

## 500kV 直流光陰極電子銃の開発

### DEVELOPMENT OF A 500KV PHOTOEMISSION GUN

西森信行<sup>#,A)</sup>, 永井良治<sup>A)</sup>, 山本将博<sup>B)</sup>

Nobuyuki Nishimori<sup>#,A)</sup>, Ryoji Nagai<sup>A)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>B)</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

#### Abstract

A high-brightness, high-current electron gun for energy recovery linac light sources, high repetition rate X-ray FEL and high power EUV 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 demonstrated generation of a 500-keV electron beam. This demonstration was achieved by addressing two discharge problems that lead to vacuum breakdown in the dc gun. One is field emission generated from a central stem electrode. We employed a segmented insulator to protect the ceramic insulator surface from the field emission. The other is microdischarge at an anode electrode or a vacuum chamber, which is triggered by microparticle transfer or field emission from a cathode electrode. An experimental investigation revealed that a larger acceleration gap, optimized mainly to reduce the surface electric field of the anode electrode, suppresses the microdischarge events that accompany gas desorption. It was also found that nonevaporable getter pumps placed around the acceleration gap greatly help to suppress those microdischarge events. The gun has provided stable beam for commissioning of the compact ERL at KEK since April 2013.

#### 1. はじめに

直流光陰極電子銃は、リニアコライダーの偏極電子源[1]やエネルギー回収リニアック (ERL) の高輝度大電流電子源[2]として国内外で20年以上に渡り開発されてきたが[3]、運転電圧は350kV以下に留まっていた。我々は図1に示す500kV光陰極直流電子銃を開発し、独自技術を用いて世界初となる500kVの安定印加[4,5]、及び500keV電子ビーム生成に成功した[6]。2012年10月にはJAEAからKEKへ500kV電子銃

の移設を行い、開発中のコンパクトERL (cERL) のコミッショニングのために2013年4月から安定にビーム供給を続けている。この電子銃には3つの主要開発技術がある。1) セラミック管、2) 加速電極、3) 光陰極である。1) セラミック管については、独自のガードリング付分割型セラミック管を開発し、サポートロッドからの電界放出電子がセラミック管表面を直接叩かない構造とした[4]。セラミック管表面のチャージアップによる放電や穴の開く事故を防ぎ、サポートロッド有の状態でも500kVの安定印加に世界で初めて成功した[4]。2) その後、ビーム生成用加速電極をインストールしたところ、電圧印加中に電極の高電界部から暗電流が突然発生する未知の問題に悩まされた。陽極効果に着目し、i)加速ギャップ周囲に非蒸発型ゲッターポンプを配置することによる陽極でのガス発生抑制とii)加速ギャップ長最適化による陽極電界の低減、により暗電流問題を解決した。これにより、世界初の500kV印加[5]、500keVビーム生成に成功した[6]。3) 光陰極として、偏極電子源開発に用いられてきた不電子親和力 (NEA) 表面を持つガリウムヒ素を選定した。名古屋大学で長年培われてきた光陰極パック輸送技術、光陰極表面洗浄技術[7,8]、NEA表面作成技術[7,8]を踏襲することで、迅速かつ確実なビーム生成を実現した。以下に技術開発の詳細を紹介する。

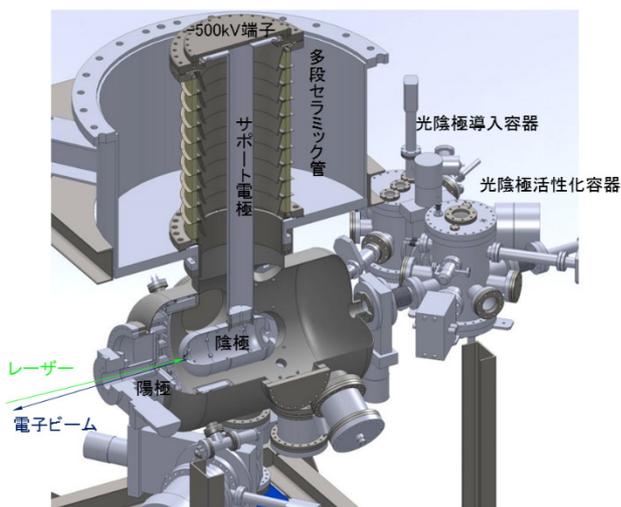


図1 : 開発した500kV光陰極直流電子銃。

#### 2. 分割型セラミック管

500kV直流光陰極電子銃の実現はCharles K. Sinclair

# nishimori.nobuyuki@jaea.go.jp

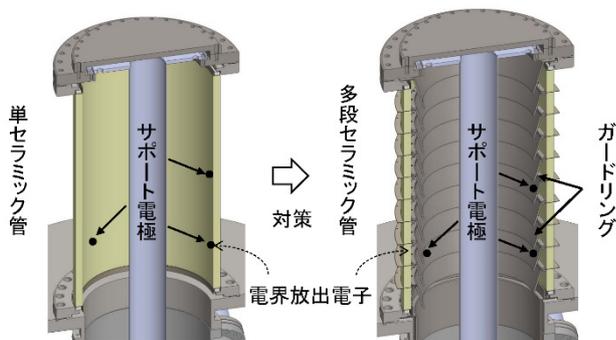


図2：サポート電極からの電界放出電子に対する対策としてのガードリング付多段セラミック管。

氏による1991年の提案後、20年以上に渡って直流光陰極電子銃コミュニティにとって宿願であった。我々が電子銃開発に着手した2008年当時、米ジェファーソン研究所 (JLab) の他に米コーネル大学、英ダレスベリー研究所が先行して同型の電子銃開発を行っていたが、放電によりセラミック管に穴があく問題により運転電圧は350kV以下に留まっていた。そこで、我々は名古屋大学や原研FEL電子銃で250kV程度までの運転実績のあった分割型セラミック管の改良である、図2に示すガードリング付分割型セラミック管の開発に乗り出した[9]。サポート電極から発生する電界放出電子を、多段分割したセラミックの各段から延びる金属製ガードリングで受け止める。この構造によりセラミック管表面を防御し

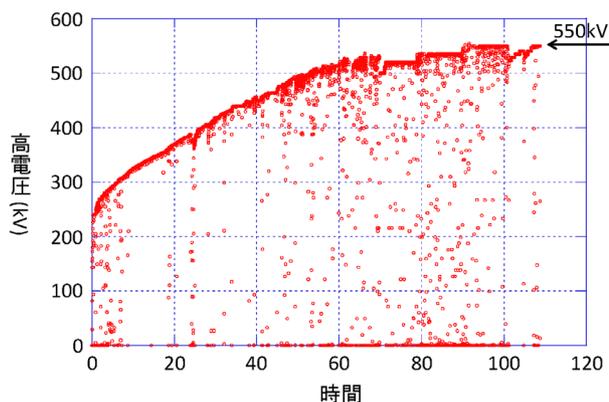
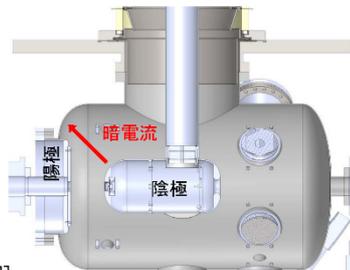


図3：高電圧印加試験結果。110時間のコンディショニングにより550kVに到達した。

た。セラミック管に対面するガードリング裏の表面電界はサポートロッド表面の1/3以下となっており、電界放出電子を大きく低減できる。分割セラミック管の各段は、管外側の絶縁ガス雰囲気中で外部抵抗を介して電氣的に繋がっており、ガードリングで受け止めた電子はグラウンドへと流れていく。

2009年6月から高電圧印加実験を開始し、11月には図3に示すように110時間の高電圧コンディショニングで最大550kVまでの高電圧印加、および8時間無放電で500kVの印加に成功した[4]。この実験では、サポートロッドからの電界放出電子に対するガードリング付分割型セラミック管の効果を見るため、サポートロッド先端にはビーム加速用の電極は設置せずに行った。

更なる課題：未知の暗電流問題の克服



- [原因究明]**  
 ① 暗電流発生箇所を特定  
 ② 陰極拭き取りで暗電流消失を確認
- [暗電流源推定]**  
 ③ 放電により正帯電後、陰極に付着した微細粉塵
- [陰極暗電流対策]**  
 ④ 希ガスコンディショニング  
 ⑤ 容器表面の粉塵除去
- 陰極対策は効果なし**

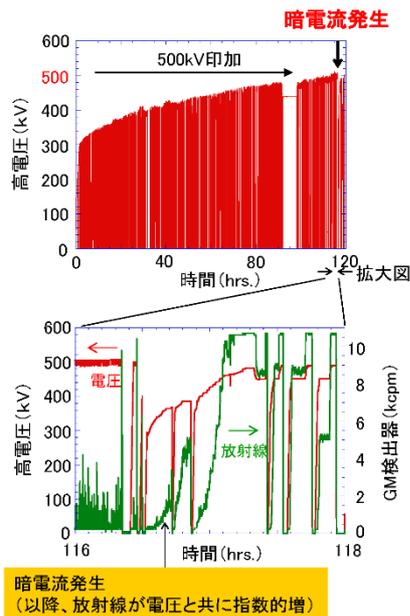


図4：ビーム加速電極（陰極・陽極）設置に伴い発生した暗電流問題。500kV付近（右上図）到達後、暗電流発生。右下に拡大図を示す。放射線が電圧と共に指数関数的に上昇。左図に示すように、原因を究明後、陰極に着目した暗電流対策を行ったが効果はなかった。

高電圧では陽極マイクロ放電効果も大きい

↓ 対策案

- (A) 陽極でのガス発生抑制: ギャップ周囲に複数の真空ポンプ配置
- (B) 陽極電場の半減: ギャップ長の拡大
- (C) エミッタンス劣化の抑制: 陰極電場強度の維持(1割減)

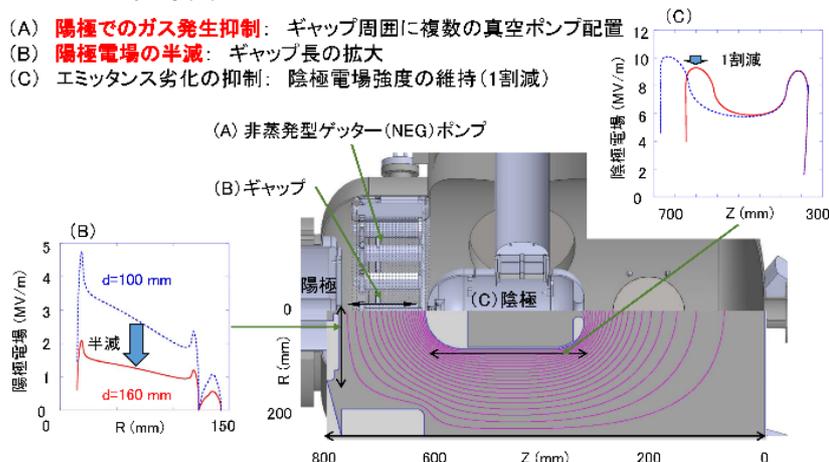


図5：陽極でのマイクロ放電効果に着目した暗電流対策。陽極でのガス発生抑制のため、加速ギャップ周囲にNEGポンプ配置、陽極電場半減によるマイクロ放電抑制のための加速ギャップ長増。ギャップ長の違いに伴う陽極、陰極の表面電場を(B)、(C)グラフに示す。

この分割型セラミック管の成功を受け、コーネル大学、JLab、中国IHEPも分割型セラミック管の採用を決めた。分割型セラミック管による高電圧性能の進歩は著しく、近年KEK第二電子銃も550kV印加を達成し[10]、コーネル大学も同様の電圧印加を達成したと聞いている。

### 3. 加速電極

分割型セラミック管による500kV高電圧印加に成功後、電子ビーム加速のために陰極・陽極を設置した。2010年7月から開始した高電圧印加試験で、新たな暗電流問題に直面した。その様子を図4に示す。500kVまで順調に高電圧印加を達成できたが、ある放電後に電圧とともに指数関数的に増加する暗電流が発生した。放射線検出器を用いて暗電流による放射線発生箇所を特定後、対応する陰極部を無塵ティッシュで拭き取りした結果、暗電流が消えることが判明した。このことから、暗電流発生の原因は、電子銃高電圧真空容器内表面の残留微細粉塵が放電により帯電し、陰極に固着するためと推定した。問題解決の方法として、電子銃真空容器内面の清浄化や、付着した暗電流源除去のための希ガスコンディショニングを試みた。しかしながら、高電圧印加試験中に暗電流源は突然発生し、一旦発生すると、真空を破り陰極の拭き取りを実施するまで除去できないという状況が長らく続いた。

そこで、この暗電流問題が、陽極面でのガス発生に伴うマイクロプラズマ生成に起因すると仮定し(図5参照)、陽極の電界を半分にする改造、ガス発生を抑制するためのNEGポンプ設置の改造を実施した。陽極の電界を下げる手段として、陰極・陽極間距離を100mmから160mmに変更した。これによ

り電界放出暗電流の発生なしに、ビーム生成条件下での550kV高電圧印加に成功した[5]。

電子銃から高品質ビームを生成するためには、加速エネルギーを500keV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、加速途中でのエミッタンス劣化を防ぐことも重要である。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が生成される光陰極面上で高電界であることが重要である。安定な高電圧印加には陽極の電場を下げるのが肝要だが、陰極の電場を下げ過ぎないように注意する必要がある。電子銃の陰極・陽極の表面電場は、内導体半径a、外導体半径bを持つ同心球コンデンサで大まかに説明できる。内導体電位がV、外導体電位が0(接地)の時、内導体表面電場は

$$E_{in} = \frac{b}{a(b-a)}V$$

となる。一方、外導体表面電場は

$$E_{out} = \frac{-a}{b(b-a)}V$$

となる。本電子銃の陰極半径は82mmであるため、a=82mm。ギャップ長が100mmの時はb=182mmとなりV=-500kVの時、 $E_{in} = -11.1$  MV/m,  $E_{out} = 2.25$  MV/mとなる。ギャップ長が160mmの時はb=242mmであり、 $E_{in} = -9.2$  MV/m,  $E_{out} = 1.06$  MV/mとなる。陽極電場が半減する一方で、陰極電場は1,2割しか減らないことになる。

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、POISSON静電場計算結果を図に示す。100mmから160mmとギャップ長を変化させることにより、陽極面電場は半分に、陰極面上での加速電場

は10%程度しか減らないことがわかる。

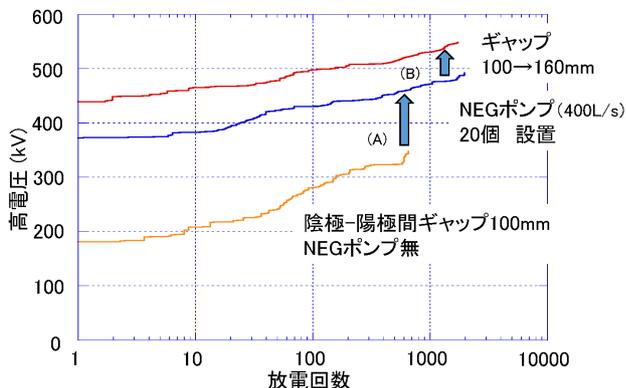


図6：陽極効果に着目した暗電流対策効果。陰極・陽極間ギャップ100mmに対してNEGポンプ設置により高電圧性能が大幅に上昇した（青）。さらにギャップを160mmにすることで、550kVに到達した。

NEGポンプ設置とギャップ長 $d=100 \rightarrow 160$ mmへの変更の効果を図6に示す。横軸の放電回数はほぼ時間に比例し、1000回の放電には1ヵ月程度の時間を要する。 $d=100$ mm、NEGポンプ無しの場合には、300kVに到達するまで1ヵ月程度要した。500kVに到達するには1年以上かかる見込みのため途中で断念した。NEGポンプの設置により、高電圧性能は飛躍的に良くなり、無放電で370kVに到達し、500kVも達成できたが、暗電流の発生を抑制することができなかった。ギャップ長を $d=160$ mmに変更することで、550kVまで暗電流の発生無しに到達することに成功した[5]。

#### 4. 光陰極

電子ビームを生成する光陰極は、名古屋大学やJLabで実績のあったガリウムヒ素半導体を用いることにした。モリブデン製のパックにインジウムで接着した厚さ0.3mmのガリウムヒ素を光陰極導入装置



図7：GaAs光陰極導入・準備容器。名古屋大学の装置[7,8]を参考に設計。パック、タングステンヒーターは名古屋大装置のコピー。

に入れ、加熱洗浄、水素洗浄を実施し、ガリウムヒ

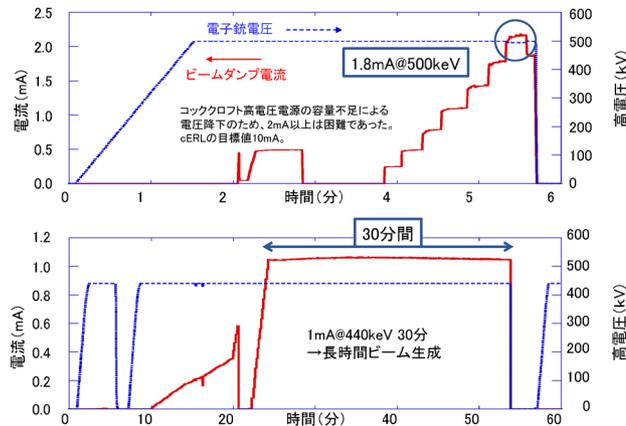


図8：電子ビーム生成試験結果。上図は500keV-1.8mAビーム生成を示し、下図は440keV-1mAを30分間連続生成を示す。

素表面を清浄化する[7]。次にトランスファーロードでパックを活性化容器に移送し、酸素とセシウムを交互に表面に添加することで高量子効率を実現する。図7に示す光陰極導入容器、準備容器は実績のある名古屋大学の装置[7,8]を参考に設計した。特にパック、パック移送機構、タングステンヒーターは名古屋大学のコピーである。このため、手際よくビーム生成を実現することに成功した。装置の改良を続けることで、加速器のコミッションング運転には十分な暗寿命を持つガリウムヒ素光陰極を準備できるようになった。ただし、寿命の改善は引き続き大きなテーマである[11]。

#### 5. 500keV電子ビーム生成試験

550kVまでの高電圧印加成功後、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。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[6,12]に述べられている。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り、最大出力2.4Wの半導体レーザー( $\lambda=532$ nm) Millennium Pro (Spectra Physics社製)を用いた。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 $\sigma=0.1$ 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印加試験時には100M $\Omega$ であるが、大電流ビーム生成試験時には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8上に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。500kVでは最大1.8mAのビームの生成に成功した[6]。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、



図9：cERLに移設した500kV光陰極直流電子銃。

高電圧電源の容量不足であると結論付けた。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。

図8下に示すように、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電流を上げてゆき、1mAを越えたところでレーザーパワーを固定した。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。

## 5. cERLへの移設と運転

上記のJAEAでの500keVビーム生成試験後、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段として使用している。図9に移設した電子銃の写真を示す。

2013年4月から2014年6月までのcERL入射器と周回部のコミッションングにおいては、ビームエネルギー390keVで運転を行っている[13,14]。延べ電圧印可時間は500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 $0.8 \times 10^{-9}$ Paが得られており、目標とする極高真空を実現している。

390kVは光陰極DC電子銃の運転電圧として世界最高であるものの、セラミック管表面の汚れ問題を解決し、cERLでの500keVビーム生成に今後挑戦したいと考えている。低エミッタンスビーム生成においては、コーネル大学が先行しており350kV電子銃

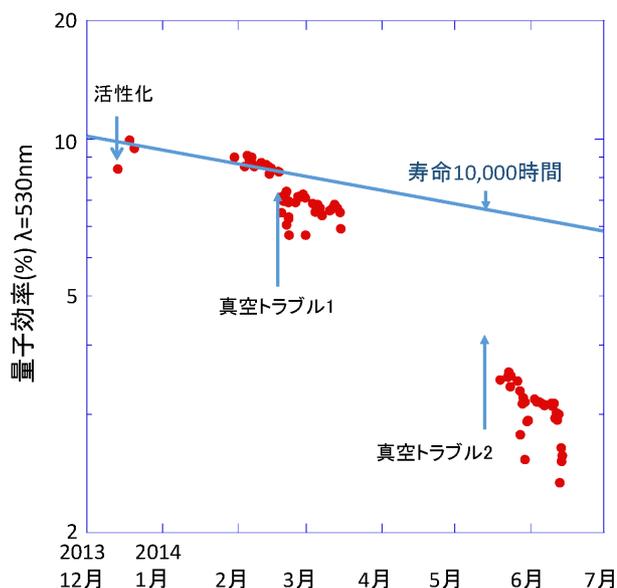


図10：cERL周回部コミッションング時の電子銃直後のファラディカップで測定したGaAs光陰極量子効率。12月の活性化と電子銃へのインストール後、7か月に渡り手を加えなくとも量子効率は2%以上であった。その間2回ほど、イオンポンプの停止などの真空トラブルが発生したが、コミッションングに影響が出るほどの量子効率低下は見られなかった。真空トラブル発生前は10000時間(1年以上)程度の寿命が期待された。

を用いて90%規格化エミッタンスで0.3mm-mradを実現している[15]。500kVビームの実現により、一層の低エミッタンス化に貢献したい。

図10に、cERLの周回部コミッションング時に測定したGaAs光陰極の量子効率の時間変化を表す。光陰極活性化直後のQEは8.5%@532nmであった。運転電流は最大5 $\mu$ A程度であり、データは静的寿命とほぼ等しいと考えられる。ビーム電流はcERL入射器ビームラインの可動式ファラディカップで測定している。約7か月のコミッションングの間、再活性化を行わず(光陰極に対して何ら手を加えることなく)ビーム運転を続けた。

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[16,17]、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。cERLでのビームダイナミクス研究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。

## 6. まとめ

次世代放射光源のための500kV直流光陰極電子銃の開発を行った。世界初の550kV印加、及び500keV電子ビームを最大1.8mA生成することに成功した。JAEAからKEKのcERLへ本電子銃を移設し、2013年4

月からcERL入射器及び周回部コミッショニングのため390keV電子ビームを安定に供給し続けている。

本500kV光陰極電子銃は、リニアコライダーやERL光源に加え様々な電子源としての応用が期待されている。SLACのLCLS-IIでの高繰り返しX線自由電子レーザー (FEL) 計画、レーザープラズマ光源に取って代わる半導体リソグラフィ用の高出力EUV-FEL、原子力廃棄物処理への応用としての大強度単色X/ガンマ線源[18]、ハドロン-電子コライダー計画[19]などである。これらの目標実現のため、高加速電界(狭い加速ギャップ)を持つ500kV電子銃の精力的な研究開発[10]が、今後も続けられると考えられる。更に、長寿命光陰極の開発も、益々重要な課題となっている。近年コーネル大学の65mA電子ビーム生成[20]で使用されたマルチアルカリ光陰極が、長寿命光陰極の主要な候補と期待されており、広島大[21]、JAEA[22]などで開発が進められている。

## 謝辞

本開発成果は、原子力機構 羽島良一研究主席、松葉俊哉研究員、KEK 宮島司准教授、本田洋介助教、広島大学 栗木雅夫教授、東京理科大 飯島北斗助教、名古屋大学 栗原真人助教 との共同研究で達成することができました。ここに深く感謝致します。特に羽島氏による多くの助言、サポートは本開発の遂行に不可欠なものでありました。また、本研究を進める上で、名古屋大学 故中西疆名誉教授、名古屋大学 奥見正治氏、東北大 武藤俊哉助教、エアリー 瀧山陽一氏には多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝致します。さらに、KEK河田洋教授、小林幸則教授、坂中章悟教授を始めとするcERLメンバーには、側面から研究開発を支えて頂きました。ここに深く感謝致します。本研究成果の一部は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大学連携支援事業によるものです。

## 参考文献

- [1] M. Yamamoto et al., "Polarized electron source for linear collider", Proc of LINAC2002, 680 (2002).
- [2] C. Hernandez-Garcia et al., "A high average current DC GaAs photocathode gun for ERLs and FELs", Proc. of PAC05, 3117 (2005).
- [3] C. K. Sinclair, NIM A 318, 410 (1992).
- [4] R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010).
- [5] N. Nishimori et al., PRSTAB 17, 053401 (2014).
- [6] N. Nishimori et al., Appl. Phys. Lett. 102, 234103 (2013).
- [7] 山本将博 他、「原子状水素を用いた表面清浄化による超格子半導体フォトカソードの高量子効率化」,第27回リニアック研究会論文集, 7P-7 (2002).
- [8] M. Yamamoto et al., "Status of 200keV beam operations at Nagoya University", AIP Conf. Proc. 987, p. 1149 (2009).
- [9] R. Hajima et al., "Design and Fabrication of a 500-kV Photocathode dc Gun for ERL Light Sources", Proc. of PAC09, 542 (2009).
- [10] 山本将博 他、「500kV DC電子銃2号機の高電圧印加試験」,本プロシーディングス (2014).
- [11] M. Kuriki et al., NIMA 637, S87 (2011).
- [12] 西森信行 他、「光陰極直流電子銃から500keV-mA電子ビームの生成」,第10回加速器学会プロシーディングス, 174 (2013).
- [13] 島田美帆 他、「コンパクトERLのコミッショニング」,本プロシーディングス (2014).
- [14] 宮島司 他、「7.7pC/bunch電子ビームのcompact ERL周回部輸送」,本プロシーディングス (2014).
- [15] C. Gulliford et al., PRSTAB 16, 073401 (2013).
- [16] S. Sakanaka et al., "Construction and Commissioning of compact-ERL Injector at KEK", Proc. of ERL2013, 16 (2013).
- [17] 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」,第10回加速器学会プロシーディングス, 841 (2013).
- [18] R. Hajima et al., Eur. Phys. J. Special Topics 223, 1229 (2014).
- [19] A. Accardi et al., "Electron Ion Collider: The Next QCD Frontier", BNL-98815-2012-JA, JLAB-PHY-12-1652, arXiv:1212.1701 (2013).
- [20] B. Dunham et al., Appl. Phys. Lett. 102, 034105 (2013).
- [21] 清宮裕史 他、「マルチアルカリ高量子効率・高耐久フォトカソードの研究」,本プロシーディングス (2014).
- [22] 西森信行 他、「大電流電子源のための光陰極準備システムの開発」,本プロシーディングス (2014).