

Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) using Pulsed-Laser Super-Cavity

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

A) Advanced 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

E) Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai-shi Miyagi, 982-0826, Japan

D) Facility of Science, Kyoto University

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

E) 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-ATF. 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. Therefore, we have planned a compact hard x-ray source using 43MeV multi-bunch electrons and a pulse enhance technology with 42cm Fabry-Perot cavity. The photon flux is multiplied with the number of bunches by using multi-bunch beam and super-cavity. We have already started the proof-of-principle experiment from this summer. Development of the super-cavity and the collision experiment will be presented at the conference.

パルスレーザー共振器を用いたレーザーコンプトンX線生成試験(LUCX)

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。

このような要望から提案されたのが、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ものである^{[1][2]}。我々の目指すX線エネルギーは医学診断に利用される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X線を約43MeVの電子ビームによって1064nmのレーザー光を散乱することで生成する。このような小型蓄積リングによるX線生成を行う前に、マルチバンチ電子リニアックを用いた原理実証試験としてLUCX(Laser

Undulator Compact X-ray source)実験を行っている。マルチバンチビームとパルスレーザー共振器を用いることによって、通常のシングルバンチ衝突よりも衝突回数を2桁程度高くすることができる。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・50nCのマルチバンチビームをエネルギー分散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のパルスレーザーを光共振器内に蓄積している。これらの結果により、すでにマルチパルスX線生成試験を開始するに至っている。

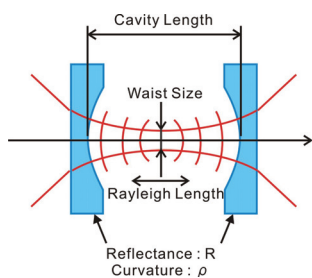
本講演では、パルスレーザー共振器開発及びX線生成試験の現状と結果について報告する。

¹ kazu-kazu-kazu@suou.waseda.jp

2. パルス増大試験

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。(Fig.2.1) パルスレーザー共振器は共振器内で光の位相を合わせることで増幅するため、共鳴幅がナノメートル以下となる。このような微小な共鳴幅であるため、モードロックレーザーと蓄積共振器の2つの共振器長をPiezo素子を用いて制御している。[3] Fig.2.1 : Schematic of Super-Cavity



パルスレーザー共振器の増大率はそれを構成するミラーの反射率によって決まる。増大率は高いほど共鳴幅が狭くなり、共鳴を維持することが困難となる。また、共振器内のレーザー光のウェストサイズは共振器長とミラーの曲率によって決まる。我々は共振器の増大率を決定するにあたり、レーザーのノイズ及びそれを制御するPiezo素子の特性を測定した。

2.2 レーザー位相雑音測定

レーザー及びリファレンスとして用いている357MHzのRF信号の位相雑音をシグナルソースアナライザーE5052A(Agilent)を用いて行った。以下のFig.2.2にその結果を示す。

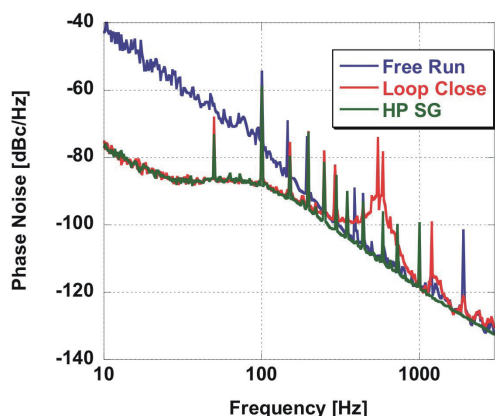


Fig.2.2 : Result of Phase Noise Measurement

図中の青はタイミング制御をしていない場合のレーザー、赤はタイミング制御をした場合、緑はリファレンスのRF信号の位相雑音の測定結果を示している。タイミング制御を行うことによって、

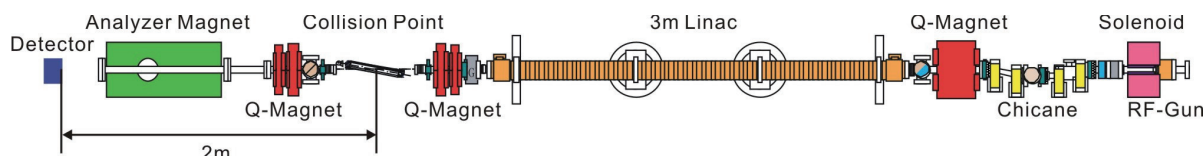


Fig.3.1 : LUCX Beam Line Layout

低周波数の雑音は抑制することができるが、800Hz付近にピークが生成されていることがわかる。これは共振器長を制御しているPiezoの固有周波数で説明することができる。したがって制御可能な雑音量はPiezo素子の固有周波数とそのフィードバック回路によって決定できることがわかる。Fig.2.2の測定より、残り雑音量を算出すると、約0.1nm(rms)であることがわかる。

以上のような測定から、加速器設置用の共振器の構成を以下のTab.2.1のように決定した。

共振器長	入射側反射率	透過側反射率	曲率半径
420mm	99.7%	99.9%	250mm

共振器長はレーザーの繰り返し周波数から決まる420mm、反射率は共鳴を維持しつつなるべく高い増大率を得られるようにした。共振器のフィネスは1570程度で共鳴幅は約0.3nm(FWHM)という設計になっている。

2.3 レーザーパラメータ測定

以上のように決定し、作製した共振器のパラメータを測定した。その結果を以下のTab.2.2に示す。

周波数	フィネス	ウェストサイズ
357MHz	1889.9	89.2 μm
入射パワー	蓄積パワー(Max)	増大率
4.05W	2.45 kW	605

Tab.2.2を見てわかるように、上記設計フィネスより少し高い値が得られていることがわかる。これは、共振器を構成するミラーの反射率が設計値よりも少し高いことに起因する。ウェストサイズはほぼ設計値通りの約90 μm(σ)となっている。ここで、フィネスはポッケルスセルを用いた共振器の減衰によって、ウェストサイズは共振器のモード間隔によって測定した。蓄積パワーは共振器からの透過光強度を測定し、これに別で測定をしたミラーの透過率から算出している。増大率は目標とする1000には届かなかったものの、原理実証試験には十分であると判断した。

3. 小型X線源計画 (LUCX)

3.1 LUCX加速器

以下のFig.3.1に我々の計画する小型X線源のレイアウト図を示す。本加速器はKEK-ATF内に設置されており、Cs-Teの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、約50MeVまで加速する。ビームラインの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を最小限に抑えられる。その後、90°アナライザーマグネットによって地面方向に曲げられ、ビームエネルギーをモニターするとともにビームダンプにてダンプされる。衝突点からX線検出器までの距離は2mほどであり、約10mrad内のX線が空気中に取り出される。この加速器の詳細に関しては本学会の[5]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目標である。

3.2 LUCXにおいて得られるX線

衝突に用いる電子ビーム・レーザーのパラメータを以下のTab.3.1に示す。

Tab.3.1 : Electron/Laser Parameters at LUCX

Electron		Laser	
RF Rep.	12.5Hz	Crystal	Nd:VAN
Energy	43MeV	Wavelength	1064nm
Bunch Rep.	357MHz	Laser Freq.	357MHz
Bunch Num.	100/train	Enhancement	500
Charge	0.5nC	Power	2kW
Bunch length	20ps	Pulse length	7ps
Beam Size	X : 80 μ m	Waist Size	X : 89 μ m
	Y : 40 μ m		Y : 89 μ m
Collision Angle	20deg		

電子ビーム・レーザーともに現在までに得られている測定値を示した。また、レーザーのパワー及び増大率は最大値ではなく、通常の運転で得られる値を示した。上表から計算される生成X線エネルギーを示す。

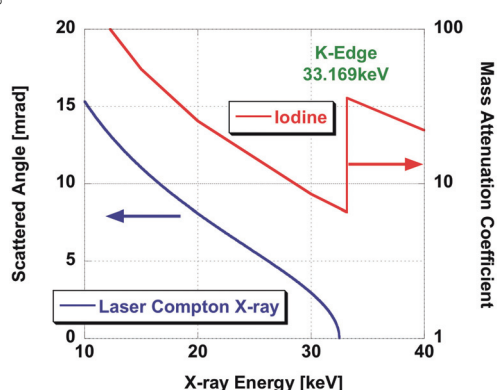


Fig.3.2 : Expected X-ray Energy at LUCX

この図を見てわかるように目標としているヨウ素のK-Edgedの33keV付近のX線が得られていることがわかる。また、生成X線数は約40Photons/Collisionと計算される。X線検出器の径(散乱角5mrad)を考慮すると1パルスで約8個のX線光子が空気中に引き出される。LUCX加速器のRF繰り返しの12.5Hzと1つのバンチ列に100Bunchが生成されていることを考慮すると、 1×10^4 Photons/secのX線が取り出されることがわかる。

3.3 X線生成試験

以上のようなR&Dを経て、今春に共振器の加速器内への設置を行った。共振器長が420mmと大きいため、600mmの大きな真空容器を用いているが、到達真空度は約 5×10^{-6} Paと線形加速器の運転には十分な真空度が得られた。

また、X線検出器に関する検討として加速器バックグラウンドの測定などを行い、検出器として以下のFig.3.3に示すような検出器を作製した。



Fig.3.3 : Schematic of X-ray Detector at LUCX

線形加速器のため、加速器からのバックグラウンドが非常に多く、これらのバックグラウンドと分けて検出するためにBragg結晶を用いた検出器となっているのが特徴である。このような検出器を用いることにより予想されるS/Nが1/10以上のところまで来ており、現在までに衝突試験を行うに至っている。夏季加速器シャットダウン前には検出はできなかったが、秋の運転開始以降X線の検出を目指して衝突試験を継続していく予定である。

4. 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。最終的なレイアウトとしてはパルスレーザー共振器と小型電子蓄積リングの組み合わせを予定しているが、まず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通常の100倍のX線の生成を目指す。パルスレーザー共振器開発としては共振器内に2.45kWものパルスレーザーを蓄積することに成功しており、すでに加速器内への設置が完了している。

今後、夏季シャットダウン明けの運転においてX線の検出を目指すとともに、X線の実験測定を行っていく予定である。

将来的には[2]に示してあるように周長13mの小型の蓄積リング内にパルスレーザー共振器を設置し、さらにLUCXの約300万倍の強度のX線の生成することを目指していく。

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] K. Sakaue, et al, Proceedings of PAC'07, (2007)
- [4] K. Hirano et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 560, (2006) 233
- [5] M. Fukuda et al., Proc. of this conference, (2007) WP04