

BEAM COMMISSIONING OF STF ACCELERATOR AT KEK

Ken Watanabe^{#,A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Alex Aryshev^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Masafumi Fukuda^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Kazufumi Hara^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Yousuke Honda^{A)}, Teruya Honma^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Yuuji Kojima^{A)}, Yoshinari Kondo^{A)}, Kiyoshi Kubo^{A)}, Shigeru Kuroda^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Takako Miura^{A)}, Toshiyoshi Miyoshi^{A)}, Yuuichi Morozumi^{A)}, Takashi Naito^{A)}, Hiroataka Nakai^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Shuichi Noguchi^{A)}, Toshiyuki Okugi^{A)}, Tunekiko Omori^{A)}, Takayuki Saeki^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Masato Sato^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Hiroataka Shimizu^{A)}, Toshio Shishido^{A)}, Takeru Takenaka^{A)}, Toshiaki Tsuchi^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Seiya Yamaguchi^{A)}, Akira Yamamoto^{A)}, Yasuchika Yamamoto^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Seiichi Hosoda^{C)}, Hokuto Iijima^{C)}, Masao Kuriki^{C)}, Goro Isoyama^{D)}, Ryukou Kato^{D)}, Keigo Kawase^{D)}, Ayaka Kuramoto^{E)}, Mathieu Omet^{E)}, Arpit Rawankar^{E)}, Yan You^{F)}

^{A)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

^{B)} School of Advanced Science and Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan, 169-8555

^{C)} Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University
1-3-2 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, Japan, 739-8511

^{D)} The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan, 567-0047

^{E)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI
Hayama-town, Miura, Kanagawa, Japan, 240-0193

^{F)} Tsinghua University

Tsinghua University, Beijing, 100084, P.R. China

Abstract

A compact high-brightness X-ray source based on inverse Compton scattering has been developed on the Superconducting Accelerator Test Facility (STF) at KEK. The beam line has an L-band normal conducting photo cathode RF gun, one Capture cryomodule with two 1.3 GHz 9-cell 1-m long superconducting cavities, a laser super-optical cavity, and a beam dump. This is called quantum beam (QB) accelerator supported by MEXT in Japan. From accelerator, quasi-monochromatic X-ray via inverse Compton scattering is obtained. Our goal in the superconducting RF accelerator system is to establish the stable operation of a 20 MV/m accelerator field for a 1 ms-long pulse train, then to obtain 10,000 nC/pulse. We are attempting to demonstrate a high-brightness X-ray generation with target value of 1.3×10^{10} photons/sec 1% band width and with a 10-20 micron head-on collision. The beam commissioning for the photo injector was started from end of Feb 2012. About 7 mA flat beam with 1 ms pulse width was generated at Mar 2012. A cooldown of the capture cryomodule was started from middle of Feb 2012 for the rf process of the superconducting cavities. The gate valves of the capture module were opened to accelerate the electron beam to 40 MeV and to transport to the beam dump at middle of April 2012, then the commissioning of the beam tuning was started. The 1 ms beam with 3.2-6.5 mA peak current and 40 MeV was achieved at middle of July. The normalized emittance was achieved less than 1.5 mm mrad at the mirror collision point, and the 36 micron beam was also achieved at collision point without a beam loss. And an inspection of facility for the radiation safety was passed at middle of July. The beam operation will restart at Sep 2012, and the X-ray will be generated by the super optical cavity. In this report, the commissioning of the photo injector and the beam tuning will be reported.

STF 加速器のコミッショニング

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」プログラムとして超伝導リニアック試

験棟 (KEK-STF) に建設を進めている量子ビーム実験用ビームライン (名称: STF 加速器) が 2012 年 2 月末に完成し、試験運転を開始した[1][2]。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、1ms

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。STF 加速器は Cs_2Te フォトカソードを電子源として使い、L-band 常伝導 1.5 セル RF 電子銃[3][4]、シケイン等の入射部[5]、L-band 9 セル空洞 2 台を納めた超伝導加速空洞モジュール[6][7]、3 つの 20° ベンド電磁石、衝突点 (X-ray 生成点、Head on Collision) [8]、ビームダンプおよび検出器[9]からなる。なお、衝突点およびビームダンプ以外のビームラインは STF Phase 2 計画と呼ばれる International Linear Collider (ILC) のための加速器技術実証実験にそのまま使用される[2]。

2009 年度から各コンポーネントの準備を開始し、2011 年夏から本格的なビームラインの建設が始まった。2012 年 2 月末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試験運転、4 月中旬から 1 m L-band 9 セル超伝導加速空洞 2 台を用いて電子ビームを 40 MeV まで加速する試験運転を開始した。7 月中旬に行われた施設の放射線安全検査は問題なく通過し、X 線生成といったユーザー運転が可能となった。7 月中旬から 8 月末の間は、メンテナンスのためシャットダウン中である。9 月初旬から冷凍機の運転を再開し、超伝導空洞の RF プロセス後の 9 月末から X 線生成実験のためのビーム運転を再開する予定である。

本報告では 2012 年 2 月末から 7 月中旬の間に行った STF 加速器のビームコミッショニングについて報告する。

2. STF 加速器の構成

STF 加速器の構成を図 1 に示す。図 2 にビームラインのレイアウトを示す。表 1 にビームパラメーターをまとめる。量子ビームの運転モードでは、バンチあたりの電荷量は 62 pC と小さいがバンチ間隔が 6.15 ns (162.5 MHz) と高繰り返しであることが特徴である。また、ピーク電流は 10 mA であり、1ms の RF パルス内にある合計 10,000 nC の電荷を 40 MeV まで加速することがこの加速器の目標である。

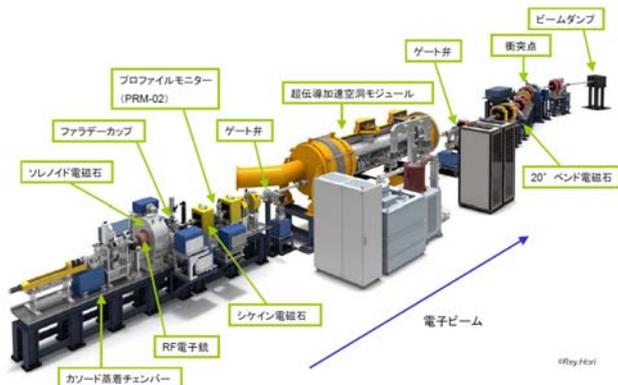


図 1 STF 加速器

表 1 ビームパラメーター

| | 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) |

一方、Phase 2 では、ビームパラメーターが異なる。これは、光電子生成用レーザー自体を別のものに切り替えて対応する。Phase 2 用のレーザーは既に準備が整っている。

ビームモニターとして、電子銃直下にファラデーカップ、キャプチャーモジュール上下流に計 2 機の ICT、ビームライン下流に WCM および ACCT、ビームライン中には 8 機のボタン電極型ビーム位置モニター、8 機の蛍光アルミナ板を用いたプロファイルモニターおよび 2 機のワイヤスキャナー (タングステンワイヤー: $10 \mu\text{m}$) が設置されている。また、光ファイバーと光電子増倍管を用いたロスモニターもビームライン下流に設置されている[10]。

入射部およびビームライン下流のオプティクス計算結果を図 3 に示す。入射部は GPT、ビームライン下流は SAD を用いて計算した。入射部は、RF 電子銃の電界強度を $E_{pk} = 46.7 \text{ MV/m}$ として計算した。これは現在使用しているクライストロンから最大投入電力 (4 MW) を供給し運転した場合を想定している。ガンレーザーのスポットサイズおよび各マグネットのパラメーターを最適化した結果、キャプチャーモジュール通過後で $< 1.5 \text{ [mm mrad]}$ になることが見積もられている。40 MeV まで加速された電子ビームは一つ目の 20° ベンドの手前にある 4 台の 4 極電磁石を用いて擬似衝突点にて一旦ビームサイズを $10 \sim 20 \mu\text{m}$ まで絞られる。ベンドの下流のオプティクスは擬似衝突点のビームサイズが再現されるように組まれている。キャプチャーモジュール通過後の規格化エミッタンスを 0.5 [mm mrad] を仮定した場合、ビームサイズは $10 \mu\text{m}$ まで絞られることが計算より見積もられている。

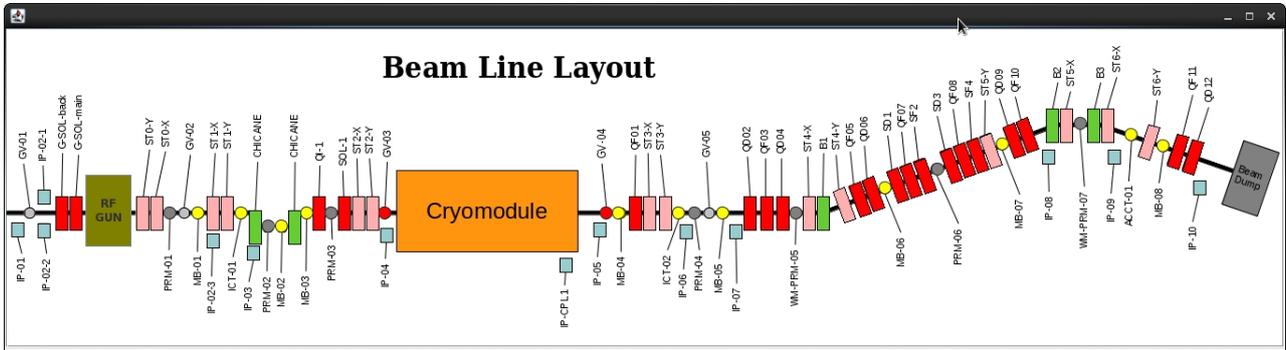


図2 ビームラインレイアウト

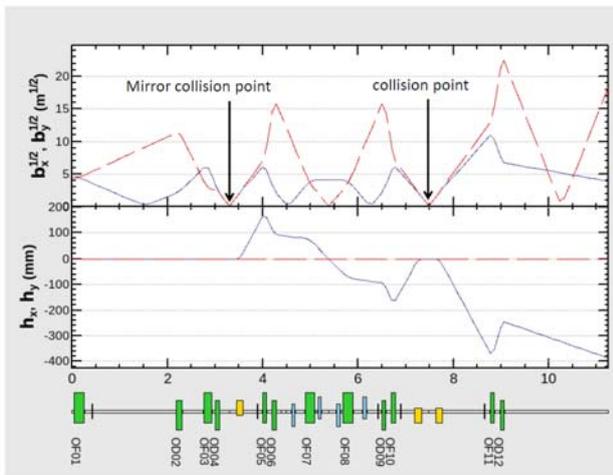
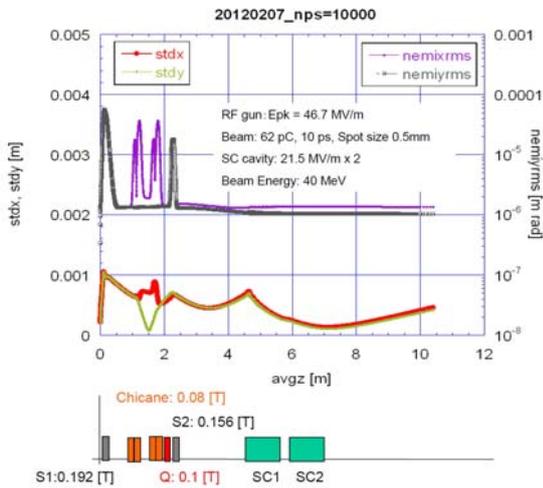


図3 入射部、ビームライン下流のビームサイズ

衝突点には 4 枚鏡を用いた光共振器が設置され、互いに 10 μm 程度まで絞られた電子ビームとレーザー (1064 nm) を正面衝突させることで、高輝度

の X 線が生成させる。生成された X 線はベリリウム窓を用いて検出器側へ透過させる。図 4 に生成される X 線のエネルギー分布と Photon 数の計算結果および光共振器のイメージ図を示す。また、X 線の検出には SOI などが用いられる。

3. STF 加速器のコミッショニング

3.1 運転体制

STF 加速器では超伝導加速空洞が納められたキャプチャーモジュールが使用され、超伝導加速空洞はヘリウム冷凍機を用いて 2 K に冷却される。ビーム運転中はこの温度を維持する必要がある。高圧ガス保安法により、STF で使用しているヘリウム冷凍機 [11] を運転するには、高圧ガス製造保安責任者試験の資格を有した保安係員による安全管理が必須である。現在の運転体制では 1 週間あたり延べ 9 人の保安係員が必要となり、KEKB、STF、ERL に所属する保安係員の協力で成り立っている。加えて、一般安全と放射線安全に対するシフトも必要であり、これは ATF、STF および Linac グループに所属する職員が対応している。ビームチューニングはビームチューニンググループが別途担当している。

図 5 に 1 週間を 1 サイクルとした通常運転におけるタイムテーブルを示す。

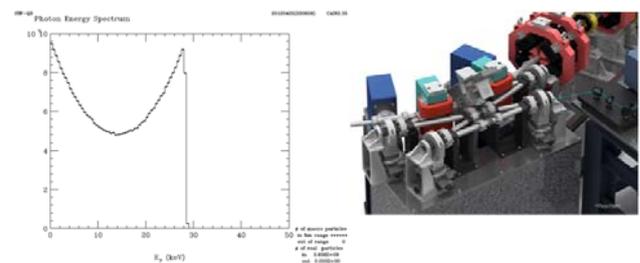


図4 生成される X 線の分布と Photon 数、光共振器 (イメージ図)

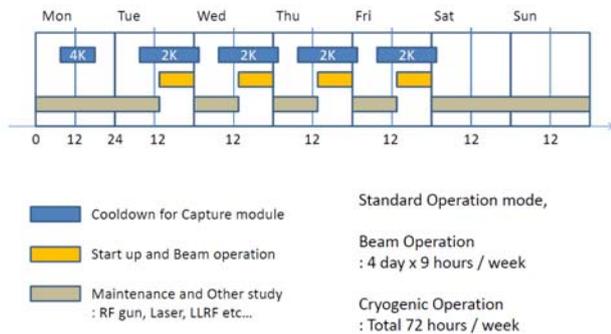


図5 1週間のタイムテーブル

3.2 コミッショニング

STF 加速器のコミッショニングは 2012 年 2 月 27 日から開始した。2012 年 2 月 27 日~4 月 11 日に RF 電子銃からのビーム取り出し試験およびキャプチャーモジュールの高電界試験が行われた。4 月 12 日にキャプチャーモジュール上下流のゲート弁を開き、40 MeV まで加速する試験運転が 7 月 13 日まで行われた。7 月 13 日に施設の放射線安全検査に合格し、運転が再開される 9 月からユーザー運転が可能となった。図 6 にコミッショニングの履歴を示す。

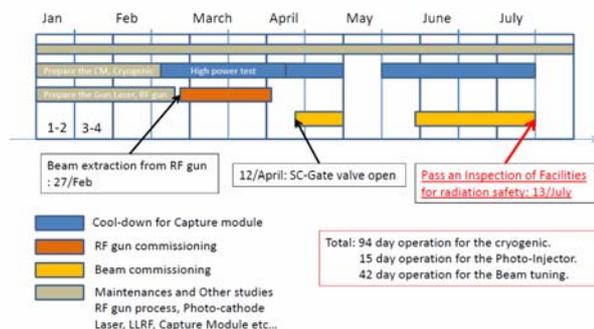


図6 コミッショニングの履歴

RF 電子銃からのビーム取り出し試験では試験開始直後にビーム信号を捉えることができ、その時のビームパラメータは 200~500 pC/bunch、36 bunches/pulse、エネルギー~4.5 MeV であった。その後、光電子生成用レーザー[12]、RF 電子銃の RF プロセスおよびカソードの調整を行い、3 月 22 日の段階で 1 ms 内のバンチあたりの電荷量がほぼ均一な flat beam (162,448 bunches/pulse、30-40 pC/bunch (4.8-6.5 mA)、~4 MeV、Input RF: 2.6 MW、1050 μs) の取り出しに成功した。その時の BPM-01 の応答を図 7 に示す。横軸は時間 (200 μs/div.)、縦軸は BPM の信号強度およびビームのゲート信号である。

4 月 12 日から行われた加速試験では大きく分けて 2 つの運転モードでビームチューニングを行った。表 2 に運転条件をまとめる。運転モードは RF 電子銃の RF のパルス長に対するトリップレートで決められたものであり、1 ms のビーム生成の際には 2.2

MW まで投入電力を落としている。RF 電子銃の電界強度が小さい分、規格化エミッタンスは大きくなる (GPT による計算では~4 [mm mrad] になると見積られている) [4]。そのため、低エミッタンスを必要としない LLRF の試験や大電流の取り出し試験などで使われる運転モード(1)である。10-20 μm のビームサイズを達成するには、少なくとも規格化エミッタンスで<1.5 [mm mrad] である必要であり、そのためには RF 電子銃の電界強度が高くなければいけない。暗電流、RF トリップ時のリカバリー時間および運転時のハンドリングの容易さなどの兼ね合いから 3.5 MW、250 μs を選択した。キャプチャーモジュールは RF 電子銃の運転モードに依存せず常にパルス幅 1.5 ms、1 ms flat top で運転している。要求されるビームエネルギーに合わせて加速電界を 10-25 MV/m の範囲で調整している。

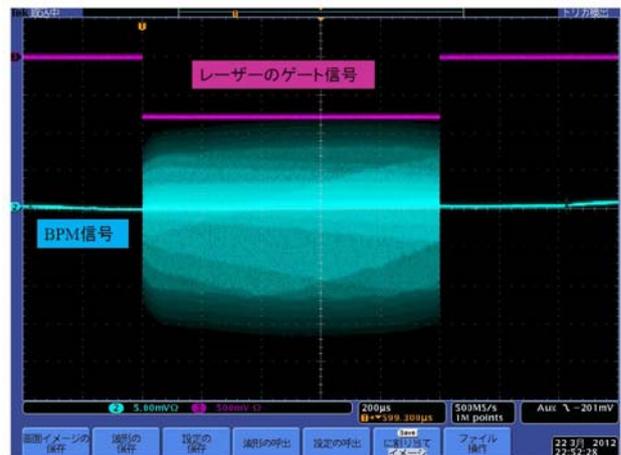


図7 1 ms 均一ビームの様子

表2 STF 加速器の運転モード

| | Operation mode (1) | Operation mode (2) |
|----------------|--|---|
| | 1 ms-long bunch | Beam focus |
| RF gun | 2.2 MW, 1050 μs, 5 Hz (Epk = 34.6 MV/m) Ave. 11.6 kW Load (Recovery time: 10~20 min) For beam tuning: 4-200 bunches Max 162,448 bunches Laser spot size: φ 3 mm | 3.5 MW, 250 μs, 5 Hz (Epk = 43.7 MV/m) Ave. 4.4 kW Load (recovery time: 1~2 min) For beam tuning: 4-200 bunches Max 32,500 bunches Laser spot size: φ 1 mm |
| Capture module | 1ms Flat top, 5 Hz Eacc: 10-25 MV/m | 1ms Flat top, 5 Hz Eacc: 10-25 MV/m |
| Optics | Commissioning optics | Collision optics (fig. 3) |
| Beam energy | 20 MeV for Phase 2 40 MeV for QB | |

運転モード(2)における擬似衝突点で測定した規格化エミッタンス (Horizontal) とビームサイズの測定結果を図 8 に示す。エミッタンスの測定は Q-scan 法を用い、ワイヤースキャナー直前にある QD04 を使用した。ビームサイズはワイヤースキャナーで測定した。

エミッタンスおよびビームサイズ測定時の電荷量は 35 pC/bunch であり、バンチ数は 40 bunches/pulse である。擬似衝突点における規格化エミッタンスはそれぞれ、0.82 [mm mrad] (Horizontal)、1.29 [mm mrad] (Vertical) であり、ビームサイズは約 22 μm であった。この状態でバンチ数を徐々に増やし、最小のビームロスで 30,000 bunches/pulse (184.5 μs) の加速に成功している。一方、衝突点におけるビームサイズは現在、36 μm に留まっており、ベンド以降のマグネットの調整や RF の位相の最適化などの微調整が必要である。また、10 μm のビームサイズの実現にはエミッタンスをさらに小さくする必要がある。このためには、RF 電子銃の電界強度をより高くする必要があり、さらなる RF プロセスおよびパワーソースの増強が必須である。

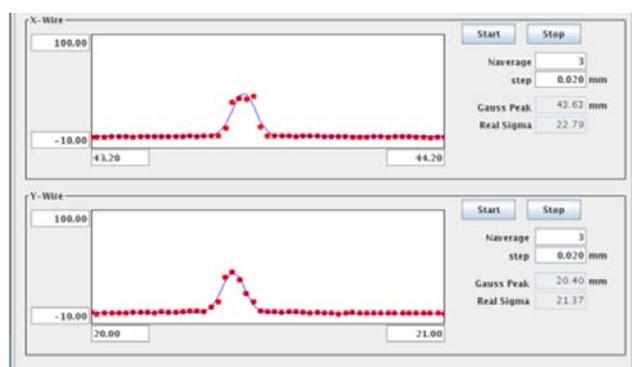
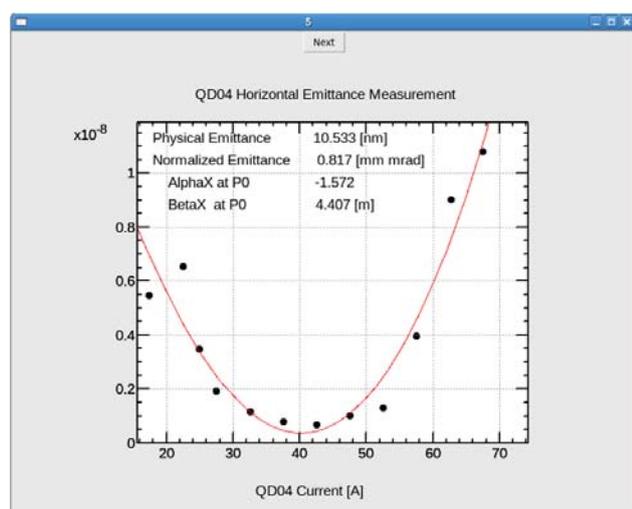


図 8 擬似衝突点における規格化エミッタンス (Horizontal) とビームサイズ (測定値)

マルチバンチビーム運転の進捗状況を表 3 にまとめる。マルチバンチビームによるビームローディング補正のための LLRF によるフィードバックは 4 月 20 日の段階で実装された[13][14]。現状では 7 月 10 日の段階でピーク電流 3.2-6.2 mA、162,448 bunches/pulse、40 MeV、5 Hz (ビームパワー: 975 [W]) のマルチバンチビームをビームダンプまで輸送するところまで達成している。

その他に 1 ms 中の各バンチのエネルギー差を評価するためのビーム位置測定技術の開発 (ATF-DR で使用された広帯域のクリッピングモジュールと FPGA ボードを用いる) や超伝導加速空洞に装着されている HOM カップラーからの高次モードの信号を利用したクライオモジュール内の加速空洞のミスアライメント計測法の研究[15]および電子銃に使用されている Cs₂Te カソードの量子効率の電場依存性 [16]といった研究なども行われている。

表 3 マルチバンチビーム運転の進捗状況

| Date | Number of bunches | Bunch Charge (peak current) | Beam Energy |
|---------------|-------------------|-----------------------------|-------------|
| 20/April/2012 | 10,000 | 20-25 pC (3.2-4 mA) | 40 MeV |
| 31/May/2012 | 80,000 | 25-40 pC (4-6.5 mA) | 20 MeV |
| 22/June/2012 | 30,000 | 50-57 pC (8-9.2 mA) | 40 MeV |
| 10/July/2012 | 162,448 | 20-40 pC (3.2-6.5 mA) | 40 MeV |

4. まとめ

2012 年 2 月末から STF 加速器のビームコミッションを開始し、約 5 ヶ月で目標の多くをクリアし、X 線生成が可能なビームの準備が整った。衝突点に設置する光共振器は 2012 年 9 月までに加速器に組み込まれ、9 月~11 月の 2 ヶ月の運転で X 線生成実験を行う予定である。

5. 謝辞

本加速器の建設およびビームコミッションを行うにあたって、所内の関係各所、各大学、各メーカーならびに各協力会社から多くの協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表したい。また、本研究は文部科学省の量子ビーム基盤技術開発プログラム「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビームの開発」のサポートのもとに行われた。

6. 参考文献

- [1] <http://kocbeam.kek.jp>
- [2] H.Hayano, "Status of Superconducting RF Test Facility (STF)", THPS096, in these proceedings.
- [3] H. Sugiyama et al., "L-band Photocathode RF gun at KEK-STF", 2011 J.Phys.: Conf.Ser.298 012015.
- [4] K.Watanabe et al., "1 ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photocathode RF gun", J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 9, No. 2, 2012.

- [5] S.Kashiwagi et al., “Development of a photocathode rf gun for the L-band linac at ISIR, Osaka University”, TUPEC009, IPAC10.
- [6] <http://accl.kek.jp/topics/topics101209.html>
- [7] Y.Yamamoto, “Construction and Beam Operation of Capture Cryomodule for Quantum Beam Experiment at KEK-STF”, THPS081, in these proceedings.
- [8] H.Shimizu et al., “Laser Stacking Cavity Development for Quantum Beam STF Collision Experiment”, THPS116, in these proceedings.
- [9] T.Miyoshi et al., “X-ray Detection Using SOI Monolithic Sensors at a Compact High-Brightness X-ray Source Based on Inverse Compton Scattering”, IEEE NSS 2012, under submitting.
- [10] Y.Yano et al., “Optical Fiber Beam Loss Monitor”, THPS021, in these proceedings.
- [11] J.Yoshida et al., “Development of STF Cryogenic System in KEK”, Proceedings of PAC07, THICKI04.
- [12] K. Sakaue, 9th High-brightness RF Electron Gun Workshop (2012) (in Japanese).
- [13] M.Omet et al., “Development and Application of a Frequency Scan-based Calibration method for the LLRF Systems at KEK-STF”, FRLR09, in these proceedings.
- [14] T.Matsumoto et al., “RF Source for Quantum Beam Experiment at KEK-STF”, THPS113, in these proceedings.
- [15] A.Kuramoto et al., “Misalignment Detection of Superconducting Cavities by Higher-order-mode at KEK-STF”, THPS078, in these proceedings.
- [16] S.Hosoda et al., “Generation of 1-ms pulse by Cs2Te photocathode in a RF electron gun”, THPS031, in these proceedings.