

蓄積リングレーザー Compton 散乱ガンマ線による利用研究

APPLICATION STUDY BY LASER COMPTON SCATTERING GAMMA-RAY SOURCE ON STORAGE RING

宮本 修治^{#,A)}, 天野 壯^{A)}, 橋本 智^{A)}, 武元 亮頼^{A)}, 山口 将志^{A)}, 小高 拓也^{A)}, 南山 康人^{A)}, 寺澤 倫孝^{A)}
坂井 信彦^{A)}, 小泉 昭久^{B)}, 宇都宮 弘章^{C)}, 山県 民穂^{C)}, 秋宗 秀俊^{C)}, 嶋 達志^{D)}, 高久 圭二^{D)},
早川 岳人^{E)}, 静間 俊行^{E)}, 李大治^{F)}, 井澤 靖和^{F)}, 堀 史説^{G)}, 岩瀬 彰宏^{G)}
浅野 芳裕^{H)}, 大熊 春夫^{I)}

Shuji Miyamoto^{#,A)}, Sho Amano^{A)}, Satoshi Hashimoto^{A)}, Akinori Takemoto^{A)}, Masashi Yamaguchi^{A)},
Takuya Kodaka^{A)}, Yasuto Minamiyama^{A)}, Terasawa Michitaka^{A)}, Nobuhiko Sakai^{A)}, Akihisa Koizumi^{B)}, Hiroaki
Utsunomiya^{C)}, Tamio Yamagata^{C)}, Hidetoshi Akimune^{C)}, Tatsushi Shima^{D)}, Keiji Takahisa^{D)}, Takehito Hayakawa^{E)}
Toshiyuki Shizuma^{E)}, Dazhi Li^{F)}, Yasukazu Izawa^{F)}, Fuminobu Hori^{G)}, Akihiro Iwase^{G)}
Yoshihiro Asano^{H)}, Haruo Ohkuma^{I)}

^{A)} Laboratory of Advanced Science and Technplogy for Industry, University of Hyogo

^{B)} Graduate School of Material Science, University of Hyogo

^{C)} Department of Physics, Konan University

^{D)} Research Center of Nuclear Physics, Osaka University, ^{E)} Japan Atomic Energy Agency

^{F)} Institute for Laser Technology, ^{G)} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

^{H)} RIKEN SPring-8 Center, ^{I)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

Laser Compton scattering gamma-ray beam source has been developed at the NewSUBARU synchrotron light facility. The available maximum Gamma-ray photon energy is 76 MeV. The flux of quasi-monochromatic gamma-ray photons (for 16.7 MeV, $\Delta E/E \square 5\%$) is more than 10^6 photons/sec using a 35 W Nd:YVO₄ laser combined with the 1 GeV storage electron beam with an intensity of 300 mA. We used the electron beams at 0.55 \square 1.47 GeV for changing the energy of quasi-monochromatic gamma-ray beam. Gamma-ray beams were used for application experiments, a nuclear physics research, a nondestructive inspection of thick material, a generation of positron by pair creation, a magnetic Compton scattering measurements, and a nuclear transmutation.

1. はじめに

兵庫県立大学ニュースバル放射光施設^[1]では、放射光利用研究と並行して、2005 年度より専用ガンマ線ビームライン^[2]を用いてレーザー・コンプトン散乱(LCS)ガンマ線の発生試験と利用実験を行ってきた^[3-14]。現在、放射光施設の運転・利用と同時に、1-MeV から 76-MeV の準単色ガンマ線を安定に発生でき、最大パワー0.33-mW のガンマ線ビームが利用可能である。

このようなガンマ線ビーム源の利用研究を推進するために、(1)ガンマ線による蓄積電子ビームエネルギーの校正、(2)陽電子による材料ボイド欠陥の非破壊検査、(3)ガンマ線磁気コンプトン散乱試験を行った。

(1)では、入射レーザーに CO₂ レーザーを用いて、電子ビームエネルギー公称値を $E_0=550\sim 974$ -MeV に変化させた時に発生す低エネルギー領域の LCS ガンマ線を、HP-Ge 検出器で測定し、放射性同位体から発生する、同じエネルギー帯のガンマ線チェックソースと比較することで、電子エネルギーを高精度に評価した^[15]。(2)では、Nd レーザーと 1-GeV 電子

[#] miyamoto@lasti.u-hyogo.ac.jp

により、17-MeV 領域の γ 線ビームを発生し、鉛ターゲットで、効率よく対生成陽電子を発生させた。磁場で高速陽電子を切り出し非破壊検査試料に照射し、対消滅ガンマ線スペクトルから、試料のボイド欠陥を評価した。欠陥が多い疲労金属試料では欠陥が少ない試料に比べて、ガンマ線スペクトルが狭くなることから、材料ボイド欠陥が評価できる。(3)は、CO₂ レーザーを用い、1/4 波長板でレーザーの左右円偏光を切り替えることにより、ガンマ線のスピ

Table 1: Parameters of NewSUBARU Ring

Storage energy	0.55 – 1.47 GeV
TopUp operation	0.974 GeV / 300 mA
Circumference	118.731 m
RF frequency	499.955 MHz
Harmonic number	198
$\Delta E/E$ (1.0/1.5 GeV)	0.05% / 0.07%
Emittance(1.0/1.5 GeV)	40 nmrad / 70 nmrad

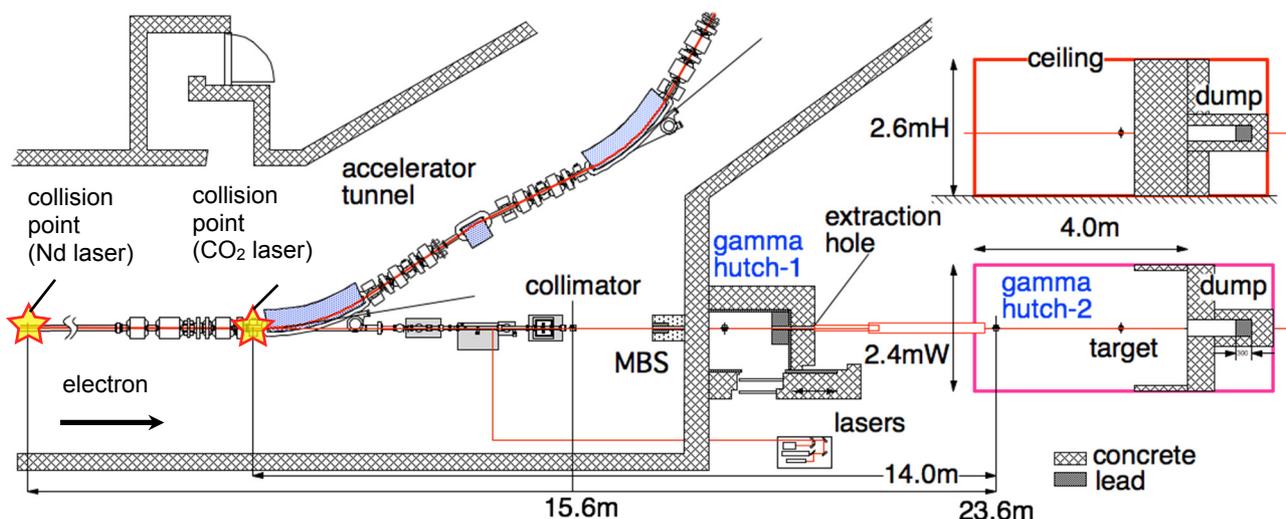


Figure 1: Layout of gamma-ray beamline BL01. Part of electron storage ring in the shielding tunnel is shown, and gamma-ray irradiation hutch-1 and hutch-2 are shown.

ン偏極を切り替えることができる。スピン偏極ガンマ線と電子とのコンプトン散乱強度が、電子スピン方向に依存するため、試料の電子スピンを直接測定でき、磁化評価手法として試験した。

Table 1にはニューズバル電子蓄積リングのパラメーターを示す。通常運転モードは、電子エネルギー1-GeVのTopUpモード(公称電子エネルギー974-MeV)と、電子蓄積後、電子を1.5-GeVまで加速する高エネルギー蓄積モード(公称電子エネルギー1.47-GeV)が、週間スケジュールされている。電子エネルギーは、0.55-GeVから1.47-GeVの範囲で変更可能であるが、標準エネルギー以外での運転は、特別スケジュールに限られる。

2. ガンマ線源と電子エネルギー評価

Fig.1に、ニューズバル放射光施設実験ホールの南東部に設置している、レーザ・コンプトン散乱ガンマ線ビームラインBL01の配置を示す。加速器収納トンネル内の電子蓄積リングの一部も示している。電子は蓄積リングを左回りに蓄積される。ガン

マ線実験ハッチは2箇所あり、加速器収納トンネルに隣接して、コンクリート壁で囲まれた”Gamma hutch-1”と、この実験ハッチ右側のガンマ線ダンプ(鉛30cm厚+コンクリート45cm厚)にガンマ線通過孔をあけ、その後方でガンマ線照射可能な”Gamma hutch-2”である。ハッチ1のみでガンマ線照射利用も可能であるが、コリメーターハッチとして利用することで、ハッチ2での計測のバックグラウンド・ノイズを低減できる。コリメーターは、XYθステージによりガンマ線光軸とのアライメント調整を行うことができる。

ガンマ線発生に使用するレーザ光は、加速器収納トンネル壁面の開口を通して、トンネル内の固定ミラーへ導かれ、集光レンズを介して、真空ダクト内のミラーにより、電子ビームとの散乱点まで導入される。準単色ガンマ線の利用には、直径1mmから6mmのコリメーター(鉛製厚さ100mm)を用いた。鉛コリメーターでビーム軸成分のみを取り出すことで準単色とすることができる。Table 2に、使用している主なレーザと、対応するガンマ線エネルギーおよび利用可能なフラックスを示す。

Table 2: Expected Gamma-ray Energy and Flux of NewSUBARU LCS Gamma-ray Source

Parameter / Lasers	Nd(ω)	Nd(2 ω)	Er	CO ₂	
Laser wavelength λ	1064 nm	532 nm	1540 nm	10592 nm	
Laser power (max) PL	35 W	20 W	4 W	7.5 W	
Gamma-ray energy (no collimator)	Ee= 974 MeV Ee=1470 MeV	5-16.7 MeV 8-37.6 MeV	10-33.4 MeV 15-73 MeV	3.5-11.5 MeV 5-25.7 MeV	0.5-1.7 MeV 0.7-3.9 MeV
Yield (no collimator)	Ee= 974	6000 γ /s/mA/W	3000 γ /s/mA/W	7000 γ /s/mA/W	7200 γ /s/mA/W
Gamma-ray energy (3mm ϕ collimator)	Ee= 974 MeV	15.4-16.7 MeV	30.5-33.3 MeV	10.6-11.5 MeV	1.57-1.7 MeV
Yield Ee= 974 MeV (3mm ϕ collimator)	I=250 mA	2×10^6 γ /s	6×10^5 γ /s	3×10^5 γ /s	1×10^6 γ /s



Figure 2: Experimental setup of LCS gamma-ray spectra measurements at GACKO, gamma-ray irradiation hutch 2 at NewSUBARU.

準単色ガンマ線のエネルギー幅は、Nd レーザの場合、衝突点から約 15.6m に設置したコリメーターにより、 $\Delta E/E=10\%$ (6mm ϕ)および 5%(3mm ϕ)程度の広がりとなっている。

ガンマ線利用における光核反応断面積計測で、反応のエネルギー閾値の計測が必要な核物理研究利用では、正確なガンマ線エネルギーが必用である。4MeV 程度までの低エネルギーガンマ線に対しては、検出器のエネルギー校正を行うための標準線源として、放射性同位体チェックソースが利用できる。しかしながら、10MeV を超えるガンマ線エネルギー領域では、利用できる標準線源がない。この

ため、電子蓄積リングの電子エネルギーが高い安定性を持つことを利用して、高エネルギーLCS ガンマ線を標準とする手法を試験した。これは、安定な長波長 CO₂ レーザと電子との散乱により、1~4-MeV のガンマ線を発生し、放射性同位体チェックソースでそのエネルギーを正確に同定し、蓄積リングの電子エネルギーを高精度で評価する手法である。この手法で求めた電子エネルギーと、短波長レーザの波長から、高いエネルギー領域のガンマ線エネルギーも高精度に評価が可能となった。

Fig.2(a)に、蓄積リングの公称電子エネルギー 800MeV で、CO₂ レーザを散乱させた場合のガンマ線を HP-Ge 検出器で計測した信号例を示す。コリメーターは直径 1mm のものを用いて準単色化している。全エネルギーピークがはっきり見えており、スペクトル広がりには 3%程度である。LCS ガンマ線の最大エネルギーエッジは、自然放射性元素 ⁴⁰K も含めた放射性同位体線源 ⁶⁰Co, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu を用い、シミュレーションも援用して求めた。このガンマ線エネルギーから逆算して、蓄積電子エネルギーの絶対値を評価した。

Fig.2(b)に、上記手法で評価した電子エネルギー E_e と、加速器制御で用いている公称電子エネルギー E_n の差 $\Delta E = E_e - E_n$ を、公称電子エネルギー E_n の関数として表した結果を示す。データ点 (●) を 4 次関数でフィットすることで、ニュースバル電子ビームエネルギーに関して以下の関数が得られている。

$$\Delta E = -4.6949 \times 10^{-10}(E_n)^4 + 1.3017 \times 10^{-6}(E_n)^3 - 1.3596 \times 10^{-3}(E_n)^2 + 0.63854(E_n) - 103.94 \quad (1)$$

3. LCS ガンマ線ビーム源利用研究

ガンマ線利用実験として、陽電子による材料ボイド欠陥の非破壊検査と、ガンマ線領域の磁気コンプトン散乱試験を行なった。

陽電子の利用には、1GeV 電子と Nd レーザ(波長 1064nm) を用いた。直径 6mm のコリメーターを通して、10%程度のエネルギー広がり 16.7MeV ガンマ線を対生成ターゲット(鉛)に照射した。このエネルギー領域では、ガンマ線と鉛の相互作用は対生成が 70%程度となるが、厚いターゲットを用いると、

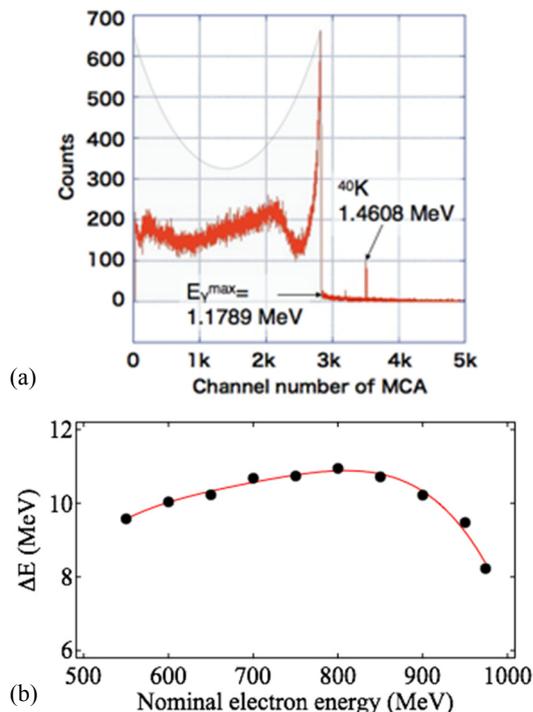


Figure 3: (a) A measured γ -ray energy signal with a HP-Ge detector. A 800 MeV nominal energy electron beam and a CO₂ laser are used. The diameter of the collimator used is 1 mm. (b) The difference ΔE of the calibrated energy E_e from the nominal energy E_n of the electron beam, $\Delta E = E_e - E_n$, at the NewSUBARU storage ring.

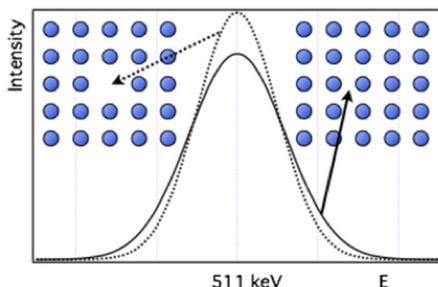


Figure 4: Schematic of annihilation gamma-ray spectra. The spectrum becomes narrow when the positron annihilates in the material having many void defects.

陽電子の取り出しが困難になるため、3mm程度の厚さの鉛ターゲットを用いた。この場合、入射ガンマ線フラックスに対する陽電子取り出し効率は3%程度と計算される。対生成後、入射ガンマ線進行方向に射出する電子陽電子対を、磁場で分離し陽電子を物性評価用試料に入射する。物質中での陽電子は、空孔欠陥に集まりやすく、その周辺で電子と対消滅する。その時発生する511keV消滅ガンマ線は、電子のエネルギーによりドブラーシフトするため、周辺電子の情報を得ることができる。具体的には、空孔近傍で消滅する場合、原子の外殻電子と対消滅する確率が高くなり、ドブラーシフトは低くなり、狭いスペクトルとなる。このスペクトル幅パラメータを用いて、金属疲労試験片試料で試すと、疲労の種類にも依存するが、疲労度合いのパラメータとして利用できることがわかった。従来低エネルギーの陽電子利用が中心であったが、LCSガンマ線からの高エネルギー陽電子を用いることで、物質内部の状態評価が可能となる。今後データを集積する必要がある。

円偏光レーザーを用いることで、円偏光（スピン偏極）ガンマ線を利用することができる。ガンマ線スピンと電子スピンの向きにより、コンプトン散乱強度が異なる。この差を検出して、試料の電子スピン磁化だけを分離して計測することができる。これが磁気コンプトン散乱の応用の一つである。鉄を磁化させると、4d軌道の電子スピンの磁場方向を向き、これに左右円偏光ガンマ線を照射した時に散乱されるガンマ線強度を測定した。CO₂レーザーを用いた、1.7MeVガンマ線では、4%程度の散乱強度差を観測でき、ほぼ理論予想通りであった。物性評価には、この4%の散乱強度差を、1/100程度以上の精度で計測する必要があり、レーザー偏光の安定性もふくめ、今後この高精度化を目的とした試験を行う。

4. まとめ

ニュースバルLCSガンマ線ビーム源では、数種類の波長の異なるレーザーを組み合わせることで、1.7-MeVから76-MeVの間で、いくつかのエネルギー領域のガンマ線ビームを利用できる。また、新たに電

子エネルギーを高精度で評価できたことで、ガンマ線利用実験に於けるガンマ線エネルギー評価精度を向上できた。利用実験では、高効率対生成による高エネルギー陽電子を発生でき、これを物性評価に用いる試験を実施した。円偏光ガンマ線の磁気物性評価のための、磁気コンプトン散乱試験もデータ取得できた。物性研究にはさらなる計測精度の改善が必要である。

参考文献

- [1] 宮本 修治 他, "ニュースバル放射光施設の現状", 本年会プロシーディングス, FSP018 第 11 回日本加速器学会年会, リンクステーションホール青森, 8 月 9-10 日 (2014).
- [2] S.Miyamoto et al., "Laser Compton back-scattering gamma-ray beam-line on NewSUBARU", Radiation Measurements, **41**, pp. S179- S185 (2007).
- [3] D.Li, S.Miyamoto et al., "Experiment on Photonuclear Reaction Induced by Laser Compton Scattering Gamma-Ray", J. Nucl. Science & Tech., vol.42, pp.259-261(2005).
- [4] T. Hayakawa, S. Miyamoto et al., "Half-life of ¹⁸⁴Re populated by the (γ , n) reaction from laser Compton scattering γ rays at the electron storage ring NewSUBARU", Phys. Rev. C **74**, 065802 (2006).
- [5] 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).
- [6] S.Miyamoto, "Laser Compton Gamma-ray Generation", ICFA Panel on Advanced and Novel Accelerators Newsletter, pp.17-22 (2009).
- [7] S.Amano, S.Miyamoto et al., "Several-MeV γ -ray generation in NewSUBARU by laser Compton backscattering", Nuclear Instrum. Methods in Phys. Res. **A602**, pp. 337-341 (2009).
- [8] D. Li, S. Miyamoto et al., "Positron generation through laser Compton scattering gamma ray", Appl. Phys. Lett., **94**, 091112 (2009).
- [9] K.Horikawa, S.Miyamoto, et al., "Measurements for the energy and flux of laser Compton scattering γ -ray photons generated in an electron storage ring: NewSUBARU", Nuclear Instrum. Methods in Phys. Res. **A618**, pp 209-215, (2010).
- [10] T.Kondo, S.Miyamoto et al., "Determination of the number of pulsed laser-Compton scattering photons", Nuclear Instrum. Methods in Phys. Res. **A659**, pp.462-466 (2011).
- [11] H.Ejiri, S.Miyamoto, et al., "Resonant Photonuclear Reactions for Isotope Transmutation", J. Phys. Soc. Japan, **80**, pp.094202-1-6 (2011).
- [12] K.Horikawa, S.Miyamoto et al., "Photonuclear Reaction of Iodine-129 with Laser-Compton Scattering Gamma-Rays Using Nd:YVO₄ Laser and Electron Storage Ring", Rev. of Laser Engineering, **39**, No.6, pp.445-447 (2011).
- [13] 宮本修治 "レーザーコンプトン散乱ガンマ線ビーム技術開発と応用", レーザー研究, **41**, pp.917-921 (2013).
- [14] Y.Asano, S.Miyamoto and LEPS-II Collaboration, "Shielding design of laser electron photon beamlines at SPring-8", Progress in Nuclear Science and Technology, **4**, pp.252-256 (2014).
- [15] H.Utsunomiya, S.Miyamoto et al., "Energy Calibration of the NewSUBARU Storage Ring for Laser Compton-Scattering Gamma Rays and Applications", IEEE Transactions on Nuclear Science, **61**, pp.1252-1258 (2014).