

Present status of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) (3)

Masafumi Fukuda^{1,A)}, Sakae Araki^{A)}, Abhay Deshpande^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Koichiro Hirano^{D)},
Shengguang Liu^{A)}, Toshiya Muto^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Noboru Sasao^{C)}, Mikio Takano^{E)},
Takashi Taniguchi^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Yoshio Yamazaki^{D)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

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

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

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

^{C)} Faculty of Science, Kyoto University

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

^{D)} Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

^{E)} Saube Co., Ltd.

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

Abstract

We have developed a high flux X-ray generator via inverse Compton scattering of an e^- beam and a high power pulsed laser beam with a pulsed-laser stacking cavity at LUCX accelerator in KEK. In accelerating multi-bunch beam, the important issue is the beam loading. By utilizing the ΔT method to compensate it, the operation in 36,38,40 and 42MeV, 40nC/100bunches has been carried out with the energy difference within 1%. However the beam has the energy differences just after the RF gun. It causes the pass difference in the chicane and then the spacing of each bunch closes. Therefore the chicane has been removed in this spring. This paper reports the present status of this accelerator.

KEK小型電子加速器(LUCX)の現状報告(3)

1. はじめに

我々は放射線医学総合研究所と共同で医学利用などを目的としたパルスレーザー共振器を用いた逆コンプトン散乱による高輝度X線源の開発を行ってきた。この装置ではX線(33keV)は光共振器内に蓄積されたレーザーパルス(1064nm)と電子ビーム(43MeV)とのコンプトン散乱により生成する。高輝度X線源としてはGeVオーダーの電子ビーム蓄積リングを利用したもの(SPring8など)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り使用できる場所は限られている。しかしレーザーコンプトン散乱の方法ではGeVオーダーの蓄積リングを用いた放射光によるX線源に比べ、より低いエネルギーの電子ビームで同じエネルギーのX線を得られるため、蓄積リングを小型化でき比較的安価に装置を構築できることが期待される。

このX線源の開発研究を高エネルギー加速器研究機構(KEK)の小型電子加速器(LUCX)(図1)で行っている。2005年11月まで第1段階として電子源の開発を行い、220nC/train、100bunches/trainのマルチバンチ電子ビームの生成に成功した^[1]。第2段階として2006年7月からは加速管を追加し43MeVまでエネルギーを上げ^[2]、レーザー蓄積装置を用いた逆コン

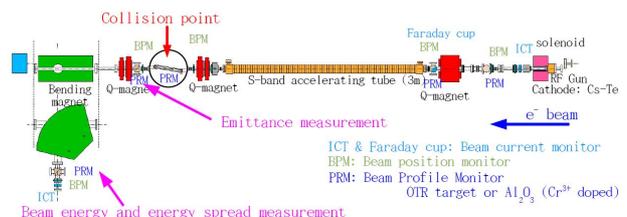


図1 小型電子加速器ビームライン

プトン散乱によるX線生成実験を開始した^[3]。2008年4月にはX線生成、および検出に成功した^{[4][5]}。本稿では、この加速器の現状を中心にX線生成実験について報告する。

2. 小型電子加速器

2.1 電子ビームライン

図1は小型電子加速器(LUCX)のビームラインである。基本的には昨年と同じ^[3]で、フォトカソードRF電子銃、S-band 3m加速管で構成され、40MeV、40nC/train、100bunches/trainのマルチバンチ電子ビーム運転をしている。ただし2008年4月にレーザーパルス(266nm)をCs-Teカソードへ垂直に入射するため

¹ E-mail: mfukuda@post.kek.jp

のシケインを取り除き、電子銃の横の斜めポートから入射するように変更した。これはバンチ間のエネルギー差を持ったビームがシケイン通過する時にバンチ間隔のずれが生じ、レーザーとの衝突時間がずれるためである(詳細は3.2節)。

またRFは1台のKlystronから供給され、パルス圧縮器で増幅後、RF電子銃と加速管の両方に分配される^[3]。

2.2 X線生成装置および検出システム

レーザー蓄積装置は加速管下流の衝突点に設置されている。357MHzのモードロックレーザーで生成されたレーザーパルスは途中フラッシュランプアンプを往復し、真空チェンバー内のパルスレーザー共振器へと入射する。フラッシュランプは電子ビームと同期しており、電子ビームとの衝突時のみ共振器内に蓄積するレーザー強度を増幅し(Burst mode)^{[4][5]}。高強度のパルスを生成できる。

生成されたX線は偏向電磁石の後方より厚さ0.3mmのBe窓を通して大気中に取り出す。その後10mmφのコリメータを通り、グラフィイト製のモザイク結晶であるHOPG(Highly Oriented Pyrolytic Graphite)で反射し、LYSOシンチレータと光電子増倍管(PMT)を組み合わせた検出器で検出する。

3. 電子ビーム調整

4種類のX線のエネルギーについて、X線エネルギーを測定するため、36,38,40,42MeVの電子ビームを用意し、このビーム調整を行った。

3.1 ビームローディング補正

マルチバンチビームを加速するとき問題となるビームローディングによるバンチ毎のエネルギー差は、高周波が空洞内を満たしていく過渡期にビームを乗せることで補正する^{[2][3]}。図2は各運転エネルギーでの100バンチのバンチ毎のエネルギーである。各エネルギーでエネルギー差が約1%に抑えられている。バンチ内のエネルギー広がりも最小になるように電子銃、加速管でのRF位相を調整しており、約0.13%となっている。

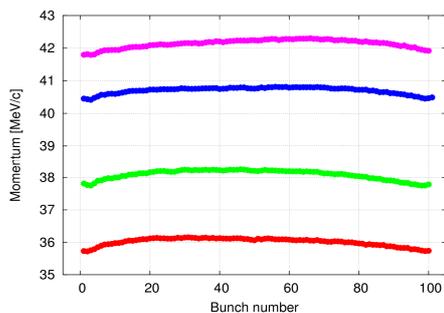


図2 36,38,40,42MeV運転時のバンチ毎の運動量

ただし電子銃出口ではバンチ毎のエネルギー差がある。(図3)。これはKlystronが1台のため、加速管

と独立にタイミングを合わせることができず、最終的にエネルギーが揃うように加速管側へRFに対する入射タイミングに合わせてローディング補正しているため、電子銃側にとってはタイミングが早く補正しすぎになっているためである。

3.2 電子銃出口でのエネルギー差による影響

バンチ毎のエネルギー差があることにより、以下の2つの理由でバンチ間隔がずれる。(1):一つはシケイン通過時に軌道が高エネルギー側は内側、低エネルギー側は外側となり、通過距離(時間)が異なるため、(2):もう一つは3-5MeVでは $\beta=1$ とは言えず、加速中の電子銃内、さらに加速管までのドリフトスペース(2m)を進む時に速度差により通過時間に差が出るためである。

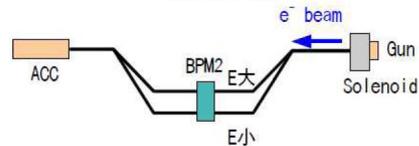
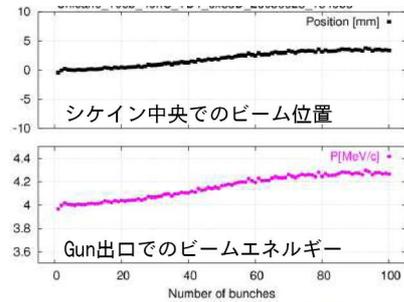


図3 シケインでのビーム位置と電子銃出口でのバンチ毎のビームエネルギー

(1)については、シケインでの軌道を変えたときに加速管でのRF位相の最適値のずれが確認されており、軌道差による加速管への到達時間のずれが生じていると示唆され、シケインでの軌道差による到達時間のずれは2.64ps/mmと予測された。また、図3のエネルギー差からGeneral Particle Tracer (GPT)で計算してもほぼ同じ結果が出た。この影響を排除するため、シケインを取り除いた。

(2)については、電子ビームエネルギーを変えるとコンプトン散乱の衝突タイミングや、加速管でビームを乗せるRF位相の最適値がシフトするなど、加速管までの到達時間の変化が見られており、40MeV→38MeV→36MeVとビームエネルギーを変えると、加速管でのRF位相も9deg,13degとずれ、衝突タイミングも10deg,14degと同じような量のずれが観測されている。これもGPTで計算したところ、傾向、数値ともだいたい一致した。このことから、おそらく100バンチのバンチ間隔が徐々にずれており、先頭と後方でバンチ間隔は10ps程度縮まっていると予想している。これによるコンプトン散乱の衝突タイミングのずれにより、後方バンチでは生成X線数は約半分になると予測されるが、これはエネルギー差を解消する以外にないため、現状では解決できていない。

3.3 斜入射に変更後のエミッタンス

シケインを無くしたため、カソードへのUVレーザー入射は電子銃側面にある斜めの入射ポートからとなった。このためレーザーはカソード面に20°の浅い角度で照射され、片方向のサイズだけが約3倍に伸びた楕円のプロファイルになってしまい、このままではEmittanceが悪化してしまう。そこでアナモフィックプリズムをUV光路の途中に入れ(図4)、あらかじめ片方のサイズを1/3にしておけば、カソード上で円にでき、Emittanceも改善できる^[7]。図4(右)は、プリズムを通した後のプロファイルで、横方向のサイズが1/3になっているのが分かる。

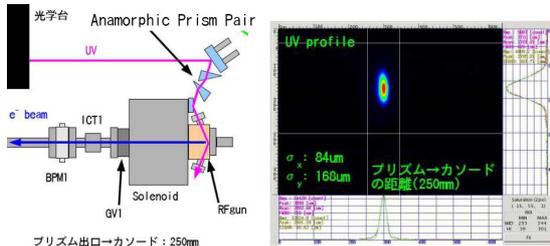


図4 UV光路上にプリズムを導入(左)、プリズム通過後のUVプロファイル

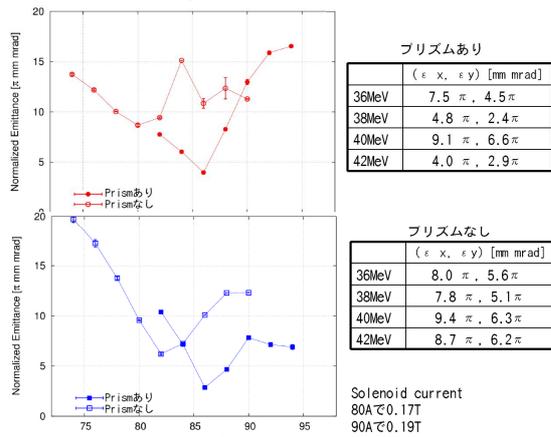


図5 アナモフィックプリズム導入前後のEmittance

導入前後のEmittance比較したのが図5である。左図が42MeV運転において、Emittanceが最小になるSolenoid磁場強度の最適値をスキャンした結果である。プリズム導入前が白抜きの点、導入後が塗りつぶしの点であり、上がHorizontal、下がVerticalである。プリズム導入後は85A(0.15T)付近でEmittance最小となっている。右の表が各ビームエネルギーでのEmittanceであり、プリズム導入後にEmittanceが改善しているのが分かる。また、シケインがあったときのEmittanceは7-10[π mm mrad](40MeV)であったが^[3]、それと比べても各エネルギーとも同じか少し良い値になっている。

3.4 電子ビームパラメータ

X線生成時のビームパラメータは表1のようにになっている。Solenoid電流の設定値がEmittance最小値のときからずれているのは、その方がX線検出器

へのバックグラウンド信号が大幅に減らせるからである。Solenoid磁場を強くすることで、焦点が加速管の前に移動し、加速管入り口では発散して加速管がコリメータのようになり、ビームの芯だけが通り、ビームハローやサテライトがカットされているのではないかと推測している。

Beam Energy	36MeV	38MeV	40MeV	42MeV
Current(100バンチ)	40nC	42nC	42nC	41nC
エネルギー差(p-p)	0.4MeV	0.5MeV	0.4MeV	0.5MeV
ΔP/P	0.11%	0.13%	0.12%	0.13%
e ⁻ beam size	X	260um	240um	200um
	Y	110um	110um	120um
Emittance	X	21π	19π	16π
	Y	8π	8π	6π
Solenoid		80.0A	84.0A	88.0A
Number of Bunches	100 bunches/train			
Bunch spacing	2.8ns			
Bunch length	10psec			
Repetition Rate	12.5 train/sec			

表1 電子ビームパラメータ

4. まとめと今後

現在、36,38,40,42MeVの4種類のエネルギーの電子ビームでそれぞれX線生成を行い、各エネルギーでのX線数、そのエネルギーの測定を行っている。測定されたX線エネルギーは計算と同じ結果になっており、HOPGによるX線エネルギー測定に成功している^[5]。

今後は、新たにRFgun用にKlystronを準備し、加速管と独立にRFを供給できるようにする計画である。これにより、RFに対するビームのタイミングも独立に選択できる。これでGun出口でのエネルギー補正も可能になり、速度差によるバンチ間隔のずれは解消できる。また、今まではビーム電流を上げるためRFパワーを上げようとする、Gunでの放電で発生し制限されていたが、Gunと加速管へのRFパワーのバランスも独立に調整可能になるため、ビーム電流の増加も期待できる。

参考文献

- [1] K. Hirano, et al., "High-intensity multi-bunch beam generation by a photo-cathode RF gun", Nucl. Instr. and Meth. A560, pp233-239 (2006).
- [2] M. Fukuda, et al., "Present status of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)", Proc of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] M. Fukuda, et al., "Present status of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)(2)", Proc of the 4rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [4] K. Sakaue, et al., "Development of a Compact X-ray Source Based on Laser-Compton Scattering with a Pulsed-Laser Super-Cavity", Proc of EPAC08, Genoa, Italy(2008) pp1872-1874.
- [5] K. Sakaue, et al., "Laser-Compton x-ray generation using pulsed-laser super-cavity and multi-bunch electron beam", in this meeting.
- [6] General Particle Tracer, <http://www.pulsar.nl/index.htm>.
- [7] R. Kuroda, et al., "Beam Diagnostics for Laser Undulator Based on Compton Backward Scattering", Proc of FEL2005, Stanford, California, USA(2005) pp596-599.