

cERL における空間電荷効果が支配的な電子ビームの光学関数と エミッタンス補償条件の改善

IMPROVEMENT OF OPTICAL FUNCTIONS AND EMITTANCE COMPENSATION FOR SPACE CHARGE DOMINATED ELECTRON BEAM IN THE COMPACT ERL AT KEK

宮島 司^{*A)}、布袋 貴大^{B)}、本田 洋介^{A)}、島田 美帆^{A)}、高井 良太^{A)}、帯名 崇^{A)}、加藤 龍好^{A)}、永井 良治^{C)}
Tsukasa Miyajima^{*A)}, Takahiro Hotei^{B)}, Yosuke Honda^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Takashi Obina^{A)},
Ryukou Kato^{A)}, Ryoji Nagai^{C)}

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

^{B)}SOKENDAI

^{C)}QST, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

In order to improve optical functions and emittance compensation conditions for space charge dominated electron beam in the compact ERL at the KEK, we introduced a new 3D model of a 2-cell injector superconducting cavity instead of a cylindrical 2D model. The 3D model includes input and HOM couplers. By using the 3D model, we improved the optical functions from the injector to the main superconducting linac. Because of the improvement of the optical functions, emittance growth at both the injector and the recirculation sections decreased for the bunch charge of 40 pC.

1. はじめに

KEK の小型エネルギー回収型線形加速器 compact ERL (cERL) は、次世代の放射光源に向けた試験加速器として開発が開始されたが、PF の将来光源として ERL に代わって貯蔵リング型光源を推進するという決定を受けて、2016 年に放射光源に向けた開発から産業利用や将来の超伝導加速器に向けた開発に転換することになった。産業利用に向けては EUV リソグラフィ光源が一つのターゲットであり [1]、また超伝導加速器の利用としては XFEL と組み合わせた CW-XFEL がターゲットの一つとなる。どちらの利用に向けても、cERL の当面の目標であったバンチ電荷 7.7 pC (1.3 GHz 繰り返しの CW 10 mA に相当) から、一桁上げた 60 ~ 数 100 pC にバンチ電荷を上げることが必要となる。ERL 光源利用の最終目標バンチ電荷は 77 pC (CW 100 mA) であったが、cERL のコミッショニングでは段階的に平均電流とバンチ電荷を上げる方針で進めており、2016 年までの CW 運転時の最大バンチ電荷は 5.5 pC であった。2017 年 3 月からはバンチ電荷を増強する試験を開始し、バースト運転でバンチ電荷 40 pC のビーム輸送試験を行った。

cERL 入射器のような低エネルギー領域にある電子ビーム輸送では、環境磁場等の外乱や空間電荷効果によって、ビーム光学関数と射影エミッタンスの補償条件が設計条件から外れてしまい、ビーム性能が悪化する。このずれを補正することが高いビーム性能を実現する上で重要である。これまでの cERL のビーム運転では、四極磁場に対するビームサイズ応答を測定・補正する方法 [2] により、比較的空間電荷効果の弱い 5.5 pC 程度のバンチ電荷では、設計輸送条件を実現できるようになった。しかしながら、2017 年 3 月から開始した 40 pC の高バンチ電荷運転では、空間電荷効果を補正しきれず射影エミッタンスの増大が起きていた。十分な補正ができ

ない原因の一つとして、入射超伝導空洞モデルの課題が明らかになってきた。入射超伝導空洞のモデルとして円筒対称性を仮定したモデル (2D モデル) をオプティクス設計に利用していたが、この理想的なモデルでは現実を反映しきれていないことがわかってきた。この課題を解決するために、入力結合器と高調波減衰結合器を加えた 3 次元加速空洞モデル (3D モデル) を新たに作成し、シミュレーションと実験を比較した結果、入射器区間の単粒子軌道応答をほぼ再現できるようになった [3]。

次の課題として、新しいモデルを用いたときにエミッタンス補償等の輸送条件の補正がどの程度改善されるかを評価することが重要となる。このために、1. 空間電荷効果の支配的なバンチ電荷 60 pC に対する 2D/3D モデルによる影響をトラッキングを用いて明らかにすること、2. 3D モデルを用いることによるバンチ電荷 60 pC の輸送条件の改善効果の定量的評価の 2 つを研究目的として、数値解析及びビーム試験を行った。本報告では、特に低エネルギー領域におけるオプティクス補正の精度向上とエミッタンス補償条件の改善について紹介する。

2. 2-CELL 入射超伝導空洞のモデル

2-cell 入射超伝導空洞 [4] は、Fig. 1 の Injector SC Linac 区間に 3 台設置されている。電子ビームは DC 光陰極電子銃において 390 ~ 500 kV の電圧で加速さ

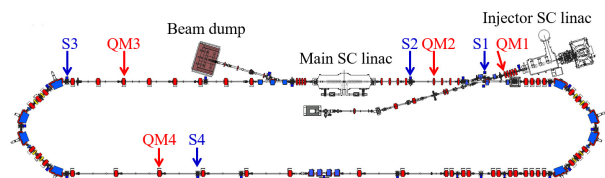


Figure 1: Layout of cERL. QM1, QM2, QM3 and QM4 indicate quadrupole magnets, and S1, S2, S3 and S4 indicate screen monitors.

* tsukasa@post.kek.jp

れた後に、3台の入射超伝導空洞で全エネルギー $E = \gamma mc^2 = 2.9 \sim 5 \text{ MeV}$ まで加速される。cERL 運転開始から 2017 年 3 月までは、2-cell 入射超伝導空洞のモデルとして、Fig. 2 に示す円筒対称性を仮定したモデルを用いていた。空洞内の電磁場分布は Poisson/Superfish によって計算され、進行方向 z とラジアル方向 r に対する分布となり、円筒対称性をもつ。計算された電磁場分布は空間電荷効果を含んだ粒子トラッキングコード General Particle Tracer (GPT) に読み込まれ、オプティクス設計に利用される。この 2D モデルは Fig. 2 に示すように、空洞の入口と出口に余計な構造物をもたない形状となっている。

しかしながら、実際の入射超伝導空洞では Fig. 3 に示すように空洞の前後に入力結合器 (input coupler) や高調波減衰結合器 (HOM coupler) が配置される。空洞入口には垂直上向き軸 $\pm 45 \text{ deg}$ 方向と垂直下向き軸方向に合計 3 本の HOM coupler が設置され、空洞出口には上下方向に 2 本の input coupler と水平方向に 2 本の HOM coupler が設置されている。3D モデル作成にあたっては、3次元電磁場解析ソフトウェアである CST MW STUDIO を使用した。電磁場分布は水平方向 x 、垂直方向 y 、進行方向 z に対する 3次元分布となる。2D モデルを用いたオプティクス計算と同様に、GPT に 3次元分布を読み込み粒子トラッキングを行っている。3D モデルを検証するために、空間電荷効果なしの条件での単粒子軌道シミュレーションとビームを使って測定したシングルキック応答を比較した。モデル計算と測定による結果は良く一致し、作成した 3D モデルが現実の 2-cell 超伝導空洞を良く再現していることを確認することができた [3]。

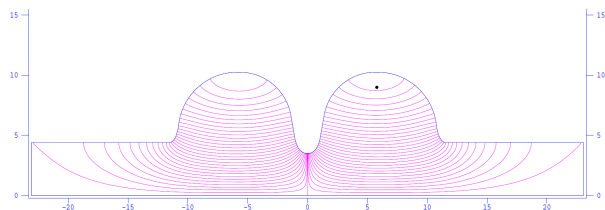


Figure 2: Two dimensional model of 2-cell superconducting cavity without couplers. The units of horizontal and vertical axes are cm.

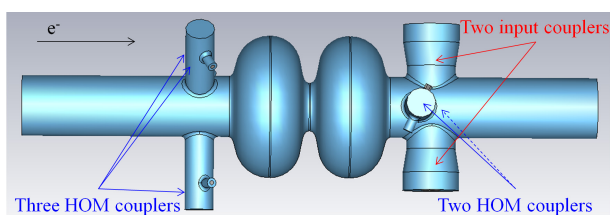


Figure 3: Three dimensional model of 2-cell superconducting cavity with input and HOM couplers.

3. ビーム輸送条件に対する影響

入射超伝導空洞のモデルの違いによる影響を評価するために、GPT を用いたトラッキングシミュレーションを行った。シミュレーション条件はバンチ電荷 60 pC、電

子銃電圧 500 kV、入射器出口の全エネルギー 5.25 MeV、主空洞出口の全エネルギー 17.7 MeV である。シミュレーションに使用したオプティクスは、3D モデルを用いた輸送路に対して Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA) により主空洞出口におけるエミッタンスとバンチ長を最小化するとともに、周回部とオプティクス整合するための拘束条件を満たすように設計された。最適化計算ではソレノイドによる収束力、バンチャー空洞電圧、入射超伝導空洞の加速勾配と位相、四極電磁石の収束・発散力が自由パラメータとして最適化された。

Figure 4 に入射超伝導空洞のモデルとして 2D モデルと 3D モデルを使用した場合の rms ビームサイズとビームの全エネルギーの計算結果を示す。2つの計算では入射超伝導空洞のモデルのみを変更し、その他の条件は同一にしている。このため、Fig. 4 に示すように入射器入口まではビームサイズは全く同じ時間発展しているが、入射空洞内に入ってから徐々にビームサイズが変化し、下流にその変化が伝播していくことがわかる。2017 年 3 月まではここで示した計算例とは逆になるが、2D モデルでオプティクス設計を行いその条件を実際の cERL 加速器に設定していた。しかしながら、Fig. 4 に示した例のように、入射空洞下流では β_x や β_y のオプティクスがずれることになる。

オプティクスのずれは、合流部でのエミッタンス補償条件に大きく影響する。Figure 5 に 2D モデルと 3D モ

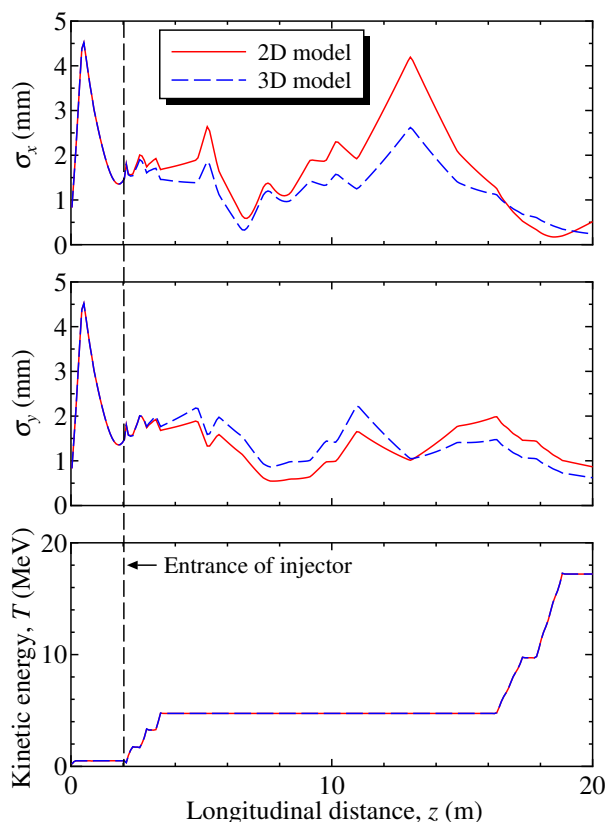


Figure 4: Time evolutions of horizontal and vertical rms beam sizes calculated by using 2D or 3D models of 2-cell injector cavities.

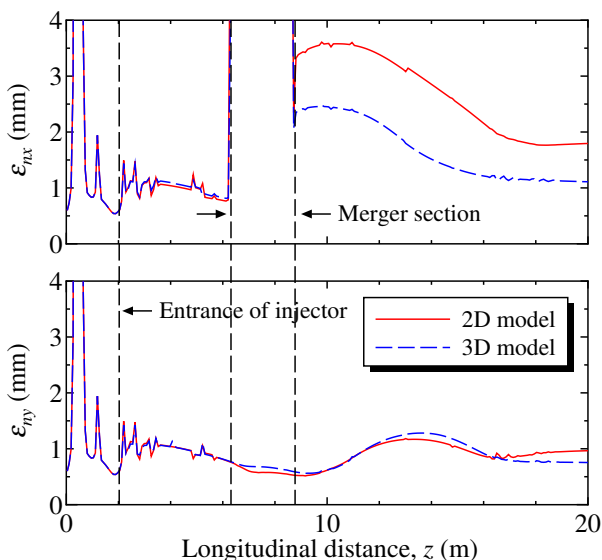


Figure 5: Time evolutions of horizontal and vertical rms normalized emittances calculated by using 2D or 3D models of 2-cell injector cavities.

デルを用いた場合の規格化 rms エミッタンスの時間発展を示す。エミッタンスはビームサイズの場合とは異なり、入射器入口から合流部入口までの区間ではほとんど同じ値となっている。しかし、合流部出口以降では 2D モデルの場合にはエミッタンスが大きく増加していることがわかる。これは空間電荷分散関数による射影エミッタンスの増加 [5] として知られている現象である。空間電荷分散関数は、分散関数と進行方向空間電荷力によって生じるパンチスライスの横方向の位置変化を表す関数であり、合流部を出た後もゼロにならない。この結果、Fig. 6 に示すようにスライス毎の位相空間上の位置変化が生じ、射影エミッタンスが増大することになる。このエミッタンス増大を補償するには、位相空間分布の長軸方向と空間電荷分散関数によるスライスがずれる方向を一致させる必要がある [5, 6]。我々が制御可能なのは位相空間分布の長軸方向、すなわち輸送オプティクスであり、合流部上流の四極電磁石を制御することで Fig. 6 (b)

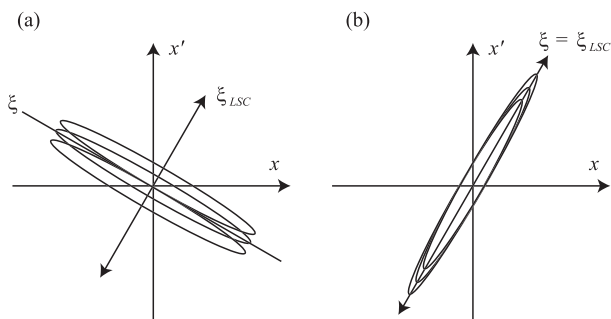


Figure 6: Schematic view of emittance correction at merger exit. ξ is the major axis of phase space ellipse, and ξ_{LSC} is the direction space charge dispersion function. Emittance growth is minimized for the figure (b).

のような補償条件を実現することができる。Figure 5 では、3D モデルを用いて最適化しているため、2D モデルに切り換えると Fig. 4 に示されるように合流部出口においてオプティクスがエミッタンス補償条件 (Fig. 6 (b)) からずれてしまう。この結果、エミッタンス増大が生じていると考えることができる。

Figure 5 における合流部内の一時的なエミッタンス増加についての注意であるが、ここで計算しているエミッタンスは水平面あるいは垂直面に対する射影エミッタンスであり、合流部では分散関数とエネルギー拡がりがないことにより大きく増大している。合流部出口以降は分散関数がゼロに戻るためエネルギー拡がりによる寄与がなくなり、通常の射影エミッタンスに戻る。

4. モデルによる影響の測定

4.1 輸送オプティクスに対する影響

ここでは、Fig. 1 の QM1 で測定したオプティクスに対する入射超伝導空洞モデルの違いによる影響を評価する。cERL では四極電磁石 (QM) の k 値をスキャンしたときの rms ビームサイズ σ_x と σ_y の応答からオプティクスが設計と合っているかどうかを評価している。また、測定された応答が設計応答からずれている場合には、スキャンした QM の上流に配置される複数の QM を補正することで、オプティクス補正を行っている [2]。オプティクスのずれの原因として、入射超伝導空洞のモデルによる影響の他に、環境磁場の影響や四極電磁石の履歴や励磁曲線のずれによる影響が考えられる。オプティクス補正ではこれらの影響を全部含めて補正することになるため、純粋にモデルの影響を区別することは難しいが、今回は 2D モデルを使用して設計した場合と、3D モデルを使用して設計した場合のオプティクス補正の収束度合について比較を行った。

Figure 7 に 2D モデルを用いて設計した場合のオプティクス補正後の QM1 スキャン結果を示す。このときのビーム輸送条件は、電子銃電圧 390 kV、パンチ電荷 0.5 pC、入射器出口の全エネルギー 2.9 MeV である。2D モデルを用いてオプティクスを設計した場合は、当然ながら入射超伝導空洞に起因するオプティクスのずれが発生する。設計応答からのずれを最小化するようにオプティクス補正を複数回繰り返し、補正が収束した条件を示している。補正が収束した条件とは、これ以上補正を繰り返しても補正量が小さくオプティクスが変わらない状態を表す。2D モデルの場合、Fig. 7 に示されるように、オプティクス補正が収束した条件でも設計応答と測定応答でずれが残っていることがわかる。

2D モデルの代わりに 3D モデルを用いて設計した場合のオプティクス補正後の結果を Fig. 8 に示す。このときのビーム輸送条件は、電子銃電圧 500 kV、パンチ電荷 60 pC、入射器出口の全エネルギー 5.2 MeV である。2D モデルの場合と同様に、オプティクス補正が収束した後の測定結果を示している。Figure 8 の条件は、2D モデルの場合と異なるため直接比較は難しいが、パンチ電荷が 60 pC であり空間電荷効果が強くより厳しい条件となっている。2D モデルの結果 Fig. 7 と比較すると、3D モデルの場合には Fig. 8 に示されるように、空間電荷効果が強くなったにもかかわらず設計応答にさらに近づけられる

Table 1: Correction k (m^{-2}) Values of Quadrupole Magnets for Optics Matching at QM1

	QMGC01	QMGC02	QMGC03	QMGC04
0.5 pC, 2016 (2D model)	-0.769	0.0897	0.568	-5.87
60 pC, 2018 (3D model)	-2.09	-4.41	1.18	-2.98

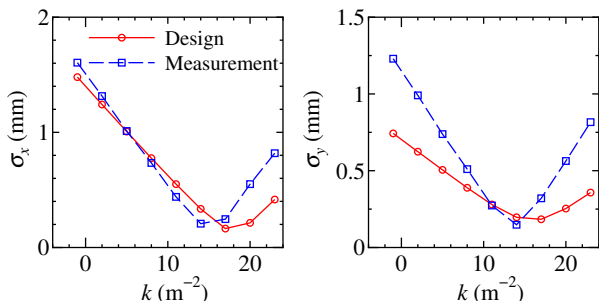


Figure 7: Measured rms beam size responses for QM1 scan after optics matching toward design optics, which is calculated by 2D model of 2-cell injector cavity.

ことが確認された。

Table 1 に 2D モデルと 3D モデルの場合の補正に使用した四極電磁石の補正量を示す。QMGC01, QMGC02, QMGC03, QMGC04 は Fig. 1 の QM1 の上流に配置される四極電磁石である。Table 1 の k 値は設計値からの補正量を表す。2D モデルの場合、1 台の四極電磁石の補正量が $-5.87 m^{-2}$ と大きく、他の 3 台の補正量の絶対値は $< 1 m^{-2}$ 程度の値となった。3D モデルの場合、1 ~ $4 m^{-2}$ 程度の補正量となったが、四極電磁石 1 台あたりの補正量絶対値の最大値は $4.41 m^{-2}$ となり、2D モデルの場合の $5.87 m^{-2}$ よりも小さくなった。これらの結果だけでは、オプティクス設計に 3D モデルを利用することで、補正量を小さくできたとはい切ることにはできないが、少なくとも Fig. 8 の結果のように、バンチ電荷 60 pC の空間電荷効果が支配的なビームでも設計オプティクスにより近づけられることが確認された。

また、3D モデルを使用したオプティクス補正を実施しても、輸送条件(励起レーザー分布、バンチ電荷、エネルギー、オプティクス)を変えた場合に、補正の収束が悪い場合もある。バンチ電荷とビームエネルギーがオプティクスに与える影響、磁場誤差の影響、入射超伝導空洞内のビーム軌道オフセット(軌道が変わると収束力が変化するため [3]) を考慮して、今後もオプティクス誤差の原因調査とマッチング手法の改善を継続していく必要がある。

4.2 エミッタンスに対する影響

オプティクス補正後に、Fig. 1 の QM2(合流部から主空洞の間)、QM3(第一アーク入口)、QM4(第一アーク下流)の三箇所において四極電磁石を用いた waist-scan 法によるエミッタンス測定を行った。エミッタンス測定結果を Table 2 に示す。第 1 行目の結果 (40 pC, 2017) は、入射超伝導空洞として 2D モデルを用いてオプティクス設計及び補正を行っているときの結果である。主空洞通

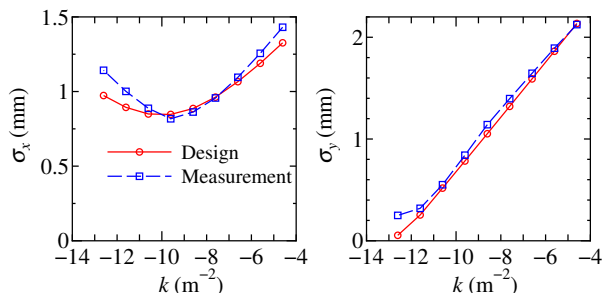


Figure 8: Measured rms beam size responses for QM1 scan after optics matching toward design optics, which is calculated by 3D model of 2-cell injector cavity.

過後に水平方向エミッタンスが $9.2 \pi mm\cdot mrad$ まで悪化している。第 2 行目の結果 (40 pC, 2018) は、3D モデルを用いてオプティクス設計及び補正を行っているときの結果であり、2D モデルのときと比べて水平エミッタンスは QM3 では $9.2 \rightarrow 3.6 \pi mm\cdot mrad$ 、QM4 では $9.8 \rightarrow 3.2 \pi mm\cdot mrad$ までエミッタンスを低減することができた。第 3 行目の結果 (60 pC, 2018) は、バンチ電荷 60 pC に対して 3D モデルを用いてオプティクス設計及び補正を行ったときの結果である。水平エミッタンスは QM3 では $5.5 \pi mm\cdot mrad$ 、QM4 では $6.5 \pi mm\cdot mrad$ となり、バンチ電荷 40 pC で 2D モデルを使用していた第 1 行目の結果と比べて、ある程度エミッタンスを低減できている。

Table 2: Measured Normalized rms Emittances in Units of $\pi mm\cdot mrad$

	QM2		QM3		QM4	
	ϵ_{nx}	ϵ_{ny}	ϵ_{nx}	ϵ_{ny}	ϵ_{nx}	ϵ_{ny}
40 pC, 2017	2.0	2.4	9.2	3.2	9.8	4.2
40 pC, 2018	1.6	1.8	3.6	1.9	3.2	2.2
60 pC, 2018	2.8	2.2	5.5	2.5	6.5	2.5

5. 考察

入射超伝導空洞として 3D モデルを用いて設計・オプティクス補正した場合には、Table 2 の第 2 行目 (40 pC, 2018)、第 3 行目 (60 pC, 2018) のエミッタンス測定結果が示すように、2D モデルを用いていたときの第 1 行目 (40 pC, 2017) の結果よりも水平エミッタンスを低減できるようになった。一つの理由としては、入射超伝導空洞の 3D モデル導入により、合流部における空間電荷分散数によるエミッタンス増大に対する補償条件を改善

することができたことによると考えることができる。これは Fig. 8 の結果が示すように、バンチ電荷 60 pC の空間電荷効果が支配的なビームに対してもオプティクスを設計条件により近づけられたことにより、合流部におけるエミッタンス補償条件が改善された考えることができる。

しかしながら、バンチ電荷 60 pC に対する設計エミッタンスは水平方向 $1.1 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、垂直方向 $0.75 \pi \text{mm}\cdot\text{mrad}$ であり、この値にはまだ到達できていない。特に垂直方向エミッタンスは合流部の分散関数の影響を受けないため、より低い値で輸送できるはずであるがまだ実現には至っていない。エミッタンス増大については、これまでの試験によりソレノイド磁場の非線形成分、励起レーザー分布の乱れ、環境磁場等が原因になり得ることがわかってきており、非線形磁場の補正用コイルの追加など一つずつ対策を行っていく予定である。

6. 結論

cERL における低エネルギー領域のビーム輸送条件をより現実の加速器に近づけるために、入力結合器と高調波減衰結合器を含む 3 次元入射超伝導空洞モデルを導入した。ビーム試験の結果、あらゆる条件に対応できているわけではないが、バンチ電荷 60 pC の空間電荷効果が支配的な条件においても、2 次元円筒対称モデルを用いていたときと比べて、オプティクスを設計条件にさらに近づけられるようになった。輸送条件が改善された結果、バンチ電荷 40 pC のビーム輸送において 2D モデルを使用してオプティクス設計していたときに比べて、エミッタンスを低減することができた。しかしながら、設計エミッタンスにはまだ到達しておらず、今後もエミッタンス増大原因の調査と対策を継続していく予定である。

謝辞

KEK の許斐太郎氏には基本となる 2-cell 入射超伝導空洞の 3 次元モデルを作成して頂き感謝する。また、本研究の一部は JSPS 科研費 (15K04740) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] N. Nakamura *et al.*, “ERL-FEL を用いた半導体リソグラフィ用高出力 EUV 光源”, 第 15 回日本加速器学会年会 (2018), WEP128.
- [2] T. Miyajima *et al.*, “Optimization of beam optics in low emittance electron linac”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, August 5-7, 2015, pp.963-967.
- [3] T. Hotei *et al.*, “高輝度ビーム実現に向けた cERL 入射器空洞のカプラーキックの評価”, 第 15 回日本加速器学会年会 (2018), THOM09.
- [4] K. Watanabe, S. Noguchi, E. Kako, K. Umemori and T. Shishido, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **714** (2013) 67-82.
- [5] R. Hajima, “Emittance Compensation in an ERL Merger”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 2004, pp. 432-434.

- [6] J. Hwang, E. Kim and T. Miyajima, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **684** (2012) 18-26.