

令和元年6月10日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K04747

研究課題名(和文) エネルギー回収型リニアック(ERL)におけるビームロスの研究

研究課題名(英文) Study of beam loss in energy-recovery linacs (ERLs)

研究代表者

中村 典雄 (Nakamura, Norio)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：10198228

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギー回収型リニアック(ERL)において通常のリニアックでは実現できない高いビーム電流を安全に達成するために、ビームハロー形成とビームロス発生の様々な機構をシミュレーションと測定を行って研究した。その結果、cERLのビームロスの主な原因が新しいビームハロー形成機構に基づくものであることを実証できた。この機構では電子銃の光陰極で生じるパンチテールが高周波加速空洞の横方向キックを受けることで横方向のハローに変換される。我々はまたコリメータによって望ましくないビームロスを有効に低減できることやGaAsからマルチアルカリに光陰極材料を変えることでハローとロスを抑制可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、幅広い学術研究利用が期待されるエネルギー回収型リニアック(ERL)の課題の1つであるビームロスのメカニズムの解明と抑制に貢献できたことで、電子銃光陰極のレーザー照射に対する時間応答の遅れに伴うパンチテールに起因する新しいビームハロー形成機構をシミュレーションと実験の両面で実証できたことは特に重要である。また、本研究によって、半導体リソグラフィ用極紫外線光源などの多くの産業利用が期待され、なおかつ加速エネルギーを回収・再利用できるという優れた経済性も有するERLの実用化に一歩近づいたことは大きな社会的な意義がある。

研究成果の概要(英文)：We have studied various mechanisms of beam halo formation and beam loss generation in energy-recovery linacs(ERLs) by using simulations and measurements in order to safely achieve a high-current beam that cannot be accelerated and transported in ordinary linacs. As a result, we succeeded in demonstrating that the main cause of the beam loss in cERL is due to a new halo formation mechanism, in which a longitudinal bunch tail arising at the photocathode is transformed to a transverse beam halo due to transverse rf kicks from the accelerating fields of the radio-frequency cavities. We also showed that the unwanted beam loss can be effectively reduced by making use of a collimation system and that another cure is to reduce the bunch tail by changing the photocathode material from the present GaAs to a multi-alkali that is known to have a shorter longitudinal tail.

研究分野：物理学

キーワード：ビームロス ビームハロー エネルギー回収型リニアック コリメータ 光陰極電子銃 超伝導加速空洞 シミュレーション 電子銃励起レーザー

1. 研究開始当初の背景

- (1) エネルギー回収型リニアック (ERL) は、周回後のビーム加速エネルギーを高効率で回収しつつ、良質で大強度のビームを提供できる可能性を持つために、高輝度・短パルス光を供給する次世代シンクロトロン放射光源や高出力・高繰り返し自由電子レーザー(FEL)、さらには高エネルギー素粒子原子核実験用加速器などへの応用が検討・提案され、本格的な ERL 加速器の実用化に向けた研究開発や諸問題の解決が求められていた。日本では、2013 年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) に図 1 に示すコンパクト ERL (cERL) が ERL 実証機として建設された。
- (2) ERL で高い平均電流を実現するためには、加速器機器保護や放射線安全の観点から運転や利用において問題となりうるビームロスの抑制とその発生機構の解明が必要不可欠であり、世界的にも重要なテーマの 1 つになりつつあった。このような研究は、平均ビーム電流の低い従来のリニアックでは深刻な問題にならず、ERL で初めて重要となる新しい研究課題であった。

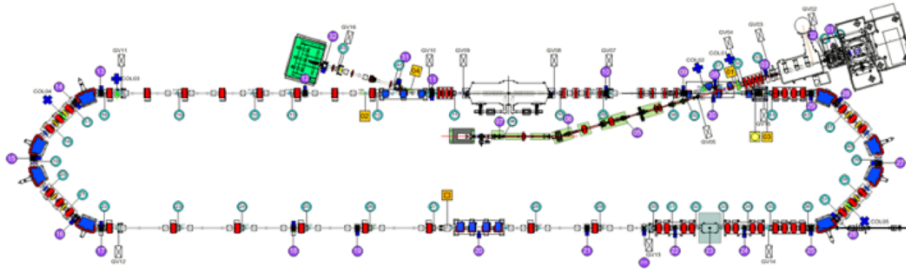


図 1: コンパクト ERL (cERL)

2. 研究の目的

- (1) 次世代加速器として様々な応用が期待されている ERL におけるビームロスの原因となりうるビームハローの起源とその形成機構を明らかにする。同時に、形成したハローがビームロスに至る過程もシミュレーションを使って解明する。
- (2) ビームロスやハローの研究結果を踏まえて、ハローの除去やビームロスの低減を図るための対策及びビームロスで発生する放射線の遮蔽の最適化や強化について知見を得る。

3. 研究の方法

ビームロスやビームハローの起源として(1)-(3)に示すような原因が考えられるので、それぞれについてシミュレーションを実行して評価を行う。

- (1) 電子ビーム内クーロン散乱 (Touschek 散乱) 及び残留ガスとの散乱
- (2) 加速空洞や電子銃からの電界放出電子
- (3) 電子銃の光陰極 (フォトカソード) のレーザー光に対する時間応答などに由来する電子バンチのテール (tail)

シミュレーションは空間電荷効果やコヒーレント放射光 (CSR) ウェーク場効果などを取り込んだシミュレーションコードを用いて行う。シミュレーションコードとしては、低エネルギーでは GPT (General Particle Tracer) を、高エネルギーでは elegant を用いる。必要に応じてコードに追加のサブルーチンプログラム等を書き加える。また、シミュレーション結果を可能な限り cERL のビームハロー測定やビームロス測定の結果と比較する。

4. 研究成果

(1) Touschek 散乱と残留ガスとの散乱によるビームロスのシミュレーションを行い、cERL ビームロス分布を評価した。シミュレーションは elegant を主に用い、残留ガスとの散乱によるビームロス計算では elegant にその機能がなかったため、新たに開発したサブルーチンを加えて評価した。cERL の目標電流である 10 mA (7.7 pC, 1.3 GHz) に対してどちらも 1 nA 以下のビームロスという結果となり、cERL の運転には大きな影響を与えないことがわかった。ただし、GeV クラスの ERL では条件によっては無視できないロス源の一つになる可能性がある。

(2) cERL 主超伝導空洞ではクライオモジュールを含む組立・設置後、電界放出電子の発生が顕著になった。そのため、主空洞の電界放出電子の輸送シミュレーションを主空洞の上下流で行い、電子がどこの場所で失われるかを追跡した。その結果、電子は主空洞下流ではダンプリングと分岐部までで低エネルギー電子の多くを損失し、最もエネルギーの高い電子でも第 1 アークの最初の偏向電磁石で損失してしまうことがわかった。下流については入射・合流部のシケインで全失する結果となった。計算結果と実際のロスモニタ等の測定結果と矛盾はなく、電界放出電子の損失が多い場所に局所的な放射線遮蔽を追加した。結果として加速器室外の放射線量の観点からは電界放出電子の寄与は無視できることがわかった。cERL 光陰極 DC 電子銃や入射空洞から

の電界放出電子は主空洞に比べて格段に小さいことも確認した。ただし、GeVクラスのERLでは電界放出電子は発生場所によってはビームと近いエネルギーを持つハローとなって長い距離を周回した後ロスを起こすため、コリメータなどの対策を検討する必要がある。

(3) ほぼ全周に配置したロスモニタなどの測定から cERL 運転時の主なビームロスの成分は、電子銃励起レーザーによる電子ビーム発生と同期しており、加速空洞の電界放出電子のようなビーム無しでも常時発生している成分ではないことがわかった。そこで、我々はビームロスの起源を特定するために、電子銃 GaAs 光陰極のレーザー光に対する時間応答に因る縦方向バンチテール(最大 100ps まで)を取り込んだ電子分布(図2)を使ってシミュレーションを行った結果、空洞での RF 位相が電子バンチのコア(数 ps のガウス分布)とテールで異なるために、縦方向のバンチテールが分散部で水平ハローを形成し、2つのアーク部及び減速後のダンプリーン付近でビームロスを起こす可能性があることを突き止めた。ただし、実際の運転中にはハローやビームロスは垂直方向に観測されることが多かった。特に垂直方向のハローは入射空洞前の垂直ステアリング電磁石を強く励磁して入射超伝導空洞中心から軌道をずらした場合には見られたことから、空洞前後のステアリング電磁石のキックや空洞の設置誤差の影響を含めたシミュレーションを行った結果、入射部と周回部のスクリーンモニタで観測される垂直方向のハローの特徴をシミュレーションでほぼ再現することができた。後方だけでなく前方にもより少量であるがテール成分が生じる場合もあったが、これはレーザーのガウス分布などからのずれあるいはレーザーシステムからの迷光などによって生じるものと考えられる。図3と図4に測定されたハローを含むビームプロファイルとそれらのシミュレーション結果をそれぞれ示す。これらの結果は、時間方向のテールが加速空洞の中心軸からずれて横方向キックを受けたことによって生じる横方向ビームハローの形成を示すものである。GaAs 光陰極だけでなく同じような時間応答の遅れを持つ光陰極を使う場合にも生じる可能性がある。上記の測定とシミュレーションはハローを除去するためにコリメータを挿入した場合に対しても行われた。図3、図4の左右の比較によってコリメータがハローを有効に除去していることが確認でき、測定とシミュレーションの結果がほぼ一致しているのがわかる。図5に、使用したコリメータの構造を示した。

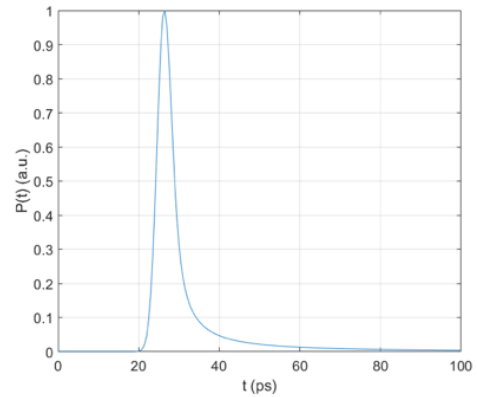


図2: 電子銃からの電子分布

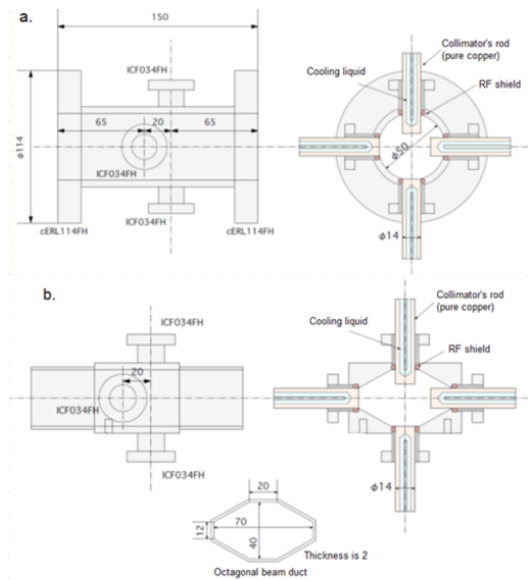


図5: 使用したコリメータの構造 (上: 直線部、下: アーク部)

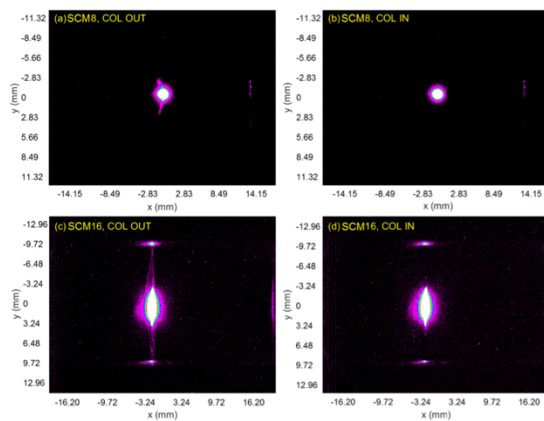


図3: 2カ所のスクリーンモニタ (SCM8, SCM16) で観測したビームプロファイル。左はコリメータ無しでハローが顕著に観測されているが、右はコリメータ有りでハローが除去されている。

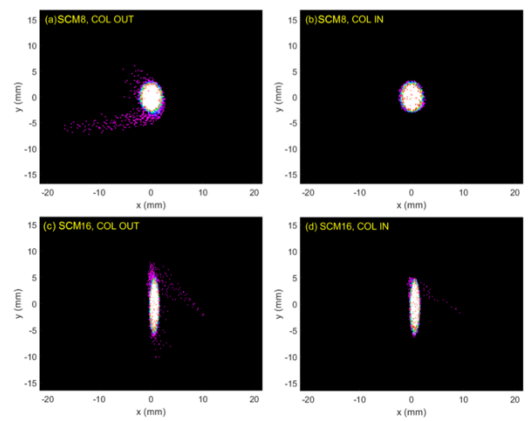


図4: 2カ所のスクリーンモニタ (SCM8, SCM16) でのシミュレーション結果。図3のプロファイルとハローをほぼ再現する。(左: コリメータ無し、右: コリメータ有り)

(4)最近では最大 60pC までの大電荷バンチでの運転を行えるようになったために大電荷バンチでのシミュレーションも行った。大電荷バンチ運転では空間電荷効果の影響が強いため数 ps のレーザーパルスを重ね合わせて (パルススタッキング) 数十 ps のフラットパルスを生成・照射するが、シミュレーションコードによる計算もその電子分布をなるべく模擬して行った。シミュレーションでは、強い空間電荷効果や電子銃での初期電子ビーム分布の違いの影響などがあり、低電荷バンチ時とはハローを含むビームプロファイルが明らかに異なった。しかし、一方で低電荷バンチの時と同様に縦方向バンチテールを起源とする横方向のハローを形成することもシミュレーションで確認できた。測定との比較を行うためにはより精確なシミュレーションを行う必要がある。

(5)ビームロスやハローの研究結果から、ハロー除去とロス低減の観点からコリメータシステムの有用性が検証できた。特に低エネルギーでのハローの除去は局所的な放射線遮蔽の負荷も小さくすることができる。また、縦方向のテール成分がビームロスの主成分と考えられることから、現在の GaAs からマルチアルカリなどの時間応答の早いフォトカソード材料へ変更することでビームロスの低減につながる可能性があることも示すことができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① O. Tanaka (O. A. Konstantinova), N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima, A. Ueda, T. Obina and R. Takai, “New Halo Formation Mechanism at KEK Compact Energy Recovery Linac”, Phys. Rev. Accel. Beams **21**, 024202 (2018). (査読有)
DOI:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.024202
- ② O. Tanaka, N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima, T. Obina, and R. Takai, “Simulation Study of the Beam Halo Formation for Beam Loss Estimation and Mitigation at KEK Compact ERL”, in Proc. of the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC16), Busan, May 8 - 13, 2016, pp. 1843 - 1846. (査読無)
DOI:10.18429/JACoW-IPAC2016-TUPOW039
- ③ O. Tanaka, N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima and S. Sakanaka, “Simulation Study of Beam Halo and Loss for KEK Compact ERL”, in Proc. of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC15), Richmond, May 3 - 8, 2015, pp. 1587 - 1590. (査読無)
DOI:10.18429/JACoW-IPAC2015-TUPWA068

[学会発表] (計 4 件)

- ① O. Tanaka (O. A. Konstantinova), N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima, A. Ueda, T. Obina and R. Takai, “Beam halo study at the KEK Compact ERL”, ERL17, CERN, Geneva, June 18 - 23, 2017, THICCC001_TALK.
- ② 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, 「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ー」、第 14 回日本加速器学会年会プロシーディングス、2017 年、THOM09.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOM/THOM09.pdf.
- ③ O. Tanaka (O. A. Konstantinova), N. Nakamura, M. Shimada, T. Miyajima, T. Obina, and R. Takai, “Beam halo observation and examination for beam loss reduction at the Compact ERL”, in Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, August 8 - 10, 2016, pp. 29 - 33.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOOL/MOOL03.pdf
- ④ O. Tanaka (O. A. Konstantinova), N. Nakamura, M. Shimada, T. Obina, R. Takai, and T. Miyajima, “Beam Halo Propagation and Mitigation for Beam Loss Study at KEK Compact ERL”, in Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, August 5 - 7, 2015, pp. 975 - 978.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP020.pdf

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：田中 オリガ (旧名：コンスタンティノワ オリガ)

ローマ字氏名：(TANAKA Olga)

所属研究機関名：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

部局名：加速器研究施設

職名：特別助教

研究者番号 (8 桁)：00734568

研究分担者氏名：島田 美帆
ローマ字氏名：(SHIMADA Miho)
所属研究機関名：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
部局名：加速器研究施設
職名：研究機関講師
研究者番号 (8桁)：10442526

研究分担者氏名：宮島 司
ローマ字氏名：(MIYAJIMA Tsukasa)
所属研究機関名：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
部局名：加速器研究施設
職名：准教授
研究者番号 (8桁)：50391769