

大電流 CW ビーム運転前後の半導体フォトカソード QE 分布測定 QE MAP MEASUREMENT OF SEMICONDUCTOR-TYPE PHOTOCATHODE BEFORE AND AFTER THE HIGH CURRENT CW BEAM OPERATION

山本 将博^{*A)}、金 秀光^{A)}、西森 信行^{B)} 本田 洋介^{A)}、宮島 司^{A)}、帯名 崇^{A)}、亀田 吉郎^{C)}、川崎 泰介^{D)}
Masahiro Yamamoto^{*A)}, Jin Xiuguang^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{B)}, Yosuke Honda^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)},

Takashi Obina^{A)}, Yoshiro Kameta^{C)}, Taisuke Kawasaki^{D)}

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

^{B)} Tohoku University

^{C)} e-JAPAN IT CO., Ltd.

^{D)} Toshiba

Abstract

A commissioning of the compact-ERL (cERL) was successful to the stable operation of the CW beam more than 900 μ A beam which was supplied from GaAs semiconductor type photocathode in March this year. In a high average beam operation, ions generated on the beam axis will increase and a part of these ions flow back to the electron gun. As a result, the problem that photocathode quantum efficiency (QE) is reduced by ion back-bombardment becomes the main factor that determine the photocathode QE lifetime. For the purpose of analyzing the area damaged by ion back-bombardment, the newly high spatial resolution QE map acquisition system was developed and implemented to the cathode preparation system. From the results of the QE-map measurements before and after the CW beam operation, it is confirmed that a area near the photocathode center dose not recover QE sufficiently after reactivation process. It is presumed that the area is damaged by the ion back-bombardment.

1. はじめに

低エミッタンスかつ大電流の CW 電子ビーム源とエネルギー回収型ライナック (ERL) の融合は、例えば真空紫外や X 線波長領域でこれまでに無い高輝度かつ高出力を実現できる光源となる CW-FEL[1, 2] を可能なものとし、また電子-ハドロン衝突型加速器でより高いルミノシティを実現するための方法の一つの候補 [3, 4] とされ注目されている。負の電子親和性 (NEA) 表面を形成した半導体フォトカソードは高い量子効率と低エミッタンスを両立できる優れた性質を持ち、上述の電子源が求める低エミッタンスかつ大電流のビーム生成条件を満足できる一方で、NEA 表面が真空環境に非常に敏感であるために容易に量子効率 (QE) が低下するという QE の寿命問題がこのカソードの利用を考えられた当初から言われ続けてきた。

特にこの寿命問題は、発生したビームと残留ガスとの衝突で発生するイオンも関与し、電子源より供給するビームの大電流化に伴ってより深刻化する。問題となるイオンは、電子銃内部で発生するものだけに限らず、電子銃の外で発生するイオンも問題となることが実験的に示されている [5]。実際に、電子ビーム近傍でビームと残留ガスとの衝突によって発生したイオンのうちエネルギーの低いイオンがビームのポテンシャルにトラップされる現象が電子銃下流の入射器近傍においても観測されており [6]、その一部のイオンが電子銃へ逆流してフォトカソードを衝撃するイメージは、特にフォトカソード中央付近の QE の低下が起きていること [5, 7] に対して矛盾のない説明を与える。つまり、フォトカソードが受けるイオン bombard の影響

を減らすには、電子銃の真空のみならず下流部の真空も運転状態で良い状態に保つことが重要であり、その影響の度合は電子銃とその近傍のシステム全体の運転方法も含めた状態に依存すると言える。

2013 年よりビーム調整が始まっている compact-ERL[8, 9, 10] では、建設当初から電子銃のすぐ下流に位置するレーザー導入およびバンチャー空洞のエリアの真空が電子銃のカソード QE に影響を与えることを予め想定し、電子銃並みの極高真空を維持できるように設計、構築され [11, 12]、実際に 2×10^{-9} Pa 程度の真空が CW 運転中も維持されている。このような状況の中で、電子源から供給する電子ビームの電流値を増やした場合、QE の低下はどのくらいの速さでフォトカソード上のどの部分がどのくらいの範囲で起きているのかを知ることは、今後の大電流 CW 運転で深刻化するフォトカソードの寿命問題に対処するための非常に重要なヒントとなる。今回、1mA 相当の CW ビーム運転を行い [13]、運転前後のフォトカソードに対して QE 分布の測定を行った。

2. QE 分布測定のセットアップ

QE 分布の測定は、昨年から行われている電子銃より引き出したビームを用いる方法に加え、今年から新たにカソード準備装置により詳細な測定が可能なシステム [14] を加え、それらを用いて行われた。この章では、今回の試験で使用したフォトカソードの状況、QE 分布測定系の簡単な概要を述べる。

2.1 GaAs フォトカソードのセットアップと履歴

今回の試験で使用した GaAs フォトカソードは、2014 年 12 月にカソード準備系へインストールされ、翌 2015

*masahiro@post.kek.jp

年1月にNEA表面を形成した後に電子銃へ装着、2015年1月～3月および5月～6月のcERLへのビーム供給[15]に利用したものを再利用している。2015年7月以降の加速電圧500kVをcERLにおいても確立させるため、電子銃セラミック管増設[16]を実施し、さらにカソード準備系へのQE分布測定装置の新設のため真空作業を実施した。その過程で、フォトカソードは1日程度の窒素環境に曝され、その後低真空環境で数日程度保管された後に、2016年1月にリフレッシュ操作(原子状水素洗浄、NEA表面の再形成)を実施している。NEA表面形成後にフォトカソード準備系でQE分布測定を行い、フォトカソードを電子銃へ移送する。

電子銃ではcERL運転の開始時と終了時の1日最低2回のQE分布測定を実施している。この間、数100 μ A～1mA相当のCWビームの供給を度々実施した。運転時は、レーザーの照射位置をカソード中心から数mmずらした状況で実施され、電子銃下流の2台のステアリング電磁石の微調整のみで元のエネルギー回収運転に支障のない軌道へ調整する方法で電子銃よりビームを供給し続けた。3月半ばにQEの低下に伴ってカソード準備系で待機させていた予備のフォトカソードと交換し、電子銃からカソード準備系へ戻された使用済みフォトカソードに対してそのままの状態でのQE分布測定、続けてCsの再蒸着を行ったときの測定、最後にリフレッシュ操作後に測定を行っている。

2.2 QE分布測定システムの概要

電子銃とカソード準備装置のQE分布測定系について述べる。カソード準備装置の測定系については亀田氏の報告[14]に詳しい内容が記載されているため、本稿では簡単な概要のみ記す。

フォトカソードが電子銃へ装着された状態でQE分布を測定する場合は、電子銃の電圧は運転電圧(今回の測定では390kV)として、約1 μ sec幅、ピーク電流100 μ A程度のバースト状の電子ビームを電子銃より約1m下流のファラデーカップで受ける。その電圧信号の波高(5mV程度)と照射するレーザーの強度からQEが求められ記録される。レーザー照射位置の変更は、フォトカソード面から光路長で1m程度離れた位置の大気側にある遠隔操作ミラーを操作することによって行われている。レーザーの照射サイズを決めるピンホールもほぼ同様の位置にあり、これらのピンホールと遠隔操作ミラーの光学系を経由した後にレーザーは真空中へ導入され、ビーム軸に程近い最終ミラーで反射して約2degの角度でフォトカソード表面へ照射する光学系となっている。最終ミラーはビームロスの問題にならないようそのサイズが制限されているために、フォトカソード面上でレーザー径を非常に小さく絞る光学系の構築は困難である。そのため電子銃でのQE分布測定時はレーザー径を ϕ 1mmとし、1mmステップで8mm \times 8mmの領域を測定する。1点の測定には数～10sec程度の測定時間内の平均値を利用するため、QE分布1回の測定は約10分程度で完了する。

カソード準備装置の測定系では、電子銃の光学系のような制限がないため測定系はコンパクトでカソード

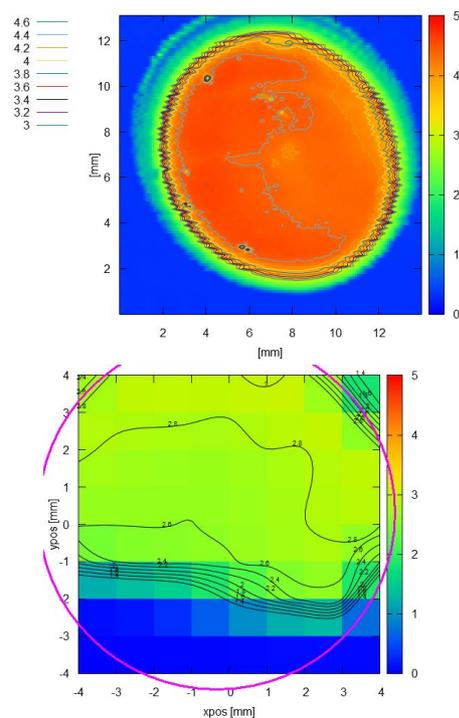


Figure 1: QE-maps measured at the cathode preparation system (top) and the gun (bottom) before using a beam operation.

上でレーザー径を ϕ 0.1mm程度まで容易に絞ることが出来る。さらに、レーザーの掃引と光電流値の取込みを高速に行う工夫により空間分解能0.1mm相当の条件で、電子銃でのQE分布測定の数点データの100倍以上となる10000点以上の測定点をもつQE分布を10分相当で取得することが出来る。

3. 実験結果

前章で述べたセットアップで実施された、カソード準備装置および電子銃において観測したQE分布の結果について以下にまとめる。

3.1 運転前

運転前のQE分布測定結果をFig.1に示す。上図はカソード準備系で測定された結果であり、下図はそのフォトカソードを電子銃へ移送後に測定した結果である。カラーマップと同時に具体的なQEの数値が読み取れるように等高線も同時に表記しているが、特に電子銃のQE分布については、データ点が少なくないためcubic spline曲線で補間した表記とした。

今回のフォトカソードの移送では、トランスファーロッドからのアウトガスの影響によって移送前に約4.5%あったQEが電子銃へ移送後に約2.8%程度まで全体的に低下している。また、電子銃では、レーザー導入系の最終ミラーを交換した作業後にミラーの位置関係が変わったために一部が照射可能範囲から外れ、下図のy座標でおおよそ-2mmより小さい範囲は物理的にレーザーが照射できずQE分布が取得できない状態

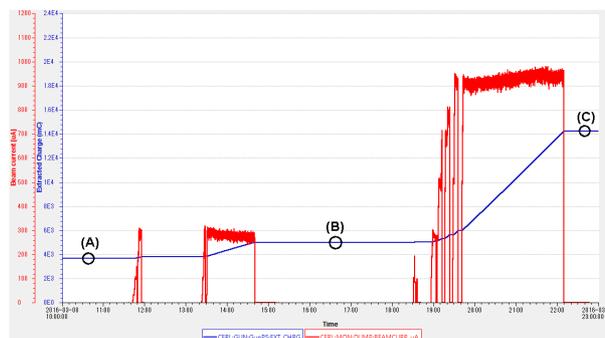
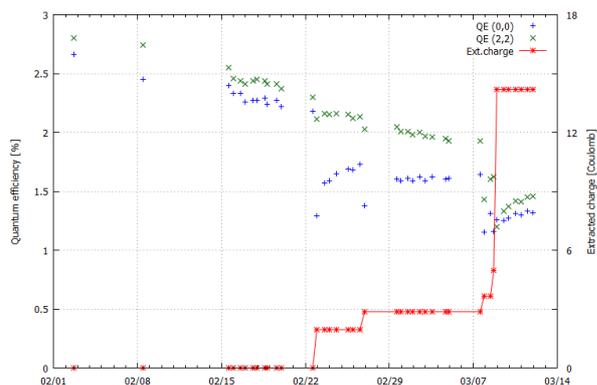


Figure 2: History of the photocathode QE and integrated extraction charge during operation by using this photocathode (left), and one day operation record at March 8 (right).

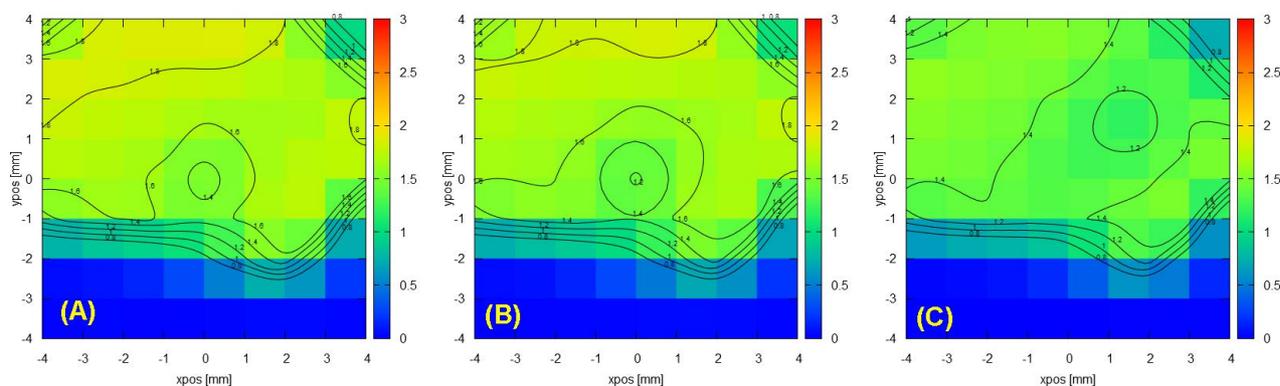


Figure 3: A typical transition of the QE distribution during one day CW beam operation. Symbols of (A), (B) and (C) correspond with the symbol in Fig.2, respectively.

となっている。下図の紫色の円はカソード電極の穴径 $\phi 10$ mm に相当する円であり、これより外側もフォトカソード表面ではないためここを境界に QE が大きく変化している。この円と QEmap 上の座標からわかるように下図の原点 (0,0) はカソード電極の穴の中心とはやや異なっている。上下両方の図からわかるように $\phi 1$ mm 程度のビーム発生範囲においては QE 分布は上記の境界付近を除いてほぼ一様であることが分かる。

3.2 運転時

このカソードの利用した期間 (2016 年 2 月 1 日～3 月 11 日) の座標 (0,0) および (2,2) 位置の QE 変化およびビームとして放出した積算電荷量の履歴を Fig.2 の左図に示す。積算電荷量が立ち上がっている時点が CW ビーム調整を行ったタイミングになっており、このタイミングで QE の大きな低下が確認されている。これからわかるように 3/8 は特に大電流の CW 運転を実施しており、Fig.2 の右図に 3/8 のビーム電流値 (赤線) および積算電荷量 (青線) の記録を示した。右図中の (A) から (C) で示した時点で QE 分布測定を実施し、その結果を Fig.3 に示す。

(A) の分布で座標 (0,0) 地点の QE が低下している理由は、前日のビーム調整でこの地点より CW ビームを

引き出したためであり、その後同じ条件 (Laser 径 $\phi 1$ mm、照射位置座標 (0,0)) より $300 \mu\text{A}$ 程度の CW ビームを 1 時間程度引き出した後に測定された分布が (B) のようになった。その後、条件を変えて (Laser 径 $\phi 1.5$ mm、照射位置座標 (1.5,1.5)) 徐々に電流値を増やし、 $900 \mu\text{A}$ 以上の CW ビーム運転を 2.5 時間程度実施した。そして、その日の最後に測定された分布が (C) である。この結果から明らかに CW 運転時はビーム放出点の QE の低下は周囲と比べ大きいことがわかる。

なお、CW ビーム供給時は QE 分布測定ができないが、ビームがほとんどロス無くビームダンプまで運ばれるため、ビーム放出点の QE はカソードに照射するレーザー強度とビームダンプの電流値からビーム発生点に限りリアルタイム測定が可能である。CW 運転時の QE の変化に関する結果の一例は本学会の報告 [13, 16] に記載されている。

3.3 運転後

CW ビーム運転後、フォトカソードを電子銃からカソード準備系へ移送して QE 分布を測定した結果を Fig.4 に示す。左図は移送直後に測定した結果であり、電子銃へカソードを導入した場合と同様に移送中に発生するガスの影響で全体的に QE が低下している。し

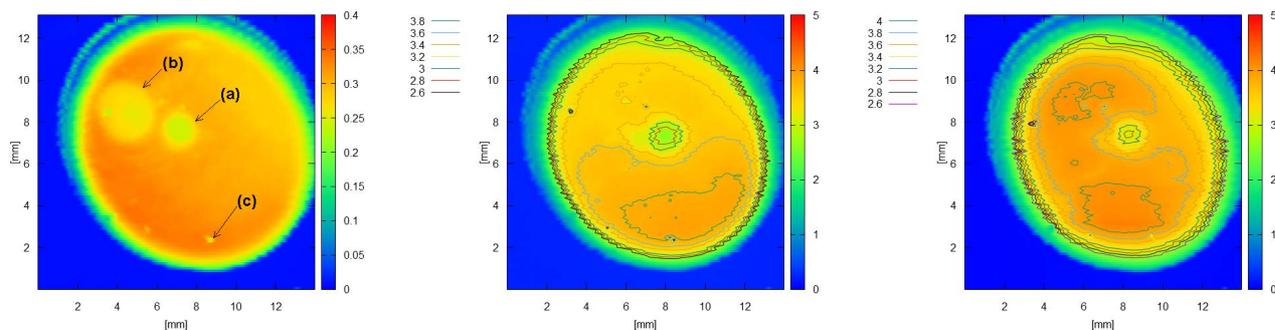


Figure 4: QE-maps after cw operation measured at the preparation system: (left) directly after the transportation from the gun to the preparation system. (center) after additional cesium deposition. (right) after refresh and reproduce NEA surface.

かし、この左図のQE分布から図中の(a)~(c)の特徴的な情報が得られる。(a)は電子銃のQE分布座標の(0,0)で照射レーザー径 $\phi 1.0$ mmの条件、(b)は同様に座標(1.5,1.5)でレーザー径 $\phi 1.5$ mmの条件でCW運転を行った時の痕跡であることが分かる。(c)はNEA表面形成時からある表面の欠陥などに由来するスポット状でQEが低い場所となっている。装置間のフォトカソードの移送操作の度にQE分布の固定座標に対してフォトカソード本体は回転方向に自由度があるのだが、スポット上でQEが低い点を目印にフォトカソード移送操作を繰り返し行った場合でもそれぞれのQEMapを相対的に比較することができる。中央の図は、左図の測定後に追加的にCsを付加させた後に測定したQE分布であり、左図で周囲よりもQEが低かったビーム放出領域である(a),(b)は周囲と同等のQEまで回復する一方で、(a),(b)とは異なるフォトカソードのほぼ中央の場所でQEがあまり回復しない $\phi 2$ mm程度の領域があることがわかる。さらにこの $\phi 2$ mmの領域からビーム放出点であった(a),(b)を結ぶ方向に向けてもQEが低くなっている領域が伸びていることが確認できる。右の図は中央図の状態からさらにフォトカソードをリフレッシュ(加熱+原子状水素洗浄、NEA表面の再形成)し直した後に測定したQE分布である。こちらも中央図と同じ領域でQEが低くなっていることがわかる。

4. 考察

4.1 運転前のQE分布について

カソード準備装置でNEA表面形成後に測定された分布は、Fig.1の上図に示されており、フォトカソード上の広範囲で約4.5%のQEが得られているが、その前に行われた2015年1月時のNEA表面形成時では10%程度のQEが得られている。今回のQEが低い理由はやはり途中で窒素とはいえ大気開放を行った作業の影響が大きいと考えられる。

この高解像度のQE分布の測定により、フォトカソード上にスポット状にいくつかQEが低い部分があることを確認することが可能となった。何が原因でこのようなスポット状にQEが低い状態となっているか今のところ不明であるが、仮にこれが電子ビームを放出す

る位置に存在した場合は、ビームの分布に強く影響するため問題であり、そのような問題を回避する上でも高解像度のQE分布測定は有用であると考えられる。

4.2 ビーム放出位置およびカソード中央付近のQEの低下について

ビーム放出位置で起きたQEの低下は、その後のCs再付加もしくはカソードリフレッシュ操作を行うことでほぼ元のQEまで回復させることができている。一方で、カソード中央付近で起きたQEの低下については様子が異なり、Csの再供給の場合およびリフレッシュ操作を行った場合の両者でも元のQEまで回復することが出来ていない。QEの低下には少なくとも2種類の異なる現象で起きていると考えられる。

以下は推測であるが、前者はNEA表面を作り上げている結晶基板表面の電気2重層の構造の変化であってCsの追加的な付加およびリフレッシュ操作によって再生可能であると想像する。今回の場合、フォトカソードはbulkのp-type GaAs(バンドギャップ約1.45 eV)を使用しているが、励起レーザーの波長は532 nm (2.33 eV)を使用しているため、GaAs結晶内部で励起した電子の大部分は結晶内部で余剰のエネルギー(励起光のエネルギーの約4割)を主にフォノン散乱等によって損失した後にビームとして引き出される。ビーム放出点で起きているQEの低下は、この損失分のエネルギーによって脆弱なNEA表面は何かの影響を受けている可能性がある。

一方、後者は基板表面そのものの変質によってその表面に電気2重層の再形成が困難な状況になっていると推測する。電子銃を出た下流部で発生・ビームポテンシャルにトラップされたイオンの一部が電子銃へ逆流する場合、そのイオンは電子銃のフォトカソードに対して最低でも電子銃の加速電圧を得て衝撃する。エネルギーの高いイオンがフォトカソード表面に打ち込まれるためにNEA表面を作るための下地の結晶基板表面そのものがリフレッシュ操作では戻らない不可逆な変化を起こしていると考え、回復が不完全になる現象は理解することはできる。さらに、後者のイオンボンバードの理由を後押しする一つの証拠として、QEが低くなる領域がビーム放出点に対して延び

ている測定結果が挙げられる。これは、電子銃内部で電子ビームと残留ガスの衝突によって発生したイオンはフォトカソードの電場中心とビーム放出点の間に到達する軌道となり、その領域がイオンボンバードの影響を受けていると解釈できる。

定常的なビーム供給を行う場合、フォトカソードのリフレッシュ操作で複数回同じカソードを使い続けられるかどうかは重要な問題の一つであるが、今回のQE分布測定の分析結果から、イオンボンバードの影響と推測されるカソード中央部のおよそ $\phi 2$ mmの範囲と重ならない領域であれば再利用が可能であることが分かった。

この他に、今回の1 mA相当のCW運転を行って新たに現れた不思議な現象がある。CW運転中のビーム放出範囲のQEはある一定の速さで低下すると予想されたが、CW運転開始直後に大きく低下し、CW運転開始数十分後になるとQEの低下がほぼ止まる傾向がほぼすべてのCW運転で見られた[13, 16]。そしてCW運転終了後にQEはゆっくりと回復する傾向も確認されている。おそらくはNEA表面の変質によって起きていると想像するが、そのメカニズムは未だ理解には至っていない。

5. まとめ

今回、1 mA相当のCWビーム運転前後のQE分布測定を行った。新たにカソード準備装置に高分解能のQE分布測定装置を設置し、電子銃およびカソード準備装置の両方でのQE分布測定を通して次のような新たな事実、現象が確認できた。

- リフレッシュ後のフォトカソードのQE分布はおよそ一様であるが、表面の一部に結晶表面の欠陥などに起因すると思われる点状(0.数mm程度のサイズ)でQEが低い部分が存在していること。
- CW運転直後のQE分布測定から、ビーム放出領域のQEの低下がその周囲の低下よりも大きいこと。
- CW運転時のビーム放出点とは異なるカソード中央付近に $\phi 2$ mm程度の範囲で、Cs再蒸着およびカソードリフレッシュ後もQEが元の状態に戻らない領域が確認され、その性質からイオンボンバードの影響の可能性が高いと考えられること。

今回のQE分布測定とその分析によって、イオンボンバードと推測される範囲と位置が明確となった。ほぼカソード中央に位置するこの領域を避けた数mm程度のoff-center位置からビーム生成を行うことで、フォトカソードは複数回再生させて使い続けることができると考えられ、今後の大電流CW運転の運用上において重要な情報が得られたと考えている。

謝辞

カソード準備系装置の改造作業では、加速器第7研究系 内山隆司 技師、三菱電機システムサービス 飯島寛昭氏にご協力いただきました。cERL電子銃の運転

および運転期間中のQE分布測定では、東日技研 路川徹也氏、NAT 沼田直人氏、NAT 浅川智幸氏にご協力いただきました。また、ERL推進室 河田洋 教授、加速器第7研究系 小林幸則 教授をはじめとするcERL関係者の皆様より多くのサポート、ご配慮を頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。本研究の一部は東芝-KEK共同研究「ERLをベースとした大強度EUV光源の研究開発」によって行われました。

参考文献

- [1] R. Hajima, N. Nishimori and E. Minehara, "A Multi-kW EUV Light Source Driven by Energy-Recovery Linac", Proc of EUV source workshop, (2006).
- [2] 宮島司 他, "ERLを利用したEUV-FEL光源の設計", FROM10, 第12回加速器学会年会プロシーディングス (2015).
- [3] J. L. Abelleira Fernandez *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **39**, 075001 (2012).
- [4] eRHIC Accelerator Design, Zeroth-Order Design Report (2009), Chapter 2: Electron Beam; https://www.bnl.gov/cad/eRHIC/eRHIC_ZDR/Chapter2.pdf
- [5] J. Grames, R. Suleiman, P. A. Adderley, J. Clark, J. Hanskecht, D. Machie, M. Poelker, and M. L. Stutzman, Phys. Rev. ST Accel. Beams **14**, 043501 (2011).
- [6] S. Full, A. Bartnik, I. V. Bazarov, J. Dobbins, B. Dumham, and G. H. Hoffstaetter, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 034201 (2016).
- [7] T. Siggins, C. Sinclair, C. Bohn, D. Bullard, D. Douglas, A. Grippo, J. Gubeli, G. A. Krafft, B. Yunn, Nucl. Instr. and Meth. A **475** (2001) 549.
- [8] 宮島司 他, "compact ERL入射器のコミッションング運転", MOOT13, 第10回日本加速器学会プロシーディングス (2013).
- [9] 島田美帆 他, "コンパクトERLのコミッションング", SAOLP1, 第11回日本加速器学会プロシーディングス (2014).
- [10] 高井良太 他, "コンパクトERLのコミッションング状況とビーム利用に向けた取り組み", FROM03, 第12回日本加速器学会プロシーディングス (2015).
- [11] 内山隆司, KEK平成24年度技術交流会 "cERL入射部の真空について"; <http://www2.kek.jp/engineer/oho/news/kouryuu/2012/doc/doc01.pdf>
- [12] T. Takahashi *et al.*, "Development of a 1.3-GHz Buncher Cavity for the Compact ERL", THPR1045, IPAC2014 proceedings.
- [13] 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", WEOM15, in these proceedings.
- [14] 亀田吉郎 他, "光陰極の2次元高解像度QE分布測定装置の開発", TUP096, in these proceedings.
- [15] 西森信行 他, "コンパクトERL電子銃の現状とアップグレード計画", WEP037, 第12回日本加速器学会年会プロシーディングス (2015).
- [16] 西森信行 他, "コンパクトERL電子銃の高性能化", MOP048, in these proceedings.