

レーザー光学系最適化によるニュースバル LCS ガンマ線源の大強度化

RESEARCH ON INCREASING LCS GAMMA-RAY INTENSITY OF NewSUBARU BY OPTIMIZING THE LASER OPTICAL SYSTEM

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. As a result of minimizing the laser diameter and improving the waist position so as to maximize the luminosity function value that evaluates the overlap between the incident laser and the electron beam, we succeeded in improving the beam intensity by about 30%. In this presentation, we will also report on gamma-ray generation using a single bunch electron beam and laser pulse (~40 ns) using a timing synchronization circuit.

1. はじめに

ニュース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、高指向性、準単色性、偏光性など優れた特徴を有する。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ビームウエストで最小径となる。

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るガンマ線強度(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が、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従来の課題であった。

本研究ではこれらの課題を解決するために、レーザー光学系の再設計および実装を行った。また、タイミング同期回路によるシングルバンチ電子ビームとパルスレーザー(約 30 ns)によるガンマ線生成についても報告する。本稿では入射レーザーとして波長 532 nm の Talon レーザーを用いた。

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光学ミラーによりトンネル内に入射する。レーザー光はトンネル内でミラー、集光レンズ、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(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。また、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レーザーの半径を Fig. 3 に示す。

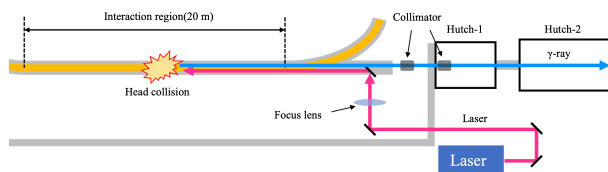


Figure 1: General layout of the LCS gamma-ray beamline, BL01 at NewSUBARU.

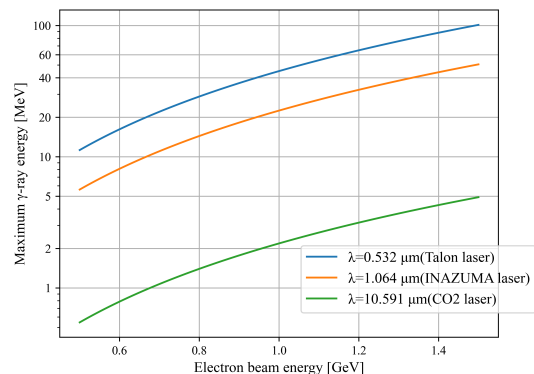


Figure 2: Maximum energy of LCS γ -ray at NewSUBARU BL01.

[#] hiraharu1267@gmail.com

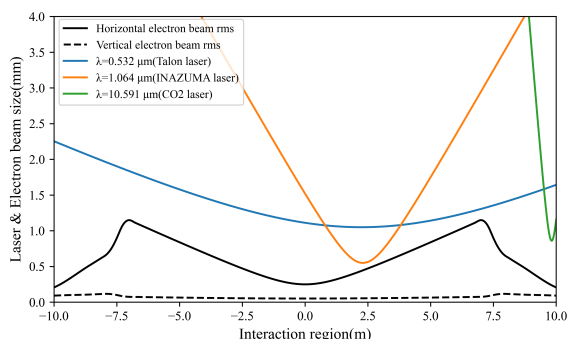


Figure 3: Electron beam rms size in horizontal (black solid line) and vertical (black dot line) and the transverse beam radius for 3 lasers are shown.

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

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[2]。

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

ここで σ_{tot} は散乱断面積である[3]。 \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]。

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

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、 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[2]。

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

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。

Figure 7(a)に光学系変更前の蓄積リング直線領域内における Talon レーザー径と電子ビーム径と、それらのパラメータから計算した L 関数を表している。変更前の光

学系ではウェスト位置同士が約 2.2 m 離れていることがわかる。

4. シングルバンチタイミング同期の実現

Talon レーザーは CW とパルスの両モードで動作できるが、パルスモードの方が出力が高いことから、パルス光とシングルバンチ電子ビームを衝突させるためのタイミング同期回路を構築した。

シングルバンチ電子ビームに同期してレーザーパルスを出射するために、RF 信号から電子ビーム周回信号 2.5 MHz を生成し、さらにレーザー繰り返し周波数に分周した (20 kHz)。デジタルディレイ DG535 により直線部中央で電子と衝突するようにディレイ調整した NIM 信号を外部トリガーとしてレーザーに入力した。Fig. 4 に同期回路の概略を示す。

電子ビームは 396 ns で蓄積リングを 1 周するため、Delay は 0-400 ns の範囲で調整した。Fig. 5 に測定したガンマ線強度の Delay 依存性を示す。約 400 ns 間隔でガンマ線強度のピークが測定できておりタイミング同期回路が正しく動作していることがわかる。入射レーザーの出力や繰り返し周波数などのパラメータを変えるだけで、Delay 最適値が変わるため、その都度タイミングのサーベイが必要であった。

5. Talon レーザー光学系の最適化

5.1 最適化計算

トンネル内に発散(凹)レンズ、収束(凸)レンズを各 1 枚ずつ用いた二枚レンズ系でレーザー光学系の最適化計算を行った。計算にはガウシアン光学理論[4]に基づく自作の Python コードを用いた。光路上にあるビューポートや光学素子の口径を超えるビーム部分は損失として取り扱った。ビームウェストの最小化およびウェスト位置が直線部中央に来るように設計した結果を Table 2 および Fig. 6 に示す。

5.2 ルミノシティの評価

蓄積リングガンマ線発生領域における最適化された Talon レーザービーム半径と L 関数を Fig. 7(b)に示す。光学系変更によるガンマ線強度の比較はこの L 関数を基に行う。評価方法はガンマ線発生領域で L 関数を最大となる位置を中心として Talon のパルス幅(30 ns)で積分し、その積分値を比較する。 L 関数積分値の計算結果から光学系の最適化により、ガンマ線強度は約 2 倍となることがわかった。

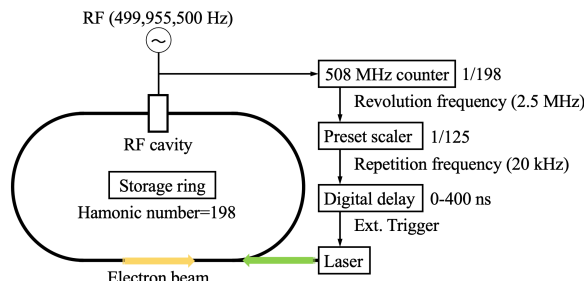


Figure 4: Timing synchronizing system.

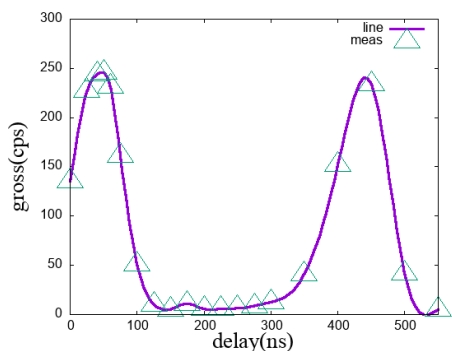


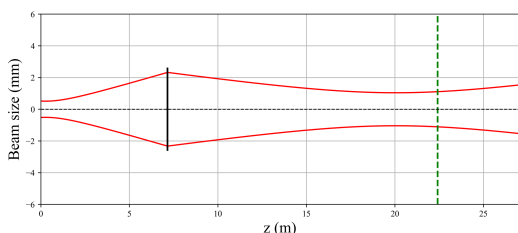
Figure 5: Dependence of γ -ray intensity on timing delay between an electron beam and a laser pulse.

5.3 最適光学系におけるガンマ線強度の実測

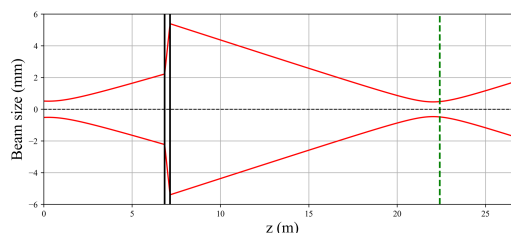
ガンマ線測定にはGe検出器およびマルチチャンネルアナライザ(MCA)を用いて、1秒あたりのガンマ線光子数(cps.)を測定した。シングルバンチ電子ビーム、レーザーパルス、コリメータなどの条件は変えずに、光学系を最適化した前後で測定したガンマ線強度とスペクトルを計測した。測定条件をTable 3に示す。Fig. 8に示すガンマ線スペクトルの測定結果から、レーザーオプティクス最適化により、1.3倍のガンマ線強度の向上が見られた。

Table 2: Parameters of Talon Laser Optics Before and After Optimization

光学系変更前		
レンズ	焦点距離[m]	位置[m]
収束(凸)レンズ	5	7.152
直線部中央[m]	22.41	
ウエストサイズ[mm]	1.04	
ウエスト位置[m]	20.05	
直線部中央-ウエスト位置[m]	2,36	
光学系変更後		
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[m]	0.38	

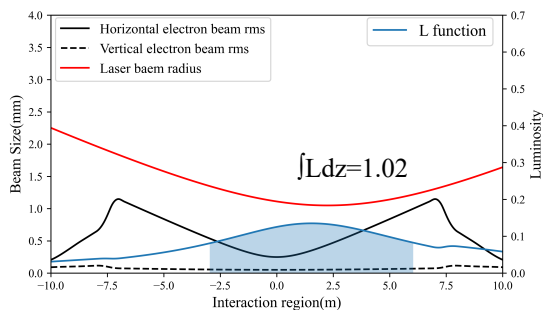


(a) Before

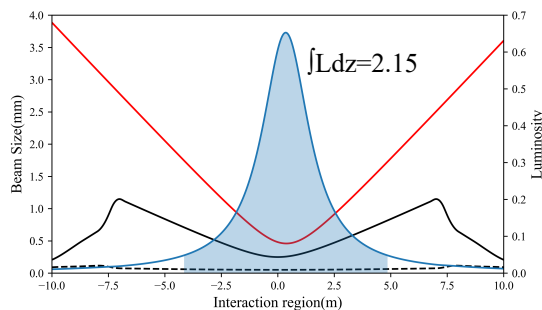


(b) After

Figure 6: Talon laser beam size (a)before and (b)after the optics optimization. Lens (black solid lines) and center position of straight section (green dot line) are shown.



(a) Before



(b) After

Figure 7: Overlap function between Talon laser and electron beams (a)before and (b)after optics optimization: horizontal (black solid line) and vertical (black dot line) electron beam size, laser radius (red line) and overlap function (blue line).

Table 3: Typical Parameters of LCS Gamma-ray Measurement

[Electron]	0.95 GeV, 10 mA, Single bunch
[Laser]	532 nm, 15 W, 20 kHz
[Collimator]	$\phi 3$ mm

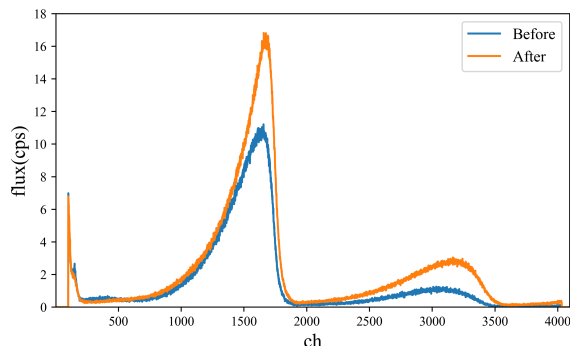


Figure 8: Measured γ -ray spectrum before (blue line) and after (orange line) the optimization of laser optics.

ガンマ線強度改善の計算値と測定値に差があった原因として、光軸アライメントの精度不足が考えられる。L 関数の計算では、電子ビーム軌道と入射レーザー光軸が完全に一致していることを仮定して計算を行っている。しかし、実際には2つのビーム軸を一致させることは非常に困難である。

この問題を解決するために今まで調整困難であった遮蔽室内にある光学素子の遠隔制御を可能にすることで、長距離を伝搬するレーザーのより高精度な光軸アライメント調整が行えるよう整備を行っている。これにより、最適解の模索、調整時間の短縮、さらなるガンマ線強度の増加の可能性が期待できる。今後、機械学習を用いた光学素子の自動アライメントシステムの開発など、更なるガンマ線源の性能向上を目指す。

またレーザー入射用のビューポートの損傷も大きく影響していると考えられる。2023年8月に真空チャンバーを大気開放して確認したところ、真空内の銀コート Si ミラーやビューポートにシンクロトロン放射光の照射跡の損傷が見られ、これらを新品に交換した。運転再開後にはこれらの素子の損傷によるレーザー透過率の低下などを評価する予定である。

6. まとめ

本研究では LCS ガンマ線レーザー光学系の最適化を行った。またタイミング同期回路を構築し、パルスレーザーとシングルバンチ電子ビームの同期運転を実現した。これらの結果、約 30% のガンマ線光子数増加に成功した。計算上はさらに改善できる見込みであったが、光軸アライメントの精度の問題、真空内ミラーや真空窓の汚れの問題などが影響していると思われる。今後これらを改善してさらなる LCS ガンマ線強度の向上を目指す。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ニューズ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] D. Filioescu, S.Miyamoto, S.Hashimoto *et al.*, NIMA(2023) to be published.
- [3] 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.
- [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.