

PRESENT STATUS OF LASER UNDULATOR COMPACT X-RAY SOURCE (LUCX) (5)^{*}

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

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

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

C) Research Core for Extreme Quantum World, Okayama University
Tsushima-naka 3-1-1, Okayama 700-8530, Japan

Abstract

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. However, some problems became clear in this experiment. It is planned to upgrade the RF-gun and the RF system of the accelerator and the super-cavity in order to resolve them and also increase the X-ray yield. The new RF-gun with high mode separation and high Q value has already introduced. A new klystron for the gun has also been installed to provide good compensation with a high-intensity multi-bunch electron beam. Furthermore, we have tried to demonstrate the X-ray generation with new RF synchronization system which adopted the reference signal of the cavity laser as a master oscillator. In this paper, the status and future plan of this accelerator will be reported.

KEK 小型電子加速器(LUCX)の現状報告(5)

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)はこのレーザー共振器内に蓄積されたレーザーパルス(1064nm)とマルチバンチ電子ビーム(43MeV)との逆コンプトン散乱により生成する(以降、レーザーコンプトン散乱と呼ぶ)。高輝度X線源としてGeVオーダーの電子ビーム蓄積リングを利用したものがあり、これは高輝度で高い安定性を持つが、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。一方、レーザーコンプトン散乱を用いる方法では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も同じエネルギーのX線を得られるため、小型で比較的安価な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。最初に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]。そして次に加速管を追加し40MeVまでエネルギーを上げた^[2]。このマルチバンチ電子ビームとパルスレーザー共振器を用いたレーザーコンプトン散乱によるX線生成実験を行った。40nC/train, 100bunches/trainの電子ビームと共振器に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]。ただ同時にいくつかの問題も判明し、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があった。また生成X線数もさらに増強する必要がある。

これらの問題を解決するためにアップグレード^[4]を行ってきており、これまでに新形状の空洞を持つRF電子銃の導入、電子銃用クライストロン追加によるRFシステムの変更、ビームラインの改修、共振器用レーザーで作り出した基準信号で加速器を動かすLaser Master systemの導入を行った。これら以外のアップグレードについても計画しており、準備を行っている。その他にCoherent Diffraction Radiation (CDR)光を利用した軟X線生成実験も行っている^[5]。

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 Quantum Beam Technology Program of JST

[#] mfukuda@post.kek.jp

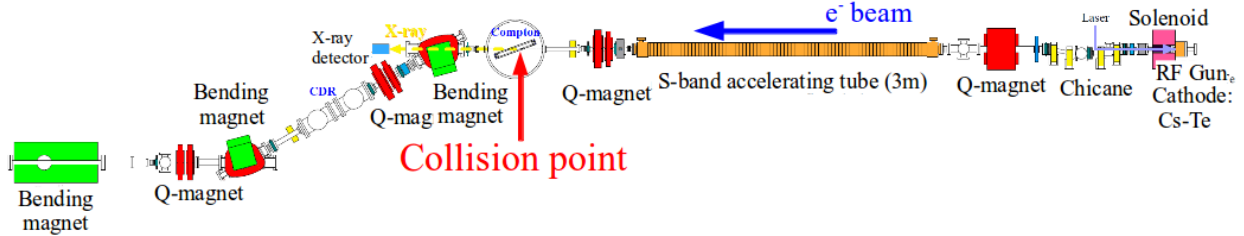


図 1 : 小型電子加速器のビームライン

2. アップグレードの進捗

2.1 X線検出器へのバックグラウンド信号

RF 電子銃からのダークカレントのビームロスによる X 線検出器へのバックグラウンド信号が大幅に減少したことが、今回の X 線生成実験では確認できた。図 2 は検出器として Microchannel plate (MCP)を用いた時のバックグラウンド信号である。以前(左図)に比べて今回(右図)はダークカレントによる信号(赤線)が大幅に減少しているのが分かる。この理由として 2009 年に空洞形状を新しくした RF 電子銃を導入^[6]によるダークカレント半減がある。その他にビームライン改修によるシケインの再導入やロスの大い衝突点後の Q-magnet の部分が偏向電磁石後に行き X 線ラインから逸れたことが考えられる。

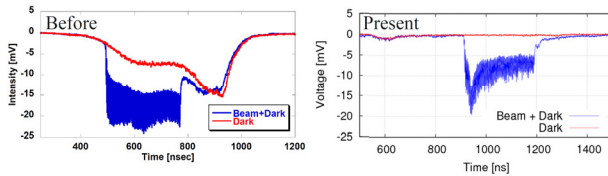


図 2 : X 線検出器(MCP)のバックグラウンド信号

2.2 RF system の変更とその結果

新しいクライストロン(TOSHIBA E3729)を RF 電子銃用に新たに追加 (図 3 右)し、2010 年 12 月より 2 台体制に変更して運転を開始した。これは RF 電子銃出口でのバンチ間のエネルギー差が残っていることに起因する、マルチバンチビームのバンチ間隔がずれる問題を解決するためである。この変更で RF 電子銃と加速管の RF system が分離できたため、独立に RF とビームのタイミングを調整することが

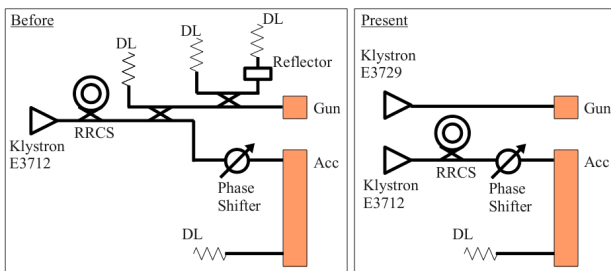


図 3 : RF システム

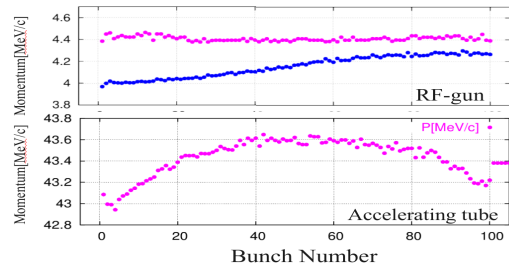


図 4 : 各バンチのエネルギー

可能となり、両方でビームローディングを補正するための調整ができるようになった。図 4 は RF 電子銃下流と加速管下流でのそれぞれのバンチ毎のエネルギーである。RF 電子銃後でエネルギー補正が出来るようになり、エネルギー差(p-p)が 7.5%から 1.5%まで下げられた。加速管後のエネルギー差(p-p)は 1.4%となっている。

2.3 Laser Master system

現在 X 線生成実験時には、光共振器用レーザーのレーザーパルス列の信号から 357MHz の RF 信号を作り、これを加速器とレーザーとの同期用 RF 信号のマスターにするシステム(Laser Master system)を採用している(図 5)。これはレーザー光共振器の共振器長に共振器用光源レーザーおよび加速器を同期させる方式である。以前の Signal Generator(S.G.)を使った同期システム(図 5 上)では、光共振器をその光源レーザーに同期させ、さらに光源レーザーを加速器に合わせるため、光共振器とレーザーの両方の PLL が必要で、これを維持するのが難しく実験中に何度も PLL が外れていた。Laser master system では、光共振器にレーザーを同期させるだけで良いので、以前よりずっと安定になる。実際に 8 時間の実験で一度も PLL が外れることはなかった。このためさらに Finesse を上げることが可能となる。また共振器用ミラーとして径の大きなものを使用できる可能性があり、これによりミラー上のレーザーサイズを大きくし、問題であるダメージ閾値による蓄積パワー制限を回避できる可能性が出て来る。

ただし、光共振器長で基準周波数が決まるため、共振器の調整により周波数が変わる。これに合わせて加速器の RF 空洞(RF 電子銃および RRCS)の共振周波数を合わせる必要がある。このため光共振器調整後に必ず加速器側の調整が必要になる。今回の実験では周波数が 2856MHz から+240kHz ずれたが加速器運転に問題は出なかった。

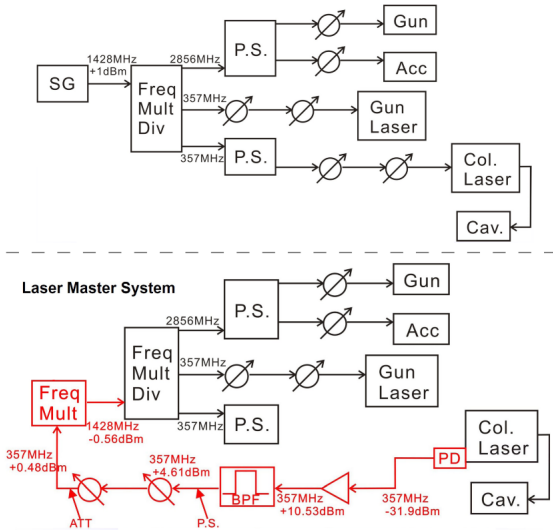


図 5 : 同期システム

2.4 Laser master system を用いた X 線生成実験

Laser master system を導入して X 線生成実験を行い、X 線を検出することが出来た(図 6)。図 6 右は BG 信号を引き X 線信号のみにしたものである。各バンチとも衝突できており Laser master system でも問題なくレーザーパルスと電子ビームを衝突できることが確認できた。前半のほうが信号が強いが、ビームロスによる BG 信号も同じ傾向を示しており、衝突タイミングよりは電子ビームサイズか位置が各バンチで違っているためと推測される。

生成 X 線数は 4×10^3 photons/collision となった。まだ加速器のビーム調整が不十分でビームサイズが大きかったため、以前の 40%ほどになっている。

2.5 ロングパルス化用ポッケルセルの試験

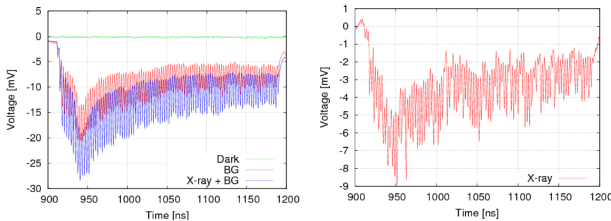


図 6 : MCP で測定した X 線信号

最大 24 μ s の Klystron で 8000 バンチのビーム生成を計画している。このためビーム生成に必要なレーザーパルス列も同じ長さで切り出す必要がある。KD*P 結晶ではピエゾエレクトリック効果によるリングングが起きるため BBO 結晶のポッケルセルを使用した。CW レーザーで切り出しテストを行った結果が図 7 で 30 μ s が切り出せることを確認できた。立ち上がりは 8ns 以下となっている。この試験では Leysop 社製 BBO Pockels cell BBO-6-40-AR1064、BME 社製 Pockels cell driver PCN-dpp を使用した。

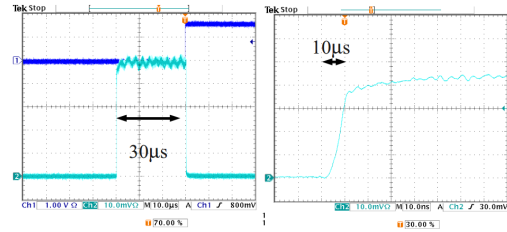


図 7 : ポッケルセルで切り出したレーザー

3. 震災の影響

震災後、RF 電子銃の共振周波数が 700kHz 以上ずれ、RF 波形も変化し Filling time は 0.76 μ s であったのが半分近くになってしまった。地震の影響でキャビティ形状が変形してしまったと思われる。ただ、これでも 4.5MeV のビーム生成は出来ており、現在はこれで運転している。

4. 今後の予定

RF 電子銃の更新、クライストロン追加、ビームライン改良、Laser master system 導入などのアップグレード後に X 線生成実験を行い、このシステムで X 線生成ができることを確認できた。今後は X 線数を増やすため、電子ビームのバンチ数増加、光共振器のミラー反射率の向上およびバーストアンプの増強を行う。加速器側の当面の目標は 1000 バンチまで増やすことである。さらに加速器を小型化するため導入する予定の 3.5cell の RF 電子銃および 12cell Booster の製作も行っている^[7]。最終的には 8000 バンチのマルチバンチ電子ビーム生成および 10^8 photons/sec 10%bw の X 線生成を行い、X 線イメージングを目指す。

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. Aryshev, et al., "A compact soft X-ray source based on Thomson scattering of coherent diffraction radiation", in this meeting.
- [6] A. Deshpande, et al., "Experimental results of an rf gun and the generation of a multibunch beam", Phys. Rev. ST Accel. Beams 14 063501 (2011).
- [7] T. Aoki, et al., "Development of an S-band multi-cell accelerating cavity for rf gun and booster linac", in this meeting.