

7.7 pC/bunch 電子ビームの compact ERL 周回部輸送 TRANSPORTATION OF 7.7 PC/BUNCH ELECTRON BEAM IN COMPACT ERL RECIRCULATION LOOP

宮島 司^{*A)}、本田 洋介^{A)}、島田 美帆^{A)}、原田 健太郎^{A)}、中村 典雄^{A)}、帯名 崇^{A)}、高井 良太^{A)}、西森 信行^{B)}、
永井 良治^{B)}、山本 将博^{A)}、金 秀光^{A)}、内山 隆司^{A)}、梅森 健成^{A)}、阪井 寛志^{A)}、三浦 孝子^{A)}、上田 明^{A)}、
久米 達哉^{A)}、長橋 進也^{A)}、濁川 和幸^{A)}、野上 隆史^{A)}、Qiu Feng^{A)}、塩屋 達郎^{A)}、高橋 毅^{A)}、田中 織雅^{A)}、
坂中 章悟^{A)}、羽島 良一^{B)}、Ji-Gwang Hwang^{C)}

Tsukasa Miyajima^{*A)}, Yosuke Honda^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Takashi Obina^{A)},
Ryota Takai^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{B)}, Ryoji Nagai^{B)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Xiuguang Jin^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)},
Kensei Umemori^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Takako Miura^{A)}, Akira Ueda^{A)}, Tatsuya Kume^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)},
Kazuyuki Nigorikawa^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Qiu Feng^{A)}, Tatsuhiro Shioya^{A)}, Takeshi Takahashi^{A)}, Olga Tanaka^{A)},
Shogo Sakanaka^{A)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Ji-Gwang Hwang^{C)}

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

^{B)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{C)}Kyungpook National University

Abstract

The recirculation of a high bunch charge electron beam with 7.7 pC/bunch, which corresponds to 10 mA peak current, were carried out in the compact ERL test accelerator. For the high bunch charge operation, the compensation of space charge effect is required to keep low emittance from the gun. In the beam operation, the injector and the main linac energies were 2.4 and 19.4 MeV. After orbit tuning and optics matching for the injector and the recirculation loop, the beam current of 90 % reached a Faraday cup just before merger chicane, and the emittance was measured by Q-scan method. Although the design emittance was 0.6 mm mrad, the measured emittances at the injector and the recirculation loop were 2.9 and 5.8 mm mrad. To improve the emittance, fine tuning in low energy region is required.

1. はじめに

大電流で高繰り返し運転可能な将来光源加速器である Energy Recovery Linac (ERL) の実証機として、compact ERL (cERL) ^[1] の試験運転を続けている。図 1 に cERL 加速器の概要を示す。ビーム試験の目標は、ERL 光源で必要となるビーム性能を検証するとともに、CW-XFEL や ERL 等の将来の大電流・高繰り返し線形加速器で鍵となる、CW 運転可能な電子銃・超伝導空洞の性能を実証することである。cERL のビーム運転は 2013 年 4 月から開始され、段階的にビーム調整が進められている。まず、2013 年 4 月から 6 月の間に入射器単体でのビーム試験を実施し、低エミッタンスビームを生成・加速することに成功した ^[2, 3]。周回部の建設が完了した 2013 年 12 月以降は、cERL 全体でのビーム試験を開始し、2014 年 3 月にエネルギー回収運転を実証することができた ^[4, 5]。

ERL の最終目標は 100 mA の平均電流 (1.3 GHz 繰り返しで、バンチあたり 77 pC) のビームを生成・加速し、低いエミッタンスを保持したまま輸送することであり、その目標値は規格化エミッタンス $\varepsilon_n < 1$ mm mrad である。このときに重要となるのが、空間電荷効果を補償した輸送条件を確立することである。空間電荷効果が支配的になる高バンチ電荷の試験は、2013 年 6 月の最後の 1 週間で行われた入射器単体でのピーク電流 10 mA 試験 ¹ のみであり、このときはビームエネルギー 5.6

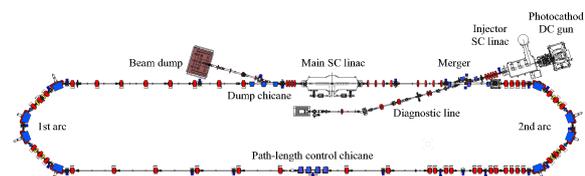


Figure 1: Layout of cERL.

MeV² で、入射器診断ラインまで $\varepsilon_n < 0.8$ mm mrad のエミッタンスでビームを輸送することができた ^[6]。これ以降の運転では、周回部輸送、エネルギー回収の実証が優先事項となり、空間電荷効果の効かない低バンチ電荷での運転をすることになった。

2014 年度はレーザーコンプトン散乱 (LCS) X 線発生 ^[7] を実証することが最優先事項であり、2014 年 5 月から 6 月のビーム運転では、引き続き空間電荷効果の効かない低バンチ電荷での調整を続け、高バンチ電荷の周回部輸送は運転停止前の 5 日間で実施することになった。高バンチ電荷輸送では、周回部での輸送条件が確立していることが重要であり、低バンチ電荷調整で実施した環境磁場対策および軌道・オプティクス調整により、

²ここでは、運動エネルギー $T = (\gamma - 1)mc^2$ を用いる。

* tsukasa@post.kek.jp

¹ピーク電流 10 mA と記述したときは、バンチ電荷あたり 7.7 pC での運転を表すものとする。

エミッタンスを悪化させない輸送条件を確立することができた^[5]。これらの条件が整った上で、7.7 pC/bunchでの周回部輸送試験を実施した。

2. 目標設定と運転条件

前回の高バンチ電荷試験では、入射器単体での低エミッタンス輸送とビーム品質測定を目標として定めたが、今回の試験では、7.7 pC/bunchのビームを周回させ、主ダンプまで輸送することを目標とした。これらの試験を通して、空間電荷効果が支配的となるビームの加速・長距離輸送の物理を理解し、ビーム性能向上のための基礎データを取得することができる。

スケジュール策定にあたっては、5日間という限られた時間しかないことを考慮し、目標を絞って効率良く試験を進める方針とした。そのために、周回部のオプティクスは低バンチ電荷用のままとし、入射器の運転条件のみを変更することとした。ビームエネルギーは、低バンチ電荷用の周回部輸送条件と同一とし、入射器で2.4 MeV、主空洞で19.4 MeVとした。2013年6月の入射器単体試験では、入射器エネルギー5.6 MeVであったのに対して、今回はこれの半分以上となり、空間電荷効果がより厳しい方向となる。入射器の運転条件としては、空間電荷効果によるエミッタンス増加を補償するために、ソレノイド電磁石、バンチャー空洞・入射器空洞の振幅・位相を変更することとした。さらに、合流部でのエミッタンス増加を補償するための条件と、主空洞下流での周回部オプティクスへのマッチング条件を満たすように、輸送条件を調整する必要がある。図2に今回の運転の最後に使用した設計オプティクスを示す。これらの条件を全て満たしたときに、設計通りの低エミッタンス輸送が可能となるが、今回のスケジュールでは時間的制約のために、ビームを周回させることを最優先とし、その後時間のある限り、輸送条件とビーム品質を設計に近づけていく方針とした。以上の方針の基に5日間のスケジュールを定め、6/16カソード再活性化と電子銃単体での高バンチ電荷生成試験、6/17レーザーパルス長伸長と入射器調整、6/18合流部・主空洞・周回部調整、6/19主ダンプまでの輸送調整、6/20ビーム品質測定とした。

ビームの時間構造は、マクロパルス長1 μ s (試験後半はビーム負荷の影響を低減するため200 nsに減らした)のバースト構造とし、ピーク電流は10 mAと高いが、平均ビーム電流は低い状態で運転した。

3. 高電荷運転に向けた準備

7.7 pC/bunchの高バンチ電荷運転に向けた準備として、カソード交換・再活性化、励起レーザー出力調整、スクリーンモニタの飽和対策、初期レーザーパルス長伸長を実施した。

cERLでは電子ビーム生成のために、NEA表面をもつGaAsフォトカソードに532 nm波長の励起レーザーを照射しているが、高バンチ電荷生成にあたっては、高い量子効率(Quantum Efficiency, Q.E.)と高いレーザー出力が必要となる。電子銃内には2つのGaAsカソードが保持されているが、高電荷試験の前の週まで使われていたカソードはQ.E.が0.6%程度まで減少している状態であった。高バンチ電荷生成を維持するのに不安

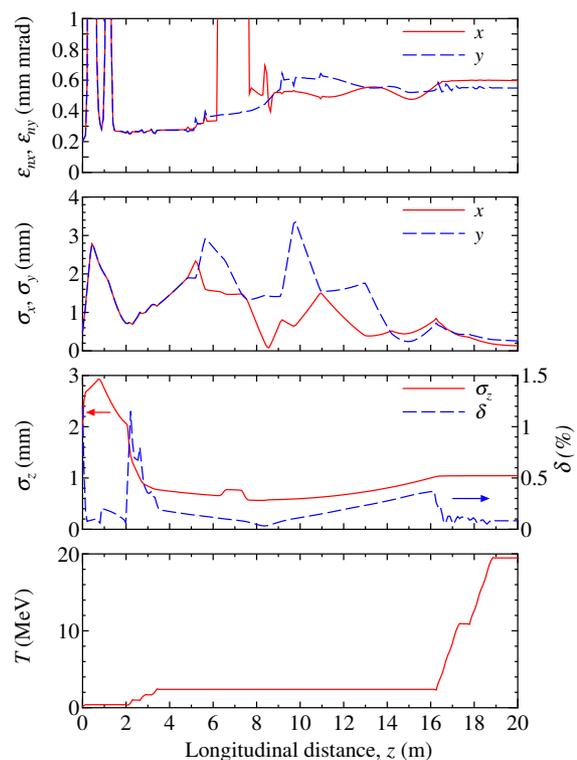
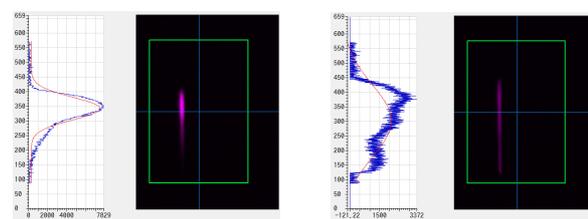


Figure 2: Design optics parameters for 10 mA peak operation from a gun to main linac.



(a) 16 ps flat

(b) 32 ps flat

Figure 3: Initial laser pulse length measured by a deflecting cavity in an injector diagnostic line. The temporal distribution is projected on vertical direction.

が残る状況であったため、カソード準備容器内に保管されていたもう一つのカソードを再活性化し、5.9%までQ.E.が回復したのを確認した後に、交換を行った。また、励起レーザーの調整を行い、前の週の20倍程度まで出力を上げることができた。これらの準備の後、電子銃単体でのビーム生成試験を実施し、ピーク電流25 mA (20 pC/bunch)程度の電子ビーム生成を確認した。

ビームプロファイル測定用のスクリーンモニタとしてCe:Yagが使われているが、通常は低バンチ電荷でも測定可能なように検出用カメラを設定している。しかしながら、この条件では高バンチ電荷運転のときに検出用カメラが飽和してしまうため、フィルターを追加することとした。特にQ-scan法でエミッタンス測定を実施するスクリーンへの対策を行った。

高バンチ電荷運転の準備を終えた後、6/17から本格的な運転調整を開始した。空間電荷効果はバンチ電荷密度に依存するため、その影響を弱めるにはある程度

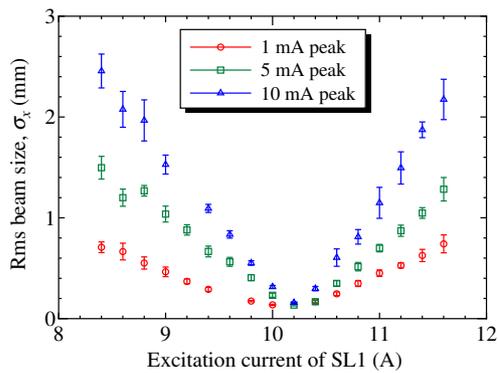


Figure 4: Solenoid scan results with different peak currents. The initial laser pulse length is 32 ps flat. The rms beam size were measured at a screen monitor, MS1.

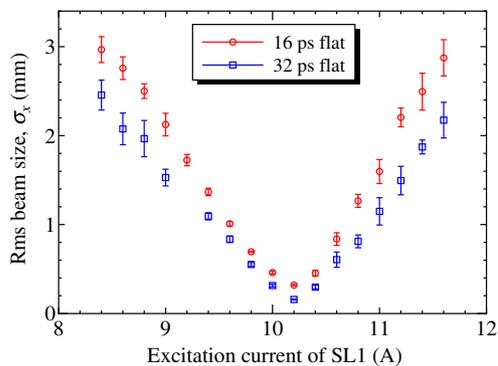


Figure 5: Solenoid scan results with different initial laser pulse lengths. The peak current is 10 mA. The rms beam size were measured at a screen monitor, MS1.

バンチ長を伸ばし、電荷密度を下げておく必要がある。このために、まず初めに励起レーザーパルス長の伸ばしを行った。通常の低バンチ電荷運転では、レーザーパルス長は 3 ps rms, Gaussian 分布であるが、高バンチ電荷運転では、これを複屈折結晶を通してパルスを積み重ねることで Flat-top に近い分布に整形し、パルス長を伸ばしている。パルス長が伸びたかどうかは、空間電荷効果の効かない低電荷の電子ビームを入射器診断ラインまで輸送し、偏向空洞^[8]を用いて電子ビームのバンチ長を測定することで確認した。図 3 にパルス長を伸ばしたときの、偏向空洞下流でのバンチ長の変化を示す。偏向空洞で時間方向の分布が y 方向に射影されるため、バンチ長に応じて y 方向にビームサイズが広がる。今回の高バンチ電荷運転では、初めは FWHM 16 ps flat パルスを用いていたが、さらに電荷密度を下げるために最終的には 32 ps flat パルスを用いることとした。

4. 入射器調整

高バンチ電荷調整の最初として、電子銃から出た直後のビームに対する空間電荷効果を、ソレノイドスキャン法を用いて調査した。具体的には、電子銃直後に設置されたソレノイドの励磁電流を変化させながら、下流のスクリーンモニターでビームサイズの変化を測定している。バンチ電荷を上げるに従い、空間電荷効果による

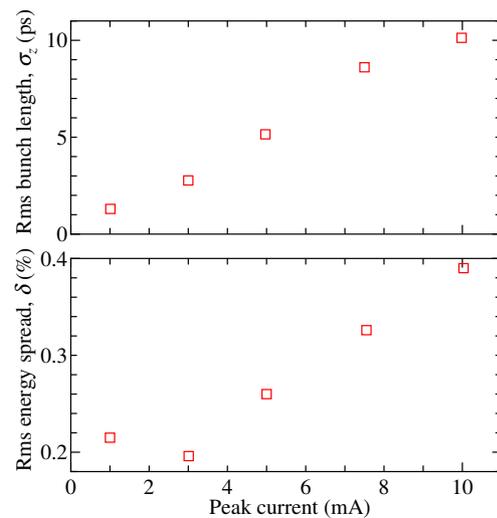


Figure 6: Measured bunch length and energy spread with different peak currents. The both values were measured in an injector diagnostic line.

発散力が強くなるはずである。図 4 にピーク電流 1 mA (0.77 pC), 5 mA (3.8 pC), 10 mA (7.7 pC) のときのソレノイドスキャンの結果を示す。バンチ電荷が増加するとともにビームサイズも増加していくことから、空間電荷効果の発散力が強くなっていくことが確認された。また、空間電荷効果はバンチの電荷量ではなくて、電荷密度に依存することを確認するために、初期レーザーパルス長を変えたときのビームサイズの変化も測定した。図 5 にピーク電流 10 mA で、初期レーザーパルス長が 16 ps, 32 ps のときの測定結果を示す。初期レーザーパルス長が長い方が、電荷密度が下がり空間電荷効果が弱くなるはずであるが、実験でも図 5 のように発散力が弱くなりビームサイズが小さくなることが確認された。

空間電荷効果による発散力は、横方向 (x, y 方向) だけではなく、進行方向 (z 方向) にも作用する。このため、空間電荷効果を調べる際には、バンチ電荷に応じたバンチ長の伸び量を測定することも重要である。図 6 に入射器診断ラインで測定したバンチ長とエネルギー拡がりを示す。バンチ長は偏向空洞を用いて測定し、エネルギー拡がりは偏向電磁石下流の分散関数がノンゼロの位置で測定している。図 6 の上段で示されるように、バンチ長はバンチ電荷に応じて伸びていることがわかる。粒子トラッキング計算では、10 mA ピーク電流で 3.5 ps と予想されているが、測定ではそれよりかなり長い 10 ps となった。RF 空洞下流ではバンチ長は空間電荷効果だけでなく、空洞の振幅・位相にも敏感であり、この調整が不十分なために、バンチ長のずれが生じていると推測される。エネルギー拡がりに関しては、図 6 の下段に示されるように、バンチ電荷の増加とともに増えることがわかる。10 mA ピーク電流の予想値 0.3 % に対して、測定値は 0.4 % であり、ある程度近い値になっている。電子銃近傍でのバンチ長測定に関しては、空洞の横方向キック力の位相依存性を利用した方法を提案しており^[9]、この方法と組み合わせ、電子銃直後の空間電荷効果の調査を進める予定である。

入射器では電子銃で生成した低エミッタンスビーム

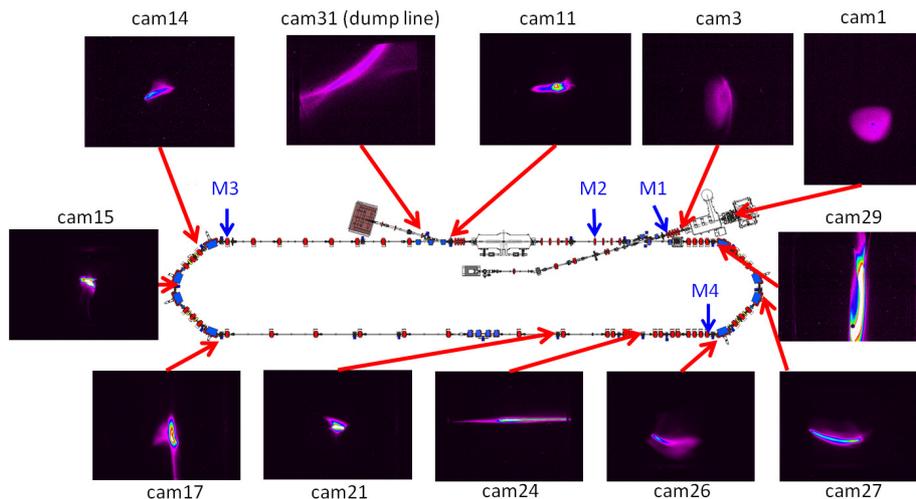


Figure 7: Measured beam profiles for 10 mA peak current operation. Optics matchings were carried out at M1, M2, M3 and M4.

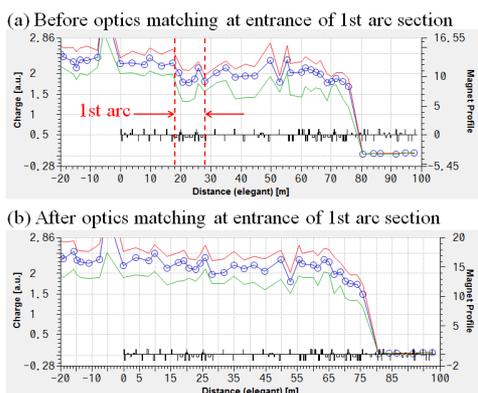


Figure 8: Beam loss in 1st arc section before and after optics matching.

を悪化させずに加速し、主空洞まで輸送することが重要である。加速・輸送で重要となるのが、バンチャー空洞および入射器空洞の振幅・位相・軌道調整である。特にバンチャー空洞と、3台ある2-cell空洞のうちの1台目の調整が鍵となる。入射器診断ラインを使いながら、振幅・位相の調整を行ったが、時間が十分ではなかったため、完全には調整しきれなかった。今回の目的は、高バンチ電荷を周回させ、主ダンプまで輸送することであるため、ある程度入射器を調整した後は周回部への調整に移った。周回部へ向けての調整では、合流部調整と主空洞への輸送調整を実施したが、低バンチ電荷運転である程度方法を確立していたため、ここはスムーズに進めることができた。

5. 周回部輸送調整

入射器から周回部への輸送オプティクス設計にあたっては、エミッタンス補償（入射器空洞、合流部）、マッチング条件（周回部への接続）を同時に満たすようにする必要がある。このため、粒子トラッキングに最適化法を適用して、設計オプティクス（図2）を決定した。入射

器のエネルギーが 2.4 MeV に下がったこと、周回部とのマッチング条件が増えたことにより、設計条件でのエミッタンスは 10 mA ピーク電流に対して、2013 年 6 月の 5.6 MeV 運転の 0.3 mm mrad から 0.6 mm mrad へ増加することとなった。さらに、入射エネルギーの減少は、環境磁場による影響を増大させるという効果もあり、実際の調整ではその影響を低減させる調整も合わせて行うことになった。具体的には、環境磁場の影響が大きそうな場所で、ビームサイズを小さくするように設計オプティクスを変更するというを実施した。

主空洞での加速については、6/17 に初めて高バンチ電荷ビームを加速することに成功した。輸送調整が進み、主空洞に到達するビーム電流が増加すると、加速される際のビーム負荷の影響によって、RF 系のインターロックが作動するということが発生した。これに対しては、フィードバックゲインの見直しによって 10 mA ピーク電流を安定に加速できるようになった。

周回部輸送調整では、主空洞で 19.4 MeV に加速されたビームが周回部の四極電磁石の中心を通るように、軌道を調整した。オプティクスについては低電荷バンチ用のままの設定としたが、軌道調整を進めていくことで、80% のビームを主ダンプまで輸送できるようになった。しかしながら、軌道調整のみでは、ある段階からアーク部等でのビーム損失を減らすことが難しくなってきた。また、入射器からのビームプロファイルを見ても、設計からずれた状態であることが明らかであったため、設計オプティクスの見直しとともに、オプティクスマッチングを実施することとした。

オプティクスマッチングでは、四極電磁石の K 値に対するビームサイズの応答を設計値に近づけるという方法を用いた。5 台の四極電磁石を一つのセットとし、最下流の四極磁石の Q-scan を実施し、 K 値に対するビームサイズの応答を x, y 方向で測定する。このとき、ビームサイズはスクリーンモニターを用いて測定した。最下流の四極電磁石の応答の設計値からのずれを補正するために、上流の 4 台の四極電磁石を 1 台ずつ変更したときの応答を測定し、応答行列を作った。この逆行列から上流 4 台の四極電磁石の補正量を求めることができ

Table 1: Emittance measurement results for 10 mA peak operation. The emittance was measured at a slit-scanner (P1), in an injector diagnostic line. Using Q-scan method, the emittance was measured at the entrance of main linac (P2), the entrance of 1st arc (P3), the exit of 1st arc (P4), and the entrance of 2nd arc (P5). In the table, $\varepsilon_{nx}/\varepsilon_{ny}$ are listed with unit of mm mrad.

Mode	Bunch charge	P1	P2	P3	P4	P5
Low charge, 13 Jun.	~ 20 fC	-	0.15 / 0.14	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14	0.13 / 0.15
High charge, 19 Jun.	7.7 pC	-	-	-	42 / 14.7	-
High charge, 20 Jun.	7.7 pC	2.5 / 2.9	-	2.9 / 2.4	5.8 / 4.6	-

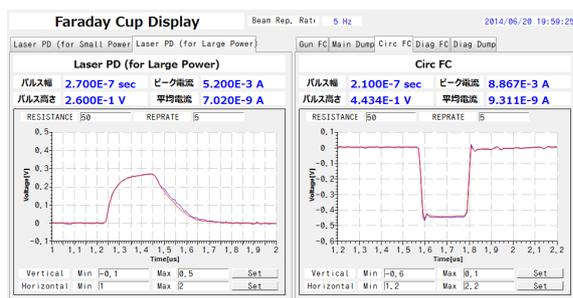


Figure 9: Measured recirculation beam current by a Faraday cup just before merger chicane.

る。この方法は、低バンチ電荷ビーム輸送調整のときに開発・検証したが、環境磁場の影響がある場合でも、局所的にマッチングを取り直すことが可能であり、エネルギーの低いビームでのエミッタンス悪化を低減するのに、大きな効果を発揮した。この方法を高バンチ電荷輸送にも適用して、プロファイルの修正とビーム損失の低減を試みた。図7にマッチングを実施した箇所 (M1, M2, M3, M4) とマッチング後のビームプロファイルを示す。マッチングによって、ビームプロファイルが設計に近づくことによって、アーク部でのビーム損失も減少した。図8にマッチング前後での第一アークでのビーム損失の変化を示す。マッチング前は第一アークに入った直後に電荷量が減少していたが、マッチング後は減少もほぼなくなり、第二アークまで損失なく輸送できるようになった。図9に示すように軌道調整、オプティクスマッチングによって、最終的に90%のビームを周回部 Faraday cup まで輸送することに成功した。

6. ビーム品質測定

高バンチ電荷運転の最終日である6/20に、入射器診断ラインおよび周回部でのエミッタンス測定を実施した。入射器診断ライン (P1) では slit-scan 法によってエミッタンスを測定した。測定されたエミッタンスは、 $\varepsilon_{nx} = 2.5$ mm mrad, $\varepsilon_{ny} = 2.9$ mm mrad である。また、周回部では主空洞入口 (P2)、第一アーク入口 (P3)、第一アーク出口 (P4)、第二アーク入口 (P5) で Q-scan 法を用いてエミッタンスを測定した。表1にエミッタンスの測定結果を示す。マッチング前は第一アーク出口で42 mm mrad だったエミッタンスが、オプティクスマッチングによって5.8 mm mrad まで下がったことがわかる。表1の測定結果より、第一アーク前後でエミッタンスが2.9から5.8 mm mrad へ悪化しており、第一アークの輸送途中に

エミッタンス増加の起源があることがわかる。また、入射器のエミッタンスは2.9 mm mrad となっており、設計値の0.6 mm mrad に対してかなり悪化しており、そもそも入射器での高バンチ電荷かつ低エネルギーでの輸送条件が確立できていないことが確認された。次の調整では、周回部の調整を進めるとともに、入射器でエミッタンスを悪化させない輸送条件を確立することが課題となる。

7. まとめと今後の課題

空間電荷効果が支配的な7.7 pC/bunch (10 mA ピーク電流) ビームの cERL 周回部輸送試験を実施した。調整後に90%程度のビームを周回部 Faraday cup まで輸送することに成功した。しかしながら、現状の問題点として、エミッタンス・バンチ長の設計値からのずれ、ビーム損失ということがある。エミッタンス・バンチ長の設計値からのずれについては、入射器空洞中心の通っていない、振幅・位相の精密調整ができていない、環境磁場の影響等が考えられる。ビーム損失については、電子銃や空洞でのビーム負荷の影響を考慮する必要がある。入射器空洞の軌道調整については、上流のソレノイドとの位置関係が重要となるので、今回取得した基礎データを元に次の運転までにソレノイドの位置を調整する予定である。また、予算の関係でなかなか実現しないが、ソレノイドの遠隔可動架台を製作し、ビーム運転中にソレノイドと入射器空洞の軌道調整を行えるようにしたい。

参考文献

- [1] R. Hajima, *et. al.* (eds.), "Design study of the Compact ERL", KEK Report 2007-7/ JAEA-Research 2008-032, February 2008.
- [2] S. Sakanaka, *et. al.*, Proceedings of ERL2013, Novosibirsk, Russia, p. 16 (2013).
- [3] T. Miyajima, *et. al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 249 (2013).
- [4] N. Nakamura, *et. al.*, "Recent Progress of the Compact ERL", in these proceedings.
- [5] M. Shimada, *et. al.*, "Beam Commissioning of Compact ERL", in these proceedings.
- [6] Y. Honda, *et. al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 841 (2013).
- [7] R. Nagai, *et. al.*, Proceedings of IPAC14, Dresden, Germany, p. 1940 (2014).
- [8] S. Matsuba, *et. al.*, Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, p. 951 (2010).
- [9] J. Hwang, *et. al.*, Proceedings of IPAC14, Dresden, Germany, p. 3596 (2014).