

# コンパクト ERL 周回部のオプティクスとエミッタンス測定 MEASUREMENTS OF BEAM OPTICS AND EMITTANCE AT THE COMPACT ERL RECIRCULATION LOOP

島田美帆 <sup>\*A)</sup>、布袋貴大 <sup>B)</sup>、宮島司 <sup>A)</sup>、高井良太 <sup>A)</sup>、帯名崇 <sup>A)</sup>、  
本田洋介 <sup>A)</sup>、中村典雄 <sup>A)</sup>、原田健太郎 <sup>A)</sup>、上田明 <sup>A)</sup>、加藤龍好 <sup>A)</sup>  
Miho Shimada<sup>\*A)</sup>, Takahiro Hotei<sup>B)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>,  
Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Kentaro Harada<sup>A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Ryukou Kato<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization, KEK  
<sup>B)</sup>The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

## Abstract

Energy Recovery Linac (ERL) is expected to realize the extreme low emittance or short bunch at a relatively high average current, which is required at the high intensity FEL or THz radiation source. It is important to control and analyze the beam dynamics at the Compact ERL (cERL), the test facility based on the superconducting linac. In a few tens pC bunch charge operation, the emittance growth due to the collective effects are not negligible at the cERL. The linear optics at the recirculation loop is optimized to suppress the emittance due to the CSR wake with the simulation code, ELEGANT. At the optimized optics, the space charge effect of the recirculation loop is also estimated with General Particle Tracer, GPT. In the cERL commissioning, the transverse emittance are measured by the Q scan method at several point in the recirculation loop. We summarized and discussed both results.

## 1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) では、加速した電子ビームからエネルギーを回収して新しい電子ビームにエネルギーを与える。そのため、線形加速器ならではの低エミッタンスや短バンチの電子ビームを 10mA 近くの高い平均電流で運転することが可能となる。この特徴から、大強度の自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) やコヒーレント放射の光源として期待されている [1,2]。コンパクト ERL (Compact ERL, cERL) は CW 超電導加速器による試験機として建設され、2013 年から段階的に試運転を進めている [3,4]。レイアウトを図 1 に示す。入射加速空洞でおよそ 3-5MeV に加速された電子ビームは入射角 16 度で周回部に合流する。主加速空洞で加速・エネルギー回収が行われ、減速したビームはダンプに輸送される。この入射・ダンプビームを振り分けるシケインは、周回ビームと運動量比が 1:6 かそれ以上の比率で軌道が振り分けられるように設計している。主加速空洞では、2 台の TESLA 型をもとに独自に設計した 9 セル空洞を一つのクライオモジュールに入れている。将来的にはさらに 4-6 台の空洞を追加できるようにスペースを確保している。主加速空洞側の直線部を北側、反対側を南側直線部と呼ぶ。コミッションングの電子ビームのエネルギーは、主加速空洞のフィールドエミッションの状況を考慮しながら調整しており、2018 年 3-6 月の運転では、周回ループで 17-18MeV であった。

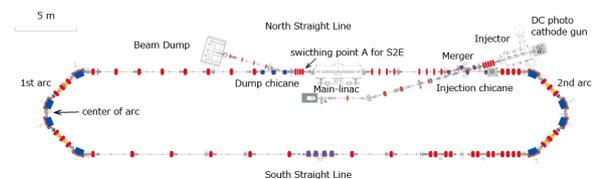


Figure 1: Layout of compact ERL. Simulation codes (GPT and ELEGANT) in the S2E simulation are switched at the point A.

## 2. 周回部オプティクス設計とエミッタンス増加

電子が十分に加速されていない低エネルギー領域では、空間電荷効果 (Space Charge Effect, SC) の影響によるエミッタンス増加を考慮してビーム輸送のオプティクスを設計する必要がある。そのシミュレーションに General Particle Tracer (GPT) を使用しているが、SC を取り入れた粒子トラッキングには膨大な計算時間・CPU が必要になる。そこで、オプティクスの最適化を、周回エネルギーに加速するまでを GPT、その後の周回ループは ELEGANT を用いて行った。GPT の最適化では SC の効果を取り入れているが、ELEGANT では SC の効果を入れずに計算時間を短縮した。しかし、CSR wake の影響は考慮している。このように、加速器の場所によって計算コードを変える手法を Start-to-end (S2E) simulation と呼ぶ。

周回ループのアーク部は、4 つの偏向電磁石で Triple Bend Achromat (TBA) に似た対称的なラティスを構成した。さらに水平方向のオプティクスを対照に保ち、アーク中心の水平分散関数から進行方向の

\* miho.shimada@kek.jp

分散関数 (転送行列の R56 成分) を推測することができるようになってきている [5,6]。偏向電磁石の間には3つの四極電磁石の Triplet を設置しており、アクロマートの条件を維持しながら R56 やアイソクロナス (R56=0) 条件を調整する。Triplet の極性の組み合わせには1つの自由度があるが、triplet の K 値の絶対値が小さくなるように DFD とした。

オプティクスが対称となる条件は、2つの triplet の K 値が対称であり、アーク中心で  $\alpha_x=0$  となることである。アーク中心の  $\beta_x$  が変数として残る。簡単に CSR wake によるエミッタンス増加の影響を調べるために、理想的なガウシアンビームでアークのみのトラッキングを行ったところ、 $\beta_x=5\text{m}$  でエミッタンス増加が最小となった。その結果を図2に示す。アーク入り口で、電子エネルギー 35MeV、バンチ電荷 80pC、規格化エミッタンス 0.4mm-mrad、バンチ長 3ps としている。

アクロマートの条件ではアーク部全体で水平方向に収束するオプティクスになるため、垂直方向でベータ関数が大きくなる傾向にある。ベータ関数の最大値を抑えるため、垂直方向もアーク中心で  $\alpha_y=0$  とし、対称性を保つようにした。アーク部中心で  $\beta_y=5\text{m}$  とすると最大ベータ関数が 40m 程度となる。このようにアーク部のベータ関数を設計したのちに、北側・南側直線部でマッチングを行った。周回ループ全体の設計オプティクスを図3に載せる。

周回ループにおいてもエネルギーが十分大きくないため、SC によるエミッタンス増加が懸念される。その評価を行うため、設計オプティクスで GPT によるトラッキングを行った。計算時間節約のため、この GPT の計算では CSR wake の影響は含まれていない。水平・垂直の規格化エミッタンスが 0.26 mm-mrad、バンチ長が 2ps のガウシアン分布の理想的なビームが周回ループに入射したとして計算を行った。図4にトラッキングの結果を示す。電荷量が 77pC の場合は、分散関数が閉じている直線部においても有意なエミッタンス増加がみられることがわかる。CSR wake によるエミッタンス増加は ELEGANT で見積もった (図4)。電荷量 77pC でエミッタンス増加が目立つようになる。SC については垂直方向にも水平方向と同程度のエミッタンス増加がみられた。

### 3. エミッタンス測定

コミッションングのビーム調整においてもオプティクス設計の手順を踏襲している。バンチ電荷量、電子銃の印可電圧や電子銃レーザーのパルス形状に合わせて、低エネルギー領域のオプティクスをその都度最適化している [7]。電荷量 60pC で規格化エミッタンスがおよそ 1mm-mrad を目標としている。エネルギー回収を行わないときは、低いエミッタンスを目指して、最大入射エネルギー 5.5MeV で入射する。分散関数 (アクロマートやアイソクロナス) の調整はアーク部で行い、北側・南側直線部でベータ関数によるビームサイズの調整 (マッチング) を行っている。分散関数は主加速空洞の加速勾配を下げた時のビーム軌道変化を BPM で測定して求めて

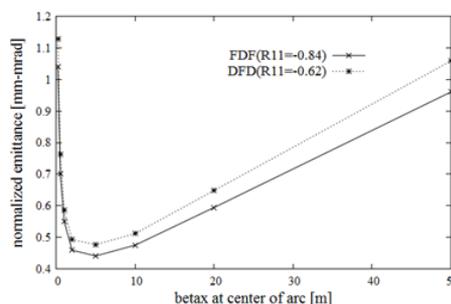


Figure 2: Simulation results of horizontal normalized emittance at the exit of the first arc as a function of the horizontal betatron function at the center of the arc. The computer code elegant is used with a macroparticles of  $10^5$ . R11 element of the arc section is also shown.

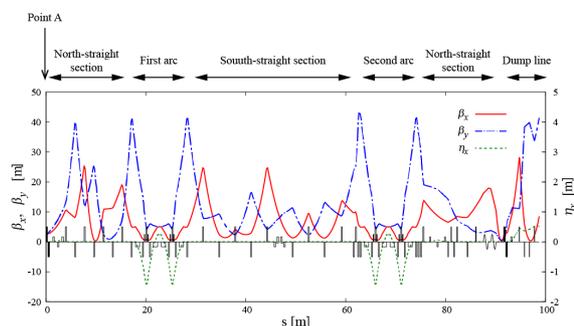


Figure 3: Betatron and dispersion functions along a beamline of the recirculation loop, that is, from the point A (the exit of the main linac) to the beam dump.

いる。対称的なオプティクスを保ちつつアーク出口で分散が閉じるように手動で調整している。

バンチ電荷 60pC に最適化・調整したオプティクスで、60pC, 40pC, 20pC を輸送し、エミッタンス測定を実施した。これは quadrupole scan method と呼ばれる手法で測定しており、四極電磁石の応答を下流のビームサイズをスクリーンで測定する方法である。このエミッタンス測定は主空洞上流と下流 (北側直線部) とアークを通過した後の南側直線部の3か所で実施した。2018年3月の結果を図5および6に載せる。垂直方向は 60pC で 1~2 mm-mrad と目標値に近いことがわかる。この時の測定では、水平方向のエミッタンスは大きかった。電荷量が大きくなるほど、エミッタンスが大きくなる傾向にある。主加速空洞やアーク部を通過するなど、下流に行くに従いエミッタンスが増加していることがわかる。水平方向だけでなく垂直方向のエミッタンスも増加していることから、原因は CSR wake だけでなく、SC や他の要因も考えられる。

大電流運転では入射合流部・ダンプのシケインを通過させる必要があるため、入射・周回運動量の比を 1:6 程度に抑える必要がある。2018年6月の運転では、入射エネルギー 2.9MeV、周回エネルギー 17.7MeV に設定した。およそ 800uA の大電流運転と同じ状況でエミッタンスを測定した。その結果を表1

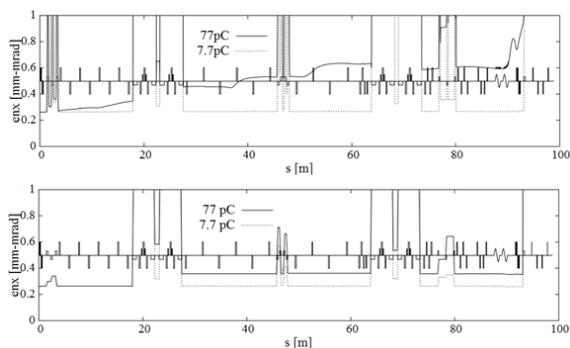


Figure 4: Result of the tracking simulations showing the changes in the horizontal normalized emittance along the recirculation loop (from an exit of the ML to the dump). Solid and dashed lines denote the results under bunch charges of 77 pC and 7.7 pC, respectively. (upper) Simulation with GPT code including the space charge effect, and (lower) simulation with elegant code including the CSR wakes.

に示す。北側直線部（主空洞下流）と南側直線部の2か所で測定した。この時のバンチ電荷量は0.6~0.7pCである。以前は、コリメータでエネルギーのずれたテールをカットするために、あえて入射器空洞で斜めに入射して、キックを与えていた [8]。これはエミッタンスが増加する原因となっていたが、今回は入射器空洞の中心を通過させつつビームロスを抑えた。この結果より、大電流に耐えられる低ビームロスと低エミッタンスの運転が共存できることがわかった。

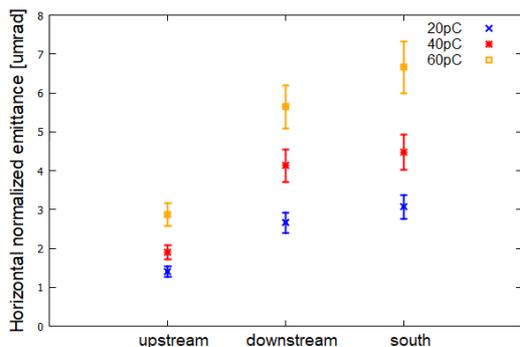


Figure 5: Measurement results of normalized horizontal emittance in the recirculation loop. Error bar is set to 10%.

Table 1: Measurement Results of Normalized Emittance at the High Beam Current Operation

normalized emittance[mm-mrad]	horizontal	vertical
North straight section	0.29	0.26
South straight section	0.42	0.26

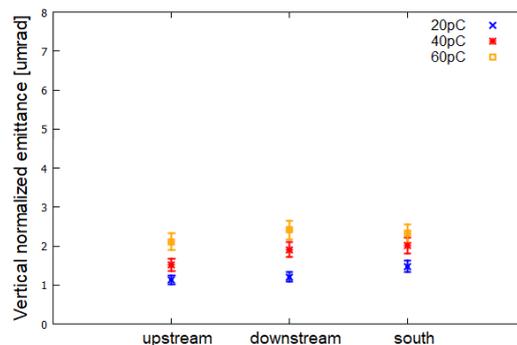


Figure 6: Measurement results of normalized horizontal emittance in the recirculation loop. Error bar is set to 10%.

#### 4. まとめ

cERL の設計オプティクスでは SC によるエミッタンス増加を抑える設計をしつつ、計算時間を節約するために S2E simulation を導入しており、GPT と ELEGANT のコードを使用している。周回ループは ELEGANT で CSR wake の影響が最小になるように最適化して設計したが、GPT で SC による影響を見積もったところ、有意なエミッタンス増加があることが分かった。コミッションングでは 60pC, 40pC, 20pC のエミッタンスを測定し、水平・垂直ともに下流で増加していることが分かったが、垂直方向は目標に近い結果が得られた。また、エネルギー回収やビームロス低減が必要な大電流運転と低エミッタンス運転が両立することが実証された。

#### 参考文献

- [1] N.Nakamura *et al.*, “S2E simulation of an ERL-based high-power EUV-FEL source for lithography”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark (2017) pp.894-896.
- [2] Y. Honda *et al.*; <http://arxiv.org/abs/1807.06195>
- [3] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Research A 877, (2018) 197-219.
- [4] M. Shimada *et al.*, “cERL 周回部のオプティクス測定”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015, pp. 971-974.
- [5] M. Shimada *et al.*, “Bunch compression at the recirculation loop of compact ERL”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea (2016) pp.3008-3010.
- [6] Y. Honda *et al.*, “Beam tuning and bunch length measurement in the bunch compression operation at the cERL, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Research A 875, (2017) 156-164.
- [7] T. Miyajima *et al.*, “60 pC bunch charge operation of the compact ERL at KEK”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, (2017) pp.890-893.
- [8] S.Sakanaka *et al.*, “Measurement and control of beam losses under high average-current operation of the compact ERL at KEK”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, (2016) pp.1839-1842.