

ERL 第二電子銃の開発状況

CONSTRUCTION OF THE 2ND 500KV DC GUN AT KEK

山本将博^{#, A)}, 宮島司^{A)}, 本田洋介^{A)}, 内山隆司^{A)}, 小林正典^{A)}, 西森信行^{B)}, 永井良治^{B)},
松葉俊哉^{B)}, 羽島良一^{B)}, 栗木雅夫^{C)}, 桑原真人^{D)}, 吉田肇^{E)}, 栗巢普揮^{F)}

Masahiro Yamamoto^{#, A)}, Miyajima Tsukasa^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Masanori Kobayashi^{A)},
Nobuyuki Nishimori^{B)}, Ryoji Nagai^{B)}, Shunya Matsuba^{B)}, Hajima Ryouichi^{B)}, Masao Kuriki^{C)}, Makoto Kuwahara^{D)},
Hajime Yoshida^{E)}, Hiroki Kurisu^{F)}

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

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{C)} Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University

^{D)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{E)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{F)} Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

Abstract

The 2nd 500 kV DC photocathode electron gun for a ERL injector was constructed at KEK. The gun has some functions such as a insulated anode electrode for using dark current monitor, a repeller electrode for decreasing backward ions, extreme high vacuum pumps and so on. A high voltage conditioning is just begun from this summer. In addition, a new cathode preparation system has been developed. It can prepare three cathodes simultaneously and storage many cathodes in a good vacuum condition. The detail design was finished and the construction of all in-vacuum components is progressing.

1. はじめに

昨年度から本格的に cERL の建設が始まり、昨年 10 月に JAEA で先に開発が進められてきた 500kV 電子銃がコンパクト ERL(cERL)の入射器ラインにインストールされ、今年 4 月より入射器運転がスタートした^[1]。現在は小電流での試験が行われているが今後、段階を経て大電流化が図られる予定となっている。2009 年より KEK にて開発を開始した第二電子銃は、cERL 入射器の 500kV 電子銃のバックアップ機の役割の他に、今後の大電流ビーム発生試験に伴い明確化する電子銃が抱える各種問題の解決のための R&D を進める重要な役割を担う。以下では、第二電子銃の現状について述べるが、ここで記載されていない装置設計、および装置の評価方法についての詳細はこれまでの報告^[2-4]をご覧ください。

2. 電子銃

現状の電子銃部の構成および写真を図 1 に示す。電子銃本体横側に絶縁油に浸された最大 600kV, 10mA まで出力可能な Cockcroft-Walton 高電圧発生装置が配置されており、その出力部は+0.2 MPa の SF6 ガスで満たされた圧力容器に接続している。高電圧発生部の出力端と電子銃側の分割型セラミックの間は、100 MΩ の保護抵抗を介して接続され、エージング時の電子銃内部で起こる放電等により電極やセラミックのダメージを抑えられるようになっ

ている。

チタン製の真空容器内に設置されたカソードとアノード電極の間隔はおよそ 70mm であり、アノード電極のサポート支柱の長さを変えることでギャップを変更できる設計になっている。アノード電極はカソード電極間で発生する暗電流を計測するため、絶縁された状態で固定されている。さらにアノードの下流部に別途、絶縁した円筒状のリペラ電極を設置している。この電極に正の電位を印加することで電子銃の下流部で発生した低エネルギーの正イオンが電子銃へ入り込まないようにし、イオン衝撃によるカソードへのダメージを抑制できるか試みる。

今回は、電子銃として機能するために必要となる部品で主排気装置以外のものを全て組み込んだ状態の電子銃部のアウトガス評価試験、および主排気系となる 4K まで冷却かつベキング可能なクライオポンプの単体での排気速度評価試験について評価した。また、開始して間もない状況であるが、電子銃の高電圧エージングの状況について以下にまとめる。

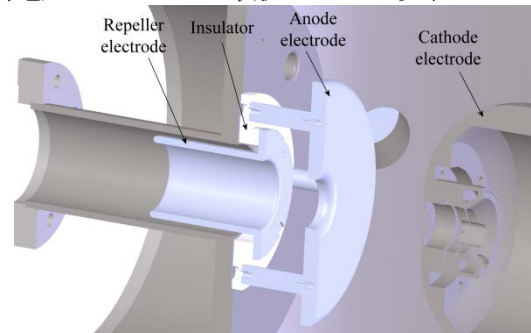


Figure 2: Cross section view around the anode electrode.

[#] masahiro@post.kek.jp

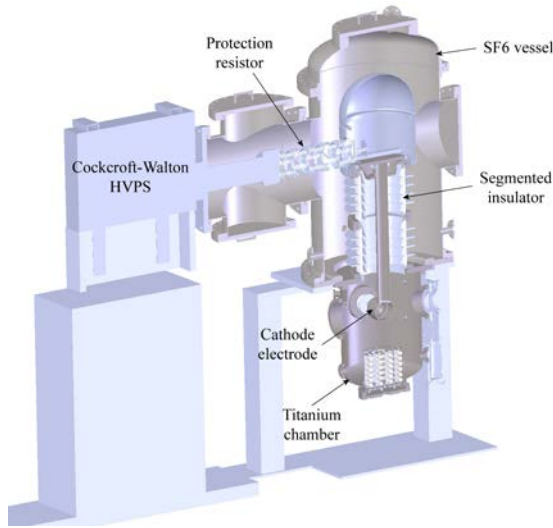


Figure 1: Cross section view of the 2nd 500 kV photocathode DC-gun (left) and a photograph of this system (right).

2.1 真空試験

電子銃装置の全ガス放出速度を前回と同様にスピニングローター真空計を使った蓄積法を用いて評価した。

まず、分割型セラミックを含む真空容器全体に対して約 150°C で約 100 時間のベーキングを行った後、十分室温に下がった段階でバルブを閉じ、約 500 時間の圧力上昇を測定した結果を図 3 に示す。全ガス放出速度は 8.1×10^{-11} Pa m³/s (水素換算) となった。これは、前回の測定値と同等以下の値であり、今回新たに導入したカソード電極およびアノード電極、カソード準備系接続部等からのアウトガスは非常に少ないことが確認できた。この結果は、水素に対する実効排気速度 1000 L/s が得られる排気装置を設置できれば、目標の 1×10^{-10} Pa 相当以下の極高真空を得られることを示している。

その肝となる主排気系については、NEG ポンプとベーカブルクライオポンプを使用することを前回の報告でも述べた。ベーカブルクライオポンプに関しては、前回の報告では排気部となるクライオパネル

の温度が 20K の装置での測定であり、到達圧力も 10^{-9} Pa で期待した排気速度は得られなかったが、その後クライオパネル温度 4K の装置で再度同様の排気速度測定を実施した。その結果を図 4 に示す。

圧力はエクストラクタ真空計 (EXG) および Bent Belt-Beam 真空計 (3BG) [5] によって測定し、到達圧力は両者でほぼ同じ値 $5 \sim 6 \times 10^{-10}$ Pa (窒素換算) であった。20K の場合と比較し、極高真空領域での排気能力は大きく改善され、特にメタン、窒素、アルゴン、二酸化炭素などは 10^{-10} Pa 台の領域でも十分な排気速度が保たれていることが確認できた。一方で、水素は図 5 に示すように、その吸着量に対する排気速度の低下が顕著であった結果から、到達圧力はクライオパネル吸着材での水素の吸着と放出で決まる平衡圧力で支配され、残留ガスのほとんどは水素であることが推測できる。つまり、NEG があまり得意としない水素以外の分子について、クライオポンプは極高真空環境下でも十分高い排気速度を維持することは確かめられたため、後はアウトガスの主成分でもある残りの水素を NEG がどれくらいまで排気できるかにかかっていると云える。

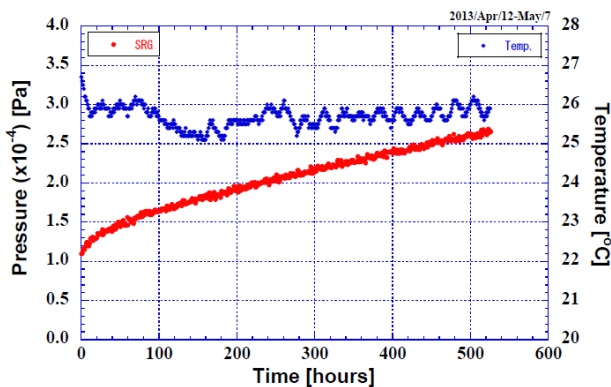


Figure 3: Result of rate-of-rise measurement

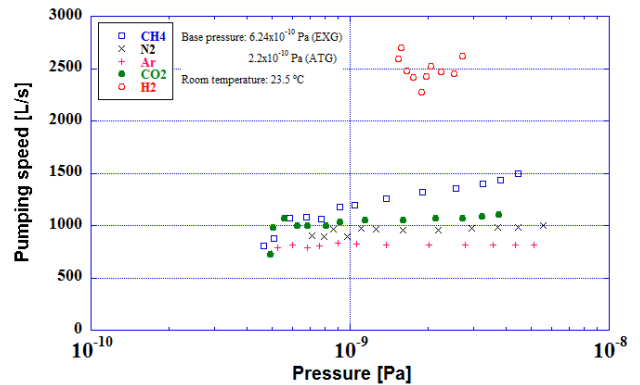


Figure 4 : Typical pumping speed of 4K bakeable cryopump.

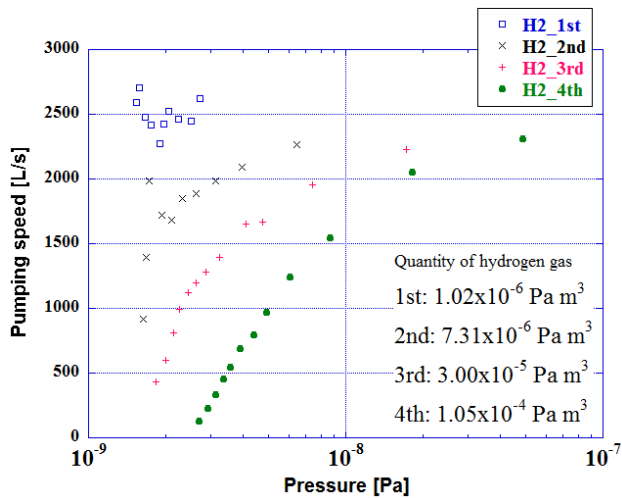


Figure 5: Pumping speed for different quantities of hydrogen gas adsorption as a function of pressure.

2.2 高電圧コンディショニング

アウトガス評価の後、バルブを再び開けてターボ分子ポンプ(STP-1003)のみによる排気を行い、超高真空状態へ戻った状態で高電圧コンディショニングを実施した。電子銃内部の圧力は EXG および 3BG で測定しており、定常状態で共に約 6×10^{-9} Pa (窒素換算) である。

コンディショニング実施時は、出力電圧、電流の他、セラミックの分圧抵抗を流れる電流もモニターし、全供給電流から高圧電源内部に流れる電流および分圧抵抗を流れる電流を差引くことで正味の負荷電流(ビーム電流もしくは暗電流)を 10nA 程度の精度で正確に測定できる構成となっている。電源側で過電流が検知された場合はすぐに出力が停止する他、真空容器内の圧力、アノード電極に流れる暗電流、放射線も監視・記録され、指定するレベルを超えた場合に自動的に出力を停止するインターロック機能が付加されている。

コンディショニングを開始し始めて、電子銃真空内の放電無く電圧はすぐに 300kV まで印加できる状態であることが確認できた。しかしその後、300kV 印加時に負荷電流が不安定となる現象が見られ、電

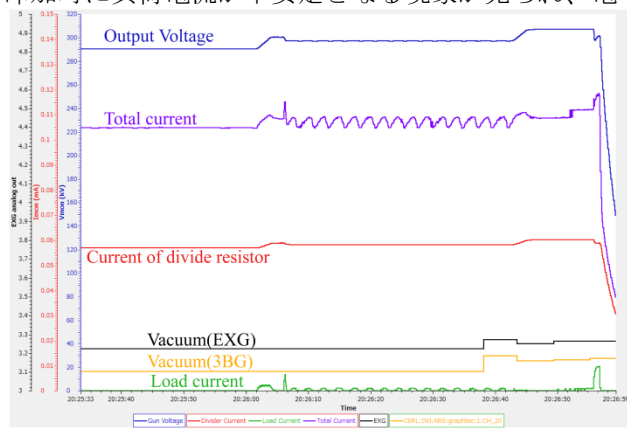


Figure 6: Typical trend graph of output voltage, total current, load current and pressure in gun chamber.

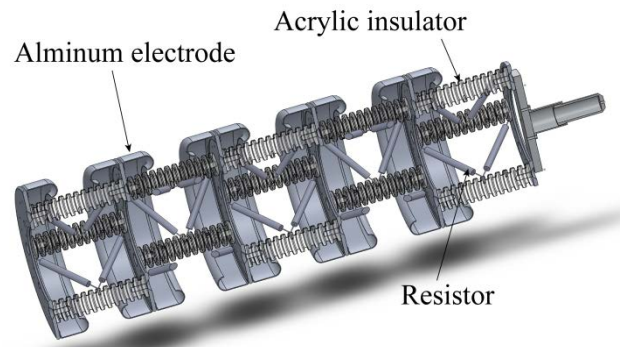


Figure 7: Design of revised protection resistor.

源側の負荷電流出力設定値である $10 \mu A$ の状態を 1 秒以上検出したために、高圧電源側のインターロックが動作し出力が停止した。このときのトレンドを図 6 に示す。出力が不安定になっている同時刻の真空圧力ならびに放射線の値に大きな変化は見られていない。また、この現象は良く再現することから、この問題は真空側以外の部分で起きていると判別できる。そして、事前に実施した保護抵抗無しの高電圧電源単体の出力試験の際は、580kV まで暗電流がほぼ無く印加できている状況から、問題は今回のセットアップで接続した保護抵抗部からのコロナ放電である可能性が高いと考えている。現在の保護抵抗部の配線部分に対して疑似的な形状で行った電場計算によると、配線部に局所的に 300 kV で 10 MV/m を超える表面電場がかかる可能性があることが判明したため、対策として 600 kV 印加時においても 10 MV/m 以下となるよう図 7 に示す構造の保護抵抗を新規に検討し、現在その製作を進めている。

3. カソード準備装置

半導体カソード表面に形成する負の電子親和性 (NEA) 表面は電子銃後方に接続されたカソード準備装置にて作成される。一方で電子銃運転および加速空洞エージング時等は加速器室内へ立ち入れないため、カソードの準備作業は加速器停止期間に限られる。現在、高 QE および低エミッタンスビームの発生の際で優れている半導体カソードを利用しているが、大電流ビーム生成時のカソード(負の電子親和性表面の)寿命は短い問題があるため、大電流化の際でも電子ビームを供給し続けるためには、限られた時間内に効率よく半導体カソードを活性化し、貯蔵する機能を持ったカソード準備装置が不可欠になる。第二電子銃のカソード準備装置はこれらの機能を考慮しながら開発を進めており、その全体図および現状の装置の写真を図 8 に示す。

以下では、各装置の詳細部分について簡単に説明する。各装置の設計は完了し、現在製作中の段階である。また、各装置の真空容器はすでに単体での真空試験は完了し、超高真空が得られることを確認している。

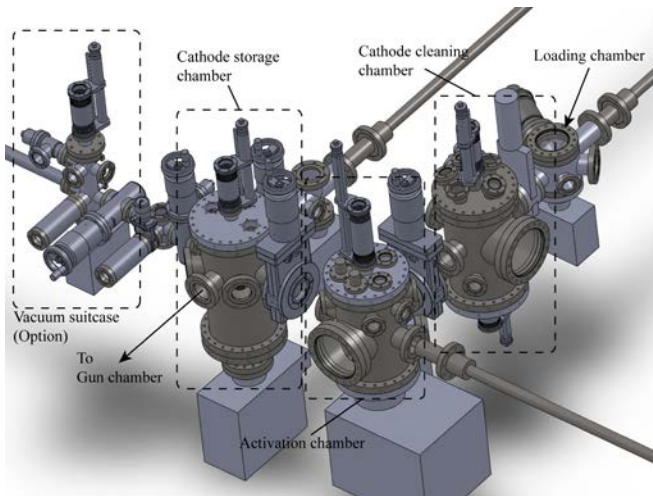


Figure 8: Schematic view of the cathode preparation system with functions of simultaneous plural cathodes cleaning, activating and storage (left), and a photograph of this system without a vacuum suitcase (right).

3.1 カソードクリーニング装置

半導体カソード表面上に NEA 表面を形成するためには、最初に半導体表面を酸化物や炭化物が付着していない清浄な状態にする必要がある。この装置では、カソードクリーニングの方法として近年この分野で広く利用されるようになった原子状水素源を採用している。この装置について、従来までの方法と異なる点は、一度に複数のカソードを同時にクリーニングする点であり、本装置では図 9 に示す最大 3 つのカソードを一緒に扱える設計とした。1 つのコンテナに 3 つのカソードが固定され、3 つの独立したカソードヒーターによりカソード本体を加熱した状態で原子状水素を照射しクリーニングを実施する。クリーニングが終了した時点でこのカソードコンテナを次の活性化装置へ移送する。

3.2 カソード活性化装置

活性化装置では、クリーニングが完了したカソードコンテナを受け取り、Cs 蒸着および酸素供給による NEA 表面の形成を 3 つのカソードに対して同時に実施する。カソード毎にレーザーを照射し、各カソードから発生した電子を各コレクタ電極で収集する。レーザー強度および光電流値からカソードの量子効率を常時モニターしながら最適な活性化が行えるようにカソード部の各 Cs 源および系全体の酸素の供給量を調整する。図 10 に示すように、カソードと Cs 源の間には特定のエリアだけ NEA 表面を形成するための穴の開いたマスクが設置されており、またこのマスクの横壁が各カソードから出る電子を収集するエリアを仕切る役割を果たす。

活性化が完了したカソードは、コンテナから 1 つずつ取り外され次のカソード貯蔵装置へ移送される。カソードコンテナは活性化装置内に残るが、この装置内に最大 3 つまでコンテナを保持することができるよう設計した。

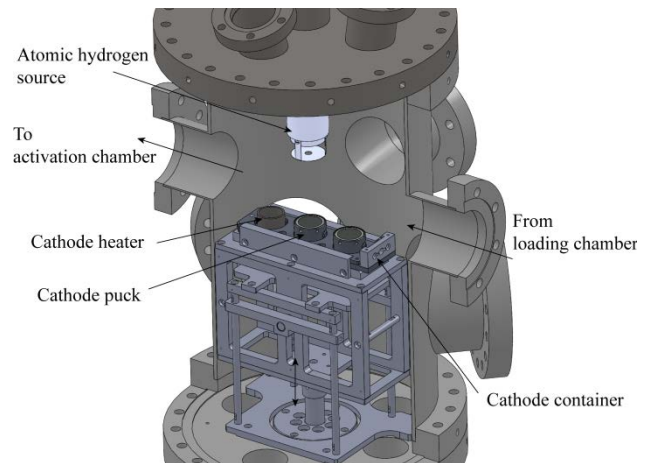


Figure 9: Picture of three-photocathode simultaneous cleaning system using atomic hydrogen sources and filament heaters.

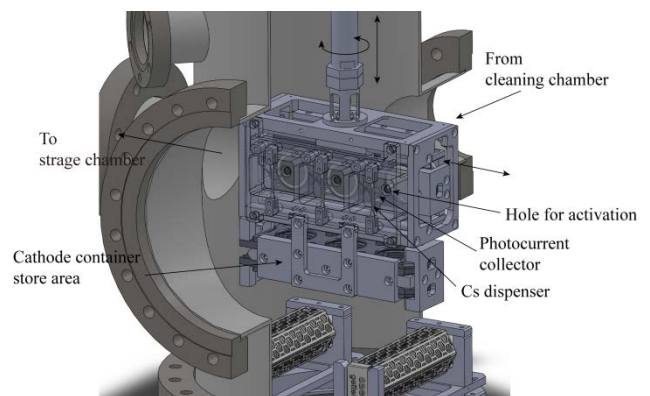


Figure 10: Picture of three-photocathode simultaneous activation system.

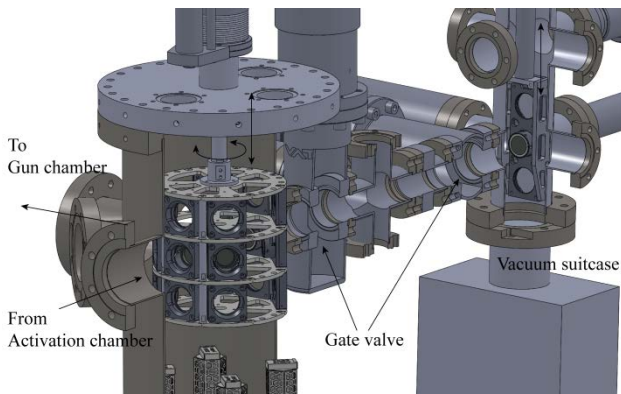


Figure 11: Picture of cathode storage system with connecting a vacuum suitcase.

3.3 カソード貯蔵装置

活性化されたカソードは真空が良く、十分長い寿命が得られる環境となっているカソード貯蔵装置でまとめて保管する。図 11 に示す貯蔵装置は最大 18 個のカソードを貯蔵でき、1600 L/s の NEG および 100 L/s のイオンポンプで排気され、数週間～数カ月レベルの dark lifetime が達成可能な約 1×10^{-9} Pa の真空が得られている。

また、図 8 および 11 に示すようにカソード活性化装置と反対側となる位置に vacuum suitcase を接続することが可能であり、vacuum suitcase で装置間のカソード移送の実績があるアルカリ系薄膜カソードなど、外部で作製されたカソードを直接貯蔵 chamber へ導入することも可能である。

この貯蔵装置でもうひとつ重要な項目として、カソードの寿命の評価の上で重要な情報となる QE 分布を調べる機能を持たせる点がある。電子銃へ装着する前のカソードおよび電子銃で使用した後のカソードについて QE 分布を調べることで、QE 低下の原因をより詳細に知ることができ、例えばイオン衝撃がどの範囲で顕著に起きるか、そこからどの程度ビーム発生位置を外せば効果的に QE 低下を遅らせることができるか判断できるようになる。この機能は、装置の真空窓の 1 カ所にコレクタ電極を設けることで比較的容易に光電流を計測できるが、QE 分布を効率的に計測、表示するためには、レーザーの位置・強度の調整と光電流の読み取りを同期・自動化する必要がある。

4. まとめと今後

KEK で開発が進められている 500kV 第二電子銃は、電極がインストールされた状態でアウトガスは十分低いことが確認できた。現在、高電圧エージングを開始しており、300kV まではまだ真空側では顕著なトラブルは発生していないが、SF₆ 側の保護抵抗部のコロナ放電の問題があったため、改良した保護抵抗の製作を行っている。カソード準備装置は、カソード操作部の詳細設計が完了し、部品の製作および真空槽の中へのインストールを行っている段階である。

今後は、電子銃に関しては新規に作製した保護抵

抗を装着し、300kV 以上のコンディショニング試験を実施する。その後、NEG および 4K bakeable cryopump の主排気系を組み込んだ極高真空生成を行い、ビーム移送系およびビームダンプの整備を進め、早ければ次年度中に電子ビーム生成の試験を実施したいと考えている。

カソード準備系については、今年中に活性化試験を開始し、複数の半導体カソードの同時活性化手法の確立を目指す。そして、将来の電子銃運転で利用できるような装置の操作性、NEA 表面形成の再現性を向上するために PLC を活用した各種のモニターと制御、カソード履歴の記録システムを立ち上げていく予定である。

5. 謝辞

多くの方の協力や支援に支えられ第二電子銃もようやくエージングを開始できる状況になった。電子銃およびカソード準備系の真空作業について、三菱システムサービスの飯島寛昭氏のご協力を頂いた。電子銃電源制御および安全系インターロック整備について、KEK 加速器施設の長橋進也氏、帯名崇氏、東日本技術研究所の路川徹也氏のご協力を頂いた。高電圧電源については、寺田隆史氏をはじめとするニチコン草津（株）の皆様、電子銃ならびにカソード準備装置に関するカソード搬送系の製作については、渡邊一彦氏をはじめとするコマヤマエレクトロンの皆様にご尽力頂いた。この場をお借りして皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] S. Sakanaka *et al.*, "Construction and Commissioning of cERL Injector and Status of cERL Return Loop", 第 10 回日本加速器学会年会, 名古屋大学, 2013, SUP027
- [2] M. Yamamoto *et al.*, "Design of a 500kV electron gun for ERL light source at KEK", 第 6 回日本加速器学会年会, 東海村, 2009, FPPSA08
- [3] M. Yamamoto *et al.*, "Basic vacuum test of 500-kV photocathode DC gun components at KEK", 第 7 回日本加速器学会年会, 姫路, 2010, WEPS124
- [4] M. Yamamoto *et al.*, "Development of extreme high vacuum system for high brightness electron source of ERL", 第 8 回日本加速器学会年会, つくば, 2011, TUPS160
- [5] F. Watanabe, "Bent belt-beam gauge: Extending low-pressure measurement limits in a hot-cathode ionization vacuum gauge by combining multiple methods", *J. Vac. Sci. Technol. A* 28, 486 (2010)