

話題

KEK-LUCX におけるレーザーコンプトン散乱小型 X 線源の開発*

坂上 和之^{*1}・Alexander Aryshev^{*2}・荒木 栄^{*2}・浦川 順治^{*2}
 武田 彩希^{*3}・照沼 信浩^{*2}・福田 将史^{*2}・三好 敏喜^{*2}・鷺尾 方一^{*1}

Development of a Compact X-ray Source via Laser Compton Scattering at KEK-LUCX

Kazuyuki SAKAUE^{*1}, Alexander ARYSHEV^{*2}, Sakae ARAKI^{*2}, Junji URAKAWA^{*2}, Ayaki TAKEDA^{*3}
 Nobuhiro TERUNUMA^{*2}, Masafumi FUKUDA^{*2}, Toshinobu MIYOSHI^{*2} and Masakazu WASHIO^{*1}

Abstract

The compact X-ray source based on Laser-Compton scattering (LCS) has been developed at LUCX (Laser Undulator Compact X-ray source) facility in KEK. The multi-bunch high quality electron beam produced by a standing wave 3.6 cell RF Gun and accelerated by the followed S-band normal conducting 12 cells standing wave “booster” linear accelerator is scattered off the laser beam stored in the optical cavity. The 4-mirror planar optical cavity with finesse 335 is used. The MCP (Micro-Channel Plate) detector as well as SOI (Silicon-On-Insulator) pixel sensor was used for scattered X-ray detection. The SOI pixel sensor has been used for LCS X-ray detection for the first time and has demonstrated high spatial resolution and high SN ratio X-ray detection that in turn lead to clearest X-ray images achieved by LCS X-ray. We have also achieved generation of 6.38×10^6 ph./sec., which is more than 30 times larger LCS X-ray flux in comparison with our previous results. The complete details of LUCX LCS X-ray source, specifications of both electron and laser beams, and the results of LCS X-ray generation experiments are reported in this paper.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と早稲田大学では KEK 先端加速器試験棟内にある小型電子加速器 (LUCX: Laser Undulator Compact X-ray source) において、電子ビームとレーザー光のレーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering: LCS) を利用した小型 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 小型 X 線源の開発を担当している。また本開発計画においては超伝導加速器試験施設 (STF: Superconducting rf Test Facility) における超伝導線形加速器を用いた LCS による

X 線生成実験¹⁾ も現在行っている。量子ビーム基盤技術開発計画における LCS 小型 X 線源の大きな特徴は、衝突用レーザー光として光共振器を用いていることが挙げられる。本 X 線源では、電子バンチの繰り返しに同期したレーザー光を光共振器内に蓄積することによってレーザー光を増強し、共振器内で電子ビームとレーザー光を衝突させることで非常に高効率に、かつ安定に X 線を生成することが可能である。

LUCX ではこれまでに光共振器とマルチバンチ電子ビームを用いたパルストレイン構造の X 線の生成¹⁾ やその LCS X 線を用いたイメージング試験²⁾ などに成功している。そして、これらの成果の蓄積から目標を設定し、加速器・レーザー

* 「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

*1 早稲田大学 理工学術院 Faculty of Science and Engineering, Waseda University
 (E-mail: kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp)

*2 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

*3 総合研究大学院大学 SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

両方のアップグレードを計画³⁾した。計画では S-band の常伝導線形加速器とレーザー蓄積共振器を用いて、1 パルスで X 線イメージを取得できることを目標とした。加速器については、1.6 Cell RF 電子銃を 3.6 Cell RF 電子銃に置き換え、加速管は 3 m の進行波管から 12 Cell の定在波管に置き換えた。レーザー蓄積共振器は、従来の 420mm 長の 2 枚ミラー共振器から約 8 m の 4 枚ミラー共振器へ改善した。アップグレード後の LUCX 加速器の概念図(図 1)を以下に示す。

これまでの試験によって加速器・レーザーともに目標値までは達していないものの、一定の成果を得ることができた。加速器としては、3.6 Cell RF 電子銃と 12 Cell 定在波管によってこれまでよりも省スペースで 23 MeV のマルチバンチ電子ビームを得ることに成功している。これまでの 100 bunch/train から 150 bunch/train までマクロバンチを伸ばすことができたとともに、バンチあたりの電荷量も 2 倍以上向上している。また、加速をすべて RF フィルタリングタイムがほぼ同じ定在波空洞によって行うことで、ビームローディング補正が非常に容易になり、マルチバンチ内のバンチ毎のエネルギー差を 0.06% 内に補正することができた。レーザーについては、約 8 m 長の 4 枚ミラー光共振器を導入し、十分な蓄積強度を実現しつつ安定に動作することを確認している。常伝導加速器からのビームに特化させるため

に我々の光共振器ではバーストモード⁴⁾という手法を用いている。この手法では電子ビームのタイミングに合わせ増幅した光を共振器に入射することによって、電子ビームのタイミングのみ強い光の蓄積が実現される。この手法の問題点として、蓄積強度が不安定であることが挙げられていたが、周回型の 4 枚ミラー共振器を用いることで改善された。X 線の検出器に関しても新たな検出器を用いることができた。量子ビーム基盤技術開発計画内で KEK が開発している SOI (Silicon-On-Insulator) 検出器^{5,6)}によって初めて LCS X 線を計測し、X 線像の取得に成功している。本稿では、第 2 章にて線形加速器システム、第 3 章にて LCS 衝突用レーザー蓄積装置に関して述べ、第 4 章にて LCS X 線生成試験の結果を報告する。

2. LUCX 加速器システム

本章では LUCX の加速器システムに関して説明する。特にアップグレード後のビームパラメータに関して詳細に解説する。この時のビームパラメータは、LCS X 線生成試験用オプティクスでの値である。

2.1 ビームラインの構成

前述のとおり、LUCX は 2856 MHz の S-band 常伝導線形加速器である。ビームラインは主に 3.6 Cell RF 電子銃及び 12 Cell 定在波管によって構成されており、LCS X 線生成試験用の 4 枚ミラー

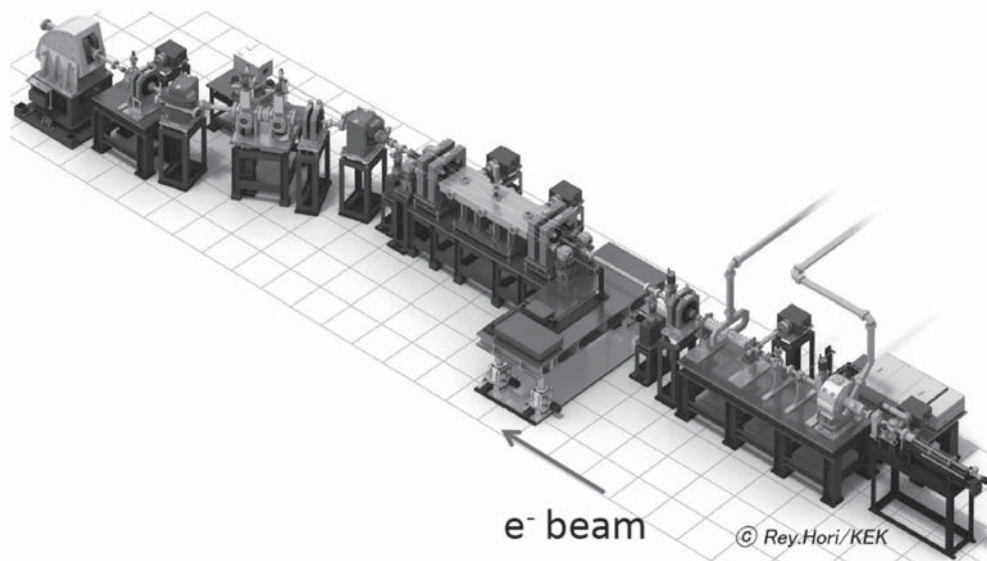


図 1 アップグレード後の LUCX 加速器

共振器が 12 Cell 定在波管の下流に置かれている。図 2 に LUCX 加速器の写真、図 3 にビームラインレイアウトを示す。図 2 の手前から 3.6 Cell RF 電子銃、奥に 12 Cell 定在波管が見える。12 Cell 定在波管は加速電界の対称性を改善するためにダブルフィールドを採用しており、左右の両方から RF を印可している様子がわかる。

電子ビームは 3.6 Cell RF 電子銃によって生成される。Cs-Te 光カソードに 266 nm の UV レーザー光を照射することによって電子を発生させ、3.6 Cell の空洞で約 8.5 MeV まで加速される。生成した電子ビームは 12 Cell 定在波管によって 23 MeV まで加速され、レーザー蓄積共振器チャンバーと合体した形で置かれた四極電磁石によって衝突点に集束される。衝突後の電子ビームは四極電磁石によって平行ビームに戻され、偏向電磁石によって X 線と分けられる。LCS によって生成された X 線は、Be 窓を通して大気中に取り出される。偏向電磁石下流にはエネルギーモニターや CT (Current Transformer)、ビームロスモニターなどが設置されており、電子ビームの状態を常にモニターしている。その後、偏向電磁石を 2 度通

り、床方向に設置されたビームダンプへ導かれる。

LUCX で生成される電子ビームはマルチバンチ構造となっており、357 MHz (2.8 ns 間隔) の繰り返し周波数で電子バンチが生成され、マクロパルスあたり 150 バンチを加速している。電子ビーム診断系としては前述のエネルギーモニターとともに CT が 3 台、スクリーンモニターが 5 台、BPM (Beam Position Monitor) が 10 台設置されている。150 バンチのマルチバンチビームはビームローディングによってエネルギー差が生じるが、バンチを加速する RF のタイミングを調整することによって補正⁷⁾している。このためにエネルギーモニターとして偏向電磁石と BPM のセットも用意しており、バンチ毎のエネルギー差が常時モニターできるようになっている。ビームプロファイルモニターとしては特に LCS X 線生成試験用に衝突点には OTR (Optical Transition Radiation) 用のターゲット、蛍光スクリーンが挿入できるようになっており、OTR 光によって電子ビームの集束サイズを、蛍光スクリーンによってレーザー光との位置をそれぞれ測定できるようになっている。

LUCX 加速器の特筆すべき特徴は、レーザー発振器を信号基準として用いている点である。次章に詳細は述べるが、光蓄積共振器は共振を維持するために非常に精度の高い制御が必要となる。そこにさらに基準 RF 信号との同期を要求すると非常に動作が不安定になる。また、本システムで使用するレーザー発振器は非常に安定な構造を有しているため、発振されるレーザー光も非常に安定になる。このような背景からレーザー発振器を RF 基準信号として用い、加速器や光電子生成用レーザーがこれに合わせるシステムを構築した。システムの詳細に関しては参考文献³⁾を参照されたい。

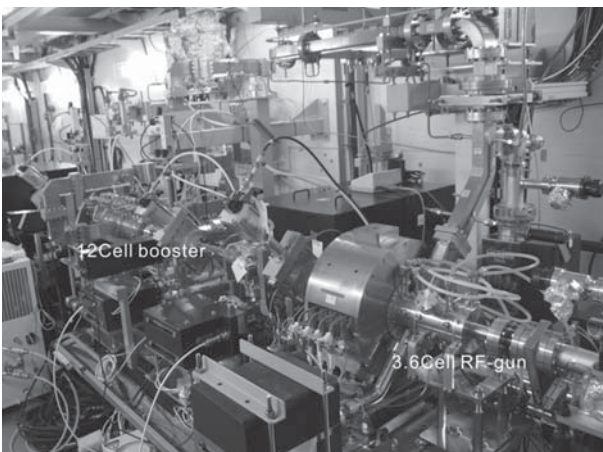


図 2 KEK 小型電子加速器 (LUCX) の写真

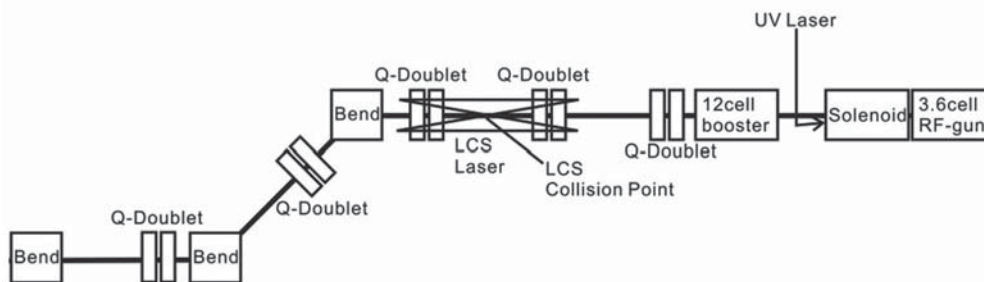


図 3 LUCX 加速器のビームラインレイアウト

2.2 3.6 Cell RF 電子銃によって生成される電子ビーム

ビームラインの構成上 3.6 Cell RF 電子銃単体でのビーム診断は困難であるため、生成した電子ビームのエネルギーのみを示す。さらに 12 Cell 定在波管によって加速した後のビームパラメータに関しては次節に述べる。

3.6 Cell RF 電子銃とはカソードを含むハーフセルと呼ばれる構造に加速高周波の半波長の長さを持ったフルセルを 3 個付属した形の定在波空洞である。これまで RF 電子銃ではフルセルが 1 個の 1.6 Cell 構造⁸⁾が主流であったが、より高いエネルギーのビームを生成することを目的として開発を行った⁹⁾。1.6 Cell 型では最大 5.5 MeV 程度の電子ビーム生成が確認されているが¹⁰⁾、3.6 Cell 型では 10 MeV 以上の電子ビームも期待できる。3.6 Cell RF 電子銃によって生成した電子ビームのエネルギー測定結果を以下の図 4 に示す。

図を見てわかる通り、3.6 Cell RF 電子銃単体によって最大 9.6 MeV の電子ビームを得ることに成功している。その際のダークカレントも 236 pC/pulse と非常に小さいことがわかる。LCS X 線生成試験においては長時間運転のために加速電場を少し下げて 8.5 MeV のエネルギーにて運転している。

2.3 LCS X 線生成試験における電子ビームパラメータ

前述のように 3.6 Cell RF 電子銃で加速された電子ビームはその後 12 Cell 定在波管によって 23 MeV まで加速される。12 Cell 定在波管は従来の

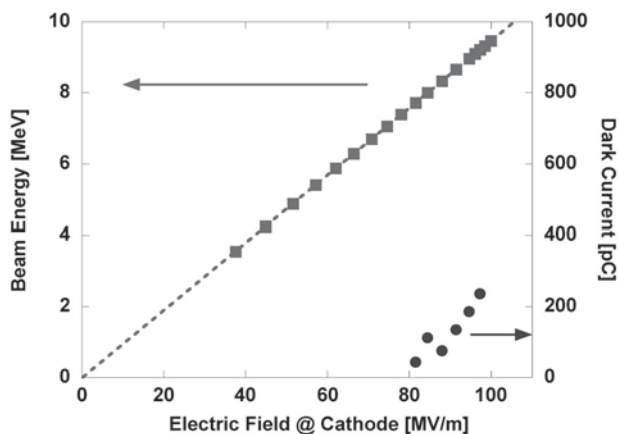


図 4 3.6 Cell RF 電子銃によって生成した電子ビームのエネルギー測定結果

3m 進行波管に対して 79 cm と非常に小型になっている。初めに LCS X 線生成試験時のビームパラメータに関してまとめた表 (表 1) を示す。

バンチ電荷は CT (Current Transformer), ビームサイズは OTR モニター, エミッタンスは Q スキャン法によってそれぞれ計測している。エネルギーに関してはバンチ内のエネルギー広がり (Energy spread) とマルチバンチ内のバンチ毎のエネルギー差 (Energy difference) とを分けて表記している。衝突点ビームサイズやバンチ数などは設計パラメータに到達していないが, LCS X 線生成試験を行うには十分な性能が得られている。また, 以前と比較してもバンチ電荷量やバンチ数, エネルギー差が改善されている。図 5 に, CT によって取得した 150 バンチのマルチバンチビームの電荷分布を示す。

図を見てもわかるとおり, 電荷量には多少の分布があるが, 綺麗な 150 バンチトレインが生成されていることがわかる。さらに図 6 にマルチバ

表 1 LCS 実験時の電子ビームパラメータ

Energy	23 MeV
Bunch charge	0.9 nC
Number of bunches	150
Beam size at the collision point (1σ)	85 μm (H) 95 μm (V)
Bunch length (FWHM)	15 ps
Bunch spacing	2.8 ns
Energy spread	0.12%
Energy difference	0.06% (rms)
Normalized rms Emittance	10 π mmmrad (H) 7 π mmmrad (V)

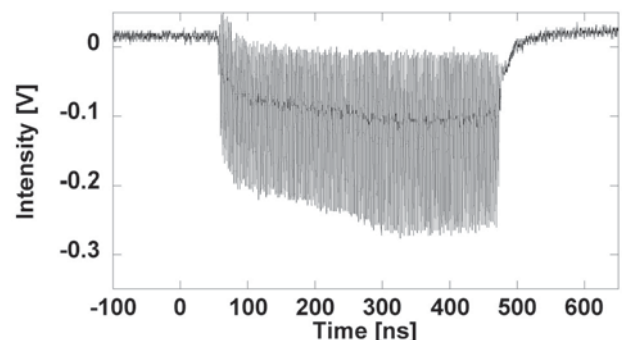


図 5 150 バンチビーム生成時の CT 波形 (12 Cell 定在波管下流)

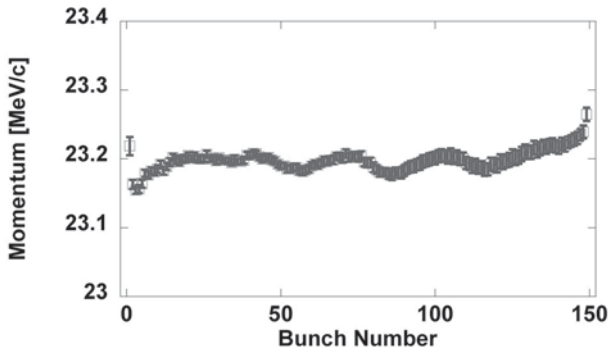


図6 マルチバンチビーム (150 バンチ) エネルギー差計測結果

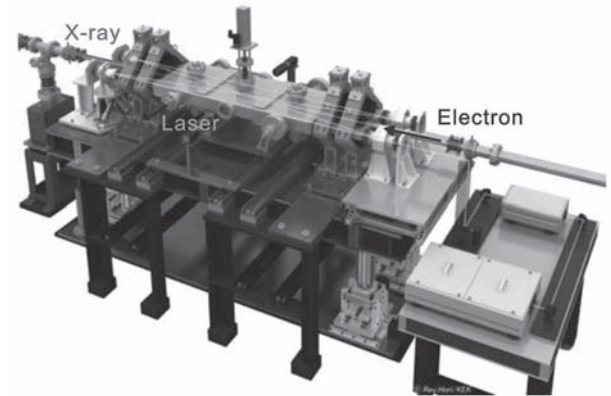


図7 4枚ミラー平面光蓄積共振器

ンチ内のエネルギー差の測定結果を示す。150 バンチに渡り非常にエネルギーの揃ったビームが生成されていることがわかる。これは電子銃・加速管の両方を RF フィルタリングがほぼ同じ定在波管とし、独立の RF 源 (クライストロン) によって RF を供給していることで達成されている。

3. レーザー蓄積共振器

電子加速器システム同様にレーザー蓄積共振器もアップグレードを行った。これまでレーザーパルスの蓄積強度を制限していたのはレーザーパルスによるミラー破壊であった。パルスレーザーによるミラー破壊の閾値は概ね 10 GW/cm^2 程度である。このような制限の下、蓄積強度を大きくするためにミラー上におけるレーザーサイズを大きくすることを目標に新しい光蓄積共振器を設計した。ミラー上のサイズを広げるために非常に長い共振器を構成した。しかしながらこれまで用いていた凹面鏡2枚構成の光共振器ではミラーの設置精度に対する要求が非常に厳しく、共振器長を長くすることが困難であった。そこで、凹面鏡2枚と平面鏡2枚の4枚のミラーによって構成されるレーザー蓄積装置を設計・製作した。本章ではその4枚ミラー平面光蓄積共振器に関して説明する。

3.1 4枚ミラー平面光蓄積共振器成

前述の通り、ミラー上のレーザースポットサイズを大きくし、共振器内の蓄積強度を向上させるために4枚のミラーで構成された光蓄積共振器を設計した。光共振器の構成は以下の図7に示す通りである。

共振器の周長は 7.56 m であり、電子ビームの周期と同期した 357 MHz のモードロックレー

ザーパルスが9個蓄積される構成になっている。平面鏡から入射されたレーザー光は向かい側の凹面鏡によって衝突点に集光され、電子ビームと衝突する。電子ビームを集束する四極電磁石は光共振器真空容器と一体構成となっており、電子ビームも良く集束でき、光共振器の長さも大きく取れ、かつ衝突角度が 7.5 度と非常に浅い角度になるように設計している。4枚のミラーはそれぞれ真空容器とはベローズで接続されており、角度や位置を調整できるようになっている。また、4枚のミラーと4つの四極電磁石は別の架台に載っており、4枚の共振器ミラーは独立に位置を調整できるようになっている。これによってレーザーと電子ビームの衝突位置は調整できる。

4枚の共振器用ミラーには昭和オプトロニクス社製¹¹⁾の非常にロスの少ない2インチ径のミラーを用いている。また、ミラーにおける反射角は 3.75 度となるが、この角度で最も良い性能が出るように反射膜コーティングも最適化されている。凹面鏡の曲率半径は 1890 mm としており、最終的には凹面鏡間の距離を調整することで衝突点でのレーザー光の集光を実現する。平面に4枚のミラーを構成し、反射角が存在している状態で凹面鏡を用いているため、現在の光共振器では非点収差が生じる。設計値としては Sagittal (Vertical) 方向には $25 \mu\text{m}$ まで集光できる一方 Tangential (Horizontal) 方向には $54 \mu\text{m}$ までしか集光できない。これに関しては STF において収差を補正した光蓄積共振器の開発が行われており¹²⁾、現在評価が行われている。実際に製作した光共振器の写真を図8に示す。

3.2 逆周回光路の利用によるバースト運転の安定化

LUCX では S-band 常伝導線形加速器からの電子ビームを用いて LCS 実験を行っている。常伝導加速器からのビームはパルスを形成して生成される。LUCX の現状の場合では、2.8 ns 間隔のマイクロパルスが 150 個連なって 420 ns の時間幅のマクロパルスを構成する。一方レーザー蓄積共振器では、通常パルスを常に供給し続け、共鳴が飽和している（共振器内のロスと入射光強度が釣り合っている）状態で使用する。つまり 2.8 ns 間隔で常にレーザーパルスが衝突点を通過している状況であり、このような時間構造にミスマッチのある状態ではレーザー光は有効に使用できていない。そこで我々はバースト運転という手法を開発⁴⁾し、試験を行ってきた。この手法は、**図 9**の構成図を見てもわかるが、共振器に入射するシード光と光蓄積共振器の間にパルス型の増幅器を導入することで、電子ビームが衝突点に到達す

るタイミングのみ非常に強いレーザー光を入射し、共振器内においても強いパルスを蓄積する技術である。これによって十分な強度の LCS X 線パルスを得ることができる。

しかしながらこの手法にも問題点があった。レーザー蓄積共振器はその内部において波長 $1 \mu\text{m}$ のレーザー光の位相を一致させて重ね合わせるため、非常に精度の高いナノメートル以下の精度での共振器制御が求められる。このような制御を実現するために piezo 素子を用いた位置制御を行っているが、バースト運転時にはレーザー光強度が一定でなく、非常に強くなる (200 倍以上) ために制御を継続することが困難であった。つまり、制御対象となる共振器の共鳴情報を共振器からの反射光のレーザー強度・位相から得ており、バースト時には入射光強度が変動するために正確な情報が得られなかった。これまではバースト時には制御を一時的に停止することによって対応してきたが、レーザー蓄積強度が非常に大きく変動し、ほぼ 100% の幅で揺れてしまっていた。そこで今回 4 枚ミラー平面光共振器となったことで考案した手法が“逆周回を利用したバースト運転”である。その概念図を以下の**図 9**に示す。

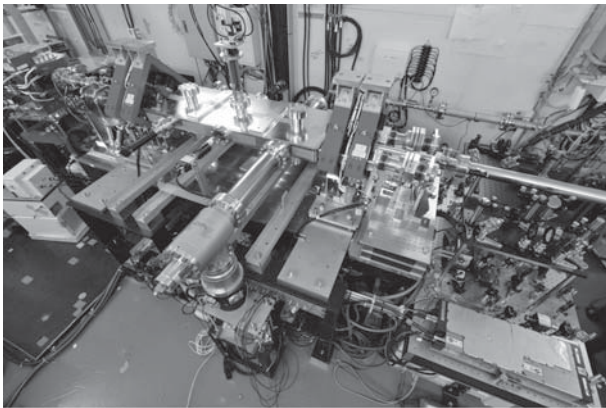


図 8 製作した 4 枚ミラー光蓄積共振器

図中の実線は通常のバースト運転の光路を示している。これは同様に LCS を行うレーザーパルスの光路であり、共振器内では衝突点で絞られることがわかる。シードとなるモードロックレーザー光はバースト増幅器を通してパル的に増幅され、共振器に入射されている。逆周回光路は点線にて示している。バースト増幅器前に分けられたレーザー光は EOM (Electro-Optic Modulator)

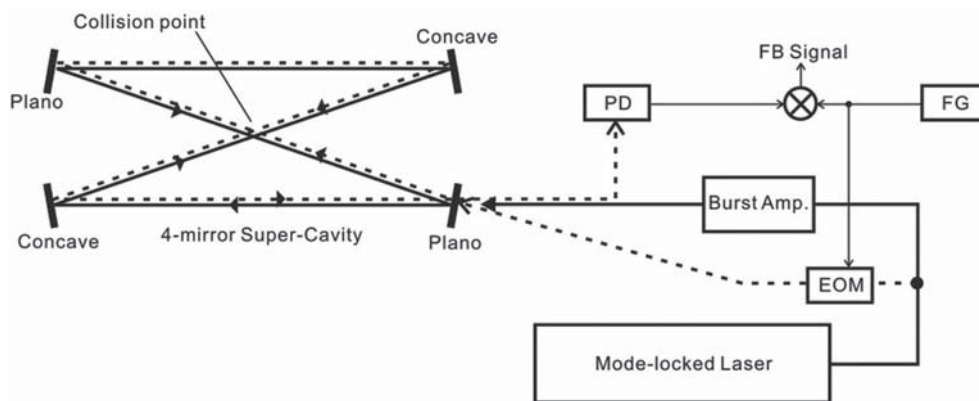


図 9 逆周回を用いたバースト運転の概念図

で変調をかけられた後、光共振器に逆向きの周回をするように入射される。4枚のミラーで構成される周回型の共振器であるため、このような逆向き周回も可能となった。共振器内のレーザー光のモードは周回の向きにかかわらず共振器ミラーの位置によって決められるモードしか共鳴できない。したがって使用する基本モードであるTEM00モードは順周回・逆周回に関わらず同じ共振器長の条件において共鳴条件を満たす。つまりバースト増幅を行っていない逆周回光路によって制御信号を作り出すことでこれまでの問題点を解決し、安定なバースト運転が可能となった。共振器の制御信号はPDH (Pound-Drever-Hall) 手法¹³⁾という広く使われている手法を用いている。これはEOMで変調をかけた光を共振器に入射し、反射された光(共振器に蓄積されずに反射した光と共振器から漏れ出した光の重ね合わせ)を変調波でDe-modulationすることによって共鳴点で正負が切り替わる信号を取り出すことができる。その様子を図10に示す。一番上の波形から共鳴制御用の信号、逆周回の共鳴の様子、順周回の共鳴の様子となっている。順周回と逆周回の共鳴ピークが全く同じ位置、全く同じ形で観測できることがわかるとともにピークの頂点において正負が反転する制御信号が生成できていることも見て取れる。このような新しい手法を用いた制御を行った結果、蓄積強度の安定度は格段に向上した。従来ほぼ100%揺れていた強度は15% rmsまで改善され、非常に効率よくLCS実験を行うことが可能となった。

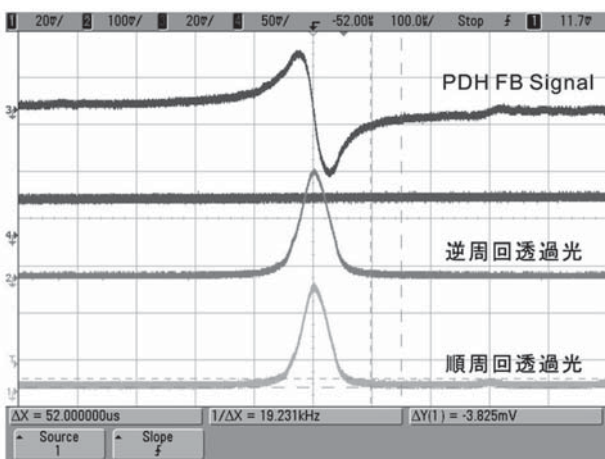


図10 逆周回の制御信号と共鳴点の波形

3.3 LCS X線生成実験時におけるレーザーパラメータ

3.2で述べたレーザー蓄積共振器によって電子ビームとの衝突点に集光されるレーザー光のパラメータを以下の表に示す。

電子ビーム同様にレーザー光についてもまだ設計値には到達していないが、LCS実験を行うためには十分な性能が確認できている。Finesseは共鳴の幅を計測することにより算出し、蓄積強度に関しては入射ミラー正面の凹面ミラーの透過光の強度と透過率から算出した値である。現時点では安定に動作させるために共振器のQ値であるFinesseを小さくしているため、蓄積強度が0.3 mJ/pulseと小さい値になっている。この値はまだミラーの破壊閾値と比べて小さい値であるので、今後Finesse等を改善することで5 mJ/pulse程度まで蓄積強度を改善できる予定である。

4. レーザーコンプトン散乱試験

表1・2に示した電子ビーム・レーザー光が得られたため、LCS X線生成試験を開始した。電子ビーム・レーザー光ともに目標値には届いていないが、加速器とレーザーシステムともにアップグレードによって性能の十分な改善がみられた。今回のLCS X線生成試験ではこれまで同様のMCP (Micro-Channel Plate) を用いた検出器の他にSOIピクセルセンサを用いた初めてのLCS X線検出試験も行った。まず検出器のセットアップを以下の図11に示す。

前述の通り、LCS X線はBe窓を通過して大気中に取り出される。取り出されたX線はφ20 mmの鉛コリメータによって切り出され、検出器に入射される。検出器は衝突点から2.7 mの位置に設置されており、SOIピクセルセンサは直動ステージによって出し入れが可能となっている。また、

表2 LCS実験時の衝突点におけるレーザーパラメータ

Energy	1.17 eV (1064 nm)
Repetition	357 MHz (2.8 ns)
Intensity	0.3 mJ/pulse
Waist size (1σ)	89 μm × 85 μm
Pulse length	7 ps
Finesse	335.43

SOI センサを退避させた場合には MCP によって検出が可能なセットアップとなっている。SOI ピクセルセンサのアパーチャーは縦 14.1 mm × 横 8.7 mm の四角形, MCP は $\phi 30$ mm のアパーチャーを持っている。検出器は電子ビーム起因のバックグラウンドを極力減らすために鉛のシールドで覆っている。

4.1 予想される LCS X 線の特性

初めに表 1・2 のパラメータから想定される LCS X 線の特性に関して示す。衝突角度は 7.5 度である。計算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)¹⁴⁾ を用いて行った。LCS X 線の総量はもちろん、検出器に入る X 線強度についても同様に計算した。その結果を表 3 に示す。

X 線の総量に関しては 1 秒あたり (パルス繰り返し 12.5 Hz) の Flux とし、また SOI ピクセルセンサで検出される X 線の Flux としては後の議論を簡単にするためにマクロパルスあたりの値を示している。また、9 keV の X 線は空気による散乱が無視できない。Be 窓から検出器までは 500 mm 距離があり、1 気圧 300 K においてその透過率は 0.7 程度である。表中の SOI で検出される X 線数としてはこの透過率を乗じた値であることを注意しておく。

想定される X 線強度としては、目標値よりも 2 桁程度小さい値であるが、以前の 2×10^5 ph./sec/total band に対して 40 倍以上の向上が見込まれることが分かる。これ以上の X 線強度を得るためには、より長い RF パルスを加速空洞に印加するための RF エージングが必要であるととも

に、レーザー側はミラーの構成を変える必要があり、時間的な制約もあることから試験実験を開始することにした。

4.2 MCP による LCS X 線の計測

最初に MCP による試験結果に関して述べる。MCP はこれまでの我々の試験経験から最も電子ビームバックグラウンドとの切り分けが可能であった検出器であり、実験はじめの X 線検出には最も向いている。MCP にて取得した衝突タイミングと信号強度の関係を図 12 に、衝突レーザー強度と MCP によって検出した LCS X 線信号の関係を図 13 に示す。

図 12 の縦軸は電子ビームバックグラウンドを差し引いた X 線強度のみを示しており、横軸は電子ビームとレーザー光の位相関係を 357 MHz で表したものである。電子ビームとレーザー光が衝突するようにタイミングを 357 MHz の位相シフターで調整しているためにこの表記になっている。半値全幅として約 4 度、時間にして約 30 ps の間のみ LCS の衝突が実現しており、X 線信号が確認できる。これは 7.5 度の衝突角度を持って衝突しているため、パルス幅のみならず水平方向のサイズにもよる時間幅である。

表 3 想定される LCS X 線の特性

Maximum Energy	9 keV
Bandwidth in Pb collimator	8%
Photon flux (total band)	8.2×10^6 ph./sec
Photon flux @ SOI sensor	7015 ph./train

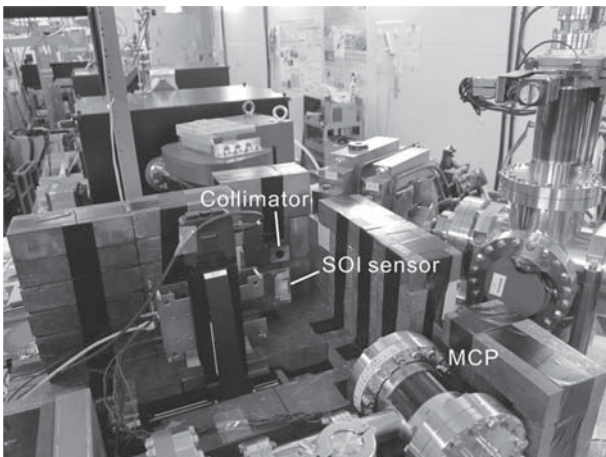


図 11 X 線検出ラインと検出器のセットアップ

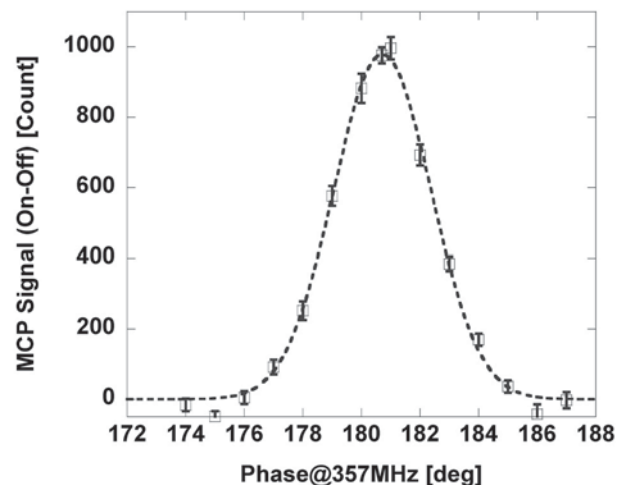


図 12 衝突タイミングと X 線強度の関係

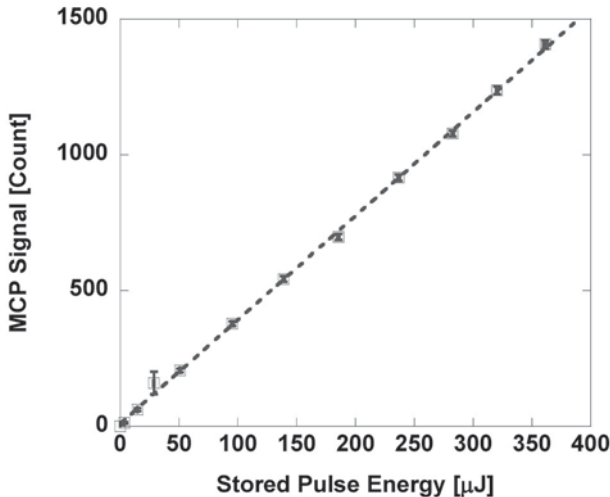


図 13 衝突レーザー強度と X 線強度の関係

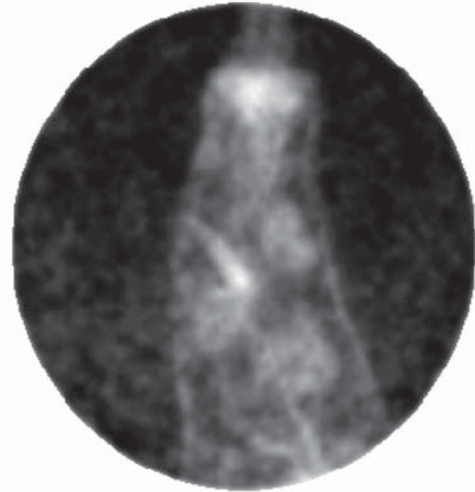


図 14 蛍光面 MCP による唐辛子の X 線像

次にレーザー強度との関係（図 13）を見ると、綺麗に比例関係にあることがわかる。LCS では X 線強度はレーザー光強度に比例するため、確実に LCS によって生成された X 線を検出しているという証拠となる。MCP による計測では、9 keV の X 線に対して MCP の校正を行っていなかったため、X 線強度を算出することはできなかった。今後校正を行い、算出できるようにする必要がある。

LCS X 線生成試験では図 12 に示したタイミングの最適位置を決めるとともに、位置関係についても最適位置を決める必要がある。そこで水平垂直方向の位置を変えて同様の測定も行い、最適な衝突を実現している。また、垂直方向に関してはレーザーと電子ビームサイズの畳み込みに相当する分布幅を測定できるので、これにより衝突点において両者が絞れていることを確認することができる。その結果は表 1・2 に矛盾するものではなかった。

次に蛍光面のついた MCP によって X 線像を取得した結果に関して示す。図 14 は蛍光面 MCP において取得した唐辛子の X 線像であり、解像度は悪いものの、唐辛子の外形や中の種、唐辛子が乾燥して縮んでいる部分などが見て取れる。

4.3 SOI ピクセルセンサを用いた LCS X 線の計測

次に SOI ピクセルセンサによって LCS X 線の検出を試験した結果について述べる。SOI ピクセルセンサ^{5,6)}とは SOI 技術（2つのシリコンウェハを絶縁膜を介して張り合わせる技術）を用いたピクセル検出器であり、KEK 測定器開発室を中

心に開発が進められている新しいイメージセンサである。接合した片側のシリコンに pn 接合を形成しセンサとし、もう一方のシリコン上に読み出し回路を形成することによって、回路とセンサが一体となったモノリシック半導体センサが構成できる。このような構成のセンサによって SN 比が向上するとともに空間分解能も非常に高くなる。今回はピクセルサイズ $17\mu\text{m} \times 17\mu\text{m}$ 、ピクセル数 832×512 (43 万画素) の SOI ピクセルセンサを用いた。SOI ピクセルセンサの有効検出部厚は $200\mu\text{m}$ であり、9 keV の X 線に対する検出効率率は 87% である。

SOI ピクセルセンサでは LCS X 線の検出に際し可視的に非常に有効な情報が得られる。9 keV の LCS X 線の場合、光子が入射したほぼ 1 ピクセルのみから信号が得られるが、電子ビーム起因の MeV オーダーのバックグラウンドではセンサ内でシャワーが発生するために近隣の数ピクセルに渡って線状に信号が検出される。これらを解析によって区別することで、非常に高い SN 比での検出が可能である。今回の LCS X 線試験においては MCP ではほぼ 1 : 1 の SN 比だったのに対して、SOI ピクセルセンサでは SN 比 10 : 1 での検出が達成できた。

また、SOI ピクセルセンサでは、9 keV 付近の X 線にあたる信号の個数を数えることによって LCS X 線強度を算出することが可能である。検出された X 線強度は 4750 ph./train であり、検出効率の 87% を考慮すると 5460 ph./train が

SOI ピクセルセンサに照射されていたことがわかる。表 4 に CAIN による計算値との比較を示す。

表 4 を見てわかるとおり、実測された X 線強度は計算の 8 割程度の強度となっていることがわかる。計算と実測の不一致の原因は、計算にレーザーと電子ビームの間の僅かな位置やタイミングのずれ及びジッターを考慮していないためと考えられ、両者の値は概ね一致していると結論付けることができる。X 線強度としても 1 秒あたり 10^7 ph./sec に近い強度が得られていることから、我々の常伝導加速器とレーザー光蓄積共振器とを用いた LCS X 線源が非常に有効であることを示すことができたと考えている。

次に SOI ピクセルセンサを用いた X 線イメージングを行った。その結果を図 15 に示す。図 14 と比較してみれば明らかだが、非常に高い空間分解能でイメージが取得できていることがわかる。

表 4 LCS X 線強度の実測と計算の比較

SOI Sensor Measurement	
X-ray flux on SOI sensor	5460ph./train
X-ray flux total band	6.38×10^6 ph./sec
CAIN Calculation	
X-ray flux on SOI sensor	7015 ph./train
X-ray flux total band	8.2×10^6 ph./sec



図 15 SOI ピクセルセンサによって取得した唐辛子の X 線像

唐辛子の外形はもちろん、内部の種子や胎座なども非常に鮮明に写っており、SOI ピクセルセンサにより LCS X 線を計測できることが明らかにできた。写真には筋状のノイズが見られるが、これは SOI センサの読み出しが区画ごとに分けられているためであり、今後のデバッグによって改善される見込みである。SN 比が非常によいデータを取得できることから、バックグラウンドによる影響を差し引く必要がなく、さらに MCP に比べて検出効率が高いことも相まって、ピクセル数が多いにも関わらず 1 イメージを取得するのに必要な X 線のショット数は 10000 であった。ビームとの同期や読み出し速度など改善できる点はまだ残っているが、今回、SOI センサを使い初めて LCS X 線検出に成功し、高い空間分解能でイメージを取得できることやバックグラウンドの影響を受けにくいなどといった本検出器の利点も明らかにすることができた。

5. まとめと今後の展望

我々の LUCX グループでは S-band 常伝導線形加速器とレーザー蓄積共振器を用いた LCS X 線源の開発を行っている。これまでに加速器の小型化のために 3.6 Cell RF 電子銃と 12 Cell 定在波管の導入を行い、十分な性能のマルチバンチ電子ビームが得られることを確認した。特にバンチ毎のエネルギー差に関しては 0.06% と非常に良く制御された電子ビームを確認している。今後の RF エージングの継続によってさらにロングパルスの運転が可能となることを見込まれ、より高強度な LCS X 線の生成が可能になると考えている。

衝突用のレーザー蓄積共振器として今回初めて 4 枚ミラー構成の平面光共振器を用いた。周長を非常に長くとることによってミラー上のスポットサイズを拡げダメージを避け、より高強度なレーザーパルスの蓄積を見込んだ。また今回は周回型共振器の利点を利用し、逆周回光路を用いた共振器制御によってバースト運転の安定化が達成された。今後、共振器の安定化とともに Finesse を向上させ、より高強度なパルスレーザーの安定蓄積が達成される予定である。それにより、現状の 10 ~ 20 倍程度の蓄積パワーが達成できるものと考えている。また、レーザーの衝突点におけるサイズに関しても共振器の調整によってより小さな

スポットサイズが達成され、衝突ルミノシティを向上させることができると考えている。

最後に LCS X線生成試験を行い、総量として 6.38×10^6 ph./sec の X線を確認した。これまでの 30 倍以上の X線強度を達成しているとともに前述の電子ビーム・レーザー光のより一層の改良によってさらなる増強が期待できる。今回は初めての試みとして SOI ピクセルセンサによる LCS X線検出試験も行った。SOI ピクセルセンサの特徴を生かし、非常に高 SN 比での検出が可能であることを確認するとともに、X線イメージの取得によって高解像度かつ高効率に検出が可能であることも確認した。今後、より解像度の高いセンサによる検出試験やそれぞれのピクセルのゲインの安定化によって X線のエネルギースペクトルの計測も可能になると考えている。

今回、アップグレードの際に掲げた目標値まで幾つかのパラメータが届かなかったものの、非常に良く改善された LCS X線源を構築することができた。今後より時間をかけて電子ビーム・レーザー光の調整・改善をしていくことにより、1 ショットで X線イメージが取得できる X線源が実現可能であることを示すことができたと考えている。更なる LCSX 線源のシステムの改善を行っていくとともに、X線の位相イメージング¹⁵⁾ 等 LCS X線源の利用も含めた研究を推進していく予定である。

参考文献

- 1) K. Sakaue, et al., "Observation of pulsed x-ray trains produced by laser-electron Compton scatterings", *Rev. Sci. Instrum.*, 80 (2009) 123304 1-7.
- 2) K. Sakaue et al., "First refraction contrast imaging via Laser-Compton Scattering X-ray at KEK", *AIP Conf. Proc.* 1466, 272 (2012).
- 3) M. Fukuda et al., "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", *日本加速器学会誌*, Vol.9, No.3, 2012, 156-164.
- 4) 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.
- 5) T. Miyoshi, "SOI 技術を用いた新しいピクセルセンサー開発の最近の進展", *高輝度光子ビーム源開発室ニュース*, Vol.6, 2011, 2-6.
- 6) Y. Arai et al., "Development of SOI pixel process technology", *Nucl. Instrum. Meth.*, A636 (2011) S31-S36.
- 7) S. Liu et al., "Beam loading compensation for acceleration of multi-bunch electron beam train", *Nucl. Instrum. Meth.*, A584 (2008) 1.
- 8) N. Terunuma et al., "Improvement of an S-band RF gun with a Cs2Te photocathode for the KEK-ATF", *Nucl. Instrum. Meth.*, A613 (2010) 1-8.
- 9) 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).
- 10) K. Sakaue et al., "Cs-Te photocathode RF electron gun for applied research at Waseda University", *Nucl. Instrum. Meth.*, B269 (2011) 2928-2931.
- 11) Showa Optronics Co., Ltd. : <http://www.soc-ltd.co.jp/en/>
- 12) H. Shimizu et al., "Stable Planner Type Four-mirror Cavity Development for X-ray Production as Basic Development of Quantum Beam Technology Program", *Proceedings of IPAC2011*, pp1470-1472.
- 13) R. W. P. Drever et al., "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator", *Appl. Phys. B*, 31 (1983) 97.
- 14) P. Chen et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, A355 (1995) 107; CAIN: <http://lcdev.kek.jp/~yokoya/CAIN/>.
- 15) A. Momose et al., "Phase-contrast X-ray computed tomography for observing biological soft tissues", *nature medicine*, 2 (1996) 473-475.