

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

LASER COMPTON BACK-SCATTERING GAMMA-RAY BEAMLINE AND ITS APPLICATION TO NRF-CT

大垣 英明^{#A)}, 紀井 俊輝^{A)}, 全 炳俊^{A)}, 大東 出^{A)}, 豊川 弘之^{B)}, 平 義隆^{B)}, 早川 岳人^{C)}, 静間 俊行^{C)},
加藤 政博^{D)}, 山崎 潤一郎^{D)}

Hideaki Ohgaki^{#A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Heishun Zen^{A)}, Izuru Daito^{A)}, Hiroyuki Toyokawa^{B)}, Yoshitaka Taira^{B)}, Takehito Hayakawa^{C)}, Toshiyuki Shizuma^{C)}, Masahiro Katoh^{D)}, Junichiro Yamazaki^{D)}

^{A)}Institute of Advanced Energy, Kyoto University,

^{B)}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,

^{C)}National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology,

^{D)}Institute for Molecular Science

Abstract

A new laser Compton scattering (LCS) gamma-ray beamline has been developed at UVSOR-III. The study on nuclear resonance fluorescence (NRF) based -computer tomography (CT) imaging by using laser Compton scattering (LCS) gamma-ray beam has been carried out at a new LCS beam line at UVSOR-III. This LCS beamline can generate 5.4-MeV energy gamma-rays with a flux of 1×10^7 photons/s. We have measured the 5292-keV NRF gamma-rays from a lead target to take a NRF-CT image by using the NRF absorption method. A sample target consists of aluminium, stainless steel, and lead rods with a diameter of 8 mm with a 5×5 array. The sample was irradiated by an LCS gamma-ray beam. Although the resolution was very poor in this preliminary experiment, ^{208}Pb distribution was successfully reconstructed by taking a normalization of the NRF absorption by the atomic transmittance.

1. はじめに

MeV 領域のチューナブルかつ単色性や偏極性の高い γ 線ビームは、核物理研究や非破壊分析等の応用には欠かせないものとなっている。そのような γ 線発生方法の一つとして、レーザーと高エネルギー電子ビームを衝突させるレーザー逆コンプトン散乱法(laser Compton scattering (LCS))がある[1]。これまでに、電子蓄積リングを用いるものや、線形加速器を用いたもの等が開発されてきた[2]-[10]。

我々はこれまで、LCS ビームを用いた非破壊検査や、同位体イメージングに関して研究を行ってきた。ここで用いている手法は、目標とする原子核の光核共鳴散乱(nuclear resonance fluorescence (NRF))である。原子核には固有の励起状態が存在しており、そのエネルギーに等しい準単色の γ 線を照射すると、共鳴吸収され、ほぼ同じエネルギーの γ 線が放出される。この γ 線を検出することで、非破壊で任意の同位体を測定する事が可能である [10]-[12]。本手法では、原理的に同位体の識別が可能であるため、同位体イメージングへの応用が、核物質管理の観点から期待されている。[13]しかしながら、NRF の反応断面積は μb のオーダーであり、特に同位体イメージングの実用化には、強力な LCS γ 線源開発が必須となっている。

現在、最も強力な LCS γ 線施設は米国 Duke 大学の HIGS 施設であり、 10^{6-7}ph/s の LCS γ 線をユーザーに提供している。ここでは、蓄積リング型 FEL の光共振器内の強いレーザーを、直接周回する電子ビームに衝突させる方式であり、2 つのビーム間のマッチングの良さや、

広い範囲に渡るエネルギー可変性を実現している[3]。一方、我が国においては、TERAS[2](すでにシャットダウン)や New SUBARU [7]を初め、数か所で LCS γ 線の発生が行われてきた。UVSOR においても、蓄積リング型 FEL を用いた、LCS γ 線の発生に成功している[4]。そこで、特に NRF を用いた同位体イメージングの研究のために、 γ 線収量の増大が可能な蓄積リング型 FEL を用いた、LCS γ 線の発生を最終目標に、UVSOR-III にて LCS γ 線のビームラインの開発と、同位体イメージングの研究を 2014 年度より開始した。まず手始めに、レーザーとしてはリング外部から、ファイバーレーザーを導入し、5MeV 近傍の LCS γ 線発生とその特性評価[14]を行った。また、これを用いて非常にラフではあるが同位体分布の CT イメージングを行った[15]。

2. LCS Beamline in UVSOR-III

プロジェクトの第 1 段階として、蓄積リング型自由電子レーザーより簡便に LCS γ 線が発生可能な市販のファイバーレーザーを用いる事にした。ここで問題になるのが、UVSOR-III にて NRF 実験が可能な LCS γ 線のエネルギーを選択せねばならない。これまで行ってきた NRF イメージング実験では鉛(^{208}Pb)のターゲットを用いて、5.512MeV の E1 レベルの励起を行ってきた[12]。そこで、このレベルの励起が可能なレーザー波長を、蓄積リングの定常運転モードでの 750MeV に合わせて、 $1.94 \mu\text{m}$ とした。この波長帯では、数 W の出力のファイバーレーザーが比較的安価で入手可能である。実際に購入したファイバーレーザーは最大出力 5W の CW レーザー (AP-Tm-1950-SM-05-LP) である。実際のレーザー波長は、スペクトロメーターにて測定した結果、 $1944.78 \pm 0.07 \text{ nm}$ であった。

[#] ohgaki.hideaki.2w@kyoto-u.ac.jp

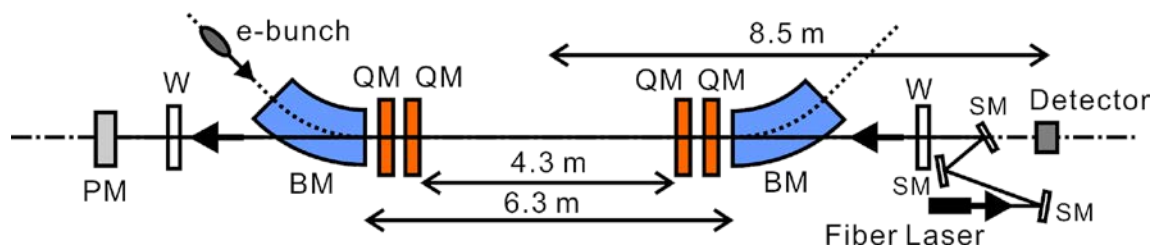


Figure 1: Schematic diagram of the experimental geometry. QM: Quadrupole Magnet in the Storage Ring, BM: Bending Magnet in the Storage Ring, W: Quartz Window, SM: Silver Mirror, PM: Laser Power Meter.[14]

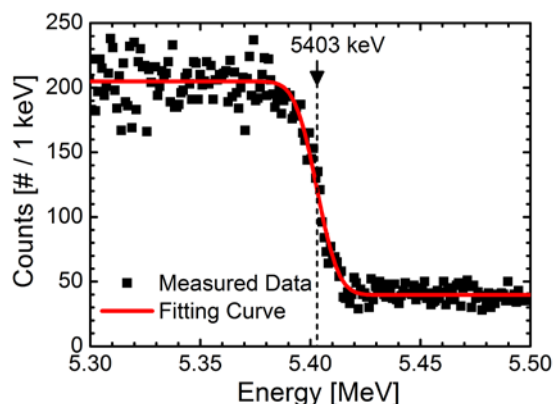


Figure 2: Measured spectrum of the maximum energy region of the LCS Gamma-rays.[14]

Figure 1に、UVSOR-IIIのBL1Uに設置したファイバーレーザーと光学系及び、LCS γ 線の特性評価のための検出器の配置図を示す。

検出器には、最大エネルギー測定用に高純度 Ge 検出器(GEM-120225-P, EG&G ORTEC)を、また、 γ 線収量の測定には LaBr₃(Ce) scintillation 検出器 (Model: 38S76, PM:R9420-100 MOD, SAINT-GOBAIN)をそれぞれ用いた。

Figure 2に蓄積電流 0.6mA、レーザー出力 1.2Wでのエネルギー測定結果を示す。スペクトルの高エネルギー側エッジをエラー関数でフィットした結果を図中赤線で示しているが、このフィットの結果 5.403 ± 0.016 MeVを得た。この γ 線エネルギーから、UVSOR-IIIの定常運転時の電子ビームエネルギーは 746 ± 1 MeVとなる。

一方、 γ 線収量は蓄積電流 300mA でレーザー出力 5W の条件で測定した。 γ 線収量を測定可能なように、鉛のアブソーバーを用いて、検出器に入る γ 線の割合を落とし、結果として $7.0\text{-}11.0 \times 10^6 \gamma/s$ の値を得た。この値は、電子ビームとレーザーのビームサイズが衝突領域で一定であると仮定した場合の計算値 $1.7 \times 10^7 \gamma/s$ とよく一致している。

3. 同位体 CT 測定実験

UVSOR-IIIのLCS γ 線を用いて、2次元の同位体分布をNRFの吸収法を用いて2次元CT画像の取得を試みた。基本的にCTイメージングは、測定物を透過してく

るX/ γ 線の吸収を測定し、測定物を回転させることで画像再現を行うものである。一方の同位体CTイメージングでは、測定物中(CT target)に存在する測定対象の同位体が入射 γ 線に対しNRF反応(吸収)を行い、その結果減弱された γ 線をWitness targetと呼ばれる、測定対象の同位体を含む物質からのNRF γ 線を測定し、CT target 中での同位体の量を得る。

入射LCS γ 線はビームライン上流に置かれた8mm径の鉛コリメータを通過させエネルギー広がり照射野を定義した。前節で有るように、LCS γ 線の最大エネルギーが5.4 MeVであったため、²⁰⁸Pbの5.292 MeVのレベルをNRF測定の対象とする必要があり、コリメータ径を大きくして、LCS γ 線のエネルギー広がりを十分大きくとった。このために、イメージングの空間分解能は8mmと、粗い物になった。

CT用のサンプルターゲットには鉛、アルミニウム、ステンレススチールの8mm径のロッドを5x5のマトリックスに組み、これを透過してくるLCS γ 線を鉛ブロックのWitness targetにし、高純度Ge検出器にて²⁰⁸PbのNRF測定を行った。Figure 3にCTサンプルターゲットの写真(右図)とそれぞれの物質の配置を上面から見た図(左図)を示す。CTサンプルターゲットはX-Y- θ 軸駆動ステージ上に置かれ、遠隔にて移動・回転の操作を行った。

LCS γ 線のビーム収量は、CTターゲット上流に置かれた厚さ5mmのプラスチックシンチレータでモニターし、全吸収後のLCS γ 線の収量は3.5" x 4"のLaBr₃(Ce) scintillation 検出器を用いて測定した。またWitness targetには5cm x 10cmで1cm厚の鉛ブロックを用い、散乱角約135度に置いた高純度Ge検出器にてNRF測定を行った。Figure 4に得られたNRFスペクトルを示すとともに、NRFピーク部分を拡大した図を下図に示す。なお、LaBr₃(Ce)検出器のスペクトルからは、CTターゲットでの原子吸収の情報が得られ、これを用いて通常の γ 線CTイメージが取得可能である。

今回の実験ではX軸のスキャンを1cmとし、回転角は36度とした。データ収取は5.292 MeVのピーク面積がほぼ100カウントになるまで測定し、1点当たりの測定時間は約1~2時間であった。

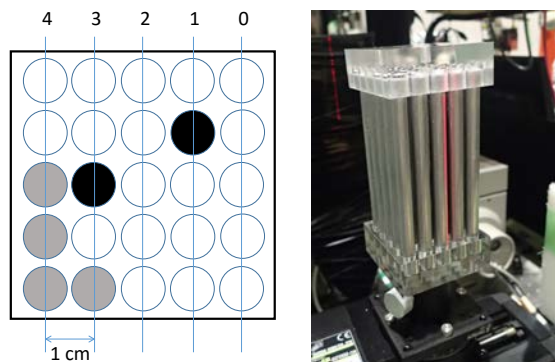


Figure 3: Left : Schematic drawing of the CT target. Black circles indicate lead rods, Grey circles are stainless steel rods, and White circles are aluminum rods. Right : Photo of the CT target.[15]

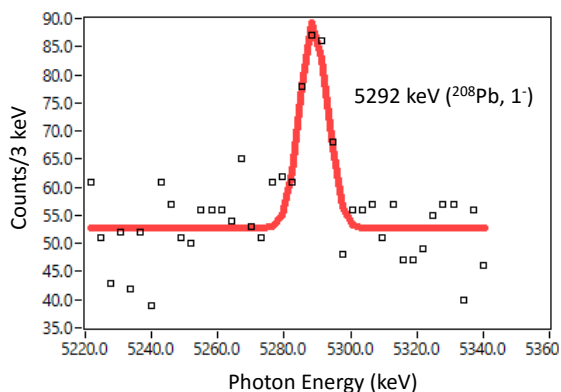
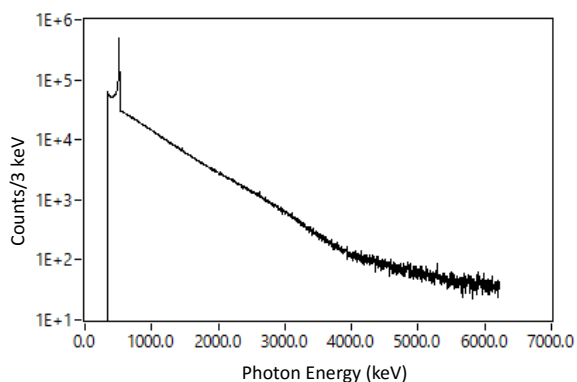


Figure 4: Upper: Typical spectrum from the witness target measured by Ge. Lower: Expanded spectrum of ROI around 5292 keV with a Gaussian peak fitting result.[15]

4. 同位体 CT イメージングの再構成

実験にて得られた 25 点の NRF ピークから Algebraic Reconstruction Techniques を用いて、画像の再構成を行った。Figure 5(a) に、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器のスペクトルから再構成した CT 画像を示す。この図では赤がより強い吸収を表している。再構成用のデータが 5×5 と非常にラフなため、再構成画像が明瞭では無いものの、Figure 5 左図にあるような、 $(x,y)=(1,1)$ 、 $(3,2)$ の位置にて、比較的強い吸収が得ら

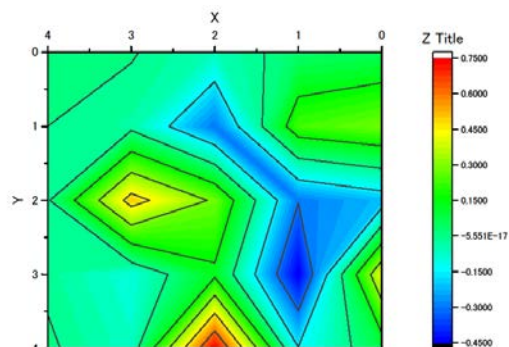


Figure 5(a): Atomic absorption image measured by the $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ detector.

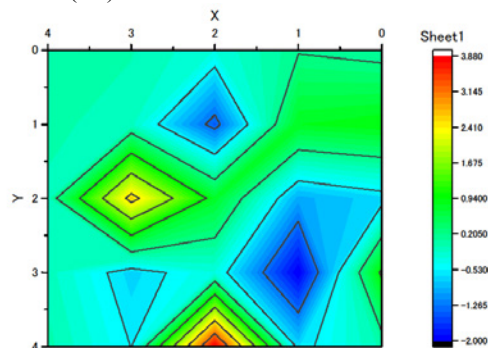


Figure 5(b): ^{208}Pb distribution image reconstructed by the transmission of 5292 -keV NRF peaks including atomic absorption.

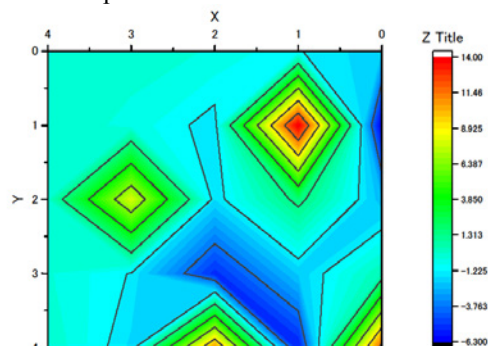


Figure 5(c): ^{208}Pb distribution image reconstructed by the transmission of 5292-keV NRF peaks.

れていることが分かる。なお今回の測定では、ステンレススチールの像は殆ど見えなかった。Figure 5 (b)に、NRF の吸収から再構成した CT イメージを示す。この図では鉛が存在する場所だけが、示されるはずではあるが、あまり明瞭ではない。これは、Witness ターゲットに入射する LCS γ 線が、CT ターゲットにおいて NRF 吸収のみならず、原子吸収も伴うからであり、実際の NRF 吸収のみのイメージを得るためには、原子吸収の効果を取り除かねばならな

い。具体的には Ge 検出器からの NRF 吸収+原子吸収を含む生データを LaBr₃(Ce) 検出器からの原子吸収データで割算する必要がある[15]。

Figure 5(c)に最終的に得られた ²⁰⁸Pb の CT イメージを示す。原子吸収を補正する演算を施した結果、明瞭な CT イメージが得られていることが分かる。

5. まとめ

同位体分布の CT 計測を目指した基礎研究を行う目的で、分子科学研究所 UVSOR-III の蓄積リングを周回する高エネルギー電子と大強度レーザーとの衝突による LCS γ 線のビームライン (BL1U) を建設している。まず、第 1 段階として、レーザーには 1.94 μ m のファイバーレーザーと、UVSOR-III の定常運転モードである 750MeV、300mA の電子ビームを用いて、最大エネルギー5.4MeV、コリメータ無しでのガンマ線収量 1×10^7 photons/s を得ている。このガンマ線を用いて 2次元の同位体分布を NRF の吸収法を用いて CT 画像の取得実験を行った。CT 用のサンプルターゲットには鉛、アルミニウム、ステンレススチールのロッドを 5 \times 5 のマトリックスに組み、これを透過してくる LCS γ 線を鉛の Witness Target に照射し、この NRF γ 線を測定する事で ²⁰⁸Pb の CT イメージの再構成を行った。この結果、CT サンプルターゲットでの原子吸収を補正する事で、²⁰⁸Pb の CT イメージを得る事に成功した。

謝辞

本研究は科研費 26289363、24340060 及び分子科学研究所 2014,2015 協力研究の支援を受けて行われました。改めてここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] O.F. Kulikov *et al.*, "Compton effect on moving electrons", *Physics Letters*, 13, 1964, p.344-346.
- [2] H. Ohgaki *et al.*, *Nucl. Instr. and Methods A* 375, 1996, p.602.
- [3] V. N. Litvinenko *et al.*, "Gamma-Ray Production in a Storage Ring Free-Electron Laser", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.78, Num. 24, 1997, p.4569-4572.
- [4] M. Hosaka *et al.*, "Observation of in-tracavity Compton backscattering of the UVSOR free electron laser", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 393, 1997, p.525-529.
- [5] D. Nutarelli *et al.*, "Gamma rays production by intra-cavity Compton Back Scattering with Super-ACO Storage Ring Free Electron Laser", *Nucl. Instr. and Methods A*, 407, 1998, p.459-463.
- [6] R. Kulein *et al.*, "Measurement of the BESSY II electron beam energy by Compton-backscattering of laser photons", *Nucl. Instr. and Methods A*, 486, 2002, p.545-551.
- [7] K. Aoki *et al.*, "High-energy photon beam production with laser-Compton backscattering", *Nucl. Instr. and Methods A*, 516, 2004, p.228-236.
- [8] K. Kawase *et al.*, "MeV γ -ray generation from backward Compton scattering at SPring-8", *Nucl. Instr. and Methods A*, 592, 2008, p.154-161.
- [9] T. Kaneyasu *et al.*, "Generation of laser Compton gamma-rays in SAGA light source", *Nucl. Instr. and Methods A*, 659, 2011, p.30-35.
- [10] J. Pruet *et al.*, "Detecting clandestine material with nuclear resonance fluorescence", *Journal of Applied Physics*, 99, 2006, 123102.
- [11] R. Hajima *et al.*, "Proposal of nondestructive radionuclide assay using a high-flux gamma-ray source and nuclear resonance fluorescence", *Journal of Nuclear Science and Technology* 45, 2008, p.441-451.
- [12] N. Kikuzawa *et al.*, "Nondestructive detection of heavily shielded materials by using nuclear resonance fluorescence with a laser-Compton scattering γ -ray source", *Applied Physics Express* 2, 2009, 036502.
- [13] Gamma Beam Industrial Applications at ELI-NP, Technical Design Report, 2015.
- [14] H. Zen *et al.*, "Generation of High Energy Gamma-ray by Laser Compton Scattering of 1.94- μ m Fiber Laser in UVSOR-III Electron Storage Ring", *Energy Procedia* 89 (2016) 335 - 345.
- [15] H. Ohgaki *et al.*, "Study on NRF-CT Imaging by Laser Compton Backscattering Gamma-rays in UVSOR", *Proceedings of IPAC2016*, 2016, 2007-2010.
- [16] I. Daito *et al.*, "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 (2016) 389 - 394.