

コンパクト ERL でのレーザーコンプトン散乱光源実証実験 DEMONSTRATION OF LASER COMPTON-SCATTERED PHOTON SOURCE AT THE CERL

永井良治^{*A)}、羽島良一^{A)}、静間俊行^{A)}、森道昭^{A)}、
赤木智哉^{B)}、小菅淳^{B)}、本田洋介^{B)}、荒木栄^{B)}、照沼信浩^{B)}、浦川順治^{B)}
Ryoji Nagai^{*A)}、Ryoichi Hajima^{A)}、Toshiyuki Shizuma^{A)}、Michiaki Mori^{A)}、
Tomoya Akagi^{B)}、Atsushi Kosuge^{B)}、Yosuke Honda^{B)}、Sakae Araki^{B)}、Nobuhiro Terunuma^{B)}、Junji Urakawa^{B)}
^{A)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Accelerator and laser technologies required for laser Compton scattering (LCS) photon source based on an energy-recovery linac (ERL) have been developed at the Compact ERL (cERL) facility. A high-flux, energy tunable, and monochromatic photon source such as the ERL-based LCS photon source is necessary for nondestructive assay of nuclear materials. For the demonstration of the ERL-based LCS photon generation, a laser enhancement cavity was installed at the recirculation loop of the cERL. The electron beam energy, the laser wavelength, and the collision angle are 20 MeV, 1064 nm, and 18 deg., respectively. The calculated maximum energy of the LCS photons is about 7 keV. A silicon drift detector (SDD) with active area of 17 mm² placed 16.6 m from the collision point was used for observation of the LCS photons. As a result of the measurement, the flux on the detector, central energy, and energy width of the LCS photons were obtained as 1200 /s, 6.91 keV, and 81 eV, respectively.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構 (JAEA) では核不拡散と核セキュリティのために原子核共鳴散乱を利用した非破壊核種分析システムの開発を進めている。この非破壊核種分析システムのカギとなる技術の一つが、高強度、エネルギー可変、準単色の γ 線源である。我々は、エネルギー回収型加速器 (ERL) とレーザー技術を基盤としレーザーコンプトン散乱 (LCS) による γ 線源をこのシステムに用いることを提案している。LCS- γ 線源では、電子ビームのエネルギー、レーザーの波長、衝突角度を変えることで、 γ 線のエネルギーを選択的に変化させられる。さらに、LCS で生成した γ 線の一部を小さな径のコリメータにより切り出すことで、 γ 線のエネルギー幅を狭くできる。このように LCS- γ 線源はエネルギー可変性、狭いエネルギー幅、小さな発散角といった他の γ 線源にはない特徴を有する。

高強度、高輝度の γ 線を LCS により生成するためには、低エミッタンスかつ大電流の電子ビームと高強度のレーザーが必要である。ERL は低エミッタンスかつ大電流の電子ビームを生成するには最適の加速器であり^[1]、高強度のレーザーはレーザーエンハンスメント共振器により得られる。高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、JAEA、国内の大学、研究機関の共同研究チームにより KEK において、ERL を基盤とした光源のための試験加速器であるコンパクト ERL (cERL)^[2] の建設、試験を進めており、この加速器にモードロックレーザー及びレーザーエンハンスメント共振器を設置し LCS 光源の実証試験を行った。ここでは、その実証試験の詳細について報告する。

Table 1: Properties of the Electron Beam

Energy [MeV]	20
Bunch charge [pC]	0.36
Bunch length [ps, rms]	2
Spot size [μ m, rms]	30
Emittance [mm mrad, rms]	0.4
Repetition Rate [MHz]	162.5

2. 電子ビームおよびレーザーの諸元

cERL は光陰極 DC 電子銃、常伝導バンチャ空洞、超伝導入射リニアック、3 台の偏向電磁石による合流部、超伝導主リニアック、そして、周回ビーム軌道から構成される。バンチャ電荷 0.36 pC、バンチャ長 3 ps の電子ビームが 162.5 MHz の繰り返しで、加速電圧 390 kV の光陰極 DC 電子銃で生成される。cERL の本来の電子ビームの繰り返しは 1300 MHz であったが、LCS 光源実証実験のために、レーザーの繰り返し周波数と同じ 162.5 MHz に変更した。電子銃で生成した電子ビームは超伝導入射リニアックによって、2.9 MeV まで加速され、3 台の偏向電磁石によって周回軌道へと合流し、超伝導主リニアックによって 20 MeV まで加速され、レーザーとの衝突点まで導かれる。合流点での電子ビームはビームサイズ約 30 μ m まで収束し、バンチャ長は約 2 ps である。レーザーと衝突した後の電子ビームは再び超伝導主リニアックに減速位相で入射し、電子ビームのエネルギーは RF エネルギーへと変換され、この回収された RF エネルギーは次の電子ビームの加速へと再利用される。衝突点で LCS 光源に利用される電子ビームの主な特性を Table 1 にまとめて示す。

コンプトン散乱の衝突断面積は非常に小さいので、高強度、高輝度 LCS 光源を実現するためには衝突に寄与しなかったレーザー光を効率的に繰り返し利用すること

*nagai.ryoji@jaea.go.jp

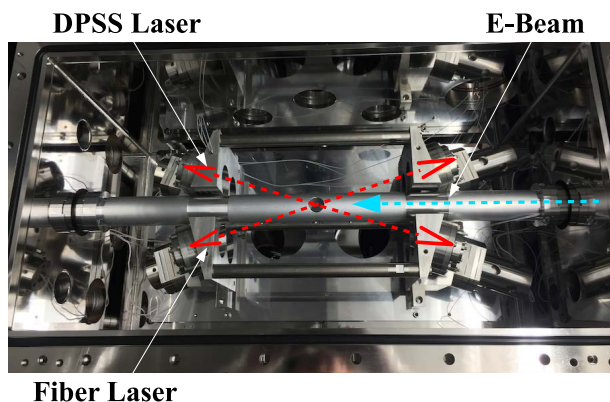


Figure 1: The enhancement cavity, installed on the electron beam line.

が重要であるが、これはレーザーエンハンスメント共振器を導入することで実現される。レーザーエンハンスメント共振器は高フィネスのファブリペロー型光共振器であり、外部から入射されるモードロックレーザー光を蓄積する。ここでの LCS 光源では高安定性と衝突点での小さな集光サイズを実現するために 4 枚ミラーの共振器を採用する^[3]。Fig. 1 に示すように 2 組の 4 枚ミラー共振器を共通のジンバルに設置する構成を採用している。ただし、それぞれの共振器は個別に調整可能である。

ERL を駆動源とした LCS 光源の実証実験のために、2 種類のレーザーを準備し、上述の 2 つの共振器をそれぞれのレーザー光蓄積に用いた。1 つは市販品のダイオード励起固体 (DPSS) レーザー (Time-Bandwidth 社製、ARGOS) であり、以下の性能を持つ：最大平均出力 45 W、波長 1064 nm、繰り返し周波数 162.5 MHz、パルス長 5.65 ps。DPSS レーザーは光共振器と共に、可動光学テーブル上に設置された。その可動光学テーブルは衝突点での電子ビームに対するレーザーの位置を調整するためのものである。もう一方のレーザーは高出力モードロックファイバーレーザーであり、JAEA 関西研究所で開発されたものである^[4]。そのファイバーレーザーはモードロック発振器と 4 段の増幅器で構成され、それらすべてのレーザー増幅材料として Yb ドープ光ファイバを用いており、以下の性能を持つ：最大平均出力 100 W、波長 1040 nm、繰り返し周波数 162.5 MHz、パルス長 2 ps。このファイバーレーザーは加速室外部に設置され、約 20 m のレーザー導波路により衝突点まで導かれている。この非常に長い導波路のために、レーザーの位置が不安定になり、レーザーエンハンスメント共振器への入射効率が劣化し LCS 光源としての性能に大きく影響することが分かった。ファイバーレーザーについては、今後、位置フィードバック装置などにより、位置安定性の向上を図って行く予定である。本報告書では、DPSS レーザーを用いた LCS 光源実証実験の結果について述べる。衝突点でのレーザー光の主な特性を Table 2 にまとめて示す。

3. LCS 光子生成実験

LCS 光源実証試験における電子ビームエネルギー、レーザー波長、衝突角はそれぞれ、20 MeV、1064 nm、

Table 2: Properties of the Enhanced Laser Beam

Center wavelength [nm]	1064
Pulse energy [μ J]	64
Pulse length [ps, rms]	5.65
Spot size [μ m, rms]	30
Collision angle [deg]	18
Repetition rate [MHz]	162.5

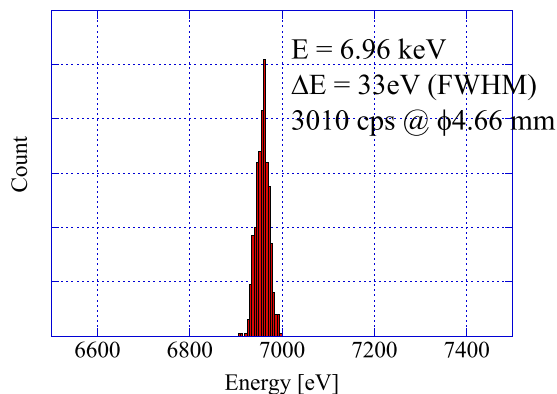


Figure 2: Energy spectrum of the calculated LCS photon at the SDD.

18 deg であり、LCS 光のエネルギーは約 7 keV となる。空気による減衰が大きいので、LCS 光は真空中に排気されたビームラインを通して、実験ハッチへと導かれ、シリコンドリフト検出器 (SDD) を用いて観測した。LCS 衝突点から SDD までの距離は 16.6m であり、SDD の有効面積は 17 mm² である。ベリリウム窓を LCS 光ビームラインの加速器側と実験ハッチ側の両側に設置し、加速器と LCS ビームラインの真空の切り分け、LCS 光の大気中への取り出しに用いた。実験ハッチ中でのベリリウム窓から SDD までの距離は 12 cm であった。その 2 枚のベリリウム窓と空気 12 cm の 7 keV に対する透過率は約 64.8 % である。SDD での LCS 光フラックスは CAIN^[5] による見積もりでは、 3.01×10^3 /s であった。Fig. 2 に CAIN による計算により得られた LCS 光のエネルギースペクトルを示す。中心エネルギーは 6.96 keV であり、FWHM エネルギー広がり 33 eV であった。

衝突点でのレーザーと電子ビームの位置合わせは、まず、スクリーンモニターでレーザーと電子ビームを観測しながら位置調整を行い、さらに、LCS 光の発生量が最大になるように可動光学テーブルを動かしてレーザーの位置を調整した。衝突のタイミング (レーザーの位相) については、まず、加速器の高周波信号とレーザーとを非同期状態での LCS 光の観測を行い、衝突する位相を探索した。その時の様子を Fig. 3 に示す。横軸がレーザーの位相であり、縦軸が LCS 光のエネルギーである。その結果、特定の位相、測定エネルギーに集中して発生する LCS 光の信号が観測でき、衝突する位相が決定できた。次に、レーザーの位相を加速器の高周波信号と同期し、Fig. 3 に示す位相でロックした状態で、LCS 光の観測を行い、さらに、詳細なレーザー位相のスキャンを行い LCS 光が最大となる位相を見出した。レーザーの位相を合わせた状態で SDD で観測したエネルギースペ

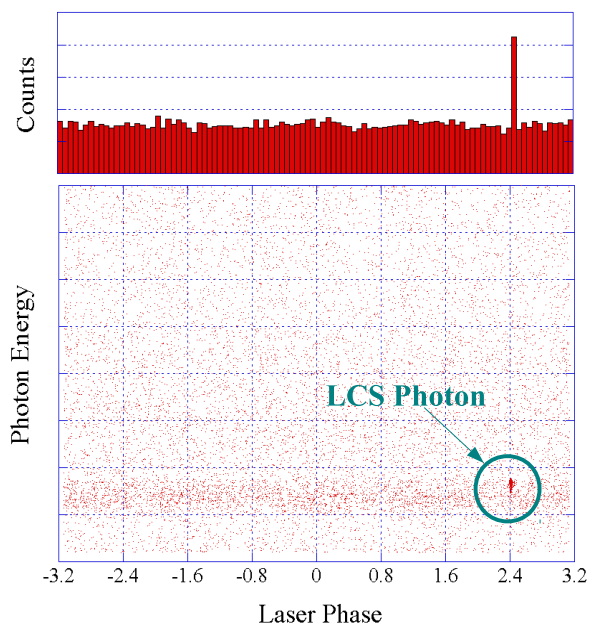


Figure 3: Detected photon plot in an asynchronous state of the laser and the electron beam.

クトルを Fig. 4 に示す。その結果、LCS 光の発生数は 1200 /s、中心エネルギー 6.91 keV、FWHM エネルギー広がり 173 eV であった。光子発生数は CAIN による見積りの 40 % であった。Fe-55 の 5.9 keV の光子を用いて計測した SDD のエネルギー分解能は 153 eV であるので、LCS 光のエネルギー広がり は 81 eV と見積もることができる。

20 MeV の電子ビームの制動放射によるバックグラウンドノイズは、Fig. 4 において、X 線ピークより高いエネルギーで見られるもので、非常に小さい。X 線ピークより低いエネルギーで見られるノイズは SDD での LCS 光子の不完全な吸収によるものである。以上のように、cERL で得られた LCS 光は非常に良い S/N のエネルギースペクトルが得られており、様々な利用実験での活用が期待される。LCS 光子の利用実験の実証としてイメージング実験^[6]と蛍光 X 線分析 (XRF)^[7]の実験を行った。詳細については、それぞれの参考文献を参照されたい。

Fig. 4 のスペクトルが得られた時の、衝突点での、LCS 全光子数は 4.1×10^7 /s と見積もられ、この時の電子ビームの平均電流は 57.7 μ A であった。cERL の電子ビームの最大平均電流は、現在の 100 μ A から 10 mA まで増強する計画である。また、衝突点でのレーザーのパルスエネルギーについても、レーザーエンハンスメント共振器の性能を改善することで、増強していく計画である。これらの努力により、cERL での LCS 光を用いた実験の適用範囲を広げることで、様々な、利用実験への寄与が期待される。

4. まとめ

cERL における LCS 光源の実証実験を行い、中心エネルギー 6.91 keV、エネルギー広がり 81 eV の生成に成功した。これは ERL とエンハンスメント共振器を用い

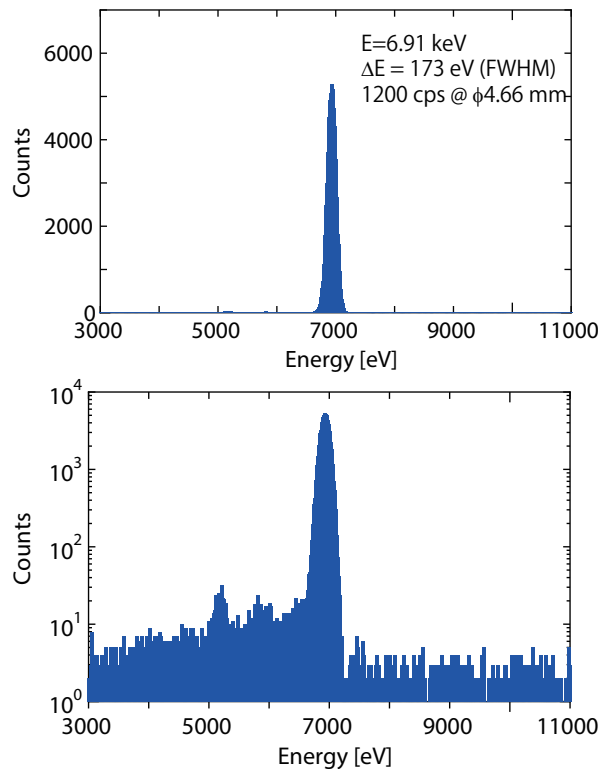


Figure 4: Energy spectrum of the observed LCS photon at the SDD with a linear scale (top) and a logarithmic scale (bottom).

た初めての LCS 光源の実証実験である。電子ビームの平均電流 57.7 μ A での、衝突点での全 LCS 光子発生数は 4.1×10^7 /s であった。本実験により、エネルギー回収型リニアックとエンハンスメント共振器を用いた LCS 光源の技術は実証され、近い将来の高強度 γ 線源^[8]や小型 X 線源^[9]への適用が期待される。

なお、本研究の一部は「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」及び、光・量子融合連携研究開発プログラム「小型高輝度 X 線源イメージング基盤研究開発」によるものである。

参考文献

- [1] R. Hajima et al., Rev. Acc. Sci. and Tech. 3, 121-146 (2010).
- [2] S. Sakanaka et al., Proc. of IPAC2013, 2159-2161 (2013).
- [3] T. Akagi et al, Proc. of IPAC2012, 2645-2647 (2012).
- [4] M. Mori et al, Proc. of CLEO-PR-2013 and OECC-2013, paper: MD1-4 (2013).
- [5] P. Chen et. al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 355, 107-110 (1995).
- [6] A. Kosuge et. al., Proc. IPAC-2015, TUPWA066 (2015).
- [7] T. Shizuma et. al., Proc. the 37th Annual Meeting of European Safeguards Research & Development Association (ESARDA) (2015).
- [8] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. and Tech., 45, 441-451 (2008).
- [9] R. Hajima et al., Proc. IPAC-2015, WEPMA056 (2015).