

Laser-Compton x-ray generation using pulsed-laser super-cavity and multi-bunch electron beam*

Kazuyuki Sakaue^{1,A)}, Sakae Araki^{B)}, Masafumi Fukuda^{B)}, Yasuo Higashi^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Toshiya Muto^{B)},
Noboru Sasao^{C)}, Liu Shengguang^{B)}, Mikio Takano^{D)}, Takashi Taniguchi^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)},
Junji Urakawa^{B)}, Masakazu Washio^{A)}

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

17 Kikui-cho, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

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

^{C)} Faculty of Science, Kyoto University

Oiwake-Cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502, Japan

^{D)} Saube Co., Ltd.

3-17-3 Hanabatake, Tsukuba-shi, Ibaraki, 300-3261, Japan

Abstract

Pulsed-laser super-cavity has been developing for a compact high brightness x-ray sources based on laser-Compton scattering at KEK-LUCX. The pulsed-laser super-cavity increases the laser power and stably makes small laser beam size at the collision point with the electron beam. Recent results of super-cavity and multi-bunch electron beam indicate the possibility of the application to K-edge digital subtraction angiography as the compact high flux X-ray source. In this spring, we succeeded in detecting a laser-Compton x-ray signal generated by a multi-bunch electron beam and a pulsed-laser super-cavity. Present status of the super-cavity and the multi-bunch linac and the results of collision experiment will be presented at the conference.

パルスレーザー共振器とマルチバンチ電子ビームを用いた レーザーコンプトン散乱X線生成

1. はじめに

現在、医学・生物学・物性など様々な分野で高エネルギーの電子ビームから得られる放射光が利用され、多大な成果をあげている。しかしながらこのような放射光はSpring-8などに代表されるように大規模な施設が必要であり、一般的に高価かつ使用できる場所が限られる。このような背景から、1大学・1研究所に設置できるようなコンパクトかつ高品質なX線源の開発が叫ばれてきた。

レーザーコンプトン散乱(LCS Laser-Compton Scattering)は高エネルギーの電子によってレーザー光を散乱することによって高エネルギーの光子を生成する手法であり、放射光などに比べ低エネルギーの電子ビームによって高エネルギーなX線が生成できるため、将来の小型X線源候補として挙げられる。このLCSを用いた小型X線源として電子ビームを小型蓄積リングに、レーザーを光共振器に蓄積し連続的に衝突を繰り返すことによって高強度なX線を生成するという方法^{[1][2]}や線形加速器をベースとしたX線源^{[3][4]}などが多数提案されている。

我々は[2]に示すように小型蓄積リングとパルスレーザー共振器を用いたX線源を最終目標としているが、まずは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X線生成を行っている。本実験により、単位時間あたりの衝突回数を100倍にすることができるとともに線形加速器ベースでの小型X線源の可能性を模索する。目指すX線エネルギーは医療診断に利用される33keV付近のX線であり、このエネルギーはヨウ素のK殻吸収端のエネルギーにあたる。

この原理実証試験を我々はLUCX(Laser Undulator Compact X-ray source)実験と名づけている。本LUCXプロジェクトは主に以下の3つのR&Dを含む。

1. フォトカソードRF-Gunを用いたマルチバンチビーム生成とそのビームローディング補正
2. 高増大率パルスレーザー共振器開発
3. 1・2を融合したマルチパルスX線生成試験

現在では100Bunches/Train・40nCのマルチバンチビームをエネルギー幅1%以内に補正しており、パルスレーザー共振器としては、最大2.4kWのパルス

* Work supported by a Grant-In-Aid for Creative Scientific Research of JSPS (KAKENHI 17GS0210) and a Grant-In-Aid for JSPS Fellows (19-5789)

¹ kazu-kazu-kazu@suou.waseda.jp

レーザーを光共振器内に蓄積しているとともに線形加速器との衝突に特化した共振器の『Burst Mode』運転試験も行っており、ピーク値として40kWのレーザーパルスを得ることに成功している。これらのR&Dを融合させることにより、すでにマルチパルスX線生成及び検出に成功している。

本講演では、パルスレーザー共振器とマルチバンチ電子ビームの現状及びX線生成試験の結果について報告する。

2. パルスレーザー共振器

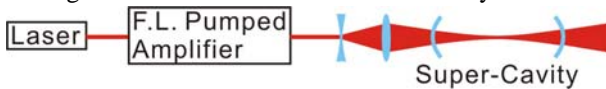
2.1 パルスレーザー共振器

パルスレーザー共振器は2枚の向かい合わせに設置された凹面鏡内にモードロックパルスレーザーを蓄積し、増幅する技術である。我々のグループではこれまでに増大率600を超えるパルスレーザー共振器の安定運転を実現しており、これは0.1nm程度の精度で共振器長を制御していることにあたる。パルスレーザー共振器の詳細に関しては[5]を参考にされたい。

2.2 バーストモード運転

パルスレーザー共振器は通常CW的に共振器内にパワーが蓄積される。しかしながら現在我々の実験では次章に示すように線形加速器からのマルチバンチ電子ビームを用いているため、電子ビームは加速RFパルスと同期したタイミングで生成され、マイクロパルスを構成している。このときパルスレーザー共振器をCWモードで用いるとほとんどのパルスは衝突せず、1衝突あたりのパルスエネルギーも小さい。この共振器を線形加速器からのビームとの衝突に特化させるために『バーストモード運転』という共振器運転方法を考案した。電子ビームのタイミングに同期して入力レーザーをパルス的に増幅することによって衝突タイミングのみ大強度のパルスを共振器内に生成することができる。バーストモードの概念図をFig.2.1に示す。

Fig.2.1 : Schematic of Burst Mode Cavity



バーストモードを用いて電子ビームと同期して生成される衝突用パルスのパラメータを以下のTab.2.1に示す。

Tab.2.1 : Parameters of Burst Cavity Laser Pulse

増幅器Gain	フィネス	ウェストサイズ
70倍	878.5	30.3 μ m
ピーク パワー	ピークパルス エネルギー	増大率
40kW	112 μ J	280

バーストモードを用いることによってこれまでの10倍以上の強度のパルスを衝突点で生成することに成功している。

3. マルチバンチ電子ビーム

3.1 LUCX加速器

以下のFig.3.1にKEKアセンブリホール内に設置している小型X線源のレイアウト図を示す。本加速器

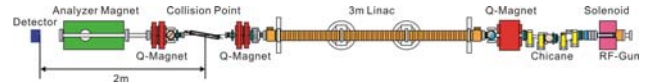


Fig.3.1 : Beamline Layout of LUCX Accelerator

はCs-Teカソードを用いたフォトカソードRF電子銃によって100Bunches/Trainのマルチバンチビームを生成^{[4][5]}し、最大50MeVまで加速する。オプティクスレイアウトとしては、衝突点の前のQ-Magnetによって電子ビームは衝突点において収束され、その後のQ-Magnetによって並行ビームに戻されるといった構成となっており、バックグラウンドとなる電子ビームの制動放射光などを最小限に抑えられる。衝突点からX線検出器までの距離は2.3mほどであり、散乱角約10mrad内のX線が空気中に取り出される。以下のTab.3.1に本加速器から得られるビームのパラメータを示す。

Tab.3.1 : Parameters of Multi-bunch Electron Beam

エネルギー	電荷量	バンチ数
43MeV	40nC/Train	100Bunch/Train
RF繰り返し	ビームサイズ	バンチ長
12.5Hz	80/40 μ m	10ps (FWHM)

この加速器の詳細に関しては本学会の[6]及び[7]を参照されたい。このビームライン中にパルスレーザー共振器を導入することにより通常の100倍のレーザーコンプトン衝突を行うのが本研究の目標である。

3.2 LUCXにおいて得られるX線

Tab.2.1及びTab.3.1に示した電子ビーム・レーザーのパラメータより予想される生成X線について考察する。以下のFig.3.1に生成X線のエネルギーを示す。この図を見てわかるように43MeVの電子ビームと1064nmのレーザー光を用いることによって目標としているヨウ素のK-Edgeである33keV付近のX線が

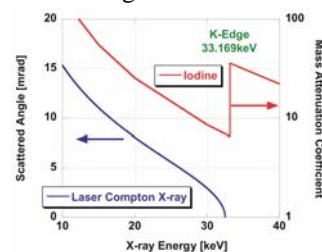


Fig.3.1 : Expected X-ray Energy at LUCX

得られていることがわかる。また、生成X線数は約 5×10^5 Photons/secと計算される。X線検出器の径(散乱角1.25mrad)を考慮すると1パルスで約343個のX線光子が検出されることになる。

4. レーザーコンプトンX線生成試験

4.1 X線検出システム

これまで述べたパルスレーザー共振器システムとマルチバンチ電子ビームを合わせることによって、33keV付近のエネルギーのX線生成を行うに至っている。以下のFig.4.1に構築したX線検出器の概念図を示す。Fig.4.1に示すようにHOPG (Highly

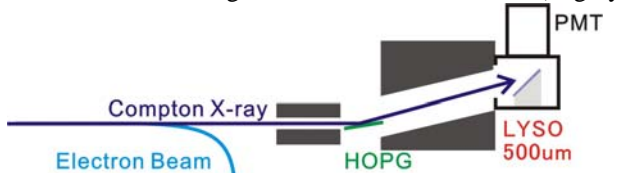
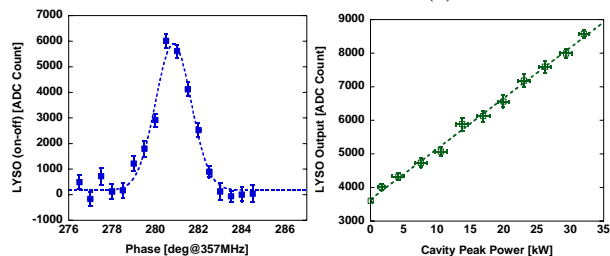


Fig.4.1 : Schematic of X-ray Detection System

Orientated Pyrolytic Graphite) というX線反射板を用いて信号であるX線を反射する構成を用いている。LUCX実験においては、線形加速器の直下でX線を検出しなければならないため、BGと分けるためにこのような構成を用いている。X線の検出には蛍光寿命が短く、薄い結晶を作製することが可能なLYSOシンチレータを用いている。

4.2 生成X線数測定試験

以上のような検出器を用いて、X線生成試験を行った。以下にその結果を示す。(a)は電子ビーム



(a) Timing Scan (b) Laser Power Correlation

Fig.4.2 : Laser Compton X-ray Signal

との衝突タイミングScan結果を示しており、衝突タイミングをずらすことによって生成X線数が変化し、その相関グラフがほぼバンチ長とパルス幅の畳み込みの15ps (FWHM)となっている。(b)には衝突レーザーパワーとの相関グラフを示しており、レーザーパワーに対して線形にX線数が変化していることがわかる。以上の2つのグラフより、このX線信号が確かにLCSによって生成されたX線であることが示される。

同時にFig. 4.1の検出システムではなく、X線を反射せず検出する試験も行い、生成X線数の測定を行った。この検出器では、2.5mm/2.3m内の散乱角のX線が検出でき、検出光子数は164Photons/Trainであった。CAIN及びGEANTを用いて算出した予想検出光子数は343Photonsであるため、測定値と計算値にはFactor2程度の開きがある。CAIN等の計算ではマルチバンチ衝突によるバンチ間隔やエミッタ

ンス増大などによる影響を考慮していないため、今後これらの影響について調べていく必要がある。

4.3 生成X線エネルギー測定試験

Fig.4.1に示したように現在の検出器システムにはBragg反射を用いた反射板を組み込んでいる。この反射板の反射角度を測定することによって、Braggの式 $n\lambda = 2d \sin \theta$ よりX線の平均エネルギーを測定することができる。この測定結果を以下のFig.4.3に示す。現在のところ、エラーバーは統計エ

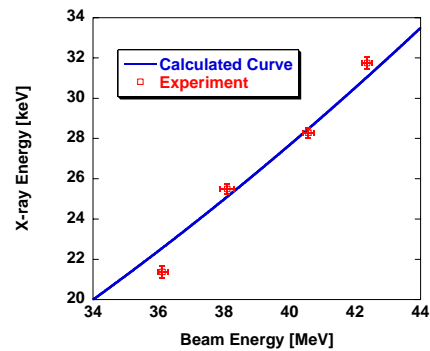


Fig.4.3 : Result of X-ray Energy Measurement

ラーのみをプロットしていることを注意しておく。電子ビームエネルギーを36~42MeVで変化させることによって計算通りにX線エネルギーが変化していることがわかる。この点からも検出しているX線は実際にLCS過程によって得られたX線であることが分かる。

5. まとめと今後の予定

我々のグループでは、パルスレーザー共振器を用いた小型X線源(LUCX)の開発を行なっている。原理実証試験として100Bunches/Trainのマルチバンチビームとの衝突により33keV付近のエネルギーのX線の生成に成功した。

今後、バンチ毎の衝突状態の測定などによってマルチバンチビームとの衝突を最適化し、現在の問題点である生成X線数が計算値より少ない点について考察していく。

参考文献

- [1] Zh. Huang, R. D. Ruth, Phys. Rev. Lett. 80 (5) (1998) 976.
- [2] J. Urakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A532, (2005) 388
- [3] R. Kuroda, et al, Proceedings of EPAC'08, (2007)
- [4] F. Ebina et al., Nucl. Instr. and Meth. B, 241 (2005) 905
- [5] K. Sakaue, et al, Proceedings of PAC'07, (2007)
- [6] M. Fukuda et al., Proc. of this conference, (2008) TP092
- [7] S. Liu et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 584, (2008) 1