

KEK 小型電子加速器におけるマルチバンチ電子ビーム生成の改善

IMPROVEMENT OF MULTI BUNCH ELECTRON BEAM GENERATION AT LASER UNDULATOR COMPACT X-RAY SOURCE (LUCX) *

福田将史^{#, A)}, 荒木栄^{A)}, 浦川順治^{A)}, 照沼信浩^{A)}, 本田洋介^{A)}, 坂上和之^{B)}, 鷲尾 方一^{C)}
Masafumi Fukuda^{#, A)}, Sakae Araki^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)},
Masakazu Washio^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

^{C)} 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 stored in an optical cavity at Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) accelerator in KEK. A multi-bunch electron beam is generated by a 3.6cell photo-cathode RF-gun and accelerated to 18-24MeV by a 12cell booster. A laser pulse in a 4-mirror planar optical cavity is enhanced by stacking injected laser pulses. And then 6-10 keV X-rays are generated by LCS between the beam and the laser pulse. Presently, we have achieved the generation of 24MeV beam with total charge of 600nC in 1000bunches. The energy difference is within 1.3% peak to peak. The beam-loading is compensated by delta T method and amplitude modulation(AM) of the RF pulse of the 12cell booster. However, there is the energy difference at the RF-gun. It is assumed that this causes the reduction of the X-ray flux due to change of the focused beam size. To compensate the energy difference, AM is also applied to the RF pulse for the gun. We will show the results of the beam-loading compensation and the generation of X-rays.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の小型電子加速器(LUCX)では、レーザーコンプトン散乱(Laser Compton Scattering: LCS)を利用した小型 X 線源の開発を行っている。この開発は、光・量子融合連携研究開発プログラムの「小型加速器による小型高輝度 X 線源と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、レーザー光共振器やX線検出器開発、X線イメージング試験を行っている。

小型電子加速器では、フォトカソード RF 電子銃と定在波型加速管により最大 30MeV の電子ビームを生成し、その下流にあるX線生成部において、レーザー光共振器内のレーザーパルスと電子ビームを衝突させ、LCS によりX線を生成している。

これまでに LCS によるX線を用いてX線吸収や屈折コントラストの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。また、昨年には 9keV のX線により、タルボ干渉を利用した位相イメージング[4]の試験も行っており、33%のモアレ縞のビジビリティが得られた[5]。ただし、X線強度が低いと、撮影には 5 時間かかっている。撮影時の生成点でのX線数は 3.3×10^6 photons/sec、 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ の撮影領域では 3.7×10^4 photons/sec であった。

現在、X線数を増強するため、電子ビームやレーザー

光共振器の調整を行っている。これまでに 24MeV、1000bunches/train、600nC (0.6nC/bunch)の電子ビームで LCS による X 線生成を行っているが、電子ビームに起因する問題としては、1000 バンチのバンチトレイン内でのX線生成数の不均一とバンチ電荷の不均一がある。前者は、RF 電子銃出口でのバンチ毎のエネルギー差により起こるソレノイドでのビーム集束の差が原因であり、これによりトレイン内において衝突点でのビームサイズが違っているためと推測している。マルチバンチ電子ビームを加速する際のビームローディングは、RF を加速空洞に満たす過渡期に電子ビームを通過させる ΔT 法と入射 RF パルスの振幅変調で補正している。この振幅変調を RF 電子銃にも適用し衝突状態の改善を図る。後者は、電子ビーム生成用のレーザーに起因しており、レーザー増幅方法の最適化による調整を続けている。

本稿では、このマルチバンチビーム生成の改善の現状について報告する。

2. 小型電子加速器

2.1 ビームライン

現在の小型電子加速器のビームラインは Figure 1 のようになっている。S-band の 3.6cell フォトカソード RF 電子銃では最大 10MeV の電子ビームを生成し、その下流にある S-band の 12cell 定在波加速管で、さらに 30MeV まで加速する。その後のX線生成部には 4 枚ミラー平面光共振器があり、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、偏向電磁石により 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。

* 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

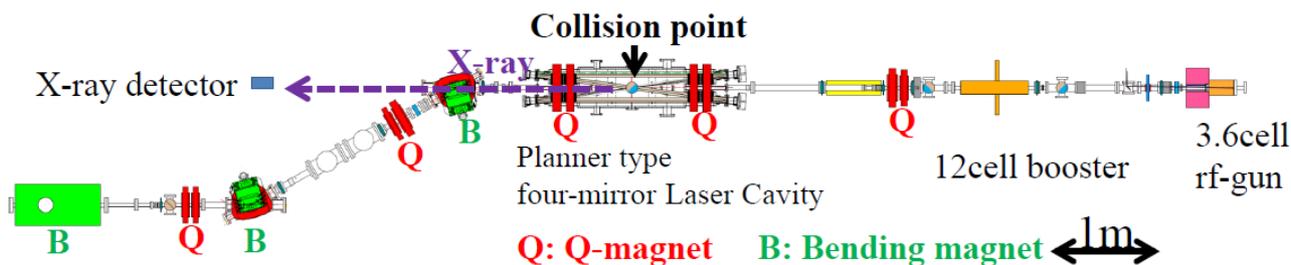


Figure 1: The beamline of the LUCX accelerator.

電子源である S-band の 3.6cell フォトカソード RF 電子銃[6]は、BNL-GunIV[7]タイプの RF 電子銃をベースにしており、そこから空洞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。

12cell ブースターは S-band 定在波型加速管[2]である。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(Figure 2)。この光共振器は凹面ミラー 2 枚と平面ミラー 2 枚で構成されている Bow-tie 型の光共振器である。誘電多層膜のダメージを避けるため、凹面ミラー間の距離を 1890mm と長くし、ミラー上でのレーザーサイズを拡大できるようにしている。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レーザーダイオード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。

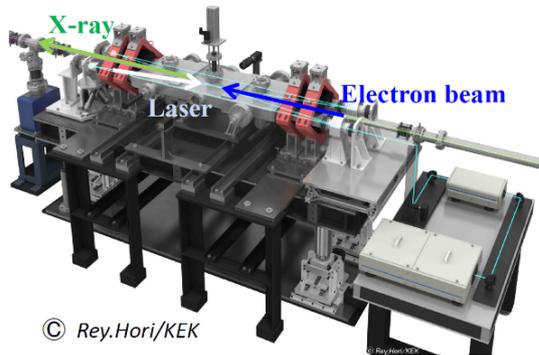


Figure 2: 4-mirror planar laser cavity.

2.2 X 線検出器

Figure 3 のように、X 線は、偏向電磁石で電子ビームと分離後、真空チェンバーを通り、衝突点から 6.5m 後に厚さ 300 μm の Be 窓から大気中に取り出される。これは空気による X 線強度の減衰を避けるためである。

真空チェンバー内には、X 線強度の測定のための 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出来る。また、この MCP はムーンバーによって X 線ライン上への出し入れが可能であり、X線イメージング時には、MCP をライン上から引き出し X 線を下流に設置したイメージ検出器に入射することができる。X 線イメージング取得用の検出器には RIGAKU 社製の HyPix-3000[8]を使用している。

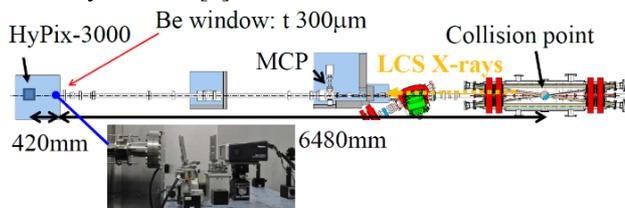


Figure 3: This picture shows the setup of X-ray detectors. The MCP measures the intensity of X-rays. The HyPix-3000 is an image sensor which has the active area of 77.5mm x 38.5mm and the pixel size of 100 μm x 100 μm .

3. マルチバンチビーム生成の改善

3.1 ビームローディング補正

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 が加速空洞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空洞を通過する。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、加速空洞の 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しきれない。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している[9]。

Figure 4 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。

ただ、ここでのローディング補正は加速管のみで行っており、RF 電子銃では行っていない。このため、電子銃出口ではエネルギー差がついた状態になっている。

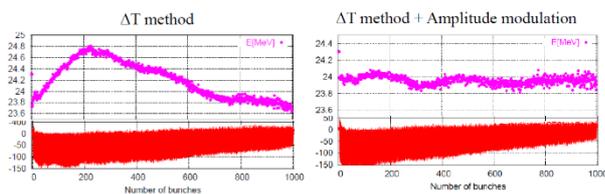


Figure 4: The left figure shows the bunch-by-bunch energy when the beam-loading was compensated by ΔT method. The right one shows the energy when the loading was compensated by both ΔT method and amplitude modulation.

3.2 電子銃出口でのエネルギー補正

Figure 5 は、加速管でのみエネルギー補正を行った場合に生成した X 線を MCP で測定したときの出力波形とカレントモニタである ICT で測定した電子ビームの信号波形である。このときは、22MeV, 0.3nC/bunch で X 線生成を行っている。このグラフからトレイン内の電子ビームカレントは、ほぼ一定なのに対し、X線強度が不均一になっているのが分かる。

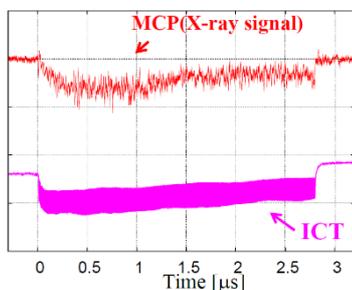


Figure 5: X-ray signal measured by MCP without the beamloading compensation at the gun.

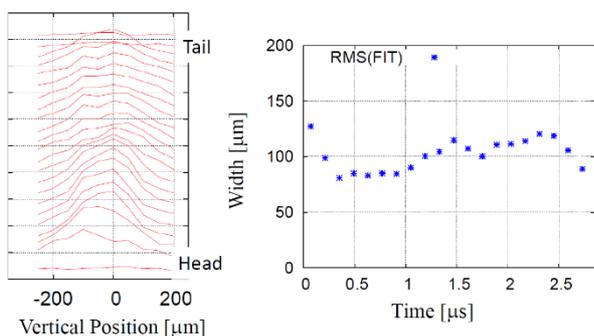


Figure 6: The result of the scan of the position between an electron beam and a laser pulse without the beamloading compensation at the gun.

また、レーザーと電子ビームの相対位置を変えながら、この波形を取得し、相対位置に対する強度の変化を測定したものが Figure 6 である。50 バンチ(140ns)毎に強度の平均を取りプロットしたものが左図で、このプロットをガウシアンでフィットして出した幅が右図になる。この幅は電子ビームレーザーのサイズの重ね合わせになる。光共振器内のレーザーパルスのサイズは一定なので、このグ

ラフからトレイン内で電子ビームサイズが変わっているのが分かる。これにより、トレイン内 X 線強度が不均一になっていると考えられる。

この原因は電子銃出口ではトレイン内にエネルギー差があり、電子銃直後にあるソレノイドによる集束に差が出てビームサイズが変化しているためであると考えられる。電子銃と加速管の間に偏向電磁石がないため、マルチバンチのビームエネルギーは測定できないが、ビームローディング計算し、現状のエネルギーを推測すると、Figure 7 のようになる。赤点が 4 バンチで測定した、RF パルスに対する電子ビームの入射タイミングを変えたときのビームエネルギーである。これをローディングがないときのエネルギーとして、それと紫線の計算したビームローディングによる減衰を合わせたものが青点になり、これがマルチバンチを加速したときのトレイン内のエネルギーに相当する。このグラフから 1000 バンチのトレイン内で最大 0.8MeV のエネルギー差があると予測される。

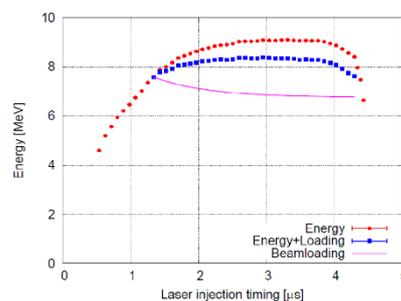


Figure 7: This graph shows an electron beam energy at the exit of the RF-gun without the beamloading compensation at the gun.

そこで、これを補正するために RF 電子銃へ入射する RF パルスに対しても振幅変調を行った。ビームローディングによる減衰を相殺するようなエネルギーを計算し、それに合わせるように調整を行った。その結果が Figure 8 であり、青点が目標のエネルギーで、赤点が測定値である。目標に対して 0.07MeV 以内で揃えられている。

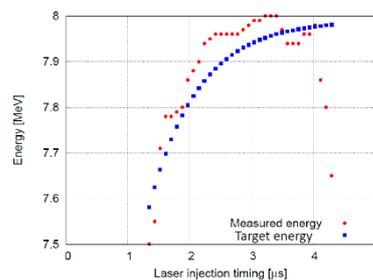


Figure 8: This graph shows an electron beam energy at the exit of the RF-gun with the beamloading compensation at the gun.

この補正を行った状態で再度 X 線生成を行った。Figure 5 と Figure 6 と同じように、Figure 9 が MCP で測定した X 線信号の波形、Figure 10 がトレイン内のサイズの測定を行った結果である。これらのグラフから、トレイン内での X 線強度やビームサイズが以前よりも明らかに均一になっているのが分かり、電子銃でもエネルギー差を補正することで、トレイン内のサイズを揃えられ、トレイン内の

X線生成数の不均一を改善することができた。

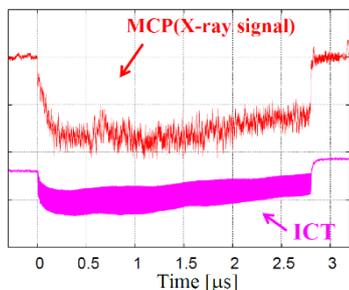


Figure 9: X-ray signal measured by MCP with the beamloading compensation at the gun.

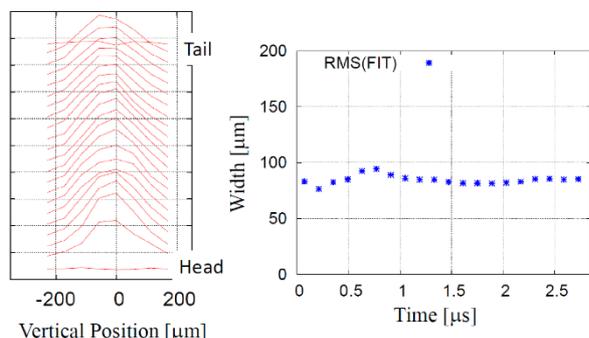


Figure 10: The result of the scan of position between an electron beam and a laser pulse with the beamloading compensation at the gun.

Table 1 が、このX線生成を行っているときの電子ビームおよびレーザーのパラメーターである。LCS によるX線数は生成点で 1.9×10^7 photons/sec と、前回位相イメージを行ったときの6倍まで増やすことができています。

Table 1: Parameters of Electron Beam and Laser Pulse

	Electron beam	Laser pulse
Energy	22MeV	1.17eV(λ : 1064nm)
Intensity	0.3nC/bunch	3.4mJ/pulse
Beam size: σ_x, σ_y	80 μ m, 60 μ m	64 μ m, 41 μ m
Pulse length	15ps(FWHM)	7ps(FWHM)
Number of bunch	1000bunches/train	

3.3 マルチバンチトレイン内のバンチ電荷の均一化

Figure 4 の下のグラフは、ICT で測定した電子ビームカレントの信号であり、トレイン内のバンチ電荷が徐々に低下し、最後はピークの50%まで低下している。これは、電子を生成するレーザーパルス列の強度を反映しており、レーザー光増幅時に前方パルスにエネルギーを取られ、後方ではゲインが下がっているためである。

このレーザーパルスは、モードロックレーザーから出たパルス列をポッケルスセルで1000バンチに切り出し、フラッシュランプ増幅器2段で約1000倍に増幅した後、BBO結晶2つを使って赤外光(1064nm)から紫外光(266nm)に変換して生成している。

前方のレーザーパルス列の強度を下げるため、ポッケルスセルの回路に抵抗を加え時定数を変更し、切り出しの立ち上がり時間を遅くすることで前方のパワーを削るようにした。さらに、1段目のアンプのゲインを下げることでパルス列のエネルギーを均一に近づけた。その結果、Figure 9 の下のグラフにあるように、ICT で測定したトレイン内の電荷は、ピークから50%まで落ちていたのが、25%に改善できた。ただ、ゲインを下げたためレーザーパワーが落ち、バンチ電荷は0.6nC/bunchから0.3nC/bunchに下がっている。今後、電子銃カソードのCs₂Teの再蒸着を行い、量子効率を改善してビームカレントを回復させる予定である。

4. まとめと今後

1000バンチのトレイン内でのX線生成数の不均一は、電子銃出口でのトレイン内のエネルギー差に起因していたが、電子銃でもRFパルスに振幅変調をかけ、電子銃および加速管の両方でビームローディング補正を行うことで、これを改善することができた。また、トレイン内のバンチ電荷の不均一においては、電子生成用のレーザーパルス列のパルスエネルギーを、ポッケルスセルによる切り出し方と増幅器のゲイン調整により、これを改善した。

今後は、電子ビームエネルギーを上げX線エネルギーを増やすことや、衝突点サイズを小さくするための電子ビーム光学の調整を行う。また、電子銃カソードの量子効率改善のためのCs₂Teの再蒸着を行う予定である。これらによりX線数を増強し、再度、タルボ干渉による位相イメージング試験を行う予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「小型加速器による小型高輝度X線源とイメージング基盤技術開発」の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] <http://nkocbeam.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] A. Momose *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L866-L868.
- [5] M. P. Olbinado, *et al.*, JSR2016, Tokyo, Japan, Jan 2016, 11P080 (2016).
- [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] Rigaku journal 30 (2), (2014).
- [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).