

ニューズバル LCS ガンマ線源の高強度化に向けた研究

RESEARCH ON INCREASING THE INTENSITY OF NewSUBARU LCS GAMMA RAY SOURCE

平川悠人[#], 橋本智

Haruto Hirakawa[#], Satoshi Hashimoto

LASTI, University of Hyogo

Abstract

The NewSUBARU beamline BL01 is one of the few Laser Compton Scattering (LCS) gamma-ray facilities in the world. LCS gamma-rays have excellent properties such as energy tunability, high directivity, quasi-monochromaticity, and polarization. We optimized the Gaussian laser beam optics to maximize gamma-ray intensity. In BL01, the incident laser propagates about 12 m after emitting and collides with the electron beam at a 20-m long storage ring line, generating gamma rays. Due to this long-distance propagation, high accuracy is required for optical axis alignment, which is currently the biggest challenge in BL01. In this presentation, we report the dependence of gamma ray intensity on the position of the incident laser waist and the gamma ray intensity dependence on the angle of the alignment mirror.

1. はじめに

ニューズバル放射光施設ビームライン BL01 は世界でも数少ないレーザーコンプトン散乱(Laser Compton Scattering)ガンマ線施設である[1]。LCS ガンマ線はエネルギー可変、準単色、高指向性、偏光性など優れた特徴を有し、様々な応用研究に利用されている。発生するガンマ線のエネルギーは、電子エネルギー、レーザー波長、および入射・散乱角度で決まる。ガンマ線の強度(光子数)は、電子ビーム電流やレーザー出力に比例し、また、電子ビームと入射レーザーのオーバーラップによって決まる。

LCS ガンマ線利用において、実験時間の短縮や S/N 比の向上など利用者に大きなメリットがあり、ガンマ線強度(光子数)の増加が求められている。

ガンマ線強度を最大化するためには、電子ビームとレーザービームを効率よく衝突させる必要がある。BL01 では、入射レーザーを蓄積リング内を周回する相対論的電子と正面衝突させ、ガンマ線を発生する。入射レーザーは光学レンズにより集光され、蓄積リング直線領域にあるレーザーウエストで最小径となる。BL01 では、レーザー径が電子ビーム径よりも大きいことに加えて、2つのビームのウエスト位置が一致していないことが課題であった。昨年加速器学会年会で、光学系の最適化を行い、これらの課題を解決できたことを報告した[2]。

今回は、パルスレーザーの出射タイミングによるガンマ線強度依存性を評価することにより、レーザーウエスト位置を推定し、最適化計算の再現性を確認した。また、アライメント用ミラーの角度によるガンマ線強度依存性、電子ビームのハイブリッドフィリング運転によるガンマ線生成を行った。本発表ではこれらについて発表する。

2. ガンマ線ビームライン BL01 の概要

ガンマ線ビームライン BL01 の模式図を Fig. 1 に示す。蓄積リングトンネル外に設置されたレーザー装置から出

射されたレーザー光は二枚のアライメント用ミラーを経てトンネル内に進入する。レーザー光はトンネル内でミラー、集光レンズ、発散レンズ、真空窓を通過して蓄積リングに導かれ、真空ダクト内の水冷された銀コート Si ミラーによって電子ビームと正面衝突するように入射される。

電子ビームと入射レーザーの衝突により発生したガンマ線は最下流の真空窓を通過した後、2つのガンマ線実験ハッチに入射される。ガンマ線のエネルギー幅を制限する鉛コリメータはトンネル内とガンマ線ハッチ1に設置している。

本ビームラインで使用されている Talon レーザー

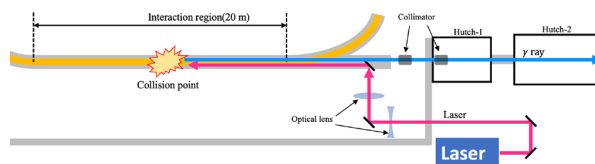


Figure 1: General layout of the LCS gamma-ray beamline, BL01 at NewSUBARU.

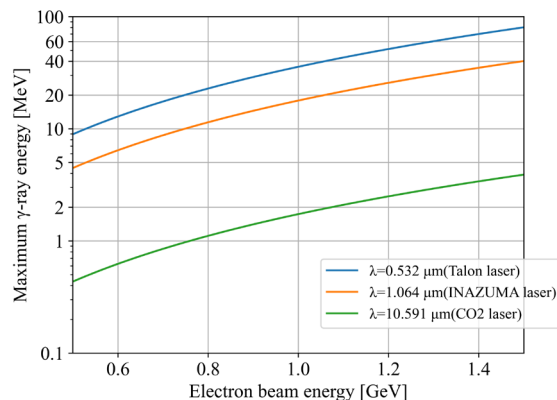


Figure 2: Maximum energy of LCS gamma-ray at NewSUBARU BL01.

[#] hiraharu1267@gmail.com

(0.532 μm)、INAZUMA(Nd:YVO₄)レーザー(1.064 μm)、CO₂レーザー(10.591 μm)の主なパラメータを Table 1 に示す。これらのレーザーと蓄積電子エネルギーの可変性から BL01 で発生可能なガンマ線エネルギー範囲を Fig. 2 に示す。

本研究では、Talon レーザーを使用しているため、本稿における入射レーザーはTalonレーザーを指す。蓄積リング直線領域における電子ビームのビームサイズおよびTalonレーザーの半径をFig. 3に示す。

Table 1: Parameters for the 3 lasers. Wavelength(λ), quality factor(M^2), beam radius(w_0) and Rayleigh length(Z_R).

Laser	λ [μm]	M^2	w_0 [mm]	Z_R [m]
Talon	0.532	1.01	0.51	1.521
INAZUMA	1.064	1	0.36	0.383
CO ₂	10.591	1.1	0.875	0.206

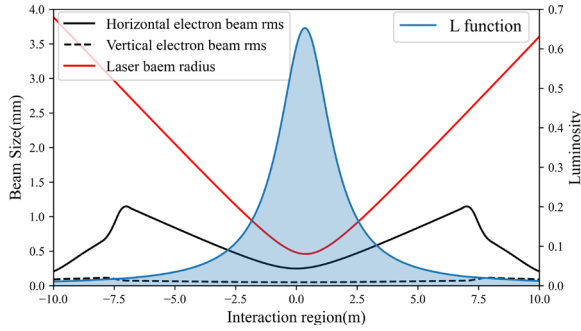


Figure 3: Electron beam rms size in horizontal (black solid line) and vertical (black dot line), Talon laser radius (red line) and overlap function (blue line) are shown.

3. LCS ガンマ線強度

単位時間あたりに発生する LCS ガンマ線光子数は次式で表される[3]。

$$\frac{dN_\gamma}{dt} = \mathcal{L} \cdot \sigma_{\text{tot}} \quad (1)$$

ここで σ_{tot} は散乱断面積である[4]。 \mathcal{L} はルミノシティと呼ばれ、単位散乱断面積、単位時間あたりに発生するコンプトン散乱光子数を表す。 \mathcal{L} は次式で表される[2]。

$$\mathcal{L} = c(1 + \beta) \frac{I}{e\nu} \frac{P}{E_p c} \int_z L(z) dz \quad (2)$$

ここで c は光速、 β は規格化速度、 I は蓄積電流値、 e は素電荷、 ν は電子の速度、 P は入射レーザーパワー、 E_p は入射光子エネルギー、 $L(z)$ (以下、 \mathcal{L} 関数) は入射レーザーと電子ビームの重なり関数を表し、共通の進行方向座標上で伝播するとき、次式で表される[3]。

$$L(z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_x(z)^2 + w(z)^2} \sqrt{\sigma_y(z)^2 + w(z)^2}} \quad (3)$$

ここで $\sigma_x(z)$ 、 $\sigma_y(z)$ は電子ビームのビームサイズ、 $w(z)$ は入射レーザーのビームサイズである。レーザー光学の影響はEq. 2の積分項のみに関係する。

BL01のTalonレーザーにおける \mathcal{L} 関数はFig. 3に示す。入射レーザーと電子ビームのウエスト近傍に \mathcal{L} 関数のピークがあることがわかる。

4. ウエスト位置によるガンマ線強度依存性

4.1 ウエスト位置の推定

昨年、光学系最適化により、入射レーザーのウエスト位置を電子ビームのウエスト位置に合わせた。しかし、ウエスト位置はレーザー口から約22 mあることや、カタログ値に基づくシミュレーションによるレーザーのスペック誤差などにより、実際にはウエストが一致していない可能性が考えられる。そこで、シングルバンチ電子とパルスレーザーによるガンマ線を測定し、ガンマ線強度のタイミング依存性からウエスト位置の推定を行った。

4.2 タイミング同期回路

タイミング同期回路をFig. 4に示す。PF信号からパルスレーザーのトリガー信号の基となる20 kHz信号を取り出し、デジタルディレイDG535により0~600 nsの遅延を与えてガンマ線を測定し、タイミング依存性を評価する。電子ビームは396 nsで蓄積リングを1周するため、約400 ns間隔でガンマ線強度のピークが測定できる。

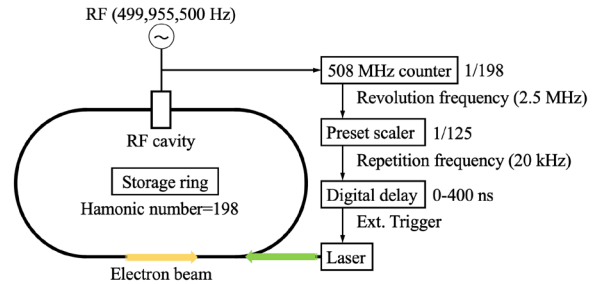


Figure 4: Timing synchronizing system.

4.3 レーザー光学系

レーザー光学系の二枚目のレンズを三つのポジションに設定し、それぞれのガンマ線のタイミング依存性の比較を行った。レーザー出射口から約7.14 mをPos.1、Pos.1から5 mmレーザー側へ移動した位置をPos.2、さらに3 mm移動した位置をPos.3とする。Pos. 1におけるレーザー光学系をTable 2に示す。レンズがレーザー側へ移動するとウエスト位置はレーザー下流方向へシフトし、ウエストサイズは大きくなる。

計算にはガウシアン光学理論[5]に基づく自作のPythonコードを用いた。

Table 2: Parameters of Talon Laser Optics

レンズ	焦点距離 [m]	位置[m]
発散(凹)レンズ	-0.2	6.84
収束(凸)レンズ	0.5	7.144
直線部中央[m]	22.41	
ウエストサイズ[mm]	0.46	
ウエスト位置[m]	22.03	
直線部中央-ウエスト位置 置[m]	0.38	

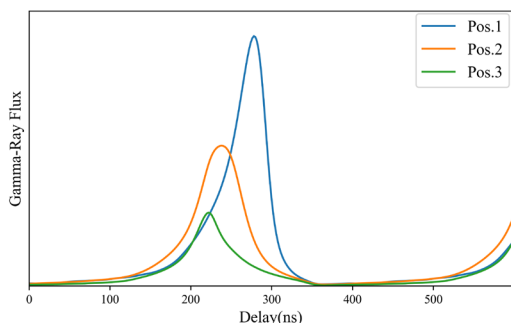


Figure 5: Comparison of the dependence of γ -ray intensity on timing delay between an electron beam and a laser pulse under three conditions based on simulation.

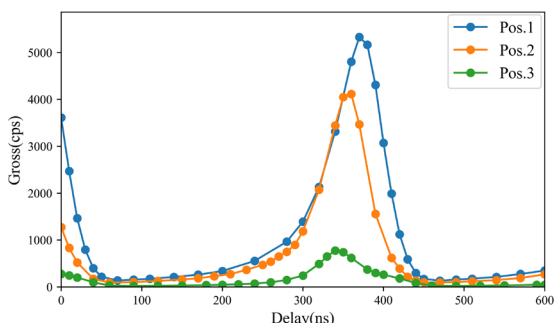


Figure 6: Comparison of the dependence of γ -ray intensity on timing delay between an electron beam and a laser pulse under three conditions based on measurement data.

4.4 タイミング依存性測定

ガンマ線測定には Ge 検出器およびマルチチャンネルアナライザ(MCA)を用いて、1秒あたりのガンマ線光子数(cps.)を各遅延時間で1分間ずつ測定した。シングルバンチ電子ビーム、レーザー強度、コリメータなどの条件は変えずに、二枚目レンズの位置のみ変えて、ガンマ線強度のタイミング依存性を測定した。各ポジションにおけるガンマ線強度のタイミング依存性のシミュレーションを Fig. 5、実測結果を Fig. 6 に示す。ウエスト位置の変化がガンマ線のタイミング依存性のピークに影響を及ぼしていることがわかった。また、Pos.1 が最もガンマ線発生

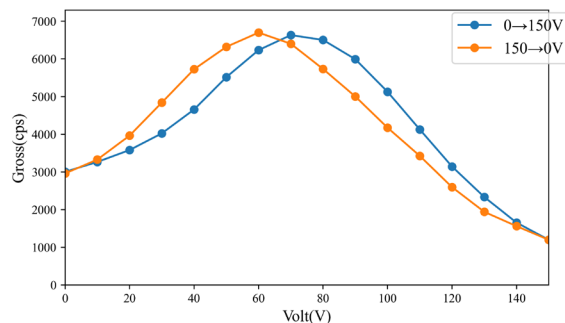


Figure 7: Dependence of γ -ray intensity on mirror angle(Horizontal). Rising voltage from 0 to 150 V(blue line) and descending voltage from 150 to 0 V(yellow line)

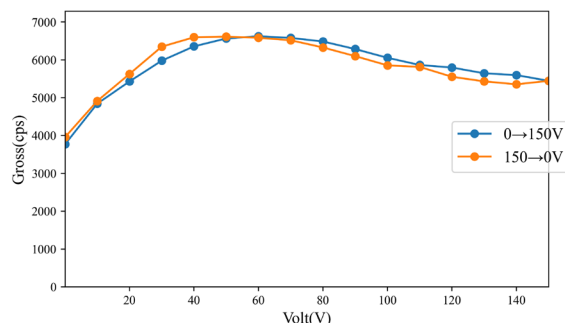


Figure 8: Dependence of γ -ray intensity on mirror angle(Vertical). Rising voltage from 0 to 150 V(blue line) and descending voltage from 150 to 0 V(yellow line)

効率が優れていることもわかった。

5. アライメント用ミラーの角度依存性

BL01 の LCS ガンマ線の強度は電子ビームと入射レーザーの光軸アライメントの精度にも依存している。従来、アライメント調整は手動で行ってきたため、調整に時間がかかる上、アライメントの精度も低く、再現性が低いという課題があった。そこで今回、ピエゾ素子駆動ミラーを導入し、半自動化することでアライメント調整の効率を飛躍的に向上させた。ピエゾ素子駆動ミラーは 0~150 V の電圧に応じて水平/垂直方向にそれぞれ約 500 μ rad の角度をつける。

ピエゾ素子駆動ミラーを用いて LCS ガンマ線の光軸アライメントの角度依存性を評価した。ガンマ線強度の水平方向、垂直方向ミラー角度依存性を Fig. 7、Fig. 8 に示す。シミュレーションでは電子ビームの断面形状が水平方向に長い楕円型であることから、ガンマ線強度のミラー角度依存性は水平方向に比べ、垂直方向が強くなると予想していたが、実測では水平方向の依存性が強く出るという結果となった。原因については今後、評価していく予定である。

6. ハイブリッドフィリングによるガンマ線生成

6.1 ハイブリッドフィリング運転

ニュースバルの1周のバケット数は198である[1]。利用

運転時は 198 bunch train で蓄積電流 350 mA まで Top-up している。対して、TOF 測定など時分割測定が必要な LCS ガンマ線利用時は、Single bunch 電子ビームにパルスレーザーをタイミング同期して照射することが多い。

そこで、利用運転中でもシングルバンチ電子によるガンマ線を生成するために、ハイブリッドフィリング運転の実証実験を行った。

6.2 フィリングパターン

フィリングパターンは Fig. 9 に示す。レーザーのパルス幅を考慮して、10 mA Single bunch の前後に 80 bucket と 40 bucket の empty bucket を配置した。Photo detector で撮影したパルスレーザーの波形を Fig. 10 に示す。パルス波形の後ろが尾を引くような非対称性があり、これらを考慮して Single bunch の後ろに多めに empty bucket を設けている。残りの 77 bucket は 340 mA の train で蓄積し、全体の蓄積電流は利用運転時と同様の 350 mA で Top-up している。

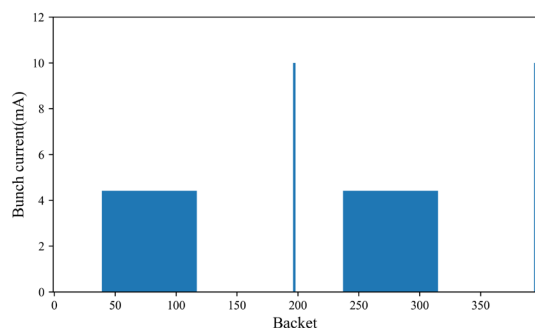


Figure 9: Filling pattern. 10 mA single bunch and 40 empty buckets and 77 train and 80 empty buckets.

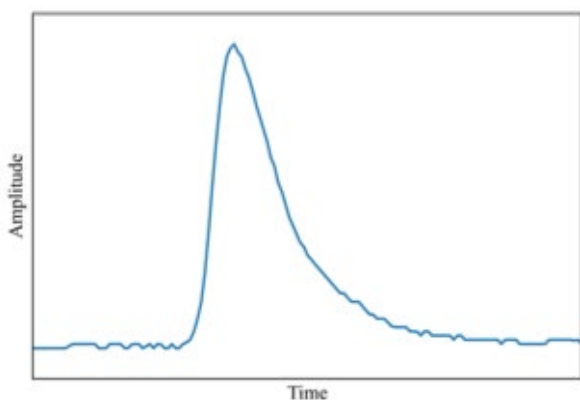


Figure 10: Pulse laser waveform of Talon at 20 kHz.

6.3 タイミング依存性測定

ハイブリッドフィリング運転でパルスレーザーによるガンマ線測定を行った。Figure 4 で説明したタイミング同期回路を用い、0~600 ns の遅延を与えた時のガンマ線強度依存性を評価した。計算には自作の Python コードを用い、パルス波形の非対称性や蓄積電子のフィリングパターンを考慮できるようにした。Figure 11 にシミュレーション結果、Fig. 12 に実測結果を示す。77 bucket train

によるガンマ線と Single bunch によるガンマ線をタイミングによって分離できていることがわかる。

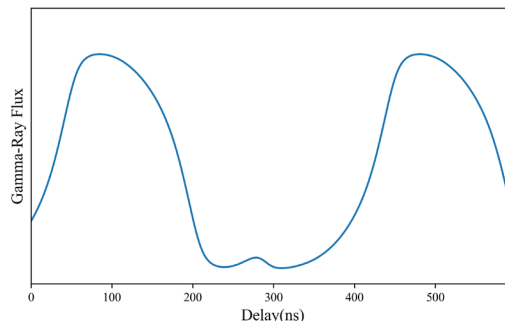


Figure 11: Dependence of γ -ray intensity on timing delay between an electron beam and a laser pulse based on simulation.

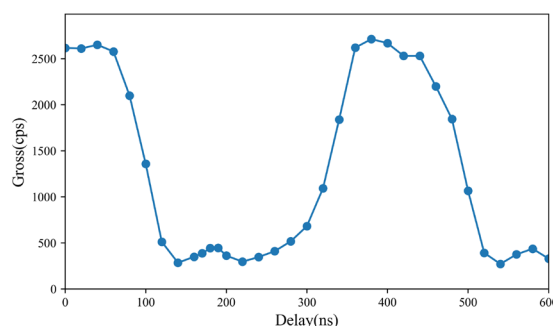


Figure 12: Dependence of γ -ray intensity on timing delay between an electron beam and a laser pulse based on measurement data.

7. まとめ

本研究では LCS ガンマ線源の高強度化・安定化を目的とした、レーザー光学系の最適化を行ってきた。本発表ではその過程として、レーザーウエスト位置の評価、アライメント用ミラーの角度偏差、ハイブリッドフィリングパターンの実証実験について述べた。今後、LCS のシミュレーション再現性の向上、光軸アライメントシステムの構築など、さらなる LCS ガンマ線源の最適化を目指す。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ニュースバル運転員の皆様には、施設の運転においてご協力をいただきました。特に、中田祥太郎氏と平山英之氏には、実験の支援において多大なるお力添えを賜りました。感謝申し上げます。

また、大阪大学の宮本修治教授には、ビームラインに関する情報を提供いただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- [1] <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS>
- [2] H. Hirakawa *et al.*, “Research on increasing LCS gamma-ray

- intensity of NewSUBARU by optimizing the laser optical system”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Oct.-Sep. 2023.
- [3] D. Filioescu, S.Miyamoto, S.Hashimoto *et al.*, NIMA(2023) to be published.
- [4] C. Sun, Y.K. Wu, “Theoretical and simulation studies of characteristics of a Compton light source”, Phys. Rev. Special Top. Accel. Beams 14 (2011) 044701.
- [5] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich (2006), 「基本 光工学 I」尾崎義治・朝倉利光訳, 『第3章 ビーム光学』, 森北出版株式会社.