

UVSOR-III における 1.94 μm 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

LASER COMPTON SCATTERED GAMMA-RAY GENERATION USING 1.94-MICRO-M FIBER LASER AT UVSOR-III

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

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

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

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

^{C)} UVSOR facility, Institute for Molecular Science

^{D)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A laser Compton scattering (LCS) gamma-ray source has been developed in the UVSOR-III storage ring to perform basic research on non-destructive three dimensional isotope imaging. A 1.94- μm CW fiber laser with the maximum average power of 5 W has been installed as the collision laser of the LCS gamma-ray source. As the first step of the development, the maximum gamma-ray energy and total flux of the LCS gamma-ray source has been measured. The maximum gamma-ray energy and the total flux were determined as 5403 ± 16 keV and 1×10^7 photons/s, respectively. The energy of electron beam circulating in the storage ring can be estimated from the maximum gamma-ray energy and has been determined as 746 ± 1 MeV. The gamma-ray flux and energy spread after collimators have been investigated by numerical simulation. The expected gamma-ray flux and energy spread after a 2-mm-diameter collimator are 4×10^5 photons/s and 2.9%, respectively. The performance of developed LCS gamma-ray source is enough high for performing basic research on the non-destructive three dimensional isotope imaging.

1. はじめに

準単色・エネルギー可変・高指向性・高偏極度といった様々な高い付加価値を持つ大強度ガンマ線ビームは原子核物理や非破壊検査等の分野で幅広い応用用途がある。この様な特性を持つガンマ線は現在、大強度レーザーと高エネルギー電子ビームとを衝突させる事で発生させる事が可能であり、このプロセスはレーザーコンプトン散乱(Laser Compton Scattering: LCS)と呼ばれており、発生したガンマ線を LCS ガンマ線と呼ばれている。LCS ガンマ線は既に多くの加速器施設において開発が進められており、様々な応用実験に供されている^[1-8]。

LCS ガンマ線の応用として、核共鳴蛍光散乱(Nuclear Resonance Fluorescence: NRF)を用いて非破壊で同位体の位置分布を測定する手法が提案されており^[9-11]、既に産業技術総合研究所(産総研)の電子蓄積リング TERAS において実証実験が行われ、その有用性が示された^[12]。しかし、2011年の東日本大震災において産総研の加速器群はダメージを負ってしまい、その後、TERASは廃止となってしまった。

そこで、我々の研究グループでは、NRFを用いた三次元同位体分布イメージングの基礎研究を行うため、電子蓄積リング UVSOR-III^[13]にて LCS ガンマ

線源の開発を提案している。UVSOR-IIIは低エミッタンス(17.5 nm-rad)、高平均電流(300 mA top-up)を誇る電子蓄積リングであり、NRF測定に必要な高フラックス、狭帯域ガンマ線発生に適した装置である。また、これまでに蓄積リング自由電子レーザー発振の実績も豊富であることから、将来的に蓄積リング自由電子レーザーを用いたLCSガンマ線発生によるガンマ線フラックスの向上も期待できる装置である。

平成24年度に科学研究費補助金基盤研究(B)『NRFを利用した同位体3Dイメージングに関する基礎研究』が採択され、UVSOR-IIIにおける波長1.94 μm のファイバーレーザーを用いたLCSガンマ線源の開発に本格的に着手した。

平成24年度には導入した波長1.94 μm のファイバーレーザーを用いた際の最大ガンマ線エネルギーの測定を行うと共に、発生ガンマ線フラックスの測定を行った。本プロシーディングスではこれらの実験結果とコリメータ設置後のフラックス及びエネルギー幅の数値計算を用いた予測結果について報告する。

[#] zen@iae.kyoto-u.ac.jp

2. 実験装置

2.1 UVSOR-III 電子蓄積リング^[13]

UVSOR-III 電子蓄積リングは最大エネルギー750 MeV の第三世代光源である。主要なパラメータを表 1 に、蓄積リングの概略図を図 1 に示す。UVSOR-III には 4 つの長直線部と 4 つの短直線部があり、長直線部の内の 1 つ(図 1 中の黒丸で示した場所)を本研究に用いた。この直線部には既に蓄積リング自由電子レーザー発生用のアンジュレータが設置されており、将来的に自由電子レーザーを用いたガンマ線発生を行う際にも同じ直線部を用いる事となる。

Table 1: Parameters of the UVSOR-III Storage Ring

Maximum Energy	750 MeV
Normal operation Current (Top-up Mode)	300 mA (multi-bunch) 50 mA (single bunch)
Natural Emittance	17.5 nm-rad
Circumference	53.2 m
RF Frequency	90.1 MHz
Harmonic Number	16
Bending Radius	2.2 m
Straight Section	(4 m × 4) + (1.5 m × 4)
Energy Spread	5.26×10^{-4}
Natural Bunch Length	128 ps

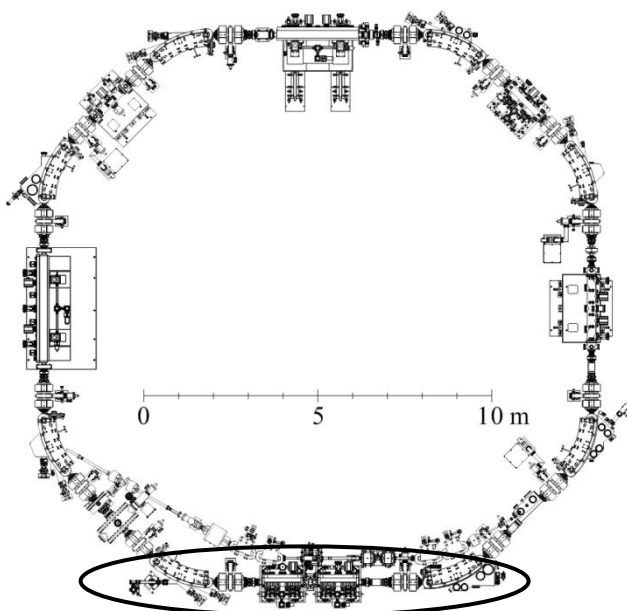


Figure 1: Schematic diagram of UVSOR-III storage ring. Black ellipse indicates the straight section used in this Research.

2.2 ファイバーレーザー

入手性が良く、取り扱いが容易な鉛(²⁰⁸Pb)の原子核が 5512 keV と 5292 keV に断面積の大きな励起準位を有する為、5.5 MeV 程度のエネルギーを持つガンマ線を発生させる事を目指し、波長 1.94 μm のファイバーレーザーを導入した。本実験で用いたファイバーレーザーの仕様を表 2 に示す。このレーザーは CW レーザーであり、発振波長幅は 1 nm 以下である。近赤外分光器(NIRQUEST512-2.2, Ocean Optics, Inc.)により測定した結果、中心波長は 1944.78 ± 0.07 nm であった。

エネルギー0.6375 eV の光がエネルギー750 MeV の電子により散乱された際に発生する LCS ガンマ線の最大エネルギーは約 5.5 MeV である。

Table 2: Main Parameters of the Fiber Laser

Model Name	AP-Tm-1950-SM-05-LP
Company	AdValue Photonics Inc.
Operation Mode	CW
Operation Wavelength	1944.78 ± 0.07 nm (Energy : 0.6375 eV)
Max. Output Power	5 W
Spectral Line Width	< 1 nm
Beam Quality, M ²	< 1.1
Output Polarization	Linearly Polarized

2.3 ガンマ線検出器と計数装置

本実験には、高純度ゲルマニウム(HPGe)検出器(GEM-120225-P, EG&G ORTEC)と LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器(結晶サイズ: φ38.1 mm x 76.2 mm, Model: 38S76, PM: R9420-100 MOD, SAINT-GOBAIN)とを用いた。HPGe 検出器はその高い分解能を生かして、低電子ビーム電流・低レーザーパワー条件下での最大ガンマ線エネルギー測定に使用した。一方、LaBr₃(Ce)検出器は高い係数率の測定が可能な事から、最大ビーム電流・最大レーザーパワー条件下でのガンマ線発生量測定に用いた。それぞれの検出器から得られた信号はデジタル信号処理装置(APU8008, Techno AP)に接続し、波高値スペクトルの測定と記録を行った。

2.4 機器配置

図 2 に実験で用いた全体の機器配置図を示す。ファイバーレーザーは長直線部の下流側から合成石英製の真空窓を通して入射した。長直線部の四重極電磁石間距離は 4.3 m、偏向電磁石間距離は 6.3 m である。長直線部の中心と検出器までの距離はおおよそ 8.5 m であった。長直線部を通り抜けたレーザーのパワーは上流側に設置された合成石英真空窓を通して大気側に取り出され、パワーメータを用いて測定した。

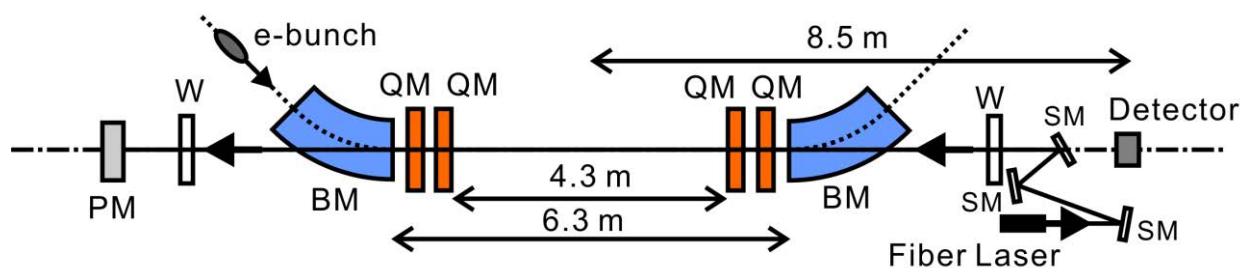


Figure 2: Schematic diagram of experimental geometry. QM: Quadrupole Magnet in the storage ring, BM: Bending magnet in the storage ring, W: Quartz Window, SM: Silver Mirror, PM: Laser Power Meter.

3. 実験結果

今回は最大ガンマ線エネルギーの測定と発生ガンマ線フラックスの測定を行った。

3.1 最大ガンマ線エネルギー測定

本実験以前に UVSOR-III 電子蓄積リングを周回する電子ビームのエネルギーの精密測定は行われてこなかった。この為、イメージング実験への応用に先立ち、1.94 μm ファイバーレーザーを用いて発生可能な最大ガンマ線エネルギーを測定すると共に、電子ビームエネルギーを同定した。

測定には HPGe 検出器を用い、電子ビーム電流 0.6 mA、レーザーパワー 1.2 W の条件下において LCS ガンマ線を発生させ、ガンマ線エネルギースペクトル測定を行った。測定結果を図 3 に示す。この際、HPGe 検出器の較正は自然放射線として存在する ^{40}K ($E=1460.8 \text{ keV}$) と ^{208}Tl (2614.5 keV) を用いた。

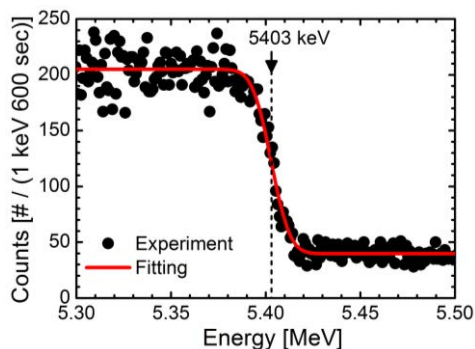


Figure 3: Measured result of maximum energy of scattered gamma-ray.

測定されたガンマ線スペクトルの高エネルギー側エッジを理論曲線、 $f_{\text{fit}}(E) = c_1 \times \text{erfc}\{(E - E_{\text{max},0})/c_2\} + c_3$ [14] にて最少二乗フィッティングする事で、電子ビームのエネルギー幅がゼロであり、検出器のエネルギー分解能がゼロであると仮定した場合のガンマ線の最大エネルギーが $5403 \pm 16 \text{ keV}$ であるという結果が得られた。本実験では、エネルギー 5.4 MeV 近辺に使用可能な較正線源を用意出来なかった事から、エネルギーの測定誤差を 0.3% として解析を行った。また、上記の測定結果より、電子ビームの中心エネルギーは $746 \pm 1 \text{ MeV}$ と同定された。この値は偏向

電磁石の設定値から推定される電子ビームエネルギー (750 MeV) に対して約 0.5% 程度低いエネルギーであった。

3.2 発生ガンマ線フラックス測定

LaBr₃(Ce) シンチレーション検出器を用いて最大電流 (300 mA)、最大レーザーパワー (5 W) の条件下において発生ガンマ線フラックス測定実験を行った。直接ガンマ線ビームを検出器に入射するとイベント数が多すぎて光電子増倍管のゲインが下がってしまい、正確なスペクトルが測定できなかった事から、検出器直前に厚さ 15 cm の鉛アブソーバーを設置し、ガンマ線強度を減衰させてスペクトルを測定した。この際のエネルギー 2~5 MeV ガンマ線の減弱率は約 7×10^{-4} である。

測定により得られたスペクトルを EGS5 [15] でのシミュレーション結果とともに図 4 に示す。EGS5 の計算では、レーザー入射用ミラーや鉛アブソーバー等の実際のジオメトリを考慮に入れて計算を行っている。

発生ガンマ線フラックスを $7.0 \times 10^6 \text{ photons/s}$ とした計算結果はガンマ線エネルギーが 4.8 から 5.4 MeV の領域では良い一致を示した。一方、発生ガンマ線フラックスを $1.1 \times 10^7 \text{ photons/s}$ とした計算結果はガンマ線エネルギーが 2 から 4.8 MeV の領域で良い一致を示した。計算結果を実験結果と比較することで、発生ガンマ線フラックスを約 10^7 photons/s と見積もった。

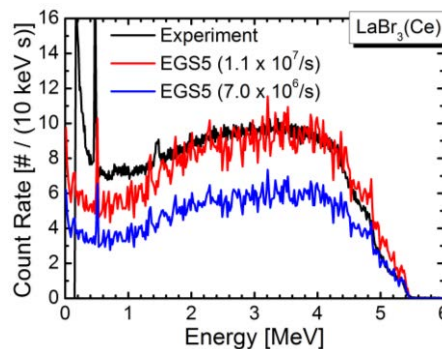


Figure 4: Measured energy spectrum of gamma-ray beam with a Lead Absorber whose thickness was 15 cm (black) and Simulation results with two different total gamma-ray fluxes, 1.1×10^7 (red) and 7×10^6 photons/s (blue).

4. 数値計算によるコリメータ設置時のフラックスとエネルギー幅予測

LCS ガンマ線の最大エネルギーと発生ガンマ線フラックスが得られたので、コリメータ通過後のガンマ線エネルギー幅とフラックスの推定を数値計算により行った。図 5 にコリメータ通過後のガンマ線スペクトルを示す。また、表 3 に各コリメータサイズにおけるコリメータ通過後のフラックスとエネルギー幅を示す。

表 3 から分かる様に、1~3 mm 径のコリメータ設置により、ガンマ線総フラックスは約 1/10 ~ 1/100 程度に減少する。しかし、図 5 に見られるように、コリメータ設置によりカットされるのは主に低エネルギー成分であり、最大エネルギー付近のフラックスは大きくは変化しない。2 mm 径のコリメータを使用した場合、コリメータを通過するガンマ線総数は 4×10^5 photons/s、エネルギー幅は約 2.9% であり、産総研 TERAS で得られていたよりも高い品質を持つガンマ線が発生できていると考えられる。このことから、三次元同位体イメージングの基礎実験を行う事が可能な LCS ガンマ線源の開発に成功したと言える。

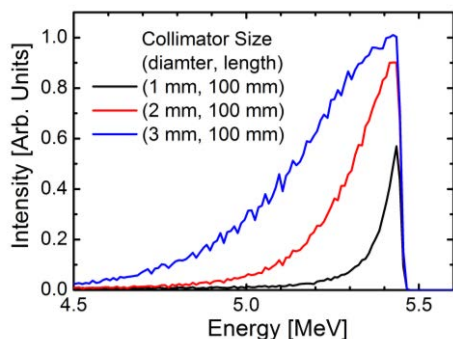


Figure 5: Expected gamma-ray spectra with different hole size of collimators placed 8.5-m downstream from center of straight section.

Table 3: The Expected Gamma-ray Flux and Energy Spread behind Collimator

Hole Size of Collimator [mm]	Flux after Collimator [photons/s]	Energy Spread [%]*
w/o collimator	1×10^7	-
3	8×10^5	5.4
2	4×10^5	2.9
1	9×10^4	1.1

*Calculated in Full Width at Half Maximum (FWHM).

5. まとめ

電子蓄積リング UVSOR-III において波長 1.94 μm のファイバーレーザーを用いた LCS ガンマ線源の開発を行っている。最大ガンマ線エネルギーと総フラックスの測定を行った。最大ガンマ線エネルギーは 5403 ± 16 keV、最大電子ビーム電流・最大レーザーパワーの際に得られるガンマ線総フラックスは約 1×10^7 photons/s であった。これらの情報を元に、コリメータ通過後のガンマ線フラックスとエネルギー幅の推定を数値計算により行った。その結果、2 mm 径のコリメータを用いた場合にガンマ線フラックスは 4×10^5 photons/s、エネルギー幅は約 2.9% であった。産総研 TERAS で得られていたよりも高い品質を持つガンマ線が発生できていると考えられる為、三次元同位体イメージングの基礎実験を行う事が可能な LCS ガンマ線源の開発に成功したと考えられる。

今後は本研究で開発したファイバーレーザーを用いた LCS ガンマ線源を用いて基礎的実験を進めると共に、ファイバーレーザー集光系の導入とその最適化によるフラックス増強を目指す。また、UVSOR-III における蓄積リング自由電子レーザーの立ち上げを行い、それを衝突用レーザーに用いた LCS ガンマ線源の開発を進め、更に高フラックス化を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26289363、24340060 および分子科学研究所協力研究(2014)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] R. Klein et al., Nucl. Instrum. Meth. **A486**, 2002, p.545-551.
- [2] K. Aoki et al., Nucl. Instrum. Meth. **A516**, 2004, p.228-236.
- [3] S. Amano et al., Nucl. Instrum. Meth. **A602**, 2009, p.337-341.
- [4] T. Kaneyasu et al., Nucl. Instrum. Meth. **A659**, 2011, p.30-35.
- [5] K. Kawase et al., Nucl. Instrum. Meth. **A592**, 2008, p.154-161.
- [6] D. Nutarelli et al., Nucl. Instrum. Meth. **A407**, 1998, p.459-463.
- [7] L.N. Litvinenko et al., Nucl. Instrum. Meth. **A507**, 2003, p.527-536.
- [8] M. Hosaka et al., Nucl. Instrum. Meth. **A393**, 1997, p.525-529.
- [9] J. Pruet et al., J. Appl. Phys., **99**, 2006, 123102.
- [10] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Technol. **45**, 2008, p.441-451.
- [11] N. Kikuzawa et al., Appl. Phys. Express **2**, 2009, 036502.
- [12] H. Toyokawa et al., Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 2011, 100209.
- [13] M. Adachi et al., J. Phys.: Conference Series, **45**, 2013, 042013.
- [14] R. Klein et al., Nucl. Instrum. Meth. **A384**, 1997, p.293-298.
- [15] H. Hirayama et al., SLAC Report number: SLAC-R-730 and KEK Report number: 2005-8.