

## 話 題

KEK におけるレーザーコンプトン散乱を用いた小型 X 線源の  
開発の現状とアップグレード計画\*福田 将史<sup>\*1</sup>・Alexander Aryshev<sup>\*1</sup>・荒木 栄<sup>\*1</sup>・本田 洋介<sup>\*1</sup>・坂上 和之<sup>\*2</sup>  
照沼 信浩<sup>\*1</sup>・浦川 順治<sup>\*1</sup>・鷺尾 方一<sup>\*2</sup>

## Development Status and Future Plan of Laser Undulator Compact X-ray Source (LUCX) in KEK

Masafumi FUKUDA<sup>\*1</sup>, Alexander ARYSHEV<sup>\*1</sup>, Sakae ARAKI<sup>\*1</sup>, Yosuke HONDA<sup>\*1</sup>, Kazuyuki SAKAUE<sup>\*2</sup>  
Nobuhiro TERUNUMA<sup>\*1</sup>, Junji URAKAWA<sup>\*1</sup> and Masakazu WASHIO<sup>\*2</sup>

## Abstract

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, an S-band accelerating tube and a part of X-ray generation. In the autumn of last year, we have succeeded in taking X-ray images of fish bone and etc. However, it had taken two hours to get an X-ray image because of low intensity of X-ray with the number of  $10^4$  photons/train. In order to obtain a clear X-ray image in a shorter period of time, we are planning to increase the intensity of X-ray to 450 times. To achieve this aim, the number of electron bunches is extended to 1000 bunches/train and the stacked laser power in the optical cavity is increased to 15 times. In order to avoid the mirror damage, the laser spot size on the mirror will be expanded by lengthening the distance between mirrors. Moreover, the collision angle is reduced from  $20^\circ$  to  $7.5^\circ$ . By carrying out these improvements, the expected number of X-ray photons will increase to  $1.7 \times 10^7$  photons/train. In this upgrade, a 3.6 cell rf-gun, a 12 cell booster and a planner type four-mirror cavity will be newly installed. In this paper, the experimental results of X-ray imaging in last autumn and the upgrade plan of the LUCX accelerator will be reported.

## 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、電子ビームとレーザー光の逆コンプトン散乱 (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、常伝導の小型電子加速器による LCS を利用した X 線源の開発、および今年度行う超伝導加速器での LCS による X 線生成実験<sup>1)</sup> 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 LCS による 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 線検出器の開発などを行っている。さらに最終年度では、加速器やレーザー光共振

器のアップグレードを行い、常伝導加速器による X 線イメージングのための LCS-X 線源の開発を行う。

こ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 30～40 MeV 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)。

昨春秋、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<sup>2)</sup>。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。これは光源のサイズの小さい 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 線強度を上げ、この撮影時間を短縮

\* 「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」文部科学省 平成 20 年度「光・量子科学研究拠点に向けた基盤技術開発」「量子ビーム基盤技術開発プログラム」より

\*<sup>1</sup> 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: mfukuda@post.kek.jp)

\*<sup>2</sup> 早稲田大学 理工学術院 Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

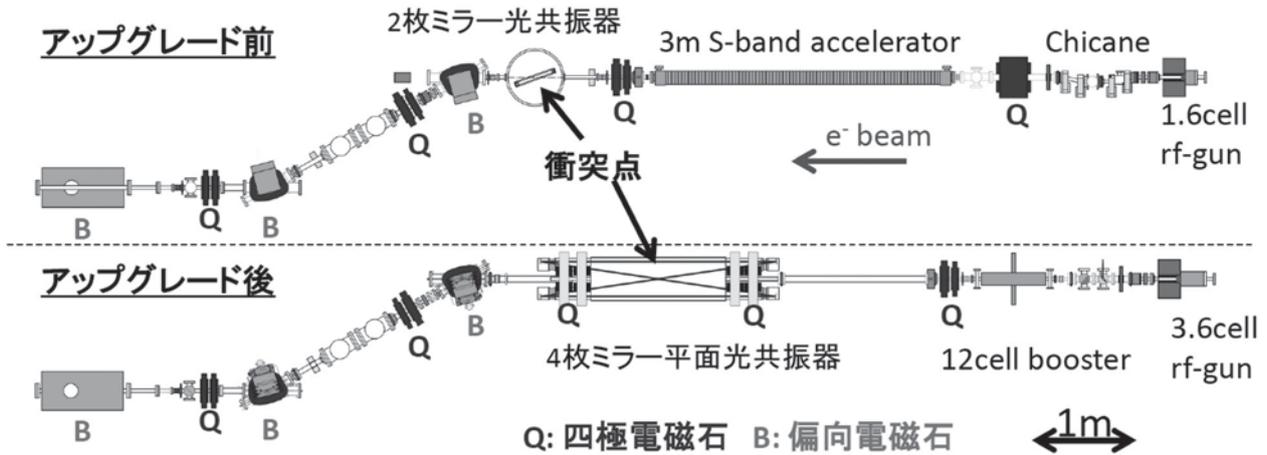


図1 KEK 小型電子加速器 (LUCX) のビームライン。

することである。昨年秋のX線イメージング試験では1つのイメージを撮影するのに合計で $10^8$ 個のX線光子を照射したが、1回のマルチバンチ電子ビームとの衝突での生成X線の光子数が $10^4$ 個と低いため、撮影に2時間ほどかかっていた。生成X線の光子数を増やすことにより、この時間を短縮し、最終的には1回の衝突によるLCS X線でイメージを撮影できるようにするのが目標である。

また生成X線の増強により、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、そして、より解像度の高い検出器を使用できるようになることから、さらに鮮明な画像を撮影す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3.6 cell RF電子銃、12 cell 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線の光子数を約450倍にする予定である。最終的な目標はX線強度を今の1000倍以上にして1ショットでのX線イメージ撮影をすることである。LUCXでは、上記を最終目標として常伝導加速器でのX線イメージングのためのX線源の開発を進めていく。

本稿では、まず第2章でアップグレード前に行ったX線イメージングの結果について報告し、第3章で現在行っている生成X線の光子数を450倍にするためのアップグレードについて報告する。

## 2. これまでのX線イメージング試験結果

前章で少し触れたように昨年秋にX線イメージング試験を行った。この試験では魚の骨の屈折コントラストイメージを取得することに成功し、生成したX線源のサイズが小さいことが確認できた。この章では、その試験結果について報告する。

### 2.1 ビームラインの構成

ビームラインの構成は図1上のようにになっている。1.6 cell RF電子銃で生成したマルチバンチ電子ビームを下流のS-band 3 m進行波加速管で30 ~ 40 MeVまで加速する。その後の四極電磁石により、電子ビームを衝突点で集束する。その衝突点には2枚ミラー光共振器が設置してあり、その内部に蓄積している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。このときの電子ビームとレーザーパルスの衝突角度は $20^\circ$ である。衝突後、電子ビームとX線は下流の偏向電磁石で分離し、電子ビームの方はダンプへ捨てられ、X線はBe窓を通じて大気に取り出す。

図2は衝突点に設置している2枚ミラー光共振器とその光学系である。光源である357 MHzモードロックレーザーから出たレーザーパルス列をLD励起光増幅器で増幅し、光共振器へ入射する。光共振器長は42 cm(往復2.8 ns)であり、ちょうどパルス列の間隔(2.8 ns)の半分となっているため、共振器内を往復しているレーザーパルスに入射パルスが次々と積み重なっている。これで高いピークパワーを持つレーザーパルスを作り出す。また、マルチバンチ電子ビームのパルス間隔もレーザーと同じになっているため、マルチバンチビームとの衝突も可能となっている。

さらにLD光増幅器では図3のように電子ビームと

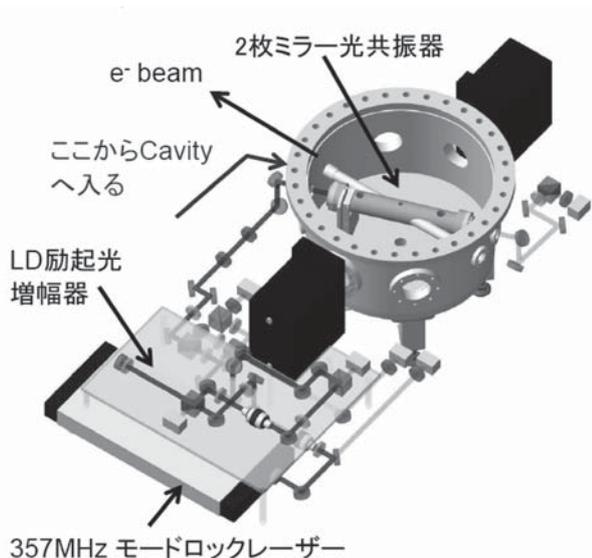


図2 2枚ミラー光共振器.

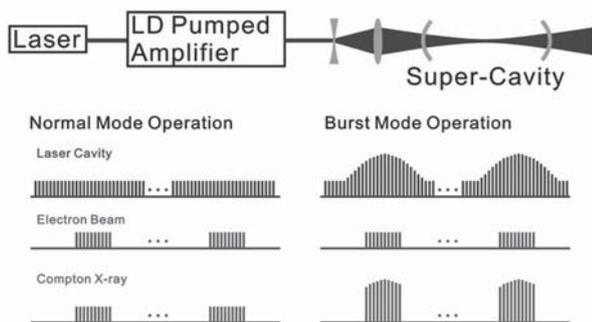


図3 バーストモードの概念図.

の衝突タイミング付近で増幅して、さらにレーザーパルスのパワーを上げる（バーストモード）ことで、生成 X 線の増強を図っている。

## 2.2 レーザーマスターシステム

加速器と衝突用レーザーの同期システムとしてモードロックレーザー発振器をマスタークロックとしたタイミングシステム（図4下）を導入し、レーザー共振器の安定運転を達成した。レーザー共振器は共振器内で1000回以上光を同じ位相で重ね合わせるため、ナノメートル以下のミラーの制御精度が要求される<sup>3)</sup>。また、Signal Generator (S.G.) のクロックに同期させるフィードバックシステム（図4上）を導入したが動作が不安定であった。本レーザーマスターシステムによって光共振器動作の安定性は飛躍的に向上するとともに、電子ビームもこれまで通りのエネルギーやビームカレントの安定性を保てることを確認した。実際に8時間の実験で一度もレーザーの蓄積フィードバックが外れることはなかった。

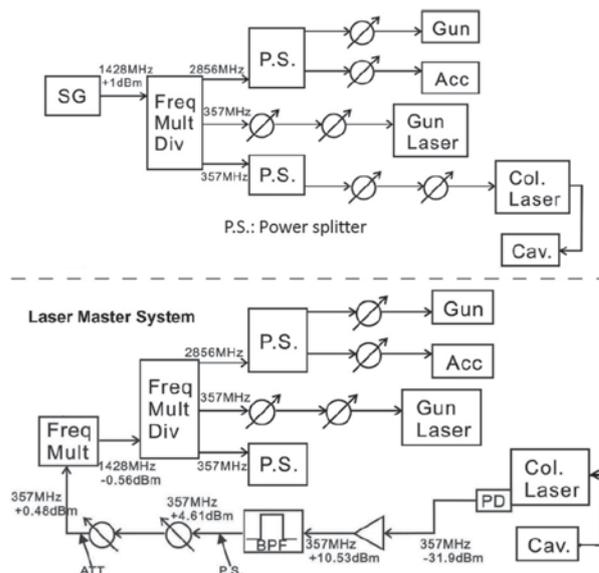


図4 S.G. のマスタークロックに同期するシステム（上）とレーザーマスターシステム（下）.

ただし、光共振器長で基準周波数が決まるため、共振器の調整により周波数が若干変わる。これに合わせてRF電子銃の共振周波数を合わせる必要がある。クライストロンはRF電子銃よりもずっとバンド幅が広いので、特に調整はしていない。このときの実験では周波数が2856 MHzから+240 kHzずれたが加速器運転に問題は出なかった。

このレーザーマスターシステムを導入することで、さらにFinesseを上げることが可能となる。また、共振器用ミラーに径の大きなものを使用できる可能性がある。ミラー位置はピエゾ素子を用いて調整しているが、ミラーの大型化で質量が増すことにより制御が難しくなる。しかし、このレーザーマスターシステムでは共振器そのものにレーザーや加速器を同期させるため、この制御が不要になる。これによりミラー上のレーザーサイズを大きくできるので、問題であるダメージ閾値によるレーザー蓄積パワー制限を回避できることが期待される。

## 2.3 X線イメージング用検出器

X線イメージング用の検出器の構成は、蛍光板付きMicro-Channel Plate (MCP), Image Intensifier, CCDカメラとなっている。これは以下の理由によるもので、まずMCPを使用したのは今までの実験の経験から高エネルギー成分のノイズには感度が低く、これを切り分けることができるからである。またMCPではX線を電子に変換し増幅するため、微小な光でも観測可能となり、さらに電子を蛍光面に当て、蛍光をミラーで反射することで、CCDカメラをノイズの多いビームラ

インの軸線から避けられるためである。さらに Image Intensifier を使うことで、高速の Gate をかけて時間的にノイズを切り分けられることができる。図5が検出器の構成図とその写真である。

### 2.4 X線イメージング試験

イメージング試験時の生成 X 線の光子数は  $1.7 \times 10^4$  photons/train であった。(電子ビームは 100 バンチのバンチ列であり、このバンチ列のかたまりを Train と呼んでいる。) また X 線の平均エネルギーは 15 keV、エネルギー幅は約 15% となっている。このときの電子ビームパラメータ、およびレーザーパラメータを表 1、2 に示す。この X 線を用いてイメージング試験を行った。

X 線イメージは吸収および屈折コントラスト像の 2 種類を撮影した。これは生成した X 線の光源サイズが

小さいことを確かめるためである。X 線の吸収の差によって像を取得する場合、生体を構成する元素などの軽元素においては吸収差が小さく、コントラストが付きにくいことが知られている。図 6 (B) は屈折コントラストの概念図を示している。こちらでは境界での屈折率差を用いてコントラストを増幅しており、エッジを強調することができる。この屈折コントラスト像を取得するためには光源点が小さい X 線が要求されるので、屈折コントラスト像から、光源サイズの小さい X 線が生成できているかを確認することができる。

本システムでは試料を設置できる場所が 2 箇所(図 5) あり、それぞれに試料を置いて X 線イメージを撮影した。最初に、試料と検出器の距離を 370 mm (A) にし吸収コントラストのイメージを撮影する。次に、その距離を 670 mm (B) に拡げてイメージを撮影しコントラストの増幅があれば、屈折コントラストを確認できたことになる。

図 7 が LCS により生成された X 線で撮影した魚の骨のイメージで、それぞれ試料から検出器までの距離は (A) 370 mm、(B) 670 mm であった。明らかに右像 (B) の方がくっきりコントラストのついた像になっているのが分かる。このラインプロファイルを取ったものが図 8 であり、コントラストの増強が確認できる。また、矢印で図示している位置において特に屈折コントラスト特有のエッジが強調されている形状が確認で

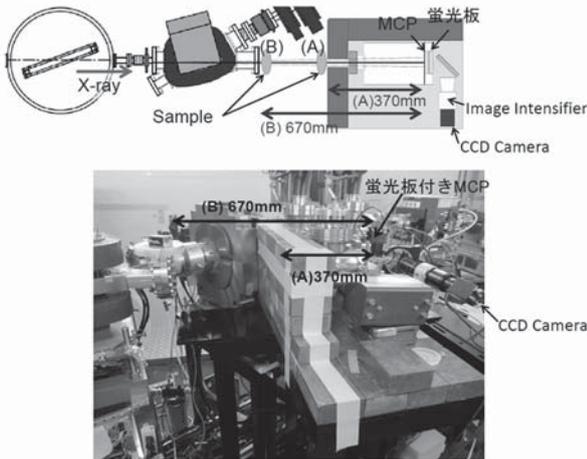


図 5 X線イメージング用検出器。

表 1 電子ビームのパラメータ

Energy	30 MeV
Bunch charge	0.4 nC
Number of bunches	100
Beam size at the collision point ( $1\sigma$ )	$200 \mu\text{m} \times 53 \mu\text{m}$
Bunch length (FWHM)	10 ps
Bunch spacing	2.8 ns

表 2 レーザーのパラメータ

Wavelength	1064 nm (1.17 eV)
Intensity	0.4 mJ/pulse
Waist size ( $1\sigma$ )	$30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$
Pulse length (FWHM)	7 ps

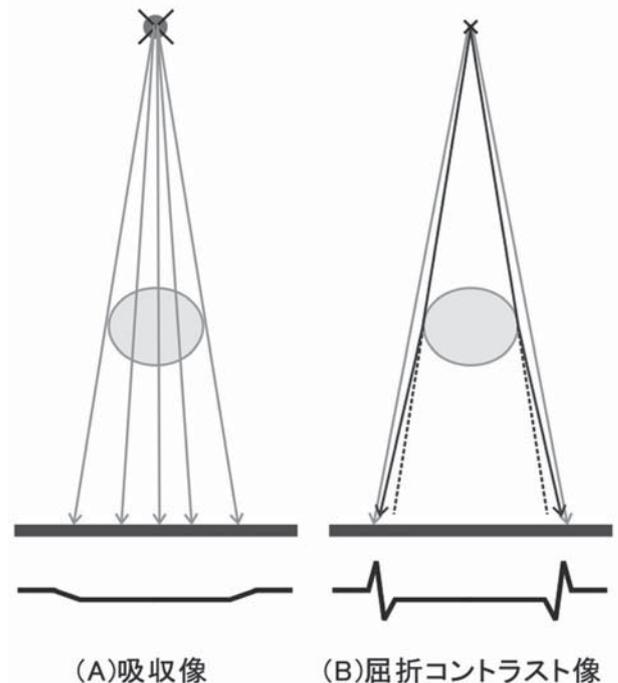


図 6 屈折コントラストの概念図。

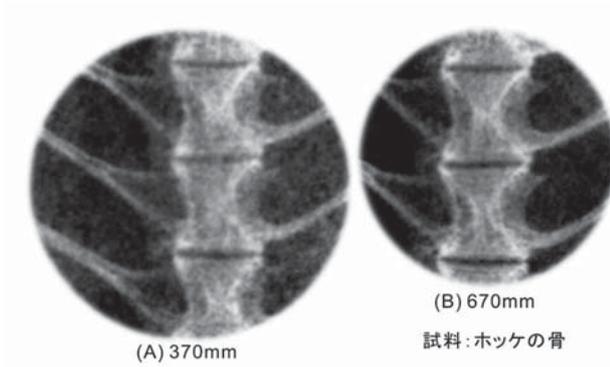


図7 撮影したX線イメージ.

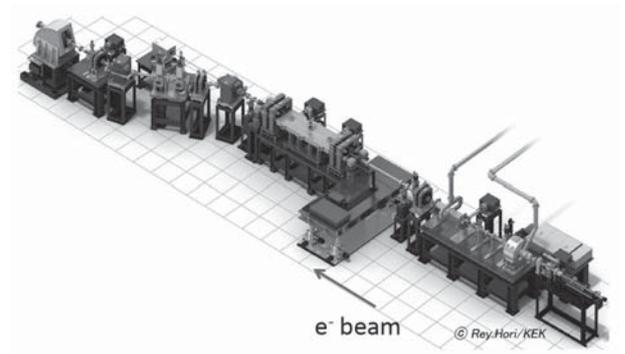


図9 新ビームライン.

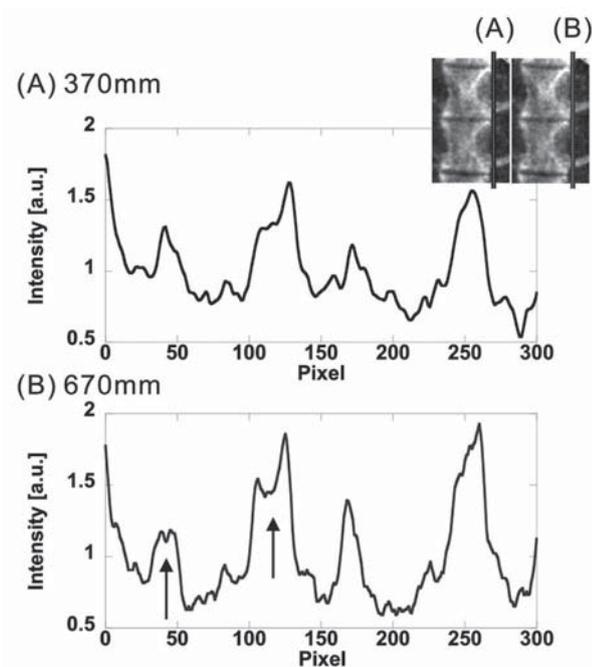


図8 X線イメージのラインプロファイル.

きる。これらはコントラスト増強ができていることを示すとともに、前述の通り今回生成しているLCS X線の線源サイズが小さいことを示している。

以上のように、我々はX線イメージを取得することに成功した。ただし、撮影には合計  $10^8$  個のX線を照射したが、X線強度が低く、この撮影に2時間がかかった。そこで、このX線強度を上げるためのアップグレードを現在行っている。次章でその内容について説明する。

### 3. アップグレード計画について

ここでは現在行っているアップグレードについて説明する。これにより、生成X線の増強、加速器部分の小型化を目指す。加速器側では、新しい電子銃および

加速管として3.6 cell RF電子銃、12 cellブースターを導入する。また、バンチ数を10倍の1000バンチまで増やす。レーザー側では、4枚ミラー平面光共振器を新たに導入し、蓄積パワーを増やし、電子ビームとの衝突角度を $7.5^\circ$ に浅くする。このアップグレードにより生成X線の光子数を $1.7 \times 10^7$  photons/trainにまで増やす。

#### 3.1 新ビームライン

新ビームライン(図1下, 図9)の構成は、基本的には以前と同じだが、電子銃、加速管をそれぞれ3.6 cell RF電子銃および12 cellブースターへ交換する。さらにRF電子銃へのレーザー入射方式を変更してシケインを取り外し、加速器部分のサイズを現在の5.7 mから2.9 mへ約半分に小型化する。ビーム加速部である12 cellブースターの下流にX線生成のための4枚ミラー平面光共振器を設置する。このRF電子銃で10 MeVのマルチバンチ電子ビームを生成し、その後の12 cellブースターでさらに30 MeVまで加速する。そして、電子ビームはブースター空洞下流の四極電磁石によって光共振器内の衝突点で集束されレーザーパルスとのLCSによりX線を生成する。この生成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。

ここからは、ビームライン改修の各変更部分について説明していく。

#### 3.2 3.6 cell フォトカソード RF 電子銃

本計画においてLCSで生成するX線の目標エネルギーは15 keVである。生成X線のエネルギーは電子ビームのエネルギーとレーザーの波長(1064 nm)で決まり、15 keVのX線を生成するには30 MeVの電子ビームが必要となる。1.6 cellからセル数を増やした3.6 cell RF電子銃<sup>4)</sup>を導入することにより、ビームエネルギーを5 MeVから10 MeVまで引き上げる。これにより下流の12 cellブースターのエネルギー利得である

20 MeV と合わせて 30 MeV のビームを生成することができる。

図 10 と表 3 に 3.6 cell フォトカソード RF 電子銃の構造とそのパラメータを示す。空洞形状は基本的に現行の 1.6 cell のものと同じで、滑らかなカーブで構成され、端板にはロードロック方式により着脱可能な Mo カソードプラグを装着している。このプラグ表面には Cs<sub>2</sub>Te を蒸着しており、これに紫外レーザーパルス光（波長 266 nm）を照射することで光電効果により電子ビームを生成する。この電子銃では 10 MeV まで電子ビームを加速する。

3.6 cell RF 電子銃では 1.6 cell のものと比べてアイリス部を小さくし、さらに導波管のカップリングホールを拡げている。このカップリングホールはレーストラック型をしており、直線部分を 1.36 mm 伸ばして穴を広げることで、カップリング  $\beta$  が 1 になるように調整している。アイリス部は全体的に 300  $\mu$ m 削っており、これにより  $2/3\pi$  と  $\pi$  モードの周波数間隔を 2.8 MHz まで拡げている。これは、3.6 cell では存在するモードが 4 つに増えたため、そのままだと各モードの間隔が 1.6 cell の時より近くなるからである。

この 3.6 cell 電子銃への交換は、昨年の 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、すでにビーム試験を行っている。これまでに 9.6 MeV の電子ビーム生成に成功しており、この時のカソード上の電界強度は 96 MV/m になっている。まだ放電頻度が高いため、エージングを行いつつビー

ム調整を行っていく。

### 3.3 RF 電子銃へのレーザー入射方式変更

RF 電子銃へ正面からレーザー光を入射するためのシケインを取り除き、省スペース化およびエミッタンス向上を図る。シケインは 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する。真空のビームライン上に 20 mm  $\phi$  の穴空きアルミミラーを設置し、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。またミラーはアルミ板の表面を鏡面加工したものを使用するため、チャージアップの問題も避けられる。

### 3.4 12 cell ブースター

3 m の S-band 進行波型加速管から 82 cm の定在波型 12 cell ブースター<sup>4)</sup>へ交換することで、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 20 MeV であり、入射ビームエネルギーが 10 MeV であるので、加速後に 30 MeV のビームを得られる。

図 11 が 12 cell ブースターであり、表 4 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基にしており、3.6 cell RF 電子銃と基本的には同じものになっている。RF 入力セルは加速管中央部に位置し、ここ

表 3 3.6 cell RF 電子銃のパラメータ

Frequency ( $\pi$ -mode)	2856 MHz
Q-value	15000
Coupling $\beta$	0.99
R/Q	395 $\Omega$
Mode separation ( $\pi$ -2 $\pi$ /3)	2.8 MHz

表 4 12 cell ブースターのパラメータ

Frequency ( $\pi$ -mode)	2856 MHz
Q-value	17800
Coupling $\beta$	1.1
Mode separation ( $\pi$ -10 $\pi$ /11)	1 MHz

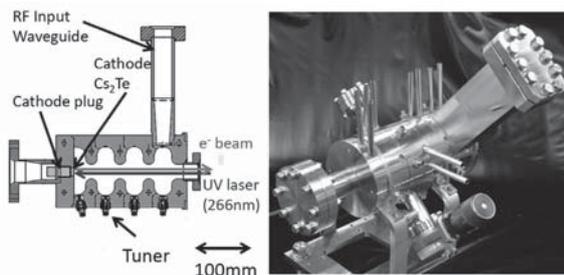


図 10 3.6 cell RF 電子銃.

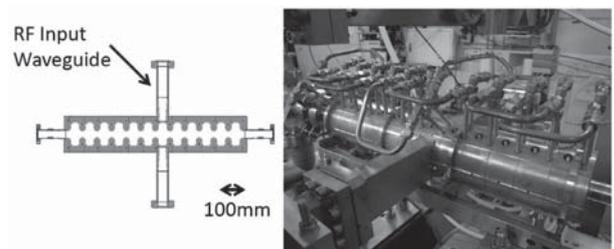


図 11 12 cell ブースター.

から高周波を入力する。内部の電界分布の対称性を良くするため、RF 入力ポートはダブルフィードになっている。

このブースターの空洞は 12 cell があるため、12 個のモードがあり、加速に使用する  $\pi$  モードと他のモードの差を広げるため、3.6 cell RF 電子銃よりもさらにアイリス全体を削って、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<sup>5)</sup> で計算した各モードの周波数は図 12 左のようになっており、 $\pi$  モードと隣の  $10\pi/11$  との差は 1 MHz となっている。計算値の Q から求めた周波数応答の -3 dB 幅をエラーバーとしてプロットしており、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 11 の写真は導入された 12 cell ブースターである。今後は RF エージングを進めて 2012 年秋にはビーム試験を行う予定である。

### 3.5 新ビームラインでの電子ビームのパラメータ

Strategic Accelerator Design (SAD)<sup>6)</sup> 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ること、また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 3 mm 以下に抑えることを目標に計算した。RF 電子銃出口での Twiss パラメータは General Particle Tracer (GPT)<sup>7)</sup> で計算したものを使用している。仮定している Emittance は RF 電子銃出口で  $5\pi$  mm mrad である。また、ビームエネルギーは RF 電子銃出口で 10 MeV、12 cell ブースターで加速後に 30 MeV としている。

図 13 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 ( $1\sigma$ ) は  $33\ \mu\text{m}$  となっている。その他の場所でもビームサイズは 3 mm 以内になっているのが分かる。

また X 線強度増大のため、電子ビームのバンチ数は

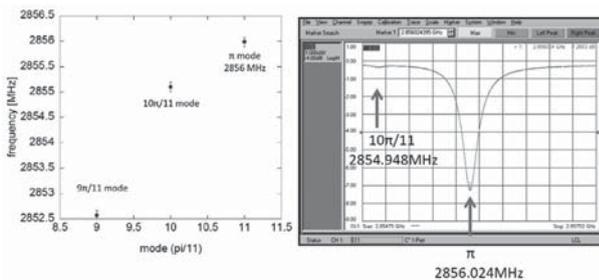


図 12 12 cell ブースターのモードの周波数。左が計算値、右が測定結果。

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、3.6 cell 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 5 にアップグレード後の電子ビームのパラメータを示す。

### 3.6 4 枚ミラー平面光共振器

新たに導入する光共振器は 4 枚のミラーを平面上に配置した構成となっている<sup>8)</sup>。今までの光共振器ではミラーの誘電多層膜のダメージ閾値により蓄積するパワーが制限されていた。そのため共振器長を伸ばし、ミラー上のレーザーサイズを広げる構成としている。また、4 枚ミラー光共振器は 2 枚ミラーのものと比べてミラーの位置に対する許容誤差が広く、共振器長を伸ばす今回の場合には、アライメントに対して有利になるので、こちらを選択している。

この光共振器は各々 2 枚の凹面ミラーと平面ミラーで構成されており、同一平面上にこれら 4 枚のミラーを配置している。図 14 が 4 枚ミラー平面光共振器であり、表 6 はそのパラメータである。共振器を大型化したため、この周長は 7560 mm に伸び、9 個のパルスが共振器内に蓄積される。ミラーの反射率は入射部のミラーが 99.7%、他は 99.99% で、Finesse は 1000、増大

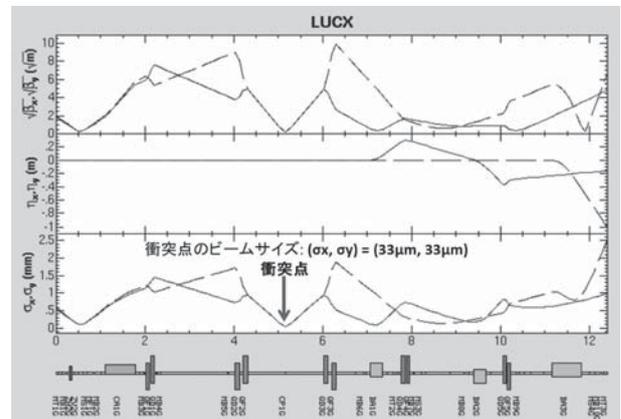


図 13 アップグレード後のビームラインのオプティクス。

表 5 電子ビームのパラメータ

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

率は500倍となっている。これらの値は低めに抑え、安定性重視の設計となっている。これは光共振器へ入射するレーザー光を増幅するバーストモードを使用するため、こちらでレーザーパワーを上げることができるためである。

凹面ミラー間の距離が420 mmから1893 mmと長くなったことで、ミラー上のレーザーサイズ( $2\sigma$ )は1.1 mm  $\phi$ から2.92 mm  $\times$  6.40 mm (H  $\times$  V)と面積が15.4倍になり、その分、ミラー表面を破壊せずに蓄積できるパワーも増える。また、ミラーの直径も以前の2倍の2インチのものを使用する。この理由は、今までの1インチミラーでは全部を使っても99.7%しか入らず、その分のパワーロスは反射率が下がるのと同じことになるためである。設計上、蓄積されるレーザーパルスのエネルギーは前回X線実験時の15倍の6 mJ/pulseとなる予定である。

衝突点でのウェストサイズ( $1\sigma$ )は55  $\mu$ m  $\times$  25  $\mu$ m (H  $\times$  V)となっており、偏平になっている。これは平面ミラーをわずかに歪ませることで丸くできる<sup>9)</sup>。今回は製作期間が限られているので、扁平のままとしている。電子ビームとの衝突角度は20°から7.5°となり、より正面衝突に近づけている。これにより、約3倍のX線強度の増加が見込める。電子ビームとの衝突位置調整はレーザー光の位置を動かして調整する。上流側の2枚のミラーは3軸の位置を調整できるムーバー架

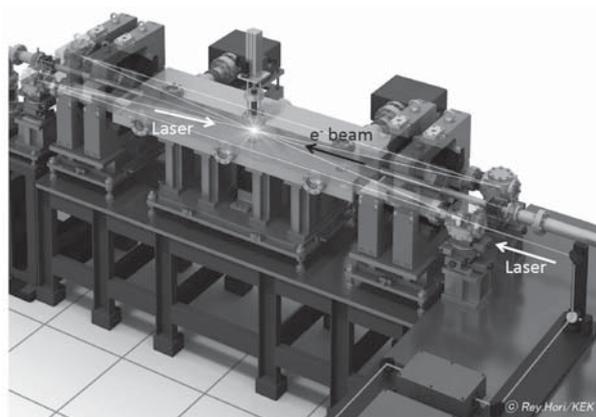


図14 4枚ミラー平面光共振器。

表6 レーザーのパラメータ

Wavelength	1064 nm (1.17 eV)
Intensity	6 mJ/pulse
Waist size ( $1\sigma$ )	55 $\mu$ m $\times$ 25 $\mu$ m
Pulse length	7 ps

台上に載っており、下流側の2枚のミラーにはそれぞれ3軸の位置および3軸の角度が調整できるヘキサポッドに載せる。これらを調整することでレーザーの位置を調整できるようになっている。また衝突点にはアルミナ蛍光板のスクリーンが挿入できるようになっており、これで電子ビームとレーザーの位置を確認して合わせることができる。その後、X線の信号を見ながら、レーザーの位置をさらに微調整する。

### 3.7 X線生成

今回のアップグレードでX線強度を前回実験時の約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7.5°へと正面衝突に近づけることで約3倍のX線強度の増加を見込んでいる。予想されるX線光子数はモンテカルロシミュレーションコードであるCAIN (Conglomerat d'ABEL et d'Interactions Non-linéaires)<sup>10)</sup>を使って計算した。この計算には表5, 6に出ている電子ビームおよびレーザーのパラメータを使用している。

この計算からX線イメージング用の検出器に入るX線光子数は $1.7 \times 10^7$  photons/trainとなり、この時のX線の平均エネルギーは15 keV、エネルギー幅は10% (FWHM)となる。LCSで生成された全X線光子数は $1.6 \times 10^8$  photons/trainとなる。これらの光子数は1000バンチのマルチバンチ電子ビームとレーザーの衝突により生成される数である。検出器は衝突点から約2.4 m下流の位置に設置しており、20 mm  $\phi$ の鉛コリメータがその直前にある。よって散乱角度が4.2 mrad以内のX線光子数を検出器に入射する光子数とした。図15がCAINで計算したX線のエネルギー分布である。(2)の線が4.2 mrad以内に入るX線のエネルギー分布である。前回と同じX線イメージを撮る場合、合計で

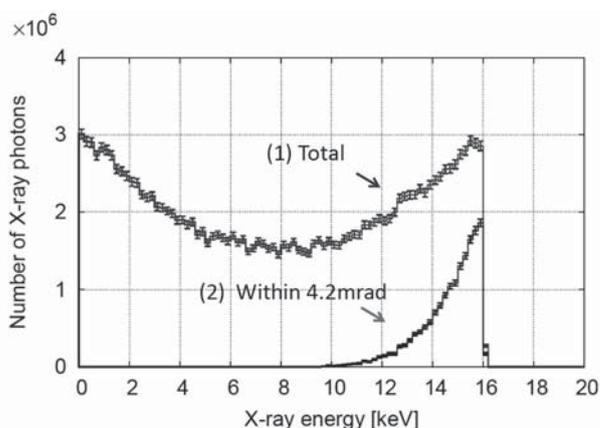


図15 X線のエネルギー分布。

$10^8$  photons の X 線を照射することになるので, この X 線強度であれば 10 ショットで撮影可能となり, 前回の 10000 ショットから比較すると 1/1000 になる. さらに, 実際ミラー破壊が起こったときのミラー表面上のレーザー光のパワー密度は現在の設計の 5 倍なので, この分さらにレーザー強度を上げられる可能性がある. S/N 比が大きくなり, ノイズの影響が減ることも合わせて考慮すれば, 1 ショットの X 線照射で撮影できることも期待できる.

#### 4. まとめと今後

我々の常伝導加速器と光共振器を用いたレーザーコンプトン X 線源開発 (LUCX) グループでは, X 線強度を増強することで, 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 X 線像が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を行っており, アップグレード後の予想 X 線光子数は, イメージング用の検出器に入る数で  $1.7 \times 10^7$  photons/train となる. この時の X 線の平均エネルギーは 15 keV, エネルギー幅は 10% (FWHM) となる. 電子ビームの繰り返しを 12.5 Hz とすると,  $2.1 \times 10^8$  photons/sec  $\cdot$  10% BW となる. この X 線光子数になれば 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.

アップグレードに伴うビームライン改修を現在行っている. 3.6 cell RF 電子銃は既にインストールされ, ビーム試験も行っている. 今後 1000 バンチのマルチバンチビーム生成を目指す. また, 12 cell ブースターは製作が終了し, 現在, RF エージングを始めたところである. 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 2012 年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, X 線イメージング実験を再び行う予定である. 目標の X 線光子数を達成

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", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012.
- 2) K. Sakaue et al., "First refraction contrast imaging via Laser-Compton Scattering X-ray at KEK", AIP Conf. Proc. 1466, 272 (2012).
- 3) K. Sakaue, et al., "Development of a laser pulse storage technique in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering", Nucl. Instrum. Meth., A637 (2011) S107-S111.
- 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>.
- 8) K. Sakaue, et al., "Upgrade plan of Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) (2)", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- 9) H. Shimizu et al., "Stable Plan er Type Four-mirror Cavity Development for X-ray Production as Basic Development of Quantum Beam Technology Program", Proceedings of IPAC2011, pp.1470-1472.
- 10) P. Chen et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 355, 107 (1995), CAIN: <http://lcdev.kek.jp/~yokoya/CAIN/>.