

KEK 小型電子加速器 (LUCX) の現状報告 (7)

PRESENT STATUS OF LASER UNDULATOR COMPACT X-RAY SOURCE (LUCX) (7)*

福田 将史^{#, A)}, 荒木 栄^{A)}, Aryshev Alexander^{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)}, Alexander Aryshev^{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 developed a compact X-ray source via inverse Compton scattering between a multi-bunch electron beam and a laser pulse stacked in an optical cavity at Laser Undulator Compact X-ray (LUCX) accelerator in KEK. Our aim is to obtain a clear X-ray image in a shorter period of times in this accelerator, which consists of a 3.6 cell photocathode rf-gun, a 12cell standing wave accelerating structure and a 4-mirror planar optical cavity. In 2012, we have upgraded the accelerator to increase the intensity of X-ray. The expected number of X-ray after upgrade is 1.7×10^7 photons/pulse with 10% bandwidth. To achieve this target, it is necessary to increase the intensity of an electron beam to 500nC/pulse with 1000 bunches at 30 MeV. We have continued the multi-bunch beam generation and X-ray imaging test after upgrade. The accelerator produces 24 MeV beam with the total charge of 460nC in 800 bunches per pulse now. The aging process is also continued to increase energy and intensity. In this paper, the present status and the results of beam tuning and X-ray generation of 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。これまでにを行ったイメージング試験では 1 枚のイメージを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。生成 X 線数を増やすことで、この時間を短縮し、最終的には 1 回の衝突で X 線イメージを取れるようにするのが目標である。また X 線数が増えることで信号とノイズの比(S/N 比)が大きくなり、さらに鮮明な画像を撮ることができると期待される。

一昨年より、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/pulse、エネルギー幅(FWHM)は 10%となっている。この X 線数であれば前回実験時と同じ X 線画像が約 10 ショットの照射で撮影でき、より鮮明な画像の取得が期待できる。

アップグレード後、マルチバンチ電子ビームや光共振器の調整をしつつ、X 線生成実験や SOI ピクセルセンサによる X 線吸収イメージの取得^[3]を行っている。生成 X 線数は 3×10^5 photons/pulse、エネルギー幅(FWHM)は 10%とアップグレード前の 30 倍になっている。

また、マルチバンチ電子ビーム生成においては、24MeV, 300bunches/pulse, 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, 800bunches/pulse, 460nC/pulse、および 27MeV, 400bunches/pulse, 240nC/pulse のビーム生成まで達成できている。

本稿では主にアップグレード後の加速器側の進捗を中心に報告する。

* 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

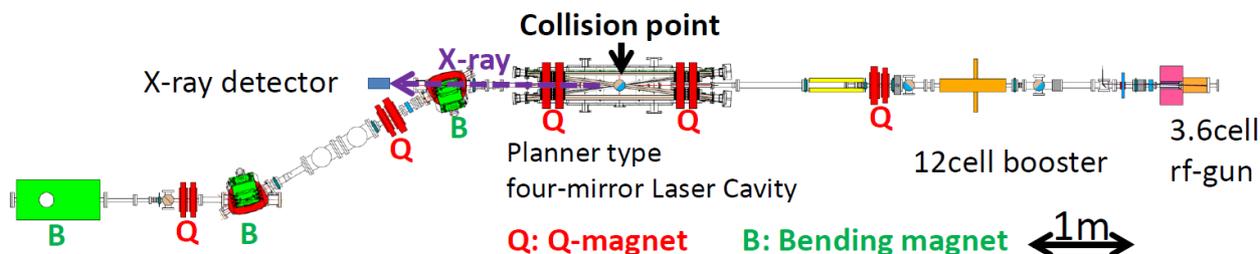


Figure 1: This figure shows the beamline of LUCX accelerator.

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は 3.6cell フォトカソード RF 電子銃、S-band 定在波加速管である 12cell ブースターで構成され、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。RF 電子銃で、10MeV のマルチバンチ電子ビームを生成し 12cell ブースターでさらに 30MeV まで加速する。この電子ビームとレーザー光共振器内のレーザーパルスを衝突させて 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^[4]は BNL-GunIV^[5]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 まで増やしたものである。Figure 2 がその断面図になっている。端板にはロードロック方式により着脱可能な Mo カソードを装着しており、この表面に Cs₂Te を蒸着しており、紫外レーザーパルス光(波長 266nm)を照射して電子ビームを生成している。量子効率はやく 0.2%を維持できている。

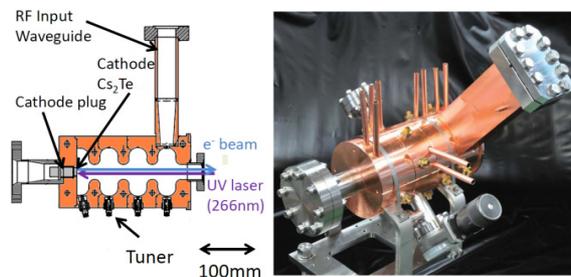


Figure 2: The cut view and the picture of 3.6cell rf-gun.

12cell ブースターは S-band 定在波型加速管^[2]である。断面図は Figure 3 のようになっており、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。さらに、ミラー上のホコリに起因するダメージも避けるため、クリーン環境で真空チェンバー内へのミラーインストール作業を行った。これにより、現在 600μJ/pulse のパルスエネルギーまで蓄積できるようになっている。

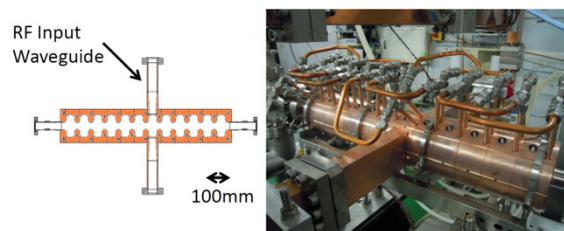


Figure 3: The cut view and the picture of 12cell booster.

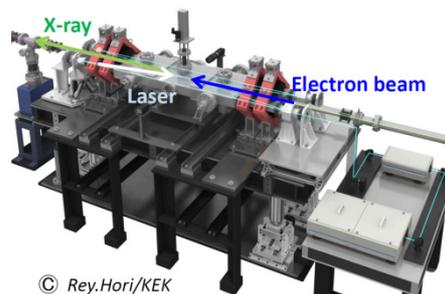


Figure 4: Drawing of the 4-mirror planar optical cavity.

2.2 タイミング同期システム

この加速器では、光共振器の種光用のモードロックレーザー発振器を基準信号として同期をとるレーザーマスターシステム^[2]を導入している (Figure 5)。レーザー光共振器では共鳴維持のため、ナノメートル以下の精度が要求される。マスターオシレーター RF 信号を基準とした場合、これに加えて同期 RF 信号にも光共振器を同期させることになり、フィードバックが難しく動作が不安定であった。レーザーマスターシステムでは、共振器用レーザー光を同期用の基準信号にするので、共鳴が維持できるように

共振器用レーザーを制御し、それに合わせて加速器側が同期をとるようになる。レーザー光共振器は共鳴を取るように制御しているだけで良いので、安定性は非常に向上した。

当初は共振器用レーザー光を Photo diode で電気信号に変換するのをビームラインで行っていたが、その電気信号に電子ビームによるノイズが乗り、マルチバンチ電子ビームを生成する際に 200 バンチ以降の電子ビームに影響を及ぼしていた。そこで、ピックアップしたレーザー光を光ファイバーで制御室まで輸送し、そこで電気信号に変換することで、この問題を解決した。現在では最大 800 バンチの電子ビームまで生成できている。

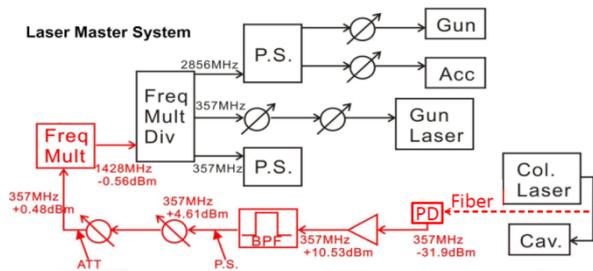


Figure 5: Timing synchronization system.

2.3 X線検出器

LCS-X線は、衝突点下流の厚さ 300 μm の Be 窓より大気中に取り出す。その後、Micro-channel plate(MCP)を設置して X 線強度の測定を行っている。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出来る。MCP は真空容器内にあり、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 窓になっているため、X 線を通さずして別の検出器での測定も出来るようになっている。

また、X 線イメージング取得には SOI ピクセルセンサ^[4]や蛍光板付き MCP を使用している。これまでに唐辛子や IC などのイメージを取得に成功している^[3]。

3. LCS-X 線生成

アップグレード後、LCS-X 線の生成実験は、バンチ電荷が 1.25nC/bunch の電子ビームで行っており、電子ビームのバンチ数を増やしつつ実験して来た。現在、得られている生成 X 線数は、 3×10^6 photons/pulse (Total band)である。FWHM10%のエネルギー幅では、強度は約 1/10 になるので、約 3×10^5 photons/pulse (10%bw)となり、アップグレード前の約 30 倍の X 線強度を達成している。これは 300 バンチの電子ビームとの衝突で得られたものである。その時の電子ビームとレーザーのパラメータは Table 1 であり、マルチバンチの各バンチのエネルギーや OTR プロファイルモニタで測定した衝突点の電子ビームサイズが Figure 6 の左の図である。

Table 1: Parameter of electron beam and laser pulse

	Electron beam	Laser pulse
Energy	24MeV	1.17eV($\lambda=1064\text{nm}$)
Intensity	1.25nC/bunch	600 μJ /pulse
Beam size: σ_x, σ_y	80 μm , 60 μm	89 μm , 85 μm
Pulse width	15ps (FWHM)	7ps (FWHM)
Number of bunch	300	

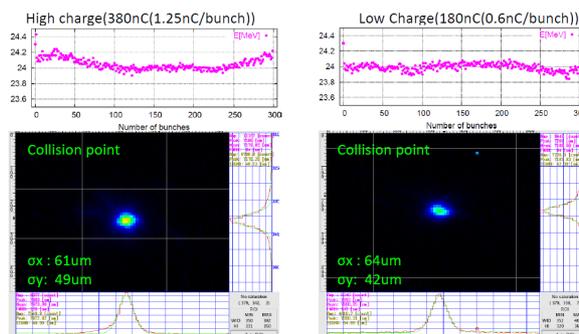


Figure 6: The energy of multi-bunch beam and the beam size at the collision point.

ところが、この際に MCP で測定した X 線信号をオシロスコープで測定したところ、200 バンチ以降の衝突では X 線強度が下がっているのが分かった (Figure 7(A))。そこで、電子ビームとレーザーパルスの衝突位置を変更しながら、X 線強度の変化を測定したところ、後方のバンチでの電子ビームサイズの増大が見られた (Figure 8(A))。これは 10 バンチ毎に X 線強度を算出しプロットしたものである。

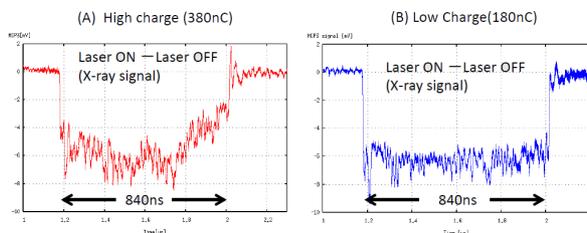


Figure 7: LCS-X-ray signal measured by the MCP.

ビームサイズ増大はウェークによる影響であることが推測されたため、バンチ電荷を約半分の 0.6nC/bunch に下げて同様の測定を行い、比較を行った。バンチ電荷以外のエネルギーやビームオプティクスなどの条件を同じにしている。Figure 6 は 1.25nC および 0.6nC/bunch 各々でのビームエネルギーと 4 バンチで測定した衝突点での電子ビームサイズである。

バンチ電荷を 0.6nC/bunch にして測定した結果が Figure 7(B)、Figure 8(B)である。こちらではビームサイズの増大は見られず、オシロスコープで測定し

た MCP による X 線信号を見ても、全てのバンチできれいに衝突しているのが分かる。

これらの結果から、現在はバンチ電荷を 0.6nC/bunch へと下げてバンチ数を増やす方向で電子ビーム強度を増強するようビーム調整を行っている。今後はマルチバンチ電子ビームの全電荷量が同じ 380nC/pulse になる 0.6nC/bunch , 630bunches で X 線生成実験を行い、後方バンチのビームサイズ増大が見られるか確認する予定である。

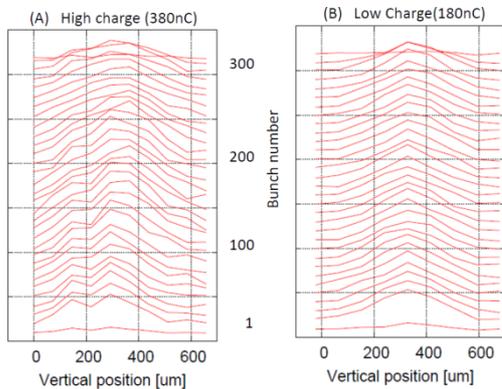


Figure 8: The result of the position scan of an electron beam.

4. マルチバンチ電子ビーム生成

現在は、バンチ電荷を 0.6nC/bunch に下げ、バンチ数を増やす方向でマルチバンチ電子ビームの調整を行っている。これまでに 24MeV , 800bunches/pulse , 460nC/pulse 、および 27MeV , 400bunches/pulse , 240nC/pulse まで生成出来ている。エネルギーの高いほうでバンチ数が少ないのは、加速電界が高く、RF パルス幅が長いと放電が起きやすいためである。

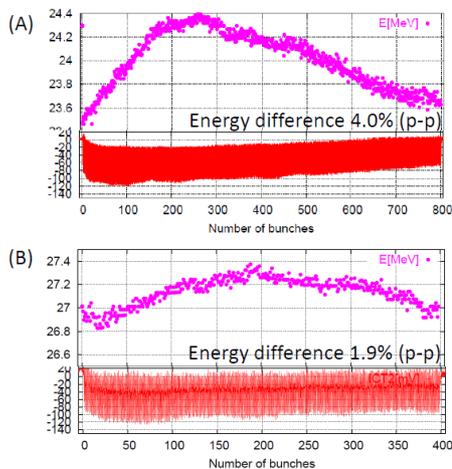


Figure 9: These graphs show the energy of multi-bunch beam and the current transformer waveform.

(A): 460nC/pulse with 800bunches at 24MeV .
(B): 240nC/pulse with 400bunches at 27MeV .

Figure 9 がバンチ毎のエネルギーを測定した結果

である。各バンチのエネルギー差は 24MeV 、 27MeV の場合でそれぞれ 4.0% 、 1.9% (peak-to-peak) となっている。今まで X 線実験をやっていた 300bunches の時は $1.0 - 1.3\%$ だったので、それと比べると大きい差になっている。

ビームローディングは RF が加速空洞に満たされる過渡期に電子ビームを通過させることで、後方のバンチほど加速電界が高くなる分とローディングで電界が低くなる分を相殺することで補正している。ただ、バンチトレインが伸びてくると、これだけでは補正が難しくなって来ているので、今後、RF の振幅に変調をかけてエネルギー補正をする^[7]ことを検討している。

5. まとめと今後

現在は、マルチバンチ電子ビーム生成のビーム調整はバンチ電荷を 0.6nC/bunch に下げ、バンチ数を伸ばす方向でビーム強度を上げる調整を行っている。 24MeV , 800bunches/pulse のビーム生成まで達成できているが、バンチエネルギーの差が 4% とまだ大きい。このエネルギー差の補正を入力 RF に振幅変調をかけることを行うことを考えており、準備を進めている。

目標は 30MeV , 1000bunches/pulse である。これを達成するためには RF のパワー、パルス幅を増やす必要があるため、今後もエージングを続ける。 24MeV では入力パワーは電子銃で 13.3MW 、加速管で 23.6MW となる。また 1000bunches を出すためには $4.0\mu\text{s}$ まで伸ばす必要がある。 30MeV の場合には、さらに電子銃で 18.4MW 、加速管で 37.7MW まで RF パワーを上げる必要がある。

X 線生成においては、後方バンチでビームサイズ増大が見られた時と同じ全電荷量 380nC/pulse になる 24MeV , 0.6nC/bunch , 630bunches で X 線生成実験を行い、後方バンチのビームサイズ増大が見られるか確認する予定である。

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] 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).
- [5] X.J. Wang et al., "Design and Construction a Full Copper Photocathode RF Gun", Proc. 1993 Part. Accel. Conf. (1993) p. 3000.
- [6] Y. Arai et al., "Development of SOI pixel process technology", Nucl. Instrum. Meth., A636 (2011) S31-S36.
- [7] Y. Yokoyama, et al., "Study on Energy Compensation by RF Amplitude Modulation for High Intense Electron Beam Generated by A Photocathode RF-Gun", Proc of IPAC11, San Sebastian, Spain, (2011).