

STATUS OF GAMMA-RAY GENERATION EXPERIMENT BY LASER COMPTON SCATTERING AT SAGA-LS

Tatsuo Kaneyasu¹, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Koda

SAGA Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0085

Abstract

We have started construction of an experimental setup for a laser Compton scattering (LCS) experiment to generate MeV photons for a beam energy measurement and user experiments in future. The LCS experiment will be performed at a straight section of the SAGA-LS storage ring, which is used for a beam injection. Photons from a CO₂ laser of 10.6 μm wavelength are scattered with the 1.4 GeV electron beam in a head-on collision condition. The laser optical system has been designed to achieve the largest luminosity, resulting in the LCS event rate $N_{\gamma} \sim 2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ with the beam current of 300 mA and laser power of 10 W.

SAGA-LSにおけるレーザーコンプトンガンマ線生成の準備状況

1. はじめに

放射光施設SAGA-LSでは、電子蓄積リングにおけるビームエネルギーモニターの構築及び将来的なガンマ線利用実験を目的として、レーザーコンプトン散乱(LCS)^[1,2]によるガンマ線生成の準備を進めている。電子蓄積リングを用いたLCS^[3-6]は、数MeV～数十MeV領域における有用なガンマ線源として核物理実験や非破壊検査等へ利用されるとともに加速器診断ツール^[7-9]としても利用されてきた。本計画では特にCO₂レーザーの実用性能の高さに着目し、CO₂レーザーを用いたLCS実験系の整備を進めている。

SAGA-LSにおけるLCSでは、波長10.6 μmのレーザー光と1.4 GeV電子ビームとのhead-on collisionにより、最大エネルギー3.5 MeVのLCSガンマ線が生成される。これに対し、SAGA-LS蓄積リングの運動量アクセプタンスは14 MeVであるため、LCSによる反跳を受けた電子はRFバケットから蹴り出されない。そのためLCSガンマ線生成は、他の放射光利用と共存可能であり、CO₂レーザーの使用は常用のガンマ線生成およびビームエネルギーモニターとしての運用上大きなメリットとなる。またCO₂レーザーは他のレーザーと比較してコスト当たりの出力が優れるため、ガンマ線強度の増大へも有利である。

現在までにレーザー光導入用のミラーチェンバーの蓄積リングへの接続を完了し、LCSビームラインBL01として整備を進めてきた。またBL01整備と平行して、基礎実験用の小型レーザーのビームクオリティの評価、レーザー光学系の検討を行ってきた。本稿ではSAGA-LSにおけるLCSガンマ線生成の準備状況として、LCSビームラインの整備、レーザー光学系のデザインとガンマ線イーロードの評価を報告する。

2. LCS実験レイアウト

図1にLCS実験セットアップの概略を示す。レーザーと電子ビームの相互作用区間は入射用長直線部LS8とした。レーザー光はリング第1セル偏向電磁石BM01の光取り出しポートからリング直線部へ導入する。レーザー光と電子ビームの相互作用領域の長さはLS8前後の四極、六極電磁石部を含め5.5 mである。また上流側の偏向電磁石BM16には、レーザー光軸アラインメントと透過レーザー光の観測のためビューポートを取り付けてある。

レーザー光導入用のミラーチェンバーをリングへ接続し、LCSビームラインBL01の整備を行った。図2にBL01の構成を示す。LCSガンマ線はミラーチェンバー終端の水冷フランジより取り出される。なお

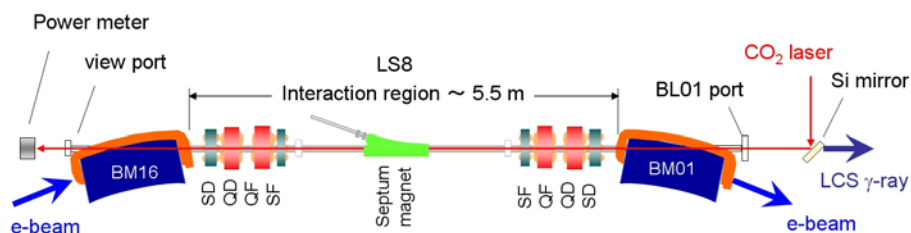


図1: LCS実験レイアウト。

¹ E-mail: kaneyasu@saga-ls.jp

3.5 MeVガンマ線のSiミラーと水冷フランジによる強度減衰率は70%程度と見込まれている。BL01ミラーチェンバー付近の現状を図3に示す。現在までにビームライン構成機器の光焼き出しを終了している。

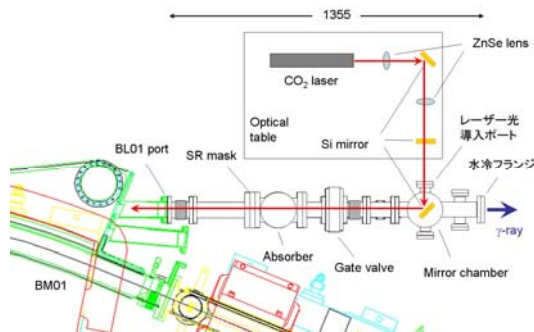


図2：LCSビームラインBL01とレーザー光学系の機器配置。

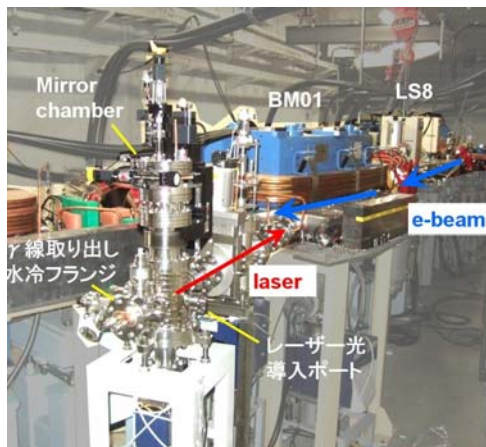


図3：LCSビームラインBL01の状況。

図2に示したように、LCS実験用のレーザーと光学系はリング室内に設置予定である。レーザー光はミラーチェンバーのビューポートからAuコートSiミラー(φ40)を用いてリング直線部へ輸送される。放射光照射による熱負荷対策として、ミラーホルダーは水冷機構を備えている。ミラーの回転分解能は垂直軸周りの回転では1.4 μrad、水平軸回転では0.45 μradである。ガンマ線生成試験は、まず最大出力10 Wの小型CWレーザー(SYNRAD社製 Model48-1)を用いて開始する予定である。レーザーについては単体試験を行い、スリットスキャン法を用いてビームクオリティを評価した。レーザー光学系のデザインでは、実測のビームパラメータを用いてガンマ線イールドを評価している。

3. LCSガンマ線イールドの評価

3.1 光学系デザイン

レーザー光学系には波長10.6 μmの赤外光の透過率に優れるZnSe製レンズを使用する。焦点距離の異なる二枚のレンズ($f = 38.1, 254$)を組みあわせ長直線部LS8中央付近にレーザーを集光し、LCSガンマ線イールドが最大となるようにレーザービームウエスト位置を調整する。なおミラーには赤外光の反射率に優れるAuコートSiミラーを用いる。

図4に現時点で想定している光学系を用いた場合のレーザーと電子ビームサイズの比較を示す。レーザーのビームウエストはLS8中間点より(電子ビーム進行方向)下流側に位置する。後に述べるように、ビームウエストがLS8中間点より0.2 m下流側に位置する場合にガンマ線イールドは最大となる。

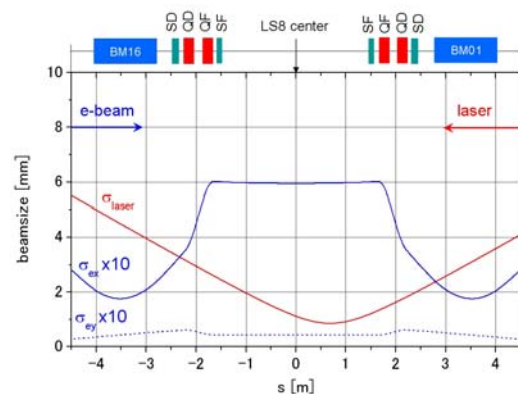


図4：相互作用領域における電子ビームサイズとレーザービームサイズの比較。

3.2 ガンマ線イールド

レーザー光学系の最適化を行うために、LCSガンマ線イールドのビームウエスト位置依存性を検討した。LCSガンマ線イールドは、レーザーと電子ビームの相互作用領域におけるビームサイズからルミノシティを計算して求めた。LCSイベントレート N_γ は、散乱全面積 σ とルミノシティ L の積として、

$$N_\gamma = \sigma L$$

と表わされる。またルミノシティは、電子ビーム、レーザーの双方をCWビームと扱い、かつ横方向にはガウス分布とした場合に

$$L = \frac{c\rho_e\rho_l}{\pi} \int \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ex}^2(z) + \sigma_l^2(z)}} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{ey}^2(z) + \sigma_l^2(z)}} dz$$

と書ける^[10]。ここで ρ_e, ρ_l は電子ビームとレーザー光の長手方向の線密度である。ルミノシティ評価において、電子ビームのTwissパラメータはSAGA-LSリングのデザイン値として、カップリング1%におけるビームサイズを求めた。またレーザービームについてもスリットスキャンで得た実測のビームパラメータ($M^2=1.06, z_0=97.5 \text{ mm}, \sigma_0 = 0.874 \text{ mm}$)から換算

したTwissパラメータを用いた。相互作用領域はLS8前後の四極、六極電磁石部を含めた5.5 mの区間とし、長手方向に積算したルミノシティを求めた。電子ビーム電流を100 mA、レーザーパワーを10 Wとして求めたLCSイベントレートのウェスト位置依存性を図5に示す。LCSガンマ線イールドの増大のためには、LS8中央より下流側にビームウェストが位置するようにレンズ系を調節すればよいことがわかる。LS8中央より0-2 m下流側にウェストが位置した場合には、LCSイベントレートは $5.5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 以上と期待される。現状の光学系ではLCSイベントレートの最大値は $5.9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ であるため、この領域ではレンズ調整はほぼ最適化されていると考えられる。

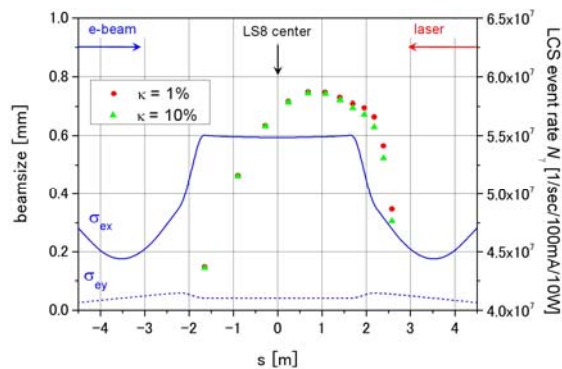


図5：LCSイベントレートのビームウェスト位置依存性。カップリングは1%と10%としてイベントレートを求めた。電子ビームサイズはカップリング1%における値をプロットしている。

電子ビームのカップリングを10%へ増大させた場合についてもLCSイベントレートを見積もった。図5に結果を示す。カップリングの増大によりリング直線部における垂直ビームサイズはおよそ130 μmへ増加する。レーザー光と電子ビームのオーバーラップが増すことでガンマ線イールドも増加するとも考えられるが、ビームサイズの増大により電子密度も減少するため、イベントレートとしてはカップリング1%のケースとの差異は殆どない。

以上の検討に基づき、ミラーチェンバー終端の水冷却フランジより取り出される実効的なガンマ線フラックスを見積もる。LCSイベントレートが $5.5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ の場合に、コリメータによるガンマ線の切り出し角度をエネルギー広がり10%と仮定し、さらにミラーと水冷フランジによる3.5 MeVガンマ線の透過率が30%程度となることから、実効的なガンマ線フラックスとして $2.5 \times 10^6 \text{ photons/sec}$ を得る。よって試験用の小型レーザーによるLCSでも、現状のユーザー運転時の蓄積電流値300 mAでは $7.5 \times 10^6 \text{ photons/sec}$ の準単色ガンマ線フラックスが期待される。

3.3 ビームエネルギー測定精度

LCSガンマ線エネルギースペクトルの高エネルギー

エッジの測定により、蓄積状態の電子ビームエネルギーを決定可能である。SAGA-LS電子蓄積リングにおける電子ビームエネルギーの測定精度を見積もった。数MeV領域のガンマ線エネルギー測定には高分解能の半導体検出器が利用可能である。一般的な検出器を想定してエネルギー分解能(FWHM)を1/1000程度として、ビームエネルギーの測定精度を見積もる。電子ビームのエネルギー広がりを 6.725×10^{-4} (デザイン値)、レーザー光のバンド幅を 3×10^{-3} 、交差角度のズレをジオメトリから許される最大値3 mradで見積もった場合には、エネルギー測定精度は $\Delta E_m/E_e = 1.7 \times 10^{-3}$ となった。この精度はこれまでに報告されたLCSによるビームエネルギー測定の結果^[8,9]と同程度である。要因ごとの測定精度への寄与を表1にまとめる。寄与が最も大きいのはレーザーのバンド幅である。発振波長域の狭いレーザーによるLCSがビームエネルギー測定精度向上へ有効と考えられる。

表1：ビームエネルギー測定精度

要因	精度・分解能	エネルギー測定への寄与 ($E_e = 1.4 \text{ GeV}$)
検出器	5×10^{-4}	0.35 MeV
ビームエネルギーの広がり	6.725×10^{-4}	0.94 MeV
レーザーバンド幅	3×10^{-3}	2.1 MeV
交差角のずれ	$< 3 \text{ mrad}$	$< 1.6 \times 10^{-3} \text{ MeV}$
Total	1.7×10^{-3}	2.3 MeV

4. まとめ

SAGA-LSにおけるLCS実験の準備状況を報告した。入射用の長直線部LS8を使ったLCS実験系をデザインした。現在までにレーザー導入用のミラーチェンバーのリングへの接続を完了し、LCSビームラインBL01の整備を進めてきた。BL01整備と平行して、レーザー光学系のデザイン、小型レーザーの単体試験、LCSガンマ線イールドの評価を行ってきた。今後はリング室内へのレーザー光学系とガンマ線検出器の設置を進め、LCSガンマ線生成試験をまもなく行う予定である。

参考文献

- [1] R.H. Milburn, Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 75.
- [2] O.F. Kulikov et al., Phys. Lett. 13 (1964) 344.
- [3] H. Ohgaki et al., Nucl. Instrum. Meth. A 375 (1996) 602.
- [4] V.N. Litvinenko et al., Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4569.
- [5] K. Aoki et al, Nucl. Instrum. Meth. A 516 (2004) 228.
- [6] K. Kawase et al, Nucl. Instrum. Meth. A 592 (2008) 154.
- [7] R. Klein et al., Nucl. Instrum. Meth. A 384 (1997) 293.
- [8] Ian C. Hsu et al., Phys. Rev. E 54 (1996) 5657.
- [9] R. Klein et al., Proceedings of the EPAC08, pp. 2055-2057.
- [10] T. Suzuki, "General Formulae of Luminosity for Various Types of Colliding Beam Machines", KEK-76-3 (1976).