

話 題

L-band 常伝導 RF 電子銃による 1 ms パルス長電子ビームの生成*

渡邊 謙^{*1}・早野 仁司^{*1}・浦川 順治^{*1}・松本 利広^{*1}・福田 将史^{*1}
 栗木 雅夫^{*2}・飯島 北斗^{*2}・坂上 和之^{*3}・倉本 綾佳^{*4}・Mathieu Omet^{*4}

1 ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photo-cathode RF Gun

Ken WATANABE^{*1}, Hitoshi HAYANO^{*1}, Jyunji URAKAWA^{*1}, Toshihiro MATSUMOTO^{*1}, Masafumi FUKUDA^{*1}
 Masao KURIKI^{*2}, Hokuto IJIMA^{*2}, Kazuyuki SAKAUE^{*3}, Ayaka KURAMOTO^{*4} and Mathieu OMET^{*4}

Abstract

We report successful generation of 1 ms long pulse and multi-bunch electron beam by a normal conducting photo-cathode RF gun at KEK-STF (Superconducting accelerator Test Facility). The 1 ms long Pulse beam generated by the RF gun is delivered to the injection line to examine stable acceleration and precise RF control. The 1 ms pulse beam is also used to demonstrate high brightness X-ray generation by inverse laser Compton scattering which will be also carried out at STF, supported by MEXT Quantum Beam project. The RF gun cavity has been fabricated by DESY-FNAL-KEK collaboration. Performing high power RF process and ethanol rinse to the cavity, a stable operation of the cavity up to 4.0 MW RF input power with ~1 ms pulse length was achieved by keeping even low dark current. The beam generation test has been started since February 2012, 1 ms pulse was generated in March 2012. We explain about the STF injector and report the basic property of this 1 ms beam generation.

1. はじめに

「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 (STF 加速器) が 2012 年 2 月末に完成し、ビーム運転が可能となった。本プログラムの目的はコンパクトな構成の加速器システムを用いて高輝度の X 線を生成することであり、1 ms の非常に長いバンチトレイン構造を持つ電子ビームとパルススタック光学空洞中に蓄積されたモードロックレーザーとのコンプトン散乱により 1.3×10^{10} photon/sec/1% bandwidth の X 線生成を目指している。ビーム繰り返しは 5 Hz、電子ビームエネルギーは 40 MeV、トレイン中の平均ビーム電流は 10 mA である。図 1 にビームラインの概略図とレイアウトを示す。上流からフォトカソード RF 電子銃、シケイン等の入射部、超伝導加速空洞モジュール、20° ベンド電磁石、衝突点、ビームダンプから成る。な

お、衝突点およびビームダンプ以外のビームラインは ILC (International Linear Collider) のための加速技術実証実験である STF Phase 2 計画にそのまま使用される。表 1 に量子ビームおよび STF Phase2 における電子ビームパラメータを示す。

2011 年夏から本格的なビームラインの建設が始まった。2 月 27 日からフォトカソード RF 電子銃 (以下、RF 電子銃) からのビーム取り出しのため試験運転を開始し、同日夜、電子ビームの取り出しに成功した。3 月 7 日の段階で 1 ms ビーム (162450 bunches/pulse, 10 ~ 20 pC/bunch) の取り出しに成功した。当初はパルス内のバンチ電荷量は一定ではなかったが、RF 位相やレーザーアンプの調整を続けた結果、3 月 23 日の段階で 1 ms 内のバンチ当たりの電荷量がほぼ均一な flat beam (162450 bunches/pulse, 30 ~ 40 pC/bunch, ~ 4 MeV) の取り出しに成功した。

4 月 12 日に 1 m L-band 9-cell 超伝導加速空洞 2 台¹⁾ を用いたキャプチャーモジュール前後のゲート弁を開

* 「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 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: kenw@post.kek.jp)

*2 広島大学 先端物質科学研究科 Hiroshima University

*3 早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 Waseda University

*4 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻 Sokendai

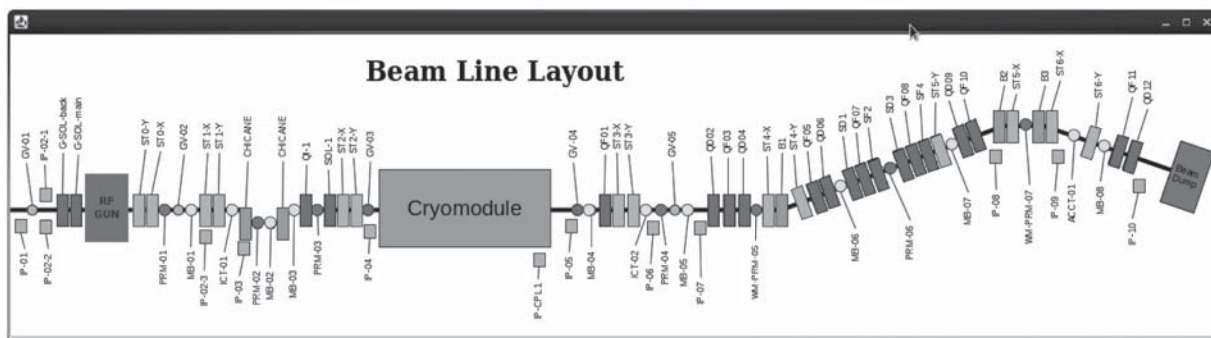
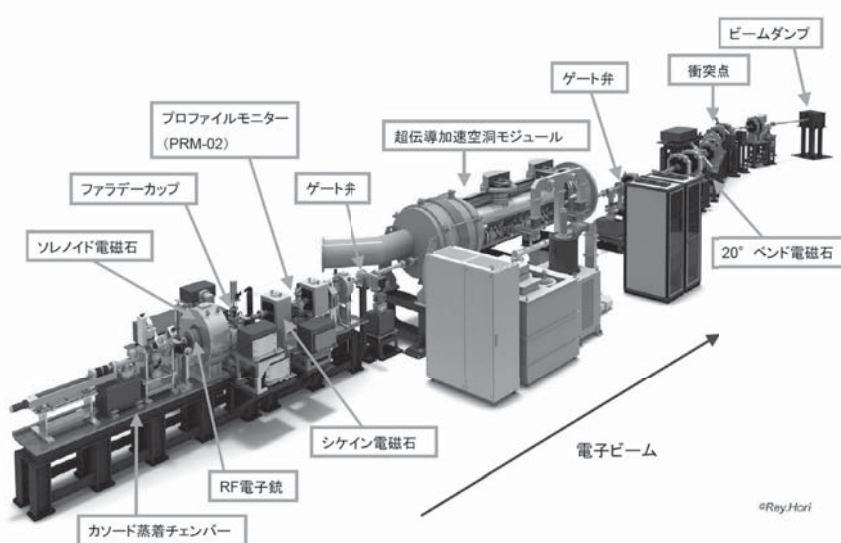


図 1 STF 加速器 (上図: 概略図, 下図: レイアウト)

表 1 電子ビームのパラメータ

| | 量子ビーム | STF Phase 2 |
|-----------------|--|--------------------------|
| Pulse length | 1 ms | 0.9 ms |
| Repetition Rate | 5 Hz | 5 Hz |
| Bunch Spacing | 6.15 ns (162.5 MHz) | 369.27 ns (2.708 MHz) |
| Number of Bunch | 162500 | 2437 |
| Bunch Charge | 62 pC | 3.2 nC |
| Total Charge | 10,000 nC | 7,798 nC |
| Beam Current | 10 mA | 8.7 mA |
| Bunch length | 12 ps (Laser, FWHM) | 10 ps (Laser, FWHM) |
| Max beam energy | 50 MeV | 21.5 MeV |
| Beam power | Max 2.5 kW (50 MeV) Usually 2.0 kW (40 MeV) | 0.8 kW (21.5 MeV) |

け, RF 電子銃から取り出した電子ビームを 40 MeV まで加速する試験運転を開始した. 翌日の 4 月 13 日 15 時 31 分に 28 バンチ, バンチ当たりの電荷量 41 pC 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. ビーム調整完了後, ビームライン下流に衝突用レーザー装置がインストールされ, X 線生成実験が開始される.

本報告では, RF 電子銃の RF プロセスから 1 ms マルチバンチビームの取り出しまでについて報告する.

2. 入射部の構成

STF にインストールされている電子銃は銅製の常伝導 L-band 1.5 セル RF 電子銃である²⁾. これは DESY・FNAL・KEK collaboration で製作された空洞である. 運転周波数は 1300 MHz であり, 電子源には Cs₂Te を用いている. 入射部の詳細を図 2 に示す. RF 電子銃上流にフォトカソード蒸着チャンバーがあり, その脇にキセノンランプを光源とした量子効率 (QE: Quantum Efficiency) 測定装置が設置されている. カソード蒸着

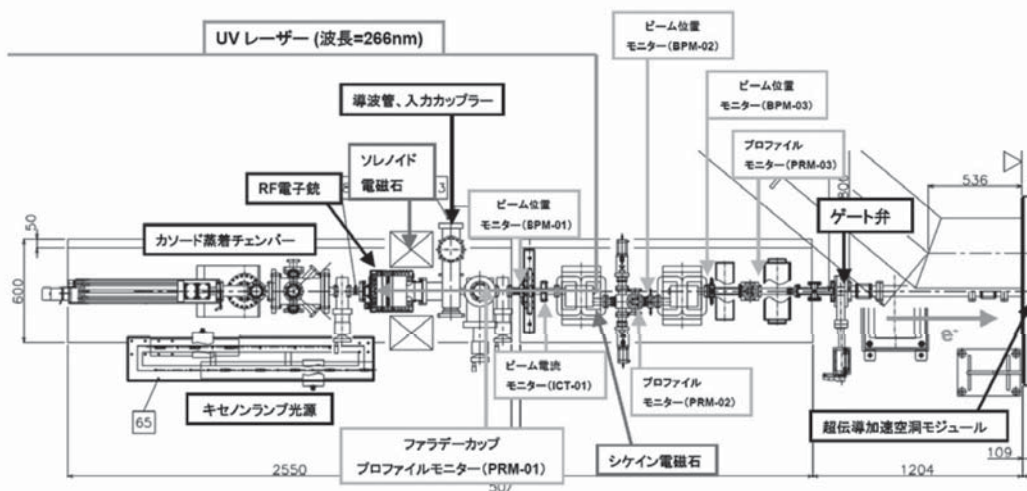


図2 入射部の構成

チェンバーと電子銃はゲート弁を介して真空ベローで接続されており、カソード蒸着後にカソードヘッドはロードロックにより電子銃まで真空中を輸送され、端板部に固定される。

カソードの輸送は1本のロットにより行えるので、運転の前後に簡単に量子効率を測定することが可能なことが特徴である。カソードヘッドにはモリブテン(以下, Mo)を使用している。電子銃直下にファラデーカップ(以下, FC)とアルミナ蛍光板(t=1 mm)を用いたプロファイルモニター(以下, PRM)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。

光電子生成用 UV レーザー(波長: 266 nm)はシケイン部に設置された View Port からカソードへ垂直入射される。シケイン部の後には、ビームの広がりを補正するための4極電磁石とソレノイド電磁石が設置されている。その下流に超伝導加速空洞モジュールがあり、40 MeV まで加速された電子ビームがビームダンプまで輸送される。

量子ビーム実験では、高輝度 X 線を生成するためにパルス内の高繰り返し(162.5 MHz)、1 ms のロングパルスの電子ビームが要求され、本実験の成否の鍵を握る。また、ビーム調整時には数十バンチ、X 線生成実験時には十数万バンチの電子ビームが必要とされ、広範囲でパルス構造が変えられること、低エミッタンスビーム生成のためにカソード上における UV レーザーのスポットサイズが可変であることが要求される。バンチ当たりの電荷量は 62 pC と小さいため、パルス当たりのエネルギーは比較的小さくてよい。光電子生成用 UV レーザーのパラメータを表 2 に示す。また、要

表 2 電子ビーム生成用 UV レーザーのパラメータ

| | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Repetition Rate | 5 Hz |
| Pulse Rep. | 162.5 MHz (6.15 ns) |
| Train Duration | Several ns - 1 ms |
| Number of pulse | Several - 162500 |
| Wave length | 266 nm |
| Pulse Energy | 0.3 μ J (Target 1 μ J) |
| IR pulse energy | Target 10 μ J |
| QE on Cs ₂ Te | 0.1% in RF gun |
| Train Flatness | できる限り Flat |
| Intensity Jitter | できる限り小さく |
| Timing Sync. | 0.3 ps (rms) |
| Size at cathode | Variable |

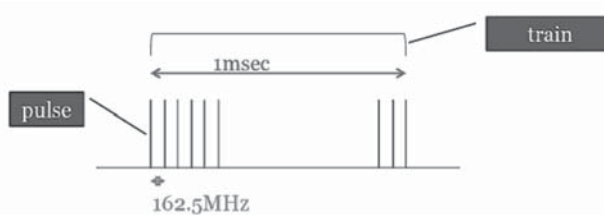


図3 UV レーザーのパルス構造

求される UV レーザーのパルス構造を図 3 に示す。図 4 は構築された UV レーザーシステムの構成である。図 5 に UV 生成のためのブロックダイアグラムを示す。

上流から Mode-locked レーザー発振器 (Time Bandwidth Product 社製: 以下, TBP 社製), MOPA (Master Oscillator Power Amplifier: TBP 社製), 2 段の Burst 増幅器 (LD 励起, Northrop Grumman 社製),

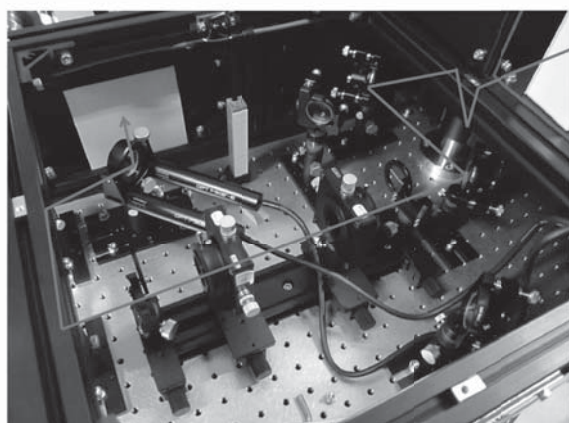
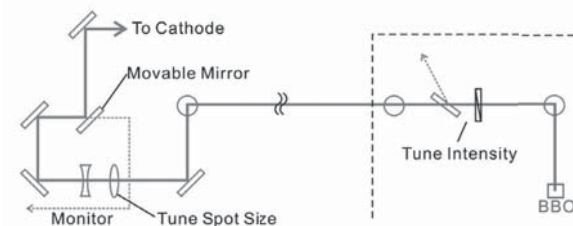
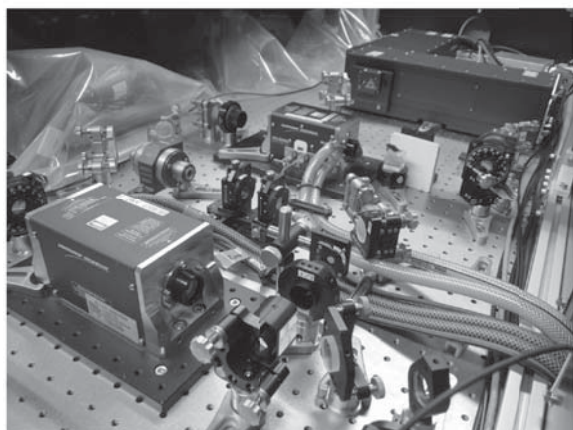
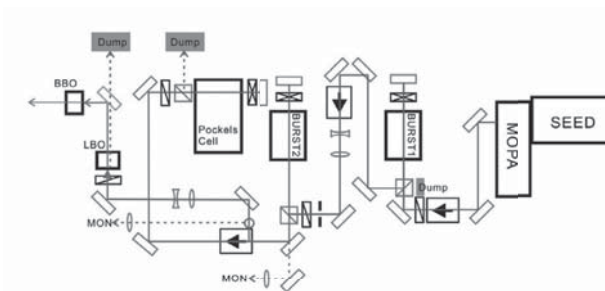


図4 UV レーザーシステムの構成 (上図: レーザーハット内, 下図: シケイン部脇)

パルス切り出し用 Pockels cell, SHG(Second Harmonic Generation)用 LBO 結晶 (LiB_3O_5 : 温度による位相整合), FHG (Fourth Harmonic Generation) 用 BBO 結晶 (α -

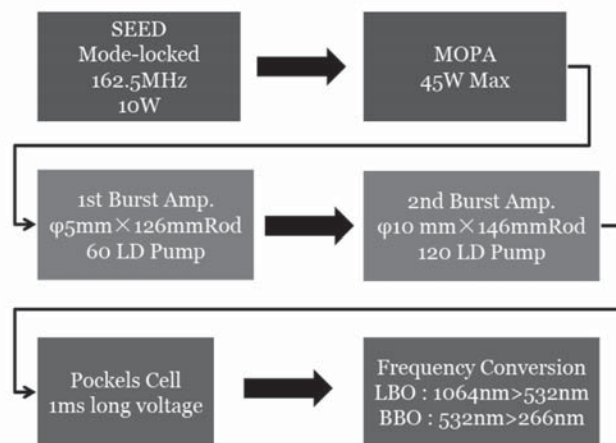


図5 ブロックダイアグラム

BaB_2O_4 : 角度による位相整合) で構成される. 紫外光へ変換後に強度調整およびサイズ調整を行い, カソード上のエネルギー密度やスポットサイズを制御している. カソード面上のスポット位置の調整はシケイン部脇に設置されている光学定盤上にあるムーバー付きミラーを用いて行っている. また, Burst 増幅器は増倍率, Pockels cell は昇降比を稼ぐためそれぞれ往復する構成である. 図6に1段目, 2段目の Burst 増幅器の出力波形を示す. 図7はその2つの合成波形である.

1段目, 2段目の Burst 増幅器の Gain を変えることで, 出力波形の調整を行っている. 図8は Burst 増幅器の Gain に対するパルスあたりのレーザーパワーの変化であり, 目標の $10 \mu\text{J}/\text{pulse}$ をクリアしていることがわかる. この合成波形の中から Pockels cell を用いて, 任意の数のレーザーパルスを切り出しており, 図9はその試験の結果である. 12バンチ (73.8 ns) から 162500バンチ (1 ms) の範囲でパルスが切り出されていることがわかる.

SHG および FHG による 1064 nm から 266 nm への変換効率として約 10% という値が得られている. 266 nm のパルスエネルギーを測定した結果, $100 \mu\text{J}/100 \text{ pulse}$ であった. 設計値は $0.3 \mu\text{J}/\text{pulse}$, システムの目標値は $1 \mu\text{J}/\text{pulse}$ であり, 目標の出力は達成できている. 今後の課題として, 1 ms における出力の均一化が挙げられる.

3. RF 電子銃の RF プロセス・ Cs_2Te 成膜と暗電流評価

RF 電子銃の高周波入力運転は空洞の周波数および電界平坦度の調整後, 2010年4月から開始した. 2012年2月までに大パワー RF 入力による空洞のプロセッシング, 空洞のエタノール洗浄, カソードブロック表面

の研磨などが行われた. 2012年3月, Cs_2Te 蒸着, 表面電界強度 (Epk) 40 MV/m という条件で, RF 印加時に 130 μA 程度の暗電流が発生している. 表3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 (1.7 MW, パルス幅 1 ms) 後の測定では, カソード表面の電界強度 (Epk) が 30 MV/m で 269 μA の暗電流が発生

しており, 目標ビーム電流である 10 mA に対して 2.7% の量であった. その後, 加速空洞洗浄に先立ち, 試験片を用いた洗浄試験を行い, エタノールを用いた洗浄方法が簡便かつ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. 1回目と同様の条件でプロセスした結果, プロセス時間が大幅に短縮されるとともに, 暗電流は 1/20 まで減少した³⁾. 2011年9月~2012年2月に, クライストロンを最大 5 MW の高出力のものに変更し, また機械研磨にてカソード表面粗さの改善を施したうえで3回目のプロセスを行った. その結果, Cs_2Te を蒸着していない Mo のみの状態では, 30 MV/m で 2.7 μA の暗電流となり, 最初のプロセス後の値に比べて 1/100 まで減少させることに成功した. 現状では, 作業のため大気解放を行った後でも数時間の RF プロセスで元の状態

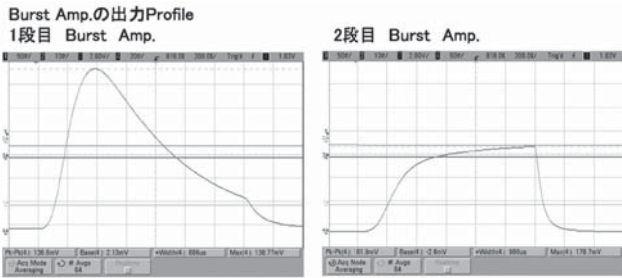


図6 1段階目, 2段階目の Burst 増幅器の出力波形

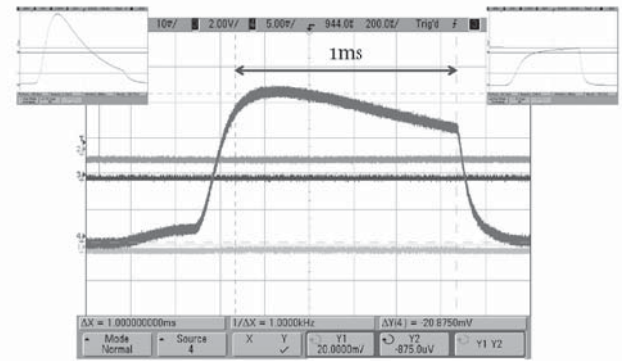


図7 1段階目, 2段階目の Burst 増幅器の合成波形

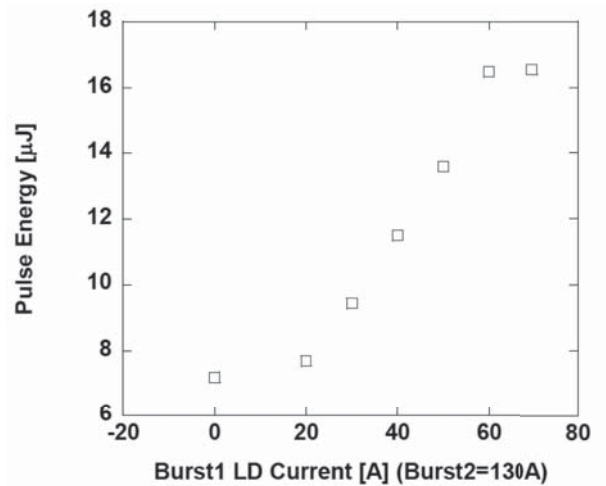


図8 Burst 増幅器の Gain に対するパルスあたりのレーザーパワーの変化

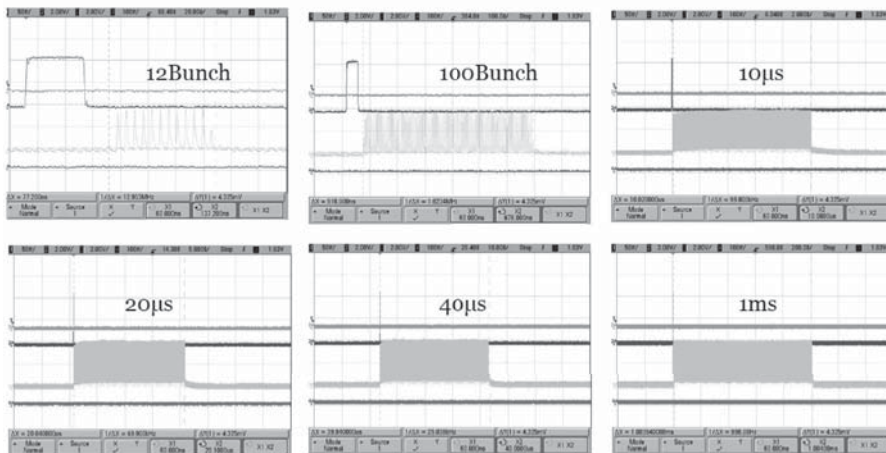


図9 Pockels cell の切り出し試験の結果

表 3 RF プロセスの履歴

| Date | Max Power | Time [hour] | Dark Current [μ A] |
|-----------------|---------------------------|-------------|---|
| 2010年4月 ～6月 | 1.7 MW 1 ms 5 Hz | 100 | 269 at 30 MV/m Dummy cathode plug (Mo) |
| 2011年1月 ～2月 | 1.7 MW 1 ms 5 Hz | 15 | 13 at 30 MV/m Dummy cathode plug (Mo) |
| 2011年9月 ～10月 | 4.0 MW 1 ms 5 Hz | 60 | 194 at 40 MV/m 7 at 30 MV/m Dummy cathode plug (Mo) |
| 2012年1月 ～2月 | 4.0 MW 1 ms 5 Hz | 13 | 64 at 40 MV/m 2.7 at 30 MV/m Dummy cathode plug (Mo) Polish on surface |
| 2012年 3月21日 | 3.5 MW 1.05 ms 5 Hz | 2.5 | 76 at 40 MV/m Ver. 3 cathode plug (Mo) Polish on surface |
| 2012年 3月24日 | 3.8 MW 0.8 ms 5 Hz | 2 | 130 at 40 MV/m Dummy cathode plug (Mo+Cs ₂ Te) |

- 1.7 MW: E_{pk} = 30.4 MV/m
- 3.0 MW: E_{pk} = 40.4 MV/m
- 4.0 MW: E_{pk} = 46.7 MV/m

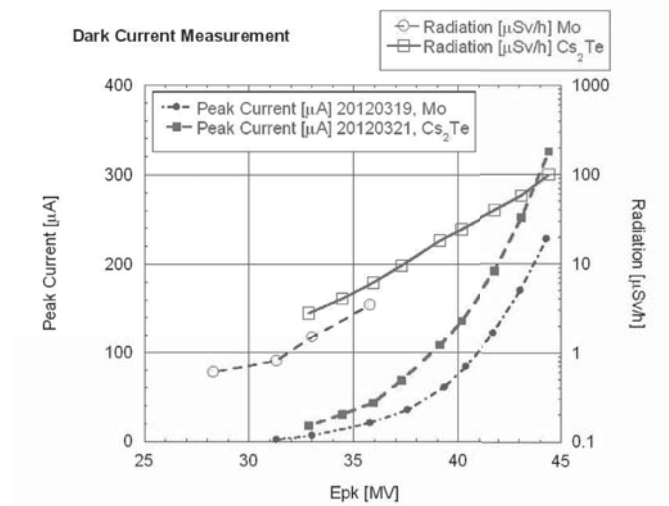


図 10 暗電流特性 (● : Mo のみ, ■ : Mo + Cs₂Te) および放射線量 (○ : Mo のみ, □ : Mo + Cs₂Te)

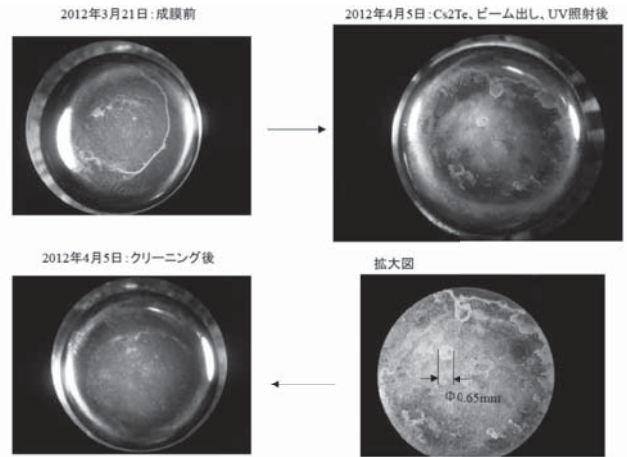


図 11 カソード表面の様子

へ復帰することが確かめられている。

カソード付近の放電を抑制するために、エッジ部の曲率半径を大きくしたカソードヘッド (Ver.3) 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。

Cs₂Te 成膜前後の暗電流特性を図 10 に示す。カソードヘッドは超音波洗浄などでクリーニングしたあとに蒸着チャンバー内に設置した。蒸着チャンバーおよび RF 電子銃をベーキングした後、2.5 時間かけて 3.5 MW, 1.05 ms まで RF プロセスした。●は RF プロセス後に測定された暗電流の値である。■は Cs₂Te を蒸

着後、再び 2 時間かけて 3.5 MW, 0.8 ms まで RF プロセスした後に測定された暗電流の値である。暗電流は Cs₂Te 成膜前後で約 1.4 倍増加した。また、図 10 中に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 (○ : Mo のみ, □ : Mo + Cs₂Te) も併記する。放射線量はカソード表面電界に対して指数関数的に増加していることがわかる。

図 11 の写真に示すように Te と Cs はカソード面全体に蒸着されており、それが暗電流増加の原因であると考えている。暗電流抑制のために、ビーム生成に必要な中心部だけに光電面を成膜するためのマスクを製作中である。

バンチあたりの電荷および QE をレーザーのバンチあたりのエネルギーの関数として図 12 に示す。●および○は Te の厚みが 10 nm の条件での QE および電荷、◆および◇は Te の厚みが 40 nm の条件での QE および電荷を表す。Te の厚みに対して QE に 5 倍程度の差が見られた。Te 10 nm 厚でビーム電流から評価した運転中の QE は、300 pC 以下のバンチ電荷ではおおよそ 2.5% である。62 pC のバンチ電荷生成にはレーザーエネルギー 0.004 μJ と現状のレーザー出力の 1% で充分である。設計値である QE > 0.1% は問題なく達成しており、取り出せる電荷量に充分なマージンを持っている。

2012 年 3 月 21 日から 4 月 2 日の電子銃の試験運転において、運転前後に Cs₂Te の QE をキセノンランプ光源で測定した。その推移を図 13 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 0.4 μJ の UV 光を 162500 \times 5 Hz 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效果による QE 回復を示唆している⁴⁾。蒸着チャンパーおよび RF 電子銃内の典型的な真空圧力は 5×10^{-7} Pa 以下であるが、保管時に QE の低下が見られた。保管時に、QE を維持するために排気系の強化が必要であるかもしれない。今後も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していく。

X 線生成実験では、X 線検出のバックグラウンドを極力減らす必要性から、十分に暗電流が低く抑制できる 33 MV/m (2.0 MW 入力, 暗電流 20 μA 以下) での運転を考えている。また、ビーム取り出し試験開始から間もないころ、ソレノイド電磁石の磁場強度を大きく変えたところ、急激な真空の悪化の後、暗電流が増加したことがあった。そのため、現在では下記に示す手順で RF プロセスおよび Cs₂Te の成膜を行っている。

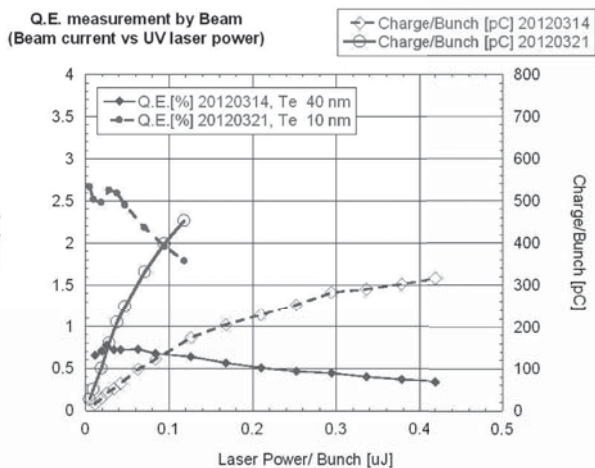


図 12 ビーム電流から評価した量子効率 (32 Bunches/Pulse)

The change of the Q.E. during beam operation measured by Xe lamp

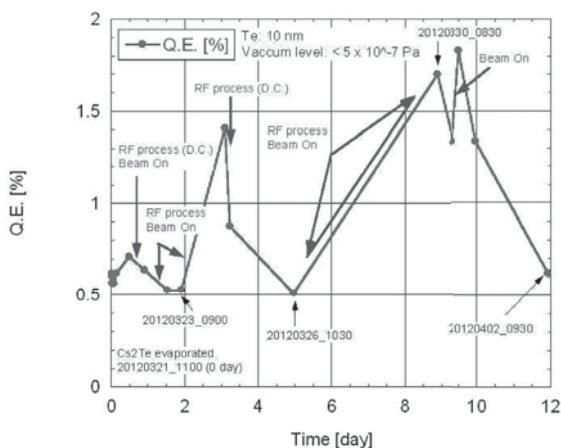


図 13 運転中の量子効率の変化 (2012 年 3 月 21 日～4 月 2 日)

- ① カソード表面をクリーニングし、蒸着チャンパーへセット、真空引き (Baking)、Te Box, Cs ディスペンサーの脱ガスを実施する。
- ② カソードヘッドを電子銃にセットし、Mo のみで RF process を行う。RF process は 20 μs から開始し、3.5 ~ 4.0 MW に到達後、50, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1150 μs の順でパルス幅を伸ばし、各パルス幅で 3.5 ~ 4.0 MW まで投入する。各パルス幅で 3.5 ~ 4.0 MW 到達後、真空の応答など様子を見ながら Solenoid 電磁石の磁場を変える。プロセス後、暗電流の測定を行う。
- ③ Te (膜厚 10 nm) 蒸着、紫外光 (波長 266 nm) を当て光電流をモニターしながら Cs を蒸着し、Cs の蒸着量をコントロールする。
- ④ Cs₂Te 成膜後、②と同じ手順で RF プロセスを行い、暗電流を測定する。
- ⑤ 光電子生成用 UV レーザーを当て、ビーム生成試験を行う。ビーム電流から QE を測定し、成膜時に測定した値と比較する。

4. ビーム取り出し試験

2012 年 2 月 27 日、RF 電子銃からのビーム取り出し試験運転を開始し、その直後にビーム信号を捉えた。その様子を図 14 に示す。ビーム電流は 200 pC/bunch で 35 bunches/pulse である。レーザー on, off により電子銃直下にある電流モニター (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、ビームの生成が確認された。このときの RF 電子銃への投入 RF は 20 μs 、4.0 MW であり、カソード表

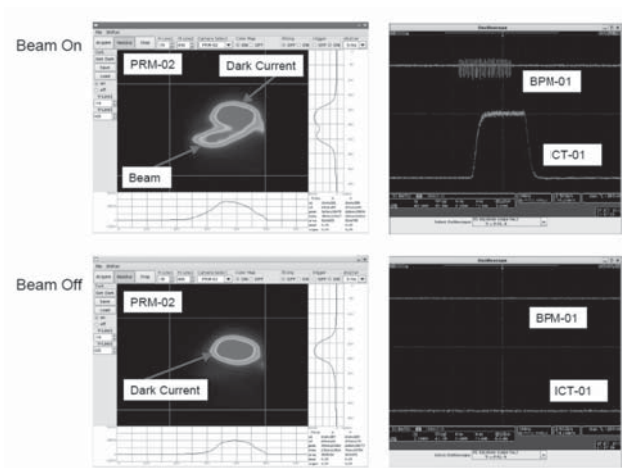


図 14 初ビームの様子

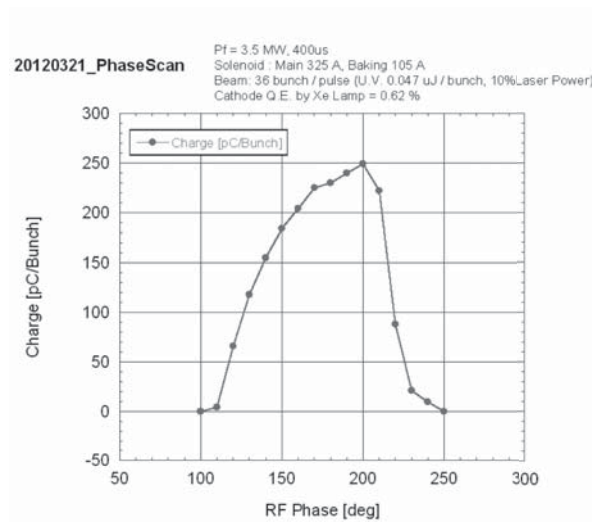


図 16 RF 電子銃の Phase Scan の様子



図 15 制御室の様子

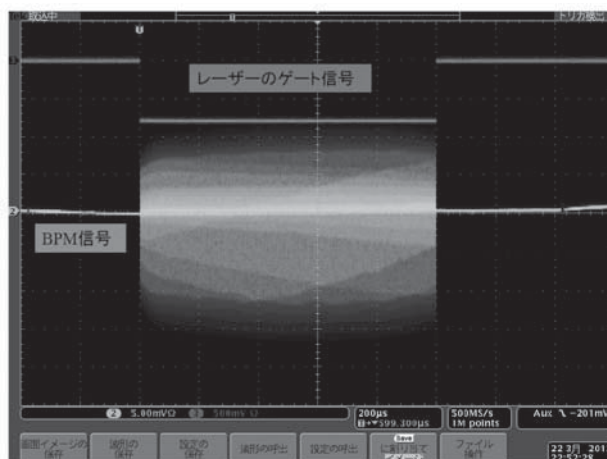


図 17 1 ms 均一ビームの様子 (30 ~ 40 pC/bunch), 中央の帯状の部分が BPM 出力, 上の矩形波が UV レーザーゲート信号を表す。

面電界強度は 46.7 MV/m であった。図 15 にビームチューニング時の様子を示す。その後、3 月末にかけて行った入射部の調整では、トリップレートと暗電流の観点から RF 電子銃への投入電力は 2.0 MW, 1050 μ s で行っている。図 16 に RF 電子銃の Phase Scan の結果を示す。RF phase が 200° のとき取り出し電流が最大となることがわかる。運転時の RF Phase は 180° で行っている。

ビーム生成量は UV レーザーの切り出しゲート幅および減衰量で制御している。3 月 7 日の段階で 1 ms ビームの取り出し (162450 bunches/pulse, 10 ~ 20 pC) に成功、UV レーザーの調整などを経て 3 月 23 日の段階で均一な 1 ms ビーム (162450 bunches/pulse, 30 ~ 40 pC) の取り出しに成功した (図 17⁵⁾)。さらにビーム電流の増大を図ったところ、極端な真空悪化が見られた

ため、設計値の約 60% のビーム電流に到達した時点で入射部のみの大電流の取り出し試験を終了した。この段階で RF 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に、1 ms の UV パルスレインをカソードに当てた状態で、50 μ s の RF パルスで時間的にスキャンし (Short RF Pulse Scan), 生成される電荷量を測定した。Short RF pulse Scan の模式図と UV レーザーの強度分布の例を図 18 に示す。

図 19 に Short RF Pulse Scan の測定結果の一例を示す。QE に相当する UV レーザーの強度と電荷量の比を見ると、パルスの立ち上がり部を除きほぼ一定になっており、1 ms という長いパルスに対して、ビーム生成が問題なく行われていることを示している。図 20 は

RF 電子銃へ供給する RF フィードバック有り無しにおける暗電流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, フィードバック制御による空洞内の電界が安定化されていることがわかる. ただし, 電界が安定するのは $100 \mu\text{s}$ 以降であり, 1 ms のビー

ムを安定に出すためには, 1.1 ms 以上の RF パルス幅が必要であり, あらためてその条件での RF プロセスを行う必要が出てきた.

1 ms に亘るバンチすべてが衝突点にて同一軌道を通過しているかをモニターすることが安定に X-ray を生成するために必要であり, ATF-DR (Accelerator Test Facility at KEK - Damping Ring) で使用されていた広帯域クリップ回路を通した信号と高速 ADC+FPGA 回路を用いて各バンチのビーム位置をモニターする予定である. 図 21 はバンチ数を 36 に設定し, ボタン型ビーム位置モニター (BPM-01: #1 電極) からの信号をこの回路を通して観測した波形である. 162.5 MHz の高繰返しで通過するバンチをチャージ積分型 ADC で検出できるか調べたものであり, 問題なく観測できる

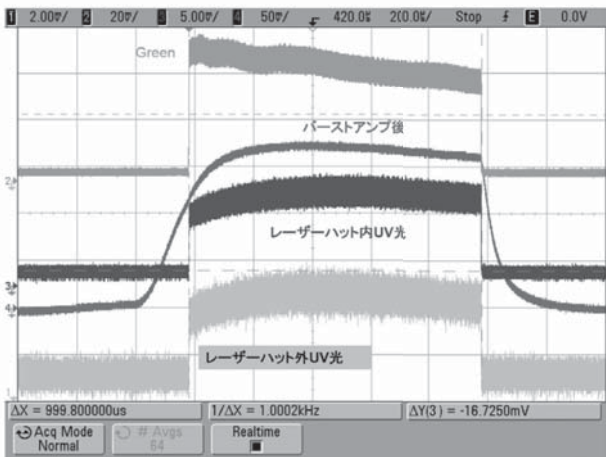
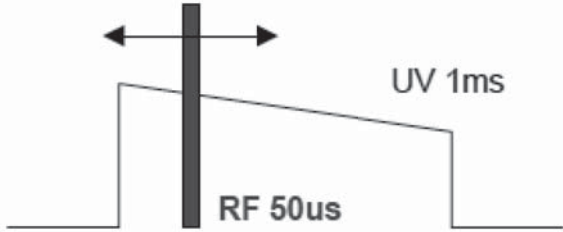


図 18 UV レーザー 1 ms , Short RF pulse ($50 \mu\text{s}$) によるスキャンの模式図と波長変換前後におけるガン用 UV レーザーの強度プロファイル

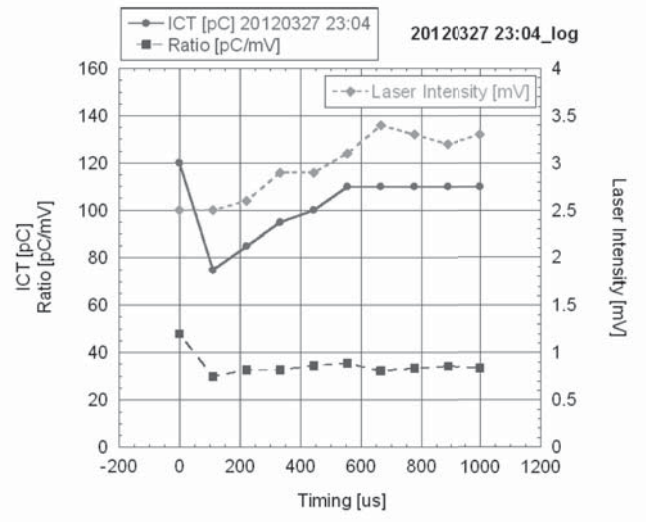


図 19 Short RF Pulse Scan の測定結果

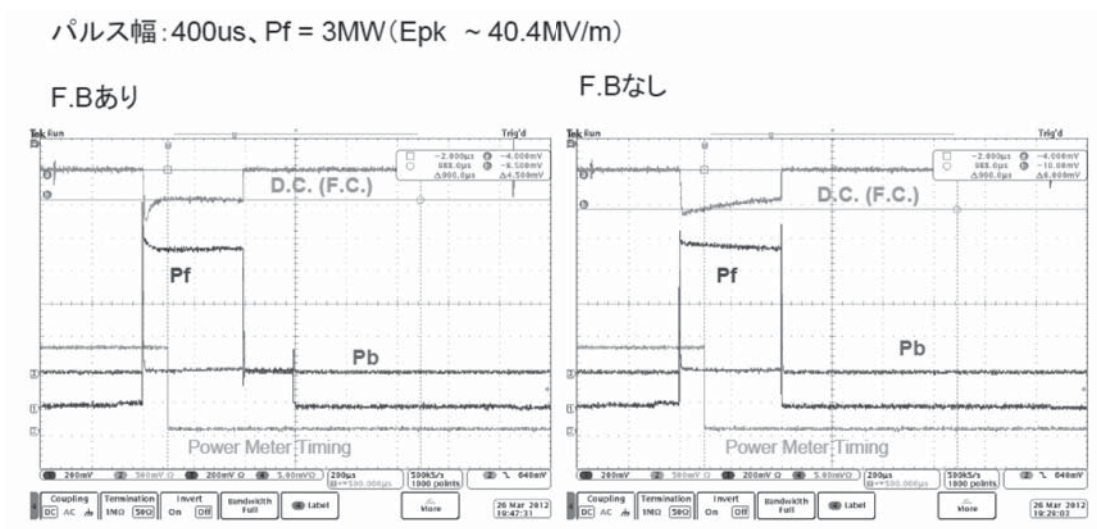


図 20 RF フィードバックによる安定化の様子. 左が FB を入れた場合, 右が FB を入れない場合. 各々 DC: 暗電流, pf: RF 入力パワー, APb: RF 反射パワーを示す.

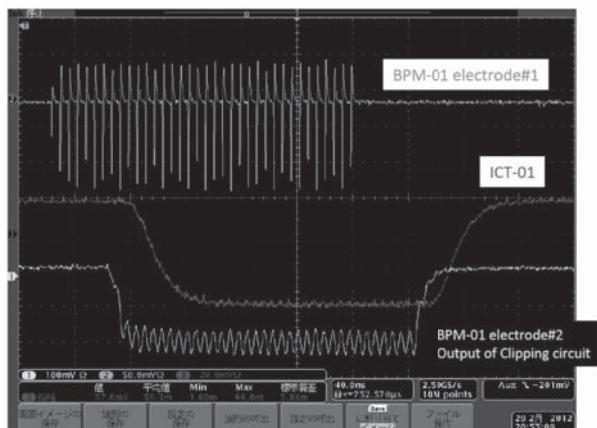


図 21 広帯域クリップ回路の応答

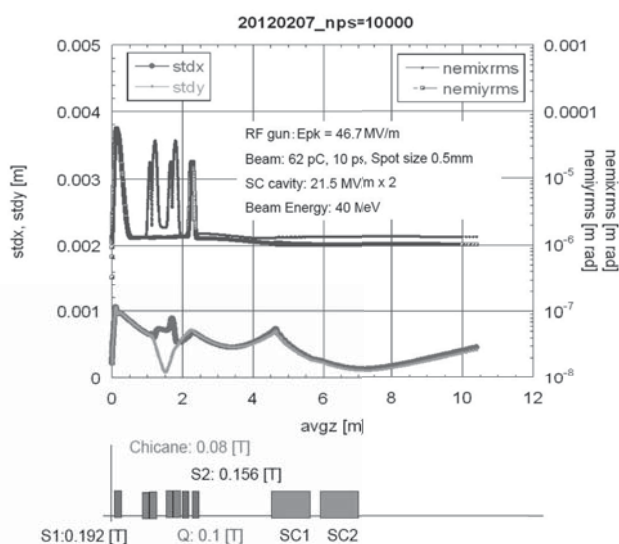


図 22 GPT の計算結果 (62 pC/bunch)

ことが確認された。

STF 加速器の入射器部の構成は STF Phase2 のビームパラメータに合わせて構築されたものである⁶⁾。量子ビーム実験ではバンチ電荷および繰り返しが大きく異なるため、入射部の粒子トラッキングシミュレーションを改めて GPT (General Particle Tracer, ver.2.81) で行った。図 22 は供給可能な最大電力で RF 電子銃を運転したときのビームサイズと規格化エミッタンスを計算した結果である。UV レーザーのスポットサイズ ϕ 0.5 mm, ビーム電流 62 pC, バンチ長 10 ps の条件で, カソード表面電界強度 $E_{pk}=46.7$ MV/m およびソレノイド電磁石 (S1) の位置を最適化した結果, 規格化エミッタ

ンス $<1.5 \times 10^{-6}$ [m rad] という値を得た。現状では $E_{pk}=33$ MV/m, バンチあたりの電荷量 30 pC, レーザーのスポットサイズが約 ϕ 2 mm, バンチ長 10 ps で運転している。また, ソレノイド電磁石 (S1) の位置が最適値と異なるため, 現在到達可能なキャプチャーモジュール通過後の規格化エミッタンスは 4×10^{-6} [m rad] と見積もられている。今後は, モニター系の立ち上げを行い, UV レーザーおよび電子銃の運転条件に対する電子ビーム特性の評価を進めていく。

5. 今後の予定

いままで述べたように, これまでに RF 電子銃からバンチあたり 62 pC 以上, ロングパルス・高繰り返しのマルチバンチビームの取り出しに成功している。

高輝度の X 線生成に向け, 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 1 ms, 2.5 MW 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 1 ms 以上, 4.0 MW での安定運転の実現を目指し, 更なるプロセスが必要である。また, 4 MW 投入時における暗電流特性は Cs₂Te 付きで ~ 500 μ A 程度であり, 10 mA のビーム電流に対して約 5% を占める。大電力伝送路の安定化と同時に暗電流の低減を目的とした RF 電子銃空洞のドライアイスなどを用いた追洗浄が必須である。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 月中に改造を行う予定である。

参考文献

- 1) <http://accl.kek.jp/topics/topics101209.html>
- 2) H. Sugiyama et al., "L-band Photocathode RF gun at KEK-STF", 2011 J.Phys.: Conf.Ser.298 012015
- 3) M. Kuriki et al., "RF Processing of L-band RF gun For KEK-STF", MOPC014, IPAC2011.
- 4) S. H. Kong, D.C. Nguyen, R. L. Sheffield, B.A. Sherwood, "Fabrication and characterization of cesium telluride photocathodes: A promising electron source for the Los Alamos Advanced FEL" NIMA358(1995) 276-279
- 5) <http://lcdev.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/>
- 6) S. Kashiwagi et al., "Development of a photocathode rf gun for the L-band linac at ISIR, Osaka University", TUPEC009, IPAC10.