

コンパクト ERL におけるビームハローとビームロスのスタディ BEAM HALO AND BEAM LOSS STUDIES AT THE KEK COMPACT ERL

田中 織雅[#], 中村 典雄, 島田 美帆, 宮島 司, 帯名 崇, 高井 良太, 布袋 貴大
Olga Tanaka [#], Norio Nakamura, Miho Shimada, Tsukasa Miyajima, Takashi Obina, Ryota Takai, Takahiro Hotei
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The beam halo studies are performed at KEK Compact ERL (cERL) systematically since machine commissioning in spring 2015. The beam loss in the recirculating loop of the accelerator was observed during the machine study. Wherein we found that the beam loss can be avoided making use of a collimation system of cERL. Therefore we established a beam halo formation study. Beam halo measurement in spring 2016 commissioning demonstrated a presence of the vertical beam halos at multiple locations of the beam line except the region near the electron gun. We guess that the transverse beam halo could occur from the longitudinal bunch tail arising at the photocathode. The halo formation process should include all the mechanisms transferring the longitudinal bunch tail into the transverse plane. They could be rf field kicks, due to injector line elements misalignments and an effect of the steering on the beam trajectory. In the present study we compare the results of the simulation including effects described above with the measurement results to explain the beam halo and to avoid the beam loss during the machine operation.

1. はじめに

2015 年春の運転開始以来、cERL では系統的にビームハローの研究が行われてきた。cERL においてビームハローの形成過程を解明することを目的として、我々はマシンスタディにおいてビームハローの測定を行い、その詳細を[1]に記述している。ビームはコリメーション無しに周回部を通過する際に、無視できないビームロスを起こす。この観測結果はビームロスの原因となるビームハローの形成過程の研究を促すものである。ビームロスを低減させ周回部でのコリメータの使用とその放射化を回避するため、ビームエネルギーが低い入射・合流部にある 2 つのコリメータ COL1 および COL2 を主に使用した。その結果、周回部におけるビームロスを低減させることに成功した。また、入射部の中心軸から角度をつけてビームを入射空洞に入射することで、コリメータの効果が高まってビームロスをさらに改善できることもわかった[2]。これは入射部ラインのステアリングコイルを使用することで達成できる。したがって、ビーム軌道に対するステアリングコイルの効果は、ビームハローの形成を強化するための重要な因子の1つである。電子銃近傍では横方向ビームハローは確認されていないため、我々はビームハロー形成を引き起こす機構が電子銃後の加速器内で縦方向バンチテールを横方向へと変換すると推測する。縦方向バンチテールは主にレーザー励起に対するカソードの時間応答によって生成されている[3]。ビームハローの測定結果を Figure 1 に、cERL のレイアウトおよび観測機器の配置を Figure 2 に示す。また、cERL の基本パラメータを Table 1 にまとめる。本研究では、観測されたビームハローのプロファイルが変換機構を含んだビームハローのシミュレーションによって良く再現できることを示す。

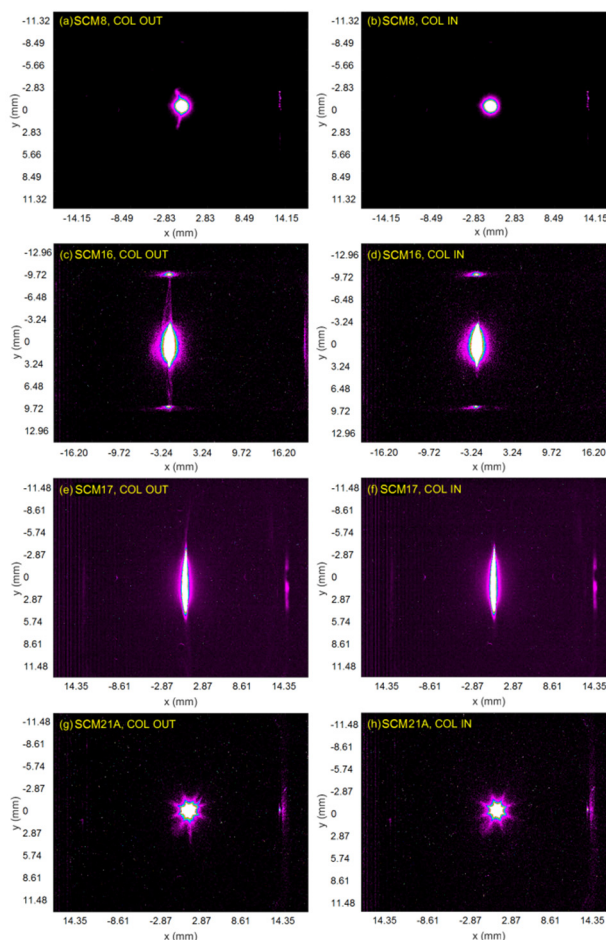


Figure 1: Measured beam halo profiles at different beam line locations without (left) and with (right) the collimation, respectively.

[#] olga@post.kek.jp

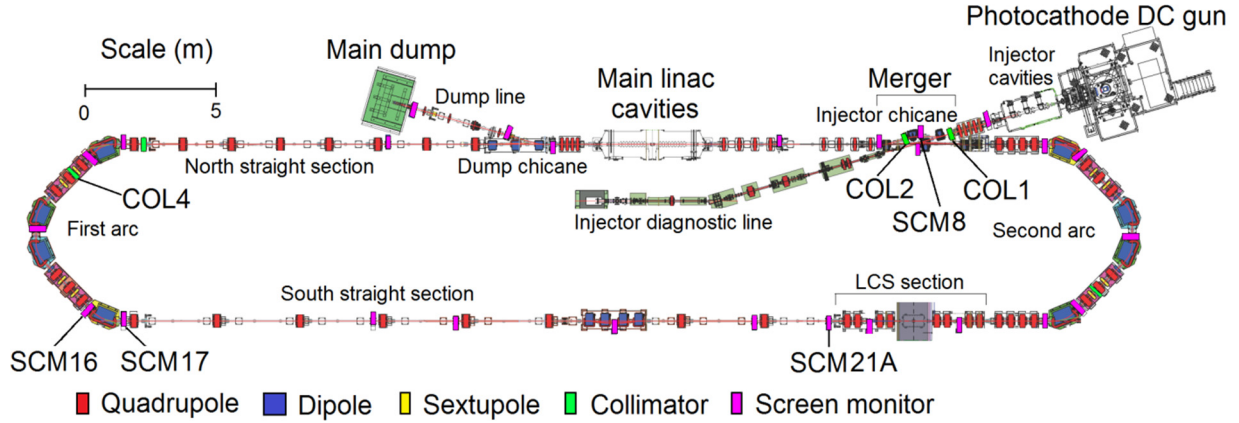


Figure 2: Layout of cERL and locations of measurement equipments.

Table 1: Typical Parameters of cERL

Parameters	Design	In operation
Beam Energy	35 MeV	20 MeV
Injector energy	5 MeV	2.9 – 6.0 MeV
Gun high voltage	500 kV	390 – 450 kV
Maximum beam current	10 mA	1 mA
Bunch length	1 – 3 ps	1 – 3 ps (usual) 0.15 ps (compressed)
Repetition rate	1.3 GHz	1.3 GHz (usual) 162.5 MHz (for LCS)

2. 縦方向バンチテール

Figure 1 の測定結果は、ビームのコア周辺に空間的ハローが存在していることを示している。前章でも述べた通り、cERL のビームハローの原因は、フォトカソードで生成された縦方向バンチテールが電子銃後に横方向ハローへと変換されるためではないかと推測される。

縦方向バンチテールのシミュレーションには、レーザー波長 520 nm でのバルク GaAs フォトカソードの時間応答の実験データを用いた[4]。投影されたバンチのトレース強度はモデル関数にフィットされた。本関数は、下記の通り 2 つの関数の重畳積分である。

$$(f * g)(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k)g(k-s)dk = \int_{-\infty}^{\infty} f(k-s)g(s)ds, \quad (1)$$

1つは下記で定義されるレーザーパルスのプロファイル関数である。

$$f(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{k^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

もう 1 つは[5]で紹介している次の光電子電流の関数から来るものである。

$$g(k) \propto \frac{1}{\sqrt{\pi k}} - e^k \operatorname{erfc}(\sqrt{k}). \quad (3)$$

ここで、 $k = t/\tau$ は正規化された時間、 $\tau = \alpha^{-2}D^{-1}$ は光電子の時間特性、 D は電子拡散定数、 α は光吸収係数である。パラメータ D と α 、そしてその関数である τ は

カソード表面の性質を表している。実験データのフィッティング結果から cERL で使われているカソードタイプ (バルク GaAs) とレーザー波長 520nm に対する光電子の時間特性 τ が割り出される。

次にレーザー励起パルスの長さであるが、cERL では、 $\sigma = 3.3$ ps に該当する[6]。そのため、縦方向バンチサイズの確率密度関数は $\sigma = 3.3$ ps のガウス信号と $\tau = 0.757$ ps のカソード放出電流の関数の重畳になる。縦方向バンチサイズの確率密度関数を Figure 3 に図示する。

縦方向バンチテールをシミュレーションに取り込むため、ビームの初期の縦方向分布を Figure 3 に示されている曲線に応じて生成した。縦方向分布のカットオフは 100 ps に設定した。また、初期の横方向分布は一様であると仮定している。シミュレーションに用いたその他入力パラメータを Table 2 に示す。cERL のラティスを通してバンチ分布を General Particle Tracer (GPT) コード[7]によってトラッキングした。

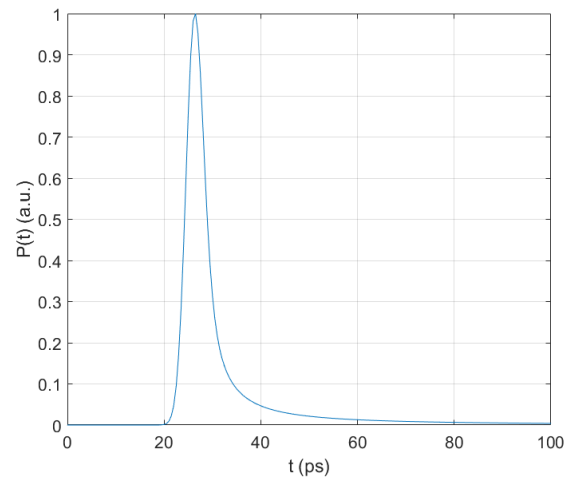


Figure 3: Probability density function of the longitudinal bunch size.

Table 2: Input Parameters for Simulations

Parameter	Value	Units
Number of particles	10^4	
Beam energy	2.9 – 20	MeV
Total charge	0.3	pC / bunch
RF frequency	1.3	GHz
Laser spot diameter	1.2	mm
Bunch length		
default	3.3	ps
with tail	100	ps

ガウス $\sigma = 3.3$ ps のビームコアにおける電子は入射空洞によって $E = 2.9$ MeV までオンcrest(on crest)で加速される。テールの電子は時間遅延によりオフcrest(off crest)加速を経験する。テールの電子は $\Delta E = 0.64$ MeV の大きなエネルギー偏差を伴い空洞を出る。縦方向テールにおける電子のエネルギーの拡がりは分散部において横方向のハロー(低エネルギー側より)をもたらす。この機構は横方向ハローの形成を説明できる。しかし、垂直方向の分散はフォトカソード後のソレノイド電磁石付近にしか存在せず、垂直分散のないスクリーンモニタ SCM8 にて明らかに垂直ハローが観測されている(Figure 2 を参照)。そのため、上述した機構のみでは、cERL で観測された垂直ハローの形成を説明することはできない。

3. 入射器空洞における RF キックの影響

加速器の運転中に、軸対称性を保持させるために入射器のソレノイドにおけるビームの軌道を精密に調整した。本調整はエミッタンスを十分下げるのに役立つが[8]、縦方向バンチテールを横方向ハローへの変換する効果はない。変換機構を調べるため、まずは入射器の空洞における RF キックの影響を検討する。

入射器の空洞のミスアライメントがある可能性は測定によって示唆されていた[9]。この測定実験では、3 つの入射器空洞の相対的位置の非均一性を HOM カプラー信号を用いて評価した。その結果、真ん中の空洞が 2.6 mm 横に変位していることがわかった。3 つの空洞間で垂直オフセットにおける有意な相対的ミスアライメントは確認されなかった。しかし、冷却サイクルや長期的ドリフト等の理由によってクライオモジュール全体が上下または左右に変位している可能性がある。

電子は様々な機構によって横方向にオフセットされている入射空洞に入射することができる。空洞のミスアライメントは、空洞の中心軸からの電子の動径方向の変位に変換される。ステアリングコイルはより直接的にビーム軌道の横方向オフセットを創り出すことができる。そのような変位は空洞内を移動する電子に対して横方向のキックを生み出す。横方向キックの値は RF 空洞の位相および空洞内のオフセットに依存している(Figure 4 を参照)。

入射空洞内で発生するビーム軌道の空洞中心軸からの変位(数 mm 程度)は電子を励起させるのに十分な強度の RF キックを生む。そのようなキックの強度は電子のバンチ内における縦方向の位置に大きく依存している。

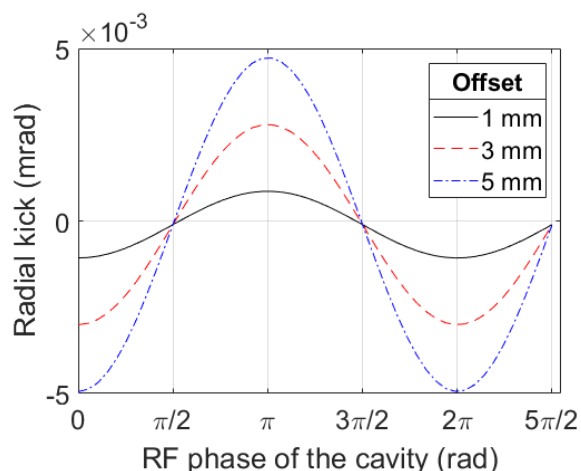


Figure 4: Radial kick values for the horizontal trajectory offsets of 1 mm (solid), 3 mm (dashed), and 5 mm (dot dash), respectively, as a function of the cavity phase.

4. ビーム軌道に対するステアリングコイルの影響

ステアリングコイルは軌道修正には欠かせない機器である。全節で述べている通り、ビームが入射器の空洞に横方向のオフセットを伴う形で入射する場合、空洞の加速モードによって横方向の RF キックを受ける。そのような機構は縦方向バンチテールから横方向ハローの形成を引き起こす。

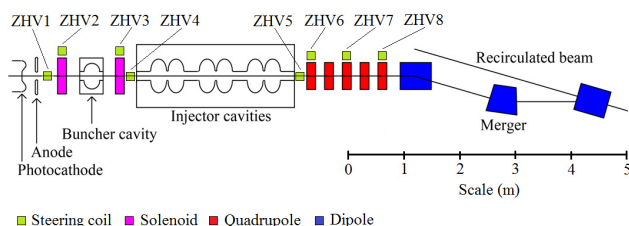


Figure 5: Layout of steering coils ZHV1 – ZHV8 in cERL injector line.

Table 3: Parameters of the Injector Line Steering Coils

Steer name	Current (A)	ItoBL (T m/A)	Length (mm)	Gap (mm)	Width (mm)	Turns / coil
ZH1	-0.30	3.42 E-5				
ZV1	-0.90	3.23 E-5	59	133	95.5	90
ZH2	0.06	5.93 E-5	63	132	66	122
ZV2	-0.18	6.07 E-5	63	132	66	122
ZH3	0.00	5.93 E-5	63	132	66	122
ZV3	0.00	6.07 E-5	63	132	66	122
ZH4	0.71	3.21 E-5	59	133	95.5	90
ZV4	-3.18	3.57 E-5				
ZH5	-0.82	7.07 E-5	79	143	95.5	150
ZV5	0.25	7.48 E-5				
ZH6	-4.90	1.83 E-4	100	60	140	240
ZV6	1.70	1.73 E-4	100	60	140	240
ZH7	-0.43	1.83 E-4	100	60	140	240
ZV7	0.005	1.73 E-4	100	60	140	240
ZH8	0.00	1.83 E-4	100	60	140	240
ZV8	-0.58	1.73 E-4	100	60	140	240

cERL 入射器には 2 種類のステアリングコイルがある。ZHV1-5 は長方形ヘルムホルツ・コイルの 2 つのペアによって構成されているセットである。ZHV6-8 はそれぞれ四重極磁石の極に巻かれた 2 つの補助コイルによって構成されている[10]。Figure 5 にそのレイアウトを示す。また、Table 3 にコイルの幾何学的パラメータを示す。

シミュレーションでは、ステアリングコイルによってビームは入射角度 0.138° で入射空洞に入射し、第一空洞の位置において 1.69 mm の垂直オフセットを持つという結果が得られている。次章では、バンチテール、入射空洞キック、ステアリングコイルの 3 つの影響を全て組み合わせた場合のシミュレーション結果をまとめる。

5. ビームハローシミュレーション

本章では、既述の各章で検討したビームハローの機構をまとめ、3 つの影響を全て組み合わせた時に測定された垂直ビームハローがどのように再現できるかを検討する。

5.1 定性的な比較検討

最初のステップとして観測された垂直ハローのプロファイルを再現する原因となる要素の組み合わせを特定することである。観測時に見られたハロー分布に近いプロファイルをシミュレーションで再現することである。縦方向バンチテールのみを考慮すれば、ハロー分布の上部または下部(観測地点に依存)のみしか再現することができない。例えばスクリーンモニター SCM8 では、縦方向バンチテールがハローの下部に変換される。この問題に関しては、カソード応答の計測データを詳細に再調査した結果、電子分布の一部(ビームの 1.5%程度)はビームのコアよりも時間的に前に存在していたことがわかった。原因として、レーザーパルスのプロファイルがガウス分布と僅かに異なるか、レーザーシステムの何らかの迷光がメインのレーザーパルスよりわずかに先にカソードに到達する場合などが考えられる。対応するデータ点を適切にフィットし、その微小の前方テール(Figure 6)を縦方向分布に加えた。後で示されるように、これによってハロー分

布の上部と下部両方が再現できるようになり、ハローのシミュレーション結果に少なからず影響を与えている。

次に、ビーム軌道変位に影響を及ぼす要因として、ステアリングコイルや入射空洞間の相対的変位以外に以下のものが考えられた。

- i. 3つの入射空洞全体の横方向変位、
- ii. cERL 入射部における環境磁場

環境磁場は地磁気やその他の予期しない局所的磁場源などによって発生しうるもので、計測および推定が非常に難しい。そのため、ここでは環境磁場による入射空洞でのビーム軌道変位への効果を i に含めて考えた。つまり、入射空洞全体のオフセットをシミュレーション上のフリーパラメータとして扱い最適値を求めた。その結果、i と ii の効果を考慮した入射空洞全体の垂直オフセットをおよそ 2mm とすることで測定したビームハローをうまく再現することができた。Figure 7 に SCM8 でのシミュレーション結果を示す。

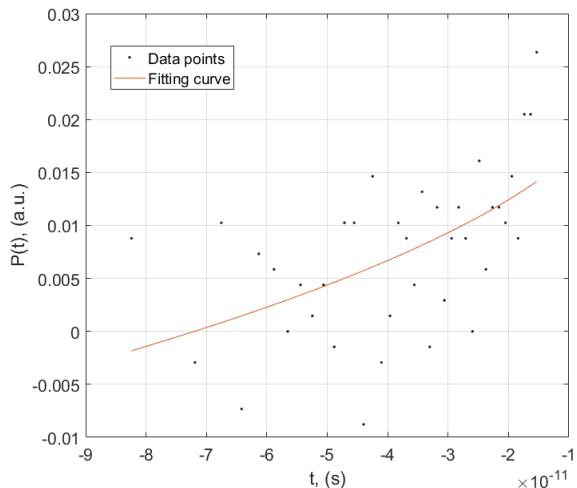


Figure 6: Time response measurement results of the bulk GaAs cathode at laser wave length of 520 nm in the interval from -100 ps to -10ps and its fitting.

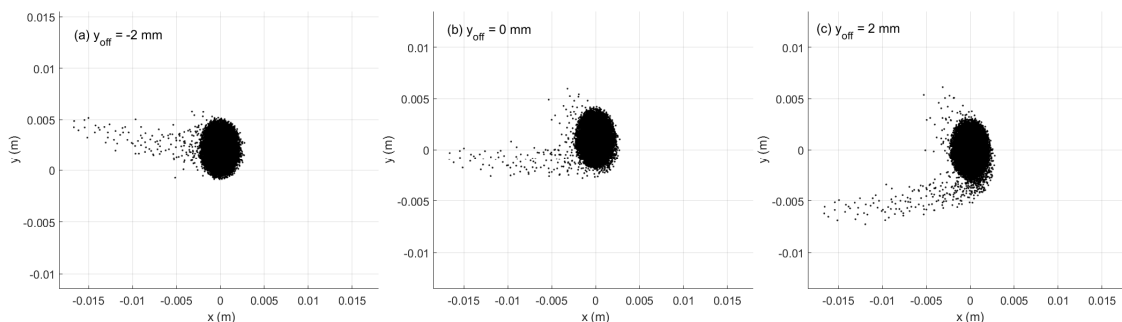


Figure 7: Simulated beam halo profiles at screen monitor SCM8 location. Horizontal offset of the cavity #2 is 2.6 mm. The longitudinal bunch distribution includes 3.3 ps Gaussian core, and the back and forward tails. The steering coils are turned on. The collimators COL1 and COL2 are taken out. Figures (a), (b), and (c) correspond to the collective vertical offset of cavities #1 - 3 of -2 mm, 0 mm, and 2 mm respectively.

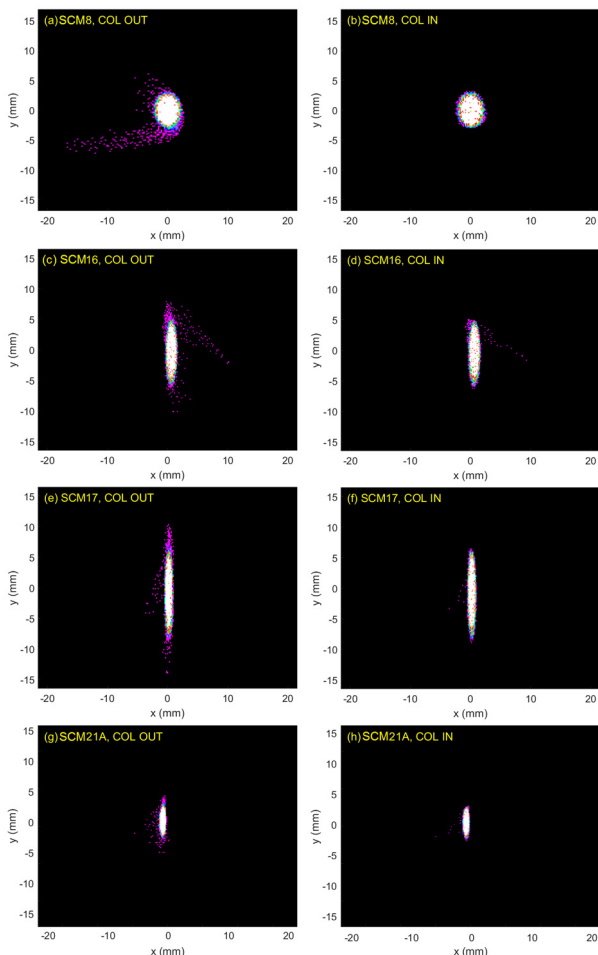


Figure 8: Simulated beam halo profiles at different screen monitor locations without (left) and with (right) the collimation COL1 and COL2, respectively.

ここで、シミュレーションのパラメータが全て固定され、異なるスクリーンモニタの位置(8、16、17、21A)でビームハローのシミュレーションが実行できる。主空洞クライオモジュールからビームダンプ(Figure 2を参照)へかけてのシミュレーションはELEGANTトラッキングコード[11]を用いて行った。ビームハローのプロファイルに関する最終的なシミュレーション結果をFigure 8に示している。Figure 8に示している左右のシミュレーションのプロファイルは、コリメータ COL1 および COL2 をそれぞれオフ・オンした場合に対応する。実測プロファイル(Figure 1)と完全に一致しているわけではないが、全体的に定性的

な類似性があることは明らかである。

5.2 定量的な比較検討

ビームハロー形成に関する定性的な記述がなされた上で、重要な問題は空間的ハローが全体的なビームロスにどの程度影響を及ぼすかである。この問いに対する答えを見つけるには、さらにシミュレーションを行う必要がある。我々は、天井のコンクリートシールド上で測定した大電流運転中に発生した放射線の計測[12]をもとに電子ビームロスを推定した。

ビームロスを再現するために、シミュレーションにおける入力パラメータをいくつか変更した。Table 2に示されているものとほとんど同じであるが、トラッキング粒子数を $N = 10^6$ 、ビーム電流を $J = 0.95$ mA (上記の放射線計測時と同じ値)とした。コリメータ COL1、2、4 は放射線計測時と同じように挿入している。シミュレーションで得られたビームロス率はFigure 9に赤い数字で示している。実測およびシミュレーションのロス率は周回部前半部(コリメータ COL4)において同じオーダーであり、大きな矛盾がないことがわかる。周回部後半ではロスの場所に類似性はあるが、ロス率の実測値がシミュレーションよりも大きかった。これは、本研究ではまだ十分に検討されていない要因が関与しているものと考えられる。

6. 結論

ビームロスの原因となっている横方向のビームハローを cERL で実験的に観測した。実験データとシミュレーションの比較により、cERL で観測されたビームハローの原因は主にフォトカソードを起源とする縦方向バンチテールと入射空洞の RF キックによるバンチテールの垂直ハローへの変換である可能性が高いことが示唆された。縦方向バンチテールから横方向ハローが生成することを実際の加速器における観測とシミュレーションで初めて示したことになる。ビームロスをさらに低減するために、バンチテールの少ないマルチアルカリカソードなどの異なるタイプのフォトカソードを検査する必要がある。また、今後行われる高バンチ電荷運転においては空間電荷効果のビームハローやビームロスへの影響についても研究を行っていくつもりである。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K04747 の助成を受けたものである。

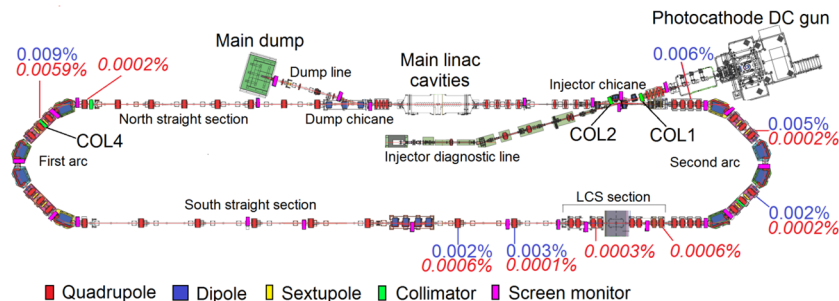


Figure 9: Comparison of beam loss rates along the beam line for the high-current operation ($J = 0.95$ mA).

参考文献

- [1] O. Tanaka *et al.*, “コンパクト ERL におけるビームロス低減のためビームハロー観察及び解析”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, August 8-10, 2016, pp. 29-33.
- [2] S. Sakanaka *et al.*, “コンパクト ERL におけるビーム電流約 1 mA の運転”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, August 8-10, 2016, pp. 291-295.
- [3] K. Aulenbacher *et al.*, “Pulse response of thin III/V semiconductor photocathodes”, J. Appl. Phys. 92, 7536 (2002).
- [4] S. Matsuba *et al.*, “Initial Emittance and Temporal Response Measurement for GaAs Based Photocathodes”, Proceedings of the 3rd International Particle Accelerator Conference, New Orleans, 2012, pp. 640-642.
- [5] I. Bazarov *et al.*, “Thermal emittance and response time measurements of negative electron affinity photocathodes”, J. Appl. Phys. 103, 054901 (2008).
- [6] Y. Honda *et al.*, “高次モード測定による cERL 入射器超伝導空洞の設置位置誤差の評価”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, 2016, pp. 893-895.
- [7] S. B. van der Geer and M. J. de Loos, “The General Particle Tracer code: Design, Implementation and Application”, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2001.
- [8] T. Obina *et al.*, “Recent developments and operational status of the compact ERL at KEK”, Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference, Busan, 2016, pp. 1835-1838.
- [9] Y. Honda and T. Miyajima, “ERL 試験加速器入射部における光陰極電子銃用レーザーシステムの開発”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, 2013, pp. 769-772.
- [10] K. Harada *et al.*, “The Magnet and Power Supply System for the Compact-ERL”, Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference, Richmond, 2015, pp. 2899-2901.
- [11] M. Borland, “Elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation”, APS Report № LS-287, 2000.
- [12] H. Matsumura *et al.*, “Beam Loss Estimation by Measurement of Secondarily Produced Photons under High Average-current Operations of Compact ERL in KEK”, Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference, Busan, 2016, pp. 2711-2714.