

Compact-ERL DC 電子銃の 500 kV 長期安定運転 LONG-TERM STABLE OPERATION OF A 500 KV DC ELECTRON GUN AT COMPACT-ERL

山本 将博^{*A)}、西森 信行^{B)}、宮島 司^{A)}、本田 洋介^{A)}、羽島 良一^{B)}

Masahiro Yamamoto^{*A)}, Nobuyuki Nishimori^{B)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Ryoichi Hajima^{B)}

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

^{B)}National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Abstract

The compact-ERL (cERL), which has been developed as a next generation radiation light accelerator in KEK, has changed its policy in 2016, and thereafter, the research and development of the accelerator as an industrial application has been progressed, but the long-term stable supply of the low emittance beam of the electron gun remains unchanged and is one of the most important items. From June 2017, we started operation with accelerating voltage 500 kV with electron gun test mode operation, then 500 keV beam was supplied in cERL operation in March and June 2018. As a result, we succeeded in maintaining the acceleration voltage of 500 kV without causing discharge even for 369 hours or more. From the experience of the operation of the electron gun there is a possibility that a very slow conditioning effect may be obtained even during high voltage operation. It is presumed that stable operation itself contributes to making a state where discharge is less likely to occur. We report on the background and current problems that the state of acceleration DC voltage of 500 kV can be maintained for a long time stably.

1. はじめに

KEK にて次世代放射光源加速器として開発が進められてきた compact-ERL(cERL) は 2016 年に方針が変わり [1]、その後産業利用応用としての加速器の研究開発が進められてきたが、大強度 CW FEL 光源 [2] の用途などでは電子銃の低エミッタンスビームの長期的な安定供給は変わらず最重要項目の一つとなっている。

cERL 電子銃はセラミック加速管の放電問題に対処し、加速電圧 500kV を実現するために 2015 年の夏に 2 段のセラミック管を増設し [3]、2015 年 11 月末～12 月の約 1 カ月間電子銃の HV コンディショニングを経たのち、2016 年 3 月の cERL 1mA CW 運転 [4] では運転中に電子銃で放電が起きない加速電圧 390kV で運転が行われていたが、その後、追加のコンディショニングを経て加速電圧 500kV の状態で調整運転を進め、予算的に運転時間が限られた中で、2018 年 3 月および 6 月の cERL 運転およびそれまでの電子銃単独運転において累計 369 時間以上の間、一度も放電を起こすことなく加速電圧 500 kV を維持し続けることに成功した。

500kV 状態で電子銃の放電は起きなくなった一方で、cERL 運転では他の要因によりインターロックが働き電子銃からのビーム供給が止まる事象・問題が度々発生したが、2018 年 3 月の cERL 運転では 500 keV の burst beam を供給し、同年 6 月には 500 keV で 1 mA 相当の 1.3 GHz CW beam の供給を行った。以下にその詳細について述べる。

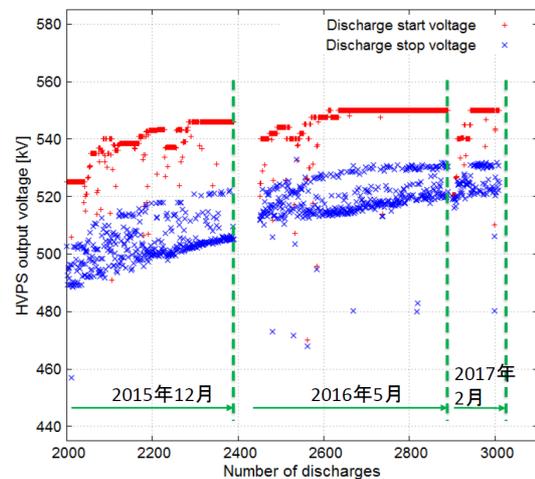


Figure 1: History of HV conditioning of electron gun. After the first conditioning in December 2015, additional conditionings were carried out for several days respectively in May 2016 and February 2017.

2. 500 KV 安定運転達成までの道のり

cERL の電子銃加速電圧 500kV の状態を長期的に安定に運転できるまで、ヒントになる実験結果や、あるいはいくつかの問題が発生し支障となる場合もあった。

2.1 追加コンディショニングからのヒント

2016 年 3 月以降、cERL での電子銃 500kV 運転を目指し、2016 年 5 月と 2017 年 2 月に追加的に HV コンディショニングを実施した。2015 年 12 月時の HV コンディショニングと連ねて放電開始電圧・停止電

* masahiro@post.kek.jp

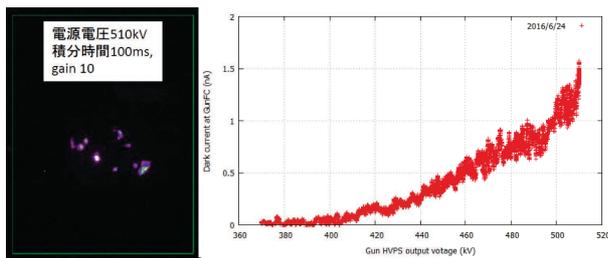


Figure 2: A typical beam image of the field emission dark current from near the photocathode (left), and a graph of the voltage dependence of the dark current at that time (right).

圧をプロットしたグラフを図1に示す。このグラフで注目すべき点は、2015年12月時のコンディショニング終了時の放電停止電圧は約505kVであったが、その後2016年3月のcERL運転を経て2016年5月のコンディショニングでは最初から放電停止電圧が510kV程度まで上昇している部分にある。cERL運転中は電子銃は390kVで安定な運転を行い、コンディショニングで行うような放電を伴う事象は起こしていないが、放電を起こさないまでもある程度高い電圧で保持するだけでゆっくりとしたコンディショニングの効果が得られていることをこのデータは示している。

これは一見些細な結果に見えるが、この現象こそが長期的に加速電圧500kVを安定に維持し続けられることを担保する重要な結果となっている。その考察は4.1で述べる。

2.2 カソードからの電界放出暗電流の問題

放電停止電圧が運転電圧よりも明らかに高い状態までコンディショニングができた状態となった後、最初に問題となったことはカソードプラグ周りからの電界放出暗電流の発生である。コンディショニング時はカソード電極にSUS製のダミーカソードプラグが挿入された状態で実施されていたが、コンディショニング完了後にダミーカソードプラグを取出し、NEA表面状態のGaAsカソードをカソード電極へ挿入してビーム運転を行うこととなる。

この時に発生した問題は、ダミーカソードプラグの場合にはほとんど発生していなかった電界放出暗電流が、GaAsカソードが固定されたカソードプラグを挿入したときに図2に示すように電界放出暗電流に伴う放射線発生が500kV到達前から発生する事象が起きたことである。この問題はGaAsカソードを固定するカソードプラグ側の寸法に個性があり、適切な寸法よりわずかに大きいプラグを利用するとカソード電極挿入時に不完全な状態で固定されることで発生することが、2つのカソードプラグを交互に電子銃電極へ着脱、高電圧印可を行うテストを通して判明した。

カソードプラグの挿入がわずかにでも不完全な状態では電極とプラグの隙間に電界が入り込み、本来隠れるはずのGaAs結晶をプラグに固定するための金属キャップのエッジ構造部などに対して電界が集

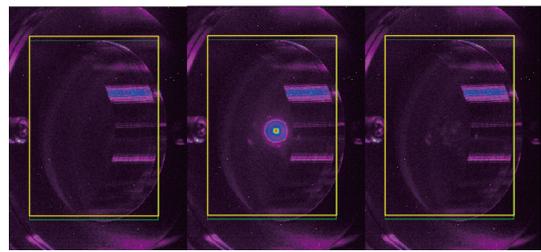


Figure 3: Evaluation of dark current by screen monitor in the gun accelerating voltage of 500 kV steady state. The image on the left is the background image of 0 kV, the center is the beam image generated by the cathode excitation due to the stray light of the vacuum gauge at the electron gun, and the right is the beam image by field emission in the vacuum gauge OFF state.

中し、電界放出現象が起きていると推測している。その後の運転には適切な寸法のカソードプラグのみを使用することで問題を回避し、光陰極装着状態で加速電圧500kVの印可を安定に行うことができるようになった。

その後、電子銃下流部のYAGスクリーンモニター[5]を利用し、カソードに高電圧がかけられた状態で電界放出暗電流としてどのくらい輸送されているのかを調査した。輸送される暗電流によるビームの電流は非常に微弱であるため、1画像取得の積分時間を数秒間程度と非常に長く設定することで、微弱なビームによるスクリーンでの微弱な発光を取得した。通常のビーム調整時は、レーザーに同期したタイミングで十分短い積分時間(~10ms)でスクリーンのビーム照射部分で励起されたYAGの発光を確認している。この場合、暗電流等による微弱な発光はバックグラウンドレベルと同等で確認することはできず、励起レーザーによってカソードから発生したビームの電流値に対応した発光をとらえている。そのビーム電流と発光量の関係を基準としてカソードからの暗電流を見積もった。暗電流ビームとして輸送されるものには2種類あり、一つは電子銃内部の圧力を計測する電離真空計からの迷光が光陰極に当たって常に連続的に光電流として光陰極面全体からほぼ一様に放出されるビーム(図3の中央図)と、迷光によらない純粋な電界放出起因のビーム(図3の右図)がある。前者は、カソードのQEに大きく依存する量となっているが、実用的なカソードのQEとして数%程度の状態では100pAレベルで暗電流ビームが放出されていることが分かった。また、電子銃の電離真空計をOFF状態とした迷光の影響を無くした状態で計測した純粋な電界放出起因の暗電流ビームは5pA程度であることが分かった。

2.3 入射部スクリーンモニターのチャージアップ問題

スクリーンモニターを利用したビーム調整時はマイクロパルス幅1 μ sの5Hzバーストパルスのビームであるが、バンチ電荷量が数pC以上とある程度大きくなると、平均電流値として数十nA以上となり、大

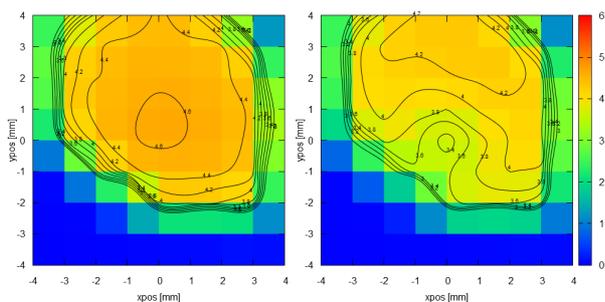


Figure 4: Comparison of the cathode QE map before and after discharge due to screen charge-up. The left figure shows the result before discharge and the right figure shows the result after discharge.

電荷バンチのビーム試験時にスクリーンのチャージアップがおきる事象がビームエネルギーがまだ低い電子銃出口直後の入射部のスクリーンで多数確認された。

通常、入射部は 10^{-9} Pa 台の極高真空状態となっているが、チャージアップ放電によって場合によっては 1×10^{-7} Pa の真空インターロックレベルを一瞬超える状況となり、インターロック動作によって電子銃からのビーム供給が停止する。

このチャージアップ問題はビームの供給停止が起きる問題の他、この放電により発生するガスおよびイオンが電子銃側へ逆流しカソード QE を一瞬で大幅に低下させる問題も明らかとなった。典型的な例を図 4 に示す。この時は、1 度の放電によって QE は約 3 割減少している。特にこのイオン衝撃によるカソードのダメージは深刻であり、負の電子親和性表面を作り直すためにカソードを加熱、原子状水素を照射するクリーニング工程を経てもダメージを受けたエリアの QE は元の状態には戻らず低い状態であることもこれまでの運転を通してわかっている [6]。このようなダメージを受けたカソードは一度真空中から取り出して新しい GaAs 基板と交換する手間と時間を要する作業が必要となるため、入射部スクリーンでのチャージアップ放電の問題は安定な加速器の運転上避けなければならない。

この問題への応急的な対処としては、それまでマイクロパルス幅 $1 \mu\text{s}$ であった状態を 100 ns まで狭めることでトータルの電荷量を減らし、その頻度を大幅に抑えることができていたが、今後の数十 pC 以上の大電荷バンチのビーム試験ではまだ不十分であり、Laser の繰り返しを下げるなどの対応も必要である。

2.4 入射器加速空洞からの電界放出由来の問題

cERL 運転では入射器加速空洞と電子銃の両方が関連した問題も発生した。burst モードでの調整運転中に入射器加速空洞下流の合流部周辺で突如放射線が高くなりインターロックで各機器が停止となる問題である。発生時は複数の原因が推測されたが様々な運転モードで挙動を確認したところ、入射加速空洞の加速電界が高く、電子銃近傍の放射線が高い状態でかつ電子銃に高電圧が印可された時にだけ発生

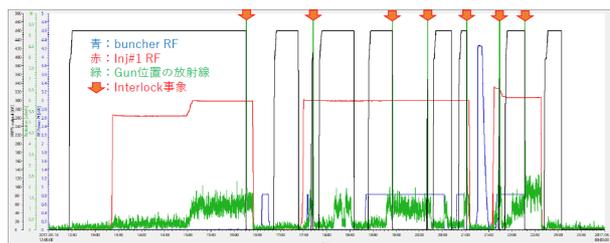


Figure 5: Interlock event accompanying an unexpected beam emission from the DC-gun derived from field emission of the injector superconducting cavities.

していることが判明した。この時の電子銃電圧、電子銃近傍の放射線、入射空洞 RF パワー、バンチャー RF パワーの履歴を図 5 に示す。

詳細な原因は定かではないが、入射器空洞の電界放出に起因する電子の一部あるいは X 線が電子銃のカソードを叩き、それに伴う電子銃からの電子放出が突発的に増加し、そのビームが入射加速空洞の適当な位相に乗って加速されたものが合流部付近でビームダクト壁にぶつかり、放射線を発生して起きていると推測している。

その後、入射加速空洞の加速電界を下げて電界放出に起因する放射線が電子銃傍の放射線モニターでほぼ検出されない状況で運転することによりこの問題が発生しないことを確認した。この経験から、空洞冷却後に cERL 運転前に行われる入射器加速空洞のエージングにおいて十分なエージングを行い、運転加速勾配で電界放出に起因する放射線が電子銃エリアで十分低く抑えることでその後の cERL 運転でこの問題の発生を回避することができている。

3. 電子銃の 500 KV 運転

3.1 burst beam モードでの大電荷バンチビームの生成

500 kV が安定にかけられる状態になり、burst モードの調整運転では今後の cERL の産業利用などの用途に向け、数 10 pC 相当の大電荷バンチのビーム試験が進められている。入射器加速空洞を含むビーム調整およびエミッタンスの評価については [7-9] で述べられているためそちらをご参照頂きたい。ここでは、現状で生成可能な大電荷バンチビームについて調査した内容を簡単に述べる。2.3 で述べたように大電荷バンチビームではスクリーンのチャージアップの問題があるため、ファラデーカップのみで引出しバンチ電荷量を計測した。繰り返し 1.3 GHz、マイクロパルス幅 100 ns のバーストパルスによる 1 バンチあたりの電荷量と励起レーザー強度の関係についてまとめたグラフを図 6 に示す。Laser 強度に対して電荷量が線形に増加していないものの、200 pC/bunch を超える大電荷バンチビームの生成を確認した。線形に電荷量が増加しない原因として、ビーム収束用のソレノイドを電荷量に対して最適化していない状況であったため、ビームが空間電荷効果によって大きく広がり、ファラデーカップ手前で一部の電荷が

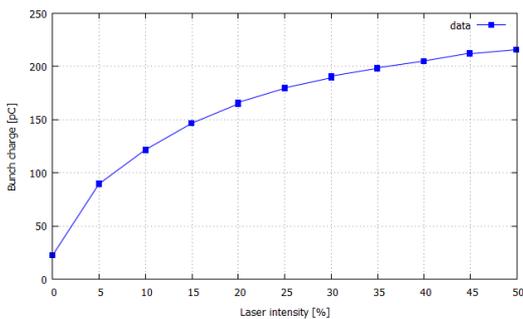


Figure 6: Result of high charged bunch generation test from GaAs photocathode.

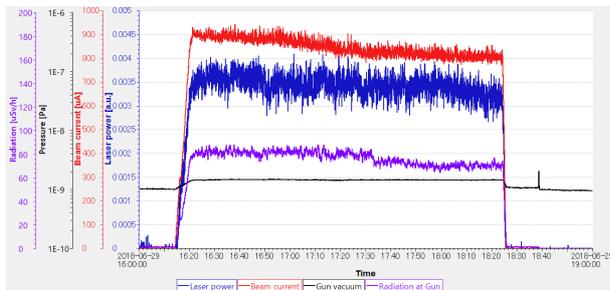


Figure 7: History of beam current, excitation laser intensity, radiation and vacuum in the DC-gun during CW beam operation corresponding to 1mA.

失われている可能性、およびカソード上から高い電流密度でビームを生成していることから表面電荷制限現象 [10] が起きている可能性も考えられる。

3.2 CW beam モードでの大電流 (～1 mA) ビームの生成

加速電圧 500kV での 1mA 相当のビーム供給を行った履歴を図 7 に示す。今回は限られた運転時間の影響で電子銃の大電流ビーム供給、カソード寿命に関する実験時間は調整時間を除いて実質数時間と短時間であったため、許容される時間の約 2 時間、安定したビーム供給を行った。運転中のカソード QE の低下が見られたが、より長時間運転でのカソード QE の低下の様子を確認することができなかった。2016 年 3 月の CW 運転時では、運転開始時の GaAs カソードの QE は 2% 程度と低い状況であったが、同程度の CW 運転状態での QE の低下は極わずかであった [4]。GaAs カソードの場合、波長 532 nm の励起条件に置いて QE の低下傾向は一定の割合ではなく、QE に依存した低下の傾向がある可能性がある。

3.3 CW 運転後のカソード QE およびその再活性化後の変化

今回の CW 運転では、電子ビームはカソードの中央(座標 (0,0))より約 2mm ずれた部分(座標 (1.5,1.5))より発生させた。CW 運転前後に電子銃部で測定した QE 分布を図 8 に示す。CW 運転前ですでにカソード中央部の QE が低い状態となっているが、これは CW 運転調整の過程で受けたダメージによるもので

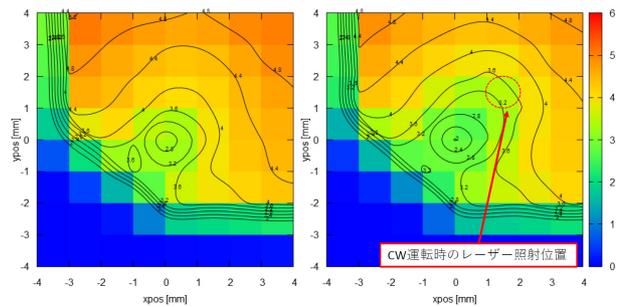


Figure 8: QE map before and after CW operation equivalent to 1 mA beam current. The left is before CW operation, right is after operation. Because the adjustment operation was carried out before 1 mA CW operation, the QE map in the left figure also decreases in the center part.

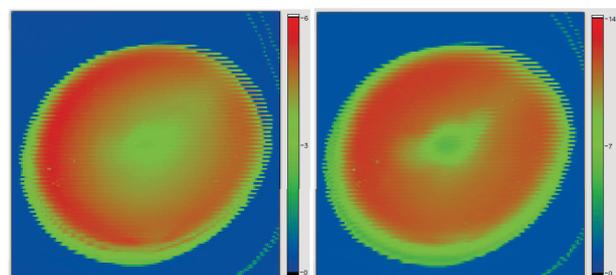


Figure 9: Detailed measurement of the cathode QE map after CW operation acquired at the cathode preparation system. The left figure was acquired before reactivation, the right figure was acquired after cesium redeposition.

あり、中央部で QE は約 2.8%、レーザー照射位置で約 4.2% であった。CW 運転後はそれぞれ約 2.0%、約 3.5% となり、カソード中央で QE 低下の割合が大きく、その範囲はおおよそ数 mm であり、電子銃近傍で電子銃で発生した電子ビームによってイオン化した残留ガスが電子銃カソードへ向けて逆加速し、カソードを叩くイオンボンバードの現象がほぼカソード中央 (Laser 照射座標 (0,0)) のこの領域に集中していることが分かる。

CW 運転終了後にカソードを電子銃からカソード準備装置へトランスファーロードを使い移動させ、カソード準備装置内で QE 分布の詳細スキャンを行った (図 9 の左、フルスケールは 6%)。その後セシウムを再蒸着させてから再度 QE 分布の詳細スキャンを実施した (図 9 の右、フルスケールは 14%)。この結果からわかるようにカソード中央部のイオン衝撃によるダメージ領域 ($\phi 2 \sim 3$ mm) の QE はセシウムの再蒸着によっても QE は 5% 台までの回復に留まったが、その周辺の領域ではほぼ初期の 10% を超える QE まで回復している。NEA-GaAs の光陰極より大電流ビームを供給する運転では、長期的に利用することを考えるとカソードの中央部より数 mm 外した位置よりビームを生成する方法が、CW 運転中の QE の低下を遅らせる効果の他、カソードを再活性化して利用し続けられる点で重要である。

4. 高電圧安定保持の背景

4.1 無放電状態の高電圧保持によるコンディショニング効果

電子銃の運転状態で高電圧が維持されている状況では、放電に至らないものの種となる微弱な電界放出暗電流が流れていることは、上述の2.2節のデータから明らかと思われるが、その微弱な暗電流によっても長期間の運転によってゆっくりとしたコンディショニング効果が得られていることが図1の2015年12月終了時と2016年5月開始時の放電停止電圧のギャップから解釈することができる。

放電停止電圧以下では長期的に放電が起きない事実とその物理的背景については文献[11,12]で報告しているように、アノード側で発生する電子刺激脱離(ESD)の一部がイオン化し、カソードへ加速衝撃する現象が関与するモデルで矛盾なく説明ができる。

加速電圧500kVの試験を開始した2017年度はその初期の状態に放電停止電圧がおよそ520kV(保護抵抗部を考慮したカソード部電圧としての放電停止電圧は約510kV)であり、その時点で既に500kVを安定に保持できる安全圏の範囲内であって、その後2018年3月および6月のcERL運転期間を経て500kVの状態を369時間保持し、その間のゆっくりとしたコンディショニングの効果を考慮するとより一層500kVで放電が起きにくい状況になっていると推測される。

4.2 電子刺激脱離(ESD)と放電抑制

ESDの一部がイオン化し、それが放電現象に寄与するモデルに基づけば、コンディショニングを短時間で行うには、ESDを減らすために衝撃電子のDoseを短時間で多く取ることが有効だが、一方で一度の放電あたりの電荷量を増やすと放電エネルギーが増大し、放電箇所の溶融や蒸発など不可逆的な損傷を与えるリスクが増える問題がある。コンディショニングの電圧、電源や装置の静電容量、保護抵抗値(電源と電極間に設ける電流制限抵抗)、放電箇所の材質、電極の配置関係から決まる電界放出位置からの電子軌道と電子衝撃位置で発生するイオンの軌道の関係など、多くの異なる条件が存在し、装置毎に効率的なコンディショニング条件は異なると考えられるが、不可逆的なダメージを与えない放電エネルギーの閾値がある程度わかればその閾値を目安に安全な範囲でできるだけ放電時の電荷量を稼ぐことができる保護抵抗を用いることでより効率的にコンディショニングを行うことができると考えられる。

また、放電箇所が予想できる場合などで本質的に放電を抑制、より電圧を高くする処置を行いたい場合は、局所的にESDが低い素材やコーティング等の表面処理が有効である可能性がある。

5. まとめ

2016年度よりcERLは開発方針が一転し、その後非常に限られた運転時間の状況の中で、cERL電子銃は調整を積み重ね、それまでの加速電圧390kVか

ら500kVまで性能を向上し、その調整において発生した種々の問題に対して対応・処置を行った。その結果、2018年3月のcERL burstモード運転での500keVビームの供給、6月には加速電圧500kVにて1mA相当の1.3GHz CWビームの供給を行うに至った。2017年度以降の電子銃の調整運転、cERL運転で累計369時間以上の間、加速電圧500kV状態で放電は一度も発生せず、運転中のコンディショニング効果を考えると今後も安定した500keVビームの供給運転が長期的に行える状況にあるといえる。

謝辞

ここで述べた成果はcERLの運転に関わられたすべての方の協力によって得られたものである。この場をお借りして御礼申し上げます。本研究の一部は、科研費15H03594, 16K05385により実施されました。

参考文献

- [1] KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP), <https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>
- [2] 中村典雄 他, "ERL-FELを用いた半導体リソグラフィ用高出力EUV光源", 第15回日本加速器学会プロシーディングス, WEP128
- [3] 西森信行 他, "コンパクトERL電子銃の高性能化", 第13回日本加速器学会プロシーディングス, WOP048, (2016).
- [4] 坂中章悟 他, "コンパクトERLにおけるビーム電流約1mAの運転", 第13回日本加速器学会プロシーディングス, WEOM15, (2016).
- [5] 高井良太 他, "コンパクトERL用ビーム位置モニターとスクリーンモニターの開発", 第10回日本加速器学会プロシーディングス, SAP024, (2013).
- [6] 山本将博 他, "大電流CWビーム運転前後の半導体フォトカソード量子効率分布測定", 第13回日本加速器学会プロシーディングス, MOP043, (2016).
- [7] T. Miyajima *et al.*, "60 pC BUNCH CHARGE OPERATION OF THE COMPACT ERL AT KEK", Proceedings of IPAC2017, MOPVA019, (2017) p.890-893.
- [8] 宮島司 他, "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", 第15回日本加速器学会プロシーディングス, WEP032
- [9] 布袋貴大 他, "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回日本加速器学会プロシーディングス, THOM09
- [10] K. Togawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., A 411 (1998) 431.
- [11] 山本将博, 西森信行, "超高真空における電子刺激脱離と直流放電現象の関係", 第13回日本加速器学会プロシーディングス, MOOL07, (2016).
- [12] M. Yamamoto and N. Nishimori, Appl. Phys. Lett. **109**, 014103 (2016)