

NewSUBARU LASER COMPTON GAMMA-RAY BEAM SOURCE

*S. Miyamoto^{A)}, K. Horikawa^{A)}, D. Tonaka^{A)}, S. Amano^{A)}, S. Hashimoto^{A)}, T. Mochizuki^{A)}, T. Shizuma^{B)},
T. Hayakawa^{B)}, D. Li^{C)}, K. Imasaki^{C)}, T. Shima^{D)}, H. Utsunomiya^{E)}, H. Akimune^{E)},
T. Yamagata^{E)}, Y. Asano^{F)}, H. Ohkuma^{G)}

^{A)}Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
1-1-2 Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

^{B)}Japan Atomic Energy Agency

8-1 Umemidai, Kizu-tyo, Kyoto 619-0215

^{C)}Institute for Laser Technology

2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

^{D)}Research Center of Nuclear Physics, Osaka University

10-1 Mihogaoka, Ibaragi-shi, Osaka 567-0047

^{E)}Konan University

8-9-1 Okamoto, Higashinada-ku, Kobe, Hyogo 658-8501

^{F)}RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

^{G)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

Abstract

Laser Compton scattering gamma-ray source is developed on BL01 of NewSUBARU synchrotron Radiation facility. Performances and characteristics of the gamma-ray source are studied for user applications. Present status of the source is possible to generate 1.7 to 40 MeV gamma-ray. beam with 5×10^6 photons/s flux. Quasi-monochromatic planer or circular polarized gamma-ray beams are also generated by using collimator.

ニューズバルレーザーCompton ガンマ線ビーム源

1. はじめに

兵庫県立大学ニューズバル (NewSUBARU) 放射光施設^[1, 2]では、放射光利用研究と並行して、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線の発生試験と利用試験を行ってきた^[3, 4]が、2005年度より、専用ガンマ線ビームライン^[5]が稼働し、数MeVから数十MeVのガンマ線を $5 \times 10^6 \gamma/\text{秒}$ のフラックスで定常的に発生・利用できる様になった。コリメーターを用いた準単色ガンマ線のフラックスでは、 $3 \times 10^5 \gamma/\text{秒}$ ($\Delta E/E \approx 5\%$) の発生率である。光核反応を用いた核変換基礎研究^[6, 7]、核物理研究^[8]、ガンマ線元素同定やラジオグラフィなどへの応用のため、利用研究者と協力して、ガンマ線源の評価とビームラインの改良を進めている^[9-12]。

Table.I にニューズバル電子蓄積リングのパラメーターを示す。平日の利用運転では、電子エネルギー1.0GeVまたは、1.5GeVで運転され、電子エネルギー一定でのガンマ線利用が可能である。ま

た、1.0GeV運転の場合は、TopUp運転で、電子エネルギー220mAの一定電流運転ができる。1.5GeV運転では蓄積モードであるため、ガンマ線発生により蓄積寿命が低下する。1.5GeV利用運転中は、入射Ndレーザー強度を1W以下に制限して運転している。

Table 1 : Parameters of NewSUBARU ring

Storage energy	0.5 – 1.5 GeV
TopUp operation	1.0 GeV / 220 mA
Circumference	118.731 m
RF frequency	499.955 MHz
Harmonic number	198
$\Delta E/E$ (1.0/1.5 GeV)	0.047% / 0.072%
Emittance(1.0/1.5 GeV)	37 nmrad / 67 nmrad

Fig.1に、ニューズバル実験ホール (横：東西85 m、縦：南北63m) の蓄積リングおよびビームライン配置を示す。BL01Aがレーザー・コンプトン散乱(LCS)ガンマ線ビームラインである。電子は左側壁

*miyamoto@lasti.u-hyogo.ac.jp

面から入射され、左回りに蓄積される。

Fig.2にBL01A周辺の機器配置を示す。蓄積リングが収納されている遮蔽トンネルの外側にレーザを設置し、トンネル内の固定ミラー、レンズを通して、真空ダクト内へレーザビームを導入する。レーザ光は、真空ダクト内のミラー（放射光を吸収するため、水冷としてある）で曲げられ、電子ビームとの衝突点へ導かれる。レーザアライメントを容易にするために、長直線部反対側（約30m上流側）のビームライン(BL01B)からHeNeレーザを導入して、基準アライメントとしている。LCS用レーザの交換や波長変換を行った場合は、このHeNeレーザにアライメントすることで、粗調をおこなう。最終的には、ガンマ線信号をモニターしながら、ミラーを調整しアライメントを確認する。

収納トンネル内のLCS用レーザの光学系は、可視および近赤外用 (Nd:ωおよび2ω) と遠赤外用 (CO₂レーザ) の2系統設置しており、遠赤外用光学材料はZnSeを用いた。Ndレーザと電子の衝突位置は、長直線部のほぼ中央で、集光レンズより13mの位置である^[12]。CO₂レーザの場合、同じ衝突位置では集光径が大きくなり、電子ビームサイズとのマッチングが悪いため、衝突位置を偏向電磁石

の直前の位置（集光レンズから約6m）とした^[14]。

準単色ガンマ線の利用には、直径3mmおよび6mmのコリメーター（鉛製厚さ100mm）を用いた。コリメーターは、収納トンネル内と遮蔽ハッチ内に設置しており、XYステージによりガンマ線光軸調整ができる。偏極ガンマ線実験のために、それぞれの光学系に偏光子、波長板も導入できる。

Fig.3にガンマ線遮蔽ハッチの外観を示す。最大 $5 \times 10^7 \gamma/\text{秒}$ のガンマ線フラックスを遮蔽するため、周囲を45cmのコンクリートと2cmの鉛で遮蔽している^[5]。またガンマ線ビーム軸方向は、鉛30cm厚さのビームダンプを設置している。安全インターロックはハッチ入り口のスライド・ドアが閉鎖され、施錠されなければメイン・ビームシャッター(MBS)を開くことができないように設定されている。現在、ハッチ内部のサイズは、1100mm^W × 1550mm^D × 1650mm^Hとなっている。ハッチ内で照射実験を行う場合、スペースの関係で計測器の配置が困難な実験がある。実験スペースを拡張するため、Fig.2の右端に示すように、遮蔽ハッチ背面ダンプと壁に取り出し穴を設け、ガンマ線の一部を後方へ引き出し、実験エリアを拡張することを検討している。

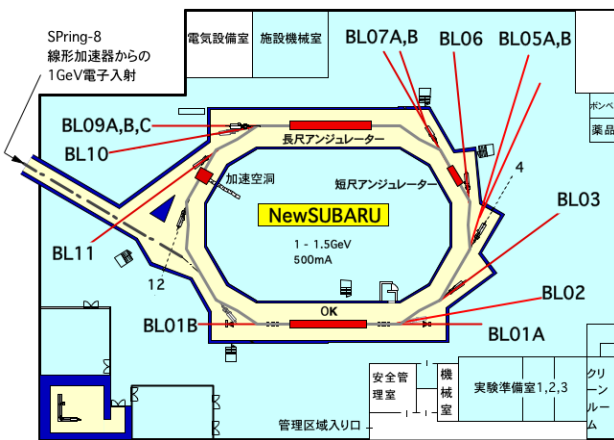


Fig.1. Layout of of NewSUBARU experimental hall.

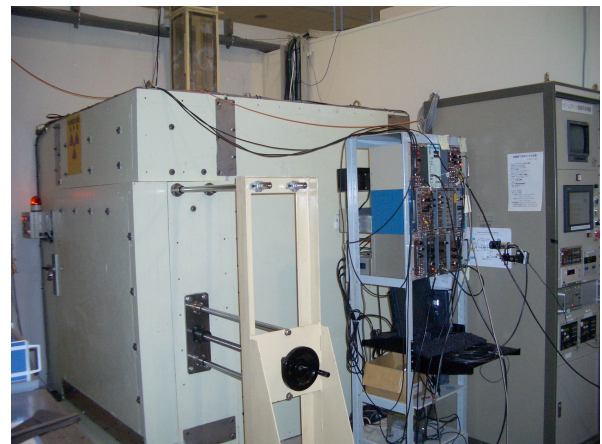


Fig.3. Photograph of present experimental hutch.

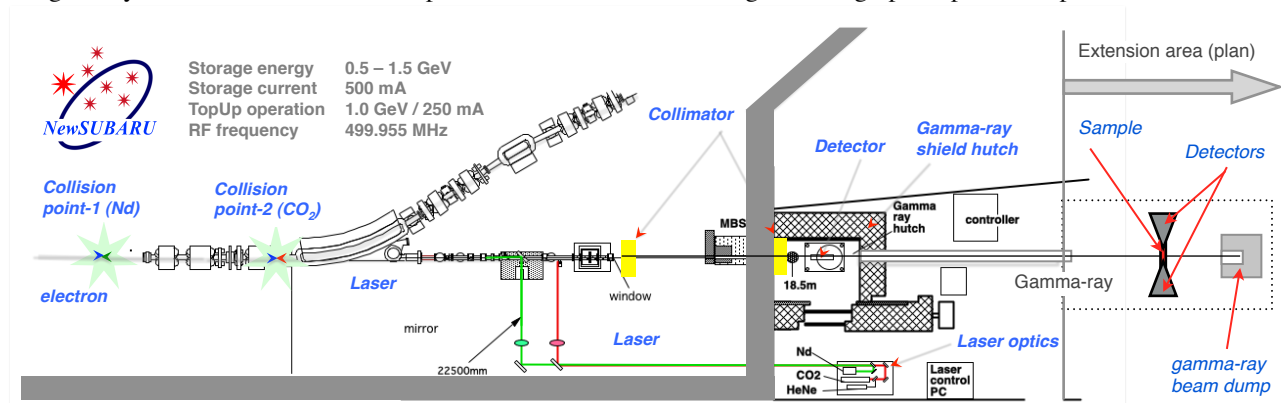


Fig.2. Detail of gamma-ray beamline BL01A and planed extension experimental area.

Table II. Flux and photon energy of present LCS gamma-ray source at NewSUBARU.

Parameter / Lasers	Nd(ω)	Nd(2 ω)	CO ₂	
Laser wavelength λ	1064 nm	532 nm	1054 nm	
Laser power (max) PL	5 W	2 W	10 W	
Gamma-ray energy (no collimator)	Ee= 974 MeV Ee=1470 MeV	6-16.7 MeV 7.6-37.6 MeV	12-33 MeV 15-73 MeV	0.6-1.7 MeV 0.7-3.9 MeV
Yield (no collimator)	Ee= 974 MeV	6000 γ /s/mA/W	3000 γ /s/mA/W	7200 γ /s/mA/W
Gamma-ray energy (3mm ϕ collimator)	Ee= 974 MeV	15.2-16.7 MeV	30-33 MeV	1.5-1.7 MeV
Yield (3mm ϕ collimator)	Ee= 974 MeV	260 γ /s/mA/W	130 γ /s/mA/W	480 γ /s/mA/W

2. ニュースバル・ガンマ線源の特徴

Table II.にニュースバルガンマ線源のフラックスと光子エネルギーを示す。フラックスは電子電流1mA、レーザ出力1Wで規格化した値を示している。たとえば1.0GeVのTopUp運転でガンマ線発生を行う場合は、電流220mA、レーザ出力5Wが可能であるので、利用できるガンマ線フラックスは、表の値の1000倍の光子数となる。

準単色ガンマ線は、鉛コリメーターでガンマ線ビーム軸成分を取り出すことで得ている。Ndレーザの場合、衝突点から約18mに設置したコリメーターにより、 $\Delta E/E=9\%$ (6mm ϕ)および4.5%(3mm ϕ)のエネルギー広がり準単色ガンマ線が得られている。

偏光ガンマ線は、従来のガンマ線源での発生が困難な線源であったが、LCSガンマ線源は、入射レーザの偏光を保存するため、散乱角度を制限してやることで、直線偏光でも、円偏光でも高度に偏光したガンマ線を発生できる。ガンマ線偏光度の定量的計測は、ガンマ線を適当なターゲットに照射し、そこからのコンプトン散乱強度の角度分布を計測して評価することができる。ガンマ線照射ターゲットからのコンプトン散乱ガンマ線のエネルギー $E_{\gamma}^{Scatter}$ は次式で表される。

$$E_{\gamma}^{Scatter} = \frac{E_{\gamma}}{1 + E_{\gamma}(1 - \cos\theta)/m_0c^2} \quad (1)$$

ここで、 E_{γ} は入射ガンマ線の光子エネルギー、 θ は入射ガンマ線進行方向に対して、散乱ガンマ線の散乱角度。例えば、 $\theta=90^\circ$ 散乱では、1.7 MeVのガンマ線では、 $E_{\gamma}^{Scatter} = 390\text{keV}$ となる。

Fig.4(a)に鉛ターゲットからのコンプトン散乱ガンマ線の角度分布計測配置を示す。ここでは、Ge検出器は水平位置に固定して、入射CO₂レーザの偏光面を回すことにより、入射ガンマ線の偏光を変化させて測定した。レーザ偏光角度 $\phi=0^\circ$ が水平偏光に対応する。Fig.4(b)は偏光方向を変化させたときの散乱ガンマ線スペクトルの測定結果で、各スペクトルは、1時間の積算時間で取得している。Ge検出器のエネルギー軸は、鉛の特性X線、K-40の1.46 MeVスペクトルで校正した。Eq.(1)から計算される394 keV付近の比較的幅の広いピークが、鉛からのコンプトン散乱ピークである。このピーク

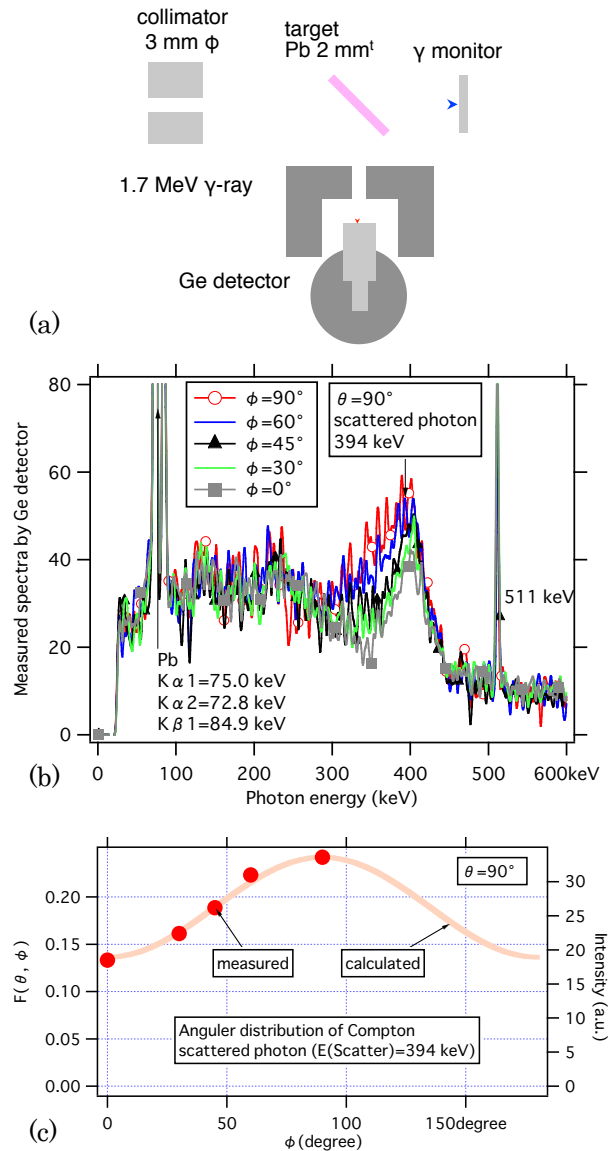


Fig.4. (a) Detector set up of Compton scattering gamma ray from Pb target. (b) Scattered photon spectrum from Pb target irradiated by 1.71 MeV gamma-ray. (c) Polarization dependence of scattered gamma intensity. ϕ is polarization angle respect to Ge detector direction. Measured value (●) is in good agreement with calculated curve assuming 100% polarization.

は、レーザーの偏光面を回転させると、それに従って強度が変化した。Fig.4(c)に偏光を回転させた場合の、散乱強度の計測値(赤丸)と100%偏光を仮定した場合の計算値(曲線)を示す。0°と90°の場合の強度比は、1.8倍で、理論的な入射ガンマ線偏光軸に対する微分散乱断面積の角度依存の評価とほぼ一致している。さらに正確にガンマ線の偏光度を評価するには、入射ガンマ線強度を高くして積算時間を長し、Ge検出器遮蔽を強化した計測が必要と思われる。

3. 電子用電子対生成実験

準単色のレーザーコンプトン散乱ガンマ線を比較的薄いターゲットに照射して、対生成陽電子を発生し、そのスペクトルを測定した例を示す^[13]。準単色入射により、発生する電子対もほぼ対称なスペクトルとなる。

数MeV以上のガンマ線と物質との相互作用は、主にターゲット核フィールドによる電子対生成が主要となる。例えば、Ndレーザー(波長1064nm)と974 MeV電子との散乱で発生する16.7 MeVのガンマ線が金ターゲットに入射した場合、電子対生成が

82%、コンプトン散乱が15%程度で、光電効果は殆どなくなる。

Fig.5 (a)に実験配置を示す。16.7 MeVのコンプトン散乱ガンマ線ビームを鉛コリメーターで直径3 mmの細いビームとし、鉛ターゲット(厚さ0.5 mm、2 mm)に入射し、後方に放射される電子対及び透過ガンマ線を磁場で分離し、イメージングプレート(IP)を用いて計測した。電磁石は、5 cmの長さで、下から上向きに0.1-0.4 Tの磁場を印可した。計測は大気中で行った。ターゲットからIPまでの間の空気との相互作用で電子対生成が起る確率は、2 mm厚さの鉛ターゲット中での相互作用の1/300程度であるため、磁場で偏向された電子対は、ほぼすべてターゲットで発生したと考えてよい。Fig.5 (b)に磁極間の磁束密度を0.2 Tにした場合の、電子陽電子分離像を示す。磁場およびターゲット厚さを変化させた場合の強度分布をFig.5 (c)に示す。磁場による偏向角度から、電子陽電子のピークエネルギーは8 MeV付近で、ピークが磁束密度に依存して移動しているのがわかる。中央のピークは透過ガンマ線による像である。ターゲットの厚さを0.5 mmから、4倍の2 mmにしても、電子・陽電子によるIP上のPLS強度は、1.5倍にとどまっている。これは、8 MeVの電子の鉛中での飛程が4.6 mmであることから、2 mmターゲットの場合は、ターゲット内での電子対吸収が大きいことがわかる。ターゲット入射側表面付近で発生した3 MeV以下の電子は、裏面まで通り抜けずに、ターゲット内で吸収されるため、低エネルギー側のスペクトルは、発生スペクトルからだいぶ変化している。

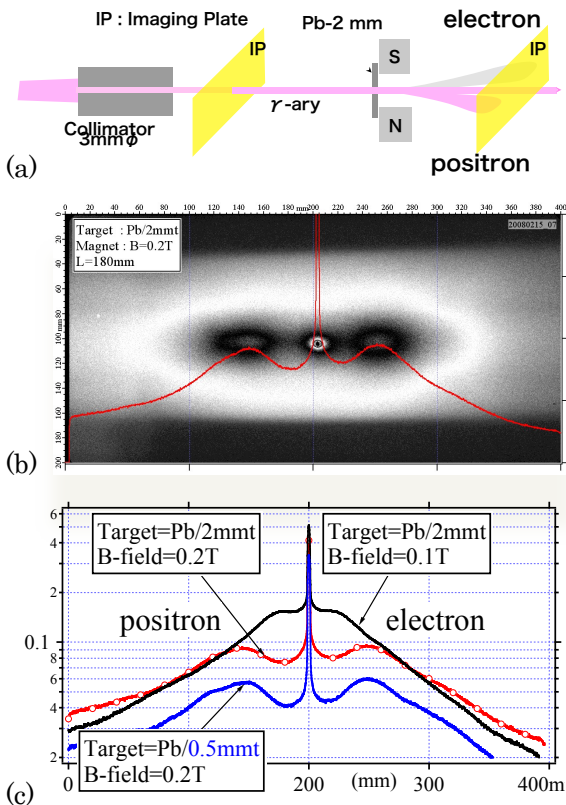


Fig.5. (a) Setup of measurements of electron and positron pair creation from Pb target. (b) Measured image of electron and positron deflected by magnet. (c) Energy spectrum was estimated from deflection length. Peak energy was about 8 MeV.

4. まとめ

上に示した利用以外に、光核反応断面積の計測^[14]、透過イメージングによる物質同定^[15]、逆に放射化法によるガンマ線フラックス計測^[16]、少量の放射性同位体の光核反応断面積の計測など、従来のガンマ線源で困難であった計測や応用が、LCSガンマ線を用いることで可能になった。

参考文献

- [1] A. Ando, et al., "Isochronous Storage Ring of the NewSUBARU Project", *J. Synchrotron Radiation*, **5**, Part 3, pp. 342-344 (1998).
- [2] S. Hashimoto, et al., "Present Status of Synchrotron Radiation Facility 'NewSUBARU'", *Trans. Materials Research Soc. Japan*, **26**, pp. 783-786 (2001).
- [3] K. Aoki et al., "High-energy photon beam production with laser-Compton backscattering", *Nuclear Inst. and Meth. in Phys. Res., A* **516**, pp. 228-236 (2004).
- [4] D. Li et al., "Experiment on gamma-ray generation and application", *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res., A* **528**, pp. 516-519 (2004).
- [5] S. Miyamoto et al., "Laser Compton back-scattering gamma-ray beam-line on NewSUBARU", *Radiation Measurements*, **41**, pp. S179- S185 (2007).

- [6] D. Li et al., "Experiment on Photonuclear Reaction Induced by Laser Compton Scattering Gamma-Ray", J. Nucl. Science Tech., **42**, pp.259-261(2005).
- [7] K. Imasaki et al., "High brightness gamma ray generation for nuclear transmutation", Proceedings of the 12th Int'l Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems, Brussels, Belgium, August 21-26 (2005).
- [8] T. Hayakawa et al., "Half-life of ^{184}Re populated by the (γ, n) reaction from laser Compton scattering γ rays at the electron storage ring NewSUBARU", Phys. Rev. C **74**, 065802 (2006).
- [9] 宮本修治 「レーザー・コンプトン散乱ガンマ線ビームライン - NewSUBARU放射光施設 -」 加速器学会誌「加速器」, **5**, pp.111-116 (2008).
- [10] 宮本修治 他, 「ニューサブアルガンマ線源性能と利用研究」 レーザー学会誌「レーザー研究」, 第**36**巻第12号, pp. 798-805 (2008).
- [11] S. Amano et al., "Several-MeV γ -ray generation in NewSUBARU by laser Compton backscattering", Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res., A, **602**, pp.337-341(2009).
- [12] K. Horikawa et al., "Measurements for the energy and flux of laser Compton scattering γ -ray photons generated in an electron storage ring: NewSUBARU", Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res., A **618**, pp 209-215, (2010).
- [13] D. Li et al., "Positron generation through laser Compton scattering gamma ray", Appl. Phys. Lett., **94**, 091112, (2009).
- [14] Dazhi Li et al., "Iodine Transmutation through Laser Compton Scattering Gamma Rays", J. Nuclear Science and Technology, **46**, pp.831-835(2009).
- [15] S. Amano et al., "レーザーコンプトンガンマ線イメージングによる物質同定", 本年会 WEPS128 (第7回日本加速器学会年会, 姫路, 2010.8.4-6).
- [16] D. Tonaka et al., "放射化法によるコンプトン γ 線源フラックス計測", 本年会 WEPS129 (第7回日本加速器学会年会, 姫路, 2010.8.4-6).
- [17] K. Horikawa et al., "レーザーコンプトン散乱ガンマ線による光核反応の計測", 本年会 THPS107 (第7回日本加速器学会年会, 姫路, 2010.8.4-6).