

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

Masafumi Fukuda^{1,A)}, Sakae Araki^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Koichiro Hirano^{2,A)}, Yosuke Honda^{A)}, Toshiya Muto^{3,A)},
Kazuyuki Sakaue^{B)}, Noboru Sasao^{C)}, Liu Shengguang^{A)}, Mikio Takano^{D)}, Takashi Taniguchi^{A)},
Nobuhiro Terunuma^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Yoshio Yamazaki^{4,A)}, Hirokazu Yokoyama^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801, Japan

^{B)} Advanced 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)} 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. The merit of this method is that a compact and inexpensive X-ray generator can be constructed because this generator can obtain the X-ray of the same energy with e^- beam of a lower energy in comparison with a synchrotron radiation facility using a GeV order storage ring. In order to demonstrate the X-ray generation using a pulsed-laser stacking cavity, we have constructed the linac to produce the multi-bunch e^- beam with the energy of 43MeV and the charge of 200nC/100bunches. This paper reports the present status of this linac.

KEK小型電子加速器(LUCX)の現状報告

1. はじめに

現在、X線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。例えば、動的血管造影では患者の体内にヨウ素を注入し、ヨウ素のKエッジ(33.169keV)前後のエネルギーの硬X線を照射し、それぞれの像をとる。Kエッジの前後で散乱断面積が大きく変わるので、その前後のエネルギーの透過X線のコントラストをとるにより、血管の鮮明な像を得ることができる。また、タンパク質の構造解析などにも利用される。これらの利用には安定した高輝度X線源が必要である。このためのX線源としては、GeVオーダーの電子蓄積リングでのアンジュレータを利用したもの(SPring8など)がある。これは、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。もっと小型で安価な高輝度X線源が実現し、病院、大学、企業なども導入できるようになれば、放射線医療、研究、産業の発展に大きく貢献することができる。

そこで、我々はコンプトン散乱を利用した小型高輝度X線源の開発研究を高エネルギー加速器研究機構(KEK)に設けた小型加速器で行っている。これは、医療用小型高輝度X線源の開発として放射線医学総

合研究所と共同で製作したものである。最終的な装置構成は、周長約13mの小型の蓄積リング中にレーザー蓄積装置を設置したものになる[1]。この装置では赤外(1064nm)のレーザーパルスと43MeVの電子ビームとのコンプトン散乱により33keVの硬X線を生成する。コンプトン散乱を利用することにより、より低いエネルギーの電子ビームで硬X線を作ることができる。このため蓄積リングの小型化が可能になり装置がコンパクトとなるため、比較的安価に高輝度X線源を製作することが可能になって来る。ただし、コンプトン散乱の断面積は小さいのでX線数を増やすために、レーザー、電子ビームとも密度を上げて衝突させる必要がある。レーザーに関しては、ピークパワーの高いパルスレーザーを作り出すために、2枚の凹面ミラーからなる光共振器であるレーザー蓄積装置を用いる。共振器長をレーザーのパルス間隔の半分にする事で共振器内にピークパワーの高いパルスを蓄積でき、また凹面ミラーを使うことで光共振器中心で横方向のサイズを100 μ m以下に絞ることもできる。また、電子ビームに関しても、高強度であることと共に、衝突点でできるだけ小さくビームサイズを絞るため、質のよい(エミッタンスの小さい)ことが重要である。

そこで、我々は高品質で大強度のマルチバンチ電

¹ E-mail: mfukuda@post.kek.jp

² Present address: Japan Atomic Energy Agency

³ Present address: Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

⁴ Present address: Japan Atomic Energy Agency

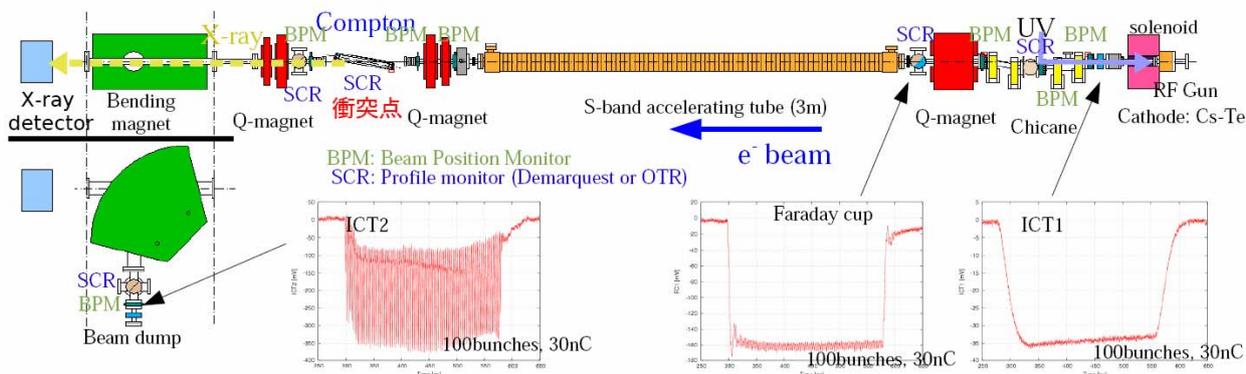


図1 小型電子加速器ビームライン

電子ビーム源の開発をKEKに設けた小型電子加速器で行っている。昨年11月まで第1段階として電子源の開発を行った。電子源としてフォトカソードRF電子銃を採用した。これは、高品質なビームを得られ、さらにレーザーのバンチ構造をそのまま引き継ぐため、バンチャーなどの装置が不要となり、ビームラインを小型化でき、マルチバンチビームも容易に生成できるためである。カソードとしてモリブデン表面に金属カソードに比べて量子効率の高いCs-Teを蒸着したものを使用した。レーザーの入射パワーと電子ビームの電荷量から計算するとカソードの量子効率は0.3%以上を保持していた。このRF電子銃を用いた大強度マルチバンチ電子ビームの生成の実験では、250nC/train、100bunches/trainのマルチバンチ電子ビームの生成に成功した[2]。現在は第2段階として、ビームエネルギーを5MeVから43MeVまで上げ、レーザー蓄積装置を用いた逆コンプトン散乱によるX線生成実験を行う予定である[3]。このため加速管とレーザー蓄積装置を設置する部分を追加するビームラインの改造を2005年11月から行った。建設は2006年3月末に終了し、エージングを開始した。また、7月中旬からビーム運転を開始したところである。本稿では、この小型電子加速器について報告する。

43MeVまで加速する。その下流にはX線生成を行う部分があり、衝突点にはレーザー蓄積装置を設置する。加速管直前と衝突点前後には四極電磁石を設置した。加速管直前のものは加速管内でのビームサイズを小さく保つためと下流の四極電磁石でのビームサイズを大きくして衝突点でのビームサイズをなるべく小さく絞るためにある。衝突点上流のものはここでビームサイズを収束するため、その下流のものは収束したあと広がるビームを抑えビームダンプまで輸送するためである。最後は偏向電磁石でビームを垂直下方に設置したビームダンプに捨てる。ビームダンプ直前には電子ビームのエネルギーやチャージ量を測定するためにプロファイルモニタとICTを設置した。また、各所に電子ビームの位置やサイズを測定するためのBeam Position Monitor やプロファイルモニタを配置している。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。ビームラインの全長は約11mである。電子ビームのパラメータは表1のようにになっている。また、このビームラインのオプティクスはSAD (Strategic Accelerator Design)[4]を使って設計した。衝突点での電子ビームサイズは $\sigma_x=64\mu\text{m}$ 、 $\sigma_y=32\mu\text{m}$ と計算されている。またX線検出に際してビームロスによるバックグラウンドを抑えるため、全体を通してビームサイズが3mm以下になるようにした。

2. 小型電子加速器

2.1 ビームライン

図1は小型電子加速器のビームラインである。電子源には引き続きフォトカソードRF電子銃を採用している。レーザーパルス(266nm)はシケインの部分からカソードへ垂直に入射する。RF電子銃で生成した4MeVの電子ビームはS-band 3m加速管で

表1 電子ビームのパラメータ

Energy	43MeV
Intensity	2nC/bunch
Number of Bunches	100 bunches/train
Bunch spacing	2.8ns
Bunch length	10ps
Repetition Rate	12.5 train/s

2.2 RF system

図2はRF systemである。Klystronは東芝製E3718を使用しており、この1台でRFgunと加速管にRF(2856MHz)を供給している。Klystronからの

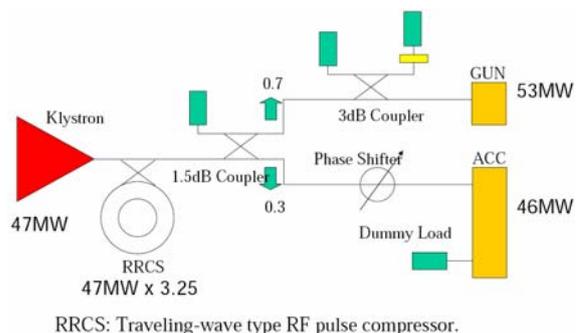


図2 RF system

47MWの出力電力は、進行波型RFパルス圧縮器RRCS(Resonant-Ring type Compression System)[5]でピーク電力を3.25倍に増幅される。その後、RFgunと加速管の両方へ分配し、それぞれ最大ピーク電力53MW、46MWを供給する。大電流のマルチバンチビームを作るときに問題となるのは、ビームローディングにより、バンチ列の前方と後方でエネルギー差が出来てしまうことである。200nC/train, 100bunches/trainのマルチバンチビームが高周波が定常状態になったときに、加速管に入射すると、18MeVのエネルギー差が生じる。電子ビームを100 μ m以下に絞りレーザーと衝突させるにはエネルギー差を1%以下に抑える必要がある。これを補正するため、高周波が空洞内に満たされつつある過渡期に入射することで、後ろのバンチほど、入射時の高周波による電場が高い状態にし、ビームローディングの影響を相殺する。ただし、過渡期に入射するとその分ビームエネルギーが下がってしまう。それを補うためにRRCSを用いピーク電力を上げて必要なビームエネルギーを得られるようにする。

図3は加速管出口でのビームエネルギーで、青線が100bunchesを入射した時のビームトレインのエネルギーである。パルス圧縮部の始めから0.2 μ sのところにビームを入射すると補正できるのが分かる。このときエネルギー差は1%である。

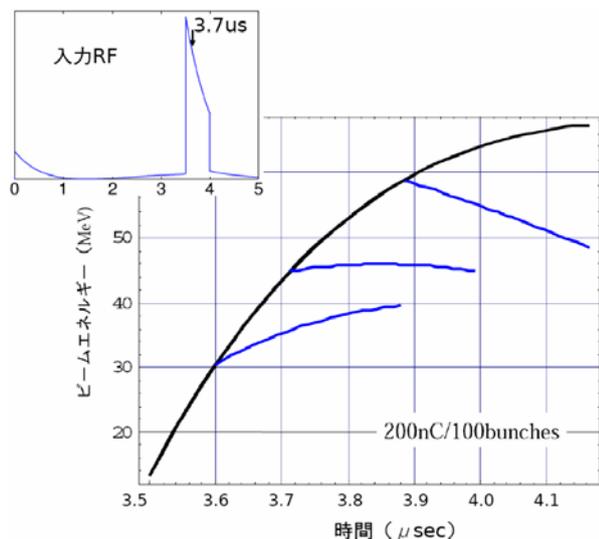


図3 加速管出口でのビームエネルギー

2.3 Laser system

レーザーシステムは図4のようにになっている。波長1064nmの7W, 357MHz, Nd:YVO₄モードロックパルスレーザー(Time-Bandwidth Products GE-100-1064-VAN-XHP)をシードレーザーとし、100バンチ(280ns)を切り出すためのポッケルセル(KD*P), 2台

のフラッシュランプ励起のNd:YAGアンプ, 赤外光を紫外光に変換する2つのBBO結晶(SHG,FHG)からなる。ポッケルセルで切り出された100バンチのレーザーパルス列はそれぞれのアンプを2回通過し、約2000倍に増幅され、BBO結晶で紫外光へと変換される。赤外→紫外の変換効率は約25%, パルスあたりのエネルギーが10 μ J/pulseの100バンチレーザーパルスを生成する。パワージッターはr.m.s.で約3%となっている。

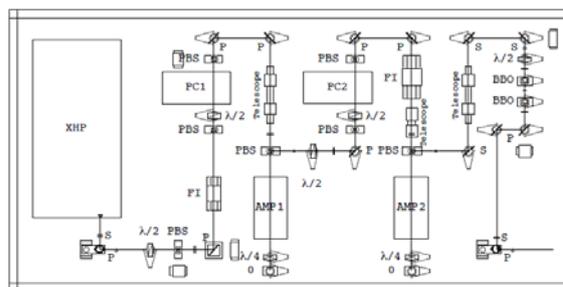


図4 Laser system

3. 現在までの運転状況と今後

今年3月末にビームラインの建設が終了しRFエージングを開始した。現在は約400時間行いKlystron出力電力23MW, RF電子銃、加速管へのピーク入力電力約30MWで安定に運転できるようになっている。RF電子銃には約10MW入っている。この出力で7月中旬よりビーム運転を開始し、38MeV, 30nC, 100bunchesのビームをビームダンプまで輸送することができた。そのときのICTで測定したビーム電流の信号が図1の波形である。まだ、RFの入力電力が設計値より低いので、ビームエネルギーを上げるため、RFに対するビームの入射タイミングを後ろにずらして運転している。エミッタンスなどのビームパラメータの測定はこれからであり、そのための測定系の確立を行っていく。今後、ビームローディングを補正しつつ、43MeV, 100バンチ, 200nCの電子ビームを生成するには、RF電力を設計値まで上げる必要があり、ビーム運転と共にRFエージングも継続し、目標のビーム生成を目指す。

参考文献

- [1] J. Urakawa, et al., "Electron beam cooling by laser", Nucl. Instr. and Meth. A532, pp388-393 (2003).
- [2] K. Hirano, et al., "High-intensity multi-bunch beam generation by a photo-cathode RF gun", Nucl. Instr. and Meth. A560, pp233-239 (2006).
- [3] K. Sakaue, et al., "Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) using pulsed-laser stacking cavity", in this meeting.
- [4] SAD <http://acc-physics.kek.jp/SAD/sad.html>
- [5] S. Yamaguchi, et al., "High-Power Test of a Traveling-Wave-Type RF-Pulse Compressor", Proc. PAC1995, Dallas, USA (1995) pp1578-1580