masuda, F. Kitatani, and H. Harada, Two-dimensional Imaging of Heavily Shielded Materials by NRF with Laser-Compton photon Beam, Conference Record of the IEEE Nuclear Science Symposium 2010, 2010, 10.1109/NSSMIC.2010.5873820 (査読無)

(11) T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, H. Harada, F. Kitatani, T. Hayakawa, T. Shizuma, N. Kikuzawa, R. Hajima, N. Nishimori, H. Toyokawa, Performance of the LaBr3(Ce) scintillator for nuclear resonance fluorescence experiment, Conf. record of IEEE Nuclear Science Symposium 2009, 2009, 1490-1492 DOI:10.1109/NSSMIC.2009.5402298 (査読無)

(12) R. Hajima, N. Kikuzawa, N. Nishimori, T. Hayakawa, T. Shizuma, K. Kawase, M. Kando, E. Minehara, H. Toyokawa and H. Ohgaki, Detection of radioactive isotopes by using laser Compton scattered  $\gamma$ -ray beams, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 608, 2009, S57-S61, DOI: 10.1016/j.nima.2009.05.063 (査読有)

(13) H. Toyokawa, S. Goko, S. Hohara, T. Kaihori, F. Kaneko, R. Kuroda, N. Oshima, M. Tanaka, M. Koike, A. Kinomura, H. Ogawa, N. Sei, R. Suzuki, T. Ohdaira, K. Yamada and H. Ohgaki, Recent progress in generation and application of AIST laser-Compton gamma-ray beam, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 608, 2009, S41-S43, DOI: 10.1016/j.nima.2009.05.062 (査読有)

(14) T. Shizuma, T. Hayakawa, H. Ohgaki, H. Toyokawa, T. Komatsubara, N. Kikuzawa, A. Tamii, and H. Nakada, Fine structure of

the magnetic-dipole-strength distribution in 208Pb, Physical Review C, 78, 2009, 061303, DOI: 10.1103/PhysRevC.78.061303 (査読有)

[学会発表] (計 23 件)

- (1) H. Negm, M Omer, H. Zen, T. Kii, K. Masuda, T. Hori, H. Ohgaki, R. Hajima, N. Kikuzawa, T. Shizuma, T. Hayakawa, I. Daito, H. Toyokawa, Response Function of LaBr3:Ce detector and Internal-Activity, 日本原子力学会「2013年春の年会」2013年03月26~28日近畿大学
- (2) M. Omer, H. Negm, H. Zen, T. Hori, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, R. Hajima, T. Hayakawa, I. Daito, S. Matsuba, T. Shizuma, N. Kikuzawa, LaBr3:Ce Detector Array (LABRA) for Active Nondestructive 日本原子力学会「2013年春の年会」2013年03月26日~28日、近畿大学
- (3) 大垣英明, 三澤毅, 増田開, 紀井俊輝, 全炳俊, 梶原泰樹, Mohamed Omer, 堀利匡, 大東出, 早川岳人, 羽島良一, 静間俊行, 神門正城, 藤本真也, 酒井文雄, 中性子/ $\gamma$ 線複合型核検知システム開発の現状 V、日本原子力学会「2013年春の年会」、2013年03月26日~28日、近畿大学
- (4) H. Ohgaki, Current Issues on Nuclear Security in Japan: Technological View, The 1st Bristol-Kyoto Symposium (招待講演) 2013年01月10日~11日、University of Bristol, UK
- (5) H. Ohgaki, Nuclear Security Technologies in Japan, 10th EMSES 2012 (招待講演)、2012年12月05日~08日、Sunee grand hotel (Thailand)
- (6) M. Omer, H. Negm, H. Ohgaki, et.al., Detection of Photon-Induced Excitations in 235U with LaBr3 (Ce) Scintillating Detectors, IEEE 2012 NSS/MIC, 2012年10月27日~11月02日、Disney Horwl, Anaheim, USA
- (7) H. Ohgaki, Development of Non-Destructive Inspection System for Special Nuclear Material, BU-KU Mini-workshop (招待講演)、2012年10月01日、University of Bristol, UK
- (8) 大垣英明, 紀井俊輝, 増田開, 三澤毅, 卞哲浩, Omer Mohamed, 全炳俊, 堀利匡, 羽島良一, 早川岳人, 静間俊行, 神門正城, 大東出, 豊川弘之, 藤本真也, 酒井文雄, 中性子/ $\gamma$ 線複合型核検知システム開発の現状 IV、日本原子力学会「2012年秋の大会」、2012年09月19日~21日、広島大学
- (9) M. Omer, H. Negm, H. Zen, T. Hori, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, R. Hajima, T.

Hayakawa, I. Daito, T. Shizuma, M. Fujiwara and N. Kikuzawa, Detection of Nuclear Resonance Fluorescence Excitations in  $^{235}\text{U}$  with  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  Scintillating Detectors, 日本原子力学会「2012年秋の大会」、2012年09月19日~21日、広島大学

(10) H. Negm, M. Omer, H. Ohgaki, et.al., Geant4 Simulation of Nuclear Resonance Fluorescence from  $^{11}\text{B}$ , SORMA WEST2012, 2012年05月14日~17日、Mariott City Center, Oakland, USA

(11) H. Ohgaki, Non-destructive Inspection of hidden SNM by using Laser-Compton Backscattering Gamma-ray induced NRF, KAERI WCI International Advisory Meeting, 2011年, 9月23日, DAEJON (KOREA)

(12) 大垣英明, 紀井俊輝, 増田開, 三澤毅, 卞哲浩, Omer Mohamed, 早川岳人, 堀利匡, 羽島良一, 静間俊行, 菊澤信宏, 神門正城, 大東出, 豊川弘之, 藤本真也, 中性子/ $\gamma$ 線複合型核検知システム開発の現状 II; (1) 全体システムの設計の現状, 日本原子力学会「2011年秋の大会」、2011年9月19-22日、北九州国際会議場・西日本総合展示場

(13) M. Omer, M. Bakr, R. Kinjo, Y. W. Choi, K. Yoshida, N. Kimura, K. Ishida, T. Sonobe, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, H. Toyokawa, Nuclear Resonance Fluorescence Excitations Measured by  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  Scintillators, 日本原子力学会「2011年秋の大会」、2011年9月19-22日、北九州国際会議場・西日本総合展示場

(14) T. Kii, T. Hori, K. Masuda, H. Ohgaki, M. Omer, R. Hajima, T. Hayakawa, M. Kando, T. Shizuma, T. Misawa, C. H. Pyeon, H. Toyokawa, Design Study of a Nuclear Material Detection System Based on a Quasi Monochromatic Gamma Ray Generator and a Nuclear Resonance Fluorescence Gamma Ray Detection System, The second International Particle Accelerator Conference (IPAC-11), 2011年9月4-9日、San Sebastian (Spain)

(15) 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, 菊澤信弘, 静間俊行, 神門正城, 豊川弘之, 藤本信也, 中性子/ $\gamma$ 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, 原子力学会春の年会, 2011年3月30日、福井大学

(16) M. Omer, M. Bakr, K. Yoshida, S. Ueda, M. Takasaki, K. Ishida, N. Kimura, R. Kinjo, Y. W. Choi, T. Sonobe, T. Kii, K. Masuda, H. Ohgaki, Response of  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  detector

using GEANT4 simulation code for Nuclear Fluorescence Resonance Application, 原子力学会春の年会, 2011年3月29日、福井大学

(17) 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, 原子力学会春の年会, 2011年3月28日、福井大学

(18) H. Ohgaki, Isotope Detection by nuclear resonance fluorescence with laser Compton Gamma-rays, China-Korea-Japan Joint Workshop on electron/photon sources and applications, 2010年12月2日、Shanghai (China)

(19) H. Ohgaki, T. Kii, K. Masuda, T. Misawa, C. Ho PYEON, R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, M. Kando, I. Daito, H. Toyokawa, Proposal of a Non-Destructive Detection System for Hidden Nuclear Materials Based on a Neutron / Gamma-ray Hybrid Approach, The 17th International Symposium on Laser Spectroscopy, 2010年11月5日、Daejeon (Korea)

(20) 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 $\gamma$ 線の核共鳴蛍光散乱による核種分析, 2010年9月16日、原子力学会秋の年会、北海道大学

(21) 大垣英明, 紀井俊輝, 羽島良一, 早川岳人, 静間俊行, レーザー逆コンプトンガンマ線を用いた核共鳴蛍光散乱実験とその同位体検出法への応用, 第11回光量子科学研究シンポジウム, 2010年6月25日、日本原子力研究開発機構関西研究所

(22) 早川岳人, 静間俊行, 菊澤信宏, 羽島良一, 瀬谷道夫, 豊川弘之, 大垣英明, 単色 $\gamma$ 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; (II) 検出器概要及び実証実験, 日本原子力学会2010年春の年会, 2010年3月27日、茨城大学

(23) H. Ohgaki, T. Kii, R. Kinjo, M. A. Bakr, K. Higashimura, K. Masuda, T. Sonobe, S. Ueda, K. Yoshida, Y. W. Choi, H. Zen, Nuclear Resonance Fluorescence Experiment using  $\text{LaBr}_3$  Scintillator at AIST-LCS beamline, International and commemorative symposium in establishing the Applied Laser Technology, 2010年2月17日、アクアトム (福井)

〔図書〕 (計2件)

(1) 大垣英明, 早川岳人, 大東出, レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線を用いた核共鳴蛍光による同位体の非破壊分析, レーザー研究, 第40(3)巻, 188-193 (2012)

(2) 大垣英明, 早川岳人, 「核共鳴蛍光散乱による隠匿された物質の非破壊同位体分

析)、応用物理学会誌、「応用物理」第80  
巻, 955-959 (2011年)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授  
研究者番号: 80303907

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○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

[http://wonda.iae.kyoto-u.ac.jp/~ohgaki/  
index.html](http://wonda.iae.kyoto-u.ac.jp/~ohgaki/index.html)

## 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

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・グループリーダー  
研究者番号: 80357582

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・主任研究員・グループ  
リーダー

研究者番号: 30218432

早川 岳人 (HAYAKAWA TAKEHITO)  
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・主任主幹  
研究者番号: 70343944

### (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  
増田 開 (MASUDA KAI)