

## STF-2 加速器におけるビームチューニング BEAM TUNING IN STF-2 ACCELERATOR

福田将史<sup>#, A)</sup>, アリシエフ アレクサンダー<sup>A)</sup>, 帯名 崇<sup>A)</sup>, 栗木 雅夫<sup>B)</sup>, 坂上 和之<sup>C)</sup>, 島田 美帆<sup>A)</sup>, 中村 典雄<sup>A)</sup>, 野津 庄平<sup>B)</sup>, 早野 仁司<sup>A)</sup>, 本田 洋介<sup>A)</sup>, 松葉 俊哉<sup>D)</sup>, 松本 利広<sup>A)</sup>, 宮島 司<sup>A)</sup>, 森川 祐<sup>A)</sup>, 山本 康史<sup>A)</sup>, Masafumi Fukuda<sup>#, A)</sup>, Alexander Aryshev<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Masao Kuriki<sup>B)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>C)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Shohei Notsu<sup>B)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Shunya Matsuba<sup>D)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>, Yu Morikawa<sup>A)</sup>, Yasuckika Yamamoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> Hiroshima University

<sup>C)</sup> University of Tokyo

<sup>D)</sup> Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima University

### Abstract

We have been developing 1.3GHz 9-cell superconducting cavities for the international linear collider (ILC) at the Superconducting RF Test Facility (STF) in KEK. The goal of the STF Phase-2 project (STF-2) is to achieve the average accelerating gradient of 31.5MV/m which is the specification of gradient for the ILC, in beam acceleration tests. The ILC specified cryomodule which includes twelfth 9-cell superconducting cavities has been installed in the STF beamline. The cooling tests and the high-power RF tests has been continued since 2014. The beamline has been also extended for the beam test in FY2018. The beam operation carried out on between February and March in 2019. In that test, a 280 MeV electron beam with 56 nC total charge in 6  $\mu$ s was successfully generated at a repetition rate of 5 Hz. At that time, the accelerating gradient which estimated from the beam energy was  $33.1 \pm 0.7$  MV/m, and the achievement of the acceleration gradient of the ILC specification could be confirmed by this beam test. The gradient is in good agreement with that of 33.8 MV/m which calculated from the RF power stored in the superconducting cavities.

### 1. はじめに

KEK の超伝導リニアック試験施設棟(Superconducting RF Test Facility, STF)[1]では、国際リニアコライダー(International Linear Collider, ILC)[2]のための超伝導加速空洞の開発を行っており、現在は、STF Phase-2 (STF-2) 計画[3]が進められている。

STF-2 では、L-band (1.3GHz)の 9 セル超伝導加速空洞 12 台が納められた ILC の仕様を満たすクライオモジュール(CM1/2a)を製作し、ILC において要求される加速電界 31.5MV/m を実現することを目指している。

STF の地下ビームラインには、2012 年には Quantum Beam 計画[4]において、2 空洞が収納されたクライオモジュール(以降、Capture Cryomodule: CCM と呼ぶ)がすでに導入されている。その後、STF-2 のためにビームラインを延長し、合計 12 空洞が収納されたクライオモジュール(上流から 8 空洞目までを CM1、下流の 4 空洞までを CM2a、総称して CM1/2a と呼ぶ)を新たに導入し、これまでに冷却試験や、RF 試験は行ってきた[5, 6]。2018 年度には CM1/2a 下流のビームラインも構築し、2019 年 2 月からは、31.5MV/m 以上の加速電界でのビーム加速試験を行うためのビーム運転を開始した。今回のビーム運転は同年 3 月まで行われた[7]。

この運転の目的の 1 つは、ビームライン延長に関する放射線申請の変更に伴い行われる原子力規制庁の検査を通過することである。このためには、最大出力 20%

以上で電子ビームを生成し、ビームダンプまでロスなく通すことが必要となる。もう 1 つは、加速器システムの動作確認および生成した電子ビームの特性測定である。

今回ビームラインを延長に伴い最大定格を Table 1 のように変更した。入射器モードと LINAC モードの 2 種類があり、それぞれにおいて最大定格を設けている。

Table 1: STF-2 Maximum Rating

	入射器モード	LINAC モード
ビームエネルギー	45MeV	500MeV
最大ビーム電流	30nA	300nA
最大ビームパワー	1.35W	135W

### 2. STF-2 加速器

#### 2.1 ビームライン

STF-2 では、電子源として L-band(1.3 GHz)フォトカソード RF 電子銃を用いている。カソードには Cs2Te を蒸着しており、そこに 266 nm の紫外レーザー光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。この紫外レーザー光をカソードに垂直入射するために、すぐ下流の Chicane の間にあるミラーで上流方向へ反射させ、真空窓を通してビームラインに合流し、カソードへ入射できるようになっている。また、このカソードの量子効率率は 0.3%となっている。

<sup>#</sup> mfukuda@post.kek.jp

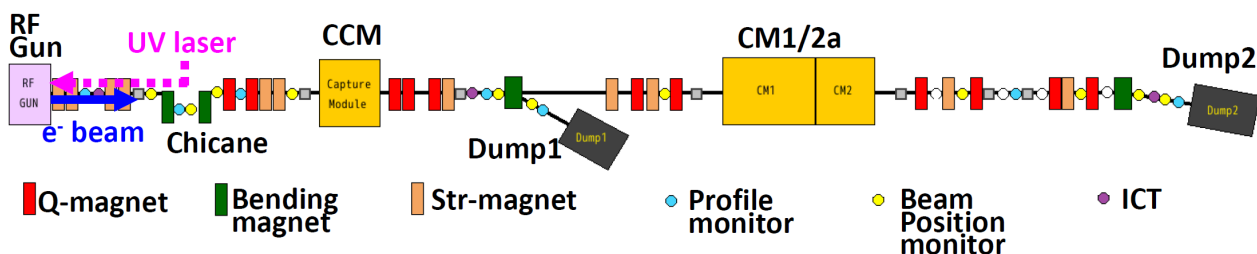


Figure 1: STF-2 Beam line layout.

STF-2 のビームラインのレイアウトは Fig. 1 のようになっている。この RF 電子銃で生成した電子ビームは、最初に CCM で 40 MeV まで加速する。入射器モードでは、この下流にある 30 度偏向電磁石で曲げて、ビームダンプ 1 へダンプする。LINAC モードでは、この 30 度偏向電磁石は OFF にして、ビームはそのまま通過させ、CM1/2a でさらに 280 MeV まで加速し、下流にある 10 度偏向電磁石で曲げてビームダンプ 2[8]へダンプする。

ビームラインには電子ビームを輸送するための四極電磁石、ステアリング電磁石を配置し、さらにビームモニタとしてアルミナ蛍光版や Optical transition radiation(OTR) 光を利用したプロファイルモニタ、ボタン電極型のビーム位置モニタ、ビーム電流モニタ(Integrating Current Transformer, ICT)を各所に設置している。

RF 電子銃、CCM、CM1/2a への RF パワーの供給は、それぞれ 5 MW クライストロン、800 kW クライストロン、10 MW マルチビームクライストロンを用いて行っている。これらクライストロンは地上部に設置され、導波管を通して地下のビームラインへ RF を供給している[9,10]。

## 2.2 電子銃用レーザーシステム

今回の運転で使用した電子銃用レーザーシステムは、6 $\mu$ s のパルス(1000bunches)当たり 0.28mJ/6 $\mu$ s の紫外レーザー光の生成を目標として構築した。これは、RF 電子銃の Cs<sub>2</sub>Te カソードの量子効率を 0.1%と仮定した場合に、最大ビーム電流である 300nA の電子ビームを生成するために必要となる量である。この電流量は 6 $\mu$ s のパルス幅の場合、電荷量 60nC/6 $\mu$ s でパルス繰り返し 5Hz のビームに相当する。

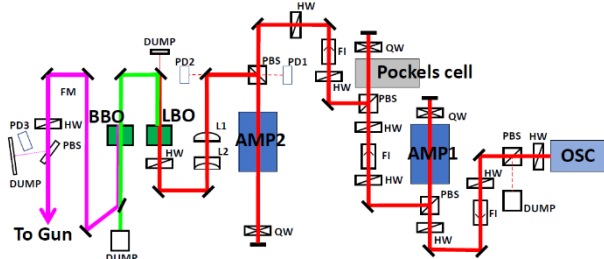


Figure 2: STF Gun laser system.

Figure 2 は、レーザーシステムのレイアウト図である。発振器としては Time-bandwidth 社製の 162.5MHz モードロックレーザーを用いている。波長は 1064nm で、出力は 12W である。レーザーを増幅するための Laser Diode 励起の増幅器が 2 台あり、1 台目で増幅した後で、ポッケルセルにより、最大 1000 バンチ(6 $\mu$ s)切り出し、さら

に 2 台目の増幅器で増幅する。その後、LBO 結晶で 532nm に、そして BBO でさらに 266nm に紫外レーザー光に波長を変換し、RF 電子銃へと送る。

実際に生成した紫外レーザー光のパルスエネルギーは、1.2mJ/6 $\mu$ s となり、必要な 0.28mJ/6 $\mu$ s を十分上回るものになっている。カソードの量子効率は 0.3%であったので、十分余裕をもったパワーでビーム運転できた。

また、発振器のモードロックレーザーは、加速器の基準信号から分周した参照用の 162.5MHz の RF 信号と Phase locked loop(PLL)により同期をとることで、電子ビームを生成するレーザーパルスと加速 RF 位相の同期をとっている。

## 3. ビーム輸送調整

### 3.1 軌道調整

CM1/2a を導入したビームラインでの初運転となるため、まず電子ビームをビームダンプ 2 まで通す調整を行った。この軌道調整で難しいと予想されたのは、クライオモジュールを通すことである。特に CM1/2a は全長 20 m あり、その下流の最初のビームモニタまで含めると 26 m の区間をビームモニタがない状態で通すことになる。この間で軌道がずれても RF 位相がずれていてもビームは通らない。

そこで手前までの四極電磁石の中心を通るようにビーム軌道を調整後、一旦クライオモジュール前後の四極電磁石を OFF にし、磁場でビームが蹴られないようにした。その上で空洞の RF 位相を変えながら、上流のステアリング電磁石を使ってビーム軌道を動かし、下流でビーム信号を捉えるまでこれを繰り返した。一度ビーム信号が見えれば、通過して来るビーム電流が最大になるように RF 位相を調整し、ビームモニタで軌道を確認しつつ、中心を通過するように軌道を調整し、最後に四極電磁石の磁場をデザイン値まで上げ、ビームがロスなく通るように微調整した。その後、ビームトランスミッションが最大になり、ビームロスが最小になるよう、四極電磁石やステアリング電磁石を調整しながら、検査を受けられる最大ビームパワーの 20%以上になるように徐々に電流を上げていった。

### 3.2 ビームロスの場所

Figure 3 は、インスタントカメラ用のフィルムをビームラインに約 3 週間貼り付けてビームロスの様子を見たものである[11]。ビームロスがあるところでは感光し明るくなる。これを見ると、CCM や CM1/2a の入り口でもややロスがあるが、偏向電磁石で曲げてビームダンプ 2 へ向かうラ

インで、ビームロスが多いことが分かる。

Figure 4 の偏向電磁石後のビームプロファイルを見ると、低エネルギー側にエネルギーテイルを引いており、これが原因の一つであると推測される。RF 位相を調整した状態でもテイルが残っているのは、バンチ長が長いためである可能性がある。今回の運転では、RF 電子銃への入力 RF パルスのピークパワーは 2.5MW で、Quantum beam 計画時の 3.5MW よりも低かった。このため、うまくバンチングできず、パルス幅が伸びている可能性がある。今後シミュレーション等で確認する予定である。

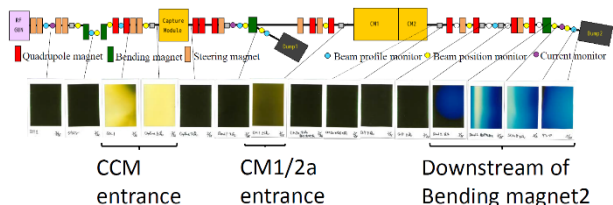


Figure 3: Result of the beam loss measurement by using films for instant camera.

### 3.3 放射線漏洩検査

ビーム調整後、事前に KEK の放射線管理センターの方で運転中の漏洩放射線量を測定してもらい、すべての個所で基準値以下であることを確認した後、原子力規制庁による検査を受けた。その際 263 MeV, 38 nC/pulse, 1000bunches/pulse, 5 Hz の電子ビームで運転し、この時のビームパワーは約 50 W と最大ビーム出力の 37% であった。このビーム出力で検査を受けて無事通過し、今回の運転の目的の一つを達成できた。

## 4. 電子ビームのパラメータ測定

### 4.1 ビームエネルギー

CCM および CM1/2a 下流の各々の電子ビームのエネルギーは、それぞれの下流にある偏向電磁石の磁場強度  $B[T]$  と曲率半径  $\rho[m]$  から  $P[MeV/c] = 300B\rho$  を用いて算出している。エネルギー測定の際には、ビームが軌道中心を通るように偏向電磁石の磁場強度を調整し、また、上流の四極電磁石で蹴られて偏向電磁石の入射位置や角度がずれないように四極電磁石の中心を通すように調整した。

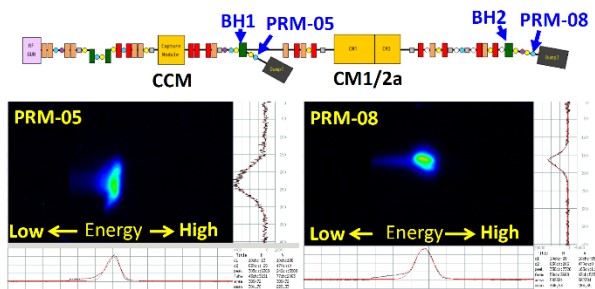


Figure 4: Beam profiles at the beam profile monitor of PRM05 and 07 which are the downstream of the bendmanet1 and 2 respectively.

Figure 4 は、この調整後に偏向電磁石下流で撮影したビームプロファイルある。水平方向にビームを曲げているので、この軸がエネルギーに対応しており、右側が高エネルギー側となる。また、この軸のビームサイズがエネルギー広がりを表しており、RMS で約 0.1% だった。ただ、低エネルギー側にエネルギーテイルが見られ、これは加速管の RF 位相の調整では消すことができなかった。3.2 節で述べたように、バンチ長が長い可能性があるが、調査中である。

Figure 5 は、CCM、CM1/2a に RF を供給しているそれぞれのクライストロンの RF 位相をスキャンし、エネルギーの変化を測定した結果である。運転時の RF 位相は、エネルギー広がりが一番小さくなる場所に合わせさせており (Fig. 5 中の青矢印)、ほぼオンクレストにビームを載せている。

クライオモジュール内の各加速空洞間の位相は、運転前にネットワークアナライザを用いて確認しながら、導波管長や移相器を用いて調整し、電子ビームが各空洞で同位相に載るように合わせた。また、実際の電子ビームでも同位相に載るように、各空洞の RF 位相を微調整している。

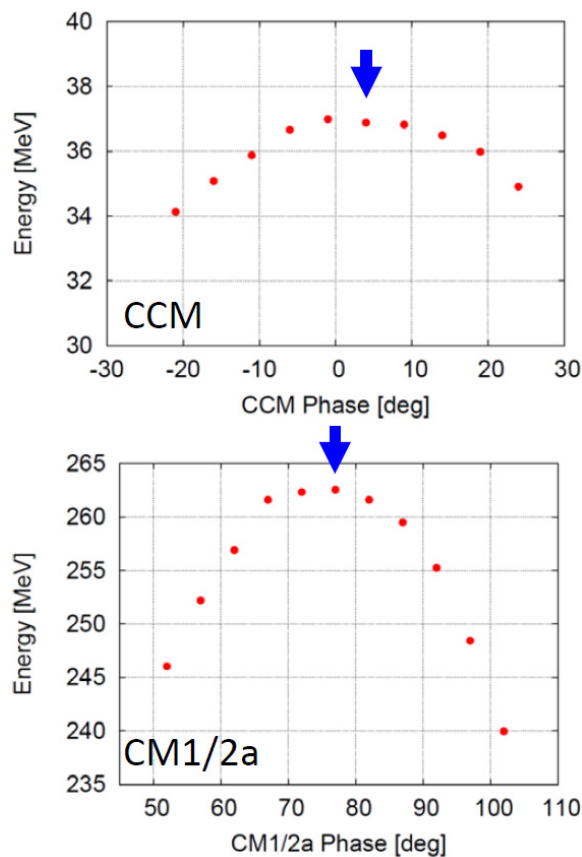


Figure 5: Beam energy as a function of the RF phase of the CCM and the CM1/2a.

このような調整を行い測定した CCM および CM1/2a 下流でのビームエネルギーは、それぞれ  $40 \pm 2$  MeV,  $280 \pm 3$  MeV となった。また、この差と CM1/2a で加速に用いた空洞の長さの合計から平均加速電界が計算できる。

CM1/2a 内では空洞長 1.035 m の空洞 7 台でビーム加速をしているので、平均加速電界は、 $33.1 \pm 0.7$  MV/m となる。パルス幅 6  $\mu$ s の電子ビームではあるが、実際のビーム加速において ILC で要求されている加速電界の達成を確認できた。さらに、空洞に蓄積している RF パワーから推定した加速電界が 33.8MV/m となっており[7]、ビーム加速により求めた加速電界と良く一致している。

#### 4.2 電子ビーム電流

今回の運転では、最終的に 280 MeV, 56 nC/1000 bunches(6  $\mu$ s), 5 Hz のビーム生成を達成しており、電子ビームカレントにおいては、ほぼ最大定格で運転できた。

電子ビームのカレントの安定性を見ると、ショット毎のカレントジッターは RMS で約 3%と安定していた。一方で、ビームカレントのドリフトや急な変化が起こることがあった。このとき電子銃用レーザー光と加速 RF の相対位相のドリフトやジャンプが確認されている。RF 電子銃では、この相対位相によって電子銃から出射される電流量が変化するため、この位相のドリフトやジャンプは、カレントのドリフトやジャンプとして観測される。

PLL による同期のために、レーザー発振器内の共振器長をピエゾで調整している。この調整量にカレントが同期することもあるため、原因の一つは PLL に起因するものと推測されているが、PLL による調整とは関係なく、カレントが変化することがあり、他の原因もあるものと推測されており、今後調査する予定である。

#### 4.3 エミッタンス

電子ビームのエミッタンス測定には、四極電磁石の磁場強度スキャンしたときのビームサイズの変化からエミッタンスを求める Q スキャン法を用いた。ビームサイズは四極電磁石下流にある OTR プロファイルモニターで測定している。CCM および CM1/2a での加速後に、各々の場所で撮影したビームプロファイルと Q スキャン時のビームサイズ測定の例をそれぞれ Fig. 6、Fig. 7 に載せた。

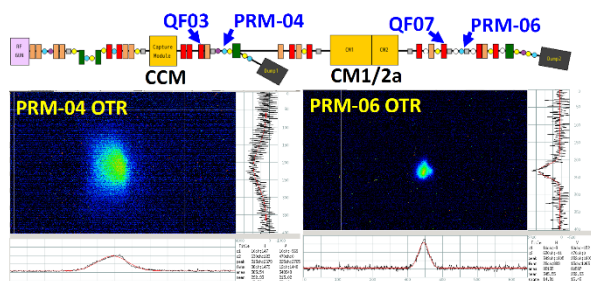


Figure 6: Beam profiles at the beam profile monitor of PRM04 and 05 which are the downstream of the bendmanet1 and 2 respectively.

測定された規格化エミッタンスは、CCM 下流で水平、垂直方向とも約 10 mm mrad、CM1/2a 下流では水平方向で 70-90 mm mrad、垂直方向で 35-53 mm mrad となっており、このときのビームエネルギーはそれぞれ 40 MeV および 280 MeV で、バンチ電荷は両者とも約 60-70 pC/bunch である。この測定は 100 バンチの電子ビームで

行っている。

2012 年の Quantum Beam 計画で CCM 後に測定された時は、エネルギー 39 MeV、バンチ電荷 39 pC で、エミッタンスは約 1 mm mrad である[5]。この部分は今回の運転でも同じビームライン構成になっているが、エミッタンスは以前の結果を再現しておらず、10 倍悪くなっている。また、CM1/2a 通過後に、7-9 倍のエミッタンス悪化が見られる。

この場所でのビームサイズは約 200  $\mu$ m であり、Dispersion は約 20 mm、エネルギー広がりは約 0.1%であったので、Dispersion によるビームサイズ測定への影響は無視できる。

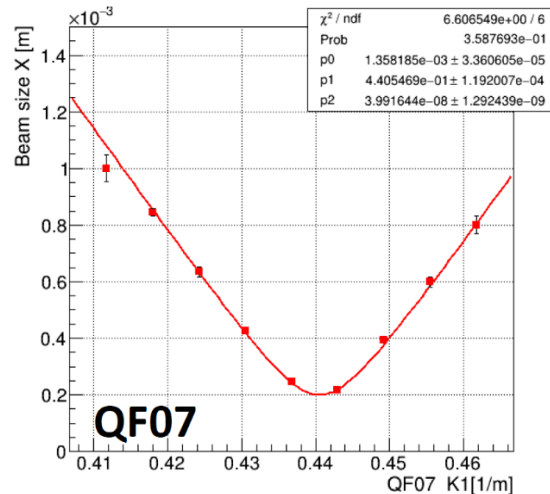
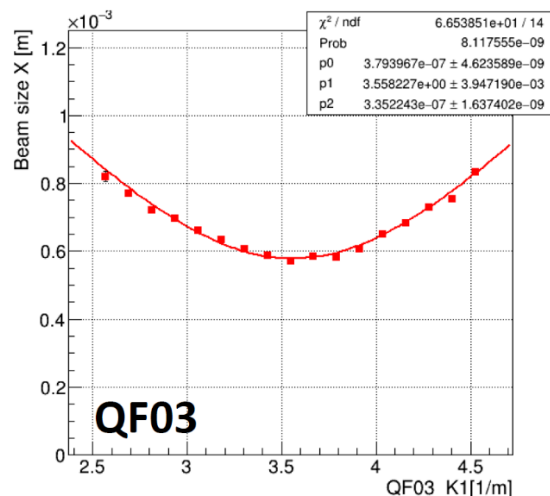


Figure 7: Beam size as a function of the K value of QF3 and QF7.

今のところ原因は特定できていない。超伝導空洞には水平方向にカップラーが付いているので、この影響(カップラーキックという)がないか調べるために、CM1/2a において、その方向に軌道オフセットつけてエミッタンスを測定したが、大きな変化は見られなかった。また、今回は RF 電子銃の入力 RF パワーが 2.5 MW と以前より低く加速電界が低いため、空間電荷効果がより大きく影響している可能性もあるが、バンチ電荷を半分の 20 pC/bunch

にしても、エミッタンスは 10%程度しか下がらず、カレント依存は小さかった。

## 5. まとめと今後

今回のビーム運転では、原子力規制庁の検査を無事通過し、また、エネルギー、カレント、エミッタンスなど電子ビームの特性を測定できており、今回の運転目標を達成することができた。Table 2 にあるように最終的に 280 MeV, 56 nC/pulse, 1000 bunches(6  $\mu$ s)/pulse, 5 Hz で、ビームパワーにすると 78 W で最大定格の 58%の電子ビームを生成し、さらに、平均加速電界では ILC の要求する加速電界を超える  $33.1 \pm 0.7$  MV/m を CM1/2a において出すことに成功した。これは ILC の要求する 31.5MV/m 以上の加速電界を実際の電子ビーム加速で確認したことになり、非常に重要な結果である。一方で、規格化エミッタンスは 35-90 mm mrad と悪く、また、加速 RF と電子生成用のレーザーとの位相同期のドリフトやジャンプに起因するカレントの不安定性が見られるなど課題も見えてきた。

Table 2: Measured Beam Parameters in this Beam Test

ビームエネルギー	280MeV
ビーム電流	280nA
ビームパルス電荷	56nC/pulse, 1000bunches(6 $\mu$ s)/pulse
パルス繰り返し	5Hz
ビームパワー	78W
平均加速電界	33.1MV/m (CM1/2a)

今後は、ビームのエミッタンス改善するために RF 電子銃の RF プロセスを進め 3.5MW 入力できるようにすることや、ビームの安定化のために、レーザー装置やその電源まわりの温度安定化や、加速 RF との同期信号の安定度の調査などを行っていき、次回のビーム運転に向けての準備を進めていく予定である。

## 謝辞

今回のビームライン建設で使用した偏向電磁石は SuperKEKB グループのご厚意により借用させていただいたものです。この際に KEK の多和田正文氏、増澤美佳氏、原田健太郎氏、長橋進也氏にご協力頂きました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] <https://ilc.kek.jp/STF/>
- [2] ILC Technical Design Report (2013); <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [3] Y. Yamamoto *et al.*, “ILC に向けた STF Phase-2 計画の進展”, 高エネルギーニュース 34-4, 277 (2016).
- [4] H. Shimizu *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A 772, 26-33 (2015).
- [5] Y. Yamamoto *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A, 729, 589-595 (2013).
- [6] T. Shishido *et al.*, “Assembly and Cool-Down Tests of STF2

- Cryomodule at KEK”, Proceedings of SRF2015, TUPB109, Whistler, BC, Canada.
- [7] Y. Yamamoto *et al.*, “Successful beam commissioning of STF-2 accelerator for ILC”, in this meeting.
  - [8] Y. Morikawa *et al.*, “Development of STF Beam Dump”, in this meeting.
  - [9] T. Matsumoto *et al.*, “Status of low-level rf control system for STF2 accelerator at KEK”, in this meeting.
  - [10] K. Tsutsumi *et al.*, “Construction of RF Power Distribution System for Stable Beam Operation for STF2 Accelerator at KEK”, in this meeting.
  - [11] Y. Honda *et al.*, “Radiation Distribution Measurement at cERL with a General Purpose Imaging Film”, Proc of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, pp. 1231-1233.