

NewSUBARU におけるレーザーコンプトン散乱ガンマ線の生成と対生成陽電子を用いた応用研究

LASER COMPTON SCATTERING GAMMA RAYS GENERATED IN NEWSUBARU AND TO USE APPLIED RESEARCH IN PAIR PRODUCTION POSITRONS

杉田健人^{#A)}, 森本悠介^{A)}, 上野陽平^{B)}, 角倉優雅^{B)}, 堀史説^{B)}, 岩瀬彰宏^{B)}
橋本智^{A)}, 天野壮^{A)}, 寺澤倫孝^{A)}, 宮本修治^{A)}

Kento Sugita^{#A)}, Yuusuke Morimoto^{A)}, Youhei Ueno^{B)}, Yuuga Sumikura^{B)}, Fuminobu Hori^{B)}, Akihiro Iwase^{B)},
Satoshi Hashimoto^{A)}, Sho Amano^{A)}, Mititaka Terasawa^{A)}, Shuji Miyamoto^{A)}

^{A)} LASTI, University of Hyogo

^{B)} Osaka Prefecture University

Abstract

We developed the MeV order gamma ray source by Laser Compton scattering (LCS) at NewSUBARU BL01. Yb fiber laser (1064nm) and an Er fiber laser (1550nm) are newly introduced. The LCS-gamma fluxes are 1.0×10^3 photon/mA/W/s and 2.0×10^2 photon/mA/W/s with gamma ray energy of 17MeV and 11MeV, using the Yb laser and the Er laser, respectively. These gamma ray beams are collimated by two collimators of 6mm in diameter. The output pulses of these two lasers are possible to synchronize with the electron bunches of 30ps pulse width in NewSUBARU storage ring. This system will be applicable to the experiments required high time resolution. Generated MeV order gamma rays will be applied for generation of high energy positrons by pair creation. Lifetime measurement will be developed for non-destructive material inspection by high energy positron.

1. はじめに

我々は兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 (LASTI) の所有するシンクロtron放射光施設 NewSUBARU (Figure 1) のビームライン 01 (BL01) において、レーザーコンプトン散乱ガンマ線 (LCS-gamma) の生成および応用研究を行っている [1,2,3]。NewSUBARU でのレーザーコンプトン散乱ガンマ線は電子蓄積リングを周回する電子とレーザー光子の間の散乱によって生成される。LCS-gamma のエネルギー E_γ は次の式で表される。

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

ここで

$$\gamma = \frac{E_e}{m_e c} \quad (2)$$

である。ここで E_L はレーザー光子のエネルギー、 γ は相対論的係数、 E_e は蓄積リング中の電子の加速エネルギー、 m_e は電子の静止質量、 c は光速で θ は電子ビームと生成ガンマ線の散乱角である。式(1)よりレーザーの波長もしくは電子の加速エネルギーを変えることで LCS-gamma のエネルギーを調節できる。我々はこの LCS-gamma システムに新たに Yb ファイバーレーザー

(KEOPSYS, 波長 1064nm, パルス幅 1ns) と Er ファイバーレーザー (KEOPSYS, 波長 1550nm, パルス幅 6ns) を導入した。NewSUBARU における LCS-gamma の生成システムと新しく導入したレーザーによる生成ガンマ線および MeV オーダーのガンマ線を利用した応用研究について報告する。

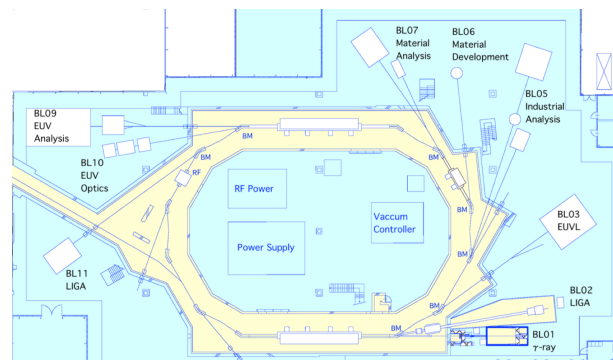


Figure 1: NewSUBARU storage ring.

2. NewSUBARU での LCS-gamma の生成

Figure 2 に NewSUBARU ビームライン 01 (BL01) の LCS-gamma 生成システムを示す。BL01 は NewSUBARU の超直線部から伸びるビームラインで電子ビームとレーザーを正面衝突させることでガンマ線を生成している。

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

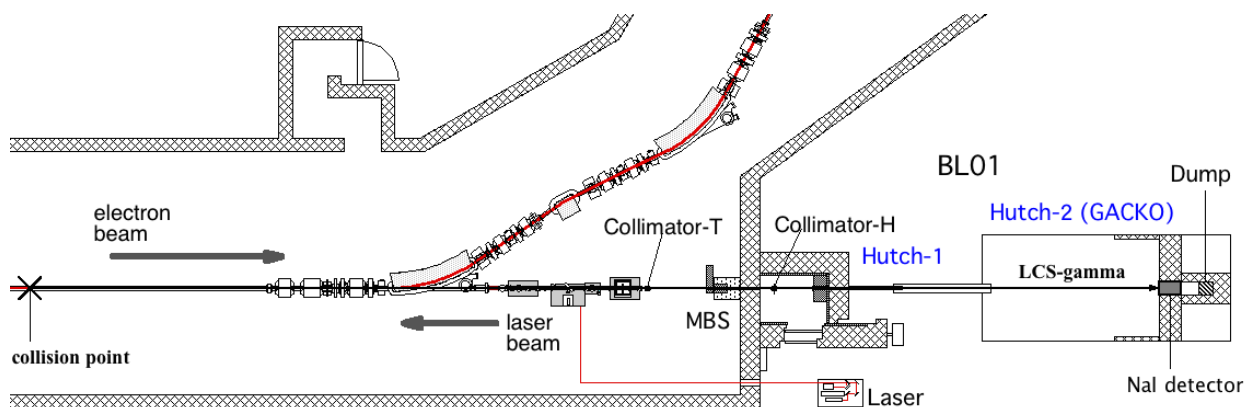


Figure 2: LCS-gamma system at NewSUBARU BL01.

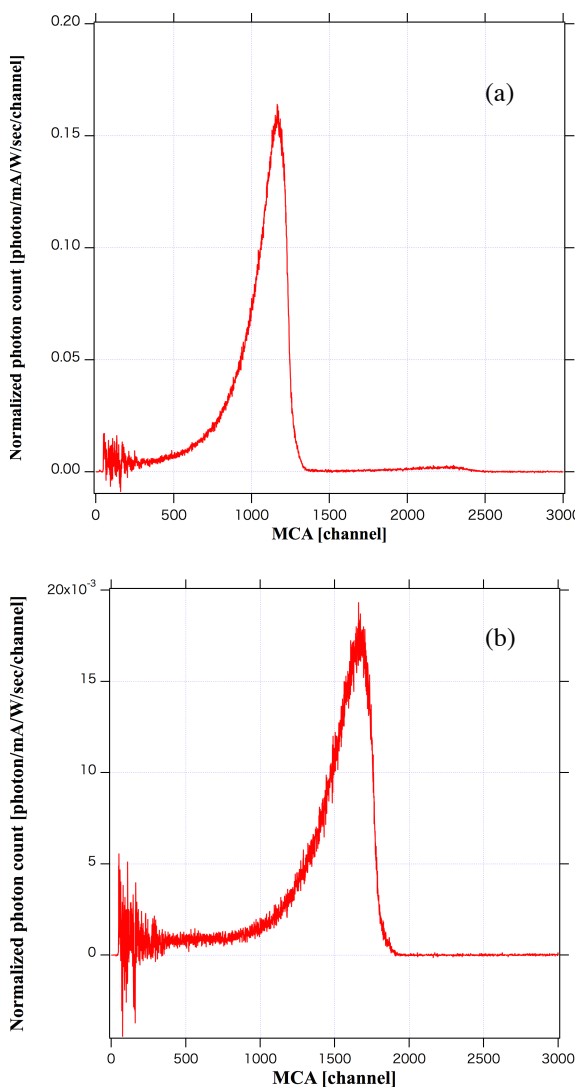


Figure 3: Measured signal of the gamma photon flux as a function of energy using (a) Er-fiber laser and (b) Yb-fiber laser. large NaI detector was used.

BL01 エンドステーションの光学台上に設置された筐体から射出されたレーザーは 2 つのミラーを通り蓄積リングのトンネル内に入る。レーザーは加速器トンネル内でミラー、レンズ、真空窓を通り真空チャンバー内に進む。レーザーは真空チャンバー内のミラーを経て電子ビームと蓄積リング超直線部で衝突する。レーザーと電子ビームの軸を合わせるアライメントは光学台上に設置した 2 つのミラーを調整することで行われる。レーザーは電子ビームと衝突するとエネルギーを付与され波長がガンマ線領域まで短くなり跳ね返る。ガンマ線はトンネル内と光学ハッチ 1 内に設置した 2 つのコリメーターを通り光学ハッチ 2(GACKO)に到達する。

ガンマ線フラックスの測定には光学ハッチ 2 内で NaI シンチレーター(8inc×12inc)を用いた。NewSUBARU 加速エネルギー1GeV での生成ガンマ線のエネルギーは式(1)より Yb レーザー使用時で 17-MeV、Er レーザー使用時で 11-MeV である。これらのガンマ線に対してトンネル内と光学ハッチ 1 に 6mm φ のコリメーターを設置しフラックスを測定した。測定された規格化ガンマ線フラックスは、Yb レーザーを用いた場合で $1.0 \times 10^3 \text{ photons mA}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ 、Er レーザーを用いた場合で $2.0 \times 10^2 \text{ photons mA}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ だった。測定時にパイルアップを起こしていたため Yb レーザー使用時には 7.5cm、Er レーザー使用時には 2.5cm の鉛を遮蔽に使用した。フラックスは鉛による減衰を考慮してある。ガンマ線の規格化に用いたパラメータは蓄積リングの電流値[mA]とレーザー出力[W]の 2 つの変動的な物理量である。Figure 3 の(a)と(b)が 2 つのレーザーを使用した場合のガンマ線信号を測定したものである。信号はマルチチャンネルアナライザー(MCA)によって記録した。Figure 3 の縦軸は規格化したガンマ線強度で、横軸が MCA のチャンネルにあたる。MCA のチャンネルはガンマ線光子のエネルギーに等しく、2000 チャンネルが約 20MeV に対応している。Figure 4 は LCS-gamma をイメージングしたもので、トンネルとハッチ 1 に設置した 6mm φ のコリメーターを通過したガンマ線画像である。画像の撮影はハッチ 2 内でシングルフォトンカウンターの MiniPix によって行った。撮影時間は 100 秒でカウントを積算してある。MiniPix の検出面は 14mm×14mm で、検出面内が 256×256 のピクセルに分かれている。LCS-gamm 画像よりハッチ

2 内でのガンマ線の直径は約 8mm であった。これは衝突点およびコリメーターと撮影点の位置を考慮すると合理的な結果である。ガンマ線を瞬時にイメージングできるので、MiniPix はガンマ線をターゲットに照射する際のアライメントに役立つ。

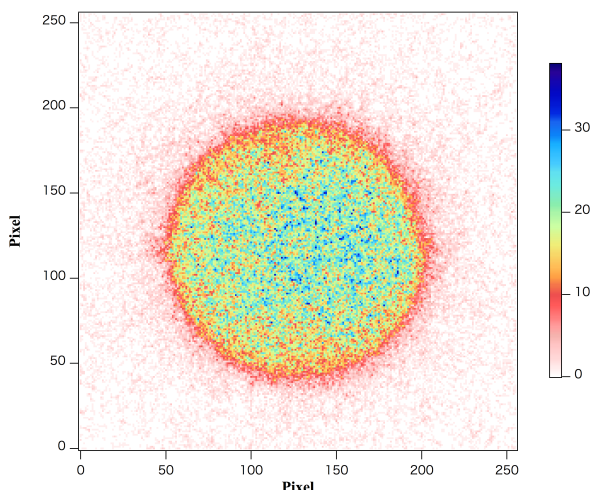


Figure 4: LCS-gamma image taken by MiniPix.

3. LCS-gamma による高エネルギー陽電子の生成及び利用研究

NewSUBARU で生成した MeV 領域のガンマ線による応用研究の一つに、電子・陽電子対生成による高速陽電子の生成及び材料欠陥検査への利用がある。電子と陽電子の静止質量 1.022MeV 以上のエネルギーを持つガンマ線が物質に照射されると原子核近傍で電子と陽電子の対生成が起こる。対生成が起こる際に 1.022MeV を超えるガンマ線エネルギーは電子と陽電子に等分配される。従って高エネルギーガンマ線を用いることで高エネルギー陽電子の生成が可能である。NewSUBARU では 17MeV の LCS-gamma を厚さ 3mm の鉛に照射することで 8MeV の高速陽電子の生成に成功している[4]。8MeV の陽電子は金属試料に対して mm オーダーの侵入深さをもつ[5]。正電荷をもつ陽電

子は物質に侵入すると原子核と電気的に反発を起こし原子空孔に集まる性質をもつ。陽電子が電子と出会うと対消滅を起こして 511keV のガンマ線を 2 本放出する。物質中で対消滅が起こる際、消滅ガンマ線には電子の運動量が反映される。そのため原子空孔に集まった陽電子と電子が対消滅を起こすと消滅ガンマ線には物質の空孔欠陥の情報が反映される。この性質を利用して消滅ガンマ線のドップラー拡がり測定、陽電子寿命測定などの材料欠陥検査の研究が進められている。NewSUBARU では現在までにバルク試料に対するドップラー拡がり測定が成されている[5,6]。NewSUBARU での電子・陽電子対生成及び陽電子消滅ガンマ線測定の概略図を Figure 5 に示す。17MeV の LCS-gamma を鉛に照射することで 8MeV の電子と陽電子を生成する。対生成電子・陽電子に磁場をかけそれぞれの軌道を分離する。陽電子の軌道に試料を置き、陽電子を照射する。試料から放出される消滅ガンマ線をエネルギー分解能の高い Ge 検出器によって検出しエネルギースペクトルを入手する。NewSUBARU では昨年度より陽電子消滅測定用にチャンバーを導入した。これによってアライメントの簡便化、真空中での測定が可能となった[7]。今後はチャンバーでの測定を重ねるとともに陽電子寿命測定回路の開発をすすめている。

4. まとめ

NewSUBARU の LCS-gamma 生成システムに Yb レーザーと Er レーザーを新たに導入してガンマ線の生成に成功した。これらのレーザーはそれぞれパルス幅が 1nsec、6nsec と短パルスである。加速器の運転モードをシングルバンチにしてレーザーと加速器を同期させることでパルス状のガンマ線を生成できる。これはガンマ線照射による中性子放出の計測である time-of-flight(TOF) の計測に応用できる。従来使用していたレーザー(パルス幅 60nsec)よりも強度が高いガンマ線を生成することができ、TOF 計測の高精度化が期待できる[8]。また NewSUBARU では MeV 領域のガンマ線を利用した陽電子消滅測定の研究も進んでいる。従来行っていたドップラー拡がり測定を陽電子用チャンバーで行うとともに、陽電子寿命測定回路の開発、組み込みを目指す。

参考文献

- [1] S.Miyamoto *et al.*, Radiat. Meas. **41**(2007)S179.
- [2] S.Amano *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A(2009), doi:10.1016/j.nima.2009.01.010
- [3] K.Horikawa *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. Physics Research. **A618**(2010)209-215.
- [4] D.Li *et al.*, APPL. Phys. Lett. **94**(2009)0901112.
- [5] F.Hori *et al.*, Jour. of Phys. Conf. Seri **674**(2016)012025.
- [6] F.Hori *et al.*, JJAP. Conf Proc. **2**(2014)011301.
- [7] 杉田健人, "材料欠陥検査へのガンマ線生成高エネルギー陽電子利用研究", 第 23 回 FEL と High-Power Radiation 研究会, 東北大学電子光理学研究センター, 三神峯ホール, 2月 23-24 日(2017).
- [8] 武元亮頼, "レーザーコンプトン散乱ガンマ線(LCS-ガンマ線)による変更軸に対する中性子の放出角度分布の測定", 年会 , プロシーディングス, MOPO055 第 13 回日本加速器学会年会, 幕張メッセ国際会議場, 8月 8-10 日(2016).

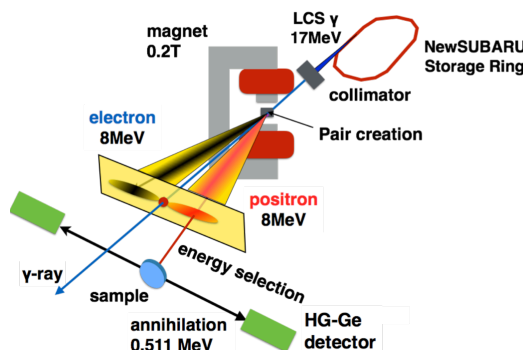


Figure 5: Positron measurement system at NewSUBARU BL01.