

KEK 小型電子加速器 (LUCX) の現状報告 (6)

PRESENT STATUS OF LASER UNDULATOR COMPACT X-RAY SOURCE (LUCX) (6)*

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 multi-bunch electron beam and a laser pulse stacked in an optical cavity at Laser Undulator Compact X-ray (LUCX) accelerator in KEK. Since the autumn of 2011, we have begun X-ray imaging test. In the beginning, it had taken two hours to get an X-ray image because of low intensity of X-ray with 10^4 photons/pulse. To obtain a clear X-ray image in a shorter period of times, we have upgraded the accelerator, which consists of a 3.6 cell photo-cathode rf-gun, a 12cell standing wave accelerating structure and a 4-mirror planar optical cavity. 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 already started the multi-bunch beam generation and X-ray imaging test after upgrade. The accelerator produces 24 MeV beam with the total charge of 380nC in 300 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 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。ここでの X 線源の開発は量子ビーム基盤技術開発計画の一部であり、この加速器では常伝導加速器による LCS を利用した X 線源の開発、および超伝導加速器での LCS-X 線生成実験^[1]のための技術開発を担当している。ここでは今までにレーザー光共振器を用いた X 線生成実験を行い、電子ビームとレーザーの衝突技術や、そのためのモニター開発、X 線検出器の開発を行ってきた。また昨年度は、さらに加速器やレーザー光共振器のアップグレードを行い、常伝導加速器での X 線イメージングのための X 線源の開発を行っている。

小型電子加速器は Figure 1 にあるようにフォトカソード RF 電子銃、加速管、X 線生成部から成り、RF 電子銃で生成したマルチバンチ電子ビームは、その下流の加速管で 30MeV まで加速され、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。

2011 秋、この加速器において 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 線イメージの取得に成功した^[2]。また吸収イメージの他に屈折コントラストによるイメージも取得できた。

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。この実験の撮影では合計 10^8 個の X 線を照射しており、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、撮影に 2 時間ほどかかっていた。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、ノイズの影響が減るため、さらに鮮明な画像を撮ることができると期待される。

昨年、このためのアップグレードとしてビームラインの改修、および新しい光共振器の導入を行った^[3]。加速器側では装置全体の小型化に向けた開発として、新しく 3.6cell RF 電子銃、12cell ブースターを導入した。また X 線生成部では、2 枚ミラーの光共振器から代えて、新たに 4 枚ミラー平面光共振器を導入する。これらの改修により生成 X 線数を 1000 倍以上にすることを目標としており、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。常伝導加速器での X 線イメージングのための X 線源の開発を予定している。

現在、アップグレード後のビームラインで、電子ビームは 24MeV, 300bunches/pulse, 380nC/pulse (1.26nC/bunch)、および 28MeV, 200bunches/pulse, 250nC/pulse (1.25nC/bunch)での運転を行っている。

* Work supported by a Quantum Beam Technology Program of JST

mfukuda@post.kek.jp

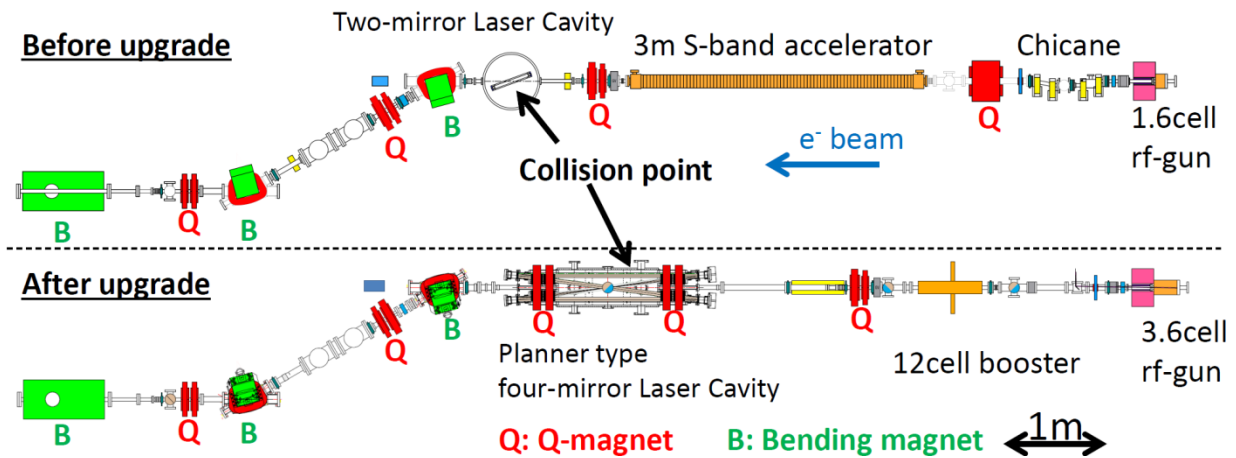


Figure 1: This figure shows the beamline of LUCX accelerator.

また、X線イメージング試験も行っている^[4]。本稿では主にアップグレード後の加速器側の進捗について報告する。4枚ミラー平面光共振器やX線検出については参考文献[5]を参照のこと。

なMoカソードを装着している。このカソード面にはCs₂Teを蒸着しており、カソードに紫外レーザーパルス光(波長266nm)を照射することで電子ビームを生成する。

2. 小型電子加速器

2.1 ビームライン

アップグレードにより、3.6cell RF電子銃および12cellブースターを導入し、そしてRF電子銃へのレーザー入射のためのシケインの取り外しを行い、加速器部分のサイズを5.7mから2.9mへと約半分に小型化した。Figure 1にあるように、この加速器は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電子銃では、マルチバンチ電子ビームを生成し10MeVまで加速する。その後の12cellブースターでさらに30MeVまで加速する。そして、レーザー光共振器内のレーザーパルスと加速した電子ビームを衝突させてLCSによりX線を生成する。衝突後に直後の偏向電磁石で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。

2.2 3.6cell RF電子銃

1.6cellからセル数を増やした3.6cell RF電子銃^[6]を導入することにより、ビームエネルギーを5MeVから10MeVまで引き上げる。これにより下流の12cellブースターのエネルギー利得である20MeVと合わせて目標である30MeVのビームを生成する。LCSで生成するX線は電子ビームのエネルギーに依存しており、目標の15keVのX線を生成するには30MeVの電子ビームが必要となる。

Figure 2とTable 1が3.6cellフォトカソードRF電子銃の構造とそのパラメータである。空洞は基本的に1.6cellのものと同じで滑らかなカーブで構成されており、端板にはロードロック方式により着脱可能

Table 1: Parameter of 3.6cell rf-gun

Frequency (π -mode)	2856 MHz
Qvalue	15000
Coupling β	0.99
R/Q	395 Ω
Mode separation ($\pi-2\pi/3$)	2.8 MHz

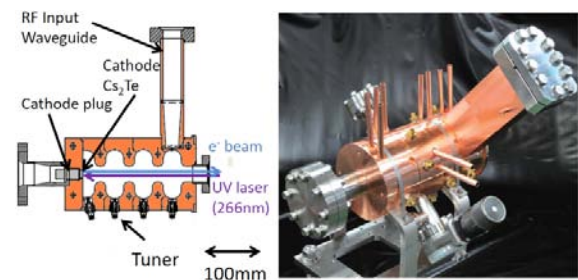


Figure 2: The cut view and the picture of 3.6cell rf-gun.

3.6cell RF電子銃では、存在するモードが4つに増えたため、1.6cellのもの比べてアイリス部を全体的に300 μ m削ることで、モード間隔を2.8MHzまで広げている。またRFインポートも広げることによって、カップリング β を1に調整している。

この3.6cell電子銃は、2011末にインストールし、ビーム試験を始めた。これまでに9.6MeVの電子ビーム生成に成功しており、このときのカソード上の電界強度は96MV/mになっている^[4]。

2.3 12cellブースター

加速器部分を小型化するために3mの進行波型S-

band 加速管から 79cm の S-band 定在波型加速管である 12cell ブースター^[3]へ交換した。ここで電子ビームのエネルギーを 10MeV から 30MeV へと加速する。

Figure 3 が 12cell ブースターであり、Table 2 がそのパラメータである。空洞の構造は RF 電子銃とほぼ同じものになっており、中央部分のセルから高周波を入力し、空洞内に充填されている高周波電場により電子ビームを加速する。内部の電界分布の対称性を良くするため、入力ポートはダブルフィードになっている。また空洞は 12cell あるため、12 個のモードがあり、加速に使用する π モードと他のモードの差を広げるため、3.6cell よりさらに全体を削り、アイリス部の直径を広げて厚さを薄くしている。これにより π モードと隣の $10\pi/11$ との差は 1MHz となっている。このブースターは昨年 7 月に完成しビームラインへ導入している。

Table 2 : Parameter of 12cell booster

Frequency (π -mode)	2856 MHz
Qvalue	17800
Coupling β	1.1
Mode separation (π - $10\pi/11$)	1 MHz

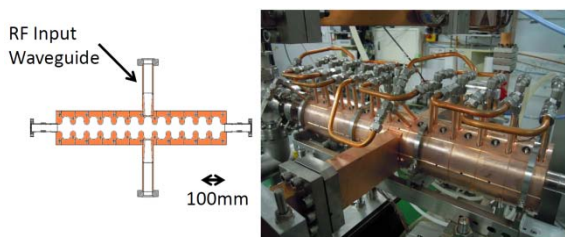


Figure 3: The cut view and the picture of 12cell booster.

2.4 レーザーマスターシステム

この加速器では、共振器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^[3]を導入している。レーザー光共振器では共振を維持するため、制御精度としてナノメートル以下が要求される。Signal Generator(S.G.)の RF 信号を基準とした場合、共振器をパルス光に加えて RF 信号にも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。本レーザーマスターシステムでは、レーザー共振器に加速器側が合わせるので、光共振器の動作安定性は非常に向上している。

3. ビーム調整の現状

3.1 マルチバンチ電子ビーム生成

電子ビームは 357 MHz (2.8 ns 間隔) の繰り返し周波数で生成し、マクロパルスあたり最大 300 バンチのビームを生成している。現在の運転では 24MeV、

300bunches/pulse, 380nC/pulse(1.26nC/bunch) および 28MeV, 200bunches/pulse, 250nC/pulse(1.25nC/bunch) での運転を行っている。エネルギーが高いとバンチ数が減るのは、バンチ数を増やすために RF パルス幅を伸ばすと放電しやすくなり、パワーを上げにくいためである。

Figure 4 はマルチバンチビームの各バンチのエネルギーであり、(A)は 24MeV, 300 バンチ運転、(B)は 28MeV, 200 バンチ運転の時の測定結果である。これは偏向電磁石の下流のビーム位置と磁場強度から算出している。ビーム位置はボタン電極型の Beam Position Monitor(BPM)で測定し、その信号波形から各バンチの位置を算出している。

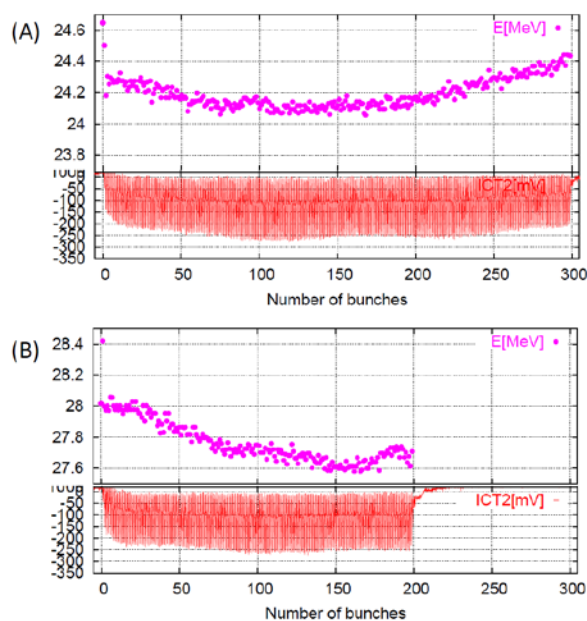


Figure 4: These graphs show the energy of multi-bunch beam and the current transformer waveform.
(A): 380nC/pulse with 300bunches at 24MeV.
(B): 250nC/pulse with 200bunches at 28MeV.

マルチバンチ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 が加速空洞内に満たされていく過渡期にビームを通すことで行っており、この場合後方バンチほど加速電界が上がるが、この上昇分とローディングによる損失分を相殺することでエネルギーを揃えている。各バンチのエネルギー差は約 1.5%(peak-to-peak)となっており、各バンチのエネルギーを揃えて加速することができている。

3.2 衝突点ビームサイズとエミッタンス

X 線生成数を増やすため、衝突点では電子ビームを集束させている。電子ビームサイズは衝突点にある OTR 光を利用したビームプロファイルモニターで測定している。Figure 5 左が、その衝突点のプロファイルである。現在、ビームサイズは Horizontal が σ_x : 70 μ m, Vertical が σ_y : 50 μ m となっている。

また、エミッタンスは Q スキャン法で測定しており、衝突点直前の Q-magnet の磁場強度を変化させ

た時の衝突点ビームサイズの変化を測定して算出している。Figure 5 右は、RF 電子銃下流のソレノイドの磁場強度を変化させて測定したエミッタンスである。ここで最小となるソレノイド磁場に合わせて運転を行っており、エミッタンスは Horizontal が 4π mm mrad、Vertical が 9π mm mrad となっている。

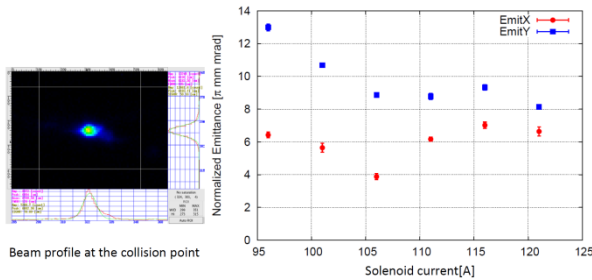


Figure 5: The left picture is the beam profile at the collision point. The right graph shows the result of emittance measurement.

3.3 エネルギー広がり

バンチ当たりのエネルギー広がりには偏向電磁石下流のプロファイルモニタで測定したビームサイズから算出している。Figure 6 は加速位相を変えて、エネルギーとエネルギー広がりを測定した結果である。エネルギーが最大となるクレストから 4° ずれた所でエネルギー広がりが 0.1%と最小になっている。運転では、ここに位相を合わせている。

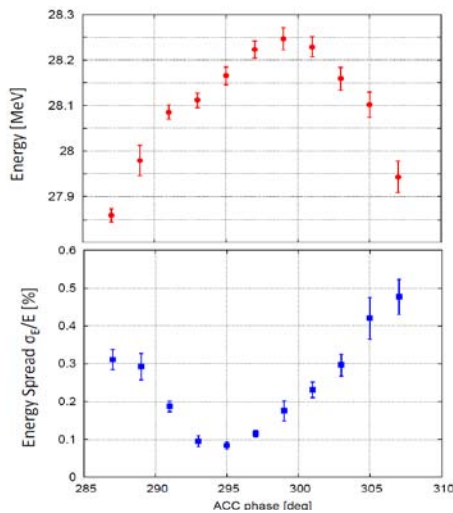


Figure 6: These graphs show the result of energy and energy spread measurement.

3.4 12cell ブースターの暗電流

12cell ブースターの下流にある Faraday cup で加速管からの暗電流を測定した。Figure 7 がその結果である。測定時の RF パルス幅は $2.0\mu\text{s}$ で、このパルスあたりの暗電流の電荷量は 2.5nC/pulse になっている。

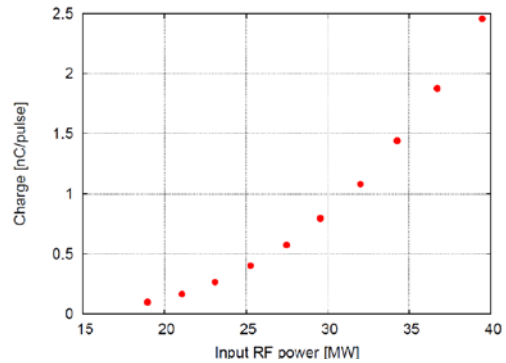


Figure 7: This graph shows the dark current from 12cell booster.

4. 今後

アップグレード後の目標を電子ビーム、レーザーとも達成すれば、X線数はイメージング用の検出器に入る数で 1.7×10^7 photons/pulse となる。この時のX線のエネルギーは 15keV 、エネルギー幅は 10%(FWHM)となる。このX線数になれば 10 ショットの照射で前回と同じ画像が撮れるようになる。X線数を増強することで、より鮮明な画像を取得し、そして最終的には 1 ショットで撮影できることを目標としている。

加速器側の当面の目標はバンチ数を 1000 バンチまで伸ばすことである。これには RF パルス幅を伸ばしていく必要があるが、現在は放電により制限されており、最大 300 バンチとなっている。今後、さらに RF エージングを続け、RF のパルス幅を伸ばし、電子ビームのバンチ数を増やしていくことを目指す。

参考文献

- [1] H. Shimizu, et al., “X-ray generation experiment in STF accelerator on quantum beam technology program”, in this meeting.
- [2] K. Sakaue, et al., “Refraction Contrast Imaging via Laser-Compton X-Ray Using Optical Storage Cavity”, Proc of IPAC12, New Orleans, LS, USA, (2012).
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] K.Sakaue, et al., “Development of a compact X-ray source via laser-Compton scattering using an optical super-cavity”, in this meeting.
- [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).