

## LASER UNDULATOR COMPACT X-RAY SOURCE (LUCX) USING PULSED-LASER STACKING CAVITY

Kazuyuki Sakaue<sup>1,A)</sup>, Sakae Araki<sup>B)</sup>, Masafumi Fukuda<sup>B)</sup>, Yasuo Higashi<sup>B)</sup>, Yosuke Honda<sup>B)</sup>, Toshiya Muto<sup>2,B)</sup>,  
 Noboru Sasao<sup>C)</sup>, Liu Shengguang<sup>B)</sup>, Mikio Takano<sup>D)</sup>, Takashi Taniguchi<sup>B)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>B)</sup>, Junji Urakawa<sup>B)</sup>,  
 Masakazu Washio<sup>A)</sup>, Hirokazu Yokoyama<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

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

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

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

<sup>C)</sup> Faculty of Science, Kyoto University

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

<sup>D)</sup> Saube Co., Ltd.

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

### Abstract

Pulsed-laser stacking cavity has been developing for compact high brightness x-ray sources based on laser Compton scattering at KEK-ATF. The pulsed-laser stacking cavity increases the laser power and stably makes small laser beam size at the collision point with the electron beam. Recent results of stacking 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 stacking 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 finished the construction of 43MeV linac and started operation in summer 2006. Development of the stacking cavity and the plan of compact x-ray source will be presented at the conference.

## パルスレーザー共振器を用いた小型X線源計画 (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。

そん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<sup>[1]</sup>。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の電子ビームと1064nmのレーザー光の散乱によって生成する。我々のグループではこれまでファブリペロー型共振器にCWレーザーを蓄積してレーザーの

ワイヤーを作成し、これをKEK-ATFのダンピンリング内に設置してビームサイズをモニターする装置として開発してきた<sup>[2]</sup>。この技術をパルスレーザーに用いてピークパワーの高いレーザー光を共振器内に蓄積し、電子ビームとのレーザーコンプトン散乱によって高品質なX線を生成することを計画している<sup>[3]</sup>。

本学会では、パルスレーザー共振器の開発状況と我々の小型X線源計画Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)について報告する。

### 2. 小型X線源計画 (LUCX)

#### 2.2 LUCX加速器

以下の図1に我々の計画する小型X線源のレイアウト図を示す。この加速器は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

<sup>1</sup> E-mail: [kazu-kazu-kazu@suou.waseda.jp](mailto:kazu-kazu-kazu@suou.waseda.jp)

<sup>2</sup> Present address: Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, 1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai-shi, Miyagi, 982-0826, Japan

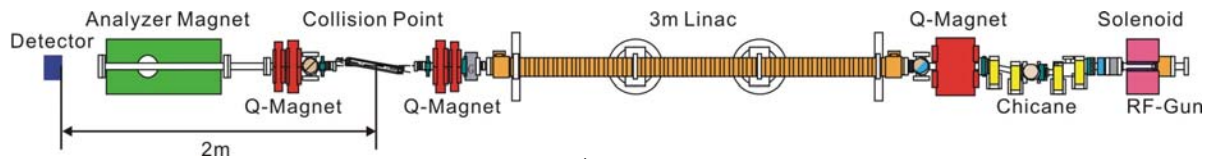


図1：LUCXビームラインレイアウト

チビームを生成<sup>[4]</sup>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線が空气中に引き出される。この加速器の現状については本学会の[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X線を生成することができる。

2.2 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表に示す。

電子ビームパラメータ	
エネルギー	43MeV
ビームサイズ(Horizontal)	64 μm
ビームサイズ(Vertical)	32 μm
バンチ数	100Bunches/Train
電荷量	2nC/Bunch

レーザービームパラメータ	
波長	1064nm (Nd:VAN)
ビームウェスト	85um
入射レーザーパワー	6W
増大率	1000
レーザー強度	17uJ/Pulse

表1：ビームパラメータ

電子ビームのパラメータは、SADシミュレーションによる計算値、レーザーのパラメータは後に示すように現在得られている増大率とウェストサイズである。また、共振器のマッチングの効率は100%を仮定している。

次に上の表から計算される生成X線エネルギーを示す。

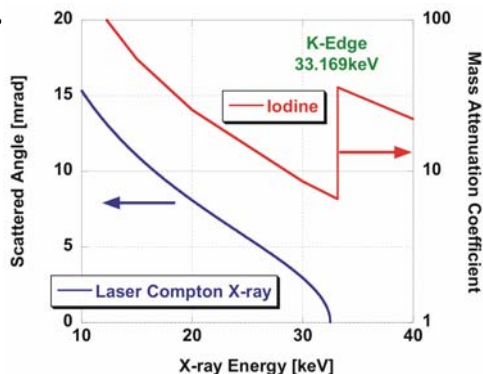


図2：LUCXにおける生成X線のエネルギー

この図を見てわかるように目標となるヨウ素のK-Edgedである33keV付近のX線が生成されていることがわかる。

また、生成X線数は表1のビームパラメータより約400Photons/Collisionと計算される。X線窓の径(散乱角10mrad)を考慮すると1パルスで約200個のX線が空气中に引き出される。LUCX加速器のRF繰り返し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、 $2.5 \times 10^5$ Photons/secのX線が検出できることがわかる。

3．パルス増大試験

3.1 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。この共振器の共鳴条件は共振器内においてパルスが重なりあうことと、共振器長がレーザーの半波長の整数倍になっていることである。モードロックレーザーにおいて、発振波長はレーザー共振器長によるため、レーザー共振器長( $L_{laser}$ )と蓄積共振器の共振器長( $L_{cav}$ )が一致することにより増幅が達成されることになる。この共鳴幅を以下の図3に示す。

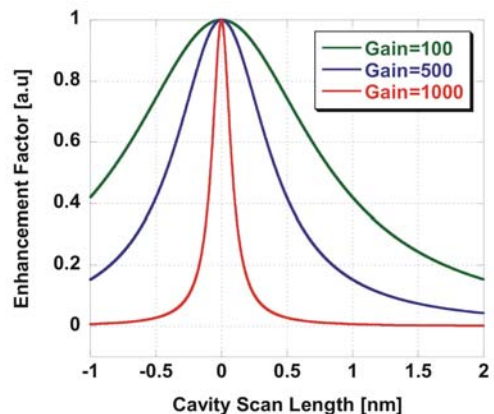


図3：パルスレーザー共振器の共鳴幅

この図は蓄積共振器の増大率による共鳴幅の違いを示している。増大率が1000にも及ぶような共振器の場合には共鳴幅は1.7 (FWHM)ほどの狭い幅になる。パルスレーザー共振器で共鳴を維持するためには図3に示される精度で一致している必要がある。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つの共振器の共振器長をPiezo素子を用いて制御している。

3.2 パルスレーザー共振器開発

我々は反射率99.9%の凹面鏡で構成された共振器

の実用化を目指し、開発を進めている<sup>[6]</sup>。ミラーの反射率99.9%から算出される共振器の増大率は1000倍であり、図3に示すように増大率1000の共振器では微小なジッターも許されないため、その原因の特定とそれの低減を図った。主なジッターの要因は以下の2つであった。

1. パルス繰り返しを制御するレーザーのタイミングスタビライザーに起因するジッター
2. ジッターの周波数の比較的高い音に起因するジッター

1のジッターに関してはパルス繰り返しを制御しているPLL(Phase Locked Loop)フィードバックのリファレンスとして使用している357MHz信号のってくる位相雑音によるもので、PLLの帯域幅を調整することにより蓄積共振器側のFBによって位相雑音によるジッターを押さえ込んだ。

2のジッターに関しては1~2kHzと比較的周波数が高く、FBのGainがあまりかせげない領域であるため、問題となってくる。そこで、防振材を導入し、音によるノイズを低減するために防音材や吸音材を導入することにより音に起因するジッターを削減した。その結果、音による共振器長のジッターを約1/10に低減した。

これらのジッターの低減後に行なったFB試験の結果を以下の図4に示す。左の図は共振器長をScan

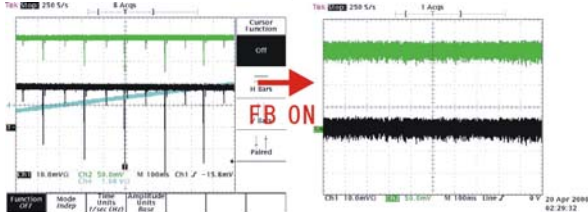


図4：パルス増大試験結果

した時に得られるFBのエラー信号を、右の図はFBをかけた際の光強度の揺れを示している。右の図を見ると強度の揺れがPeak-Peakで約15%程度であることがわかる。現在、この揺れを最小限に抑え、より安定なシステムの構築を目指している。

これまでのジッタースタディやその他のスタディの結果、現在得られている共振器のパラメータを以下の表に示す。

パルスレーザー共振器パラメータ				
Frequency	Finesse	Waist Size	Injected Laser	Laser Power
Cavity Length	Reflectivity	Curvature	Power	in Cavity
357MHz	~3000	170um	6W	Now
420mm	~99.9%	250mm	(357MHz)	Developing

表2：パルスレーザー共振器パラメータ

この表2中のそれぞれのパラメータは現在までに測定値として得られている値を示している。また、

共振器内のレーザー強度は現在、入射効率の向上とFBの改善を行なっている最中のため、『現在改善中』とした。予定値としては、約5kW程度のレーザー強度が共振器内で得られる予定である。

#### 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増大率1000の共振器システムの構築に目処が立っており、早期システムの完成を目指している。

今後、以下の図5のようにLUCXビームラインにパルスレーザー共振器を設置し、予想されるX線 $2.5 \times 10^5$  Photons/Secの生成・検出を目指す。

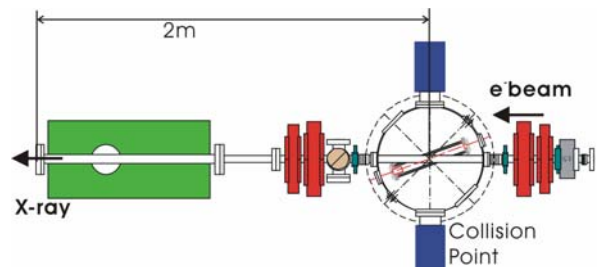


図5：共振器を設置したビームライン予想図  
将来的には[3]に示されるように周長13mの小型の蓄積リング内にパルスレーザー共振器を設置し、さらにLUCXの約300万倍の強度のX線の生成をすることを計画している。

#### 参考文献

- [1] Zh. Huang, R. D. Ruth, Phys. Rev. Lett. 80 (5) (1998) 976.
- [2] Y. Honda et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 538, (2005) 100
- [3] J. Urakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A532, (2005) 388
- [4] K. Hirano et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 560, (2006) 233
- [5] M. Fukuda et al., Proc. of this conference, (2006) WP73
- [6] M. Nomura et al., Proc. of EPAC2004 (2004) 2637