

KEK 小型電子加速器におけるレーザーコンプトン散乱を利用したX線生成強度の改善

IMPROVEMENT OF X-RAY YIELD PRODUCED BY LASER COMPTON SCATTERING AT LUCX ACCELERATOR

福田将史^{#,A)}, 荒木栄^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, 浦川順治^{A)}, 坂上和之^{B)}, 照沼信浩^{A)},
本田洋介^{A)}, 森川祐^{A)}, 鷺尾方一^{B)}

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

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

Abstract

We are developing a compact X-ray source based on laser Compton scattering (LCS) between an electron beam and a laser pulse, which is stored in an optical cavity, at Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) accelerator in KEK. The purpose is to develop a compact X-ray source that can be introduced by companies and hospitals. To generate 6-10keV X-rays, a multi-bunch electron beam with the energy of 18-24MeV is collided with a laser pulse in a 4-mirror planar optical cavity which is enhanced by stacking injected laser pulses. We have also taken X-ray images with the generated X-rays by LCS. However, the X-ray intensity is still insufficient for use of X-ray imaging. Therefore, we have continued to improve the intensity of the X-ray flux. In an electron beam, the number of bunches is extended to 1000 bunches. The beam loading, which is a problem during acceleration, is compensated by applying amplitude modulation to input RF pulse. In the laser cavity, the stored power is limited by the damage of the mirror surface. To avoid it, the mirrors is kept clean in installation and the laser spot size on the mirror is also extended. Recently, the repetition rate of the beam pulse is also increased from 3.13Hz to 12.5Hz and the tuning of the electron beam and the laser cavity has been continued accordingly.

1. KEK 小型電子加速器でのX線源開発

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の小型電子加速器(Laser Undulator Compact X-Ray Source: LUCX)では、企業や病院が導入できるような小型X線源を作ることがを目的として、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。X線源として、大型の電子ビーム蓄積リングを用いた放射光源によるものがあり、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る。一方、LCS を利用した方法では、約 2 桁低いエネルギーの電子ビームでX線を生成できるので、装置を小型化できる。ただし、X線源として利用するには、まだX線の光量を増強する必要があるため、加速器やレーザー装置の開発を要する。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。

この開発を行っている加速器の構成は図1のようになっている。ここでは、S-band のフォトカソード RF 電子銃で生成したマルチバンチ電子ビームを S-band 定在波型加速管で 18-24MeV まで加速する。このビームを 4 枚ミラー平面光共振器内に蓄積したレーザーパルス(波長:1064nm)と衝突させ、LCS により 6-10keV の X 線を生成する。

これまでに LCS によるX線を用いて吸収、屈折コントラ

ストのX線イメージ[1,2]のほか、タルボ干渉を利用した位相イメージング[3]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ている[4]。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 3.13Hz のビームパルス繰り返しで、24MeV、1000bunches/pulse、600nC (0.6nC/bunch)の電子ビームを生成し、これとの LCS による X 線生成を行っており、さらにX線強度を上げるために、この繰り返しを 4 倍の 12.5Hz にして、加速器およびレーザー共振器の調整を行っている。

本稿では、これら X 線生成やイメージング試験について報告する。

2. 小型電子加速器

現在の小型電子加速器のビームラインは Fig. 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。その後の四極電磁石により収束し、X線生成部にある 4 枚ミラー平面光共振器内のレーザーパルスと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、偏向電磁石により X 線と電子ビームは分離し、X 線のみを Be 窓から大気中に取り出している。

[#] mfukuda@post.kek.jp

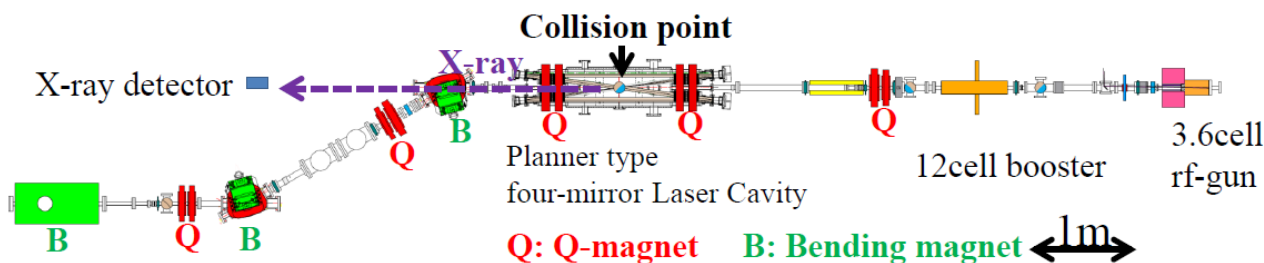


Figure 1: The beamline of the LUCX accelerator.

電子源である S-band の 3.6cell フォトカソード RF 電子銃[5]は、BNL-GunIV[6]タイプの RF 電子銃をベースに、そこから滑らかな曲線で構成する空洞形状に変更し、さらにセル数を 3.6cell まで増やしたものである。Cs₂Te を蒸着した Mo カソードに、紫外レーザー光(波長 266nm)を照射して電子ビームを生成する。また、12cell ブースターは S-band 定在波型加速管[1]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。

衝突点には 4 枚ミラー平面光共振器[2]を設置している(Fig. 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。中心の光軸がクロスする部分で凹面ミラーによりレーザー光を集光している。また、ミラー表面の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、ミラー上のスポットサイズを拡大できるようになっている。共振器に入射するレーザー光は、入射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する。これにより、電子ビームがいるタイミングで蓄積パワーを約 1000 倍まで増幅している。

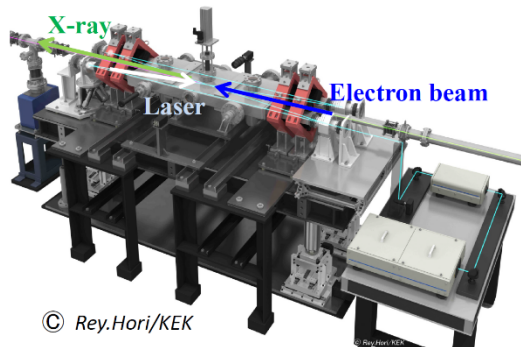


Figure 2: 4-mirror planar laser cavity.

生成した X 線は、偏向電磁石で電子ビームと分離後、真空チャンバーを通り、衝突点から 6.5m 後にある厚さ 300 μ m の Be 窓から大気中に取り出す(Fig. 3)。これは空気による X 線強度の減衰を避けるためである。

真空チャンバー内には、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できる。また、この MCP はムーバーによって 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下流に設置したイメージ検出器まで X 線を通すことができる。X 線イメージング取得用の検出器には RIGAKU 社

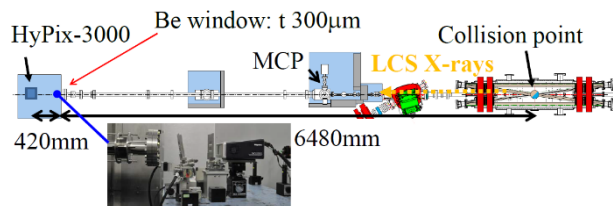


Figure 3: This picture shows the setup of X-ray detectors. The MCP measures the intensity of X-rays. The HyPix-3000 is an image sensor which has the active area of 77.5mm x 38.5mm and the pixel size of 100 μ m x 100 μ m. 製の HyPix-3000[7]を使用している。

3. X線強度増大のための改善

3.1 電子ビーム

電子ビームの強度を上げるため、バンチ数を伸ばしていき、現在は、22MeV, 1000 bunches/pulse, 600nC/pulse のマルチバンチ電子ビームを生成している。この加速時に問題となるビームローディングの補正は、加速空洞へ入射する 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[8]。この補正をしないと、パルス内のバンチ間でエネルギー差ができ、電子銃直後にあるソレノイドや四極電磁石による集束に差が出て、衝突時のビームサイズが変化し、パルス内の X 線強度も減少してしまう。この補正後、パルス内のエネルギー差は電子銃出口で 0.9%、加速後で 1.3%に抑えることが出来ている。[8]

Table 1 に、X線生成を行っているときの電子ビームのパラメーターを載せている。

3.2 レーザー光共振器

LCS により X 線強度を上げるためには、レーザー光共振器に蓄積するレーザーパワーを上げる必要があるが、共振器を構成するミラーの耐久性により最大蓄積パワーが制限されてきた。Figure 4 は、バースト時のレーザーマクロパルスの波形と、ミラー表面が損傷したときの写真である。損傷時のミラー上のレーザースポットサイズは約 2mm(2 σ)、マクロパルス(30 μ s, 11000pulses)のレーザーパワー密度の推定値は 240J/cm² である。写真から誘電多層膜が破壊され融解しているように見える。損傷部分は局所的でスポットサイズよりは 1/5 から 1/10 くらいの大きさになっている。

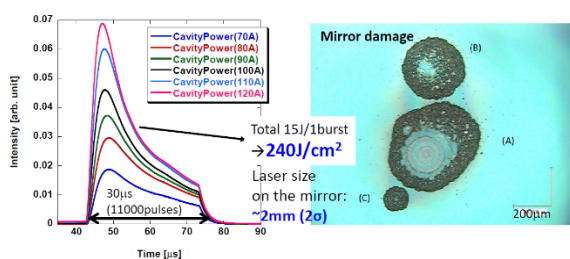


Figure 4: Waveform of laser macro pulse in the laser cavity and the picture of the damaged surface of the mirror.

現在は、これに対処するため、真空チェンバーへミラーを設置する際、反射表面を清浄な状態に保つ、ミラー上のレーザースポットサイズを拡大しパワー密度を下げる、損傷閾値の高いコーティングのミラーを使用するということをしている。

光共振器を構成するミラーは真空チェンバー内に設置している。ミラーインストール時には大気中で表面にホコリなどが付着する可能性がある。このための対策として、大気開放部をクリーンブースで覆う、ミラー表面をファーストコンタクト[9]でクリーニングするというを行っている。ファーストコンタクトはミラー表面に塗ると固まってフィルム状になり、剥がすときに一緒にミラー上の汚れを取り去ることができるものである。また、真空へ引く際にも、チェンバー内のホコリが舞ってミラーに付着するのを防止するために、大気圧から 100Torr までは 1Torr/sec 以下の速度で引くようにしている[10]。

ミラー上のスポットサイズは凹面鏡間の距離を調整して広げている。ミラー上のスポットサイズは、ミラーからの漏れ光を薄い板に当ててプロファイルを見ることで測定している。Figure5 が凹面鏡の位置とその時のスポットサイズの測定値と計算値(実線)である。現在は矢印で示した 6.8mm x 2.5mm のサイズにしている。また、ミラー上のサイズを広げることで、焦点でのサイズは逆に小さくなり、この点もX線強度を上げることにもつながる。

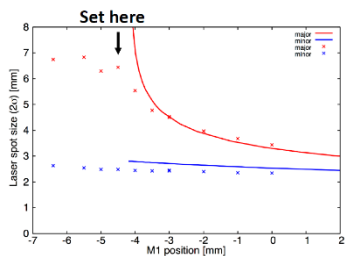


Figure 5: Laser spot size on the mirror as a function of the position of the concave mirror.

さらに複数のメーカーのミラーの損傷閾値の測定を行っている。波長 1064nm、パルス幅 10ns、照射サイズ 350μm x 340 μm のレーザーパルスをミラーに照射し、1照射ごとに、照射位置、およびエネルギーを変更していき、損傷が発生したときのエネルギー密度を求めた。その結果、現在は閾値が 160 – 410 J/cm² と高かったメーカーのミラーを使用している。

これらの対策を行い、現在のレーザーのパラメーターは Table 1 のようになっている。

Table 1: Parameters of Electron Beam and Laser Pulse

	Electron beam	Laser pulse
Energy	18-24MeV	1.17eV(λ: 1064nm)
Intensity	0.6nC/bunch	3.4mJ/pulse
Beam size: σ _x , σ _y	80μm, 60μm	60μm, 25μm
Pulse length	15ps(FWHM)	7ps(FWHM)
Number of bunch	1000bunches/pulse	

3.3 ビームパルス繰り返しの 12.5Hz への引き上げ

現在は、さらにX線強度を上げるため、電子ビームパルス繰り返しを 3.13Hz から 12.5Hz に上げて加速器、およびレーザー光共振器の調整している。

加速器側においては、まず繰り返しを上げて運転するため、RF コミッショニングを行った。最初は短い RF パルス幅から始め、パワーが上げられるようになるにつれ、パルス幅を伸ばして進めた。現在、RF パルス幅 3.8μs、入力 RF パワーは電子銃が 14MW、加速管が 12MW で運転を行っており、22MeV、700bunches/pulse、370nC/pulse のマルチバンチ電子ビームを出すことが出来ている。

また、レーザー光共振器もバーストアンプの部分の繰り返ししが 12.5Hz に上がることで、熱レンズ効果が変わり、レーザー光共振器への入射マッチングがずれるため、入射部のエキスパンダーレンズの間隔の調整による補正を行った。マッチングがずれると、1 次の成分が増えるため、これが最小になる場所に調整し、3.13Hz 時と同じ蓄積パワーが達成できるのを確認している。

これら電子ビームとレーザーを衝突させて実際にX線生成も行っており、X線フラックスは 1.4x10⁸ photons/sec (Full band width)となっており、3.13Hz 運転時の約 2.6 倍までX線強度を増強することが出来ている。

4. X線イメージング試験

LCS で生成したX線の特徴としては、準単色、微小光源、比較的大きな散乱角を持つ、エネルギー可変などがある。これらの特徴を利用したX線イメージング試験も行っている。

微小光源、および比較的大きな散乱角を持つという特徴を利用すると、撮影試料から離れた位置でイメージを取得することで、簡単にイメージが拡大でき、より鮮明なイメージを取得できる。Figure 6 にその概念図と実験セットアップを載せている。X線は発生点から円錐状に広がるため、試料から離れて撮影することで、イメージを拡大することが可能となる。実際に、同じ試料において、その直後と、3.8m 下流で撮影したX線吸収イメージが Fig.7 である。これは 9keV のX線で撮影し、撮影時間は 15 分となっている。下流で撮影したものは約 2.4 倍に拡大され、より鮮明な画像を得ることが出来ている。

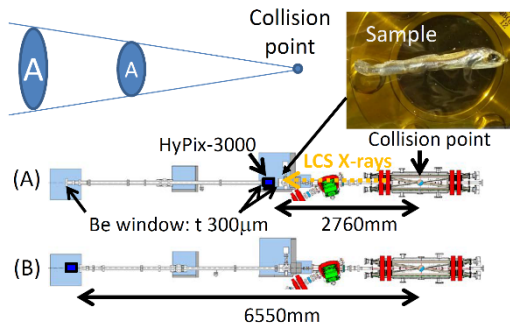


Figure 6: Set up of X-ray imaging test.

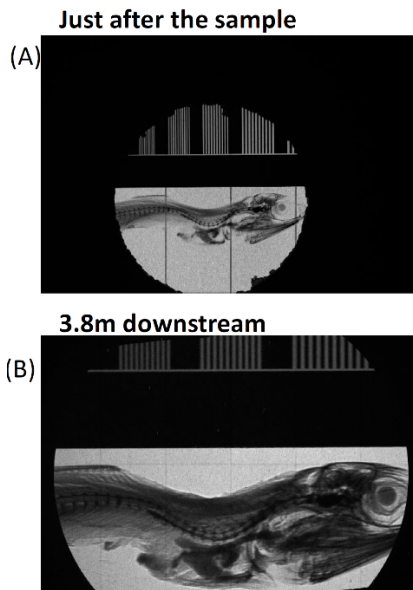


Figure 7: X-ray image of a small fish.

また、LCS で生成するX線は電子ビームのエネルギーの 2 乗に比例するので、ビームエネルギーを制御して、X線のエネルギーを容易に変更できる。この特徴を利用して、K 吸収端を利用したX線イメージングも行っている。Figure 8 の左のグラフは、鉄(Fe)および亜鉛(Zn)の薄膜の透過率をX線のエネルギーを変えながら測定した結果である。実線が計算した単色X線の透過率、点が LCS で生成したX線(エネルギーバンド幅:約 5%)で測定した透過率である。測定した透過率はほぼ計算値と合っており、またK 吸収端の部分で大きく透過率が変化しているのが分かる。このうち亜鉛の吸収端の両側のエネルギー(9.5keV と 10.8keV)で、それぞれカプセル剤のイメージを撮影し、その差分を取ったものが、Fig. 8の右の写真である。風邪薬、鉄剤、亜鉛剤の3つを撮影している。差分画像は、エネルギーの低い 9.5keV で撮影したものから、エネルギーの高い 10.8keV のものを引いた差分になっており、通常エネルギーが低いほうが透過率も下がるので、暗く表示される。しかし亜鉛は K 吸収端をまたいでいるため、亜鉛カプセルの部分だけが 9.5keV での透過率が高く、差分画像で明るく強調されているのが分かる。このようにX線エネルギーを容易に変更できるので、吸収端を利用し特定の元素の部分強調したイメージの取得も可能となる。

5. まとめ

X線強度を上げるため、電子ビーム側ではバンチ数を増大し、それに伴い RF パルスに振幅変調をかける方法によるビームローディングの補正も行い、レーザー側では、蓄積パワーを制限していたミラー破壊を避けるため、ミラーを清浄に保持し、ミラー上のサイズを広げる対策を行った。また LCS により生成されるX線の特徴を利用したX線イメージング試験を行って来ている。さらに、現在、ビームパルス繰り返しを4倍の 12.5Hz に上げ、それに伴う電子ビームおよびレーザー光共振器の調整を続けている。

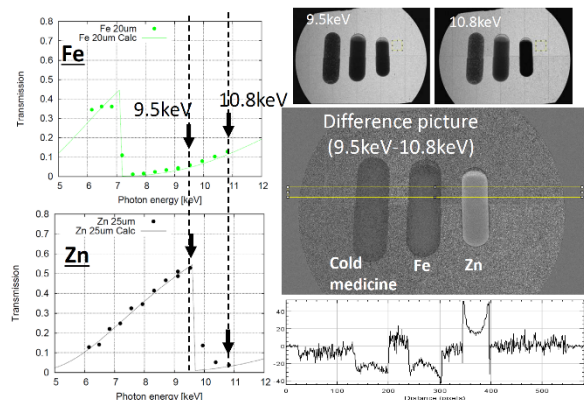


Figure 8: The left graphs show the X-ray transmission of a metal film. The right picture shows the difference picture of capsules. It was taken by k-edge imaging.

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] 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.
- [2] 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.
- [3] A. Momose *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L866-L868.
- [4] M. P. Olbinado, *et al.*, JSR2016, Tokyo, Japan, Jan 2016, 11P080 (2016).
- [5] 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).
- [6] X.J. Wang *et al.*, “Design and Construction a Full Copper Photocathode RF Gun”, Proc. 1993 Part. Accel. Conf. (1993) p. 3000.
- [7] Rigaku journal 30 (2), (2014).
- [8] 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).
- [9] <https://www.photoniccleaning.com/>
- [10] H. Yamakawa, “低圧装置内のパーティクルの汚染”, エアロゾル研究, 14(4), 317-322(1999).