

ILC に向けた STF-2 加速器のビームコミッショニング

SUCCESSFUL BEAM COMMISSIONING OF STF-2 ACCELERATOR FOR ILC

山本康史^{#, A)}, 加古永治^{A)}, 宍戸寿郎^{A)}, 梅森健成^{A)}, 阪井寛志^{A)}, 佐伯学行^{A)}, 許斐太郎^{A)}, 松本利広^{A)}, 道園真一郎^{A)}, 江木昌史^{A)}, 明本光生^{A)}, 荒川大^{A)}, 片桐広明^{A)}, 川村真人^{A)}, Qiu Feng^{A)}, 中島啓光^{A)}, 三浦孝子^{A)}, 早野仁司^{A)}, 福田将史^{A)}, 本田洋介^{A)}, 中村典雄^{A)}, 宮島司^{A)}, 帯名崇^{A)}, 島田美帆^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, 栗木雅夫^{C)}, 松葉俊哉^{C)}, 野津庄平^{C)}, 坂上和之^{B)}, 仲井浩孝^{A)}, 小島裕二^{A)}, 原和文^{A)}, 本間輝也^{A)}, 中西功太^{A)}, 清水洋孝^{A)}, 近藤良也^{A)}, 山本明^{A)}, 木村誠宏^{A)}, 荒木栄^{A)}, 森川祐^{A)}, 佐波俊哉^{A)}, 大山隆弘^{A)}, 高原伸一^{A)}

Yasuchika Yamamoto^{#, A)}, Eiji Kako^{A)}, Toshio Shishido^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Takayuki Saeki^{A)}, Taro Konomi^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Masato Egi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Masato Kawamura^{A)}, Feng Qiu^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Takako Miura^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Masafumi Fukuda^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, Masao Kuriki^{C)}, Shunya Matsuba^{C)}, Shohei Notsu^{C)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Hirotaka Nakai^{A)}, Yuuji Kojima^{A)}, Kazufumi Hara^{A)}, Teruya Honma^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Hirotaka Shimizu^{A)}, Yoshinari Kondou^{A)}, Akira Yamamoto^{A)}, Nobuhiro Kimura^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Toshiya Sanami^{A)}, Takahiro Oyama^{A)}, Shin-ichi Takahara^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} University of Tokyo

^{C)} Hiroshima University

Abstract

Beam commissioning of STF-2 accelerator was carried out in Superconducting RF Test Facility (STF) at KEK from Feb. to Mar. 2019. After tuning cavity, RF, and beam, electron beam energy finally reached 280 MeV, and average accelerating gradient of each cavity estimated from beam energy was 33.1 MV/m. This is an important milestone in technology demonstration as well as a result that exceeds the ILC specification of 31.5 MV/m. In this presentation, outline of beam commissioning will be described.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の超伝導高周波試験施設(Superconducting RF Test Facility: STF)では、2006年から国際リニアコライダー(International Linear Collider: ILC)計画にとって基幹技術である超伝導空洞およびクライオモジュール(超伝導空洞が収納された状態の断熱真空容器の呼び名)の技術開発が進められてきた。これまでに実施されてきた実験計画は4つで、Table 1の通りである。

Table 1: Four Experimental Projects in STF

Project	Experimental period
STF Phase-1 (STF-1) [1]	F.Y. 2008~2009
S1-Global [2]	F.Y. 2010~2011
Quantum Beam [3]	F.Y. 2012~2013
STF Phase-2 (STF-2) [4, 5]	F.Y. 2014~

ILCはenergy frontier machineであるため、出来るだけ高い加速勾配で運転することが求められており、STFでは高加速勾配に到達できる超伝導空洞の開発が行われ

てきた。2014年度から実験を開始したSTF-2計画のクライオモジュールにはILC仕様である35 MV/m以上に到達した空洞が9台インストールされ(クライオモジュール全体では12台)、2019年2~3月に行われた4回目の冷却試験でILC仕様を上回る高加速勾配でビーム運転を行なった。Table 2はビーム運転におけるILC仕様である。

Table 2: ILC Specification in Beam Operation [6]

Item	Specification
Accelerating gradient	31.5 MV/m
Q ₀	1.0 x 10 ¹⁰
Drive Frequency, Mode	1.3 GHz, TM ₀₁₀ , π-mode
Cavity fill time	924 μsec
Beam pulse length	727 μsec
Total RF pulse length	1650 μsec
Pulse repetition rate	5 Hz
Beam current	5.8 mA
Operational temperature	2 K

[#] yasuchika.yamamoto@kek.jp

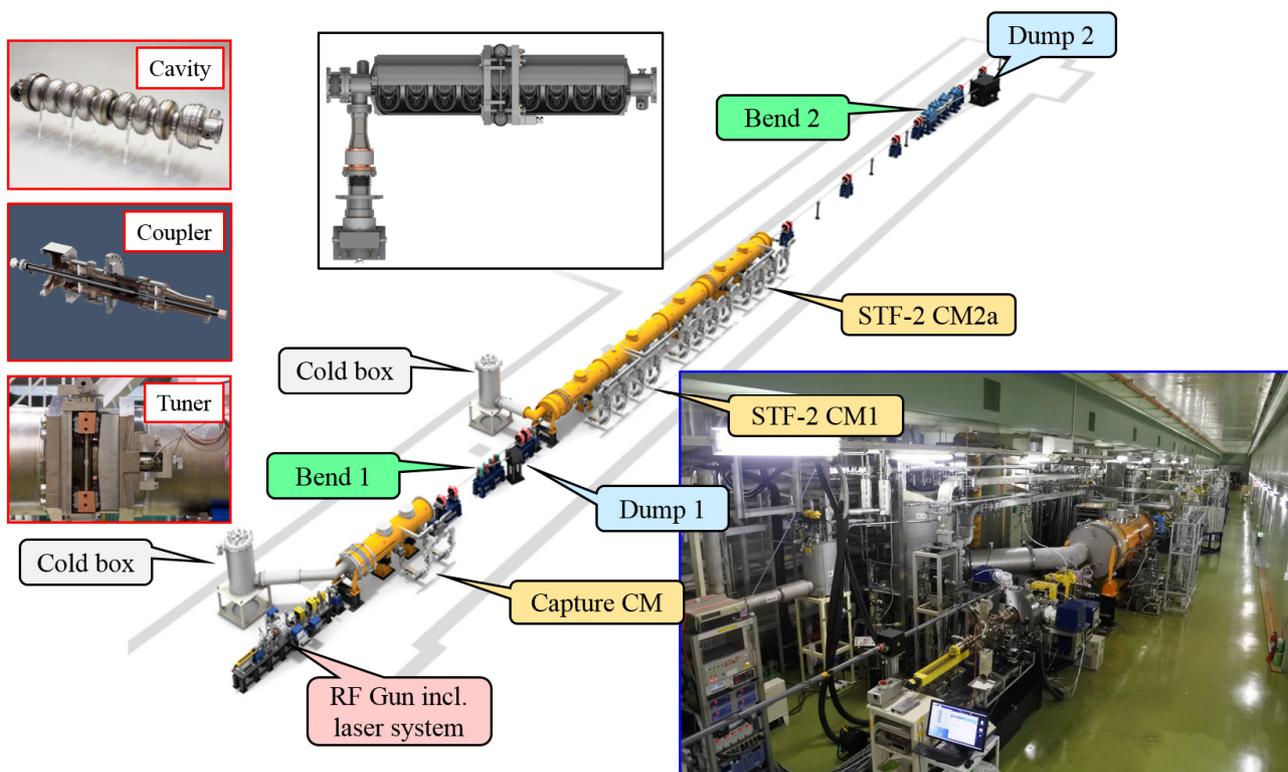


Figure 1: Schematic view of STF-2 accelerator including photos of STF cavity, power coupler, frequency tuner system and STF tunnel.

2. STF-2 加速器のビームライン建設

STF-2 加速器のビームライン建設は 2018 年 8 月から始まり、2019 年 1 月に完成した。Figure 1 は STF-2 加速器の概要図である。赤枠内の写真は、上から STY タイプ空洞、カップラー、チューナー、である。青枠内写真は完成後のトンネル内の様子である。STF-2 加速器は入射部と主リニアック部に分かれている。入射部は Quantum Beam 計画にてすでに完成しており RF 電子銃やシケイン部、2 空洞が収納されたキャプチャークライオモジュール(Capture Cryomodule: CCM)で構成される。主リニアック部には 12 空洞が収納されたクライオモジュール(8 台収納された方を CM1、4 台収納された方を CM2a と呼ぶ。モジュール全体で CM1/2a と呼ぶ。)が設置されており、ここで平均加速勾配が 31.5 MV/m のビーム加速を行なう。中流部と下流部にそれぞれベンド型電磁石(Bend1, 2)およびビームダンプ(Dump1, 2)が設置されている。

ビームダンプについては[7]を参照されたい。CM1/2a の下流には将来、さらに新たなクライオモジュールを設置するためのスペースを設けている(STF-2 計画は、計 24 空洞を用いた 3 台のクライオモジュールを建設し、ビーム運転を行なうことが最終目標である)。

今回のビーム運転では、放射線漏洩の程度を考慮しつつ、放射線施設検査に確実に合格するため、最大ビームエネルギー 500 MeV、最大ビーム電流 300 nA、最大ビーム出力 135 W で申請した。

2015 年に実施した 2 回目のクライオモジュール試験(以下、モジュール試験と略す)にて CM1 に収納された 3 空洞に著しい性能劣化が見られたが[5]、この原因として考えられたのは、CM1 の 2 つの空洞ストリング(4 台の空洞が連結された状態のことで、両端はゲート弁で閉じられている)を接続する際に用いていた局所クリーンルームおよび真空排気系の性能に問題があったということである。CM1 と CM2a の間をつなぐビームパイプも同様の作業環境で接続されており、さらなる性能劣化を引

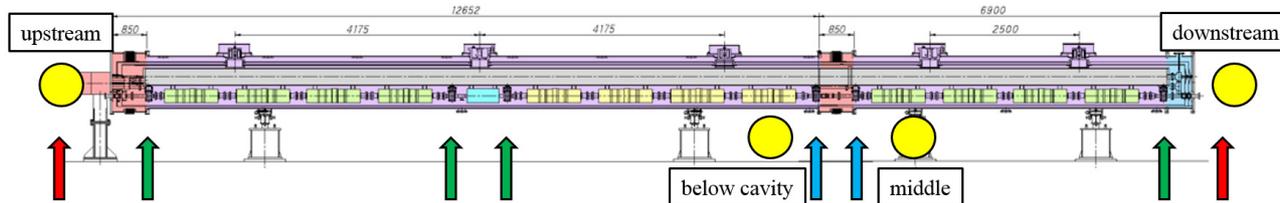


Figure 2: Position of gate valves (colored arrows) and radiation monitors (yellow circles) attached at CM1/2a.

き起こす恐れがあったため、今回のビームライン建設に合わせて CM1 と CM2a の間を繋いでいるビームパイプの再接続作業も行うことになった。新型エアフィルターシステムに加えて、低速度真空排気システム、真空対応パーティクルカウンター、クライオモジュールにジャストフィットする局所クリーンルーム、などを揃えて万全の態勢で臨むことになった[8]。作業はスムーズに行なわれ、後述するように性能劣化を生じることはなかった。Figure 2 の色付き矢印は CM1/2a の内部、および前後に取り付けられているゲート弁の位置を示している。緑色矢印が 2014 年に開放したもの、水色が今回のビームパイプ再接続作業後に開放したもの、赤色がビームコミッション直前に開放したもの、である。ゲート弁を開放することは、超伝導空洞内部が外環境に対し無防備になるということで、ダスト混入の危険性が高くなり、結果として field emission の影響も受けやすくなる、ということの意味する。そのため、ビーム運転期間中も運転を行っていない夜間や週末は両端のゲート弁(赤色)は閉状態にしていた。

ビームライン接続には先に導入したエアフィルターシステムを用い、2 名がビームライン両脇に立ち、清浄環境下で作業を行った。Figure 3 は作業中の様子を示している。ILC 建設時にもトンネル内で同様の作業が行われるはずで、今回の作業は良い経験となった。



Figure 3: Status of construction of beamline in STF-2 accelerator.

3. クライオモジュールの性能

STF-2 加速器に用いられている超伝導空洞の数は、CCM が 2 台、CM1/2a が 12 台の計 14 台である。CM1/2a は性能の良い 8 空洞のみに導波管が接続されており[9]、運転に使われている。また、今回のモジュール試験では冷却後に 1 台の空洞(Cavity#4)のチューナー部品に不具合が生じ¹、運転から外されることになった。2016 年に行った 3 回目のモジュール試験にて一部の空洞の加速勾配に劣化が見られたため[5]、今回はショートパルス (Table 2 の beam pulse length を 100 μ sec にすること)によるエイジングから始めた。Figure 4 はエイジング後の全

¹ チューナー用モーターと連結される市販品である高真空用回転フィードスルーの故障であった。交換可能であるため、今後の運転に支障はない。

空洞の最大加速勾配である。CM1/2a の 7 空洞の平均値は 33.8 MV/m であった。性能劣化が見られた空洞も 2015 年に行った 2 回目のモジュール試験の加速勾配まで性能が回復した。

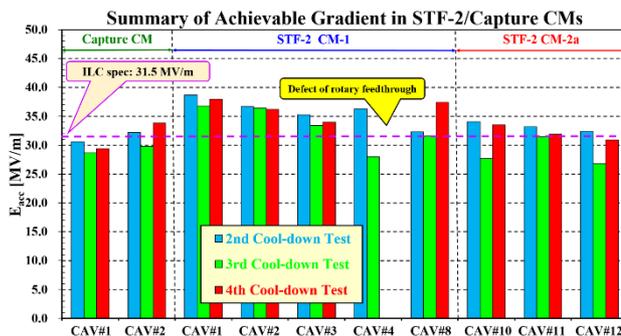


Figure 4: Achievable accelerating gradient in CCM and CM1/2a. CAV#4 was not used in beam commissioning due to defect of frequency tuner component.

空洞の熱負荷は、クライオモジュールから冷凍設備へ戻っていくヘリウムガス流量から求められる。測定手順は、静的熱負荷の測定→動的熱負荷(7 空洞合計)→動的熱負荷(7 カップラー合計)→静的熱負荷、の通りである。静的熱負荷とはクライオモジュールに高周波を投入していない状態での消費熱のことであり、動的熱負荷とは高周波を投入している状態での消費熱である。さらに、動的熱負荷には 2 パターンあり、空洞のチューニングが取れている場合とそうでない場合とに分かれる。チューニングが取れている場合は、高周波は空洞内まで伝播するが、取れていない場合(これを離調、あるいは detune ともいう)はカップラー先端部で全反射となる。これにより、カップラーのみの動的熱負荷の測定が可能となる。カップラーは、空洞と常温とを物理的につなげる高周波機器であり、ここからの熱侵入を如何に小さくするかが一つのキーポイントである。Figure 5 は熱負荷を無負荷 Q 値 (unloaded Q、慣習的に Q_0 と書く)に直したプロットで、3回

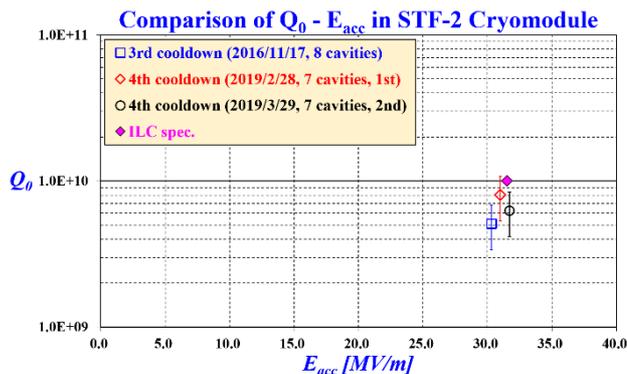


Figure 5: Comparison of unloaded Q (Q_0) between three measurements and ILC specification.

目のモジュール試験(2016年に実施)の結果を含む3つの点が表示されている。誤差は、主に静的熱負荷の再現性およびヘリウムガス流量計の測定値のばらつきから求められた。赤い点は誤差の範囲内で ILC スペックと一致しているが、全体的に Q_0 が低いのは field emission の影響である(空洞表面から放出される電子の加速にエネルギーが使われてしまう)。 Q_0 はヘリウムの消費量と関係しているため、ILC 計画の運転経費に影響を及ぼす。高加速勾配と同様、高 Q_0 値も今後の課題である。

空洞から発生する放射線量も重要な測定対象で、一空洞ずつ測定される。放射線は、クライオモジュールの上流部 (upstream)、中流部 (middle)、下流部 (downstream)、そして測定している各空洞の直下 (below cavity)、の4ヶ所 (Figure 2 の黄色の○の位置) で、感度の異なる二種類の検出器を用いて測定している。空洞直下以外は定点観測である。Figure 2 の below cavity は Cavity#8 の下に設置した状態を示している。Figure 6 は CM1/2a 間のビームパイプの再接続作業を行った場所の直近にある Cavity#8 の放射線量の 2015 年からの推移を示す (below cavity と downstream は桁が異なるので注意)。各色は、黒(2015)→青(2016)→赤(2019)→紫(2019)、の順に変化している。今回のモジュール試験では、ビームコミッショニングのために CM1/2a 両端のゲート弁を開放する前と、コミッショニング後の空洞を昇温する直前の2回に亘り放射線測定を行った。まず、ビーム

パイプ再接続作業の影響であるが、それには図中の青と赤の点を比較すればよい。一見して明らかのようにほとんど変化していないことがわかる。したがって、再接続作業による影響は無かったものといえる(ここには掲載されていないが、他の空洞でも同様の傾向であった)。一方、ビームコミッショニング後の結果(紫)は、コミッショニング前に比べていずれの方向でも増加しており、運転中にビームパイプから何らかの影響を受けてしまったものと思われる。今後のビーム運転でも要注意である。2016年までは放射線が全く観測されていなかった下流部の放射線量が今回のモジュール試験から激増しているのは、CM1/2a 間にある2つのゲート弁 (Figure 2 の水色の矢印) を開放したことによるものと考えられる。ゲート弁を開放したことによる放射線量の変化は、他の空洞にも見られておりはっきりとした相関がある。

4. ビームコミッショニング

ビームコミッショニングは2月前半に行われた入射部のみの運転と3月に行われた主リニアックも含む運転の2段階で実施された(時期が異なるのは放射線施設検査の日程による)。ここでは3月に行なわれたビームコミッショニングについて述べる。ビームチューニングの詳細については、[10]を参照されたい。

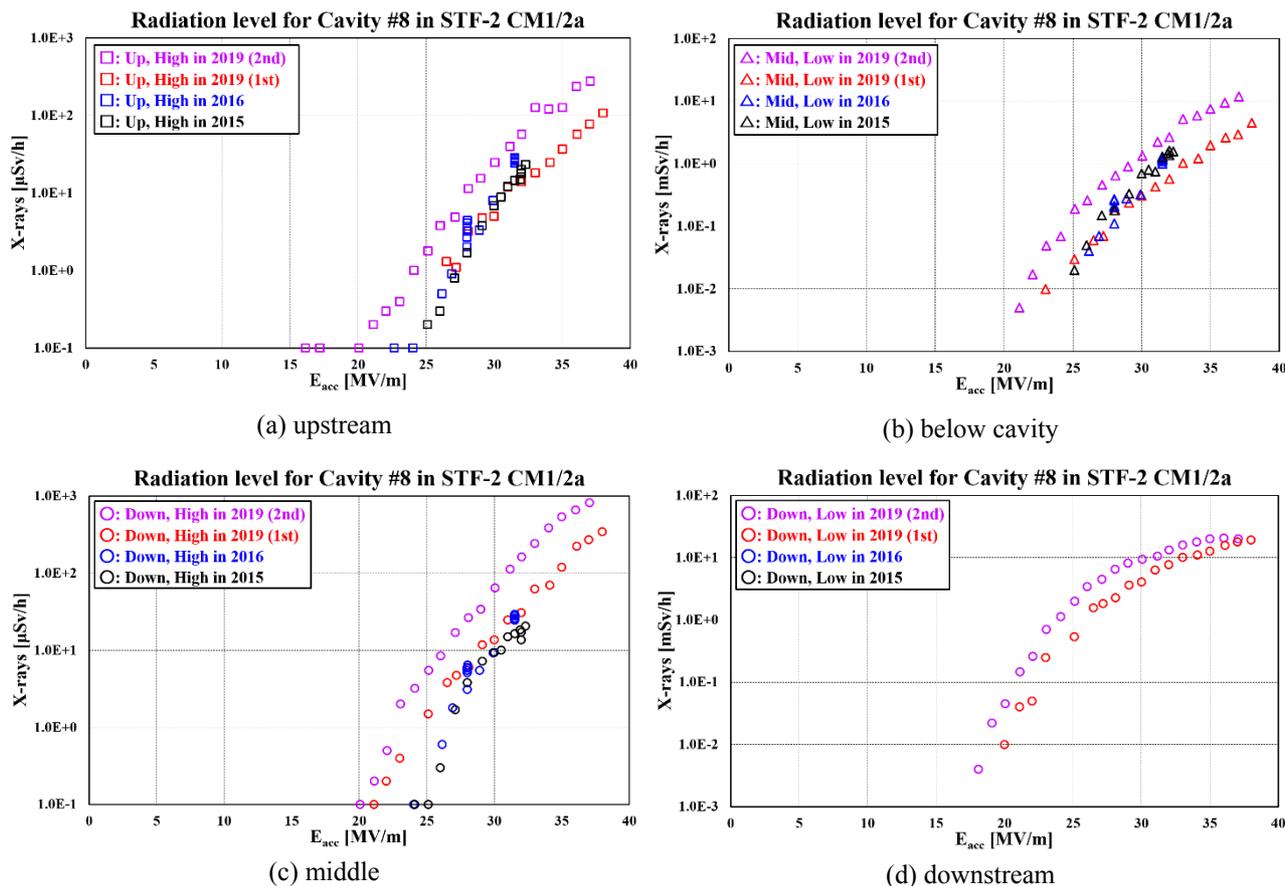


Figure 6: History of radiation level for Cavity#8 observed at upstream, below cavity, middle and downstream since 2015.

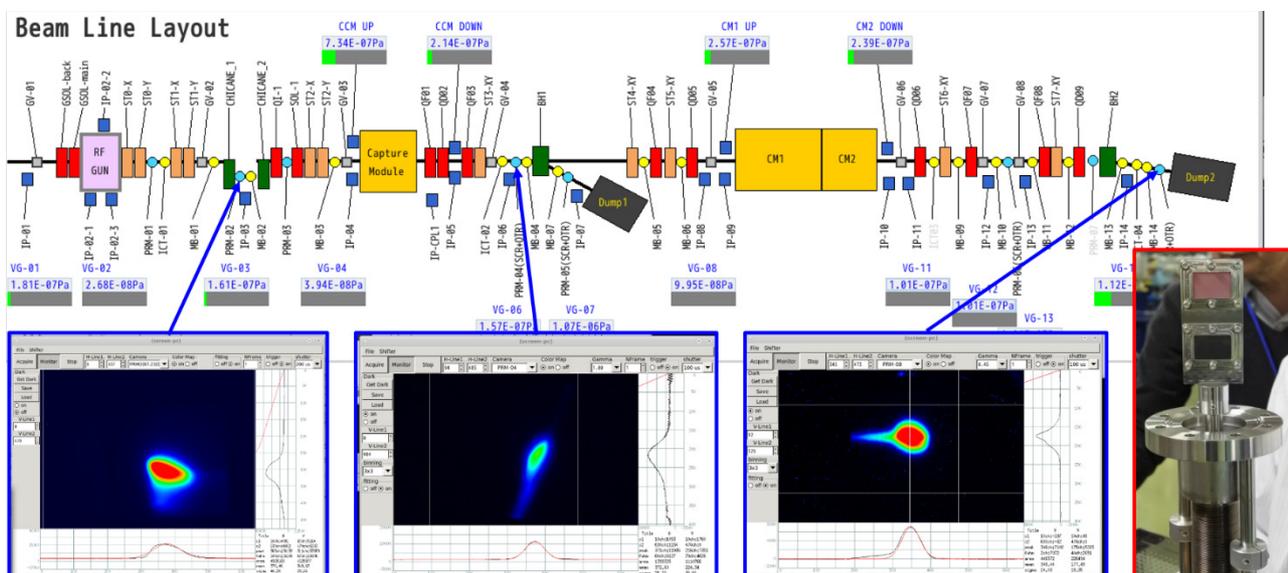


Figure 7: Beam profile observed by beam profile monitors (BPRM#2, #4, #8) installed at each section of beamline.

4.1 ビームエネルギーの最大化

今回のビームコミッショニングの主要目的は、CM1/2aの空洞を出来る限り高い加速勾配で運転し、ビームエネルギーを最大化するという事である。そのため個々の空洞のサーキュレータ部に設けられている可変型ハイブリッド(パワー分配器)のチューニングを行ない、各空洞をクエンチフィールド近くまで引き上げた。その後、高周波制御(Low-Level RF: LLRF)グループにより、フィードバックループをかけて7空洞のベクターサム運転に移行した(flat-topの傾きを0.1%以下にすること)[11]。この時の7空洞平均の加速勾配は33.8 MV/mであった。

4.2 加速勾配のマッチング調査

最下流にあるビームダンプ2(Dump2)までのビーム通過は、調整開始から1日程度で達成したが、その後のビームエネルギーと空洞の加速勾配とのマッチング調査にはかなりの時間を要した。マッチング調査とは、Dump1とDump2の手前に設置された電磁石(Bend1, Bend2)で測定されたビームエネルギーの差から求められる空洞の加速勾配と、空洞から取り出される高周波信号から求められる加速勾配とを比較する、というものである。この比較をする際に、以下のパラメータについて再確認を行なうことになった。

- 電磁石(Bend2)の磁界強度と電流との相関
- 空洞からの高周波信号線の減衰率
- 空洞とピックアップアンテナとの結合度

以上の較正データを再確認・再設定した後、ビームエネルギーから求められた7空洞平均の加速勾配が33.1 MV/mとなった。一方、先に述べたように高周波信号から求められる平均加速勾配は33.8 MV/mで、約2%でお互いが一致する結果となった。したがって、いずれの結果もILC仕様である31.5 MV/mを上回る高加速勾配

に到達したことで、一つの重要なマイルストーンに達したことになる。Figure 7はビームエネルギーの最大化を行った後でビームプロファイルモニターにより観測されたビームライン各点のビームの様子である。

4.3 運転中に起こったトラブル

今回実施したビーム運転期間はたかだか2ヶ月程度であったが、実に多くのトラブルに見舞われた。主なものを以下に列挙する。

- 冷却水系ポンプの故障
- マルチビームクライストロン電源の故障
- 小型クライストロン電源の故障
- 導波管内放電
- 減圧用ポンプの故障
- 空洞チューナーシステムの故障

これらのトラブルにより貴重な運転時間を5日間ほど失うことになったため、運転を行なわない今年度中に修理、保守、交換作業を行う予定である。

5. まとめと今後の予定

STF-2 加速器は4回目の冷却試験にてついにビームコミッショニングを行なうことができた。ILC 加速器の最重要パラメータである加速勾配は、高周波から求めたものが33.8 MV/m、ビームから求めたものが33.1 MV/mに達し、いずれも要求仕様を満足していることが確認された。これはILCの運転条件をビームエネルギーの観点からも実証したということになり、非常に意義深いことである。Table 3に今回のビームコミッショニングの主な達成項目をまとめておく。

Table 3: Achievements in STF-2 Beam Commissioning

Beam energy	280 MeV
Beam power	78 W
Beam current	280 nA
Charge	56 nC/pulse
# of bunches	1000 (6 μ sec) / pulse
Average gradient by beam energy	33.1 MV/m
Average gradient by RF	33.8 MV/m

次回のビーム運転は 2020 年度に予定しているが、それまでに行なう主な項目を以下に列挙する。

- 空洞の入れ替え
- ビームダンプシステムの改良
- 電子銃の高電圧化
- ビームモニター系の改良
- レーザーシステムの変更

空洞の入れ替えとは、現在 CM2a に入っている性能が最も低い Cavity#9 (今回の運転には用いられていない) を取り出して、性能の良い空洞に入れ替える作業を行う、というものである。入れ替える空洞に対しては、近年、米国・フェルミ国立加速器研究所にて開発された新しい表面処理方式による性能向上²を見込んでいる。ビームダンプ冷却水系と放射線遮蔽体の強化は、今後のビーム電流増強のために必要な項目である。また、現在所定のパワーに到達していない電子銃について、カソードの再成膜を行なうと同時にエージングを徹底的に行うことで、3.5 MW の定格パワーを出せるようにする予定である。これによりビームクオリティが改善するものと期待される。今回の運転には使わなかったが、CM1 内に空洞型ビーム位置モニターがあり、これを使うとビームチューニングに有効であると期待されるため、次回の運転までにデータ収集系を整備する。レーザーシステムを変更することで、ビーム電流を上げることは可能であるが、ビームロスに伴う一般管理区域への放射線漏洩対策をさらに徹底して行なう必要があると容易ではない。したがって、ビーム電流が ILC スペックである 5.8 mA (727 μ sec) に到達するにはもう少しばかりかかりそうである。

謝辞

ビームライン建設からビームコミッショニングまでの間、実に多くの方々にご協力いただきました。以下の方々に対し、ここに改めて感謝申し上げます。

原田健太郎氏、多和田正文氏、増澤美佳氏、長橋進也氏 (以上、KEK)

岡田昭和氏、飯竹真之氏 (以上、株式会社ケーバック)
浅野峰行氏、今田信一氏、山田浩気氏、泰中俊介氏、

石原将治氏、石本和也氏、沼田直人氏、堤和昌氏、(以上、日本アドバンステクノロジー株式会社)
早川厚氏、寺嶋凌氏 (以上、関東情報サービス株式会社)

参考文献

- [1] E. Kako *et al.*, “Cryomodule tests of four Tesla-like cavities in the Superconducting RF Test Facility at KEK”, *Phys. Rev. Special Topics - Accel. and Beams*, Vol.13, 041002 (2010).
- [2] Y. Yamamoto *et al.*, “Test Results of the International S1-Global Cryomodule”, in *Proc. of the 15th International Conference on RF Superconductivity*, Chicago, IL, U.S., 2011, pp. 615-624.
- [3] Y. Yamamoto *et al.*, “Construction and Beam Operation of Capture Cryomodule for Quantum Beam Experiments at KEK-STF”, in *Proc. of the 3rd International Particle Accelerator Conference*, New Orleans, LA, U.S., 2012, pp. 2236-2238.
- [4] T. Shishido *et al.*, “Assembly and Cool-Down Tests of STF2 Cryomodule at KEK”, in *Proc. of the 17th International Conference on RF Superconductivity*, Whistler, BC, Canada, 2015, pp. 888-892.
- [5] Y. Yamamoto *et al.*, “Achievement of Stable Pulsed Operation at 36 MV/m in STF-2 Cryomodule at KEK”, in *Proc. of the 18th International Conference on RF Superconductivity*, Lanzhou, China, 2017, pp. 722-728.
- [6] ILC Technical Design Report;
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [7] Y. Morikawa *et al.*, “Development of STF Beam Dump”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, FROH07.
- [8] S. Imada *et al.*, “The construction of the clean assembly environment for the beampipe re-assembly at the KEK STF cryomodules”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, WEPI002.
- [9] K. Tsutsumi *et al.*, “Construction of RF Power Distribution System for Stable Beam Operation for STF2 Accelerator at KEK”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, THPH009.
- [10] M. Fukuda *et al.*, “Beam tuning in STF-2 accelerator”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, THPI017.
- [11] T. Matsumoto *et al.*, “Status of low-level rf control system for STF2 accelerator at KEK”, in *Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, Japan, Jul. 2019, WEPH011.

² 空洞性能の向上に関する研究は近年、世界中で活発に行なわれており、いずれはニオブ以外の金属による空洞が実用化される時代が到来する可能性がある。