

## ILCに向けたSTF-2クライオモジュールによる電子ビーム加速運転

### REPORT OF ELECTRON BEAM ACCELERATION WITH STF-2 CRYOMODULES FOR THE ILC

倉田正和<sup>\*,A)</sup>, 山本康史<sup>A)</sup>, 加古永治<sup>A)</sup>, 梅森健成<sup>A)</sup>, 阪井寛志<sup>A)</sup>, 佐伯学行<sup>A)</sup>, 道前武<sup>A)</sup>, Mathieu Omet<sup>A)</sup>, 片山領<sup>A)</sup>, 井藤隼人<sup>A)</sup>, 荒木隼人<sup>A)</sup>, 松本利広<sup>A)</sup>, 道園真一郎<sup>A)</sup>, 江木昌史<sup>A)</sup>, 明本光生<sup>A)</sup>, 荒川大<sup>A)</sup>, 片桐広明<sup>A)</sup>, 川村真人<sup>A)</sup>, 中島啓光<sup>A)</sup>, 早野仁司<sup>A)</sup>, 福田将史<sup>A)</sup>, 本田洋介<sup>A)</sup>, 島田美帆<sup>A)</sup>, Alexander Aryshev<sup>A)</sup>, 栗木雅夫<sup>B)</sup>, 荒本真也<sup>B)</sup>, Zachary Liptak<sup>B)</sup>, 坂上和之<sup>C)</sup>, 仲井浩孝<sup>A)</sup>, 小島裕二<sup>A)</sup>, 原和文<sup>A)</sup>, 本間輝也<sup>A)</sup>, 中西功太<sup>A)</sup>, 清水洋孝<sup>A)</sup>, 近藤良也<sup>A)</sup>, 山本明<sup>A)</sup>, 木村誠宏<sup>A)</sup>, 荒木栄<sup>A)</sup>, 森川祐<sup>A)</sup>, 大山隆弘<sup>A)</sup>, 高原伸一<sup>A)</sup>, 増澤美佳<sup>A)</sup>, 植木竜一<sup>A)</sup>, 岩下芳久<sup>D)</sup>  
Masakazu Kurata<sup>\*,A)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>A)</sup>, Eiji Kako<sup>A)</sup>, Kensei Umemori<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Takayuki Saeki<sup>A)</sup>, Takeshi Dohmae<sup>A)</sup>, Mathieu Omet<sup>A)</sup>, Ryo Katayama<sup>A)</sup>, Hayato Ito<sup>A)</sup>, Hayato Araki<sup>A)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>, Masato Egi<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>A)</sup>, Masafumi Fukuda<sup>A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>, Alexander Aryshev<sup>A)</sup>, Masao Kuriki<sup>B)</sup>, Shinya Aramoto<sup>B)</sup>, Zachary Liptak<sup>B)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>C)</sup>, Hirotaka Nakai<sup>A)</sup>, Yuuji Kojima<sup>A)</sup>, Kazufumi Hara<sup>A)</sup>, Teruya Honma<sup>A)</sup>, Kota Nakanishi<sup>A)</sup>, Hirotaka Shimizu<sup>A)</sup>, Yoshiaki Kondou<sup>A)</sup>, Akira Yamamoto<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kimura<sup>A)</sup>, Sakae Araki<sup>A)</sup>, Yu Morikawa<sup>A)</sup>, Takahiro Oyama<sup>A)</sup>, Shin-ichi Takahara<sup>A)</sup>, Mika Masuzawa<sup>A)</sup>, Ryuichi Ueki<sup>A)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>D)</sup>

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

<sup>B)</sup> Hiroshima University

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

<sup>D)</sup> Kyoto University

#### Abstract

In the Superconducting rf Test Facility (STF) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), the cool-down tests of STF-2 cryomodules and the beam operations have been held since 2019. STF-2 cryomodules are the same type as those for the International Linear Collider (ILC). As a result of beam operation so far, the averaged acceleration gradient of 9 cavities reached 33 MV/m, which satisfies the specification of the ILC (31.5 MV/m). Hence anomalous emittance growth after passing the accelerating cavities was seen on previous beam operation in April 2021, we observed inside the cavities by eye and confirmed there is no obstacle which was the source of this emittance growth. After checking almost same performance of accelerating cavities as those of the previous beam operation, we investigated various candidates that could cause this anomalous emittance growth in the beam operation. For a long pulse (726  $\mu$ s) and high current (5.8 mA) beam same as those of the ILC specification, about 100  $\mu$ s long pulsed beam operation was demonstrated without loss. By implementing feedforward control to suppress the acceleration gradient drop due to beam loading, we could perform successful beam operation without loss. This is a powerful finding for beam operation with a pulse length equivalent to that of the ILC specification in STF-2. We will present the outline of the cool-down test and the beam operation at STF.

#### 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 (STF) では、国際リニアコライダー (ILC) [1] の実現に向けた基幹技術の一つである超電導加速の技術を検証するために開発が進められている。STF-2 の主な目的は、ILC のデザインと同じパルス長、ビーム強度によるビーム運転をめざすことである。STF-2 でのビーム運転を成功させるために、次の 3 点が重要である。一つ目は ILC の要求と同等、あるいはそれ以上の高加速勾配によるビーム加速、二つ目は長いパルスと大電流ビーム運転であり、STF-2 加速器においてはビームロスを抑制したビーム運転が最も重要な課題である。三つ目はビームの品質を保ったままビーム運転することであり、我々は低エミッタンスビームを生成し、維持し、ダンプしな

ければならない。これらの要件において STF-2 では積極的に研究開発が行われている。本講演では、これらの研究の現状について報告する。

#### 2. STF-2 加速器

STF-2 加速器の概略図を Fig. 1 に示す [2,3]。STF-2 加速器は、長さ約 70m の超伝導リニアックである。STF-2 加速器には 14 台の超伝導空洞があり、そのうちの 2 つは、キャプチャークライオモジュール (Capture Cryomodule, CCM) に収納されている。光陰極 RF 電子銃によって生成された電子ビームは、CCM により約 40MeV まで加速される。残りの 12 台の空洞はクライオモジュール (CM1/CM2a) にあり、8 台は CM1、4 台は CM2a に収納されている。電子ビームは CM1/CM2a によって最大 500 MeV まで加速される。中流部と下流部に 2 つのビームダンプ (Dump1,

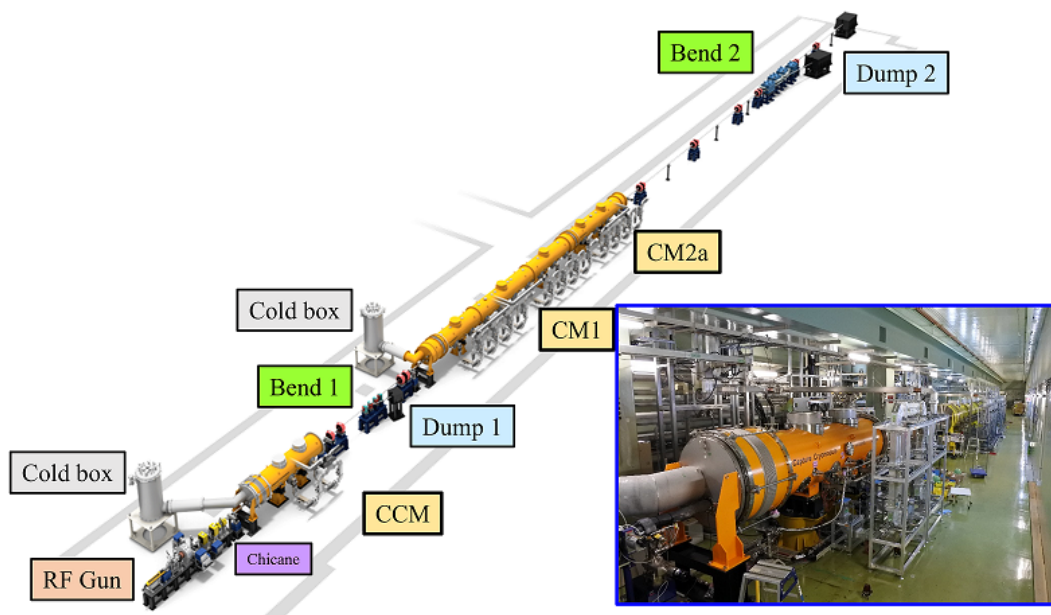


Figure 1: Layout of STF-2 accelerator including a tunnel photo.

Dump2) と 2つの偏向電磁石 (Bend1, Bend2) があり、それぞれのダンプに電子ビームを送る。ビーム調整およびビーム状態の診断のために、ビームラインのいたるところに種々のモニターが設置されている。

そこで、ビーム運転では#3 空洞は detune してビーム加速を行った [4,5]。

### 3. クライオモジュールの性能

### 4. 100 $\mu$ sec 長パルス運転

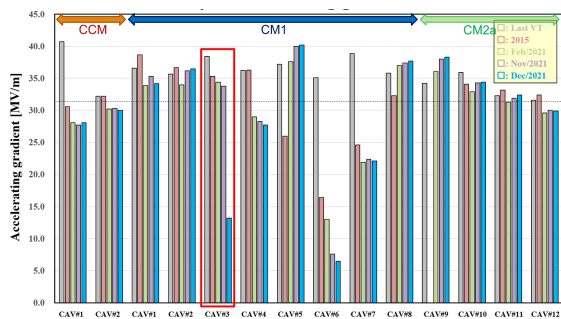


Figure 2: Achievable Accelerating Gradient in 2021.

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。Figure 2 は各超伝導空洞の縦測定およびエージング後の加速勾配を示したものである。破線は ILC のクライオモジュール試験における超伝導空洞のスペックである (31.5 MV/m)。2021 年の間、ほとんどの空洞は同じ性能を維持できたことを示している。14 台のうち 11 台の加速空洞は、ILC のスペックである 31.5 MV/m の  $\pm 20\%$  以内の性能を持っている。しかし、一部のキャビティは、異常な熱負荷や電界放出などにより性能が低下している。また、CM1 に設置されている #3 空洞は、11 月の放射線測定中に異常なクエンチが発生し、その後大幅な電圧降下が起こってしまった。

Signal of Cherenkov counter

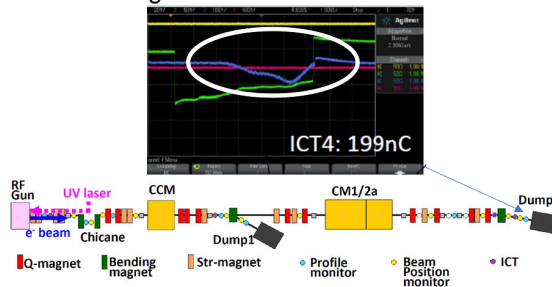


Figure 3: STF-2 beamline and oscilloscope image of the cherenkov counter.

2021 年 4 月のビーム運転では、Bend2 下流での激しいビームロスが大電流ビーム運転にとって大きな問題となった [6]。Figure 3 に STF-2 ビームラインの模式図を示す。Dump2 の直前に Dump2 からの放射線をチェックするチェレンコフカウンターがあり、150 nC/Pulse 以上のビーム運転でチェレンコフカウンターからの信号 (オシロスコープの青の信号) が見られた。このビームロスの原因はビームローディングであり、これにより加速空洞内の電圧降下を引き起こし、その結果パルスビームのエネルギー広がりが大きくなる。電子ビームはダンプに送られる前に偏向電磁石によって曲げられるため、パルス内の各電子は、偏向電磁石下流のディスパージョンにより

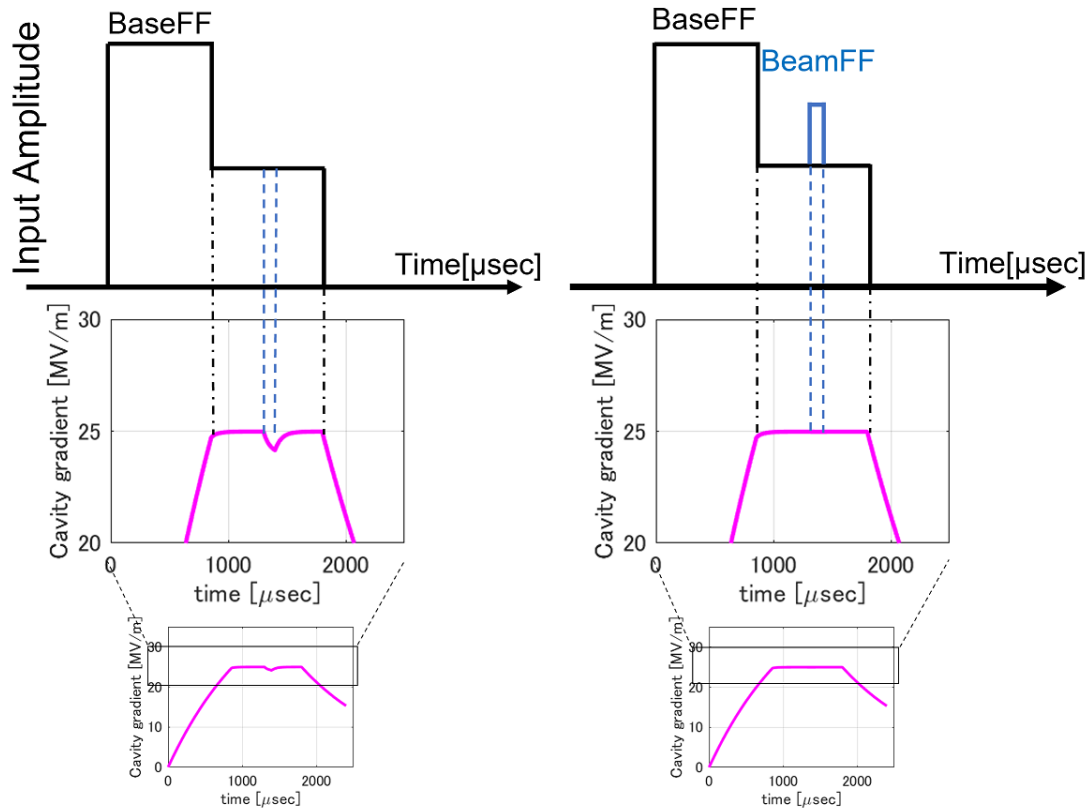


Figure 4: Feed Forward (FF) table for beam acceleration.

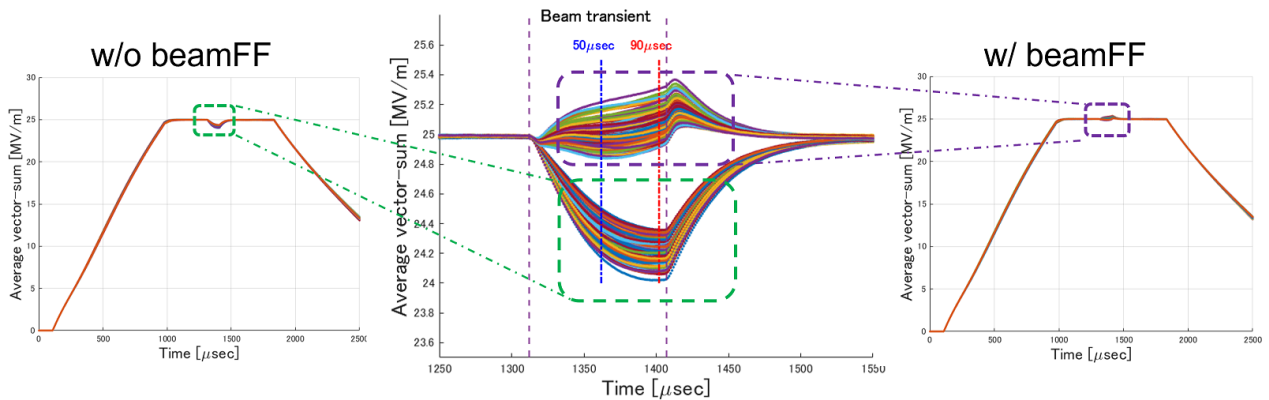


Figure 5: Averaged vector sum of the acceleration gradient over eleven cavities with and without BeamFF.

エネルギーに応じて異なる軌道をとることになる。したがって、電子ビームは、エネルギー分散が大きすぎるとビームパイプまたはダンプの入り口に当たる。長いパルス長のビーム運転を行う場合、ビームローディング補償を行い、抑制することは、ビームロスのない運転を実現させるために重要である。

Figure 4のように、空洞内の加速勾配はクライストロンからのパワー入力によって生成される [7]。安定したビーム加速を実現するためには、このような加速勾配を生成する段階ののち、加速勾配が一定にな

るフラットトップの加速電場が必要である。フラットトップの安定化のため、不規則な擾乱に対しては、フィードバックシステムにより補正を行っている。一方、ビームローディングはビームの加速空洞の通過中に発生するため、フィードフォワードであらかじめ追加のパワーを入力することによりビームローディングを補正する。このフィードフォワードにより、パルスビームのエネルギー広がりが小さくなり、ビームロスを抑制するためのビーム調整を容易にすることができる。

ビーム運転において、ビームローディング補償の有無それぞれについて運転を行い、比較をした。Figure 5 に加速空洞の加速勾配の平均ベクトル和の分布を示す。ビームローディング補償のない場合、ビームローディングによる明らかな加速勾配低下が見られる。一方、フィードフォワードを課すことで、加速勾配低下の回復が見られる。STF-2 加速器のディスパージョンの評価から、ビーム損失が発生していないアクセプタンスを設定することができる。Figure 6 に 121 パルスについて、加速空洞通過時の加速勾配がアクセプタンス内にあるかどうかをチェックした。黒のヒストグラムは、ビーム通過前の加速勾配を示している。アクセプタンスは紫の破線により示している。青と赤のヒストグラムは、ビームが加速空洞に到達後、50  $\mu\text{sec}$  と 90  $\mu\text{sec}$  における加速勾配の平均ベクトル和を示している。ビームローディング補償がない場合、加速勾配はこのウィンドウの外側に分布し、ビーム運転中にビームロスが発生したことを示している。一方、ビームローディング補償がある場合、加速勾配はアクセプタンス内に分布している。したがって、100  $\mu\text{sec}$  までのパルス長のビームに対してビームロスなしでダンプまで輸送するようにビームをうまく制御することができる。しかし、電子銃から来る暗電流による放射化の抑制の問題が残っている。

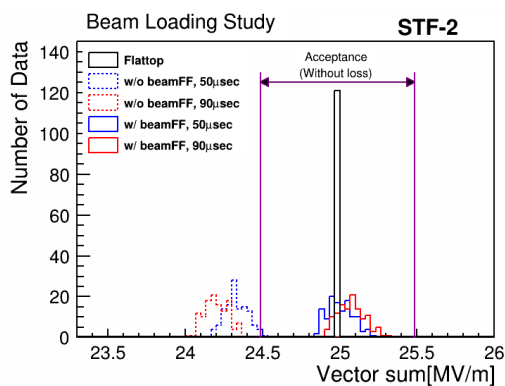


Figure 6: Vector sum of cavity acceleration gradient at each time after beam coming.

## 5. エミッタンスの異常増大

2019 年以降、加速する空洞を通過する前後でエミッタンスが変化していることが観測された [6]。エミッタンスはジ OTR モニターを用いた Q スキャンにより測定され、四重極磁石の磁場変化に対するビームサイズの変化を測定することによって評価している。Figure 7 において空洞の上流 (QF03) と下流 (QF07) でそれぞれエミッタンスを評価したところ、空洞の上流ではエミッタンスは  $O(1[\text{mm mrad}])$  で十分にビームの品質は良いと評価できた。一方、空洞下流のビームの状態を推定するとエミッタンスは  $O(10[\text{mm mrad}])$  であり、エミッタンスが設計よりも数倍大きくなっていることが分かった。2 つのエ

ミッタンス測定点の間にあるコンポーネントは四重極磁石およびクライオモジュールであり、主な構成要素は線形光学と加速で、このエミッタンスの増大を説明することができない。したがって、エミッタンスを増大させる原因を究明しないといけない。

2021 年 11 月、クライオモジュール内にエミッタンス増大の原因となる障害物などがいないことを確認するため、加速空洞の内部を目で実際に観察した。空洞の真空をベントし、ベローズを外して view port を設置し、中をのぞくための光学系と望遠鏡をセットして観察した。その結果、空洞内にはエミッタンス増大源となるような異物は何もなかったことを確認した。ビーム運転においては、主に加速空洞周りに焦点を当ててこのエミッタンス増大の原因となりうる様々な候補について調査した。また、クライオモジュールのすぐ上流および下流にビームプロファイルモニターを新たに設置し、エミッタンスに対する加速空洞の効果をより詳細に確認することとした。クライオモジュールの前後でビームプロファイルが異常になっていないことを確認した。

また、エミッタンス計算についても再検討をおこなった。その結果、ビームライン上のコンポーネントの最新のジオメトリが計算に正しく反映されていないことがわかった。したがって、修正後、我々はエミッタンスの再評価を行った。新しいビームプロファイルモニターの設置により、これまでは測定できなかった 4 極電磁石位置、Fig. 7 における QF04 および QD05 でのエミッタンスも測定できるようになった。Figure 8 にエミッタンス再計算のまとめを示す。x 軸はエミッタンス測定点にある 4 極電磁石を示し、y 軸はエミッタンスを示す。赤い点は x 方向のエミッタンス、青は y 方向のエミッタンスである。同じ磁石でも測定条件が異なるためにエミッタンスが異なる。Figure 8 から、エミッタンスは QF03 に達するまでに設計値よりもすでに数倍大きくなっていることが分かった。また CM1/2a 前後でのエミッタンス増大の効果は小さく見える。そこで、上流のコンポーネント (電子銃-CCM 間) を調査することを計画している。

## 6. 運転計画

Table 1 に STF-2 ビーム運用計画のパラメータを示す。2021 年 4 月には、2020 年度のビームパラメータによるビーム運転を行い、高いパルス電流により、ビームロスが引き起こされた。そこで 2021 年 12 月には、約 100  $\mu\text{sec}$  長のパルス運転を行った。前述のように、STF-2 の目標は ILC スベックによるビームロスのない運転を実証することである。そこで、F.Y.2022 においては 7 倍の長さのパルスビーム運転を計画している。次のビーム運転に向けて

- ロスモニタをビームライン上にさらに設置する
- 4 極電磁石の交換および設置
- ビーム位置モニターの設置
- Turbo ICT の導入

を予定している。

Table 1: Beam Parameters in Fiscal Years and ILC Specification

Item	F.Y.2020	F.Y.2021	F.Y.2022	ILC spec.
Max. beam energy [MeV]	500	500	500	$500 \times 10^3$
Max. beam intensity [ $\mu\text{A}$ ]	3.00	3.00	21.5	21.0
Max. beam power [kW]	1.350	1.350	9.675	$14 \times 10^3$
Max. num. of bunch / train	1000	16260	118048	1312
Bunch spacing [nsec]	6.15	6.15	6.15	554
Max. train length [ $\mu\text{sec}$ ]	6.15	100	726	726.848
Repetition rate [Hz]	5	5	5	5
Bunch charge [pC]	600	36.90	35.66	$3.21 \times 10^3$
Bunch current [mA]	97.561	6.00	5.799	5.8

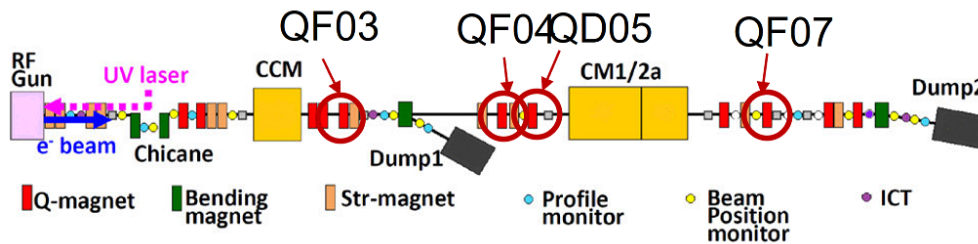


Figure 7: STF-2 beamline and quadrupoles which can measure emittance.

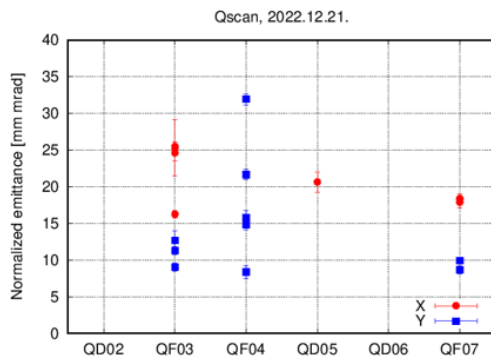


Figure 8: Summary of emittance estimation at each quadrupole.

## 7. まとめ

STF-2 は ILC における基幹技術である超伝導加速の検証を目指している。2021 年のビーム運転ではビームローディング補償をしてロスモニタを注視しながらビーム調整を行うことにより最大 100  $\mu\text{sec}$  のパルスビーム運転をビームロスなく行うことができた。最終的には ILC スペック (726  $\mu\text{sec}$ ) と同じ長さのパルス運転を計画している。2019 年以来、2021 年 4 月のビーム運転まで加速空洞の前後で異常なエミッタンス増大が観測された。そこで 2021 年 12 月のビーム運転においては、主に加速空洞を中心にエミッタンス増大の原因について調査を行った。まず目視により空洞内部を観察して異物がないことを確認した。ビーム運転においては様々なエミッタ

ス増大源の候補について調査したが原因は特定されなかった。同時にエミッタンスの再評価を行ったところ、エミッタンスは加速空洞の上流ですでに設計値の数倍大きくなっており、加速空洞前後のエミッタンスの変化は小さいことが分かった。エミッタンス増大の原因は電子銃を含めた上流部に絞られてきている。

## 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report; <https://linearcollider.org/technical-design-report/>
- [2] H. Hayano, “Superconducting rf test facility (STF) in KEK”, Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity, Cornell University, Ithaca, New York, USA (2005).
- [3] H. Hayano, “Progress status of STF accelerator development for ILC”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 1-3, 2017, Sapporo, Japan (2017).
- [4] Y. Yamamoto *et al.*, Slide of the LINAC2022, Liverpool, England (2022).
- [5] Y. Yamamoto *et al.*, Slide of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18-21, 2022, Online, TUP029, (2022).
- [6] Y. Yamamoto *et al.*, “ILC に向けた STF-2 クライオモジュールによる 33MV/m のビーム加速実証”, Slide of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-12, 2021, Online, TUOB04, (2021).
- [7] M. Omet, “Digital Low Level RF Control Techniques and Procedures Towards the International Linear Collider”, Ph. D thesis, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies) (2014).