

KEK 小型電子加速器 (LUCX) の現状報告 (8)

PRESENT STATUS OF LASER UNDULATOR COMPACT X-RAY SOURCE (LUCX) (8)*

福田 将史^{#, A)}, 荒木 栄^{A)}, 浦川 順治^{A)}, 坂上 和之^{B)},
照沼 信浩^{A)}, 本田 洋介^{A)}, 鷲尾 方一^{B)}
Masfumi Fukuda^{#, A)}, Sakae Araki^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)},
Nobuhiro Terunuma^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Masakazu Washio^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

Abstract

We have been developing a compact X-ray source based on laser Compton scattering (LCS) between an electron beam and a laser pulse stacked in an optical cavity at Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) accelerator in KEK. The accelerator consists of a 3.6-cell photo-cathode rf-gun, a 12-cell standing wave accelerating tube and a 4-mirror planar optical cavity. Our aim is to take a clear X-ray image in a shorter period of times. The target flux of X-ray is 1.7×10^7 photons/pulse with 10% bandwidth at present. To achieve this target, it is necessary to increase the intensity of an electron beam to 500 nC/train with 1000 bunches at 30 MeV and the intensity of a laser pulse to 6mJ/pulse respectively. Presently, we have achieved the generation of 24 MeV beam with total charge of 600 nC in 1000 bunches with the bunch-by-bunch energy difference is within 1.3% peak to peak. The beam-loading has been compensated by injecting the beam before rf power has been filled (ΔT method) and by modulating the amplitude of the rf pulse. On the other hand, we have obtained the laser pulse with 750 μ J/pulse in the optical cavity now. In this paper, the present status and the results of beam tuning and X-ray generation of the LUCX accelerator will be reported.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)内にある小型電子加速器 (LUCX) では、レーザーコンプトン散乱(Laser Compton Scattering: LCS)を利用した X 線源の開発を行っている。この X 線源の開発は、光・量子融合連携研究開発プログラムの「小型高輝度 X 線源イメージング基盤技術開発」^[1]の一部であり、この加速器では常伝導加速器によるレーザー光共振器を用いた LCS-X 線生成を行い、X 線検出器開発や X 線イメージング試験などを行っている。

Figure 1 にあるように小型電子加速器では、フォトカソード RF 電子銃で生成したマルチバンチ電子ビームを、その下流の定在波型加速管で最大 30MeV まで加速し、X 線生成部にあるレーザー光共振器内のレーザーパルスと衝突し、LCS によって X 線を生成する。

この加速器では、これまでに LCS による X 線イメージング試験を行い、IC や魚の骨などの X 線吸収や屈折コントラストによるイメージの取得している^[2,3]。これは X 線源のサイズが小さく品質の高い X 線が生成できていることを示している。

現在の目標は X 線数を増やして、この撮影時間を短縮することである。IC や魚の骨などイメージング試験では 1 枚撮影するために合計 10^8 個の X 線を照

射しており、撮影には 2 時間ほどかかっていた。これは、1 回のマルチバンチ電子ビームとの衝突での X 線生成数が 10^4 個と低いためである。

このため、2012 年より生成 X 線数は 1000 倍以上にすることを目標として、X 線数増強のためのアップグレード^[2]およびビーム調整、X 線生成実験を行って来ている。予想 X 線数は 1.7×10^7 photons/train、エネルギー幅(FWHM)は 10%となっている。X 線数が増えることで、この撮影時間を短縮でき、信号とノイズの比(S/N 比)が大きくなるため、さらに鮮明な画像を撮ることが期待できる。

現在、マルチバンチ電子ビーム生成や光共振器の調整をしつつ、SOI ピクセルセンサ^[4]や HyPix-3000^[5]による X 線イメージの取得を行っている。

マルチバンチ電子ビーム生成においては、24MeV、300bunches/train、1.25nC/bunch で X 線生成実験を行った際に後方バンチでビームサイズが増加しているのが判明したため、バンチ電荷を 0.6nC/bunch まで下げてバンチ数を増やす方向で調整を行っている。現在、24MeV、1000bunches/pulse、600nC/pulse のビーム生成まで達成できている。

レーザー光共振器においては、安定化対策として、振動源の除去やフィードバック系のパラメーターの調整、電気信号ノイズ対策を行っている。これにより、現在のところ、平均 755 μ J/pulse (270kW)のパワーを 7%(rms)の安定度で蓄積できている。

本稿では、X 線源開発として、この加速器で行っているマルチバンチ電子ビーム生成やレーザー共振器開発、および X 線イメージング試験の現状について報告する。

* This work was supported by Photon and Quantum Basic Research Coordinated Development Program from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan.
[#] mfukuda@post.kek.jp

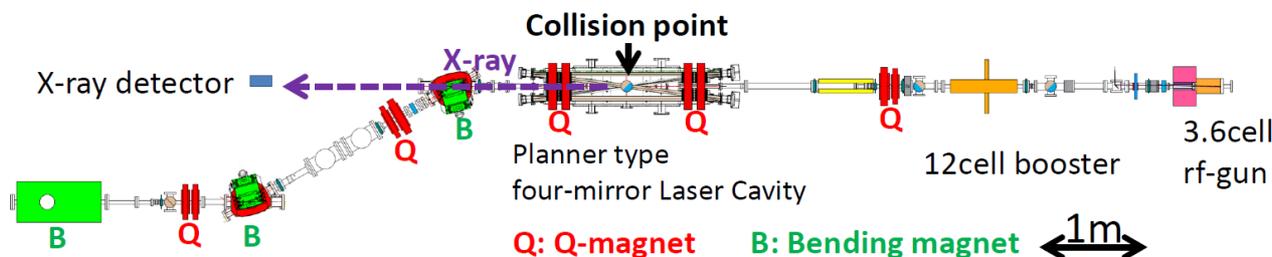


Figure 1: This figure shows the beamline of LUCX accelerator.

2. 小型電子加速器

2.1 ビームライン

現在のビームラインは Figure 1 のようになっており、マルチバンチ電子ビーム生成部では 3.6cell フォトカソード RF 電子銃で 10MeV のビームを生成し、S-band 定在波加速管である 12cell ブースターで、さらに 30MeV まで加速する。その下流の X 線生成部には 4 枚ミラー平面光共振器を設置している。このレーザー光共振器内のレーザーパルスと電子ビームとを衝突させて LCS により X 線を生成する。衝突後、偏向電磁石で X 線と電子ビームは分離され、X 線のみを Be 窓を通して大気中に取り出している。

電子源である 3.6cell フォトカソード RF 電子銃^[6]は、Figure 2 の左図のように、BNL-GunIV^[7]タイプの RF 電子銃をベースに空洞の形状を滑らかな曲線で構成するものに変更し、セル数を 3.6cell まで増やした構造になっている。端板には Cs₂Te を蒸着した Mo カソードを装着しており、紫外レーザー光(波長 266nm)を照射して電子ビームを生成している。

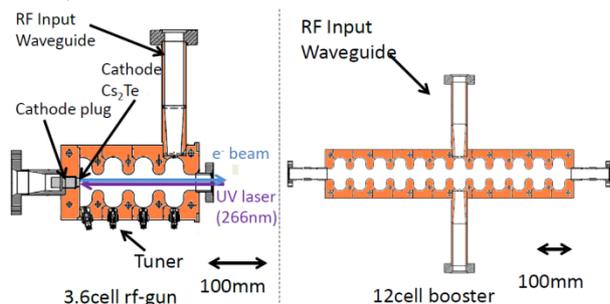


Figure 2: The cut views of a 3.6cell rf-gun(left) and a 12cell booster(right).

Table 1: Parameters of the RF-gun and the Booster

	3.6cell rf-gun	12cell booster
Frequency[MHz]	2856	2856
Q-value	15000	17800
Coupling β	0.99	1.1
R/Q [Ω]	395	420
Mode separation[MHz]	$2.8(\pi-2/3\pi)$	$1.0(\pi-10/11\pi)$

12cell ブースターは S-band 定在波型加速管^[2]である。Figure 2 の右図のように空洞形状は RF 電子銃の

フルセルと基本的に同じ構造になっている。RF の入力ポートはダブルフィードになっており、中央部分のセルから高周波を入力する。これは内部の電界分布の対称性を良くするためと入力ポートでの放電を軽減するためである。

衝突点には 4 枚ミラー平面光共振器^[3]を設置している。この光共振器は各々 2 枚の凹面ミラーと平面ミラーで構成されている Bow-tie 型の光共振器である。凹面ミラー間の距離を 1890mm と長くすることによりミラー上でのレーザーサイズを拡大し、今まで蓄積パワーを制限していた誘電多層膜のダメージを避けるようになっている。

Figure 3 はレーザー共振器の構成図^[3]である。共振器に入射するシード光は、光共振器に入射する前にパルス型 LD 励起光増幅器であるバーストアンプで増幅される。これにより、電子ビームがいるタイミングだけ蓄積パワーを約 1000 倍まで増幅している。また、蓄積パワーは、光共振器からの透過光強度から算出している。

共鳴を維持するフィードバックの制御には、Pound-Drever-Hall (PDH) 手法^[8]を利用している。これは共振器へ入射する際の反射光を利用しているが、瞬間的に 1000 倍までアンプした光が来ると、その間はフィードバック制御ができない。そのため、衝突用とは別にフィードバック用に増幅器を通さないようにした逆周回させた光を蓄積し、その反射光をフィードバック制御に利用している。

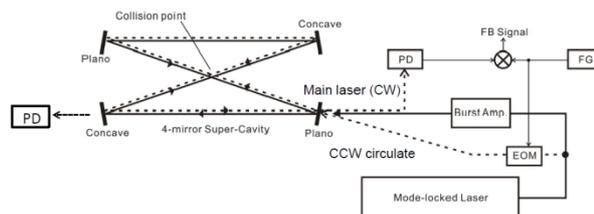


Figure 3: Schematic diagram of the 4-mirror planar optical cavity.

2.2 X 線検出器

Figure 4 のように、X 線は一旦大気に取り出された後、もう一度真空チェンバーを通るようになっていいる。これは下流で測定する場合に大気による X 線強度の減衰を軽減するためである。

真空チェンバー内には、X 線強度の測定用に

Micro-channel plate(MCP)を設置している。MCPは応答が早くマルチバンチ電子ビームとの衝突によるLCS-X線の時間構造を見ることができる。また、このMCPはムーバーによってX線ライン上への出し入れが可能であり、MCPの前後ともBe窓(厚さ300 μm)になっているため、X線を通過させて別の検出器での測定も出来るようになっている。

X線イメージング取得用の検出器にはSOIピクセルセンサ(INTPIX4)^[4]やRIGAKU社製のHyPix-3000^[5]を使用している。

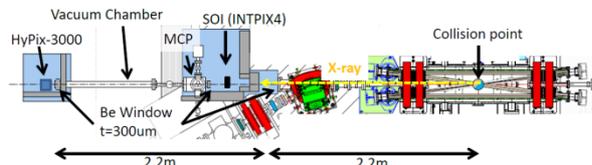


Figure 4: Placement of X-ray detectors.

3. マルチバンチ電子ビーム生成

マルチバンチ電子ビームの加速時に問題となるビームローディングの補正は、RFが加速管に満たされていく過渡期のタイミングに電子ビームを載せることで行う(ΔT 法)。こうすると、後方バンチほど加速電界が高いタイミングで加速管を通過する。この上昇分とビームローディングによる低下分とを相殺することでエネルギーを補正する。

ただ、1000バンチ電子ビームのトレイン長は、2.8 μs であり、加速管のRFのFilling time 0.8 μs よりずっと長く、後方バンチではRFが満たされてしまった状態になるので、 ΔT 法ではビームローディングの影響を相殺できない。

そこで、加速管へ入射するRFに振幅変調をかけることで、ビームローディングを補正するためにLow level RF系にRFの振幅と位相を制御できるようにIQ変調器を導入した^[9]。

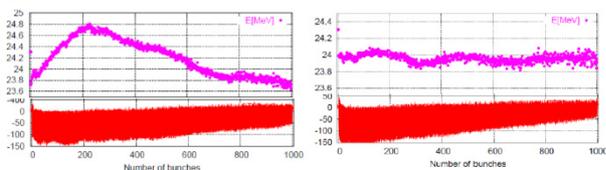


Figure 5: The left figure shows the bunch-by-bunch energy when the beam-loading was compensated by ΔT method. The right one shows the energy when the loading was compensated by both ΔT method and amplitude modulation.

Figure 5は、24MeV、1000bunches/train、0.6nC/bunchの電子ビームを加速したときの各バンチにエネルギーである。左がローディング補正を ΔT 法のみで行った場合で、右がさらにRFに振幅変調もかけて補正した場合である。 ΔT 法だけの補正ではトレイン内の各バンチのエネルギー差はPeak-to-peakで4%となってしまうが、さらに振幅変調もかけることで、1.3%に抑えることができた。

また、Figure 5の下図のICTの信号から、電子ビームのバンチ電荷が後方バンチほど低下しているのが分かる。これはFigure 6にあるようにRF電子銃で電子ビームを生成するためのレーザーパルス列の強度が後方バンチほど低くなっているためである。これはレーザーパルス増幅時に前方パルスにエネルギーを取られ、後方パルスではゲインが下がっているためである。このレーザーシステムでは2台のフラッシュランプ光増幅器でパワーを増幅している。今後、うち1台の増幅タイミングを遅らせることで、このゲインの低下を抑えるテストを行う予定である。

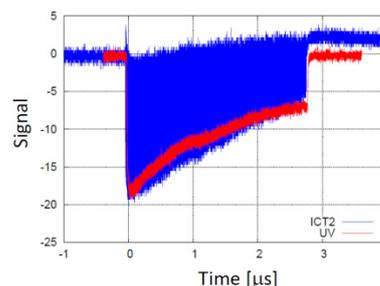


Figure 6: Pulse shapes of the ICT signal(blue line) and Photo-diode signal for a UV laser pulse(red line).

4. レーザー蓄積パワーの安定化

4枚ミラー平面光共振器の蓄積パワーの安定化対策として、振動源の除去やフィードバック系のパラメーターの調整、電気信号ノイズ対策を行った。

レーザー共振器の共鳴状態は、ミラー間の距離の揺れに非常に敏感なため、まずは振動対策から行った。レーザー共振器のそばにあった振動源としてはLD励起増幅器や加速管の温度制御用のチラーや、レーザーの電源があった。チラーは全てビームライン外へ移動した。電源はレーザーが載っている光学台の下にあったものを、別の台へ移動し、振動が直接伝わらないようにした。これ以前は、フィードバックを掛けても、蓄積パワーが非常に不安定でゼロから最大値まで大きく揺れていたが、ゼロまで落ちることは抑えることが出来た。

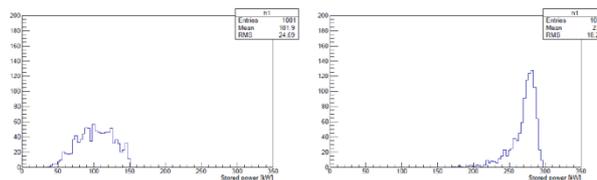


Figure 7: These graphs show stored power distribution. The left and right graphs show stored power before and after noise suppression respectively.

Figure 7の左図にあるように、振動対策後も、蓄積パワーは揺れており、特に電子銃用のレーザー増幅器や電子磁石電源をオンにするだけで、蓄積パワーが揺れるようになっていた。電気信号対策としては、フィードバック制御信号のラインにはチョークコイルを入れるなど、グラウンドループによるノイズの低減を行った。

フィードバックの調整としては、レーザーの共振器長を制御するピエゾの共振周波数をマスクするノッチフィルターの周波数を最適化した。また、フィードバック制御のエラー信号のゼロ点の調整によっても安定になった。今のところ原因は分からないが、バーストアンプのオン、オフで最適値がずれており、オンの時に安定になるようにゼロ点を合わせている。

これにより、Figure 7 の右図にあるように平均 $755\mu\text{J/pulse}$ (270kW) のパワーを 7%(rms) の安定度で蓄積できるようになった。

5. X線イメージング試験

現在、 24MeV の電子ビームで 10keV の X 線を生成し X 線イメージング試験を行っている。実験時の電子ビームとレーザーのパラメーターは Table 2 にそれぞれ載せている。

Table 2: Parameter of Electron Beam and Laser Pulse

	Electron beam	Laser pulse
Energy	24MeV	$1.17\text{eV}(\lambda=1064\text{nm})$
Intensity	0.56nC/bunch	$530\mu\text{J/pulse}$
Beam size: σ_x, σ_y	$80\mu\text{m}, 60\mu\text{m}$	$89\mu\text{m}, 85\mu\text{m}$
Pulse width	15ps (FWHM)	7ps (FWHM)
Number of bunch	700	

X 線イメージの取得には HyPix-3000 を使用しており、有効感度面積は $77.5\text{mm} \times 38.5\text{mm}$ 、ピクセルサイズは $100\mu\text{m}^2$ となっている。また、設定した 2 つの閾値の間の信号のみを測定することが可能で電気ノイズや高エネルギーのバックグラウンドをカットすることができる。

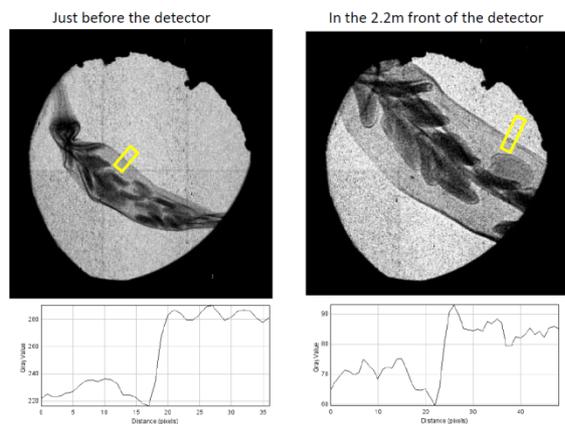


Figure 8: X-ray images of chilli.

Figure 8 は HyPix-3000 で取得した X 線イメージである。試料は唐辛子で、検出器は衝突点から 4.4m の位置に設置している。左が検出器直前に試料を置いて撮影したもの、右が検出器の約 2.2m 前方に置いて撮影したものになる。

測定時の X 線数は 9×10^5 photons/train で、検出器

にはピクセルあたり $1.1\text{photons/sec/pixel}$ の X 線が来ていた。撮影時間は 300 秒となっている。

X 線は点光源に見えるため、試料を離して撮影した右図では、イメージが約 2 倍に拡大されている。また、屈折コントラストにより、エッジの部分のコントラストが強調されているのが分かる。

6. 今後

電子ビーム側は、電子銃用レーザーの増幅の調整を行い、トレイン内のバンチ電荷が徐々に下がる状態を改善し、バンチ電荷が揃った 1000 バンチビームの生成を行う。また、衝突点サイズをさらに小さくすることも目指す。RF エージングを進め電子銃のカソード電界を上げてエミッタンスを下げるなどを行っていく。

レーザーに関しては蓄積パワーをさらに上げるため、入射光の増幅時にポッケルセルを使用する予定である。光共振器の Filling time を考慮すると、数十 μs の間、増幅すれば十分だが、現在はシード光をずっと通しているため増幅器を励起している $200\mu\text{s}$ の間で全てアンプしており、効率が悪くなっている。ポッケルセルで必要な時間だけ Seed 光を切り出せば、それに全てのゲインを費やせるので、より強いパワーを共振器に入射でき、蓄積パワーの増加が見込める。このテストを行う。

X 線イメージング試験としては、8 月にはタルボ干渉を利用した位相イメージングを行う予定である。これに伴い、空気による X 線強度の減衰を避けるため、衝突点から検出器部までの 6.5m を真空にするために、全て真空パイプで接続するようにした。また、使用する X 線のエネルギーは 9keV で、これは 22MeV の電子ビームとの衝突で生成するため、このエネルギーでの電子ビームの調整を行っている。

参考文献

- [1] <http://nkcbeam.kek.jp/>
- [2] M. Fukuda et al., "KEK におけるレーザーコンプトン散乱を用いた小型 X 線源の開発の現状とアップグレード計画", 日本加速器学会誌, Vol.9, No.3,2012, 156-164.
- [3] K. Sakaue et al., "KEK-LUCX におけるレーザーコンプトン散乱小型 X 線源の開発", 日本加速器学会誌, Vol. 10, No. 1, 2013 32-42.
- [4] Y. Arai et al., "Development of SOI pixel process technology", Nucl. Instrum. Meth., A636 (2011) S31-S36.
- [5] <http://www.rigaku.co.jp/products/xrd/HyPix-3000/>
- [6] T. Aoki, et al., "Development of an S-band Multi-cell Accelerating Cavity for RF Gun and Booster Linac", Proc. of IPAC11, San Sebastian, Spain, (2011).
- [7] X.J. Wang et al., "Design and Construction a Full Copper Photocathode RF Gun", Proc. 1993 Part. Accel. Conf. (1993) p. 3000.
- [8] R. W. P. Drever et al., "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator", Appl. Phys. B, 31 (1983) 97.
- [9] M. Fukuda et al., "Generation of multi-bunch beam with beam loading compensation by using rf amplitude modulation in laser undulator compact X-ray (LUCX)", Proc. of IPAC15, Richmond, VA, USA (2015).