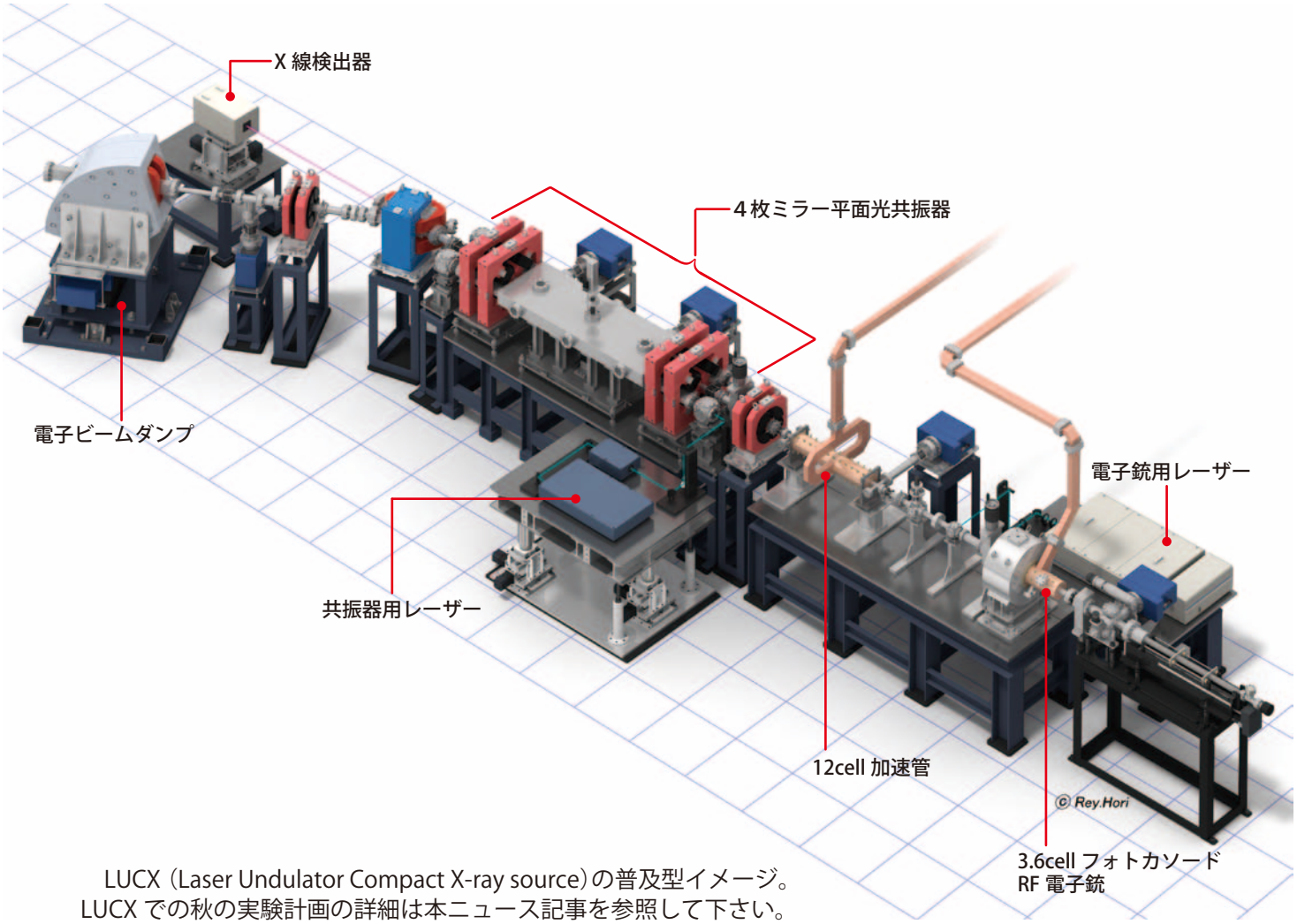
May. 2012

高輝度光子ビーム源開発室ニュース

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

Vol.8



LUCX（Laser Undulator Compact X-ray source）の普及型イメージ。
LUCX での秋の実験計画の詳細は本ニュース記事を参照して下さい。

高輝度光子ビーム源開発室ニュース Vol.8 をお送り致します。ニュース Vol.8 の記事として、高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設、渡邉謙氏らに「L-band フォトカソード高周波電子銃からのビーム取り出し試験」、福田将史氏と早稲田大学理工・学術院・理工学研究所、坂上和之氏に「LUCX における X 線数増強のためのアップグレード計画」の記事をお願いしました。

今年度は本受託事業の最終年度ですので、現在開発しています先端基盤技術を融合した付加価値の高い普及型装置の案作成も重要な課題になっています。今年度の目標は、最先端加速器技術と最先端レーザー技術の融合による安定逆コンプトン散乱高輝度 X 線生成技術の性能確認です。ニュース Vol.9 は開発レーザー装置の性能および実用化と本光子ビーム源を使った利用実験に関する報告を行う予定です。ご期待下さい。

■ L-band フォトカソード高周波電子銃からのビーム取り出し試験

渡邉 謙　早野仁司　松本利広　福田将史　浦川順治　高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設
栗木雅夫　飯島北斗　広島大学　先端物質科学研究科
坂上和之　早稲田大学　理工学術院　理工学研究所
倉本綾佳　Mathieu Omet　総合研究大学院大学　高エネルギー加速器科学研究科

序文

「超伝導加速器による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」プログラムとして KEK-STF（超伝導リニアック試験棟）に建設を進めている量子ビーム実験用ビームラインが 2012 年 2 月末に完成し、ビーム運転が可能な状態となった。ビームライン下流に設置される予定の衝突用レーザー装置は、20% ビームパワーの放射線発生装置検査運転後にインストールされる予定である。

2012 年 2 月 23 日に所内の放射線安全検査をパスし、翌週の 2 月 27 日から試験運転を開始した。同日夜、フォトカソード高周波電子銃（以下、RF 電子銃）からのビーム取り出しに成功した。3 月 7 日の段階で 1ms ビームの取り出し（162450 Bunches, 10 ~ 20 pC/bunch）に成功した。当初はパルス内のバンチ電荷量を一定にできなかったが、調整を続けた結果、3 月 23 日の段階で 1ms 内のバンチ電荷がほぼ一様な flat beam（162450 Bunches, 30 ~ 40 pC/bunch）の取り出しに成功した。

4 月 12 日に L-band 9-cell 超伝導加速空洞 2 台を用いたキャプチャーモジュール前後のゲート弁を開け、電子銃から取り出した電子ビームを 40MeV まで加速した。翌日の 4 月 13 日 15:31 に 28 バンチ、バンチあたりの電荷量 41pC の電子ビームをビームダンプまで輸送することに成功した。

今回、その中の入射部の状況について、RF 電子銃の RF プロセス状況から 3 月末に達成した 1ms マルチバンチビームの取り出しまでの内容を報告する。

詳細なビームパラメータは高輝度光子ビーム源開発室ニュース vol. 7 November 2011 に記載されているので、そちらを参照して頂きたい。

RF 電子銃の RF プロセス・Cs_2Te 成膜と暗電流評価

STF にインストールされている電子銃は L-band 銅製 1.5 セル RF 電子銃である [1]。運転周波数は 1300MHz であり、入射部の構成を図 1 に示す。RF 電子銃上流にフォトカソード蒸着チェンバーがあり、その脇にキセノンランプを光源とした量子効率測定装置が設置されている。カソード蒸着チェンバーと電子銃は真空ベローで接続されており、カソード蒸着後にロードロックシステムで真空中のカソードヘッドは電子銃へと輸送され、電子銃にセットされる。運転の前後に量子効率の測定が可能である。カソードヘッドにはモリブデン（以下、Mo）を使用している。電子銃直下にファラデーカップとアルミナ蛍光板（t=1mm）を用いたプロファイルモ

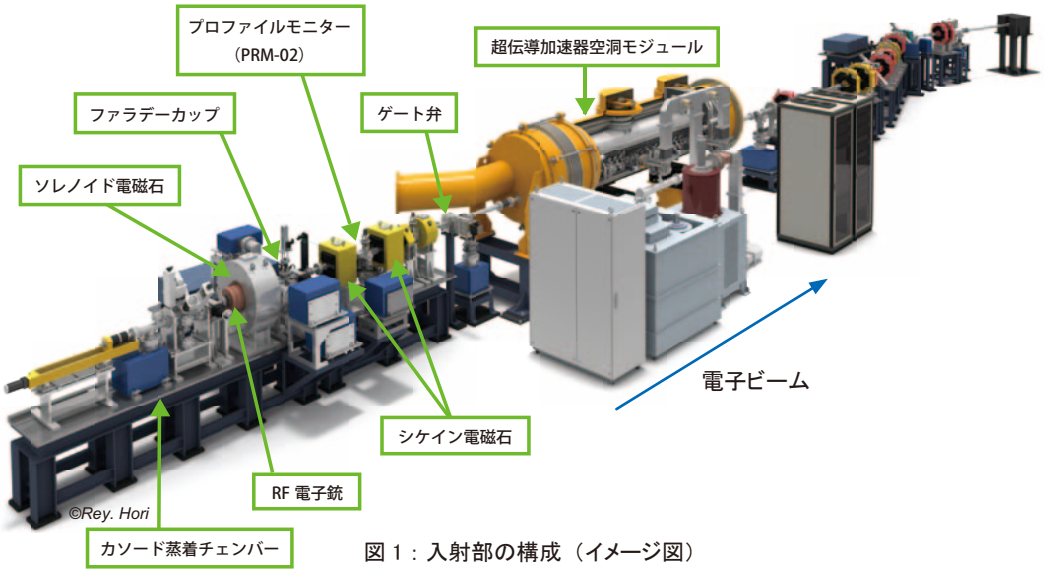


図 1：入射部の構成（イメージ図）

表 1　STF L-band RF 電子銃の暗電流の推移

Date	Max Power	Process 時間	Dark Current	Other
2010 年 4 月～ 6 月	1.7MW 1ms 5Hz	100 hours	269 μA @ 30 MV/m	Dummy Cathode Plug. Mo（膜無し） 1.7 MW: 30.4 MV/m
2011 年 1 月～ 2 月	1.7MW 1ms 5Hz	15 hours	13 μA @ 30 MV/m	Dummy Cathode Plug. Mo（膜無し） エタノール洗浄後
2011 年 9 月～ 10 月	4.0MW 1ms 5Hz	60 hours	194 μA @ 40 MV/m 7 μA@30MV/m	Dummy Cathode Plug. Mo（膜無し）
2012 年 1 月～ 2 月	4.0MW 1ms 5Hz	13 hours	64 μA @ 40 MV/m 2.7 μA@30MV/m	Dummy Cathode Plug. Mo（表面追研磨） 4 MW: 46.7 MV/m
2012 年 3 月 21 日	3.5MW 1ms 5Hz	2.5 hours	76 μA @ 40 MV/m	Ver. 3 Cathode Plug. Mo（表面追研磨） 3 MW: 40.4 MV/m
2012 年 3 月 24 日	3.8MW 800 μs 5Hz	2 hours	130 μA @ 40 MV/m	Ver. 3 Cathode Plug. Mo+Cs_2Te

ニターが設置され、暗電流の測定、ビームプロファイルの測定が可能である。以下の暗電流値は全てこのファラデーカップで測定されたものである。

RF 電子銃の高周波入力運転は 2010 年 4 月から開始され、クライストロン出力の増強、電子銃内のエタノール洗浄、カソードブロック表面の研磨効果などを調べた。2012 年 3 月、Cs_2Te 蒸着、表面電界強度（Epk）40MV/m という条件で、RF 印加時に 130μA 程度の暗電流が発生していた。表 1 に RF プロセスと暗電流測定の履歴をまとめる。2010年4月～6月に行った1回目のプロセスでは、暗電流はカソード表面の電界強度が 30MV/m で 269μA あり、目標ビーム電流である 10mA に対して 2.7% の量であった。その後、銅製加速空洞内の洗浄方法を開発する為、試験片を用いた洗浄試験を行った。結果、エタノールを用いた洗浄方法が簡便かつ少ないリスクで有効であることが分かった。2010 年 12 月に加速空洞本体のエタノール洗浄を実施した。その後に行った 2 回目のプロセスは、短時間の RF プロセスで暗電流は当初の値に比べて 1/20 まで減少した [2]。2011 年 9 月～2012 年 2 月に行ったプロセスでは、クライストロンを最大 5MW の高出力のものに変更し、かつ機械研磨にてカソード表面粗さの改善を行った。結果、Cs_2Te を蒸着していない Mo のみの状態では、30MV/m で 2.7μA の暗電流となり、当初と比較して 1/100 まで減少させることに成功した。また、カソード付近の放電によるトリップレートを下げるために、エッジ部の曲率を大きくしたカソードヘッド(Ver.3. と呼んでいる)を製作した。以下、ビームテストではこの Ver.3 ヘッドを使用している。トリップレートについては現在評価中である。

Cs_2Te 成膜前後の暗電流特性を図 2 に示す。また、超伝導加速空洞モジュールの下に設置されている放射線モニターの値も併記する。暗電流は成膜前後で約 1.4 倍増加した。これは図 3 の写真に

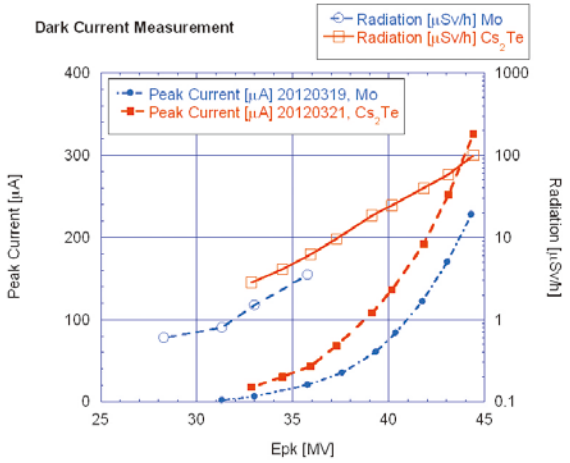


図 2：最近の暗電流の様子（青：Mo のみ、赤：Cs_2Te あり）

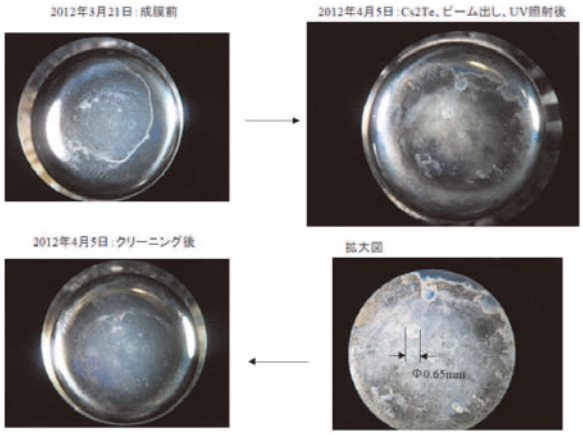


図 3：カソード表面の様子

示すように、Cs がカソード面全体に蒸着されているためと考えている。暗電流をより抑えるために、ビーム生成に必要な中心部のみに光電面を成膜することが必要であり、蒸着領域を制限するマスクを製作中である。ビーム電流から評価した量子効率（Quantum Efficiency; QE）を図 4 に示す。現状、運転中の QE は ~2.5% であり、UV レーザー出力を 25%まで下げた状態で、バンチあたり 450 pC の電子ビームが生成されている。62pC の取り出しにはレーザー出力を 1% まで下げて運転する必要がある。成膜時、蒸着槽で評価している量子効率は Xe ランプ光源を分光した 266nm の UV 光により行っているが、Xe ランプによる測定時の QE の値に対して運転中の QE は 3 倍ほど大きい。Xe ランプ光のパワー較正が課題である。

2012 年 3 月 21 日から 4 月 2 日にかけて運転終了後に Cs_2Te の量子効率を Xe ランプ光源で測定した。その推移を図 5 に示す。運転前後で QE が回復する傾向が見られた。ビーム運転の際、バンチ当たり約 0.4μJ の UV 光を 1ms、5Hz という高いレートでカソードへ照射しており、化学的あるいは熱的効果による QE 回復の可能性を示唆している。蒸着槽および RF 電子銃内の典型的な真空圧力は、5×10^{-7} Pa 以下であり、保管後 QE の低下が見られた。今後継続してビーム生成や保管時における量子効率の変化を測定する。

X 線生成実験では、X 線検出のために暗電流によるバックグラウンドを極力減らす必要性から、充分に暗電流が低く抑制できる 33MV/m（2MW 入力、暗電流 20μA 未満）での運転を考えている。

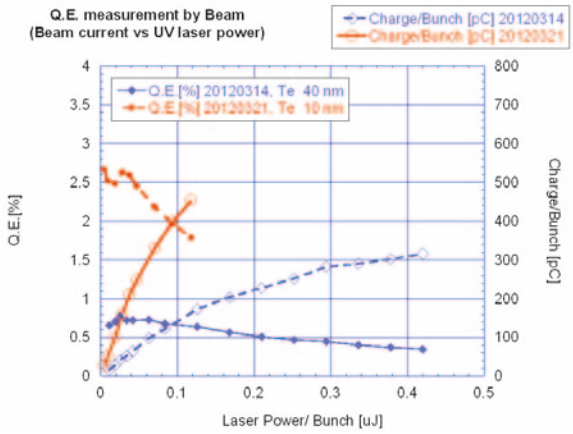


図 4：ビーム電流から評価した量子効率（32 Bunches/Pulse）

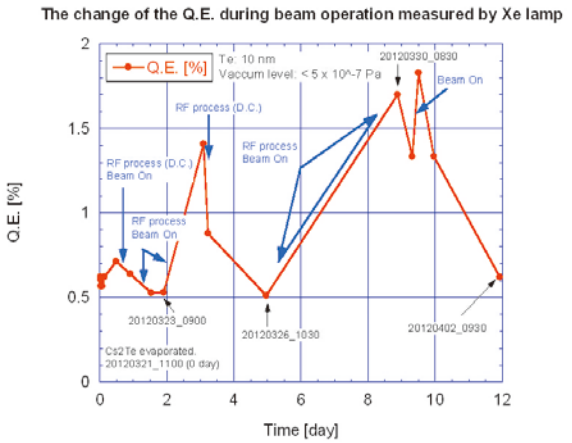


図 5：運転中の量子効率の変化（2012 年 3 月 21 日～ 4 月 2 日）

・電子銃からのビーム取り出し

2012 年 2 月 27 日、RF 電子銃からのビーム取り出し試験を開始し、すぐにビーム信号を捉えた。初ビームの様子を図 6 に示す。ビーム電流は 200pC/bunch で 35 bunches/pulse である。レ

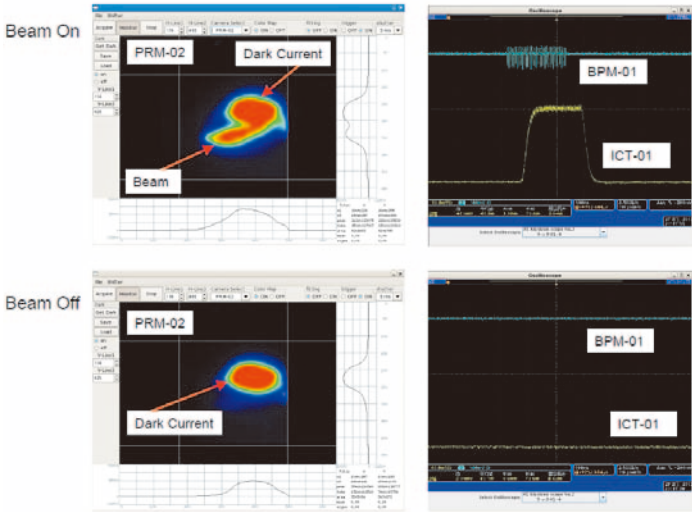


図 6：初ビームの様子（PRM-02、ICT-01、BPM-01 からの信号）

ーザー on、off により電流モニター（ICT-01）、ビーム位置モニター（BPM-01）の信号に明瞭な変化があったことから、ビーム生成が確認された。その後、3 月末にかけて入射部の調整を行い、3 月 7 日の段階で 1ms ビームの取り出し（162450 Bunches, 10 ~ 20 pC）に成功、UV レーザーの調整などを経て 3 月 23 日の段階で 1ms flat beam（162450 Bunches, 30 ~ 40 pC）の取り出しに成功した（図 7）[3]。この段階でパルス内の位相や振幅などを制御する RF のフィードバックが実装された。

次にビーム生成の均一度を確認するため、1ms の UV パルストレインをカソードに当てた状態で、50μs の RF パルスを時間的にスキャンし（Short RF Pulse Scan）、UV レーザーの強度に対するバンチあたりの電荷量を測定した。Short RF Pulse Scan の模式図と UV レーザーの強度分布の例を図 8 に示す。また、RF 電子銃の RF 位相スキャンを行い、180 deg 付近に固定した状態で RF のタイミングをシフトさせて Short RF Pulse Scan を行った。図 9 にそれぞれの測定結果を示す。QE に相

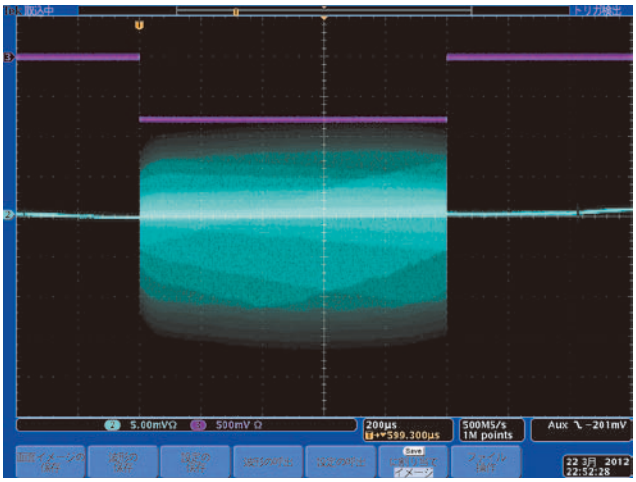


図 7：1ms Flat Beam の様子（30 ～ 40pC/Pulse）、青：BPM の信号、赤：UV レーザーのゲート信号

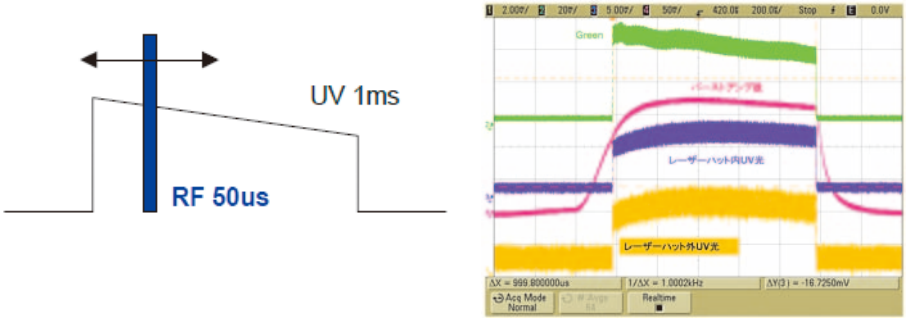


図 8：UV レーザー 1ms、Short RF Pulse（50μs）によるスキャンの模式図と波長変換前後におけるガンレーザーの強度プロファイル

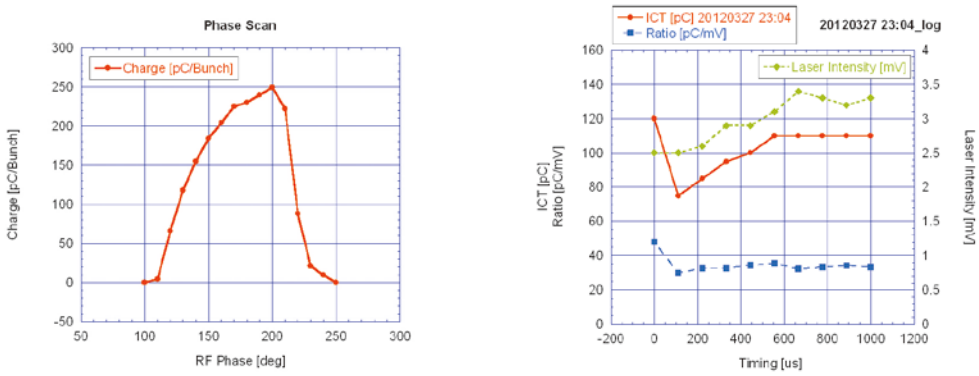


図 9：RF 電子銃の Phase Scan と Short Pulse Scan の測定結果

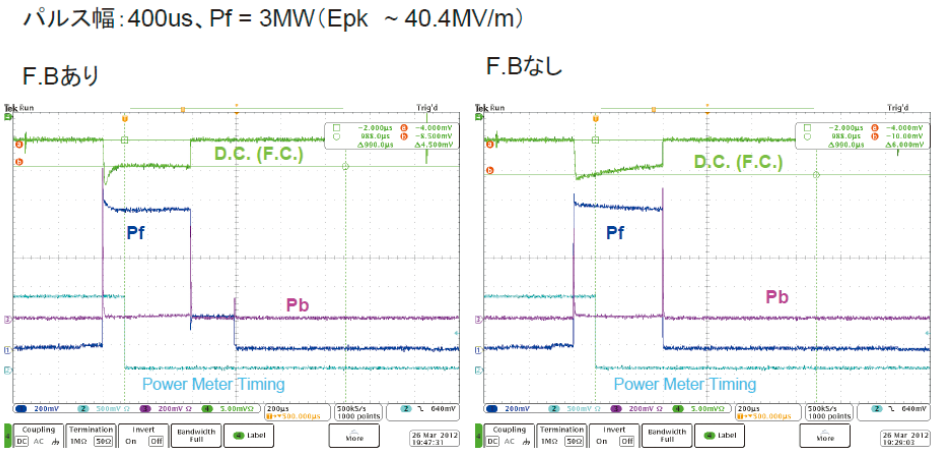


図 10：フィードバック有り無しにおける暗電流の変化（D.C.：暗電流、Pf：入力パワー、Pb：反射パワー）

当する UV レーザーの強度と取り出された電荷量の比を見ると、パルスの先頭を除きほぼ均一になっており、ビーム生成が 1ms という長いパルスに対して、問題なく行われていることを示している。

図 10 は RF 電子銃へ供給する RF のフィードバック有り無しにおける暗電流のプロファイルである。暗電流の強度プロファイルが一定となっており、フィードバックが正常に働いていることわかる。ただし、電界が安定するのは 100μs 以降であるため、1ms ビームを安定に出すためには、1.1ms 以上の RF パルス幅が必要であり、その条件での RF プロセスを行う必要が出てきた。

2012 年 4 月 12 日、L-band 9-cell 超伝導加速空洞 2 台 [4] が納められているキャプチャーモジュールへと接続されたゲート弁を開け、ビームダンプまで 40MeV の電子ビームの輸送を開始した。少ないバンチ数で調整を行い、徐々にバンチ数を増やしていき、6 月に予定されている放射線安全検査に必要な 20% ビームパワー以上の安定運転を目指す。また、高輝度の X-ray 生成に向け、電子ビームのエミッタンスをできる限り小さくする必要がある。そのためには、できる限り高い電界強度で RF 電子銃を運転する必要がある。現在の導波管を含めた RF 電子銃システムで、パルス幅 1ms、2.5MW 付近まで安定に動作することが確認された。今後は投入可能なパワーの上限である、1ms 以上、4MW の投入の実現を目指し更なる試験と改良が必要である。加えて、現在、RF 電子銃トリップ時におけるリカバリーの時間を短縮するために、チラーの改造も行っている。改造案はすでに固まっており、5 月中旬に改造を行う予定である。

参考文献

[1] H. Sugiyama et al.,"L-band Photocathode RF gun at KEK-STF", 2011 J.Phys: Conf.Ser.298 012015
[2] M. Kuriki et al., "RF Processing of L-band RF gun For KEK-STF", MOPC014, IPAC2011.
[3] http://lcdev.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/
[4] http://accl.kek.jp/topics/topics101209.html

■ LUCX における X 線数増強のためのアップグレード計画

福田 将史　高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設
坂上 和之　早稲田大学　理工学術院　理工学研究所

序文

LUCX（Laser Undulator Compact X-ray source）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。これは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である。

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線生成実験のための技術開発を担当している。この加速器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[1]。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、この時間を短縮することである。今回の撮影では合計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る。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、今回の目標である。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。

このために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いる。このようにLUCXでは、常電導加速器でのX線イメージングのためのX線源の開発を最終年度に予定している。本稿では、そのためのアップグレード計画について報告する。

新ビームライン

新ビームラインへの改修はX線数を増強する為および加速器を小型化するために行う。X線増強のため、新しいレーザー共振器を導入することで、15倍にレーザーパルスエネルギーを上げる。また電子ビームはバンチ数を10倍の1000バンチにすることを目指す。さらにシケイン取り外しによりエミッタンスの向上を図る。そして加速器の小型化のため、3.6cell RF電子銃および12cellブースターへの交換およびシケインの取り外しにより加速器部分のサイズを現在の5.7mから2.5mまでと約半分に小型化する。これで30MeVまでビーム加速することを目指す。

新しいビームラインの加速部分は3.6cellフォトカソードRF電子銃、12cellブースターで構成さ

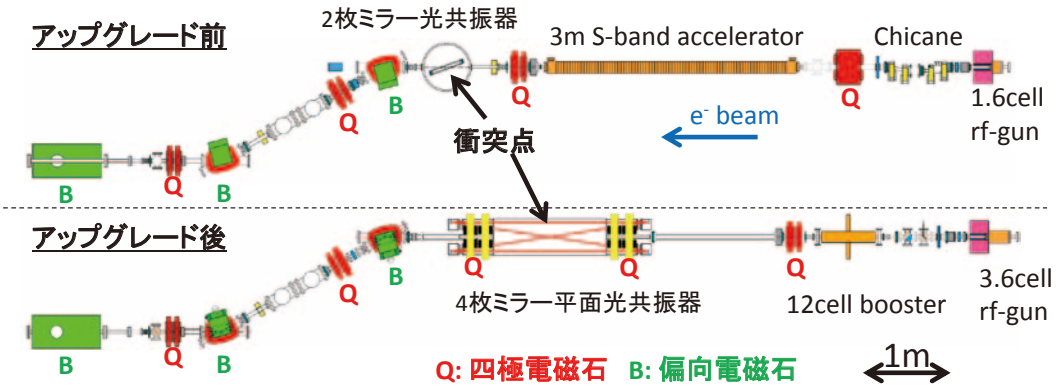


図1：アップグレード前後のビームライン

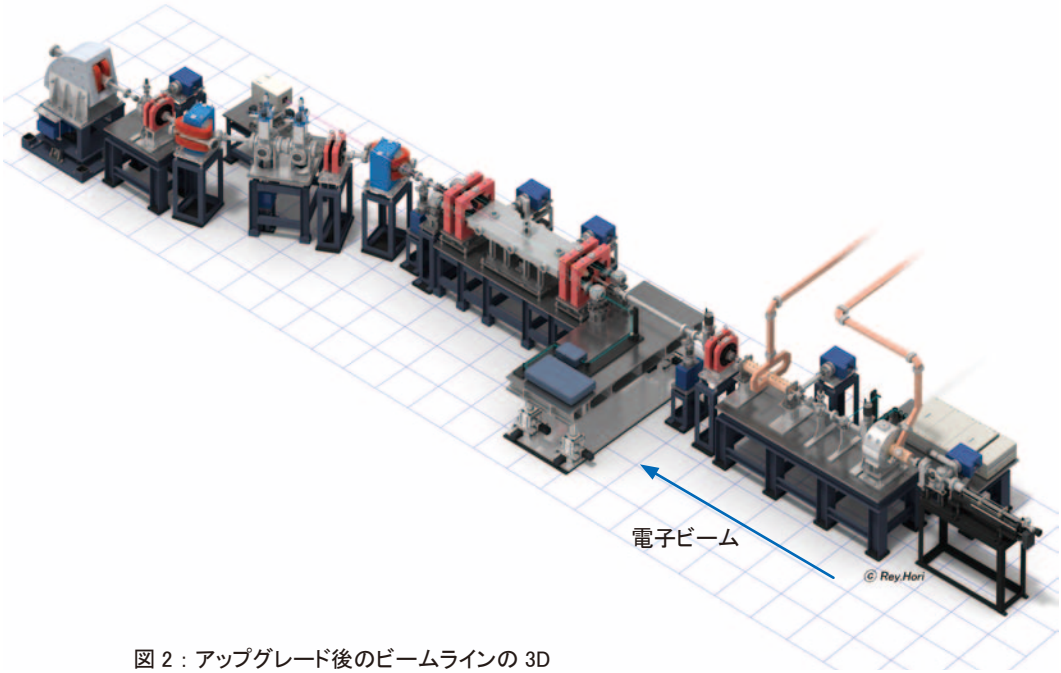


図 2：アップグレード後のビームラインの 3D

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。このビームラインが図 1 下及び図 2 である。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。電子ビームは直後の偏向電磁石で曲げられ、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。

・3.6cell フォトカソード RF 電子銃

セル数を増やすことでエネルギーを上げるため、1.6cell RF 電子銃を 3.6cell RF 電子銃に交換する。これで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ことができる。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 3、図 4 が 3.6cell フォトカソード RF 電子銃であり、表 1 がそのパラメータである。空洞は滑らかなカーブで構成されており、ここに高周波を満たすことで加速電界を作り出す。この内部の

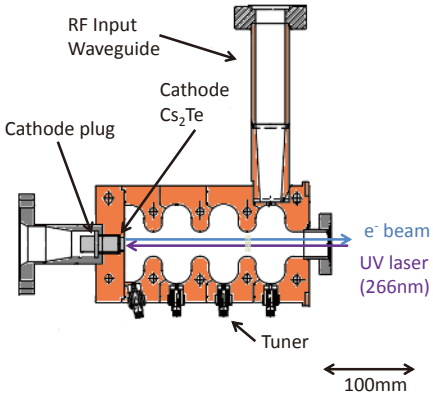


図 3：3.6cell RF 電子銃

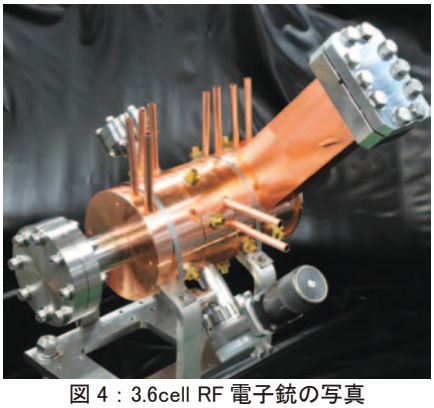


図 4：3.6cell RF 電子銃の写真

表 1：3.6cell RF 電子銃のパラメータ

Frequency (π-mode)	2856 MHz
Q value	15000
Coupling β	0.99
Filling time	0.84μs
R/Q	395Ω
Mode separation (π-2π/3)	2.8 MHz

カソードに紫外レーザーパルス光を照射することで光電効果により電子ビームを生成し、その後の空洞で 10MeV まで加速する。電子ビームはレーザーパルスと同じ時間構造で生成されるため、1000 パルスのレーザーパルス列を照射することで 1000 バンチのマルチバンチビームを生成することが出来る。バンチ長もレーザーのパルス長とほぼ同じになる。このようにフォトカソード RF 電子銃を用いることで、容易にマルチバンチを生成でき、さらにバンチャーも不要なため装置をコンパクトにすることができる。

カソードには半導体である Cs_2Te を蒸着してある。これは入射したレーザーパワーに対してどのくらい電子が生成できるかを示す量子効率が銅などの金属より 2 桁以上高く、同じレーザーパワーでより高い電荷量の電子を生成できる。マルチバンチビームを生成する際には入射するレーザーパルス増幅の負担を減らすことができる。ただし、放電やそれによるガス放出などにより劣化して量子効率が下がることもある。場合によってはカソードを交換する必要が出て来る。このため、図 3 のカソードプラグの部分は引きだして新しいものに交換できるようになっている。

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 10 分に 1 回と高いため、エージングを行いながらビーム調整を行っている。

・12cell ブースター

3m の進行波型の S-band 加速管から約 1m の 12cell ブースターへ交換し、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 5 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界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 2 つのダブルフィードになっている。

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、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[2] で計算した各モードの周波数は図 6 のようになっており、π モードと隣の 10π/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。

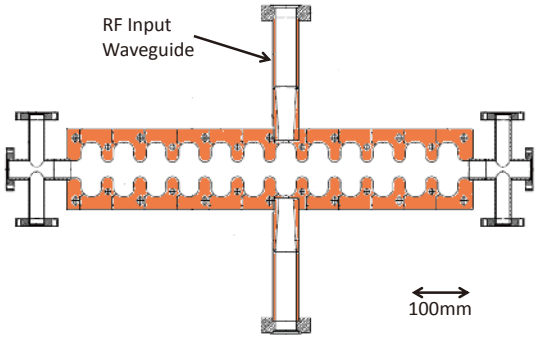


図 5：12cell ブースター

表 2：12cell ブースターのパラメータ

Frequency (π-mode)	2856 MHz
Q value	19000
Coupling β	1.0
Zshunt	57MΩ/m
R/Q	2.8 Ω

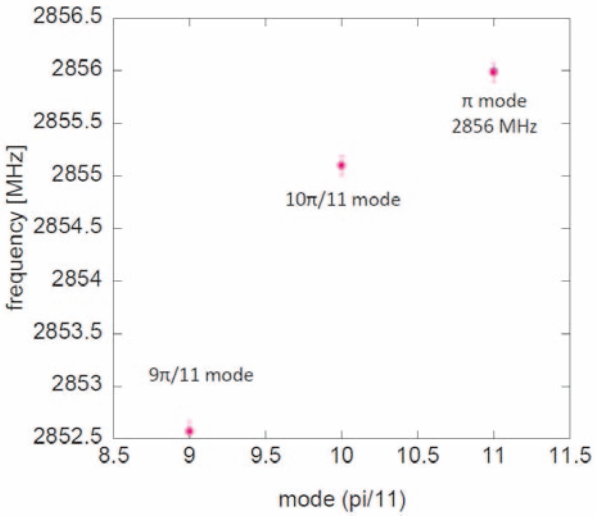


図 6：Superfish で計算した各モードの周波数

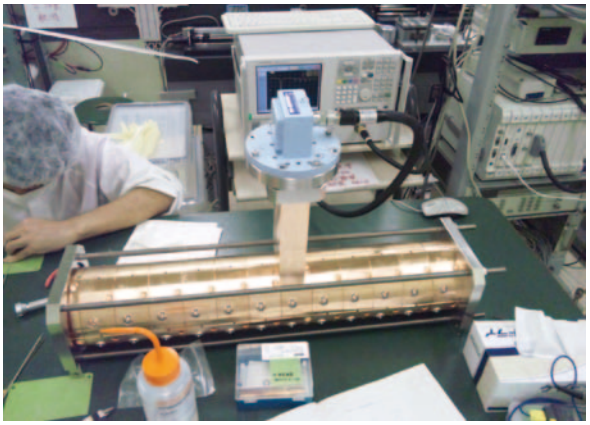


図 7：12cell ブースターの周波数測定時の写真

このブースターは製作中であり、夏までの完成を予定している。現在は空洞の加工中であり、図 7 の写真は加工途中の空洞を組み上げて周波数を測定している様子である。今後は最終調整加工、ロウ付け、外装品の溶接と進めていく。

・シケインの取り外し

RF 電子銃下流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。ただし、シケインを作るため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、ビームライン上に設置した穴空きのミラーで側面から入射したレーザー光を反射し、カソードへ入射する。電子ビームはこのミラーの穴を通過する。レーザー光の入射角度は正面入射の時と比べて約 1° の角度が付く。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。

・4 枚ミラー平面光共振器

新たに導入する 4 枚ミラー平面光共振器は、光共振器内に蓄積できるパワーを制限していたミラーダメージを避けるため、共振器長を伸ばしてミラー上のサイズを広げる構成になっている。今までの光共振器ではミラーのダメージ閾値で蓄積するパワーが制限されていた。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 8 が 4 枚ミラー平面光共振器であり、表 3 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 7560mm に伸び、10 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 2000、増大率は 1000 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

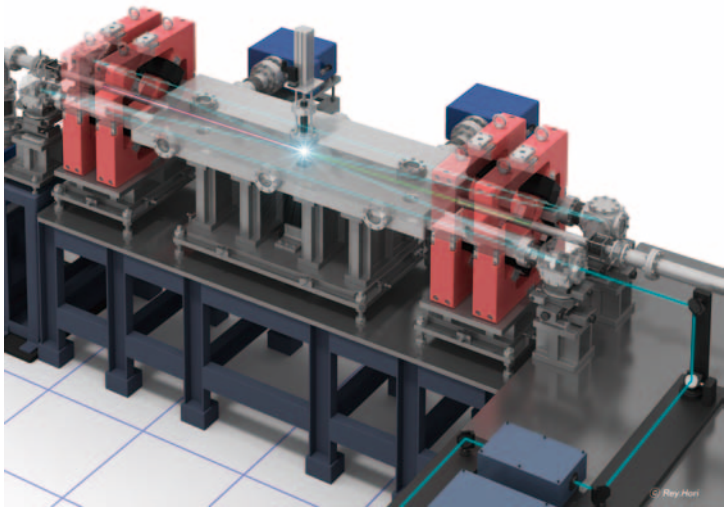


図 8：4 枚ミラー平面光共振器

表 3： 4 枚ミラー平面光共振器のパラメータ

周長	Waist (2σ)(H × V)	ミラー上のサイズ (2σ)(H × V)	Curvature	凹面間距離
7.56m	109μm × 50μm	2.92mm × 6.4mm	ρ=1.89m × 2, Flat × 2	1.8928235m
波長	パルスエネルギー	Finesse	反射角 = 衝突角	パルス長
1064nm	6mJ/pulse	2000 (with Burst)	6deg	7ps

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 420mm から 1893mm と長くなったことで、ミラー上のレーザーサイズ（2σ）は 1.1mmφ から 2.92mm × 6.40mm(H×V) と面積が 15.4 倍になり、その分、ミラー表面を破壊せず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。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、その分パワーロスで反射率が下がるのと同じになるためである。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 6mJ/pulse となる予定である。

衝突点でのウェストサイズ(2σ) は 110μm×50μm(H × V) となっており、偏平になっている。STF で使用する光共振器のように平面ミラーをわずかに歪ませることで、これは丸くできる [3]。今回は製作期間が限られているので、偏平のままとしている。

電子ビームとの衝突角度は 20° から 6° 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線数の増加が見込める。

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台上に乗っており、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乗っている。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。

・新ビームラインでの電子ビームのパラメータ

Strategic Accelerator Design(SAD)[4] 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)[5] 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 9 が計算したオプティクスであり、衝突点で

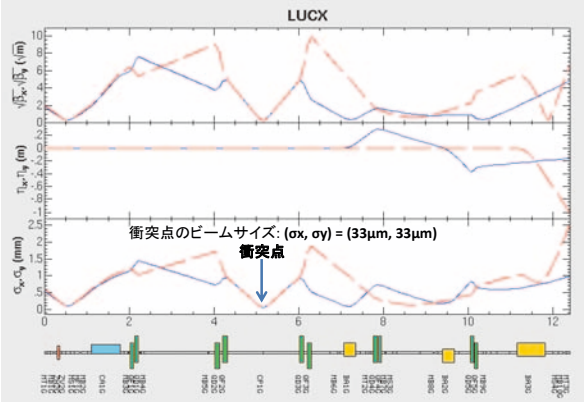


図 9：SAD で計算した電子ビームのオプティクス

の電子ビームサイズ (1σ) は 33μm となっている。そ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 4μs 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 4 にアップグレード後の電子ビームのパラメータを示す。

X 線生成

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、モンテカルロシミュレーションコードである CAIN(Conglomérat d'ABEL et d'Interactions Non-linéaires)[6] を使って計算した。

Ｘ線イメージング用の検出器に入る予想Ｘ線数は 1.7×10^7 photons/train となり、エネルギー幅 (FWHM) は 15keV を中心として 10% となった。LCS で生成された全Ｘ線数は 1.6×10^8 photons/train となる。これらの数は 1000 バンチのマルチバン

表 4：　電子ビームのパラメータ

エネルギー	ビーム強度	バンチ数	ビームサイズ (1σ)(H × V)	バンチ長	繰り返し	バンチ間隔
30MeV	0.4nC/bunch	1000 bunches	33μm × 33μm	10ps	12.5Hz	2.8ns

チ電子ビームのトレインと衝突したときに生成される数である。図 10 が CAIN で計算したＸ線のエネルギー分布である。検出器は衝突点から約 2.4m 下流の位置に設置してあり、20mmϕ の鉛コリメータがその直前にある。よって 4.2mrad 以内に入るＸ線数を検出器に入る数とした。図 10 の青線が 4.2mrad 以内に入るＸ線のエネルギー分布で、この結果から最大 16keV、エネルギー幅 (FWHM) が 10% とした。前回と同じＸ線イメージを撮る場合、合計で 10^8photons のＸ線を照射したので、このＸ線数であれば 10 ショットで撮影可能となり、前回の 10000 ショットから比べると 1/1000 になる。さらに、実際ミラー破壊が起こったときのレーザーパルスエネルギーは約 2mJ/pulse と前回実験時の 0.4mJ/pulse 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線照射で撮影することも期待できる。

まとめと今後

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を計画しており、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 × 10^7photons/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 × 10^8photons/sec・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。

アップグレードに伴うビームライン改修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、現在ビーム試験中である。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 ブースターは製作中で夏前に完成予定である。そして 4 枚ミラー平面光共振器は現在設計中である。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、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。

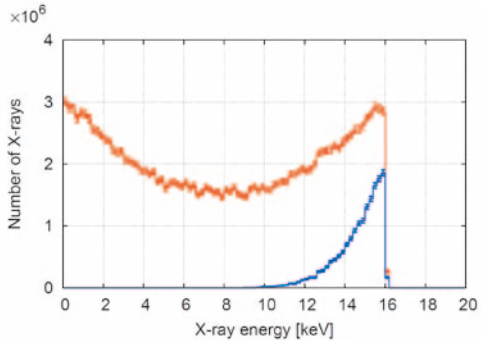


図 10 : CAIN で計算したX線のエネルギー分布。赤線は生成X線の全てのエネルギー分布、青線は 4.2mrad 以内のものだけ取り出した時のエネルギー分布

参考文献

[1] 坂上和之 , 福田将史 , 高輝度光子ビーム源開発室ニュース Vol.7.
[2] J. H. Billen, L. M. Young, “POISSON/SUPERFISH” ,. LA-UR-96-1834.
[3] H. Shimizu et al., Proceedings of IPAC2011, pp1470 1472.
[4] K. Hirata (CERN Report No. 88-04, 1988), SAD: http://acc-physics.kek.jp/SAD/.
[5] M.J. de Loos, S.B. van der Geer, Proceedings of EPAC 1996, p. 1241, GPT: http://www.pulsar.nl/gpt/index.html.
[6] P. Chen et. al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 355, 107(1995), CAIN: http://lcdev.kek.jp/~yokoya/CAIN/.

Acknowledgments

This News is supported by Quantum Beam Technology Program of the Ministry of Education, Science, Sports, Culture and Technology of Japan (MEXT).

量子ビーム基盤技術開発プログラム（2008-2012 年度）

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT［http://www.quantumbeam.net/］

次世代ビーム技術開発課題「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」（拠点責任者：浦川順治）

Development for Next Generation Compact High Brightness X-ray Source using Super Conducting RF Acceleration Technique

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
High Energy Accelerator Research Organization
〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1　TEL 029(879)6248
小型高輝度光子ビーム源開発室　［http://kocbeam.kek.jp/］