

Upgrade plan of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)(2)*

Kazuyuki Sakaue^{† A)}, Masakazu Washio^{A)}, Sakae Araki^{B)}, Aryshev Alexander^{B)}, Masafumi Fukuda^{B)}, Junji Urakawa^{B)},
Nobuhiro Terunuma^{B)}, Yosuke Honda^{B)},

^{A)}Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)

3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have been developing 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 can generate 30-40MeV electron beam with 100 bunches/train. As a laser target, we have been developing a pulsed laser storage cavity with burst operation. We have already succeeded in obtaining X-ray images, however, we need more than 8000 images accumulation for one image. We are now planning to upgrade both accelerator and laser cavity in order to increase an X-ray flux. As for laser cavity system, we designed new cavity system with larger laser spot on mirror surface to increase the stored power. Also, the colliding angle with electron beam will be improved from 20deg to 7.5deg. Owing to these improvements and accelerator upgrade, about 600 times larger X-ray flux will be achievable. In this conference, we will report the recent results of our experiment, upgrade plan of laser storage cavity and expected X-ray flux.

KEK 小型電子加速器 (LUCX) アップグレード計画 (2)

1. はじめに

KEK 小型電子加速器 (LUCX) では、レーザーコンプトン散乱 (LCS) を利用した X 線源の開発を行っている。電子ビームはフォトカソード RF 電子銃で生成し、加速管で最大 40MeV まで加速する。パルスあたり 100 バンチのマルチバンチ電子ビーム加速が可能であり、大強度かつ高品質の電子ビームを生成することが可能となっている。その後、光共振器内のレーザーパルスと衝突させ 15~30keV の X 線の生成を行っている。レーザーパルスの繰り返しは電子バンチの繰り返しと同期しており、X 線もトレインあたり 100 パルス生成されることになる。このようなマルチバンチ電子ビームとの衝突のためにレーザー光は光共振器への蓄積及び電子ビームタイミングに合わせて増幅するバーストモードと呼ばれる手法を用いてレーザーターゲットを生成している。^[1] これまでに LCSX 線の検出には成功しており^[2]、X 線イメージングの取得も行っている^[4]。しかしながら現状ではまだまだ X 線強度が足りないのが現状である。そこで現在 LUCX 全体の改良を行っている。本論文では次節にて LUCX における LCSX 線生成のこれまでの成果を述べ、3 節にて X 線強度増強のためのレーザー蓄積装置の改良設計の詳細を、4 節にて期待される X 線数に関して議論し、5 節でまとめと今後のスケジュールについて述べる。加速器部の詳細及び同様に予定されている加速器の改良に関しては^[3]を参照されたい。

2. LUCX における LCSX 線生成試験の現状

LUCX ではマルチバンチ電子ビームと光蓄積装置を用いたレーザーコンプトン散乱研究を行ってきており、2008 年に LCSX 線の検出に成功した。^[2]以降 X 線の増

強及び X 線イメージング試験を行っており、昨年度 X 線イメージの取得に成功した。^[4]現状の X 線の生信号を以下の図 1 に示す。

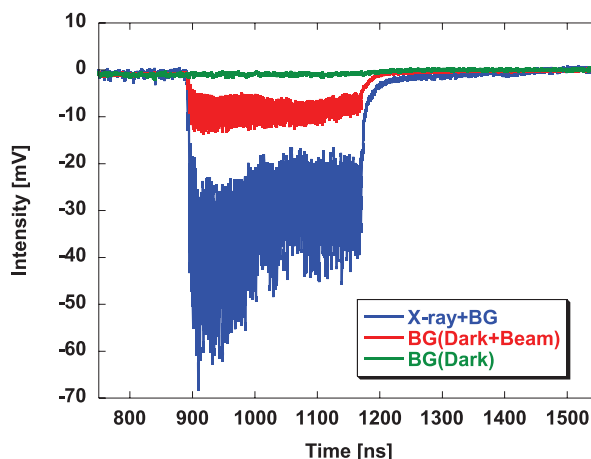


図 1: MCP を用いて取得した LCSX 線とバックグラウンド信号

図 1 は Micro-Channel Plate (MCP) を用いて取得した LCSX 線の生信号である。緑線はダークカレントのバックグラウンドを示しており、ほぼ検出されていない。これは様々なバックグラウンド削減の効果によるものである。赤線はビームからのバックグラウンドとなっており、100 本のパルス状のバックグラウンドが見取れる。青線はさらにレーザーターゲットである光共振器を動作させた際の信号であり、バックグラウンドに LCSX 線が上乗せされている。電子ビームバックグラウンドと同タイミングのパルス信号が大きく増強されているのがわかる。MCP の検出効率はずでに校正済みであり、約

* Work supported by JST Quantum Beam Technology Program.

[†] kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

5%であることを考慮すると X 線の強度は 2.1×10^5 /sec であった。当然この X 線強度では実用に堪えるものではないが、図に示す通り S/N が大きく改善されたため、X 線イメージの取得は可能であろうと判断し、試験を行った。

X 線イメージ取得用の検出器には同様に MCP を基本にしたものを使用した。蛍光面を付属した MCP を用いることによって増幅された電子を画像化している。詳細は [4] を参照されたい。取得した X 線イメージのサンプルを 1 例以下の図 2 に示す。



図 2: LCSX 線によって取得したホッケの背骨像

図 2 は 15keV LCSX 線によって取得したホッケの背骨のイメージである。電子ビームのエネルギーを 30MeV に調整することによって X 線のエネルギーを 15keV にすることが可能である。背骨のみならず周りの軟組織まできれいにイメージングできていることがわかる。しかしながら、本イメージには約 10000 ショットの画像蓄積が必要であった。これは X 線強度の不足に起因する。しかしながらターゲットとなる X 線強度の算出がこの画像によって可能になったのみならず、10000 ショットもの画像蓄積を行ったにもかかわらず像が全くぶれていないことから X 線の線源位置が常に安定していることを示している。これは我々の X 線源がレーザーターゲットとして光共振器を用いているため非常に安定なレーザー位置を保持しているからであると考えている。

我々の X 線源開発の最終目標としては、図 2 と同程度以上のイメージを 1 ショットで取得することである。したがって、X 線強度を 10000 倍向上させることを最終目標として掲げている。

3. LUCX レーザー蓄積装置のアップグレードデザイン

前節の結果を受けて現在 LUCX ではシステムのアップグレードを行っている。本節ではレーザー側のデザインに関して述べる。まず始めにアップグレード後の

LUCX のデザインイメージ図を図 3 に、レーザー蓄積装置周りのイメージ図を図 4 に示す。

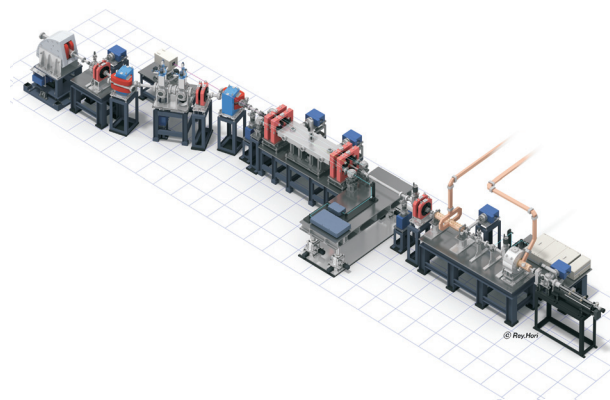


図 3: アップグレード後の LUCX のイメージ図

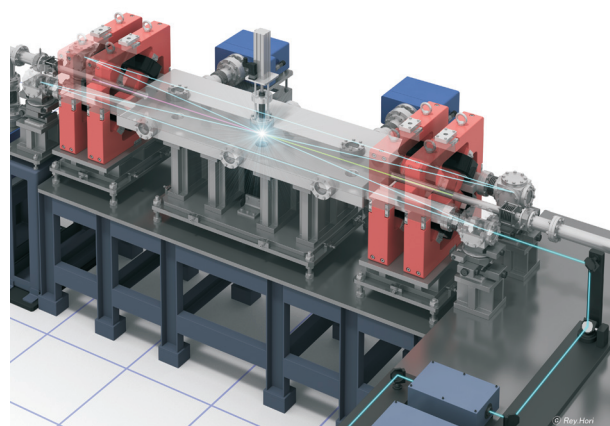


図 4: アップグレード後の LUCX レーザー蓄積装置イメージ図

LUCX ではこれまで光蓄積装置として 2 枚の凹面鏡を用いた共振器を用いてきた。共振器の長さは電子バンチの繰り返しと同期させるために 420mm としていた。バーストモード蓄積を行うことによってすでに 0.4mJ のパルスの蓄積を達成している。LCSX 線を増強するためにはレーザーパルス強度を増強させるのが最も効率が良い。しかしながらこれまでの試験において本 2 枚ミラー光共振器ではミラー上のレーザー強度が強すぎるためにミラー表面の破壊が観測されており、ほぼ限界に近い状態で運転を行っていた。このため 2 枚ミラー共振器では限界と判断し、図 4 に示すように 4 枚のミラーを用いた Bow-tie 型の光共振器を設計した。この共振器は 2 枚の凹面鏡と 2 枚の平面鏡によって構成されている。このような構成にすることによって共振器の安定領域が増えるためミラー間の距離を広くとることができ、ミラー上で非常に大きなスポットサイズを実現することが可能である。以下の図 5 に共振器内に蓄積されているレーザーの挙動を示す。

このような 4 枚ミラー共振器では凹面鏡上である程度

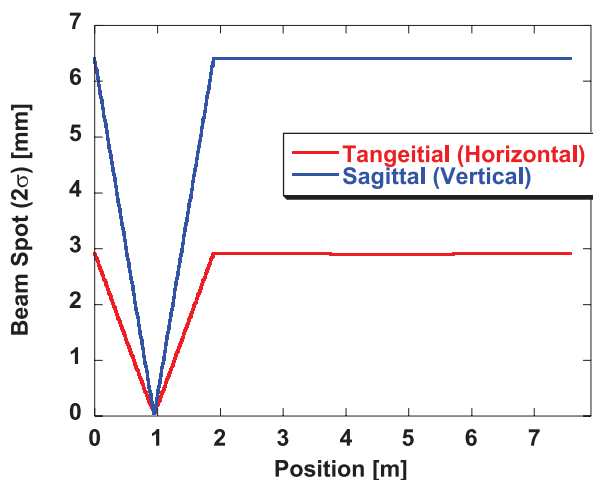


図 5: 電子ビームエネルギーと生成 X 線エネルギーの関係

角度を持って反射するため見かけの曲率半径が Sagittal 面 (Vertical) と Tangential 面 (Horizontal) で異なり、扁平な形状のプロファイルとなる。図中のレーザーが集束・発散される位置に凹面鏡が置かれている構成である。共振器の 1 周は 7.56m となっており、357MHz 繰り返しのパルスが 9 パルス同時に蓄積されることになる。収束点におけるレーザーサイズは 50/109 μm (2σ) であり、ミラー上のサイズは 6.4/2.92mm(2σ) である。これまでの共振器では収束点で 60 μm 、ミラー上で 1.1 であった。したがって、収束点ではほぼ同等の性能であり、ミラー上の面積としては約 20 倍になっているため 20 倍程度のパルス強度を蓄積できると期待している。

また、同様に衝突角度についても改善を施している。これまでの 2 枚ミラー共振器では衝突角度は 20 度としていた。今回ミラー間の距離を広くとることによってより効率的な正面衝突に近い角度での衝突が可能となり、7.5 度の衝突角を実現できる。これは X 線強度 (ルミノシティ) としては約 3 倍改善することにあたる。

以下の表 1 に改良型 4 枚ミラー共振器のデザイン値をまとめる。

表 1: LUCX 改良型共振器のスペック

周長	ウェスト (H)	ウェスト (V)
7.56m	109 μm	50 μm
スポット (H)	スポット (V)	衝突角
2.92mm	6.4mm	7.5 度
凹面間距離	フィネス	パルスエネルギー
1.89m	2000	8mJ

ミラー上のスポットを大きく拡大したことによってパルスエネルギーが 8mJ と非常に大きく向上するとともに衝突角が改善することによって約 60 倍の X 線強度の向上が見込まれる。現在この共振器の製作をしている最中であり、基礎試験を行っている段階である。

4. アップグレード後の LCSX 線

前節に述べたようにレーザー側の改良によって 60 倍の X 線強度の改善が見込める。また、加速器側も同様に改良を行っており、100 バンチ運転から 1000 バンチ運転へ 10 倍の電子ビーム強度の増強が現在進行中である [3]。レーザーのバースト増幅時間幅は約 100 μs と 1000 バンチ運転に対しても十分な幅があるため、バンチ数の向上の分だけ X 線強度が向上することになる。したがってレーザー側と合わせることによって約 600 倍の向上が期待されている。これは最終ターゲットである 10000 倍には及ばないものの、非常に大きな向上である。これらのアップグレードによって X 線強度は $2.1 \times 10^5/\text{sec}$ から $1.26 \times 10^8/\text{sec}$ と大きく改善し、数ショットで前述の図 2 のイメージが取得できることになる。

5. まとめと今後の課題

現在前述の改良型 4 枚ミラー光共振器の製作を行っているとともに製作完了とともにすぐに試験に移れるように基礎試験を行っている。扁平ビームを蓄積する技術や効率よくマッチングさせる技術などを試験しており、一定の目処が立っている。製作は今秋に完了する予定であり、加速器側のアップグレードも同タイミングで終了する予定である。今秋にはどちらもアップグレードした状態での LCSX 線生成試験を行うことが可能であり、まずは今回のターゲット X 線強度である $1.26 \times 10^8/\text{sec}$ を目指していくことになる。また、その後同様に X 線イメージング試験を行うとともにより高分解能な検出器の試験や位相コントラストイメージングを行っていく予定である。

参考文献

- [1] K. Sakaue et al., Nucl. Instrum. Meth. A637(2011)S207.
- [2] K. Sakaue et al., Rev. Sci. Instrum. 81(2010)123304.
- [3] M. Fukuda et al., Proc. of this conference, THPS133.
- [4] K. Sakaue et al., AIP Conf. Proc. in press.