

Future plan of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)*

Masfumi Fukuda^{1,A)}, Sakae Araki^{A)}, Abhay Deshpande^{A)}, Yasuo Higashi^{A)},
Yosuke Honda^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Noboru Sasao^{C)}, Mikio Takano^{D)},
Takashi Taniguchi^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Junji Urakawa^{A)}

^{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)} Research Core for Extreme Quantum World, Okayama University
Tsushima-naka 3-1-1, Okayama 700-8530, Japan

^{D)} Saube Co., Ltd.
3-17-3 Hanabatake, Tsukuba-shi, Ibaraki, 300-3261, Japan

Abstract (英語)

We have developed a compact X-ray source based on inverse Compton scattering of an electron beam and a laser pulse stacked in an optical super-cavity at LUCX accelerator in KEK. The X-ray generation has already been confirmed but some problems have been found at the same time. To overcome the problems and to increase the number of X-rays, we have decided to upgrade of the accelerator and the super-cavity. Firstly, a new rf-gun with high mode separation and high Q value and a new klystron for the gun will be installed to get the good compensation with a high-intensity multi-bunch electron beam. Secondly, a new optical super-cavity consists of 4 mirrors will be installed to increase the stacked power in the cavity and to reduce the laser size at the focal point. The first target is to produce a multi-bunch electron beam with 1000 bunches/train, 0.5nC/bunch and 5MeV without the accelerating tube and to generate a soft X-ray by inverse Compton scattering. In this paper, the upgrade plan will be reported.

KEK小型電子加速器(LUCX)の将来計画

1. はじめに

我々は高エネルギー加速器研究機構(KEK)に設けた小型電子加速器(LUCX) (図1) で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小型X線源の開発を行っている。現在は量子ビーム基盤技術開発プログラムにおいて、このためのパルスレーザー共振器、これを用いたX線生成技術、X線検出器の開発を行っている。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。

この小型電子加速器では、第1段階として電子源

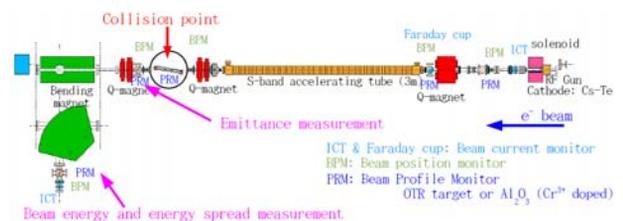


図1 現在の小型電子加速器ビームライン

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]。そして第2段階として加速管を追加し40MeV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プトン散乱によるX線生成実験を行い、40nC/train、100bunches/trainの電子ビームと蓄積パワー40kWのレーザーとの衝突によりX線を生成し、ほぼ予想値と一致した 1×10^4 photons/trainのX線が得られた^{[3][4]}。ただ同時に、電子ビームのバンチ間隔のずれや光共振器のミラー損傷など、いくつかの問題も判明した。現在は、これを解決するために、この加速器のアップグレードを計画している。本稿では、この小型電子加速器での今後の計画について報告する。

* Work supported by a Grant-In-Aid for Creative Scientific Research of JSPS (KAKENHI 17GS0210) and a Quantum Beam Technology Program of JST

¹ E-mail: mfukuda@post.kek.jp

2. アップグレード計画

アップグレードにより、今までの実験で判明した問題を解決し、さらに電子ビームおよびレーザー強度の上げ、生成X線数の増大を目指す。電子ビーム側ではKlystron 1台でRF電子銃と加速管にRFを供給していることに起因する問題があったので、RF電子銃用に新たに1台Klystronを追加する。さらにRF電子銃も新しいもの^[5]に交換する。またレーザー側は4枚のミラーで構成される光共振器を新たに導入する。これに伴い、運転モードも変更し、今までの加速管で50MeVまで加速する運転に加えてRF電子銃単独運転で5MeVでの運転も予定している。このため両方のエネルギーでX線生成実験を行えるようビームラインの改修も行い、衝突技術および検出器開発を行う。ここで得た技術は量子ビーム基盤技術開発プログラムにおいて行われる超電導ビームラインでのX線生成にも生かせると期待される。

2.1 電子ビーム側のアップグレード計画

電子ビーム側での問題^[3]は、マルチバンチビームのバンチ間隔のずれ、RF電子銃での放電やこの暗電流によるX線検出におけるバックグラウンド信号などであり、これらはKlystron 1台からRF電子銃と加速管の両方にRFを供給している(図2左)ことが原因となっている。

マルチバンチビーム加速時のビームローディング補正はRFを満たす過渡期にビームを乗せる方法を採用し、最終的にバンチ間エネルギー差を1%に抑えられているが、RF電子銃出口ではその差が残っている。これはRFにビームを乗せるタイミングを加速管側に合わせ、RF電子銃でのそれは最適なものより早めになっているからである。

この残ったバンチ間エネルギー差はバンチ間隔(2.8ns)のずれを引き起こし、2.8nsで往復している光共振器内のレーザーパルスとの衝突タイミングがずれてしまう原因になっている。これはビームエネルギーが4MeV程度と低いので、十分光速に近いとは言えず速度差があるため、エネルギー差が加速管までの到達時間の差となって現れるためである。またシケインでも軌道差から到達時間の差が生じていた。

またRFにビームを乗せるタイミングを早くして加速電場が低くなった分、RRCS(パルス圧縮機)で増幅した高いパワーのRFを入力し補っているため、放電が起きやすくなっている。このためローディング補正に十分な電場強度まで上げられず当初予定の200nC/trainまでビーム電流が増やせず、50nC/trainまでに制限されている。

他にもX線検出におけるバックグラウンド信号において、RF電子銃からの暗電流に起因するものが全体の50%以上を占めていた。

これらを改善するため、まずRF電子銃用のKlystron(TOSHIBA E3729, 24MW, 24us) 1台を新たに導入し(図2右)、RF電子銃と加速管のそれぞれ独立にRFとビームとのタイミングを調整できるようにして、RF電子銃で残っていたエネルギー差を解消する。また、無理に高いパワーのRFを入れずにす

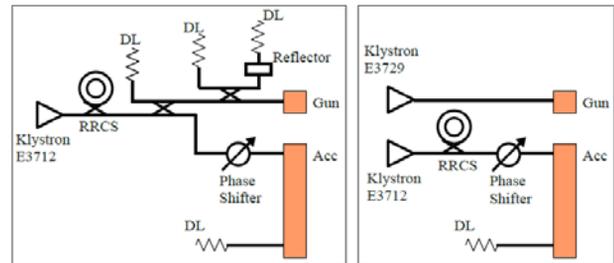


図2 現在(左)と変更予定(右)のRF system
むため、放電が抑えられ、予定の200nC/trainまでビーム電流が増加できると期待される。

また、電子ビーム強度や品質向上、暗電流の低減のため、新しいRF電子銃^[5]も導入する。これは従来と同じ1.6cellであるがCavityの構造は異なっており、ビーム軸方向に向かった壁面の構造は滑らかな曲線になっている(図3)。さらにチューナーもCavity内部に突き出さず、表面を押し変形させるタイプに変更、さらにレーザー光を入射するための斜めポートもなくした。このためQ値は14000と現在のRF電子銃の約1.8倍になっており、加速電場が高くなる分、空間電荷効果を抑えられエミッタンスが改善すると期待される。また表面がなめらかになった分、暗電流の減少も期待される。もうひとつの特徴は π モードと0モードの共振周波数差も8.62MHzと従来の約2.5倍になっていることである。

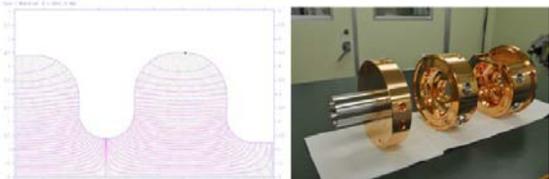


図3 新しいRF電子銃の断面と写真^[5]

2.2 パルスレーザー光共振器側のアップグレード

レーザー側での問題は、光共振器内のレーザーパルスのピークパワーが高くミラー表面の誘電多層膜を破壊してしまうことである。バーストモードではレーザーをフラッシュランプでアンプしてから光共振器に入射し、電子ビームとの衝突の瞬間だけパワーを上げている。このときにミラー表面上でのピークパワーが閾値(10GW/cm²)を超えて誘電多層膜を破壊してしまうため、これを超えない程度にパワーを抑えなければならなかった。2枚ミラーの共振器ではミラー上のサイズを広げるためには曲率を共振器長の半分近づけなければならず(Concentric)、焦点サイズは小さくなるがミラーの設置誤差に非常に敏感になってしまい不安定になる。

そこで4枚ミラーで構成される光共振器を開発し導入することを予定している。この共振器ではConfocalとなるため、ミラー上のサイズを広げやすく、レーザーパワーを上げられる。この光共振器に関しては[6]を参照のこと。

2.3 新しいビームライン

これらに伴い、RF電子銃単独運転で5MeVのビームと、RF電子銃と加速管で50MeVのビームの2つの

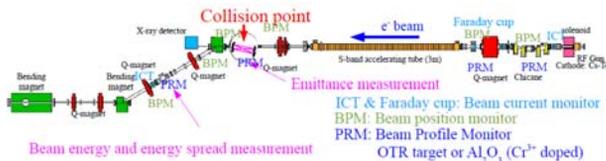


図4 建設予定の小型電子加速器ビームライン

モードでの運転を行い、それぞれのモードでX線生成実験を予定しているため、それに合わせてビームラインの改造も行う(図4)。ビームラインの主な変更部分は電子ビームとレーザーの衝突点の下流部であり、衝突後すぐに偏向電磁石で電子ビームを水平方向に30度曲げる。これは5MeVの電子ビームでX線生成を行う場合、エネルギーが低く、この広がり角が非常に大きい(図5)ので、生成後すぐに電子ビームと分離し取り出すためである。その後さらに電子ビームを30度偏向電磁石で曲げ戻し、最後は90度偏向電磁石で垂直下方へダンプする。2つの30度偏向電磁石の間にビームプロファイルモニタを設け、ビームエネルギーやその広がりを測定する。またBPM、ICTも設置し、マルチバンチビームのバンチ毎のエネルギーをモニタし、ビームローディング補正の調整に使用する。ビームダンプを下流まで伸ばしたのは、ここで発生する2次粒子がX線検出器のバックグラウンド信号になるからと、もう一つはX線検出器を試験する場所の確保のためである。RF電子銃単独運転のモードでは加速管は取りはずし、そこはビーム診断区間として利用する予定である。

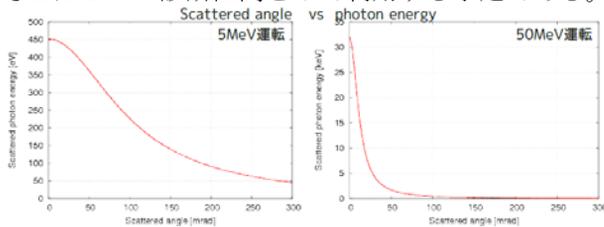


図5 生成X線の角度分布

2.4 ビーム運転予定

エネルギー5MeVのRF電子銃単独運転モードでは、新しいRF電子銃の性能試験と軟X線生成を目的としている。最大24usのRFを入射し、最大8000バンチ、4000nC/train(0.5nC/bunch)のマルチバンチビーム生成を目標とする。エネルギーが低く空間電荷効果の影響を受けやすいので、バンチ毎の電荷量は少なくし、かわりにバンチ数を増やすことで、電子ビームの強度を上げる。これで生成X線数の増大を目指す。このときの予想X線数は 1.8×10^7 photons/train in 20mradとなる^[6]。またRF電子銃の試験として高電荷ビームとして1000バンチ、2000nC/train(2nC/bunch)の運転も考えている。このモードでの運転はRF電子銃用のレーザーシステムやKlystron用の電源など準備に時間がかかるものが多いので段階を経て進めていく。最初の目標は1000バンチ、500nC/train (0.5nC/bunch)での運転である。

エネルギー50MeVのRF電子銃と加速管を使用した運転モードでは、バンチ数は同じ100バンチだが、

表1 電子ビームのパラメータ(計算値)

Energy	5MeV	50MeV
Intensity	0.5nC/bunch	2nC/bunch
Num. of	8000 bunches	100bunches
Bunch spacing	2.8ns	2.8ns
Bunch length	10ps	10ps
Repetition Rate	12.5 train/sec	12.5 train/sec
Emittance	$5 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$	$5 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$
(σ_x, σ_y) at C.P.	200 μm , 60 μm	80 μm , 40 μm

200nC/train(2nC/bunch)までビーム電流を増大し、硬X線生成を行うことを目標とする。今度はRF電子銃と加速管でそれぞれビームローディング補正が可能となる。初期のRF電子銃開発のときに200nC/trainのビーム生成は成功している^[1]ので、問題は加速管でのローディング補正となる^[5]。

この両方の運転モードで4枚ミラー光共振器を用いたX線生成実験で、ビーム調整やバックグラウンド対策などの衝突技術の蓄積およびX線検出器の開発を行っていく予定である。

3. 今後の予定

今後は、まず現在のビームラインのままRF電子銃のみを新しいものに交換し、この電子銃の性能試験を行う。このインストールは8月中旬を予定している。この試験の間に、レーザーシステムの1000バンチ運転の試験を行う。このビーム試験で現在のRF電子銃との比較を行った後、加速管を取り除き、5MeV、1000バンチ、500nC/train (0.5nC/bunch)、パルス繰り返し3.13Hzの運転を行う。順調にビームが出たらX線生成実験も行う予定である。その後、新しいビームラインの建設に入り、今年度内の完成を予定している。

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] S. Liu, et al., "Beam loading compensation for acceleration of multi-bunch electron beam train", Nucl. Instr. and Meth. A584, pp1-8 (2008).
- [3] M. Fukuda, et al., "Present status of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)(3)", Proc of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [4] K. Sakaue, et al., "Demonstration of Multi-Pulse X-ray Generation via Laser-Compton Scattering Using Pulsed-Laser super-cavity", Proc of LINAC08, Victoria, British Columbia, Canada (2008).
- [5] A. Deshpande, et al., "Design of a mode separated RF photo cathode gun", Nucl. Instr. and Meth. A600, pp361-366 (2009).
- [6] K. Sakaue, et al., "Laser-Compton x-ray generation using pulsed-laser super-cavity and multi-bunch electron beam", in this meeting.