

Present status of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) (4)*

Masfumi Fukuda^{#,A)}, Aryshev Alexander^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Abhay Deshpande^{A)},
Yosuke Honda^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{C)}, Noboru Sasao^{D)}, Nobuhiro Terunuma^{A)},
Junji Urakawa^{A)}, Masakazu Washio^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801, Japan

^{B)} SOKENDAI: The Graduate University for Advanced Studies
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801, Japan

^{C)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
17 Kikui-cho, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044, Japan

^{D)} Research Core for Extreme Quantum World, Okayama University
Tsushima-naka 3-1-1, Okayama 700-8530, Japan

Abstract (英語)

We have developed a compact X-ray source via inverse Compton scattering between an electron beam and a laser pulse stacked in an optical super-cavity at Laser Undulator Compact X-ray (LUCX) accelerator in KEK. The accelerator consists of a photo-cathode RF-gun and an S-band accelerating tube and now produces the multi-bunch electron beam with 100 bunches, 0.5nC bunch charge and 40MeV beam energy. It is planned to upgrade the RF-gun and the RF system of the accelerator and the super-cavity in order to increase the X-ray yield. The new RF-gun with high mode separation and high Q value has installed and estimated the performance. The dark current has dropped to about half and the emittance is improved by about half compared with that of the old gun. A new klystron for the gun will be installed to provide good compensation with a high-intensity multi-bunch electron beam. A new optical super-cavity consisting of 4 mirrors is also being developed to enhance the stacking power in the cavity and to reduce the laser size at the focal point. In this paper, the status and future plan of the accelerator will be reported.

KEK 小型電子加速器(LUCX)の現状報告(4)

1. はじめに

我々は高エネルギー加速器研究機構(KEK)に設けた小型電子加速器(LUCX) (図1) でパルスレーザー共振器を用いた逆コンプトン散乱による小型X線源の開発を行っている。量子ビーム基盤技術開発プログラムにおいて、この加速器ではパルスレーザー共振器の開発、これを用いたX線生成技術、X線検出器の開発を行っている。X線(33keV)はこの光共振器内に蓄積されたレーザーパルス(1064nm)と電子ビーム(43MeV)とのコンプトン散乱により生成する。高輝度X線源としてはGeVオーダーの電子ビーム蓄積リングを利用したものが、高輝度で高い安定性をもつが、一般的に装置が巨大で高価であり使用できる場所は限られている。しかしレーザーコンプトン散乱の方法ではGeVオーダーの蓄積リングを用いた放射光によるX線源に比べ、より低いエネルギーの電子ビームで同じエネルギーのX線を得られるため、蓄積リングを小型化でき比較的安価に装置を構築できることが期待される。

この加速器ではいくつかの段階を経てレーザーコ

ンプトン散乱を用いたX線源の開発を行ってきた。第1段階として電子源の開発を行い、220nC/train、100bunches/trainのマルチバンチ電子ビームの生成に成功した^[1]。そして第2段階として加速管を追加し40MeVまでエネルギーを上げた^[2]。この電子ビームとパルスレーザー共振器を用いた逆コンプトン散乱によるX線生成実験を行い、40nC/train、100bunches/trainの電子ビームと蓄積されたパルスエネルギー110μJ/pulseのレーザーパルスとの衝突によりX線を生成し、ほぼ予想値と一致した 1×10^4 photons/trainのX線が得られた^[3]。ただ同時にRF電子銃からのダークカレントによるX線検出器へのバックグラウンド信号の問題、RFシステムに起因する電子ビームのバンチ間隔のずれ、ダメージ閾値を超えることによる光共振器のミラー損傷など、いくつかの問題も判明した。生成X線数もさらに増強する必要がある。

これらを解決するために、新しいRF電子銃の導入、RFシステムの変更、4枚のミラー構成される新しい光共振器の導入とアップグレードを計画している^[4]。新RF電子銃はすでに導入されビーム試験を行った。その他も準備を行っている。また、ビームラインの改修も行い、本年3月に完成した(図1)。本稿では、この小型電子加速器の現状と今後の計画について報告する。

* Work supported by a Grant-In-Aid for Creative Scientific Research of JSPS (KAKENHI 17GS0210) and a Quantum Beam Technology Program of JST

mfukuda@post.kek.jp

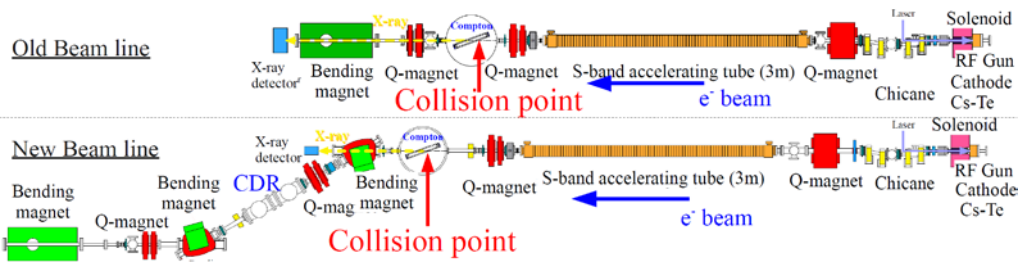


図 1 : 小型電子加速器のビームライン

2. アップグレードの進捗状況

2.1 新 RF 電子銃とその試験結果

電子ビーム強度や品質向上、ダークカレントの低減のため、新しい RF 電子銃^[5]を導入した。これは従来と同じ 1.6cell であるが Cavity の壁面構造は滑らかな曲線になっている(図 2)。さらに端板は溶接、チューナー穴はなくし表面を押し変形させるタイプに変更、レーザー光入射用の斜めポートもなくした。これにより Q 値は約 14000 と現在の RF 電子銃の約 1.8 倍になった。もうひとつの特徴は π モードと 0 モードの共振周波数差が 8.62MHz と従来の約 2.5 倍になっていることである。

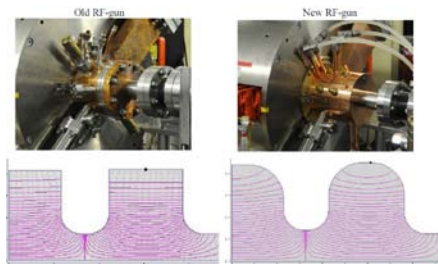


図 2 : RF 電子銃の写真と形状

この新 RF 電子銃はビームライン改修前にすでに導入しビーム試験を行い、ダークカレントおよびエミッタンスを測定した。また電子銃単体運転で 300 バンチのマルチバンチビーム生成試験を行った。

新 RF 電子銃のダークカレントは約半分に低減できた。図 3 は入力 RF パワーに対する 1RF パルス当たりのダークカレントの電荷量をプロットしたものである。パルス幅 $2\mu\text{s}$ の矩形波を入力した。カソードは Cs-Te で量子効率約 0.3% である。新 RF 電子銃は約 250 時間のコミッショニング後、古い電子銃は 2 年以上運転後に測定した。このダークカレントはビームライン途中でのロスで X 線検出器へのバツ

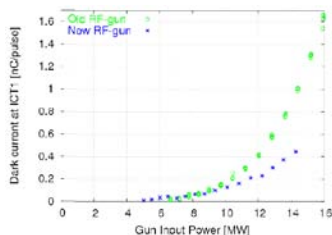


図 3 : 新旧 RF 電子銃の暗電流の測定結果

クグラウンド信号を作る原因となっており、この改善で X 線検出における S/N 比の向上が期待できる。

新 RF 電子銃でのエミッタンスの最小値は X,Y でそれぞれ 3.8π , 1.5π mm mrad と以前の電子銃のときの半分以下まで改善した。図 4 はソレノイド磁場の強度に対するエミッタンスを測定した結果である。測定は 40MeV, 0.4nC/bunch, 4bunches の電子ビームで行われ、エミッタンスは Q スキャン法を用いて測定した。新 RF 電子銃は Q 値が高く加速電場も高くなり空間電荷効果によるエミッタンス悪化が低減された。エミッタンス最小になる磁場強度が新電子銃のほうで高くなっているのもビームエネルギーが上がっていることを示している。

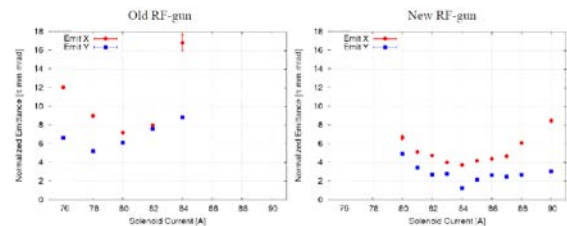


図 4 : 新旧 RF 電子銃のエミッタンスの測定結果。

図 5 は電子銃単体運転時の 300 バンチのマルチバンチビーム生成の試験結果で、5.24MeV、バンチ間エネルギー差 1%、全電荷量 140nC のビームを生成できた。図 5 の下は電流モニタ ICT の生信号であり、各バンチの電荷量が分かる。今後、最大 8000 バンチまでのビーム生成を計画している。また、ビームエネルギーを上げるため 3.5cell の RF 電子銃の製作も行っている^[6]。

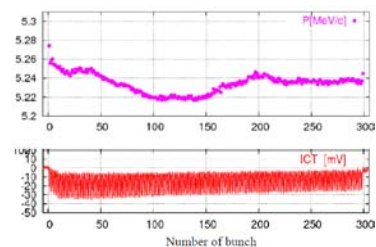


図 5 : 300 バンチビーム生成時の運動量と ICT 信号

2.2 1000 バンチのレーザーパルス生成試験

RF 電子銃用のレーザーの試験として 1000 バンチ (パルス幅 $2.8\mu\text{s}$) をポッケルセルで切り出す試験を行った。現在のポッケルセル結晶は KD*P である。

これは長いパルス幅を切り出すと図 6(左)のようにリングングが起きてしまう。そこでこのピエゾエレクトリックリングングの小さい BBO 結晶(Model 1150-6-1064, LASERMETRICS)に変更した。この結晶で試験した結果が図 6(右)である。きれいに切り出せているのがわかる。今後は最終目標である 8000 バンチ(パルス幅 22.4 μ s)まで切り出すためにこの HV 電源を新しいものに更新し試験する。

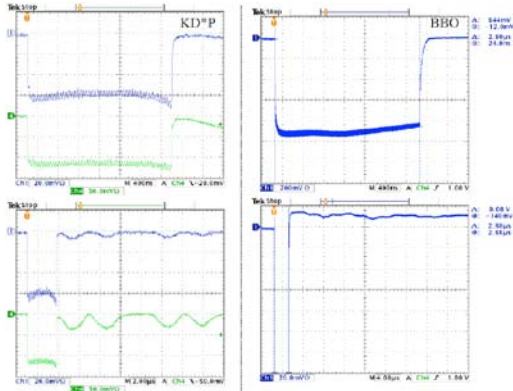


図 6 : 1000 バンチ(2.8 μ s)を切り出した時の様子。

2.3 RF システム

RF 電子銃用にクライストロンを新たに追加し、図 7(右)のように電子銃と加速管で RF システムを独立にする準備をしている。マルチバンチビーム加速におけるビームローディングは RF を満たす過渡期にビームを乗せる Δt 法で補正している。このタイミングを各々で独立に調整可能となり、両方でエネルギー補正が出来るようになる予定である。

また、RF 電子銃単体での運転で最大 8000 バンチの電子ビーム生成を計画しており、この追加するクライストロン(TOSHIBA E3729)は最大パルス幅 24 μ sとなっている。現在これの単体動作試験の準備中で間もなく開始する予定である。

2.4 新ビームライン

新しいビームライン図 1(下)への改修は 3 月に完了、7 月には施設検査に合格した。以前のライン(図 1(上))からの主な変更点は X 線の収量増加のためにレーザーとの衝突点と X 線検出器の距離を縮めたことと検出器へのバックグラウンド信号低減のためにビームダンプを下流へ移動したことである。

また 30 度偏向電磁石の下流で Coherent Diffraction Radiation(CDR)を利用したマイクロ波および軟 X 線源の開発^[7]が今後行われる。

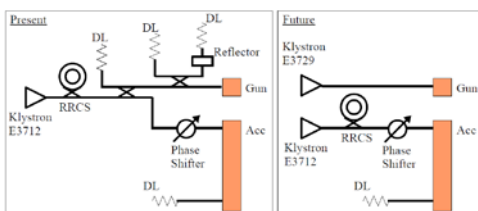


図 7 : RF システム

3. 今後の予定

現在、新しく追加するクライストロンの単体試験運転の準備中である。この試験終了後 RF システムを変更し、50MeV, 200nC/train, 100bunches/train のマルチバンチ電子ビーム生成およびこれを用いた X 線生成実験を行う。その後は加速管を取り除き RF 電子銃単体運転を行う。始めの目標は 5MeV, 3000bunches/train, 0.5nC/bunch のマルチバンチビーム生成である。最終的には 8000bunches を目指す。この電子ビームを用いた軟 X 線生成実験も行う予定である。これらのパラメータは表 1,2 にある。このときの予想 X 線数は 1.8×10^7 photons/train(< 20mrad)となる。

表 1 : 電子ビームパラメータ(in future plan)

Energy	5MeV	50MeV
Intensity	0.5nC/bunch	2nC/bunch
Num. of Bunch	8000 bunches	100 bunches
Bunch spacing	2.8 ns	2.8 ns
Bunch length (FWHM)	10 ps	10 ps
Repetition Rate	12.5 train/sec	12.5train/sec
(σ_x, σ_y) at C.P.	200 μ m, 60 μ m	80 μ m, 40 μ m

表 2 : レーザーパラメータ (in future plan)

Wave length	1064nm
Intensity	10mJ/pulse
Pulse width	7ps
Beam size(σ_x, σ_y)	8 μ m, 8 μ m

参考文献

- [1] K. Hirano, et al., "High-intensity multi-bunch beam generation by a photo-cathode RF gun", Nucl. Instr. and Meth. A560, pp233-239 (2006).
- [2] S. Liu, et al., "Beam loading compensation for acceleration of multi-bunch electron beam train", Nucl. Instr. and Meth. A584, pp1-8 (2008).
- [3] K. Sakaue, et al., "Demonstration of Multi-Pulse X-ray Generation via Laser-Compton Scattering Using Pulsed-Laser super-cavity", Proc of LINAC08, Victoria, British Columbia, Canada (2008).
- [4] M. Fukuda, et al., "Future plan of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)", Proc of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [5] A. Deshpande, et al., "Design of a mode separated RF photo cathode gun", Nucl. Instr. and Meth. A600, pp361-366 (2009).
- [6] T. Aoki, et al., "Development of a 3.5cell S-Band photocathode RF electron gun", in this meeting.
- [7] A. Aryshev, et al., "A Compact Soft X-ray Source based on Thomson Scattering of Coherent Diffraction Radiation", Proc of IPAC'10(MOPEA053).