

DEVELOPMENT OF A 500-KV PHOTOEMISSION DC GUN AT JAEA

Nobuyuki Nishimori^{1,A)}, Ryoji Nagai^{A)}, Shunya Matsuba^{A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Masahiro Yamamoto^{B)},
Tsukasa Miyajima^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Hokuto Iijima^{C)}, Masao Kuriki^{C)}, Makoto Kuwahara^{D)}, Shoji Okumi^{D)},
Tsutomu Nakanishi^{D)}

^{A)}JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{B)}KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Hiroshima University, Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8530

^{D)}Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8602

Abstract

A 500-kV, 10-mA photocathode DC electron gun has been developed for the next generation energy recovery linac (ERL) light sources. The high voltage conditioning up to 526 kV has been performed with a cathode electrode and NEG pumps in place. High beam current operation up to 10mA has been demonstrated, and 1/e charge life time of 30C has been obtained.

JAEAにおける500-kV光陰極DC電子銃の開発

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、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、米国ジェファーソン研究所(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光陰極電子銃の開発に着手しており、その更なる高輝度化、大電流化を目指している。

DC電子銃の技術的最大の課題は、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]。しかしながら、ビーム生成に用いるカソード電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、これまでの運転電圧は350kV以下に留まっていた。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ことで、サポートロッドからの電界放出電子の問題を解決し、H21年度に550kVまでの高電圧印加に世界で初めて成功した[6]。H22年度からは、電子ビーム生成のためのカソード・アノード電極のインストール、非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプのインストールを行い、500kVまでの高電圧印加に成功し、300kVで5.7 μ Aのビーム生成を行った[7]。

現在、KEKでは次世代放射光源のプロトタイプであるコンパクトERL(cERL)を建設中である[1]。cERLでは500kV-10mAという目標性能を持つDC光陰極電子銃を用いる計画である。このcERL用として、我々の開発している本電子銃がインストールされることになった。H24年秋にKEKへの移設、H24年度末までのビーム生成が計画されている。我々は、移設までに500kV-10mAという目標性能に少しでも近い値を達成する必要がある。本報告では、500kV-10mAビーム生成へ向けた開発の進展状況を高電圧試験と大電流試験の2つに分けて紹介する。高電圧については、ビーム生成条件下の高電圧印加試験で、526kVまでの印加、及び440kVにおいて8時間連続無放電試験に成功した。大電流については、10mAま

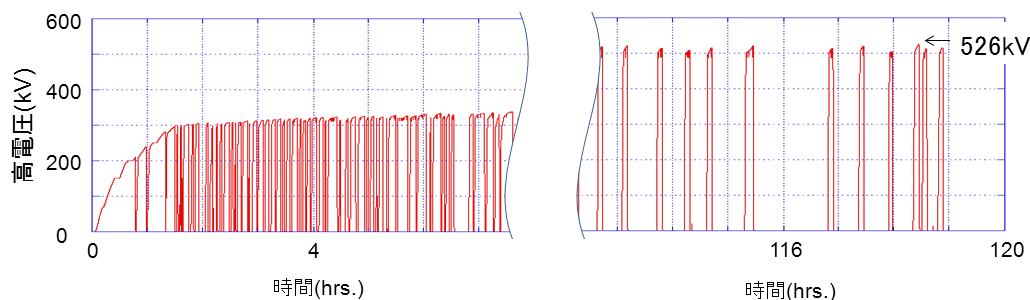


図1：ビーム生成条件下の高電圧印加試験。526kVまでの印可に成功した。

での大電流生成試験に成功した。また、5mAビーム連続運転時の光陰極寿命試験を行い、1/e寿命30Cを得た。

2. 高電圧印加試験

カソード電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、510kVに到達したことをH23年の学会で報告した[7]。今回、その最大印加電圧を図1に示すように526kVまで増やすことに成功した。しかしながら、高電圧印加試験中に、電子銃真空容器内の微細粉塵がカソード電極に付着し、暗電流を引き起こすという、昨年来の問題については解決できていない。問題解決のために実施した希ガスコンディショニングと電極の改造について紹介する。

希ガスコンディショニングで暗電流のソースを除去する試みを行ったが、暗電流の減少はほとんど観測されなかった。これは、ヘリウムやクリプトンガスを 10^{-2} - 10^{-3} Pa程度電子銃真空容器に満たし、高電圧印加で暗電流を発生させて希ガスをイオン化し、そのイオンを暗電流ソースに逆流させて表面を改質し、暗電流を抑制するという方法である[8]。コーネル大やJLabでは一定の効果が報告されている[8]が、我々の電子銃では改善効果はほとんど見られなかった。

電極改造により、カソード・アノードギャップ長を100mmから160mmに変更し、カソード電極の表面電界を下げて電圧印加試験を行った。しかし、微細粉塵により突然発生する暗電流の問題を相変わらず解決できていない。そこで、現在取り組んでいるのがカソード電極の再改造である。これまで、カソード電極の表面電界を下げる努力を続けてきたが、次

は電子銃真空容器内側の電界を下げることで、微細粉塵がカソード電極側に引き付けられることを阻止しようと考えている。現状の直径164mmの電極を114mmに改造することで、電子銃真空容器内側の電界を0.7倍に引き下げる予定である。

高電圧での電子銃ビーム生成試験を見据え、連続無放電運転試験を行った。結果を図2に示す。この実験時は、450kV以上で暗電流が電子銃下部に向かって発生していた(図2右上)。図2右下は、放射線の最も強い電子銃容器の位置にGM放射線検出器(TGS-R74-22759, ALOKA社製)を貼り付け、電圧の関数として、放射線測定した結果である。図2左上に示すように放射線の発生していない電圧440kVでの連続無放電高電圧印加試験を行い、8時間以上を達成した。この時の真空度は実験を通して 8×10^{-10} Paであり、GM放射線検出器で測定した放射線量はバックグラウンドレベルであった。同様の実験を460kVと480kVで行い、無放電時間が2時間、0.5時間という結果を得た。暗電流が発生している条件で、電圧を8時間以上無放電保持するのは困難と考えられる。

3. 大電流ビーム生成試験

cERLの要求するビーム電流10mAを、本電子銃で実証する必要がある。世界を見渡せば、JLab-FELの9.1mA[4]、同じくJLabの偏極電子源グループの10mA[9]、コーネル大の52mA[10]生成など、10mAクラスの実証実験は既に行われている。高電圧試験に比べると技術的な困難は少ないと考えられる。しかし、H22年度の $5.7 \mu\text{A} @ 300\text{kV}$ が本電子銃の最大引き出し電流であり[7]、名古屋大の $270 \mu\text{A} (3.3\text{pC/bunch} \times 81.25\text{MHz})$ [11]が日本におけるDC光

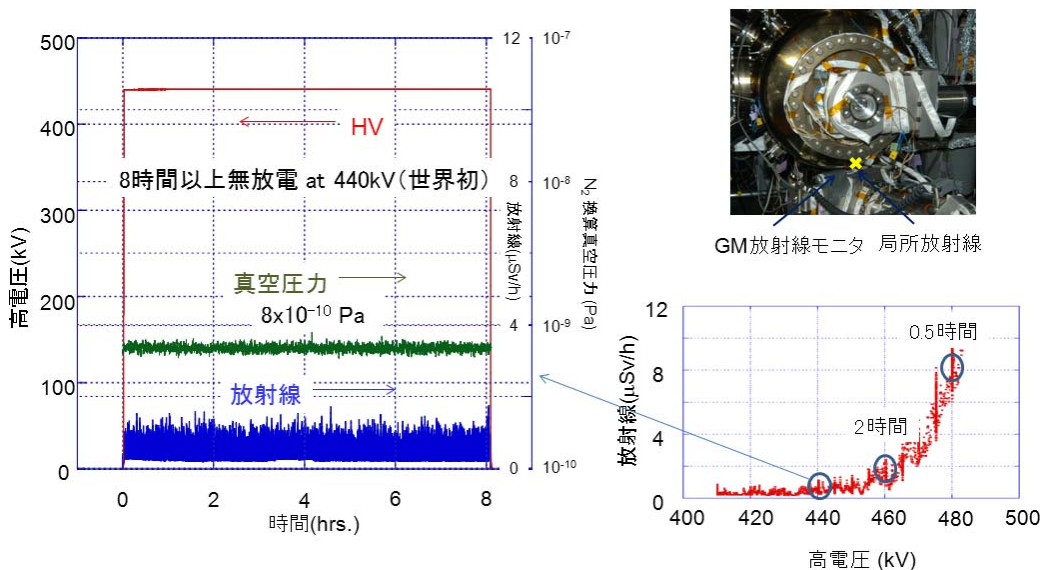


図2：ビーム生成条件下での高電圧無放電運転試験。440kVでは8時間の連続無放電に成功。暗電流の発生する460kVでは2時間、480kVでは0.5時間であった。

陰極電子銃からの最大引き出し電流であることを考えると、大電流試験について我々の経験は十分ではない。大電流運転時の未知の問題点の洗い出しとその解決を早急に実施する必要があった。

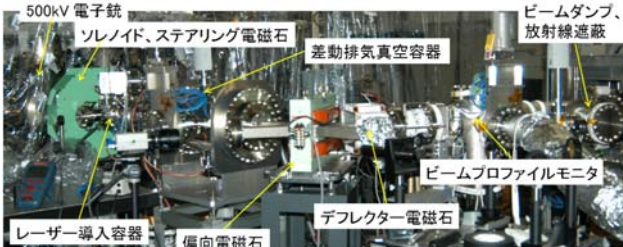


図3：500kV電子銃ビームライン。

今回の大電流試験に用いたビームラインを図3に示す。電子銃直後にステアリング電磁石とソレノイド電磁石を設置し、ビームの軌道調整を行う。続いてレーザー導入真空容器、NEGポンプを備えた差動排気用真空容器を設置している。アノード電極下流1.8mに60度偏向電磁石を設置し、ビームダンプに導く。ビームはアルミナ蛍光板とビームダンプ電流で確認した。偏向電磁石直後に設置したステアリング電磁石に交流電流を流し、上下左右にビームを走査した。これにより、ビームダンプでのビーム広がり

を大きくすることができ、発熱の集中を抑制できる。H22年の5.7 μ A@300kVビーム試験以後、ビームラインに次の3つの装置を追加している。1) ビームダンプの放射線遮蔽、2) 差動排気装置、3) レーザー導入真空容器。

H22年のビーム生成では、ビームダンプは放射線遮蔽されておらず、ダンプで発生する放射線が、実験室エリアの放射線モニタを10 μ Sv/h以上に押し上げ、5.7 μ Aより大電流の試験が困難になった。そこで、10cmの鉛遮蔽でビームダンプを覆う放射線遮蔽装置を設置した。500kV-10mAのビーム生成にも耐えられる設計となっている。

差動排気用真空容器設置の目的は、ビームダンプでのアウトガスが電子銃に逆流し、光陰極のイオンバックボンバードメントの原因となることを防ぐことである。ICF305フランジの真空ダクト内に8つのNEGポンプ (WP38/950 St707, SAES getters) を設置し、ビームの入出射口に直径3cm長さ3cmのオリフィスを設け、コンダクタンスを制限した。ビームによりビームダンプの真空度が1 $\times 10^{-5}$ Paまで悪化しても電子銃へのガスの流入が1.9 $\times 10^{-10}$ Pa \cdot m³/sに抑えられる設計になっている。

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

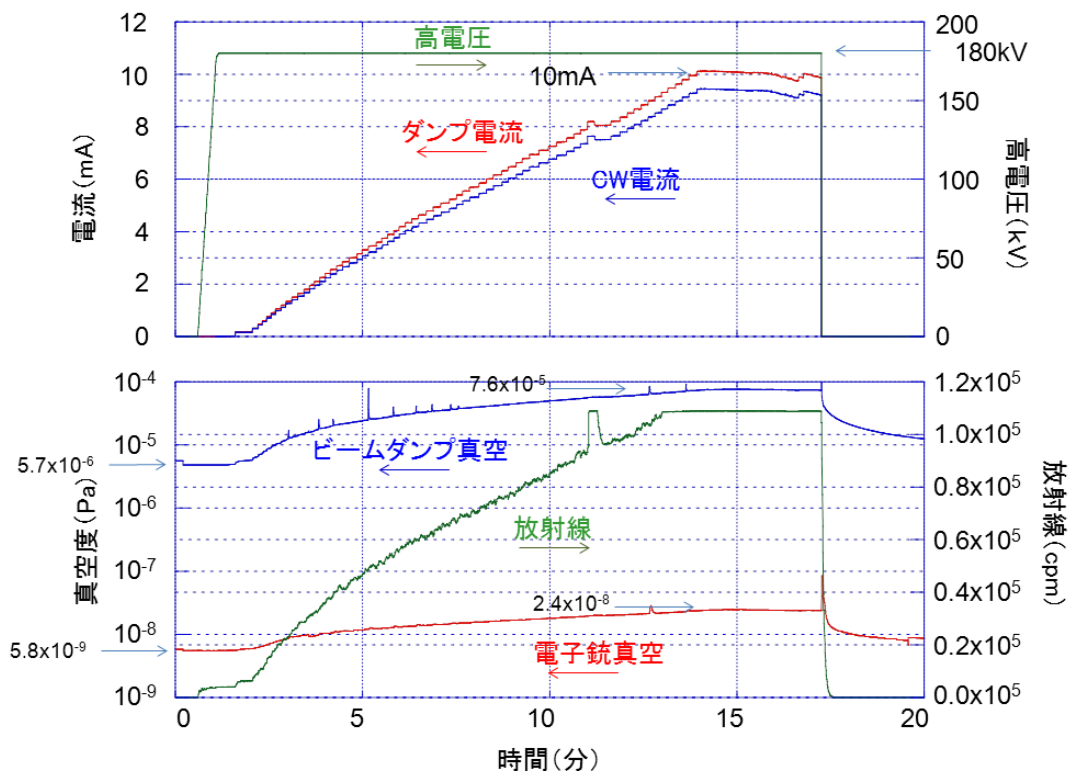


図4：10mAビーム生成試験結果。横軸は時間。上図の赤線がビームダンプ電流、青線が高電圧電源電流のビーム電流、緑線が高電圧を示す。下図の赤線は電子銃真空度、青線はビームダンプ真空度、緑線は放射線を示す。

(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、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光陰極をカソード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。今後、詳細に調べる必要がある。

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5W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。

大電流試験を行う前に、アルミナ蛍光板でビームプロファイルを確認し、交流電源デフレクター電磁石を用いてプロファイルモニタでのビームサイズを2cm×2cm程度に広げた。ダンプでのビームサイズはその倍程度と推定される。

図4に10mAビーム生成実験の結果を示す。ビームダンプの電流を測定しながら、入射レーザーパワーを増やし、徐々に電流を増やした。10mA時のレーザーパワーは1.6Wであり、GaAs光陰極のQEは1.5%であった。放射線は実験室のエアモニタと、レーザー導入真空容器そばに設置してあるGM放射線検出器 (TGS-133、ALOKA社製)を用いてモニタした。真空度は電子銃、ビームダンプの真空計でモニタした。ビーム電流はビームダンプとグランド間に接続した1k Ω の抵抗間の電圧から求めた。高電圧電源から電子銃に供給しているコッククロフトウォルトン電源の電流 (図4,5ではCW電流と表示)でビームダンプ電流をクロスチェックした。CW電流がダンプ電流より少なめに出ている理由は現時点では不明であるが、その比はほぼ一定である。高電圧電源とセラミック管の出力抵抗は66.6k Ω である。

図4に示すようにダンプ電流10mAで2分程度キープすることができたが、その後は急速に電流が減少し、やがて高電圧電源がインターロック信号により突然トリップした。高電圧電源とコッククロフトウォルトン電源をつなぐ配線コネクタの発熱が原因と考えており、改良を計画している。

ビームダンプの真空度は10mA運転時に $7.6\times 10^{-5}\text{Pa}$ まで上昇し、電子銃の真空度は $2.4\times 10^{-8}\text{Pa}$ まで上昇

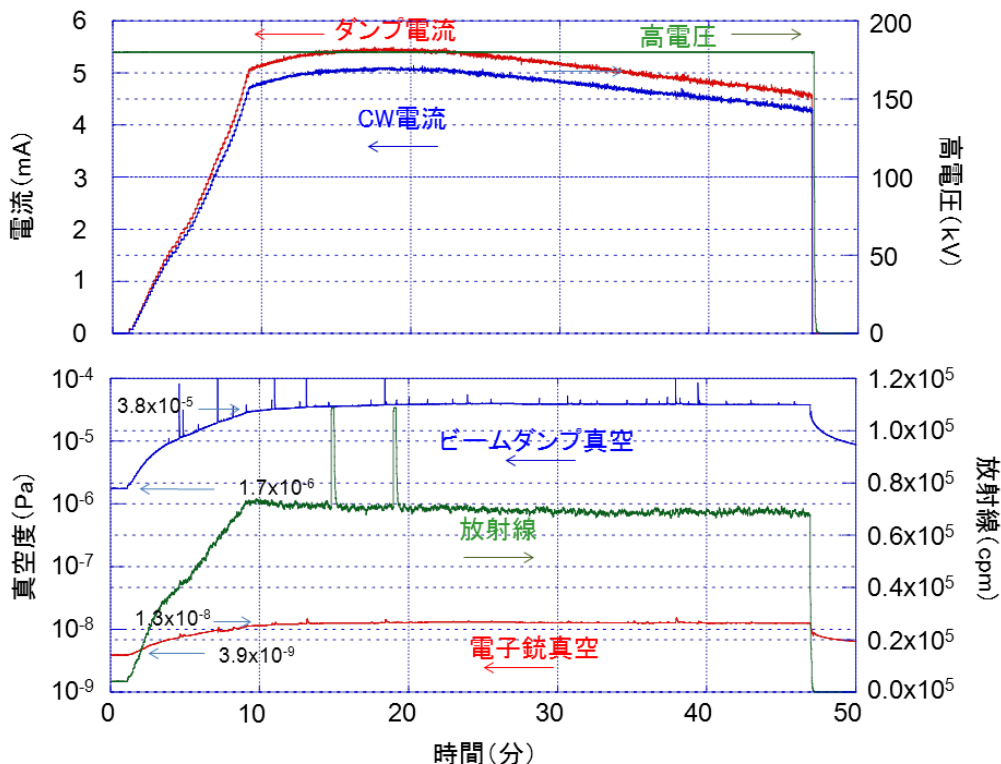


図5：5mAビーム長時間運転試験結果。横軸は時間。上図の赤線がビームダンプ電流、青線が高電圧電源電流のビーム電流、緑線が高電圧を示す。下図の赤線は電子銃真空度、青線はビームダンプ真空度、緑線は放射線を示す。

した。ICF305差動排気真空容器の設計では、大電流運転時のビームダンプ真空度を 1×10^{-5} Paと仮定し、電子銃へのアウトガスの逆流は問題ないと考えていた。ところが、ビームダンプの真空が仮定値より1桁程度悪化し、電子銃の真空度を9乗パスカル前半に保つのが困難である。この対策として、ビームダンプのベーク温度増が考えられる。JLabではビームダンプを450°C-24時間ベークしている[9]が、我々は250°C-24時間程度であった。

大電流試験時の放射線については、レーザー導入真空容器そばに設置したGM放射線検出器と実験室内壁に設置してあるエリアモニタを用いた。実験当初、mAを超えるビーム電流を生成すると、エリアモニタが $10 \mu\text{Sv/h}$ を超え、それ以上の運転が困難であった。そこで、ビームダンプから偏向電磁石にかけてのビームダクトを鉛シートで覆ってみたところ、放射線発生量を大幅に抑えることができた。ビームサイズを広げるためのデフレクター電磁石の作用でビームの一部がダクトに当たるなどして、放射線を発生させていると考えている。

5mAで長時間運転を行った結果を図5に示す。レーザーパワーを徐々に増やしながら電流を上げてゆき、5mAを越えたところでレーザーパワーを1.37Wに維持した。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45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30C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JLabのデータ[9]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30C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。コーネル大では K_2CsSb 光陰極を用いて、20mA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[12]。運転前後でQEの劣化はほとんど見られていないし、グリーン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。

今回の大電流試験は、高電圧印加試験中に450kV程度で暗電流が発生し、高電圧試験を継続できなくなった後に実施した。200kV以上では暗電流が発生するため、大電流試験の電子銃電圧を180kVに設定した。より高い電圧での電流試験は、暗電流の原因と考えられるカソード電極に付着している微細粉塵を除去した後に実施予定である。

4. 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進めている。高電圧に関して、カソード電極を取り付けたビーム生成可能な状態で高電圧印加試験を行い、526kVまでの印加、440kVでの8時間連続無放電試験に成功した。目標とする500kVまで、あと一息のところまで到達している。大電流に関しては、10mAの実証試験、5mAでの40分間連続運転に成功した。GaAs光陰極の1/e電荷寿命を測定し30Cを得た。目標とする10mA運転の目途が立ったと考えている。

今後は、より高電圧での大電流試験を目指して準備を進める。秋にはcERL@KEKへ移設し、2012年度内のビーム生成を予定している。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤 (C) 23540353、文部科学省委託研究：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建設の進捗状況」、第8回加速器学会プロシーディングス, 1071 (2011).
- [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 γ 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] 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).
- [8] D. Alpert et al., J. Appl. Phys. 38, 880 (1967); C. Hernandez-Garcia et al., "DC gun high voltage conditioning with Krypton gas", JLAB-TN-08-065, October 2008.
- [9] J. Grames et al., PRSTAB 14, 043501 (2011).
- [10] Ivan Bazarov, "Overview of Photoinjectors for Future Light Sources", slide at FLS2012.
- [11] 山本将博 他、「GaAs及びGaAs/GaAsP超格子フォトカソードからの高密度バンチビーム生成」、第3回加速器学会プロシーディングス, 166 (2006).
- [12] L. Cultrera et al., PRSTAB 14, 120101 (2011).