

CONTINUOUS OPERATION OF THE LASER COMPTON GAMMA-RAY SOURCE AT SAGA-LS

Tatsuo Kaneyasu*, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Koda
SAGA Light Source
8-7 Yayoi gaoka, Tosu, Saga 841-0005

Abstract

A laser Compton scattering (LCS) gamma-ray source was constructed at the SAGA light source facility. Basic concept of the LCS source is high-flux gamma-ray generation in a GeV-class storage ring combined with an infrared high-power laser. To produce high-flux gamma rays in the few MeV region, we used a CO₂ laser with a 10.6 μm wavelength. Head-on collisions between the laser photons and the 1.4 GeV electron beam in the storage ring produce gamma rays up to a maximum energy of 3.5 MeV without affecting the light source performance during a normal user time. We investigated the stability of the gamma-ray flux during continuous operation. The performance of the gamma-ray source and future plans for improving the availability of the gamma rays are reported.

SAGA-LS レーザーコンプトンガンマ線源の連続運転試験

1. はじめに

放射光施設 SAGA Light Source (SAGA-LS) では 1.4 GeV 電子蓄積リングと CO₂ レーザーを用いてレーザーコンプトン散乱 (LCS) ガンマ線の生成実験に取り組んでいる。SAGA-LS LCS ガンマ線源の基本コンセプトは、GeV クラスの電子蓄積リングにおける大出力赤外レーザーを用いた数 MeV 領域の高フラックスガンマ線の生成かつ放射光ユーザー運転との共存である^[1]。数 MeV 領域のガンマ線は原子核物理や天体核物理研究における利用に加え非破壊検査技術への応用も注目されており^[2]、これまで数箇所の施設で LCS ガンマ線の生成実験および利用研究が行われてきた^[3, 4, 5, 6]。SAGA-LS LCS では高フラックスガンマ線を放射光ユーザー運転中に随時利用できる特徴を生かし、各種材料へのガンマ線照射効果の研究や非破壊検査への応用を検討している。

SAGA-LS における LCS では蓄積リングの入射用直線部をレーザーと電子ビームを相互作用区間として活用している。LCS 用レーザーには取り扱いの容易な小型 CO₂ レーザー (波長 10.6 μm, 最大パワー CW 10 W) を採用した。レーザー光と電子ビームの正面衝突によって最大エネルギー 3.5 MeV の LCS ガンマ線が生成される。蓄積リングのエネルギーアクセプタンスはガンマ線エネルギーより十分に大きく、CO₂ レーザーによる LCS はビーム寿命へ影響を与えないため通常の放射光ユーザー運転と共存可能である。現状では最大強度条件 (ビーム電流 300 mA, レーザーパワー 10 W) にて利用可能なガンマ線フラックスは、コリメータ無しで 1×10^7 photons/s 程度であるが、CO₂ レーザーは大出力化も比較的容易であり将来的な大強度化も検討している。

これまでに LCS ガンマ線の特性評価を目的とした基礎実験や、LCS の蓄積リングパラメータ評価への応用を進めてきた^[1]。基礎実験の結果、スペクトル形状や空間分布はシミュレーションとよく一致すること、ガンマ線強度は設計値の 30% 程度であるがレーザー光学系

の調整により強度増加が見込まれること、蓄積ビームへの影響はみられず LCS ガンマ線源の基本動作に問題はないことがわかった。その後、現状の実験系における最大強度の LCS ガンマ線生成に成功し^[7]、さらに 10 時間 (1 日のユーザー利用時間に相当) の連続運転においても LCS ガンマ線は安定供給できることを確認した。既に 2012 年 7 月より、放射光ユーザー運転中に一部応用実験への LCS ガンマ線供給も試験的に行っている。本稿では LCS ガンマ線源の連続運転試験の報告に加え、ガンマ線応用実験の利便性向上を目的とした整備計画についても紹介する。

2. LCS ガンマ線源の概要

図 1 に LCS ガンマ線源の構成を示す。これまで CO₂ レーザーと集光光学系は蓄積リング室内に設置されていたが、加速器運転中に光軸アラインメントと集光調整を容易に行えるようにレーザー関連機器は実験ホール内のレーザーハッチへ移設した。実験ホールのレーザーハッチから遮蔽壁貫通孔を通して輸送されたレーザー光は、ミラーチェーンのレーザー光導入ポートを通り蓄積リングの直線部中央付近へ集光される。電子ビームとレーザー光の相互作用領域の長さはおよそ 5.5 m である。レーザー光は下流側の偏向電磁石のビューポートから取り出され、レーザー光の透過強度はパワーメーターで常時モニターされている。

理想的な集光およびアラインメントを仮定すると、最大強度条件 (ビーム電流 300 mA, レーザーパワー 10 W) にて LCS イベントレートはおよそ 1×10^8 photons/s と見積もられる。ただしミラーやフランジによる強度減衰があるため、検出器へ到達するガンマ線のフラックスは真空中のイベントレートの 20% 程度である。LCS ガンマ線はビームライン末端の水冷フランジから取り出され応用実験に供給される。検出器位置におけるガンマ線の水平・垂直ビームサイズはそれぞれ 2.1, 1.1 mm (rms) である。図 2 に BGO シンチレーション検出器 (結晶サイズ 2 インチ) を用いて測定したガンマ線スペクトルの例を示す。ガンマ線スペクトルは最大エネルギー

* kaneyasu@saga-ls.jp

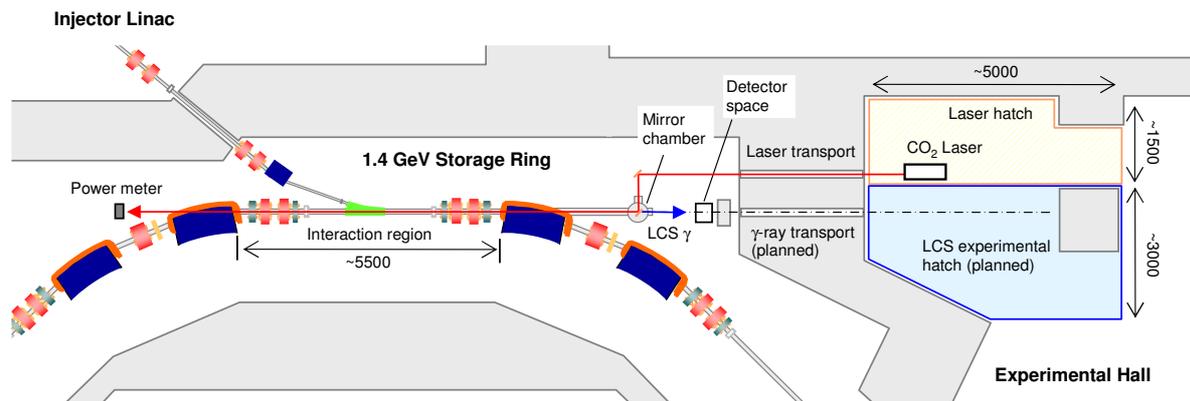


図 1: LCS ガンマ線源の機器構成.

の 3.5 MeV 近傍まで連続的な分布を示しているが、これはコリメータ等でガンマ線の取り込み角を制限していないためである。シンチレーション検出器による光子計数が困難な高フラックス領域では、ガンマ線の強度評価は線量測定に基づいて行っている [7]。イオンチェンバータイプのサーベイメータを用いた線量測定により、 10^7 photons/s オーダーのガンマ線フラックスが測定可能である。

現状ではガンマ線の応用実験は蓄積リング室内で行っている。そのため、放射光ユーザー運転中にはガンマ線実験スペースへ立ち入ることができない。またサンプルや検出器を設置可能なスペースは $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 程度に限られており、多様なガンマ線応用実験を実現するためには実験環境の整備が必須である。そこでガンマ線応用の利便性向上を目的として、LCS ガンマ線の実験ホールへの取り出しと実験ハッチの整備を計画している。

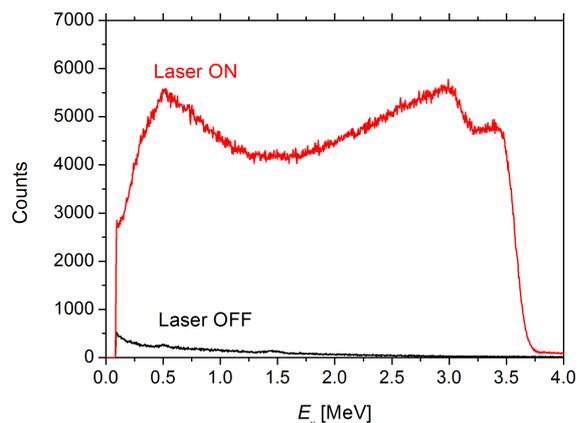


図 2: BGO シンチレーション検出器で測定したガンマ線スペクトル。ビーム電流は 2 mA, レーザーパワーは 1.5 W.

3. 連続運転試験

現在、SAGA-LS 光源加速器のユーザー運転は一日一回の入射で行われており、初期蓄積電流はおおよそ 300 mA, ユーザー利用時間は 10.5 時間である。LCS ガンマ線源の長時間安定性および蓄積ビームへの影響を調査する

ため、ユーザー運転と同等の条件で LCS ガンマ線源の連続運転スタディを行った。ガンマ線源の運転は 10 時間連続で行い、その間レーザーパワーは 10 W に固定した。LCS ガンマ線のフラックスはイオンチェンバータイプのサーベイメータを用いて測定した(コリメータ等による取り込み角制限は無い)。運転試験中はガンマ線強度と各種ビームパラメータのロギングに加え、リング真空、透過レーザーパワー、レーザー導入用 BaF₂ ビューポートの表面温度をモニターした。

図 3 に測定結果の一例を示す。検出器位置におけるガンマ線フラックスは最大でおおよそ 1×10^7 photons/s である。レーザーパワーの揺らぎ(最大 $\pm 10\%$)によってガンマ線強度は変動するものの、ビーム電流の減衰にほぼ比例してガンマ線フラックスは低下している。測定中にガンマ線強度が一時的に数箇所低下している部分は最下流ミラー(ミラーチェンバー内のミラー)の調整作業によるものである。最下流ミラーには偏向電磁石からの放射光が常時照射されるため、ミラーの熱変形によってレーザー光軸がずれて LCS イベントレートが低下する。数回の連続運転試験の結果、数時間に一回程度、ミラーの角度を微調整することでビーム電流に比例したガンマ線フラックスが保たれることがわかった。

LCS ガンマ線源の連続運転中に、蓄積ビームのパラメータやリング真空に LCS 由来の変動は見られなかった。またレーザー導入用ビューポートについても温度上昇や窓材の変質などの異常は無かった。図 3 に示したデータでは it の急落が発生しているが、その他のビームパラメータやリング真空に異常は無く再現性も無いことから、これは LCS 由来ではなく偶発的な現象と考えている。連続運転スタディを数回繰り返し、蓄積ビームへ影響を与えずに LCS ガンマ線は継続して生成可能なことを確認した後、2012 年 7 月より放射光ユーザー運転中に一部応用実験への試験的なガンマ線供給を開始した。

試験運転スタディ(10 時間連続運転)とユーザー運転中の LCS 実験(11 時間連続運転)におけるガンマ線フラックスを図 4 に示す。フラックスはビーム電流と透過レーザーパワーの積に対してプロットしている。いずれのデータにおいても、ガンマ線フラックスは概ねレーザーパワーとビーム電流の積に対してリニアである。Run #1 のみ若干リニアリティが劣るのは、運転中

に最下流ミラーを全く調整しなかったためミラーの熱変形によってレーザー光軸と電子ビームのオーバーラップが徐々に悪化したことによると考えられる。図に示したデータのうち、Run #4 はレーザー機器の移設後に実施したユーザー運転中のガンマ線照射実験の結果である。Run #4 ではその他の測定に比べフラックスが増加している。これはレーザー機器の移設によって光軸アラインメントと集光位置の調整が容易になり、電子ビームとレーザー光のオーバーラップが改善されたためと考えている。しかしながらガンマ線フラックスは設計値の40%程度にとどまっており、フラックス増加のためにはレーザー光学系のさらなる調整が必要である。レーザー光と電子ビームのオーバーラップを最適化するため、エッジ放射を利用した光軸アラインメント手法を検討している。

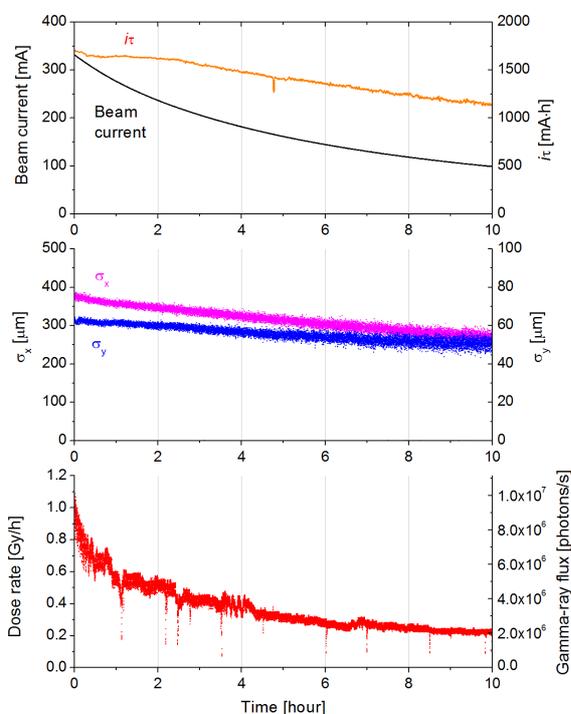


図 3: 連続運転試験中のガンマ線強度とビームパラメータ。上段) 蓄積ビーム電流と it , 中段) 電子ビームサイズ, 下段) ガンマ線のビーム照射野内線量とフラックス。

4. 今後の整備計画

ガンマ線応用実験の利便性向上を目的として、実験ホールへのガンマ線取り出しと実験ハッチ建設の準備を進めている。実験ハッチの建設により、ガンマ線の利用スペースが拡大されるだけでなく、加速器運転中の実験準備も可能となるため、ガンマ線応用実験の利便性は著しく向上することが期待される。実験ハッチの機器構成やインターロックシステムの基本設計は既に終了しており、2012 年度秋のシャットダウン時期に実験ハッチを建設予定である。なおガンマ線実験ハッチの本格的な運用は 2013 年度を予定している。

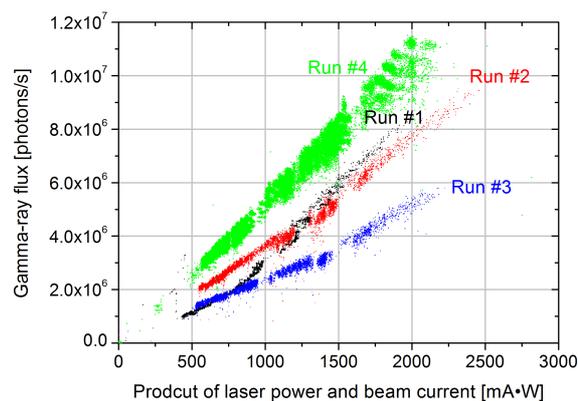


図 4: LCS ガンマ線源の連続運転中のガンマ線フラックスとビーム電流と透過レーザーパワーの積の関係。

5. まとめ

SAGA-LS では、通常の放射光ユーザー運転と共存可能な LCS ガンマ線源の開発に取り組んできた。LCS ガンマ線源は 1.4 GeV 電子蓄積リングと CO₂ レーザーから構成され、電子ビームとレーザー光の正面衝突により最大エネルギー 3.5 MeV のガンマ線が生成される。検出器位置におけるガンマ線フラックスは最大強度条件でおよそ 1×10^7 photons/s である。

ガンマ線フラックスの長時間安定性とビームへの影響を調査するため、ユーザー運転と同等の条件でガンマ線源の連続運転試験をおこなった。ガンマ線フラックスは概ね蓄積ビーム電流に比例しており、長時間連続運転においてもガンマ線は安定供給が可能ながわかった。また LCS は蓄積ビームやリング真空へ影響を与えないことが確認された。2012 年 7 月より試験的にユーザー運転中の LCS ガンマ線応用実験を開始した。現状ではガンマ線の応用実験は蓄積リング室内の狭いスペースで行われているが、ガンマ線応用の利便性を向上させるために、2012 年度中の実験ハッチ整備に向けて準備を進めている。

参考文献

- [1] T. Kaneyasu, et. al., Nucl. Instr. and Meth. A 659 (2011) 30.
- [2] J. L. Tain, Synchrotron Radiation News 22 (2009) 3.
- [3] H. Ohgaki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 455 (2000) 54.
- [4] S. Amano, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 602 (2009) 337.
- [5] Y.K. Wu, et al., Proc. of PAC'99, p. 3181.
- [6] Y. Taira, et. al., Nucl. Instr. and Meth. A 637 (2011) S116.
- [7] T. Kaneyasu, et. al., Proc. of IPAC'11, p 1476.