

ILCに向けたSTF-2クライオモジュールによるILCスペックと同等の電流、パルス長を持った電子ビームの加速運転達成

REPORT OF SAME PULSE LENGTH AND CURRENT ELECTRON BEAM ACCELERATION AS ILC SPECIFICATION WITH STF-2 CRYOMODULES

倉田正和^{*A)} 山本康史^{A)}, 加古永治^{A)}, 梅森健成^{A)}, 阪井寛志^{A)}, 佐伯学行^{A)}, 道前武^{A)}, Mathieu Omet^{A)}, 片山領^{A)}, 井藤隼人^{A)}, 荒木隼人^{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)}, 中島啓光^{A)}, 早野仁司^{A)}, 福田将史^{A)}, 本田洋介^{A)}, 島田美帆^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, 栗木雅夫^{C)}, 伊達圭祐^{C)}, Zachary Liptak^{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)}, 大山隆弘^{A)}, 高原伸一^{A)}, 増澤美佳^{A)}, 植木竜一^{A)}, 岩下芳久^{D)}, 栗山靖敏^{D)}

Masakazu Kurata^{*A)}, Yasuchika Yamamoto^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Takayuki Saeki^{A)}, Takeshi Dohmae^{A)}, Mathieu Omet^{A)}, Ryo Katayama^{A)}, Hayato Ito^{A)}, Hayato Araki^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Masato Egi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Masato Kawamura^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Masafumi Fukuda^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, Masao Kuriki^{C)}, Keisuke Date^{C)}, Zachary Liptak^{C)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Hirotaka Nakai^{A)}, Yuuji Kojima^{A)}, Kazufumi Hara^{A)}, Teruya Honma^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Hirotaka Shimizu^{A)}, Yoshiaki Kondou^{A)}, Akira Yamamoto^{A)}, Nobuhiro Kimura^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Takahiro Oyama^{A)}, Shin-ichi Takahara^{A)}, Mika Masuzawa^{A)}, Ryuichi Ueki^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{D)}, Yasutoshi Kuriyama^{D)}

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

^{B)} The University of Tokyo

^{C)} Hiroshima University

^{D)} Kyoto University

Abstract

In the Superconducting rf Test Facility (STF) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), a total of eight cooling tests of the STF-2 cryomodule have been conducted by the end of 2022, and beam operations have been carried out since 2019. As a result of the operation of the acceleration cavities so far, an averaged acceleration gradient of 33 MV/m has been achieved in 9 cavities on average, which has a margin of 5% of the ILC's required specification (31.5 MV/m). In addition, by taking advantage of the experience obtained from the 100 μ sec pulse length beam operation in the November-December 2021, stable electron beam operation with a pulse length of 726 μ sec, and a bunch current of 5.8 mA, has been successfully demonstrated, which are equivalent to those of the ILC specification. In this talk, we will report on the results of the beam operation at STF-2.

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。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達成するために、2021年より長パルスのビーム運転のスタディをおこない、2021年の運転では100 μ secパルスビームについて、ビームロスを抑えながら運転することを達成した。2022年の運転においては、そこで得られた知識をもとに726 μ sec, 5.8 mAのビームを安定的に運転することに成功した。本講演では2022年のビーム運転について報告する。

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 加速器には合計 14 台の超伝導空洞が設置されている。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

* kurata@post.kek.jp

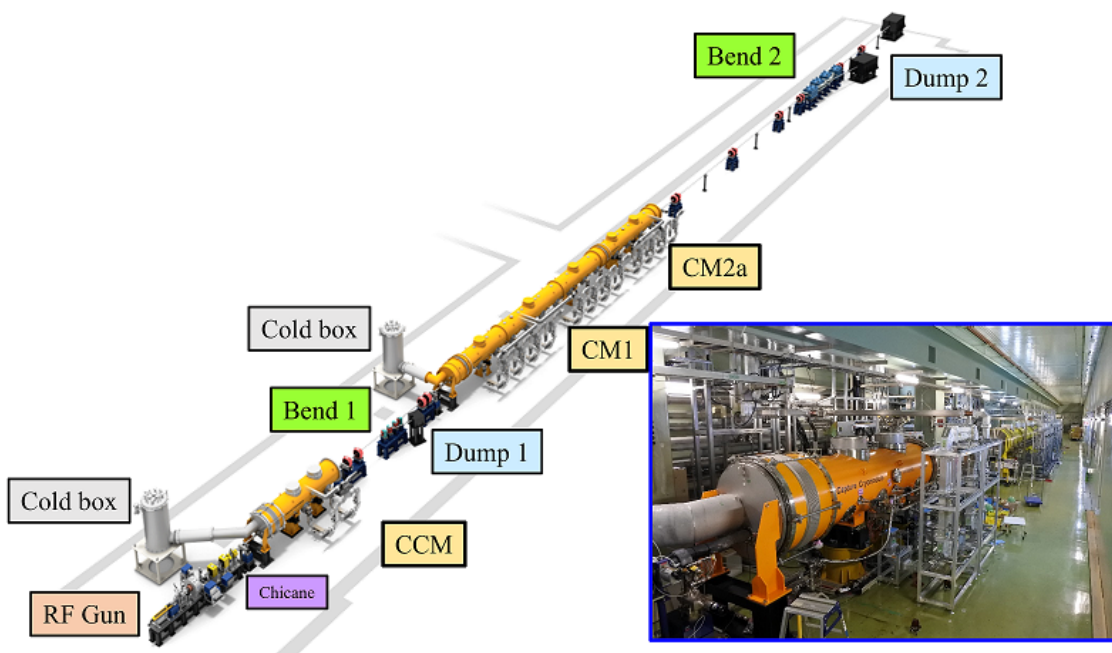


Figure 1: Layout of STF-2 accelerator including a tunnel photo.

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, Dump2) と 2 つの偏向電磁石 (Bend1, Bend2) がある。運転モードは 2 種類 (入射器モードおよび LINAC モード) あり、入射器モードでは電子ビームは Bend1 で 30 度曲げられ、Dump1 に送られ、LINAC モードでは Bend2 で 10 度曲げられて Dump2 に送られる。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。

STF-2 の電子ビーム (6.15 nsec のバンチ間隔で 35 pC/bunch) と ILC のデザインにおける電子ビーム (554 nsec のバンチ間隔で 3.2 nC/bunch) はパルス内のバンチ構造は異なるが、STF-2 ではパルス内のバンチ数とバンチ電荷を制御することにより、ILC スペックと同じパルス長と電流で運転することを目指した。

3. クライオモジュールの性能

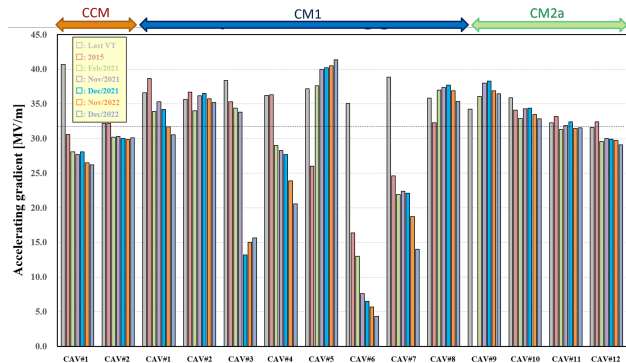


Figure 2: Achievable Accelerating Gradient in 2022.

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)。2022 年の間、14 台のうち 10 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。CM1 に設置されている#6 空洞は 2015 年の空洞冷却試験から異常な熱負荷により性能が大きく劣化した。また、同じく CM1 に設置されている#3 空洞は、2021 年 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。2022 年の 726 μsec , 5.8 mA ビーム運転では#3 および#6 空洞の 2 つを detune してビーム加速を行った [4,5]。

4. 726 μsec , 5.8 mA ビーム運転

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]。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。よって、2021 年 12 月の運転において、クライストロンからの入力パワーにフィードフォワードであらかじめ追加のパワーを入力し、ビームローディングを補正することで、パルス

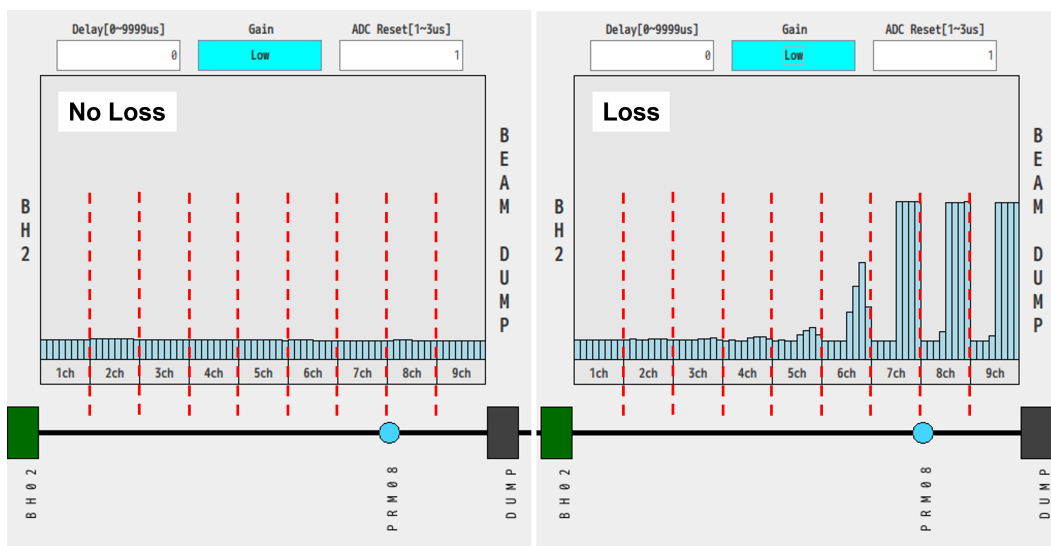


Figure 3: Comparison of the loss monitor distributions with and without beam loss at downstream of Bend2.

長 $100 \mu\text{sec}$ の電子ビームで運転を行い、ビームロスを抑制しながらビームを輸送できることを確認した [7]。

2021 年の運転で得られた知識をもとに、ILC スペックと同等のパルス長、電流を持つビームの運転を行った。ビームロスを調べるために CCM 下流から 1 m おきにロスモニタを設置してビーム運転中にビームロスが起きているかを確認しながらビーム調整を行った。Figure 3 に Bend2 下流の、ロスが起きているときと起きているときのロスモニタの信号の比較を示す。1つの ch は一つのセンサーを表し、下部にあるビームラインの模式図のおおよその位置に設置されている。1つの ch は 8つの棒グラフを持ち、1つの棒はパルス内 $100 \mu\text{sec}$ ごとに積分されたビームロス信号の大きさを表す。ロスがあるときのモニタでは、Dump2 の直前でパルスの後半でビームロスが起きている、それによる大きな信号が得られている。2021 年のビーム運転の結果から、ビームロスは Bend2 で曲げられたあと Dump2 前で起こるので、Bend2 下流でロスモニタに信号が出ないようにビーム調整を行った。

パルス長、パルス電流をターゲットに合わせるために、まず低電荷 ($\sim 20 \text{ pC/bunch}$) でバンチ数を増やすことでパルス長を $726 \mu\text{sec}$ まで引き伸ばし、その後バンチ電荷を増やすことで 5.8 mA にすることとした。これは加速空洞の安定性をなるべく維持するためである。ビーム調整では RF 電子銃と CM1/CM2a の位相の関係性の調整、Bend2 の電流値、シケイン磁石の電流値などの調整を行った。またバンチ数を徐々に増やしていく際に、軌道が常に同じになるように軌道調整用電磁石の電流値を調整することで、逐一軌道調整を行った。

その結果、 $726 \mu\text{sec}$, 5.8 mA のビーム運転を行うことに成功した。ビームパワーは 5.6 kW に到達し、このビームパワーで 1 時間運転させることができた。Figure 4 にこのビーム運転でのビーム電荷の履歴を示す。安定運転に達する前にビーム調整を行い、パルス内バンチ数、およびバンチ電荷を徐々に増やしていった。また、Table 1 に 2021 年の $100 \mu\text{sec}$ ビーム運転、2022 年の $726 \mu\text{sec}$,

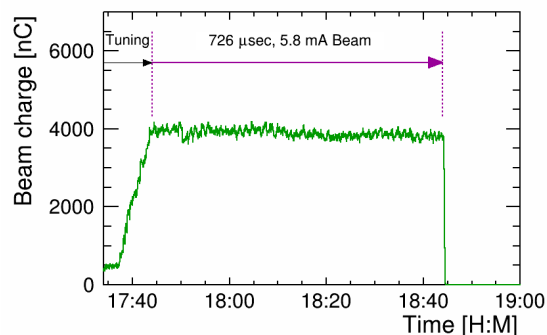


Figure 4: Trend of the beam charge during the $726 \mu\text{sec}$, 5.8 mA beam operation.

Table 1: Summary of the Achieved Beam Parameters in Each Beam Operation at STF-2

Parameters	$100 \mu\text{sec}$	$726 \mu\text{sec}$
Energy [MeV]	313	293
Pulse current [mA/pulse]	4.0	5.8
Bunch charge [pC/bunch]	25	35
Number of bunches	16000	118000
Pulse length [μsec]	98.4	726
Beam power [kW]	~ 0.6	5.6

5.8 mA ビーム運転で達成したビームパラメータを示す。パルス内でどれくらいエネルギーが変化しているかを見るために、ビーム位置モニターでの x 位置の測定からディスページョンによりパルス内各位置でのエネルギー差を見積もった。Figure 5 にその結果を示す。それぞれのビーム運転の前に短いパルスビーム ($\sim 615 \text{ nsec}$) を用いてエネルギー測定を行っており、 3.6 mA ビーム運転

の時は 291 MeV、5.2 mA ビーム運転の時は 293 MeV であった。パルス内のエネルギー差を測定する際、3.6 mA ビーム運転の時は 61.5 μsec ごとの位置でのエネルギー差、5.2 mA ビーム運転の時はパルス先頭と後方のエネルギー差を測定した。

その結果、パルス内でのエネルギー差はせいぜい 1.5% であり、ビームロスを起こさないようにビーム調整ができる条件の 4% に比べて小さいことが分かった。よって、ビームロスを抑制しつつ、長パルス、大電流ビームを Dump2 まで輸送できていると考えられる。

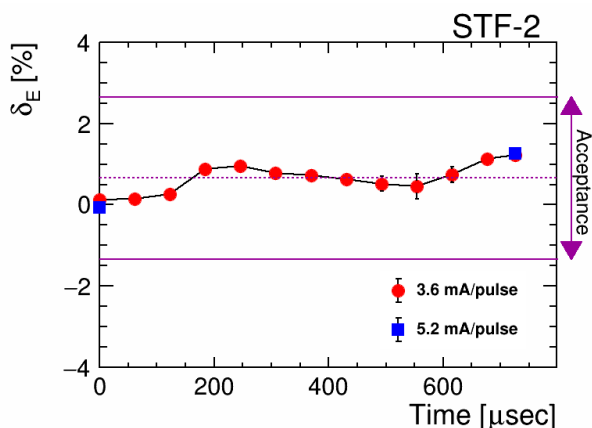


Figure 5: Relative difference from the nominal beam energy at each position inside the pulsed beam.

フィードフォワードでビームローディングを抑制しているにもかかわらず、パルス内でのエネルギー差が蛇行した分布になるのは RF 電子銃に照射しているレーザーのパワーの安定性が反映している。フィードフォワードの入力の形が矩形波であるために、このようなパルス内の構造を補正することができない。パルス内エネルギー差を抑制するために、矩形波の代わりに適応的なフィードフォワードのテーブルを適用するか、レーザーの安定性を向上させることが必要である。また、パルス後方ほどエネルギーが高くなっているような調整となっているため、フィードフォワードの入力の大きさについても調整が必要である。これらのパルス内エネルギーの安定性に関する課題については、さらなる調査が必要である。

5. エミッタンスの異常増大

2019 年以降、エミッタンスが大きく悪化していることが観測された [6]。エミッタンスは 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 6 にビームラインの概略図とエミッタンスを測定できる電磁石を示す。Figure 7 に 2021 年に行ったエミッタンス測定の結果を示す [7]。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。この

エミッタンスのスタディによって、CCM の下流からエミッタンスは $O(10[\text{mm mrad}])$ であり、エミッタンスがデザイン ($O(1[\text{mm mrad}])$) よりも数倍大きくなっていることが分かった。また、CM1/2a の上流および下流で加速空洞によるエミッタンスの増大効果は小さいことも分かった。したがって、エミッタンスを増大させていると考えられる要素は RF 電子銃から CCM の間に存在すると推察される。2022 年のビーム運転では、エミッタンス増大源について上流部を重点的にスタディすることとした。

まず、最上流部から CCM 下流までの軌道について調査するために、CCM で電子ビームを加速させずに Dump1 まで輸送する運転を行った。この運転により、これまでの運転では CCM に入射する際の軌道が y 方向に大きく蹴られていたことが分かり、この結果をもとに軌道を修正して通常のビーム運転でエミッタンスを測定したところ、CCM の下流においてエミッタンスが大きく改善した。

また、バンチ内にいくつかの塊ができることによってエミッタンスが悪化することを防ぐために、電子ビームを生成するために電子銃カソードに照射するレーザーのプロファイルを整えてバンチ内の垂直方向電子分布が多峰性を持たないようにすることを目指した。Figure 8 に成形前後のレーザープロファイルの比較を示す。

ビーム運転においては、電子銃カソードへのレーザーの照射位置やソレノイドの電流値などのスキャンを行い、エミッタンス増大を抑制するように調整を行った。Figure 9 に 2022 年のビーム運転でのエミッタンススタディのまとめを示す。今回のビーム運転においてエミッタンスは 3-7 mm mrad と大きく改善した。しかし、デザインのエミッタンスに比べるとまだ大きく、さらなる調査が必要である。

6. 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フィードフォワードによりビームローディング補償をし、ロスモニタを注視ながらビーム調整を行うことにより最大 100 μsec 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。

これに引き続いて 2022 年のビーム運転では ILC スペックを満たすパルス長 (726 μsec)、パルス電流 (5.8 mA) のビーム運転を行い、ビームパワーが 5.6 kW に到達、このビームパワーを 1 時間維持して運転することができた。パルス内でのエネルギー差を評価したところ、せいぜい 1.5% であり、ビーム調整によりビームロスを抑制することのできる条件である 4% 以下を十分に達成できることが分かった。さらなるパルス内エネルギーの安定のためにフィードフォワードテーブルのスタディや RF 電子銃のレーザーの安定性などの調査が必要である。

2019 年以來、デザインのエミッタンスの何倍も悪化した、異常なエミッタンス増大が観測された。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ていたが、

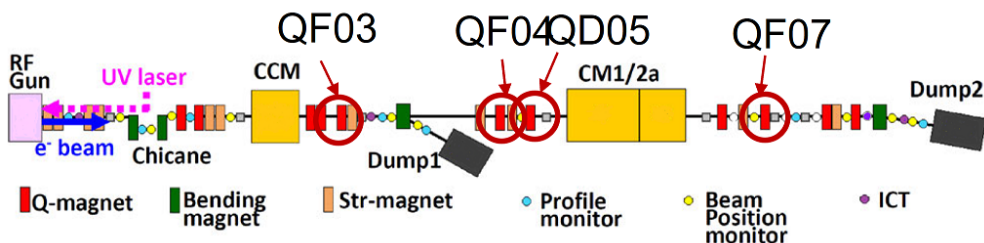


Figure 6: STF-2 beamline and quadrupoles which can measure emittance.

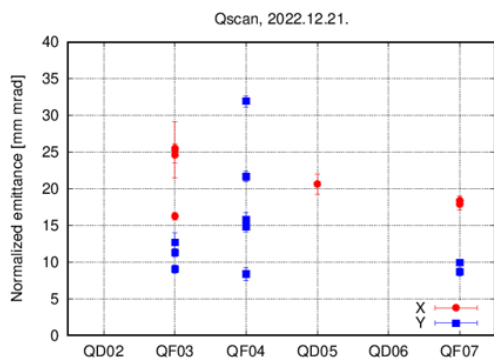


Figure 7: Summary of emittance estimation at each quadrupole in 2021.

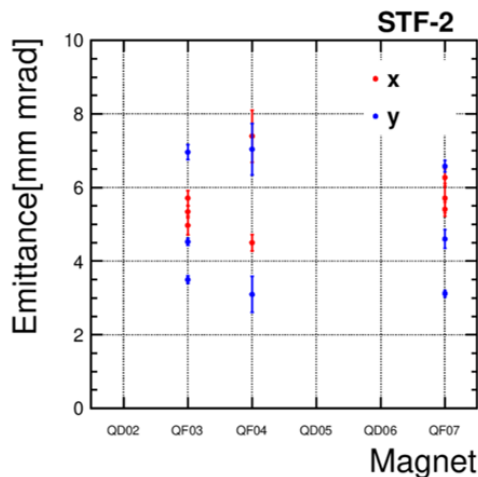


Figure 9: Summary of emittance estimation at each quadrupole in 2022.

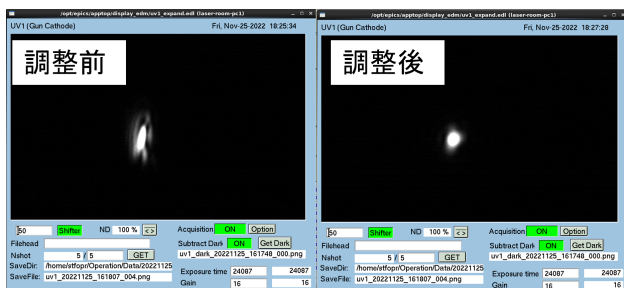


Figure 8: Comparison of the laser profile before and after the correction.

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。

それを受けて 2022 年のビーム運転では、RF 電子銃から CCM までのエミッタンス増大源について調査を行った。CCM で加速を行わずにビームを Dump1 に輸送する運転で、軌道の調査を行ったところ、エミッタンスが劇的に改善することが分かった。また、電子銃に照射するレーザープロファイルの改善、ソレノイド電流値や RF ガンのレーザー照射位置などのスキャンなどを行ったところ、エミッタンスは 3-7 mm mrad となり、大幅に改善した。しかし、デザインよりまだ大きく観測されているので、さらなる調査が必要である。

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 of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-12, 2021, Online, TUOB04, (2021).
- [7] M. Kurata *et al.*, 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, Proceedings of of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan October 18-21, 2022, Online, WEOA04, (2022).