

Upgrade plan of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)(1) *

Masfumi Fukuda ^{#,A)}, Aryshev Alexander ^{A)}, Sakae Araki ^{A)},
Yosuke Honda ^{A)}, Kazuyuki Sakaue ^{B)}, Nobuhiro Terunuma ^{A)},
Junji Urakawa ^{A)}, Masakazu Washio ^{B)}

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

^{B)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

Abstract (英語)

We have developed a compact X-ray source via inverse Compton scattering between an electron beam and a laser pulse stacked in an optical super-cavity at Laser Undulator Compact X-ray (LUCX) accelerator in KEK. The accelerator consists of a photo-cathode RF-gun and an S-band accelerating tube and now produces the multi-bunch electron beam with 100 bunches, 0.4nC bunch charge and 30-40MeV beam energy. In the autumn of last year, we have succeeded in taking X-ray images of fish bone and etc. However, it took two hours to get an X-ray image because of low intensity of X-ray with the number of 10^4 photons/pulse. To get a clear image at shorter times, we are planning to increase the intensity of X-ray to 450 times. To achieve this aim, the number of bunches of the electron beam is extended to 1000 bunches and the stacked power in the laser cavity is increased to 15 times by expanding the laser size on the mirror in order to avoid the mirror damage. Moreover, the collision angle is reduced to 6 degree. By doing so, the expected number of X-ray is 1.7×10^7 photons/pulse. In this upgrade, a 3.6cell rf-gun, a 12cell booster and a planner type four-mirror Cavity will be introduced. In this paper, the upgrade of this accelerator will be reported.

KEK 小型電子加速器(LUCX)アップグレード計画(1)

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)内にある小型電子加速器 (LUCX) では、レーザーコンプトン散乱(Laser Compton Scattering: LCS)を利用した X 線源の開発を行っている。ここでの X 線源の開発は量子ビーム基盤技術開発計画の一部であり、常電導加速器による LCS を利用した X 線源の開発、および今年度に行う超伝導加速器での LCS による X 線生成実験^[1]のための技術開発を担当している。ここでは今までにレーザー光共振器を用いた X 線生成実験を行ってきており、電子ビームとレーザーの衝突技術や、そのためのモニター開発、X 線検出器の開発を行ってきた。また最終年度では、さらに加速器やレーザー光共振器のアップグレードを行い、常電導加速器での X 線イメージングのための X 線源の開発を行う。

現在の小型電子加速器はフォトカソード RF 電子銃、加速管、X 線生成部から成り、この RF 電子銃で生成したマルチバンチ電子ビームは、その下流の加速管で 30-40MeV まで加速され、X 線生成部にあるレーザー光共振器内のレーザーパルスと衝突し、LCS によって X 線を生成する(図 1 上)。

昨年秋、この加速器において LCS による X 線イメージング試験を行い、IC や魚の骨などの X 線イメージの取得に成功した^[2]。また吸収イメージの他に屈折コントラストによるイメージも取得できた。これは X 線源のサイズが小さく品質の高い X 線が生成できていることを示している。

現在の目標は X 線数を増やして、この撮影時間を短縮することである。この前の実験の撮影では合計 10^8 個の X 線を照射しており、1 回のマルチバンチ電子ビームとの衝突での X 線生成数が 10^4 個と低いため、撮影に 2 時間ほどかかっていた。生成 X 線数を増やすことで、この時間を短縮し、最終的には 1 回の衝突で X 線イメージを取れるようにするのが目標である。また X 線数が増えることで信号とノイズの比(S/N 比)が大きくなり、ノイズの影響が減るため、さらに鮮明な画像を撮ることができると期待される。

このためのアップグレードとしてビームラインの改修、および新しい光共振器の導入を計画している。加速器側では装置全体の小型化に向けた開発として、新しく 3.6cell RF 電子銃、12cell ブースターを導入し加速器部分の小型化を試みる。また、X 線生成部では、現在使用している 2 枚ミラーの光共振器の代わりに、新たに 4 枚ミラー平面光共振器を導入する。これらの改修により生成 X 線数を 1000 倍以上にすることを目標として、常電導加速器での X 線イメージングのための X 線源の開発を予定している。本稿では、このアップグレード計画について報告する。

* Work supported by a Quantum Beam Technology Program of JST

mfukuda@post.kek.jp

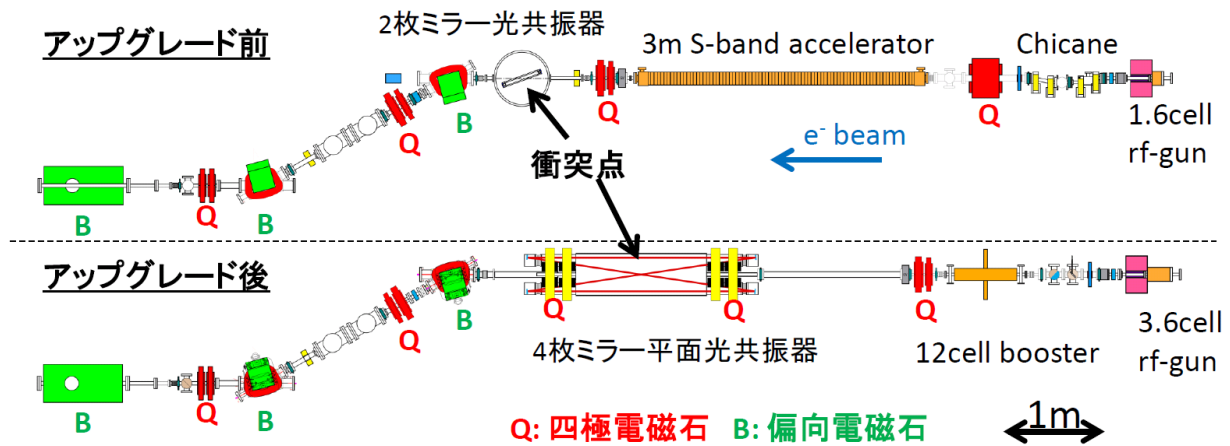


図1：KEK 小型電子加速器(LUCX)のビームライン

2. 新ビームライン

新ビームラインでは、3.6cell RF 電子銃および12cell ブースターへの交換、そして RF 電子銃へのレーザー入射のためのシケインの取り外しを行い、加速器部分のサイズを現在の 5.7m から 2.9m までへと約半分に小型化する。このビームラインは 3.6cell フォトカソード RF 電子銃、12cell ブースターで構成され、その下流の X 線生成部に 4 枚ミラー平面光共振器を設置する (図 1 下)。この RF 電子銃で電子ビームを生成し 10MeV まで加速、その後の 12cell ブースターでさらに 30MeV まで加速する。そして、光共振器内のレーザーパルスと電子ビームを衝突させて LCS により X 線を生成する。この X 線と電子ビームは直後の偏向電磁石で分離され、X 線のみを Be 窓を通して大気中に取り出す。

このビームライン改修での変更部分は RF 電子銃および加速管の交換、シケインの取り外し、4 枚ミラー平面光共振器の導入である。ここからはこれら各部分について説明していく。なお、新レーザー光共振器については[3]を参照のこと。

2.1 3.6cell フォトカソード RF 電子銃

1.6cell からセル数を増やした 3.6cell RF 電子銃^[4]を導入することにより、ビームエネルギーを 5MeV から 10MeV まで引き上げる。これにより下流の 12cell ブースターのエネルギー利得である 20MeV と合わせて目標である 30MeV のビームを生成する。LCS で生成する X 線は電子ビームのエネルギーに依存しており、目標の 15keV の X 線を生成するには 30MeV の電子ビームが必要となる。

図 2 と表 1 が 3.6cell フォトカソード RF 電子銃の構造とそのパラメータである。空洞は基本的に 1.6cell のものと同じで滑らかなカーブで構成されており、端板にはロードロック方式により着脱可能な Mo カソードを装着している。このカソード面には Cs₂Te を蒸着しており、カソードに紫外レーザーパ

ルス光(波長 266nm)を照射することで電子ビームを生成する。この電子銃では 10MeV まで電子ビームを加速する。

表 1：3.6cell rf-gun のパラメータ

Frequency (π -mode)	2856 MHz
Qvalue	15000
Coupling β	0.99
R/Q	395 Ω
Mode separation (π -2 π /3)	2.8 MHz

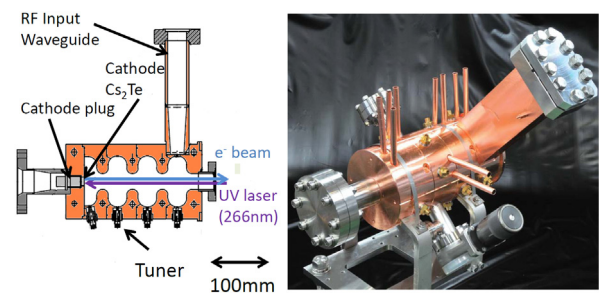


図 2：3.6cell RF 電子銃

3.6cell RF 電子銃では 1.6cell のものと比べてアイリス部小さくし、RF インポートポートを広げている。アイリス部は全体的に 300 μ m 削っており、これによりモード間隔を 2.8MHz まで広げた。3.6cell では存在するモードが 4 つに増えたためである。また、RF インポートポートはレーストラック型をしており、直線部分を 1.36mm 伸ばし穴を広げることによって、カップリング β を 1 にしている。

この 3.6cell 電子銃への交換は、X 線イメージング実験終了後に先行して行われた。昨年末にインストールし、現在ビーム試験を行っている。これまでに 9.6MeV の電子ビーム生成に成功しており、この

ときのカソード上の電界強度は 96MV/m になっている。まだ放電頻度が高いため、エージングを行いながらビーム調整を行っている。

2.2 12cell ブースター

3m の進行波型 S-band 加速管から 82cm の定在波型 12cell ブースター^[4]へ交換し、加速器部分を小型化する。ここで電子ビームのエネルギー利得は 20MeV であり、入射ビームは 10MeV であるので、加速後 30MeV のビームとなる。

図 3 が 12cell ブースターであり、表 2 がそのパラメータである。空洞の構造は今までの技術の蓄積を元にしており、3.6cell RF 電子銃とほぼ同じものになっている。中央部分のセルから高周波を入力し、空洞内に充填されている高周波電場により電子ビームを加速する。内部の電界分布の対称性を良くするため、電子銃と違い入力ポートはダブルフィードになっている。

表 2 : 12cell ブースターのデザインパラメータ

Frequency (π -mode)	2856 MHz
Qvalue	19000
Coupling β	1.0
Mode separation (π -10 π /11)	1 MHz

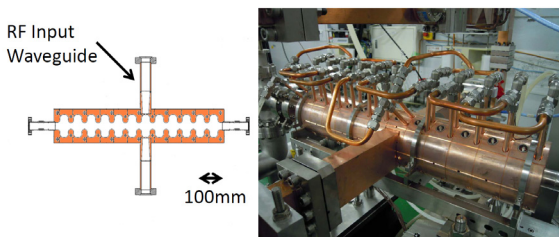


図 3 : 12cell ブースター。

このブースターの空洞は 12cell あるため、12 個のモードがあり、加速に使用する π モードと他のモードの差を広げるため、3.6cell よりさらに全体を削り、アイリス部の直径を広げ、厚さを薄くしている。こうすることで Mode separation を広げている。2次元高周波電場計算コード Superfish^[5]で計算した各モードの周波数は図 4 左のようになっており、 π モードと隣の 10 π /11 との差は 1MHz となっている。エラーバーはピークから 3dB 下がった時の周波数を示しており、この周波数差で充分離れているのが分かる。

このブースターは 7 月に完成しビームラインへ導入している。現在、RF エージングを開始したところである。図 3 の写真は導入された 12cell ブースターである。今後は RF エージングを進めて秋にはビーム試験を行う予定である。

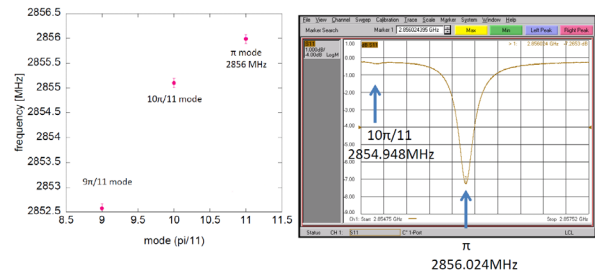


図 4 : 12cell ブースターのモードの周波数。左が計算値、右が測定結果。

2.3 シケインの取り外し

RF 電子銃へのレーザー入射用ミラーを避けるためのシケインを取り除き、スペースの短縮およびエミッタンスの向上を図る。これは RF 電子銃内のカソードへ紫外レーザー光を正面から(カソードに垂直に)入射するために設けられたが、スペースを取ること、またこれによるエミッタンスの増大が見られたため、これを取り外すことにした。

これに伴い紫外レーザー光の入射光路も変更し、ビームラインの真空中に穴空きのミラーを設置し、側面から入射したレーザー光を反射し、カソードへ約 1° の角度で入射する。電子ビームはこのミラーの穴を通過する。これにより、カソードに照射されるレーザー光の形状は角度方向にわずかに広がることになるが、この影響はほぼ無視できると考えている。

2.4 新ビームラインでの電子ビームのパラメータ

Strategic Accelerator Design(SAD)^[6]により新ビームラインでの電子ビームの光学系を計算した。衝突点で電子ビームを絞り、ビームロスを防ぐためビームライン全体でのビームサイズを 3mm 以下に抑えることを目標に計算した。初期値の Twiss パラメータは General Particle Tracer(GPT)^[7]で計算したものを使用している。仮定している Emittance は 5π mm mrad でビームエネルギーは 30MeV である。

図 5 が計算したオプティクスであり、衝突点での電子ビームサイズ(1σ)は $33\mu\text{m}$ となっている。そ

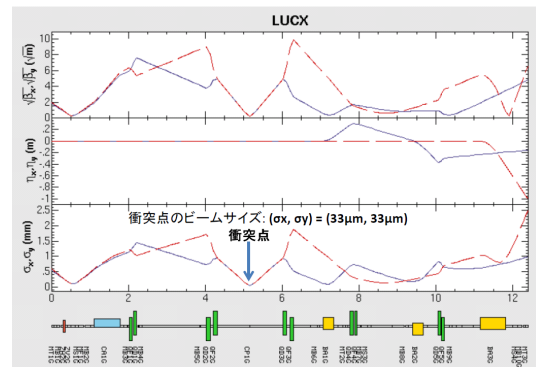


図 5 : アップグレード後のビームラインのオプティクス

の他の場所でもビームサイズは 3mm 以内になっているのが分かる。

また X 線数増大のため、電子ビームのバンチ数は前回実験時の 100 バンチから 1000 バンチへ増やす。これには加速電界を作る高周波のパルス幅を $4\mu\text{s}$ まで伸ばす必要があり、3.6cell RF 電子銃の方は現在そのためのエージングを進めている。表 3 にアップグレード後の電子ビームのパラメータを示す。

表 3：電子ビームのパラメータ

Energy	30MeV
Intensity	0.4nC/bunch
Number of bunch	1000
Beam size at the collision point (1σ)	$33\mu\text{m} \times 33\mu\text{m}$
Bunch length	10ps
Bunch spacing	2.8ns

表 4：レーザーのパラメータ

Energy	1.17eV(1064nm)
Intensity	6mJ/pulse
Waist size(2σ)	$109\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$
Pulse length	7ps

3. まとめと今後

今回のアップグレードで X 線数を前回実験時の約 450 倍にすることを目標としている。電子ビームを 1000 バンチにすることで 10 倍、レーザー光共振器に蓄積するパワー増加で 15 倍、衝突角度を 6° へと正面衝突に近づけることで約 3 倍の X 線数増加を見込んでいる。予想 X 線数は表 3、表 4 に出ている電子ビームおよびレーザーのパラメータを用いて計算している。アップグレード後の予想 X 線数は、イメージング用の検出器に入る数で 1.7×10^7 photons/train となる。この時の X 線のエネルギーは 15keV、エネルギー幅は 10%(FWHM)となる。電子ビームの繰り返しを 12.5Hz とすると、 2.1×10^8 photons/sec \cdot 10%BW となる。この X 線数になれば 10 ショットの照射で前回と同じ画像が撮れるようになる。X 線数を増強することで、より鮮明な画像を取得し、そして最終的には 1 ショットで撮影できることを目標としている。

現在、加速器およびレーザー光共振器のアップグレード作業を行っており、ビーム運転再開は秋になる予定である。3.6cell RF 電子銃は既にインストールされ、改修前にビーム試験を行っている。今後 1000 バンチのマルチバンチビーム生成を目指す。また、12cell ブースターは 7 月に完成し RF エージング中である。そして 4 枚ミラー平面光共振器は現在製作中である。それぞれ秋には準備が出来る予定

であり、新ビームラインへの改修後に、ビーム運転および X 線イメージング実験を行う予定である。目標の X 線数を達成すれば、より空間分解能の高い検出器も使用できるようになるため、非常に鮮明な画像を得ることが出来ると期待される。

参考文献

- [1] K.Watanabe, et al., “Beam commissioning of STF accelerator at KEK”, in this meeting.
- [2] K. Sakaue, et al., “Refraction Contrast Imaging via Laser-Compton X-Ray Using Optical Storage Cavity”, Proc of IPAC12, New Orleans, LS, USA, (2012).
- [3] K.Sakaue, et al., “Upgrade plan of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX)(2)”, in this meeting.
- [4] T. Aoki, et al., “Development of an S-band Multi-cell Accelerating Cavity for RF Gun and Booster Linac”, Proc of IPAC11, San Sebastian, Spain, (2011).
- [5] J. H. Billen, L. M. Young, “POISSON/SUPERFISH”, LA-UR-96-1834.
- [6] K. Hirata (CERN Report No. 88-04, 1988), SAD: <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>.
- [7] M.J. de Loos, S.B. van der Geer, Proceedings of EPAC 1996, p. 1241, GPT: <http://www.pulsar.nl/gpt/index.html>