

解 説

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—

宮本 修治*

Laser Compton Scattering Gamma-ray Beam Line on NewSUBARU Synchrotron Radiation Facility

Shuji MIYAMOTO*

Abstract

Laser Compton gamma ray beam line on New SUBARU supplies quasi-monochromatic, polarized high energy photon beam. World highest class gamma-ray flux of more than 10^6 photons/s is generated at photon energy range of 2 to 40 MeV.

1. はじめに

兵庫県立大学ニュースバル (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³⁻⁵⁾が、2005年度より、専用ガンマ線ビームライン⁶⁾が稼働し、数 MeV から数十 MeV のガンマ線を 5×10^6 γ /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、 5×10^5 γ /秒 ($\Delta E/E < 10\%$) の発生率である。光核反応を用いた核変換基礎研究^{7,8)}、核物理研究⁹⁾、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。

レーザー・コンプトン散乱ガンマ線源の研究は、レーザー発明直後から、世界各地の電子蓄積リングを持つ加速器研究所で試験された^{10,11)}。初期には、宇宙の星間光による高エネルギー電子の減速機構の実証として検討されたが、レーザー出力の向上とともに、ガンマ線源として他の光源には無い特徴が注目され始めた。さらに放射光施設など電子蓄積リングの高性能化と利用施設の充実により、高エネルギー光子の発生と利用が図られるようになった¹²⁾。大型放射光施設 SPring-8 (8

GeV 電子蓄積リング) では、レーザー電子光 (LEP) と呼ばれる、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線ビームライン (BL33LEP) が建設され、エネルギーを高精度で同定した 2 GeV を超える偏極光子を発生して、ハドロン・核物理研究に利用している^{13,14)}。

本稿で紹介するニュースバル放射光施設におけるガンマ線ビームラインと同様な、電子蓄積リングを用いたガンマ線源で、定常的に MeV エネルギーのガンマ線を発生している光源は、現在世界に 3 台稼働していると思われる。産業技術総合研究所の TERAS と、米国 Duke 大学の HIGS ガンマ線源である。産業技術総合研究所では、比較的早い 1980 年代末から蓄積リング TERAS (200–800 MeV) と外部レーザーを用いたレーザー・コンプトン散乱ガンマ線源の研究が始められた。ガンマ線源研究だけでなく、定常的にガンマ線を発生できる「ガンマ線利用光源」(1–40 MeV) の開発努力がなされ、核物理研究やガンマ線非破壊検査などガンマ線応用研究を積極的に推進し、現在もガンマ線光源開発と応用研究において成果を上げている^{15–18)}。Duke 大学の、HIGS 施設^{19,20)}は、電子エネルギー 0.2–1.2 GeV の蓄積リングにより発生した自由電子レーザー¹⁶⁾の波長可変性と、レーザー共振器内の高い光子密度を利用して、ガンマ線エネルギー可変 (2–50 MeV) で、高フラックス (10^6 – 10^7 γ /s) ガンマ

* 兵庫県立大学高度産業科学技術研究所
Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
(E-mail: miyamoto@lasti.u-hyogo.ac.jp)

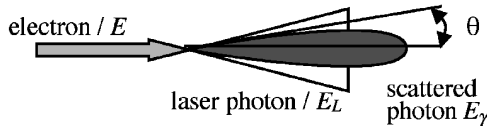


図1 正面衝突の場合のレーザー・コンプトン散乱の配置

線源を実現している。

2. コンプトン散乱光源

コンプトン散乱光源の特徴を明確にするために、電子エネルギーとレーザー光子エネルギー、および散乱動力学から決まるガンマ線スペクトルの角度分布をもとに、加速器パラメータの違いによる、光源特性の比較を行う。

図1のように、高エネルギー電子ビームに対して、正面からレーザー光ビームを入射して、レーザー光子が電子進行方向にコンプトン散乱する配置を考える。電子ビームバンチの診断等^{21,22)}では、レーザービームを90度方向から入射する場合もあるが、ここでは、散乱光子を光源とする応用を想定して、電子ビームに対して、正面衝突させる配置を考える。この場合、散乱光子エネルギーと散乱角度の関係は、次式で表される。

$$E_\gamma(\theta) = \frac{4E_L\gamma^2/(1+R)}{1+\gamma^2\theta^2/(1+R)} \quad (1)$$

ここで、 $\gamma = E/mc^2$ はローレンツ係数、 E は電子エネルギー、 mc^2 は電子の静止エネルギー、 E_L はレーザー光子エネルギー、 θ は電子ビーム進行方向に対する散乱光子の射出角度、 $R = 4E_L\gamma/mc^2$ は散乱光子の電子に対する反跳効果である。

図2にこの関係を図示する。散乱角度で、 $1/\gamma$ 程度の範囲に高いエネルギーの散乱光子が集中することがわかる。数値例としては、エネルギー1 GeVの電子ビームに対して、Nd レーザ（波長1064 nm）を入射した場合、軸上（散乱角度 $\theta = 0$ ）には、 $E_\gamma = 17.5$ MeVのガンマ線が発生する。エネルギー分布の角度広がり、だいたい、 $\theta_{1/2} = 1/\gamma = 0.5$ mradとなる。一方、ガンマ線フラックスの幅も $1/\gamma$ となり、大半の散乱光子が、半値角0.5 mradに含まれることになる。この放射分布は、散乱粒子である電子の座標系から、実験室系へのローレンツ変換で決まるため、シンクロトロン放射光が電子軌道前方に集中して高輝度な放射となる状態と同様である。散乱中心軸にガンマ線コリメーターを設置することで、エネルギー広がり比較的小さい準単色ガンマ線源として利用することができる。先ほどの数値例では、コリメーターで散乱光

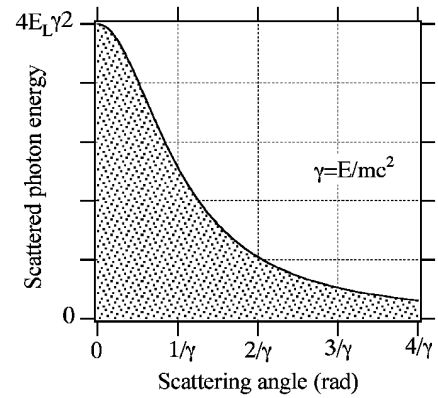


図2 散乱ガンマ線エネルギーの散乱角度依存性。電子ビームエネルギー $E = \gamma mc^2$ 、入射レーザー光子エネルギー E_L の場合の、散乱光子エネルギーの散乱角度分布。

子ビーム軸を0.15 mrad程度切り出す（散乱点から20 mの位置で、直径3 mmのコリメーターに対応）ことで、理想的にはエネルギー広がり2%のガンマ線ビームが得られる。実際には、散乱点での電子ビームの角度広がり依存して、エネルギー広がりが増加する。

また、上記パラメータ領域では、散乱の全断面積は、ほぼ Thomson 散乱の断面積できまり、

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_0^2 = 0.665 \text{ barn} \quad (2)$$

程度である。ここで、 $r_0 = e^2/mc^2$ は電子の古典半径。コンプトン散乱断面積の量子力学的取り扱い、Klein-Nishinaの式で計算され、散乱光子エネルギーに関する微分散乱断面積は以下ようになる²³⁾。

$$\frac{d\sigma}{dE_\gamma} = \frac{\pi r_0}{2} \frac{m^2 c^4}{E_L E} \left[\frac{m^4 c^8}{4E_L^2 E^2} \left(\frac{E_\gamma(\theta)}{E - E_\gamma(\theta)} \right)^2 - \frac{m^2 c^4}{E_L E} \times \frac{E_\gamma(\theta)}{E - E_\gamma(\theta)} \right] + \frac{\pi r_0}{2} \frac{m^2 c^4}{E_L E} \left[\frac{E - E_\gamma(\theta)}{E} + \frac{E}{E - E_\gamma(\theta)} \right] \quad (3)$$

一方発生した散乱光子と物質との相互作用は、光子エネルギーによって、大きく3つの領域に分けられる。図3に、鉛ターゲットを例に、光子と物質の相互作用機構の、エネルギー依存性を示す。) おおむね500 keV以下の領域では、光電効果が主要な相互作用で、原子に束縛された電子を励起することで、物質が光子エネルギーを吸収する。光電効果は光子エネルギーとともにその断面積は減少し、) 2-5 MeVの

光子エネルギーの全断面積が最も小さい領域になる。ここでは、電子対生成確率もまだ小さく、コンプトン散乱による光子エネルギー吸収が主要となる。さらに光子エネルギーが上昇すると、コンプトン散乱断面積も減少するが、原子核フィールドによる電子対生成確率が增大し、主要な反応機構となる。また、ターゲット核の質量数に依存するが、10–20 MeV の光子エネルギー領域は、光核反応断面積の広い大きな反応断面積（巨大共鳴）領域があり、 (γ, n) 反応や $(\gamma, 2n)$ 反応も数%の確率で起る。

以下の3種の加速器（およびその代表的パラメータ）について、レーザー・コンプトン散乱光源を構成した場合の特徴を表1に比較する。(A)電子エネルギー10–100 MeV のSバンド線形加速器の場合、加速器のサイズは10 m程度。電子パルスの特徴は、マイクロ(2856 MHz)・マクロ(10 μ s/60 Hz)構造の10 psバンチで構成され、マクロ平均電流0.1 A、全時間平均電流は10 μ A。(B)電子エネルギー0.5–2 GeV の中型

電子蓄積リングの場合、周長100 m。電子パルスの特徴は、バンチ幅100 ps, RF周波数500 MHzで、バンチ間隔2 nsec, 平均電流0.1 A。(C)電子エネルギー5–10 GeV の第3世代放射光源電子蓄積リングの場合、周長1500 m。電子パルスの特徴は、バンチ幅100 ps, RF周波数500 MHzで、バンチ間隔2 nsec, 平均電流0.1 A。

3. ニュースバル・ガンマ線ビームライン

図4にニュースバル放射光施設の概要と、ガンマ線ビームラインの概略を示す。ニュースバルは1から1.5 GeVの電子エネルギーで運転する放射光施設で、周長約120 mの電子蓄積リングを持つ。SPring-8大型放射光施設内に兵庫県立大学が建設し、SPring-8の1 GeV電子入射器から電子の供給を受けている。1 GeV運転では、200–250 mAでTopUp（随時入射一定電流運転）が可能で、1.5 GeVモードでは、350 mA程度蓄積後電流減衰モードでの運転となる。現在、軟X線ビームラインを主に、偏向電磁石ビームライン(BL)が5本、アンジュレータービームラインが3本稼働している。本年末には、さらに材料分析用ビームライン(BL05)が供用開始の予定である。レーザーコンプトンガンマ線ビームラインは、BL01で、図4の様に、15 mの長直線部下流に設置されている。蓄積リング収納トンネルの外部に設置したレーザーを長直線部下流から蓄積リング内へ導入して、直線部で電子と正面衝突をさせる。発生するガンマ線は、収納トンネル外部に設置したガンマ線シールドハッチ内へ導き、計測および照射実験を行う。ガンマ線の計測には、NaI(3")シンチレーター、GSO(Ce添加Gd₂SiO₅単結晶、72×72×180 mm)シンチレーターおよびGe検出器(64 ϕ ×60 mm, ORTEC社GMX45)を用いた。

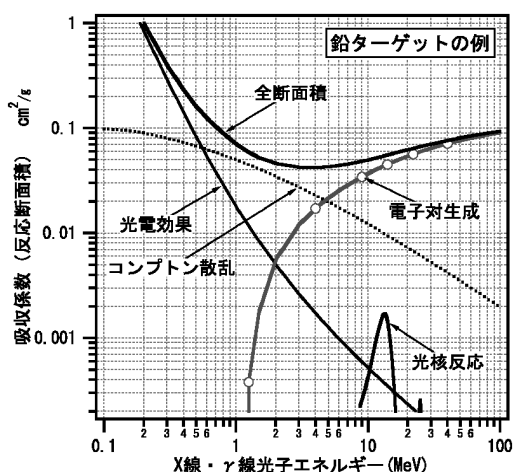


図3 光子の物質による吸収断面積

表1 3種の加速器による、レーザー・コンプトン散乱光源の特徴

加速器	レーザー波長/出力=1 μ m/1 W 光子エネルギー/フラックス/ 角度広がり ($2/\gamma$)	特徴
(A) 小型線形加速器 E=20 MeV ($\gamma=40$) 平均電流 10 μ A	8 keV/10 ² 光子/s 50 mrad/ ϕ 50 mm@1 m	コンパクト X線光源。原子と相互作用。 レーザー出力を増大して、高いフラックス発生。 スーパーキャビティ。多重反射ミラー。
(B) 中型電子蓄積リング E=1 GeV ($\gamma=2000$) 平均電流 100 mA	17 MeV/10 ⁶ 光子/s 1 mrad/ ϕ 20 mm@20 m	準単色 MeV ガンマ線源。原子核と相互作用。 蓄積電子損失で、発生フラックス制限される。 高平均光子出力。適度な発散角で準単色、偏極光源。
(C) 大型電子蓄積リング E=8 GeV ($\gamma=16000$) 平均電流 100 mA	1 GeV/10 ⁶ 光子/s 60 μ rad/ ϕ 6 mm@100 m	高い光子エネルギー。原子核/素粒子と相互作用。 損失電子エネルギー計測。 狭い発散角。広帯域スペクトルとして利用。

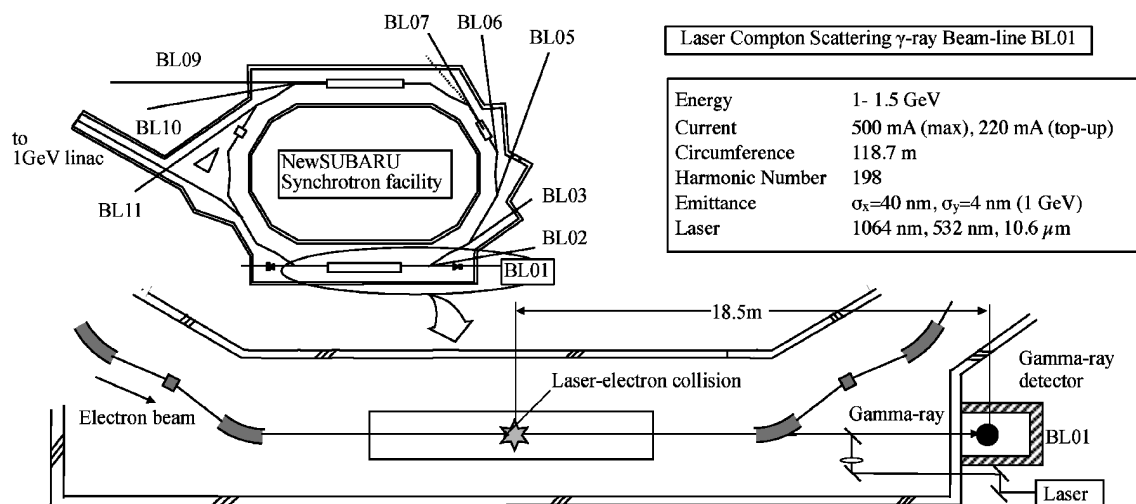


図4 兵庫県立大学ニュースバル放射光施設の概要と、ガンマ線ビームライン BL01 模式図。大型放射光施設 (Spring-8) の 1 GeV 線形加速器から電子を入射し、周長約 120 m の蓄積リングで、放射光利用研究を行っている。南側長直線部のビームライン 1 番 (BL01) がガンマ線ビームライン。

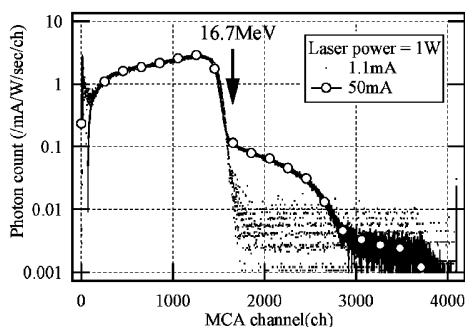


図5 GSO シンチレータによるガンマ波高値分布計測例

図5に、コリメーターなしで、GSO シンチレータを用いて計測したガンマ線の波高分布例を示す。計測条件は、電子エネルギー 976 MeV、レーザー波長/パワー 1064 nm/1 W、電子電流は 1.1 mA と 50 mA、多重波高分布計測器 (MCA) での積算時間は 600 sec である。縦軸は、mA/W/s/ch で規格化してある。横軸はガンマ線エネルギーに対応し、Y-88 γ 線源で較正した値は、1640 ch が約 16.7 MeV である。スペクトルに、検出器の応答関数を含んでいるため、ガンマ線スペクトルそのものではない。正確なエネルギーは大型の検出器を用い検出器応答シミュレーションとの比較で評価する必要がある。

図5において、低エネルギー側では、電子電流変化に対して、規格化スペクトルは良く一致している。一方 16.7 MeV より高エネルギー部分で、電流が多くなると、スペクトルの膨らみが観測されている。この計

測の条件である、電子エネルギー 976 MeV およびレーザー波長 1064 nm から計算されるコンプトン散乱ガンマ線の最大エネルギーは (式(1)より) 16.7 MeV となる。50 mA での計測で現れる最大エネルギー以上の信号は、検出器に同時に 2 光子以上が入射した和スペクトルと考えられる。

GSO シンチレータ検出器の 17 MeV 近傍のガンマ線検出効率シミュレーション²⁴⁾によると 98% 程度であるため、計測されたガンマ線スペクトルを積分することで、全ガンマ線フラックスを求めることができる。このとき、最大エネルギー以上の和スペクトルの部分は、2 光子入射と仮定して、2 倍して積分した。

ビーム電流を変化させた時のガンマ線光子積分フラックスを、ビーム電流値に対してプロットしたものを図6に示す。レーザーパワー 1 W、コリメーターなしで、電流のみ変化させた結果である。電流に関してはよい直線性を示し、電流の増加による電子ビームのパラメーター変化は少なく、ガンマ線発生に影響しないと言える。

レーザーアライメントによるガンマ線発生量の最適化を図るため、散乱相互作用軌道中での電子ビームサイズの変化を考慮して、レーザー集光位置を調整した。ガンマ線ハッチでのフラックスを最大とする、レーザー集光条件は、図7の状態であった。ここで、 σ_x 、および σ_y は、水平および垂直方向の電子ビーム RMS 半径分布である。相互作用領域中央で、それぞれ、0.3 mm, 0.2 mm となっている。これに対して、レーザー集光 (図6の点線) を中央より約 2 m ほど手前に調

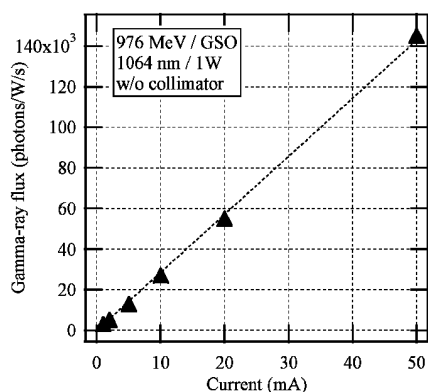


図6 計測ガンマ線フラックスの電子ビーム電流依存性

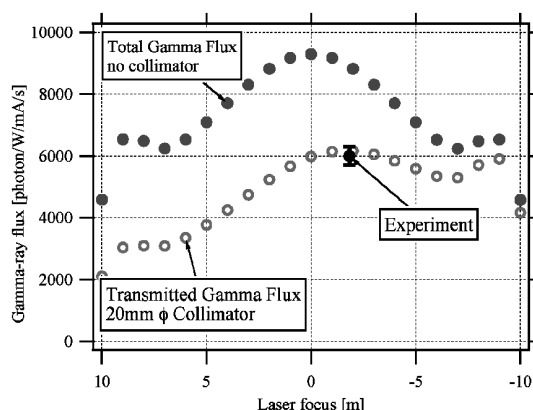


図8 レーザ集光位置を変化させた場合の、観測ガンマ線フラックス変化

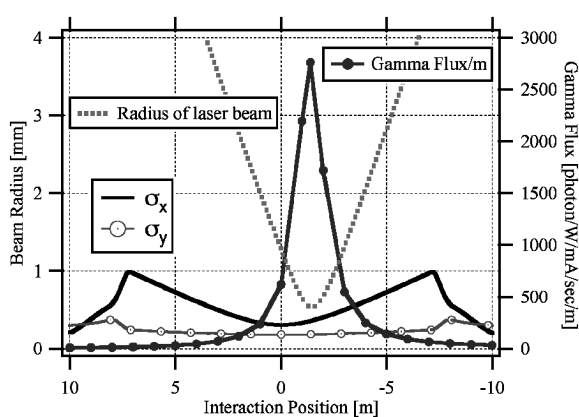


図7 散乱相互作用部の電子およびレーザービームのサイズ

整したとき、約 6000γ 光子/秒/mA/W の最大規格化フラックスが得られた。

相互作用領域の単位長さごとのガンマ線発生量を計算してプロットすると、図8のようになる。横軸はレーザー集光位置で、全フラックス（中実点）は中央で収束させた場合が最大となるが、実際は散乱角の大きなガンマ線は、真空ダクト内のアプソーバーや、コリメータでカットされ、図の中実点の用なレーザー集光位置依存となる。エラーバー付きの黒点が、実測点で、計算評価とよく一致している。

以上の結果から、ニュースバルを電流 200 mA で TopUp 運転し、レーザーパワー 5 W を入射する場合のガンマ線フラックスを評価すると、 $6 \times 10^6 \gamma/s$ の全フラックス（約 6 MeV から 16.7 MeV）となる。

さらに、Nd レーザの 2 倍高調波（波長 532 nm）および、炭酸ガスレーザー（波長 10.6 μm ）の導入に加え、電子エネルギーを 976 MeV, 1.22 GeV, 1.46 GeV と変化させて最大ガンマ線エネルギーの計測を行い、電子ビームエネルギーおよびレーザー波長から計算され

るガンマ線エネルギーと矛盾しない（2% 以内）計測結果を得ている。現在までに測定したガンマ線ビームのエネルギー広がり（準単色性）は、散乱点から 18.5 m の位置に、直径 3 mm のコリメーターを設置した場合、10% 程度である。計算によると、電子ビームとの相互作用位置を調整することで、エネルギー広がりを改善できそうである。今後、レーザー波長領域を拡大して、ガンマ線エネルギー可変性を向上するとともに、エネルギー広がり改善を行う。さらにガンマ線の偏極度を評価するモニタ手法を追加して、偏極ガンマ線の利用に向けた準備を行う予定である。

4. まとめ

ニュースバル放射光施設にレーザー・コンプトン散乱ガンマ線ビームラインを設置し、ガンマ線照射実験が可能なビームラインが稼働している。ガンマ線フラックスとエネルギーの評価を行い、 10^6 ガンマ光子/秒のフラックスの 6–16.7 MeV ガンマ線を発生できている。今後、レーザー波長領域の拡大と、偏極ガンマ線のモニタ法を準備して、準単色、エネルギー可変で、偏光特性に優れた、ガンマ線ビームラインとして整備することを計画している。また、並行して、ガンマ線ビームを利用した応用研究を進める予定である。

謝辞

本レーザー・コンプトン散乱ガンマ線源研究では、以下の方々に御協力を頂き、また有益な議論を頂いたことに感謝いたします。レーザー技術総合研究所 今崎一夫氏、李大治氏、大阪大学核物理研究センター 嶋達志氏、藤原守氏、甲南大学理学部 宇都宮弘章氏、秋宗秀俊氏、日本原子力研究開発機構 早川岳人氏、静岡俊行氏、高輝度光科学研究センター 浅野芳裕

氏, 大熊春夫氏, 兵庫県立大学工学研究科 青木一彦氏, 高度産業科学技術研究所 望月孝晏氏, 天野壯氏, 堀川賢氏, 安東愛之輔氏 (現 J-PARK), 庄司善彦氏, 橋本智氏.

参考文献

- 1) A. Ando, S. Amano, S. Hashimoto, H. Kinoshita, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, M. Terasawa, T. Watanabe and N. Kumagai: "Isochronous Storage Ring of the NewSUBARU Project", *J. Synchrotron Radiation*, 5, Part 3, pp. 342-344 (1998).
- 2) S. Hashimoto, A. Ando, S. Amano, Y. Haruyama, T. Hattori, K. Kanda, H. Kinoshita, S. Matsui, H. Mekaru, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, Y. Utsumi, T. Watanabe and H. Tsubakino, "Present Status of Synchrotron Radiation Facility 'NewSUBARU'", *Trans. Materials Research Soc. Japan*, 26, pp. 783-786 (2001).
- 3) K. Aoki, K. Hosono, T. Hadame, H. Munenaga, K. Kinoshita, M. Toda, S. Amano, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Aoki and D. Li, "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, K. Imasaki, M. Aoki, S. Miyamoto, S. Amano, K. Aoki, H. Hosono and T. Mochizuki, "Experiment on gamma-ray generation and application", *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res.*, A 528, pp. 516-519 (2004).
- 5) D. Li, K. Imasaki, S. Miyamoto, S. Amano and T. Mochizuki: "Spatial Distribution of Polarized Gamma Ray Generated Through Laser Compton Scattering On NewSUBARU Storage Ring", *Rev. Laser Engineering*, 32, pp. 211-213 (2004).
- 6) S. Miyamoto, Y. Asano, S. Amano, D. Li, K. Imasaki, H. Kinugasa, Y. Shoji, T. Takagi and T. Mochizuki, "Laser Compton back-scattering gamma-ray beam-line on NewSUBARU", *Radiation Measurements*, 41, pp. S179-S185 (2007).
- 7) D. Li, K. Imasaki, S. Miyamoto, S. Amano and T. Mochizuki: "Experiment on Photonuclear Reaction Induced by Laser Compton Scattering Gamma-Ray", *J. Nucl. Science Tech.*, 42, pp. 259-261 (2005).
- 8) K. Imasaki, D. Li, S. Miyamoto, S. Asano, T. Mochizuki and Y. Asano, "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).
- 9) T. Hayakawa, S. Miyamoto, Y. Hayashi, K. Kawase, K. Horikawa, S. Chiba, K. Nakanishi, H. Hashimoto, T. Ohta, M. Kando, T. Mochizuki, T. Kajino and M. Fujiwara, "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, pp. 065802-1-5 (2006).
- 10) R. H. Milburn, "Electron Scattering by an Intense Polarized Photon Field", *Phys. Rev. Lett.*, 10(3), pp. 75-77 (1963).
- 11) C. Bemporas, R. H. Milburn and N. Tanaka, "Photons from Compton Scattering of Light on 6.0 GeV", *Phys. Rev.*, 138, pp. B1546-1549 (1965).
- 12) A. D'Angero, O. Bartalini, V. Bellini, P. L. Sandri, D. Moricciani, L. Nicoletti and A. Zucchiatti, "Generation of Compton backscattering-ray beams", *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, A 455, pp. 1-6 (2000).
- 13) 藤原 守, "レーザー電子光によるフォーク核物理の研究", *放射光*, 10, pp. 23-35 (1997).
- 14) T. Nakano, *et al.*, "Evidence for a Narrow $S = +1$ Baryon Resonance in Photoproduction from the Neutron", *Phys. Rev. Lett.*, 91, pp. 012002-1-4 (2003).
- 15) H. Ohgaki, S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, R. Suzuki, T. Noguchi and T. Tomimasu, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 38, 386 (1991).
- 16) H. Ohgaki, H. Toyokawa, K. Kudo, N. Takeda and T. Yamazaki, "Generation and application of Laser-Compton gamma-ray at ETL", *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, A 455, pp. 54-59 (2000).
- 17) H. Toyokawa, H. Ohgaki and T. Shima, "Gamma-ray imaging with the Compton-backscattered laser photons", *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 49, pp. 182-187 (2002).
- 18) 宇都宮弘章, "実験室で探る天体光核反応とその周辺", *日本物理学会誌*, 62, pp. 34-39 (2007).
- 19) V. N. Litvinenko, B. Burnham, M. Emamian, N. Howler, J. M. J. Madey, *et al.*, "Gamma-Ray Production in a Storage Ring Free-Electron Laser", *Phys. Rev. Lett.*, 78, 24, pp. 4569-4572 (1997).
- 20) V. N. Litvinenko, S. H. Parka, I. V. Pinayeva and Y. Wu, "Performance of the OK-4/Duke storage ring FEL", *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, A 470, pp. 66-75 (2001).
- 21) H. Sakai, Y. Honda, N. Sasao, S. Araki, Y. Higashi, T. Okugi, T. Taniguti, J. Urakawa and M. Takano, "Performance Studies of a Laser Wire Beam Profile Monitor", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, pp. 6398-6408 (2002).
- 22) K. Chouffani, F. Harmon, D. Wells, J. Jones and G. Lancaster, "Determination of electron beam parameters by means of laser-Compton scattering", *Phys. Rev. SPT-Acc. and Beams*, 9, pp. 050701-1-11 (2006).
- 23) F. R. Arutyunian and V. A. Tumanian, "The Compton effect on relativistic electrons and the possibility of obtaining high energy beams", *Phys. Lett.*, 4, pp. 176-178 (1963).
- 24) T. Shima: private communication.