

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用装置の建設 CONSTRUCTION OF THE EQUIPMENT FOR A DEMONSTRATION OF LASER COMPTON-SCATTERED PHOTON SOURCE AT THE CERL

永井良治^{*A)}、羽島良一^{A)}、森道昭^{A)}、静間俊行^{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

A high intensity γ -ray source from the laser Compton scattering (LCS) by an electron beam in an energy-recovery linac (ERL) is a key technology for a nondestructive assay system to identify nuclear materials. In order to demonstrate accelerator and laser technologies required for a LCS photon generation, a LCS photon source is under construction at the Compact ERL (cERL). The LCS photon source consists of a mode-locked fiber laser and a laser enhancement cavity. A beamline and an experimental hatch are also under construction. The commissioning of the LCS photon source will be started in February 2015 and LCS photon generation is scheduled in March 2015.

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。その非破壊核種分析システムで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たレーザーコンプトン散乱 (LCS) により生成した準単色の γ 線を活用する。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る^[1]。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] を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 に建設している。LCS により γ 線を生成するための高出力モードロックレーザーシステムと組み合わせての加速器の性能を実証するために、LCS 光源とその周辺機器を cERL に建設中である。ここでは、その LCS 光源の設計とその他周辺機器について報告する。

2. コンパクト ERL の概要

電子ビーム電流、エミッタンスというような ERL の性能は電子銃、超伝導加速器によって決定され、それらは、ERL 開発成功のカギとなる主要技術である。共同研究チームでは ERL のために、光陰極電子銃の開発と超伝導加速器の最適化を行ってきた。cERL はそれらの主要技術を実際の電子ビーム加速により実証することを目

的として建設された。cERL の設計パラメータを Table 1 に示し、また、レイアウトを Fig. 1 に示す。cERL の初期段階では電子ビームのエネルギーが 35 MeV なので、LCS で生成する光子のエネルギーは 22 keV である。しかしながら、LCS 光子のエネルギーの増加は cERL に超伝導加速器を追加することで単純に達成できるので、cERL での LCS による光子の生成は非破壊核種分析システムのための高強度 LCS- γ 線源の実証試験とみなせる。Fig. 1 を見ても分かるように、cERL の将来の増強^[3] のために追加の超伝導加速器と 2 周目の周回軌道のスペースが確保されている。cERL の将来のエネルギー増強により、電子ビームのエネルギーが 245 MeV になると、エネルギー 1 MeV の光子が生成可能となる。

Table 1: Design parameters of cERL.

Beam energy [MeV]	35 (initial goal) 245 (upgradable in future)
Injection energy [MeV]	5
Beam current [mA]	10 (initial goal) 100 (future goal)
Normalized emittance [mm mrad, rms]	1 (initial goal) 0.1 (at low current)
RF Frequency [MHz]	1300
Bunch length [ps, rms]	1-3 (usual) ≤ 0.1 (under compression)

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に、JAEA において半導体光陰極を備えた直流電子銃を設計、製作し、世界最高電圧である 500 kV での電子ビーム生成に成功した。また、半導体光陰極からの取り出し電流についても 10 mA まで到達できた^[4]。それまでの光陰極直流電子銃の運転電圧は放電によるセラミック管の破壊などの問題で 350 kV に制限されていた。JAEA で開発した電子銃では、ガードリング付多段

*nagai.ryoji@jaea.go.jp

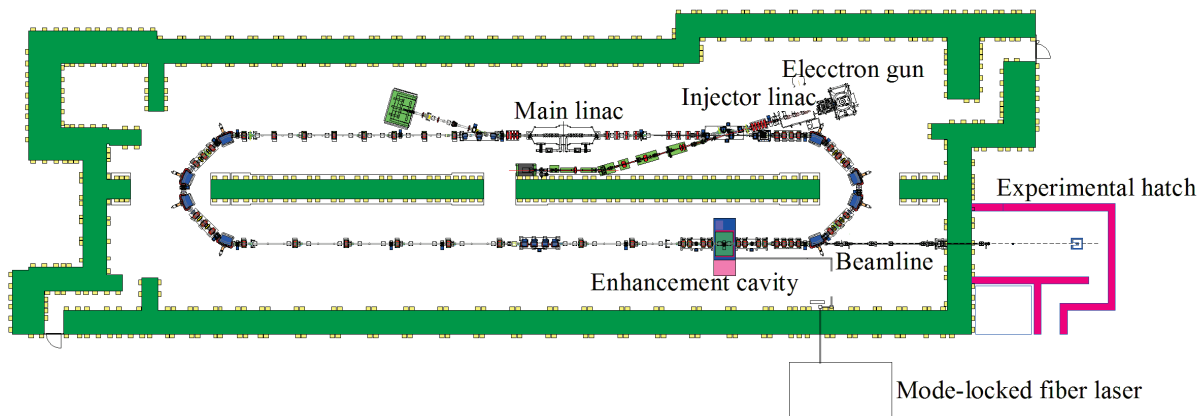


Figure 1: Layout of the cERL.

セラミック管を採用し、セラミック管中央を通るSTEM電極からの電界放出からセラミック管を保護することで問題を解決した^[5]。500 kVでの電子ビーム生成に成功した後に電子銃をKEKのcERLに移設し、ビーム運転を2013年4月から行い、現在もcERLの運転に用いている。

KEKでは、入射加速器用と主加速器用の2種類の超伝導加速器をcERLのために開発した^[6]。超伝導加速器の動作温度と周波数はそれぞれ、2 Kと1300MHzである。入射加速器は3台の2セル空洞を1台のクライオモジュールに組み込んだものである。入射加速器は周回軌道から外れた位置にあり、そこではエネルギー回収されることなく大電流電子ビームを加速するので、非常に大きなRF電力が必要となる。そこで、RFカップラ1台あたりの投入電力を低減するため、また、RFカップラによる電界の非対称性を避けるために、2台のRFカップラにより1台の空洞にRFを投入するシステムを採用した。主加速器は2台の9セル空洞を1台のクライオモジュールに組み込んだものである。主加速器においては、ビームブレイクアップを防ぐためのRFの高次モード(HOM)の減衰が主な課題である。HOMの減衰を効果的に行うためにビームパイプタイプのHOMダンパーを採用した。HOMダンパーは9セル空洞の両端の80 K部分に設置されている。

光陰極電子銃で生成された電子ビームは入射超伝導加速器で5 MeVまで加速され、周回軌道に合流した後主加速器により35 MeVまで加速される。その後、周回軌道の後半に設置されたLCSセクションでレーザー光と衝突して γ 線を発生した後に、周回軌道を通って主加速器に再入射し、5 MeVまで減速されダンプされる。cERLのコミッショニングは2013年12月に開始され、2014年2月にエネルギー回収運転の成功に至っている。

3. LCS光源の設計と周辺機器

ERLによるLCS光源を実現するために必要な加速器技術、レーザー技術を有していることを実証するためにcERLにおいてLCS実験を計画している。この実験のために、レーザーエンハンスメント共振器をcERLの

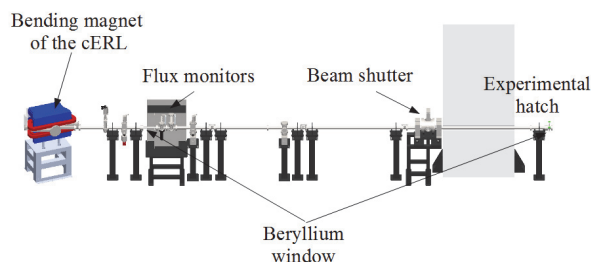


Figure 2: Schematic drawing of the beamline.

周回軌道に設置する。共振器内に蓄積された高強度レーザーと電子ビームが衝突することで生成されたLCS光はLCS光の評価のために真空中に排気されたビームラインを通して実験ハッチまで輸送される。Fig. 1にLCS光源およびその周辺機器の配置を示す。LCS光源のコミッショニングは2015年2月に開始され、LCS光の生成は2015年3月に計画されている。Fig. 2に示すように、LCS光を輸送するためのビームラインは二つのベリリウム窓、ビームシャッター、フラックスモニタにより構成される。ベリリウム窓は加速器側と実験室側のビームラインの両端に設置される。ビームシャッターは鉛製で厚さ20 cmである。薄いシンチレータ検出器とシリコンドリフト検出器を最初のベリリウム窓の直後にフラックスモニタ^[8]として設置する。

コンプトン散乱の衝突断面積は小さいので、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^[7]。また、高速に偏波面を切り替えるなどの将来の計画のために、Fig. 3に示すように、二組の光共振器を同じジンバルに組み込んだ構成を採用している。エンハンスメント共振器の設計パラメータをTable 2に

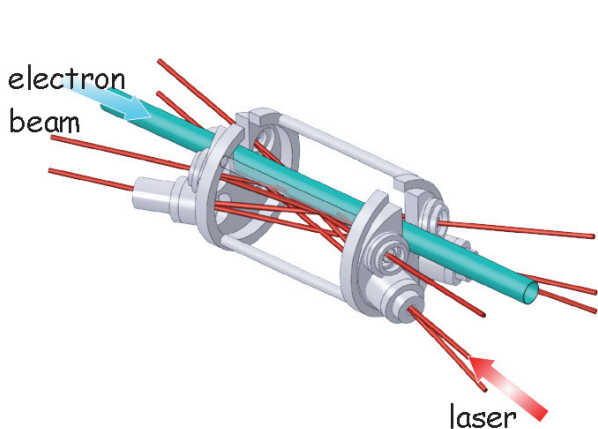


Figure 3: Schematic drawing of the enhancement cavity.

Table 2: Design parameters of the enhancement cavity.

Frequency [MHz]	162.5
Enhancement factor	2550
Collision angle [deg]	18
Spot size [μm , rms]	20 (hor.), 30 (vert.)

まとめて示す。

この LCS 光源のための高出力モードロックファイバーレーザーは JAEA 関西研究所で開発している [9]。その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いる。LCS 光のエネルギー広がりにはレーザー光の波長広がりの影響を受けるので、狭帯域の高出力レーザーを開発した。Fig. 4 に示すように、このレーザーでは増幅の際の非線形な波長広がりを抑えるために、2 台のパルス伸長器と 1 台のパルス圧縮器を備えており、バンドパスフィルタを各増幅器の間に挿入している。レーザーは既に完成しており、安定性などの基礎データの収集やエンハンスメント共振器とのマッチングのための微調整を行っている段階であり、cERL に設置するためのレーザーハッチが完成次第、移設する予定である。レーザーの設計パラメータを Table 3 にまとめて示す。

Table 3: Design parameters of the mode-locked fiber laser.

Average power [W]	~ 100
Center wavelength [nm]	1043
Band width [nm, FWHM]	~ 2
Minimum pulse duration [ps]	~ 1
Repetition rate [MHz]	162.5

LCS 光源の実証実験の際の典型的な運転モードはマクロパルス幅 1 ms、バンチ電荷 0.77 pC のバーストモードを想定している。加速器エネルギーは超伝導空洞からの電界放出を避けるために、20 MeV の予定である。これらの LCS 光源のパラメータを Table 4 にまとめて示す。実験ハッチでの LCS 光のフラックスは CAIN でのシミュレーションにより、マクロパルス平均で 3.5×10^7 ph/s という値が得られている。その LCS 光のエネルギース

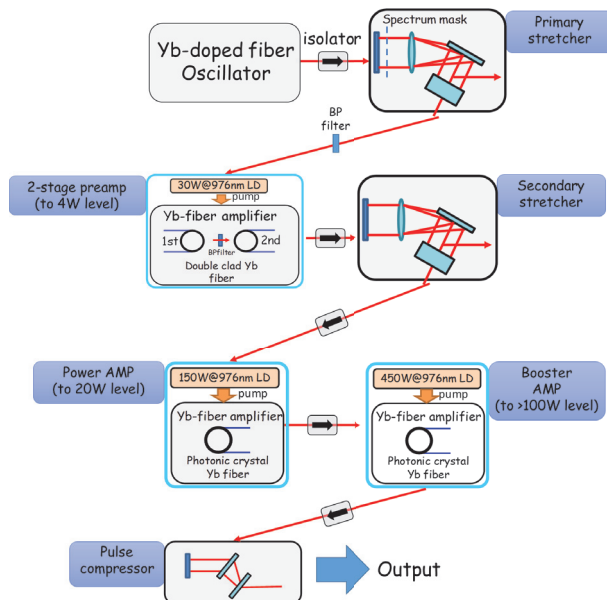


Figure 4: Diagram of the high-power mode-locked fiber laser.

ペクトルは Fig. 5 に示すようであり、中心エネルギーは 7.18 keV、FWHM 幅は 0.043 keV である。

Table 4: Typical parameters of the LCS photon source.

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]	0.3
Parameters of the laser	
Wavelength [nm]	1030
Energy per pulse [mJ]	1.5
Pulse duration [ps, rms]	2
Collision angle [deg]	18
Spot size [μm , rms]	50

4. まとめ

非破壊核種分析システムのための光源として、ERL を基盤とした準単色の LCS- γ 線源の開発を進めている。LCS- γ 線源実現のために必要な加速器とレーザーを組み合わせた総合的な性能の実証のために、LCS 光源とその周辺機器を、ERL を基盤とした光源のための試験加速器、cERL に建設している。cERL でのエネルギー回収運転は 2014 年 2 月に達成され、電子ビーム性能を向上するための研究が進められている。LCS 光源のコミッションングは 2015 年 2 月に開始され、LCS 光の発生は 2015 年 3 月に計画されている。実証実験における実験ハッチでの LCS 光のフラックスはマクロパルス平均で 3.5×10^7 ph/s と見積もられている。

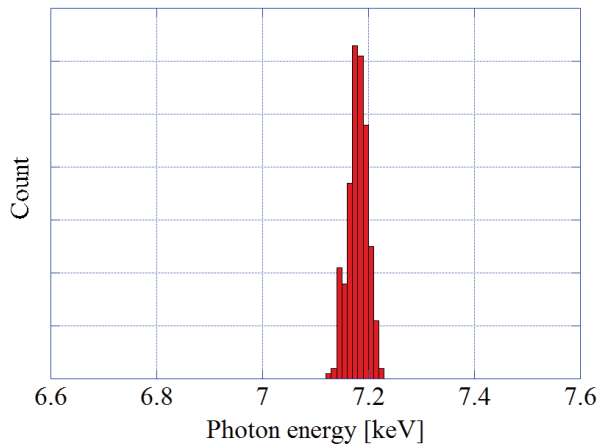


Figure 5: Energy spectrum of the LCS photon beam at the experimental hatch.

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] M. Shimada, et al, Proc. of IPAC2011, 1909–1911 (2011).
- [4] N. Nishimori, et al, Appl. Phys. Lett. 102, 234103 (2013).
- [5] R. Nagai, et al, Rev. Sci. Instr. 81, 033304 (2010).
- [6] K. Umemori, et al, Proc. of SRF2009, 896–901 (2009).
- [7] T. Akagi, et al, Proc. of IPAC2012, 2645–2647 (2012).
- [8] R. Nagai, et al., “Development of optical cavities for the laser-Compton scattering experiment at cERL”, SUP110, These Proceedings.
- [9] M. Mori, et al, Proc. of CLEO-PR-2013 and OECC-2013, paper: MD1-4 (2013).
- [10] P. Chen, et. al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 355, 107–110 (1995).