

STF-2 におけるビーム調整とビーム測定

BEAM TUNING AND BEAM PARAMETER MEASUREMENT IN STF-2 ACCELERATOR

福田 将史^{#,A)}, 荒木 隼人^{A)}, アリシェフ アレクサンダー^{A)}, 井藤 隼人^{A)}, 梅森 健成^{A)},
阪井 寛志^{A)}, 早野 仁司^{A)}, 本田 洋介^{A)}, オメット マチュー^{A)}, 松本 利広^{A)}, 森川 祐^{A)},
山本 康史^{A)}, 栗木 雅夫^{B)}, 坂上 和之^{C)}

Masafumi Fukuda^{#,A)}, Hayato Araki^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Hayato Ito^{A)},
Yosuke Honda^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Mathieu Omet^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)},
Kensei Umemori^{A)}, Yasukawa Yamamoto^{A)}, Masao Kuriki^{B)}, Kazuyuki Sakaue^{C)}

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

^{B)} Hiroshima University ADSE

^{C)} University of Tokyo

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 31.5 MV/m which is the specification of gradient for the ILC. The ILC specified cryomodule with twelfth cavities including a Nitrogen-infused cavity has been installed in the STF beamline. In the beam operation performed in 2021, the accelerating gradient of 32.9 ± 0.4 MV/m which estimated from the beam energy has been achieved 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 33.0 MV/m which calculated from the RF power stored in the superconducting cavities. On the other hand, the emittance growth has been observed in the cryomodules of CM1 and CM2a. We are investigating the reason now. We will report the result of beam measurements such as energy, accelerating gradient, emittance, stability of beam current.

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]の基幹技術の1つである超伝導加速空洞やクライオモジュールの技術開発および性能試験を行ってきた。

現在の STF Phase-2 (STF-2)[3] では、STF 棟地下トンネルに 1.3 GHz 超伝導加速空洞 12 台を納めた ILC 仕様のクライオモジュールを設置し、冷却試験やビーム加速試験を行い、ILC で要求される加速電界 31.5 MV/m の実現を目指している。2019 年から開始したビーム運転では 7 空洞での平均加速勾配 33.1MV/m の達成をビーム加速にて確認している[3]。今年、新しい表面処理法を行った空洞(Nitrogen-infused cavity: N-infused cavity)を 1 台導入[4]し、これを含むクライオモジュール内の 12 空洞全てを稼働させたビーム加速試験を開始した[5]。

2021 年のビーム運転の目的の一つは、12 空洞全てを稼働させた状態でのビーム加速試験と新しい空洞導入後の加速電界の確認となる。2019 年の運転では 12 空洞のうち 8 空洞のみに RF を供給していた。今回は立体回路を組み、残りの 4 台にも RF が供給できるようにした。

もう一つは、大電流ビームの加速試験である。最大定格電流は、 $3.0 \mu\text{A}$ と 2019 年の運転から 10 倍に上げた。これは、ILC のビーム電流の 1/5 にあたり、ILC 相当の

ビーム電流を加速するための前段階の試験となる。また、最大定格変更に伴い最大出力 20 %以上での運転による漏洩放射線検査を通過も目的となる。

あとは、2019 年の運転で判明したエミッタンス悪化の原因調査および改善、レーザー安定化によるビームの安定性の確認である。エミッタンスの悪化は、放電が原因で RF 電子銃への入力パワーが 2.5 MW と低く、加速電界低下により空間電荷効果の影響を受けやすかったためと推測された。今回はコンディショニングにより定格の 4.0 MW まで上げた。レーザーの不安定性はエアコンなどによる温度変化がきっかけとなっていたため、温度安定化などの対策を行った。

この他にも、クライオモジュール内の超伝導電磁石の試験[6]やエミッタンス交換実験[7]が行われた。

2. STF-2 加速器

2.1 STF-2 ビームライン

STF-2 加速器のビームラインを Fig. 1 に示す。L-band(1.3GHz) フォトカソード RF 電子銃で生成した電子ビームは、その下流の ILC 仕様の 9 セルの超伝導空洞 2 台を含む Capture Cryomodule(CCM)で 40 MeV まで加速する。ここでエネルギーを測定する場合のみ、偏向電磁石 BH1 に通電し、ビームを 30 度曲げてダンプ1でダンプする。さらに加速する場合は、BH1 を真っすぐ通過させ、その下流にあるクライオモジュール CM1(8 空洞)および CM2a(4 空洞)(以降、両方合わせて CM1/2a)により、

[#] mfukuda@post.kek.jp

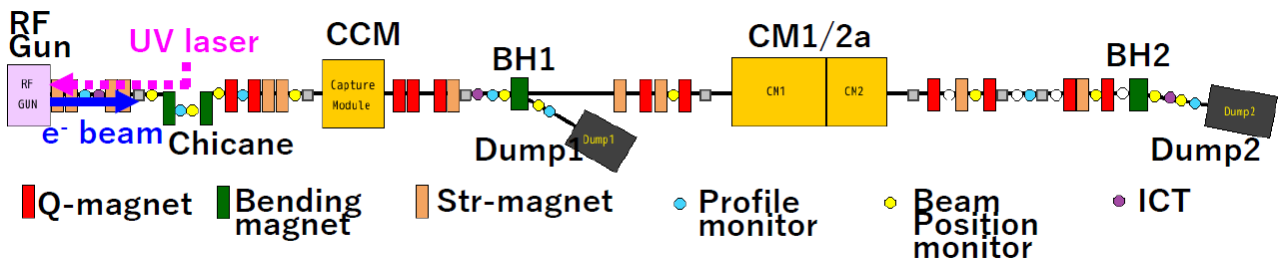


Figure 1: STF-2 beamline layout.

さらに 380 MeV まで電子ビームを加速する。その後、偏向電磁石 BH2 で 10 度曲げた後、ダンプ 2 へとダンプする。

高周波源は 3 台あり、5 MW 出力のクライストロンが RF 電子銃へ、800 kW クライストロンが CCM の 2 台の超伝導空洞へ、10 MW マルチビームクライストロン が CM1/2a の 12 台の超伝導空洞へ RF を供給している[4]。前回の運転では、CM1/2a 内の 8 台の空洞に RF を供給してビーム運転をしたが、今回は立体回路の改修を行い、全 12 台の空洞へ RF を供給できるようにした。

RF 電子銃では、波長 266 nm の紫外レーザー光を Cs₂Te が蒸着してあるカソードへ照射し、光電効果により電子バンチを生成するが、このカソードの量子効率、は、運転直前にキセノンランプから分光した紫外光を照射して測定した場合で 1 %であった。また運転中に入射したレーザーパワーとビーム電流から見積もった量子効率は 2 %となっている。これはショットキー効果により電流量が増えて、量子効率が高めにしているものと推測される。今期の運転期間である約 1 か月間、この量子効率は保持できていた。2019 年の運転では 0.3 %と低く、今回の運転前に改善策として、蒸着チェンバーを改造し、真空度や蒸着作業の操作性の改善や、Cs や Te の試料も新しいものを使用するなどの対策を行っている。

ビームラインにはビームを輸送するための四極電磁石およびステアリング電磁石あり、四極電磁石は CCM-CM1/2a 間に 5 台、CM1/2a 下流に 4 台設置している。

また、ビーム位置やサイズを測定するために、ビーム位置モニターや、スクリーンモニターも各所に設置している。スクリーンモニターは計 6 台あり、電子銃下流のシケイン中央と出口に 1 台ずつ、そして CCM 下流と CM1/2a 下流に、Q スキャンによるエミッタンス測定用と、偏向電磁石で曲げた後のビームエネルギー測定用として、それぞれ 2 台ずつ計 4 台配置している。これら 4 台のスクリーンモニターでは、ビームサイズを正確に測定する必要があるため、2 段式導入器でアルミナ蛍光板と Optical transition radiation(OTR)用の鏡面加工した 0.5 mm 厚の金属板を同じ場所で切り替えて使えるようになっている。また、ボタン電極型のビーム位置モニターを、シケイン部に 3 台、CCM 下流部に 3 台、CM1/2a 下流部に 4 台の計 10 台配置している。

ビーム電流モニターとしては、積分形電流モニター(Integrating Current Transformer: ICT)を電子銃下流、CCM 下流、BH2 下流の 3 か所に設置し、それぞれの場所でのビーム電流を計測している。

2.2 電子銃用レーザー

Figure 2 に示したのが電子銃用レーザーのレイアウトである。発振器(OSC)は 162.5 MHz のモードロックレーザーで、波長 1064 nm、パルス長 10 ps のレーザーパルス列を出力する。このレーザーパルスは、2 台のレーザーダイオード励起の増幅器(AMP1,AMP2)で増幅する。また、途中にあるポッケルスセルで、最大 1000 パルス(6 μs)を切り出す。増幅した赤外レーザー光を LBO 結晶と BBO 結晶を通して 266 nm へと波長変換し、この紫外レーザー光を電子銃へ送る。

最大定格でのビーム電流 3.0 μA を出す場合、1000 バンチ(6 μs)、5 pps のビーム運転を仮定すると 1 バンチあたり 600 pC 出すことになり、カソードの量子効率 0.3 %を仮定すると、必要なレーザー 1 パルスあたりのエネルギーは約 1 μJ になる。今回の運転では 1.5 μJ 出ており、しかも量子効率は 2019 年の運転時の 0.3 %から 1 %以上に上がったので、十分余裕をもって運転できた。

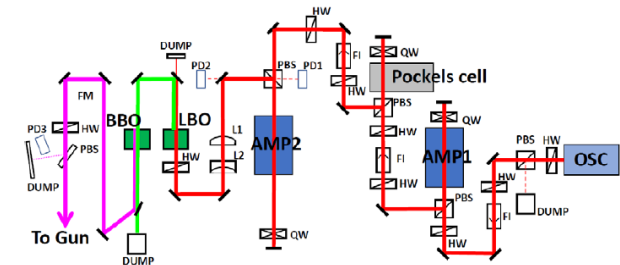


Figure 2: Laser system for a photo-cathode RF gun.

レーザーの安定化対策として、クリーンブースを拡張し、発振器の電源部をブース内に含めることで温度安定化を図った。この電源部には励起用のレーザーダイオードがあるためである。これまでは、レーザー本体はクリーンブースに入れて温調していたが、この電源は、その外にあり、エアコンによる温度変化の影響を受けていた。

さらに、加速器との同期のために 162.5 MHz の RF 信号を使って Phase locked loop(PLL)を行っている装置の AC ラインに、ノイズカットトランス(電研精機研究所製、NCT-I3)を導入した。

Figure 3 のグラフは、ある 1 日におけるレーザーハット内の温度、湿度、大気圧、発振器内の共振器長を調整しているピエゾの動きを表したものである。7 時頃レーザーを立ち上げると、温度が上昇していき、約 2 時間で温度が安定している。それに従って共振器長を調整しているピエゾも大きく動いている。だが、温度が安定した後ピエゾが動き続けている。右下のグラフには、空気の屈

折率の変化も載せており、これは、温度、湿度、大気圧から計算[8]したものである。これを見ると、屈折率の変化に合わせて共振器長を調整しているのが分かる。屈折率が変わり、空気中の光の速度や波長が変わるためと考えられる。

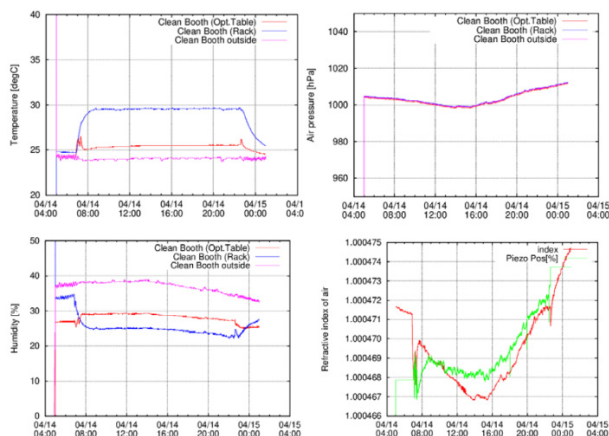


Figure 3: Temperature, Humidity and air pressure in a laser hut, and the movement of a piezo for adjusting the cavity length of a laser oscillator.

また、紫外レーザー光のパワーの1日の変化を Fig. 4 に示す。ゼロ付近に下がっているときは、低電流運転か、ビームを OFF にしているときである。このグラフから1日を通して、レーザーパワーが安定しているのが分かる。2019年では、1日安定に運転できず、途中で調整に入ることがあったが、改善策を施した今回の運転では、それではなく、安定して運転できた。

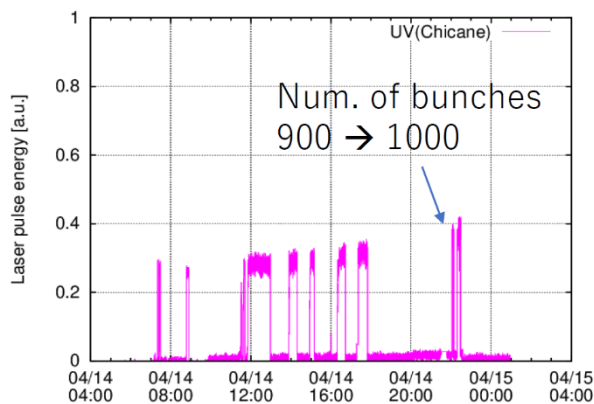


Figure 4: Trend of a UV laser power for one day.

3. ビーム測定

3.1 ビームエネルギーおよび加速電界測定

ビームのエネルギーは、偏向電磁石の磁場強度 $B[T]$ と曲率半径 $\rho [m]$ から $P[MeV/c] = 300 B\rho$ を用いて算出している。 $B[T]$ は、偏向電磁石下流のスクリーンモニターでビーム位置が軌道中心に来るように調整した時の磁場強度である。放射線を低減するため、 40 pC/bunch , 100 bunches , 5 pps と低電流ビームで測定した。

RF 位相は、各加速空洞でビームエネルギーが最大に

なるように位相調整を行い、それぞれのオンクレストに合わせた。

この後、CM1/2a の 12 空洞全てに RF を供給した状態でビーム加速を行い、ビームエネルギーは、 $384.2 \pm 4.0 \text{ MeV}$ となった。前回の 7 空洞運転時の 280 MeV から約 100 MeV 上げることができた。また、この時のエネルギー広がり RMS で 0.2% (100 bunch で測定) であった。

加速電界の測定では、大きな RF パワーを入力できない 3 台の空洞をデチューンして、新しい空洞(N-infused cavity)を含む 9 台で加速試験を行った。この時の CCM 下流でのエネルギーは $41.2 \pm 2.0 \text{ MeV}$ 、CM1/2a 下流でのエネルギーは $348.7 \pm 3.7 \text{ MeV}$ であった。Figure 5 にエネルギー測定時のビームプロファイルを示す。加速空洞 1 台の空洞長を 1.038 m とすると、9 空洞での平均加速電界は、 $32.9 \pm 0.4 \text{ MV/m}$ となった。これは、空洞に蓄積した RF パワーから計算した加速電界 33.0 MV/m とよく一致しており、ILC の要求している 31.5 MV/m 以上の加速電界を達成できた。

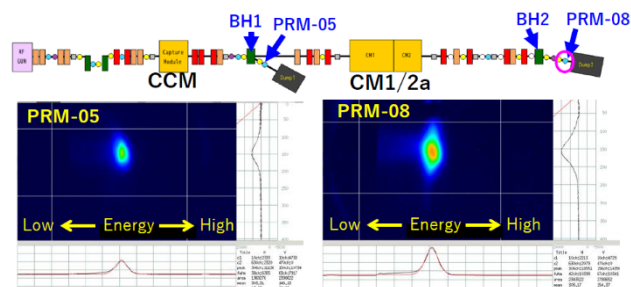


Figure 5: Beam profiles in the energy measurement at the downstream of a bending magnet.

3.2 大電流ビーム運転

2019 年の運転時から最大定格変更し、最大ビーム電流を 10 倍に上げたので、バンチ数を最大 1000 bunch ($6\mu\text{s}$) にして、大電流ビームでの運転を行った。Figure 6 のグラフは、各 ICT で測定したビーム電流の時間変化であり、1 時間以上安定して運転できているのが分かる。

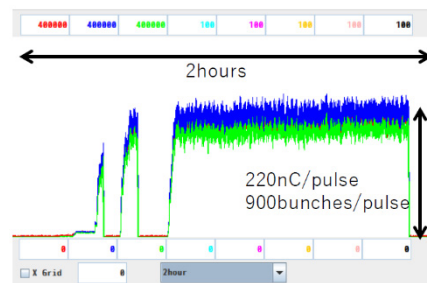


Figure 6: Trend of the beam current for two hours.

漏洩放射線検査では、エネルギー 372 MeV 、ビーム電流 1.82 A (364 nC , 5 pps) のビームを出して行った。これはビームパワーにすると 680 W で最大出力の 50% にあたる。測定の結果、漏洩放射線量は基準値以下で検査を無事通過できた。

ただし、このような大電流ビーム運転後、下流の 10 度偏向電磁石 BH2 で曲げた後のビームラインにあるプロファイルモニタ PRM-08 付近で放射化が見られ、ビーム

ロスしていることが分かった。ロスモニタとして空気チェレンコフカウンターを、その付近に設置して、ロスの信号を見たのが、Fig. 7 である。マクロパルスの後ろの方で、ロスが起きているのが分かる。運転終了後の解析で、この時のパルス内電流は 56 mA で、その時の予想されるビームローディングによるエネルギー低下はマクロパルスの最後尾で 4.2 % となった。これによる軌道のずれを計算すると、ちょうど PRM-08 でロスが起こる計算となり、ビームローディングによるエネルギー低下が原因と分かった。

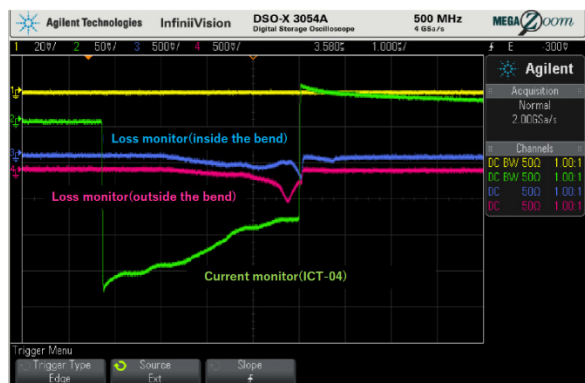


Figure 7: Signal of loss monitors placed near the profile monitor (PRM-08) where the beam loss occurred.

3.3 エミッタンス測定

エミッタンスは、CCM 下流と CM1/2a 下流の 2 か所で Q スキャン法を用いて測定している。ビームサイズは、滲みの影響のない OTR 光を利用したスクリーンモニターで測定した。エネルギー測定と同じく、放射線を低減するため、40 pC/bunch, 100 bunches, 5 pps と低電流ビームで測定している。

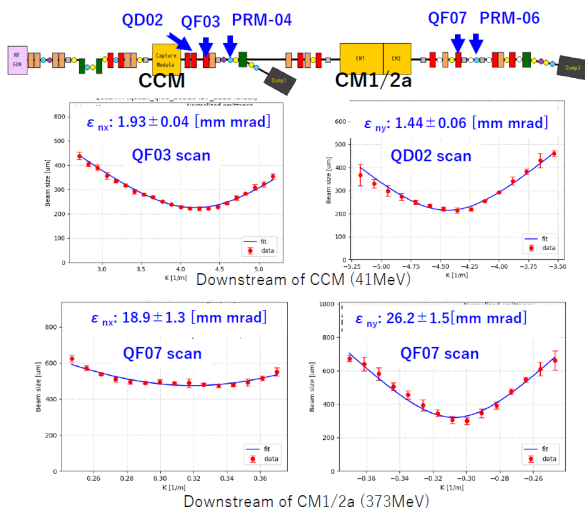


Figure 8: Results of the emittance measurement by Q-scan method.

2019 年の運転では、規格化エミッタンスは、CCM 下流および CM1/2a 下流で、それぞれ 10-20 mm mrad および 20-90 mm mrad と悪かった。対策として、RF 電子銃のコンディショニングを行い、入力パワーを 2.5 MW から

4.0 MW に改善し、加速電界を上げることで、空間電荷による影響を低減させた。

今回の運転で Q スキャンにより測定した規格化エミッタンスは、Fig. 8 にあるように CCM 下流では、X: 1.93 ± 0.04 mm mrad、Y: 1.44 ± 0.06 mm mrad と以前から大きく改善した。ただ、CM1/2a 下流では、X: 18.9 ± 1.3 mm mrad、Y: 26.2 ± 1.5 mm mrad と悪いままだった。RF 電子銃での加速電界の増加で、CCM ではエミッタンスが改善したが、CM1/2a では改善せず、エミッタンス悪化には、空間電荷効果以外の別の原因があることが分かった。

1 バンチあたりの電荷を変えて、エミッタンスを測定した結果が Fig. 9 である。これを見ると、CM1/2a 下流でのエミッタンスは、電荷が下がっても悪いままで、悪化の原因は、バンチ電荷に依存するものではないと思われる。現在、原因を究明中である。

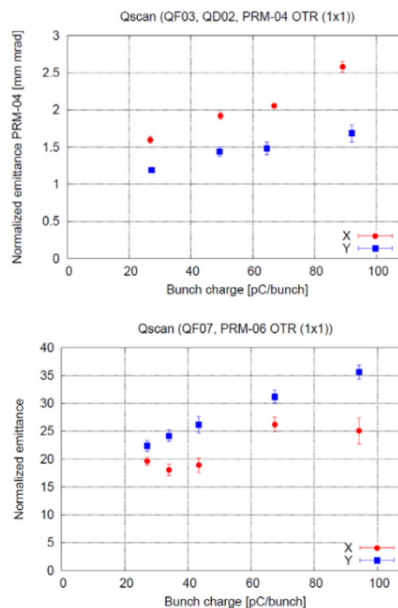


Figure 9: Results of the measured emittance as a function of the bunch charge.

3.4 CM1/2a のビーム輸送効率

CM1/2a でエミッタンス悪化が起きていると推測されたので、ここでのビームトランスミッションを調査した。CM1/2a の上流側にあるステアリング電磁石 ST5 でビーム軌道を一定のステップで振っていき、CM1/2a 下流にあるビーム位置モニター (MB-09) でのビーム位置や、CM1/2a 上流の MB-06 と下流の MB-09 を使ってビームトランスミッションを測定した。また、MB-09 のそばにロスモニタとして空気チェレンコフカウンターを設置した。

Figure 10 が、その測定結果である。左が、MB-09 でのビーム位置をプロットしたもので、普段ビームを通す中央付近では、特にゆがみは見えず、CM1/2a 内で不要なキックを受けている様子はない。端の方は大きく歪んでいるが、これは位置の計算式に高次の補正が入っていないため、正しく計算できるのはおよそ ± 5 mm くらいまでである。右はロスモニタの信号で、右端に来るとロスが大きくなっており、その中央寄りでも少しロスが出ている。中央のグラフは、MB-06 と MB-09 の信号強度から出

したトランスミッションであるが、端のほうまでほぼロスなく通っており、ビームを止めるような障害物はなさそうである。あるとすれば、物質量が少なくビームが突き抜けてしまうようなものと考えられる。

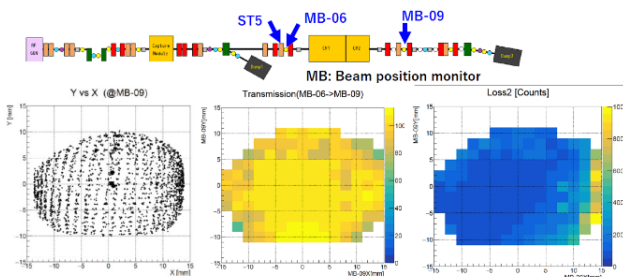


Figure 10: Results of the beam position at the MB-09, the transmission of the CM1/2a and the beam loss near the MB-09, when scanning the beam position by the steering magnet of ST5.

3.5 CM1/2a 入口でのビームサイズ

CCM 下流での Q スキャンの測定結果から得られた Twiss パラメーター α, β を使い、転送行列にて CM1/2a 入口までのベータ関数の計算を行い、そこでの推定ビームサイズを計算した。Figure 11 が Strategic Accelerator Design(SAD)[9]で計算したベータ関数である。計算された CM1/2a 入口でのビームサイズは、X: 0.5 mm, Y: 7.4 mm となり、非常に縦長のビームを入射していたことになる。これがエミッタンス悪化の原因か現在調査中である。

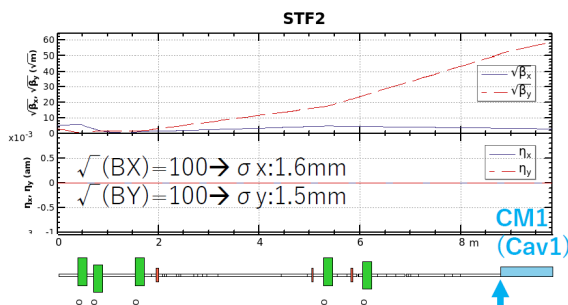


Figure 11: Beta functions between the CCM and the CM1/a calculated by SAD.

4. まとめと今後

今回の運転において、新しい表面処理をした空洞(N-infused cavity)を含む 9 空洞での平均加速電界は、 32.9 ± 0.04 MV/m となり、ILC の要求する 31.5 MV/m 以上の加速電界を達成できた。エミッタンスは、CCM 下流の 40 MeV のビームでは 1.7 mm mrad 前後と改善されたが、CM1/2a では、20 mm mrad 前後と 10 倍以上に悪化しており、現在原因を究明中である。

今後は、エミッタンス悪化の原因調査のため、CM1/2a 内に障害物がないか確認するため、CM1/2a の上下流に覗くための真空窓を取り付け、内部を観察する予定である。また、CM1/2a の直前、直後のビームサイズが測定できるように、スクリーンモニターを増設する。さらに、ビー

ムローディングによるロスを減らすため、マクロパルス内電流を RF システムとして想定している 10 mA 以下に減らし、ロングパルスでビームを出せるようにする。このために、レーザーの増幅系のパラメーターを調整して、6 μ s から 100 μ s にパルス幅を伸ばす。

これらの対処を行い、2021 年の秋にもう一度ビーム運転を行う予定である。さらに来年度には 5 倍のビーム電流へ増強し、ILC と同等のビーム電流での運転を目指す。

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ズ 34-4, 277 (2016).
- [4] Y. Yamamoto *et al.*, “Cavity Exchange Work for Cryomodules in STF-2 Accelerator”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FRPP31.
- [5] Y. Yamamoto *et al.*, “Demonstration of electron beam acceleration at 33 MV/m by STF-2 Cryomodules for ILC”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, TUOB04.
- [6] H. Shimizu *et al.*, “R&D activities report on superconducting magnet in STF”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, MOOB05.
- [7] S. Aramoto *et al.*, “Round to flat beam transformation experiment at kek stf”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 9-12, 2021, WEP031.
- [8] “レーザー干渉測長器の環境依存性について”, TRI Osaka technical sheet, No. 5001; <http://tri-osaka.jp/technicalsheet/5001.PDF>
- [9] SAD Home Page – Strategic Accelerator Design; <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>