

## 光陰極直流電子銃から 500keV-mA 電子ビームの生成

### GENERATION OF A 500-KEV ELECTRON BEAM WITH MILLIAMPERE CURRENT FROM A PHOTOEMISSION DC GUN

西森信行<sup>#,A)</sup>, 永井良治<sup>A)</sup>, 松葉俊哉<sup>A)</sup>, 羽島良一<sup>A)</sup>, 山本将博<sup>B)</sup>, 宮島司<sup>B)</sup>, 本田洋介<sup>B)</sup>, 内山隆司<sup>B)</sup>, 飯島北斗<sup>C)</sup>, 栗木雅夫<sup>C)</sup>, 桑原真人<sup>D)</sup>

Nobuyuki Nishimori<sup>#,A)</sup>, Ryoji Nagai<sup>A)</sup>, Shunya Matsuba<sup>A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>A)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>B)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>B)</sup>, Yosuke Honda<sup>B)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>B)</sup>, Hokuto Iijima<sup>C)</sup>, Masao Kuriki<sup>C)</sup>, Makoto Kuwahara<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup>KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup>Hiroshima University, Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8530

<sup>D)</sup>Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8603 Hanako Marui<sup>#,A)</sup>, Taro Masugu<sup>A)</sup>, Ryushi Kasoku<sup>B)</sup>

#### Abstract

A high-brightness, high-current electron gun for energy recovery linac light sources and high repetition rate X-ray FEL requires an exit beam energy of  $\geq 500$  keV to reduce space-charge induced emittance growth in the drift space from the gun exit to the following accelerator entrance. We have developed a DC photoemission gun employing a segmented insulator to mitigate the field emission problem, which is a major obstacle for operation of DC guns at  $\geq 500$  kV. The first demonstration of generating a 500-keV electron beam with currents up to 1.8 mA is presented.

#### 1. はじめに

エネルギー回収リニアック(ERL)を用いた次世代光源として、リング型次世代X線光源、共振器型X線自由電子レーザー(XFEL)[1]、コンプトン散乱を利用した大強度単色X/ガンマ線源[2]、多重ビームラインを持つXFEL[3]が検討されている。これら次世代放射光源の主要開発要素の一つが、0.1-1mm-mradの低エミッタンス、かつ1-100mAの電流を生成できる高輝度・大電流電子銃である。我々は、米国ジェファソン研究所(JLab)で9.1mA、エミッタンス8mm-mradのビーム生成の実績[4]を持つDC光陰極電

子銃を開発しており、更なる高輝度化、大電流化を目指している。

DC電子銃の最大の技術的課題は、電子ビームの高エネルギー化である。500keV以上のビームを生成することができれば、電子銃出口から加速器に至るドリフト空間での電子ビームの空間電荷力によるエミッタンス劣化を避けることができ、目標とする低エミッタンス化が可能となる[5]。ビーム生成に用いる陰極を支えるサポートロッドからの電界放出電子が、セラミック管にダメージを与える問題により、運転電圧が350kV以下に留まっていたが、我々は多重分割型セラミック管をガードリングと共に用いる

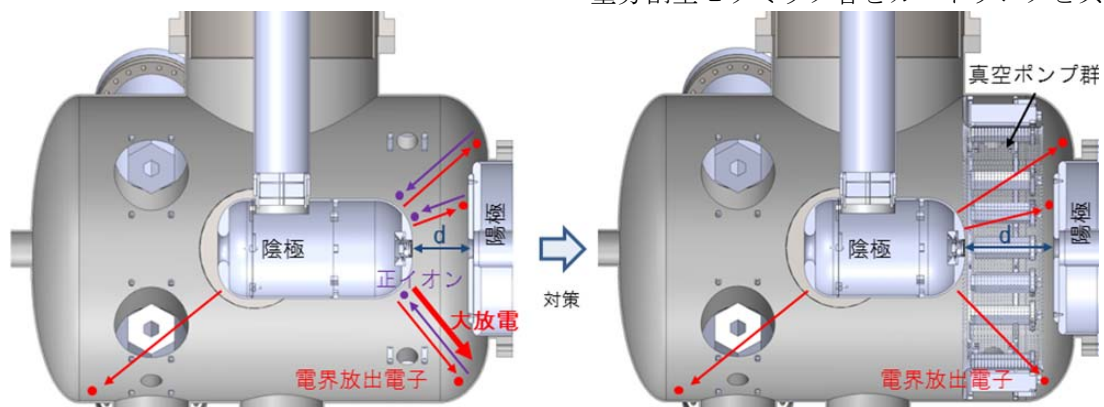


図1：電子銃陰極からの電界放出電子が大放電へと成長する仮説、及びその対策。陰極からの電界放出電子により容器表面の吸着ガスが脱離、イオン化して陰極を衝撃して2次電子を放出する。この放電の連鎖により大放電が生じると考えた(左)。対策として、陰極と陽極間の加速ギャップ周囲に非常発型ゲッターポンプを配置するとともに、加速ギャップを広げて陽極表面の電界を下げる工夫を行った。

<sup>#</sup> nishimori.nobuyuki@jaea.go.jp

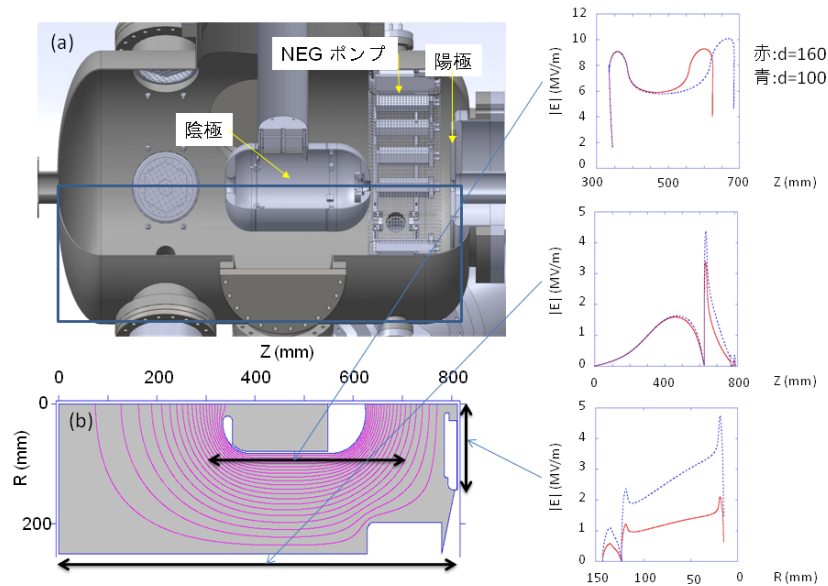


図2：電子銃真空容器断面図(a)と、Poissonで計算した容器内の静電場分布(b)。陰極電場(c)、電子銃容器表面電場(d)、陽極電場(e)をギャップ長 $d=160\text{mm}$ の場合を赤実線、 $d=100\text{mm}$ の場合を青点線で表示。

ことでこの問題を解決した[6]。次に問題となったのが、陰極と電子銃真空容器を含む陽極間での放電である。放電により、容器表面で帯電した微細粉塵が陰極に引き付けられて付着すると、電界放出暗電流を発生させる問題である。

この問題を解決するため、陰極・陽極間距離を $100\text{mm}$ から $160\text{mm}$ に変更し、特に陽極の電界を下げる改造を行った。これにより電界放出暗電流の発生を抑制し、目標としていたビーム生成条件下での $550\text{kV}$ 高電圧印加に成功した。さらに電子銃下流のビームラインを用いて、世界に先駆けて $500\text{keV}$ 電子ビームを最大 $1.8\text{mA}$ まで生成することに成功した[7]。平成24年10月には、KEKで建設中の次世代放射光源のプロトタイプであるコンパクトERL (cERL) へ、本電子銃の移設を行い、据え付け調整を行った。平成25年4月から6月にかけて実施されたcERL入射器ビームコミッションでは $390\text{keV}$ 電子ビームを安定に供給した。レーザー直径 $1.1\text{mm}$ で、規格化熱エミッタンス $0.07\text{mm}\cdot\text{mrad}$ を得ている[8,9]。本報告では、JAEAで行った $500\text{keV}$ ビーム生成試験、cERLでの電子銃運転状況について紹介する。

## 2. 陰極・陽極間距離の変更

陰極と非常発型ゲッターポンプを電子銃真空容器にインストールしたビーム生成条件下での高電圧印加試験で、 $526\text{kV}$ に到達したことをH24年の学会で報告した[10]。しかし、電子銃容器内の微細粉塵に起因して発生する暗電流問題が未解決のままであった[10]。そこで、陰極・陽極間距離を $100\text{mm}$ から $160\text{mm}$ にする改造を行い、高電圧印加に成功した。

電子銃から高品質ビームを生成するために重要なのは、加速エネルギーを $500\text{keV}$ 以上にして加速後の

空間電荷力によるエミッタンス劣化を防ぐとともに、加速中の空間電荷力によるエミッタンス劣化を防ぐことである。そのためには、空間電荷力の影響の強い低エネルギー部で、素早く加速する必要がある。すなわち電子ビームを生成する光陰極面上で高電界であることが重要である。陰極面上の加速電場は、陰極・陽極ギャップ距離 $d$ と陰極の曲率半径 $r$ で決定されるが、幾何学的な効果により主に効くのは $r$ である。ギャップ長 $d$ を増やしても、陰極面上の電場はあまり変化せずに平均加速電場が $d$ に比例して減るので、陽極面上の電場が大きく減ることになる。ここでは、この陽極面の電場減少を用いて、暗電流問題の解決を試みた。

電圧印加中に突然発生する暗電流問題を解決するには、真空容器中の微細粉塵の帯電メカニズムを理解する必要がある。微細粉塵を直接帯電させるには電界放出電流だけでは小さすぎるので、我々は次のような仮説を立てた。図1左に示すように、陰極からの電界放出電子が電子銃容器に衝突するとガスを発生する。ガスがイオン化して陰極を衝撃すると、2次電子を発生させ、放電の連鎖に至る。この結果、小さな電界放出電流が微細粉塵を正に帯電させることのできる大きな放電に成長するという仮説である。この仮説を基に、ガス発生抑制とそのイオン化を防ぐ工夫を行った。ガス発生抑制には、図1右に示すように加速電極の周囲を非蒸発型ゲッターポンプで覆う独自のポンプ配置を採用していたので、それを利用した。ガスのイオン化は、電子銃容器表面でのマイクロプラズマの発生などによると考えられるので、容器表面の電界を半分にするため、電極ギャップ長 $d$ を $100\text{mm}$ から $160\text{mm}$ に伸ばした。陰極の曲率半径は $67\text{mm}$ で変更しなかったが、光陰極表

面の電界減少は1割程度であり、ビームエミッタ

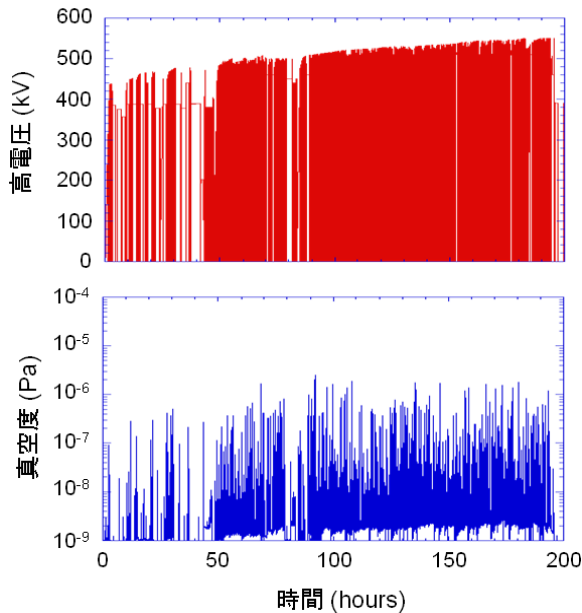


図3：高電圧コンディショニングの様子。電子銃電圧（上）と真空度（下）を時間の関数としてプロット。

スの劣化を最小限にすることができた。

電極ギャップ長dの延長に伴う陰極面上の電場変化について、静電場計算を行った結果を図2に示す。100mmから160mmと、大きくギャップ長を伸ばしたにも関わらず、陰極面上での電場変化は最大10%程度であることがわかる。陽極電場変化について、Z>700mmでは、半分程度に減っている。

### 3. 高電圧印可試験

陰極・陽極間距離 160mm での高電圧コンディショニングの結果を図3に示す。延べ200時間ほどのコンディショニングを経て550kV達成に成功し、暗電流の発生も確認されなかった。550kVでは10分間連続無放電保持に成功した。陽極電場を半分に減らした効果が実証され、ビーム生成条件下での高電圧印加技術を確立したと考えている。

サポート電極のみの実験結果や、昨年度までのビーム生成条件下での高電圧コンディショニングの経験からは、550kVで10分保持することができれば、510kVでは8時間以上の無放電保持が出来るはずである。しかし、今回の実験では510kVでは40分保持が最長であった。この原因が、セラミック管にあることを突き止め、cERLへの移設後の電圧印可は分割セラミック管の最上段と最下段をショートして行っている。最大印可電圧は400kV程度以下に留める必要があるが、8時間以上の長時間保持運転は問題なく達成されている。

### 4. 500keV電子ビーム生成試験

高電圧コンディショニングに成功したので、ビームラインを電子銃下流に接続してビーム引き出し試験を行った。JAEAにおける電子銃ビーム生成試験用ビームラインの詳しい構成については、文献[10]に既に述べられている。

レーザー導入真空容器は、400-800nm波長でARコートをした合成石英ビューポート（浜松ホトニクス製）と銀コーティングモリブデンミラー（Rocky Mountain Instrument, Co製）を備えている。ミラー中心からGaAs光陰極までの距離は約630mm、

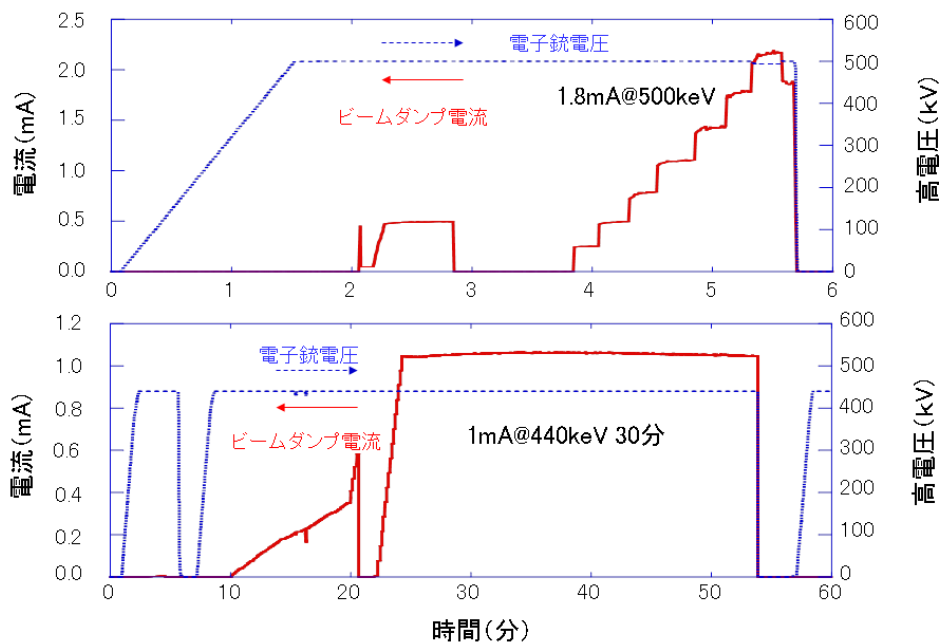


図4：500keVビーム生成試験結果（上）を時間（分）の関数としてプロット。赤線がビームダンプ電流、青線が高電圧を示す。下図は440keVビーム生成試験結果で、1mAで30分間のビーム生成を行った。

ビーム軸に対するレーザーの入射角は約2.3度である。GaAs光陰極を電極にインストールした状態で測定した、入射窓直前と出射窓直後のレーザーパワーの比は20%程度であった。GaAs光陰極の $\lambda=532\text{nm}$ のレーザーに対する反射率の実測値は32%程度であったことから、レーザー導入容器のミラーやビューポートでレーザーロスが生じていると考えられる。

波長532nmのレーザーで10mA引き出すには、2.3[W%]のレーザーと光陰極を組み合わせる必要がある、ワットクラスの高出力レーザーが必要となる。そこで、最大出力2.4Wの半導体レーザー ( $\lambda=532\text{nm}$ ) Millennia Pro (Spectra Physics社製)を用いた。レーザービームライン上に設置した偏向板を回転させ、レーザー出力をリモート切り替えできる。レーザーは光陰極中心に照射し、集光ミラーを用いてサイズを $\sigma=0.1\text{mm}$ にした。

高電圧電源とセラミック管の間の出力抵抗は高電圧コンディショニング時は100M $\Omega$ であるが、大電流ビーム生成試験時は66.6k $\Omega$ に変更する。出力抵抗での電圧ドロップの影響を防ぐためである。

図4上図に500keVビーム生成試験の結果を示す。横軸は時間(分)で電子銃高電圧(青)、ビームダンプで測定したビーム電流(赤)を示す。レーザーパワーは偏光板の回転によりコントロールしているため、階段状にビーム電流が増えていることがわかる。500kVでは最大1.8mAのビームの生成に成功した。

この試験では10mAのビーム生成を目指して比較的短時間に電流を増やした。ところが、2.2mA以上では電圧がドロップすることが判明した。3回試験を繰り返したが同じ結果が得られ、高電圧電源の容量不足であると結論付けた。図4上図の電流が2mAを越える部分では、電圧が500kVから494kVにドロップしている。電圧降下に伴いビームエネルギーが変化すると偏向電磁石での偏向角が変わるため、ビームダクトに衝突したビームが多量の放射線を生じさせ、真空の劣化や放電を引き起こす。3回目の試験後に、放電の影響からか500kVの電圧印可ができなくなった。そのため、長時間ビーム生成試験の実施を断念した。

放射線は電子銃近くに設置したNaI放射線検出器で計測した。電子銃側で放電を起こした時にも計測できるようにするためであったが、ビーム生成時の放射線量が予想以上に多かった。ビームの外側に薄く広がるビームハローの影響かとも思われたが、偏向電磁石下流のビームダクトの遮蔽強化が放射線低減に最も効果があったため、ビームラインの放射線遮蔽不足によると結論付けている。ビームダクトは遮蔽ができないため、ビームダンプからの2次電子や反跳電子がビームラインに戻り、ビームダクトに衝突して放射線を生じすると考えている。

図4の下図に示すように、エネルギー440keV、ビーム電流1mA程度で長時間の運転試験を行い、光陰極寿命の測定を行った。レーザーパワーを徐々に増やしながらか電流を上げてゆき、1mAを越えたところ

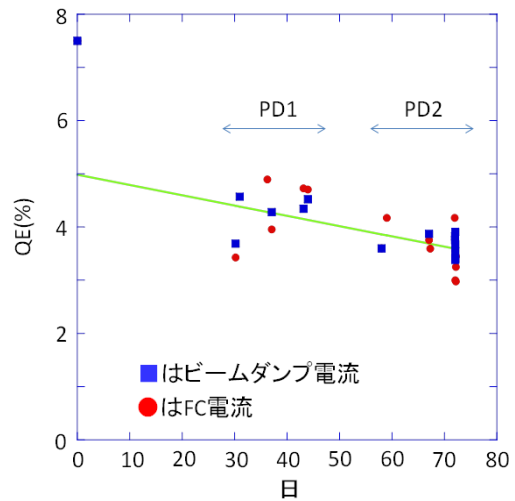


図5: GaAs光陰極の量子効率の変化。cERLの入射器コミッショニング中の測定値であり、1/e寿命200日 が得られている。

ろでレーザーパワーを固定した。始めの10分程度は徐々に電流が増加したが、やがて下がり始めた。電流を出し始めてから30分程度で光陰極の電荷寿命測定に十分なデータを取得できたため、ビーム生成試験を終えた。電流の減衰カーブから、光陰極の1/e電荷寿命46Cが得られた。

レーザーを電極中心から外して電子ビームを生成する、オフセンター運転により電荷寿命を延ばすことができることが知られている。レーザーサイズ $\sigma=0.1\text{mm}$ という今回の実験条件に近い米国ジェファーソン研究所のデータでは、5mmオフセンター運転で最大600Cが得られるものの、オンセンター運転では100C以下となり我々の46Cと大差ない。今後、寿命を長くするには、オフセンター運転とビームダンプでの真空劣化の抑制が重要である。

長寿命化には光陰極を変更するオプションもある。米国コーネル大では $\text{K}_2\text{CsSb}$ 光陰極を用いて、65mAのビームをほぼ連続8時間運転することに成功している[11]。運転前後でQEの劣化はほとんど見られておらず、波長530nmのレーザーを使う限りにおいては、エミッタンスもGaAs光陰極と大きな違いはない。

## 5. cERLへの移設と運転

JAEAでの500keVビーム生成試験を終え、2012年10月にはKEKで建設中のcERLへの移設を開始した。12月までにセラミック管単体の電圧印可試験を行ったところ、420kVで放電が発生し、電圧の安定な印可が困難であることが判明した。原因を調査したところ、分割セラミック管の最上段、最下段のセラミック内面の汚れにより放電が発生していることが明らかとなった。応急処置として最上段、最下段のセラミック管をショートし、10段の分割セラミック管を8段として当面使用する。

2013年4月22日から6月28日までの2ヵ月に及ぶcERL入射器のコミッショニングにおいては、

ビームエネルギー390keV で運転を行っている。延べ電圧印可時間は200時間を超えたが、電子銃に起因する放電現象は皆無であり、安定なビーム運転に貢献した。長時間(7時間)電圧変動は0.063%(rms)と測定されており、電子銃からのビームエネルギーは極めて安定である。真空についても、エクストラクターゲージで $1.2 \times 10^{-9}$ Pa が得られており、目標とする極高真空を実現している。

また、390kV は光陰極 DC 電子銃の運転電圧として世界最高である。2014年の3月以降にセラミック管表面の汚れ問題の解決に着手する予定であり、cERLでの500keVビーム生成については、その後に挑戦する。500kVビームの実現により低エミッタンス化はもちろんのこと、入射器コンポーネントに要求されるアライメント条件が緩和される効果が期待される[12]。

高電圧と並ぶ、光陰極電子銃の最重要課題が高量子効率、長寿命の光陰極開発である。cERLの当面のコミッショニングにおいてはGaAs光陰極を用いることにしている。これまでの開発経験が豊富なためである。図6に、cERLの運転時に測定したGaAs光陰極の量子効率の日変化を表す。光陰極活性化時を0日としてプロットしてある。活性化直後のQEは7.5%@532nmであった。運転電流は最大0.3 $\mu$ Aであり、データは静的寿命を表す。ビーム電流はcERL入射器のビームダンプ、ファラディカップで測定し、レーザーパワーはピークパワーの高低に応じて2種類の計測器で測定している。パワーが低い場合にPD1、高い場合にPD2を用いた[13]。データを最小2乗法を用いてフィットすると、1/e寿命5000時間(約7ヶ月)が得られた。本装置のこれまでの実績として寿命2000時間が最長であったが[14]、それを上回っている。

このように、QEの劣化がほとんどなかったため、cERLの入射器コミッショニングにおいては、光陰極の再活性化を一度も行わずにビーム運転を2ヶ月間継続した。ミリアンペア以下の運転には、充分耐え得る性能を示している。一方で、10ミリアンペア以上の運転には、寿命性能の面でGaAs光陰極は最適でないと考えられており、アルカリ光陰極の開発が世界的に進められている[11]。我々も、広島大で開発中の光陰極をcERLでテストを実施できるよう、準備を進めている[15]。

ソレノイドスキャンにより熱エミッタンスと同程度のエミッタンスが得られていることが確認され[9]、電子ビームのパンチ幅もレーザーパルス幅と同程度が得られている。ビームダイナミクスの出発点となるビーム性能としては十分な電子源性能を現時点で示していると考えている。

## 6. まとめ・今後の予定

次世代放射光源のための500kV-10mA光陰極電子銃の開発を行った。高電圧に関して、ビーム生成可能な状態で550kVまでの印加に成功した。陰極・陽極間距離を160mmとすることで、陽極や電子銃容器

表面の電界を下げ、マイクロ放電を抑制することに成功したためと考えている。下流ビームラインと接続し、500keV電子ビームを最大1.8mA生成することに成功した。440keV電子ビームを1mAで30分間連続的に生成し、1/e寿命46Cを得ている。既に180keV電子ビームを10mA生成することに成功しているため、ビームエネルギー、電流の目標値をそれぞれ独立に達成した。

cERL@KEKへの移設も無事終了し、cERL入射器コミッショニングのために390keV電子ビームを安定に供給することに成功した。高電圧のトラブルはなく、光陰極の量子効率の劣化も少なかった。ビームダイナミクスの出発点となる電子源の性能として、今のところ十分な性能を発揮している。光陰極の長寿命化が今後の最大の開発要素であり、アルカリ光陰極開発に取り組む。また、500keVビームをcERLで供給するため、セラミック管内面の汚れ除去にも取り組む。

## 謝辞

本研究の一部は、科研費基盤(C)23540353、文部科学省受託研究：量子ビーム基盤技術開発プログラム、KEK大学連携支援事業の成果である。

## 参考文献

- [1] 坂中章悟 他, 「コンパクトERL入射部の建設と周囲部の建設状況」, 本プロシーディングス, (2013).
- [2] 羽島良一 他, 「コンパクトERLにおけるレーザーコンプトン $\gamma$ 線の発生と核種非破壊測定実証試験の計画」, 第8回加速器学会プロシーディングス, 953 (2011).
- [3] J. N. Corlett et al., "Design studies for a VUV-soft X-ray FEL facility at LBNL", Proc. of IPAC'10, 2639 (2010).
- [4] C. Hernandez-Garcia et al., "A high average current DC GaAs photocathode gun for ERLs and FELs", Proc. of PAC05, 3117 (2005).
- [5] I. V. Bazarov and C. K. Sinclair, PRSTAB 8, 034202 (2005).
- [6] R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010).
- [7] N. Nishimori et al., Appl. Phys. Lett. 102, 234103 (2013).
- [8] 宮島司 「compact ERL 入射器のコミッショニング運転」, 本プロシーディングス (2013).
- [9] 本田洋介 他, 「ERL試験加速器入射部における横方向ビーム性能評価」, 本プロシーディングス (2013).
- [10] 西森信行 他, 「JAEAにおける500-kV光陰極DC電子銃の開発」, 第9回加速器学会プロシーディングス, (2012).
- [11] B. Dunham et al., Appl. Phys. Lett. 102, 034105 (2013).
- [12] C. Gulliford et al., PRSTAB 16, 073401 (2013).
- [13] 本田洋介 他, 「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」, 本プロシーディングス (2013).
- [14] 西森信行 他, 「500-kV光陰極DC電子銃の開発」, 第8回加速器学会プロシーディングス, 20 (2011).
- [15] 山本記史 他, 「CsK2Sb光陰極の電子引き出し寿命に関する研究」, 本プロシーディングス (2013).