

レーザーコンプトン散乱光源用ビームラインモニタの開発 DEVELOPMENT OF THE BEAMLINE FLUX MONITOR FOR THE LASER COMPTON-SCATTERED PHOTON SOURCE

永井良治^{*A)}、羽島良一^{A)}、森道昭^{A)}、静岡俊行^{A)}、赤木智哉^{B)}、小菅淳^{B)}、本田洋介^{B)}、浦川順治^{B)}

Ryoji Nagai^{*A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Michiaki Mori^{A)}, Toshiyuki Shizuma^{A)},

Tomoya Akagi^{B)}, Kosuge Atsushi^{B)}, Honda Yosuke^{B)}, Junji Urakawa^{B)}

^{A)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In order to demonstrate accelerator and laser technologies required for a laser Compton scattering (LCS) photon generation, a LCS photon source is under construction at the Compact ERL (cERL). We considered the flux monitors for the adjustment LCS photon source. A thin scintillator detector and a silicon drift detector are employed as flux monitors and are installed at the upstream part of the LCS beamline. The background signal level due to the bremsstrahlung of the electron beam was measured by a CsI(pure) scintillator. In the result of the measurement, the background signal is acceptable level for the flux monitors.

1. はじめに

放射光、レーザーコンプトン散乱 (LCS) などの高輝度、高強度の光源を実現するためには、低エミッタンスかつ大電流の電子ビームが必要である。低エミッタンスかつ大電流の電子ビームを生成するための加速器としてエネルギー回収型加速器 (ERL)^[1] は最適の加速器であり、ERL は光源用加速器として期待されている。コンパクト ERL という ERL 試験加速器の建設、コミッションング^[2] を国内の大学・研究機関の協力体制のもと、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において進めている。日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、 γ 線を利用した核セキュリティのための非破壊核種分析システムの開発を行っており、そのための γ 線源として ERL で生成した電子ビームを用いた LCS 光源を提案している^[3]。

このような LCS 光源を実現するために十分な加速器技術およびレーザー技術を有することを実証するために、コンパクト ERL での LCS 光源の建設を進めている。LCS 光源ではレーザーと電子ビームを衝突させるための調整初期の微弱な LCS 光を如何に検出するかが成功の鍵である。そこで、LCS 光源の発光点に出来るだけ近い位置に LCS 光のモニタを配置して調整初期の微弱な LCS 光を捉え、電子ビームおよびレーザー光の調整を行う予定である。ここでは、この LCS 調整のためのフラックスモニタの検討・開発状況について報告する。また、LCS のためのビームラインは加速器の直線部を真っ直ぐに見通す位置であるので、電子ビームの制動放射によるバックグラウンドによりフラックスモニタが機能しなくなる可能性があるため、その位置でのバックグラウンド強度の計測も行ったので、その結果についても報告する。

2. LCS 用ビームライン

LCS 光源はコンパクト ERL の周回ビームライン直線部に設置する計画であり^[4]、ここで発生した光子を実

験室まで輸送するためのビームラインは直線部終端の偏向電磁石の外側、直線部の延長線上に設置される。この光源の典型的な電子ビームのエネルギーは 20 MeV であり、波長、約 $1 \mu\text{m}$ のレーザー光と 18 deg の角度で衝突させるので、LCS 光のエネルギーは約 7 keV である。7 keV の光子の空気の透過率は 1 m で 16.9 % であるので、この光子を加速器シールド外に設ける実験室まで輸送するには真空中を輸送する必要がある。

そのビームラインの概略を Fig. 1 に示す。LCS 用ビームラインは二つのベリリウム窓、ビームシャッター、フラックスモニタから構成される。二つのベリリウム窓は厚さ 0.2 mm 以下、純度 99 % 以上、有効径 $\phi 50 \text{ mm}$ であり、ビームラインの両端に設置され、一つは加速器とビームラインの間で、もう一つは実験室側である。ベリリウム窓の透過率は不純物により低下するが、ここで使用する窓の約 7 keV の光子に対する透過率は約 85% である。ビームシャッターはビーム取り出し口から実験室へと漏れ出る放射線および LCS 光を遮蔽するものであり、SUS のケースに鉛を充填した厚さ 20 cm のものである。薄いシンチレータとシリコンドリフト検出器の 2 種類の検出器を加速器側のベリリウム窓の直後に LCS 調整用のフラックスモニタとして配置する。シンチレータ検出器の有効径は $\phi 30 \text{ mm}$ であり、LCS 衝突点からの距離は約 8.3 m である。

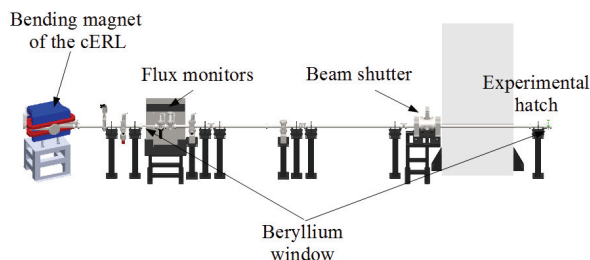


Figure 1: Schematic drawing of the beamline for the LCS photon source.

シンチレータ検出器に入射する LCS 光を Table 1 に

*nagai.ryoji@jaea.go.jp

示す条件で CAIN^[5] を用いて見積もった。これらのパラメータはこの LCS 光源の最終的なパラメータ^[4]ではなく、光源の調整初期状態で想定されるパラメータである。電子ビームのエミッタンスについては、これまでのコミッショニングの結果から 0.3 mm-mrad 程度が期待されるが、加速器のオプティクスが十分に調整されないことを考慮して 0.5 mm-mrad とした。また、レーザー光を蓄積する共振器の調整を容易にするために、まずパルス長の長い 40W 程度のレーザーを用い、その後に 100W のファイバーレーザーを用いる予定である。さらに、光共振器のエンハンスメントは 2550 倍が設計値であるが、十分に調整されないことを考慮して 1000 倍として LCS 光の見積もりを行った。

Table 1: Parameters of the LCS Photon Source at the Early Phase

Parameters of the electron beam	
Energy [MeV]	20
Bunch charge [pC]	0.77
Bunch length [ps, rms]	3
Spot size [μm , rms]	50
Emittance [mm mrad]	0.5
Parameters of the laser	
Wavelength [nm]	1030
Average power [W]	40
Enhancement factor	1000
Repetition rate [MHz]	162.5
Pulse duration [ps, rms]	13
Collision angle [deg]	18
Spot size [μm , rms]	50

シンチレータ検出器に入射する LCS 光のフラックスは、CAIN での見積もりの結果にベリリウム窓の透過率約 85% を加味すると、 2.07×10^6 ph/s である。また、CAIN で得られたエネルギースペクトルは Fig. 2 に示すようであり、中心エネルギーは 7.18 keV、FWHM スペクトル幅は 0.043 keV であった。

3. LCS 光用フラックスモニタ

LCS により発生した光子のフラックスモニタとしては、薄いシンチレータを用いたシンチレータ検出器とシリコンドリフト検出器の 2 種類の検出器を準備する。まず、シンチレータ検出器について述べる。シンチレータ検出器において採用するシンチレータとして LYSO(Ce)、GAGG(Ce)、YAP(Ce) の 3 種類について主に検討した。それぞれのシンチレータの特性^[6] について、Table 2 にまとめた。ここで、重要となる主な特性は発光量と減衰時間である。また、入手の簡便さ（コスト、納期）についても考慮した。発光量について比較してみると GAGG(Ce) が最も優れているが、発光波長が 520 nm であるので、光電子増倍管を用いた場合には光電面感度のピーク（420 nm 付近）からずれおり、感度としては LYSO(Ce) とほぼ同等である。減衰時間については、LCS

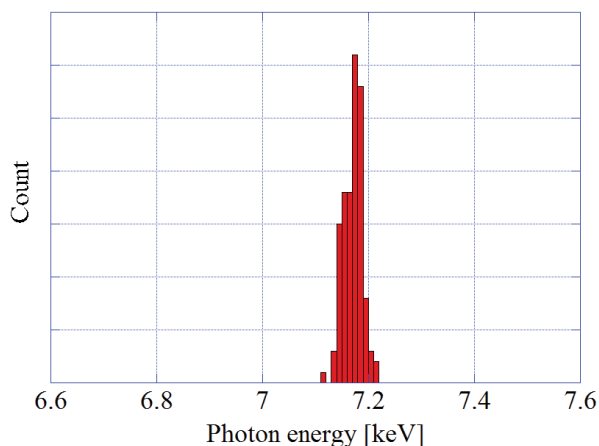


Figure 2: Estimated energy spectrum of the LCS photon beam at the flux monitor.

光が MHz 程度で入射すると考えられることから、100 ns 程度以下である必要があり、3 種類ともこれを満たしている。LYSO(Ce) については自己放射能によるバックグラウンドもあるが、ここではシンチレータを薄くするために、自己放射能によるバックグラウンドは 100 Bq 程度であり、問題にならない。入手の簡便さについては LYSO(Ce) はコストがやや高く、製作に時間を要する。その他二つはほぼ同程度であるが、GAGG(Ce) は近年 PET などでの利用を目的に開発されたシンチレータであり、今後さらに流通していく可能性がある。以上のことから、シンチレータとして GAGG(Ce) を採用することとし、以下の検討を進めた。

Table 2: Physical Properties of the Scintillation Materials

Material	Photon yield	Decay time	Wavelength
LYSO(Ce)	32000 [/MeV]	41 [ns]	420 [nm]
GAGG(Ce)	65000 [/MeV]	88 [ns]	520 [nm]
YAP(Ce)	19700 [/MeV]	28 [ns]	347 [nm]

電子ビームの制動放射の高エネルギー部分の影響を避け、LCS で発生した数 keV 程度の光子のみに感度を持たせるために、シンチレータの厚さを 0.2 mm とした。厚さ 0.2 mm の GAGG(Ce) に光子が入射した際の反応効率を EGS5^[7] を用いて計算した。その結果を Fig. 3 に示す。20 keV の光子に対しては 96% で反応するが、200 keV に対しては 3.3% であり、高エネルギーの光子に対してはほとんど反応しないことが、この結果から分かる。通常のシンチレータ検出器に光電子増倍管を直結する形で使用するが、ここでのモニタは真空ダクト中に抜き差しできる構造である必要があるので、電子ビームのスクリーンモニタと同様な構造として、カメラを配置する位置に光電子増倍管を設置する構造とした。Fig. 4 にシンチレータ検出器の構造を示す。ビームパイプの内径は 30 mm であり、これを完全に覆うために $\phi 50$ mm のシンチレータをビーム軸に対して 45 度で配置する構造とした。シンチレータで発生した光を効率よく捕集するために、シンチレータの中心から 60 mm の位置に光電子増倍管（浜松ホトニクス製 H7195、有

効径 $\phi 46$ mm) を配置する。ここでは単純に光電子増倍管までの距離を近づける構造としたが、この方法で十分な捕集効率が得られない場合は、ミラーによる集光やライトガイドによる輸送などの方法も考えられる。

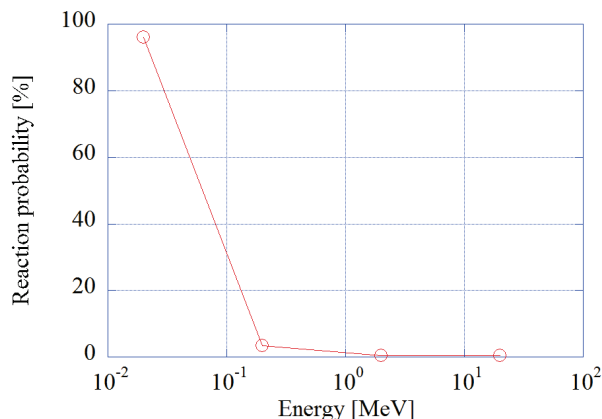


Figure 3: Reaction probability of the GAGG(Ce) scintillator.

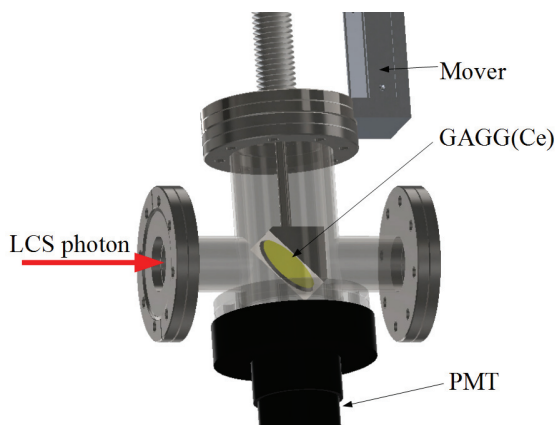


Figure 4: Schematic drawing of the scintillator detector.

このシンチレータ検出器では LCS で生成した光子を計数することを目的としており、ほぼ 100 % の計数効率であることが望ましい。ここで言う、計数効率 100 % とはシンチレータに LCS 光子 1 個が入射した時に、光電子増倍管の第 1 に 1 個以上の電子が到達することである。波高分析によるエネルギースペクトルを得るには、LCS 光子 1 個の入射に対して、統計的に十分な数の電子が第 1 に到達する必要があるが、このモニタでは、光子の数が分かれば十分なので、計数効率だけについて議論する。シンチレータに LCS で生成した光子 (エネルギー: 7.18 keV) が入射すると、466 個の光子が発生する。光電子増倍管の占める立体角の割合は 3.3 % であるので、光電子増倍管に入射する光子は 15 個となる。光電子増倍管の検出効率は光電面の量子効率とダイノードの収集効率の積である。520 nm の光子に対する H7195 の量子効率は 11 % であり、収集効率は一般的に 60-90 % であると言われているので、光電子増倍管の検出効率は少なくとも 6.6 % 以上である。従って、光電子増倍管で発生して増幅される電子は 0.99 個以上

となるので、シンチレータ検出器で、ほぼ 100% の効率で計数できる。

この他にシリコンドリフト検出器をフラックスモニタとして使用する。シリコンドリフト検出器は高計数率、高分解能で X 線の検出が可能な検出器^[8]であり、市販品の UHV 仕様の製品 (Amptek 製 FAST SDD) を使用しシンチレータ検出器の場合と同様に、真空中においてビームライン上から抜き差しできる構造とし、真空中に挿入するロッドの先端に検出器を取り付ける。シリコン素子の大きさは 5×5 mm であり、厚さは 0.5 mm である。シリコンドリフト検出器に入射する LCS 光のフラックスは、シンチレータ検出器との面積比から、 7.32×10^4 ph/s である。FAST SDD の最大計数率は 1 Mcps 以上であるので、1 桁以上の余裕があり、調整により LCS 光がここでの見積もり以上に多くなって計測可能である。

4. 制動放射によるバックグラウンド

電子ビームの制動放射によるバックグラウンドによるパイルアップや s/n などにより、フラックスモニタが機能しなくなることが考えられるので、コンパクト ERL において、バックグラウンドの計測を行った。LCS 光フラックスモニタを設置する位置とほぼ同じ位置に CsI(pure) シンチレータ検出器を設置して計測した。CsI(pure) の大きさは $5 \times 5 \times 10$ cm であり ^{60}Co を用いてエネルギーの校正を行った。LCS 光源を見込む方向以外からの放射線の影響を避けるため検出器周辺を鉛約 20 cm で遮蔽した。フラックスモニタを設置した際も同様の遮蔽を施す計画である。バックグラウンドとして問題となるのは制動放射の低エネルギー部分であるが、加速器側の真空ダクト終端はガラス製の窓で閉じてあるので、制動放射の低エネルギー部分を直接計測することはできない。そこで、制動放射全体のエネルギースペクトルを計測し、その形状から、低エネルギー部分を見積もることとした。

計測は LCS 光源用の電子ビーム収束条件、電子ビームエネルギー 20 MeV、1300MHzCW 運転で行った。バンチ電荷については、エネルギースペクトルが計測可能な計数率まで計数率を下げるため、0.038 fC まで下げて計測を行った。LCS 光源の実証試験においてはバンチ電荷は 0.77 pC であり、空間電荷力の大きく働く領域ではないので、バックグラウンドはバンチ電荷に比例するものとして見積もった。Fig. 5 に、計測された制動放射のエネルギースペクトルと Kramers の式^[9]でのフィッティングの結果を示す。赤で示されるのが計測されたスペクトルであり、青で示されるのがフィッティングの結果である。計測されたスペクトルは Kramers の式でほぼ表現できるものであり、フィッティングの結果を用いて低エネルギー部分を見積もりことが可能であると言える。

シンチレータ検出器でのバックグラウンドについては、Fig. 3 から分かるように、高エネルギー部分の制動放射はバックグラウンドとして寄与しないので、1-200 keV までの積分値をバックグラウンドとした。また、シリコンドリフト検出器については、s/n について考える場合エネルギー分解測定が可能であるので、 $7.2 \text{ keV} \pm 0.5 \text{ keV}$ をバックグラウンドとし、パイルアップについて考える場合は 1-200 keV までの積分値をバックグラウンドとした。

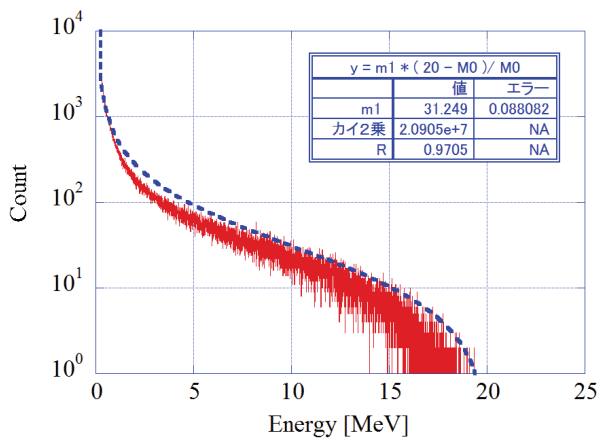


Figure 5: Energy spectrum of the measured background signal.

その結果、シンチレータ検出器への電子ビームの制動放射によるバックグラウンドは 12.4 Mcps であり、s/n 値としては 1/6 程度である。シリコンドリフト検出器への 1–200 keV のバックグラウンドは 439 kcps であるのに対してシリコンドリフト検出器の最大計数率は 1 Mcps 以上であるので、バックグラウンドによりパイルアップすることはない。また、7.2 keV±0.5 keV のバックグラウンドは 11.5 kcps であるので、s/n 値としては約 6 である。以上の結果から、電子ビームの制動放射によるバックグラウンドは許容範囲であり、バックグラウンドによりフラックスモニタの機能に問題を生ずることはないと言える。

しかしながら、バックグラウンドの計測値は十分に小さいものであるとは言い難く、バックグラウンドを減らし、s/n 値を改善する方法についても検討中である。具体的には、真空ダクト中の電子ビームの通らない部分にコリメータを挿入する、電子ビームの収束をやや緩やかにする、電子ビームの繰り返しをレーザーと同じ 162.5 MHz まで減らすなどの方法である。特に、電子ビームの繰り返しをレーザーと同じ 162.5 MHz まで減らせば、レーザーと衝突しない無駄な電子バンチを省くことで、8 倍の s/n の改善が見込まれる。

5. まとめ

コンパクト ERL での LCS 光源開発において、LCS 光源の調整用のフラックスモニタとして、LCS ビームライン中に設置するモニタの検討を行った。シンチレータ検出器とシリコンドリフト検出器の 2 種類の検出器を採用し、電子ビーム用スクリーンモニタと同様の構造により、真空ダクト中に抜き差しできる構造とした。シンチレータ検出器については、シンチレータとしては厚さ 0.2 mm の GAGG(Ce) を採用した。シンチレータ検出器の計数効率ほぼ 100 % であった。フラックスモニタは現在製作中であり、完成後、⁵⁵Fe を用いた動作確認を行った後にビームラインに設置する予定である。また、フラックスモニタを設置する位置での電子ビームの制動放射によるバックグラウンドの計測を行い、バックグラウンドは許容できる範囲であり、フラックスモニタが十分に機能する範囲であることが確認できた。

参考文献

- [1] R. Hajima, et al., Rev. Acc. Sci. and Tech. 3, 121–146 (2010).
- [2] M. Shimada, et al., “Beam commissioning of compact ERL”, SAOLP1, These Proceedings.
- [3] R. Hajima, et al., J. Nucl. Sci. and Tech. 45, 441–451 (2008).
- [4] R. Nagai, et al., “Construction of the equipment for a demonstration of laser Compton-scattered photon source at the cERL”, SUP109, These Proceedings.
- [5] P. Chen, et. al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 355, 107–110 (1995).
- [6] “Physical properties of scintillation materials”, Ohoyo Koken Kogyo co., Ltd.
- [7] H. Hirayama, et al., SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
- [8] <http://www.amptek.com/products/fast-sdd-silicon-drift-detector/>.
- [9] H.A. Kramers, Phil. Mag. 46 836 (1923).