

500 kV DC 電子銃 2 号機の高電圧試験

HIGH VOLTAGE TEST OF THE 2ND 500 KV DC-GUN FOR ERL

山本将博^{#,A)}, 宮島司^{A)}, 本田洋介^{A)}, 内山隆司^{A)}, 金秀光^{A)}, 小林正典^{A)}, 西森信行^{B)}, 永井良治^{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)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Xiuguang Jin^{A)},
Masanori Kobayashi^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{B)}, Ryoji Nagai^{B)}, Ryouichi Hajima^{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

A high voltage and vacuum test of the second 500 kV DC-gun was carried out at KEK. Some problems happened in high voltage conditioning processes during a year. We dealt with these problems carefully or easy way in some cases, then we can hold 500 kV in stable more than 50 hours after 550 kV conditioning process. As for the preliminary vacuum test, a pressure of the gun was obtained $4\text{E}-10$ Pa by using NEG pumps and a bakable cryopump.

1. はじめに

エネルギー回収型ライナック(ERL)の実証機であるコンパクト ERL(cERL)は、周回部も完成し 2013 年末から調整運転を開始した^[1]。cERL 電子銃^[2]は、JAEA から KEK 移設後にセラミック管に不具合が発生しているものの、加速電圧を 390kV に抑えることで cERL 入射器運転時からトラブルの発生は皆無で、非常に安定な運転が続けられている。一方で cERL 運転と並行してより挑戦的な電子銃 2 号機の開発を進めている。

昨年までに電子銃を構成する部品の製作およびそれらのアウトガス評価、排気装置の実効排気速度の評価を終え、すべて組み込んだ状態での高電圧および真空の総合的な基本性能試験を開始している。各部の特長や詳細については、本学会でこれまでに報告した過去の予稿集^[3]を、カソード準備装置については、本予稿集にある報告^[4]をご覧ください。

2. 装置の概要

電子銃の全体図を Fig.1 に示す。

2.1 真空系

電子銃 chamber は内径約 $\phi 640$ mm、高さ約 850 mm のチタン製 chamber と内径 $\phi 360$ mm、高さ約 400mm の 5 分割型セラミック管 2 組を接続した真空容器と、その内部に設置されたチタン製のガードリング電極、アノード電極、カソード電極およびサポート管より構成され、真空側の総表面積は約 8 m^2

[#] masahiro@post.kek.jp

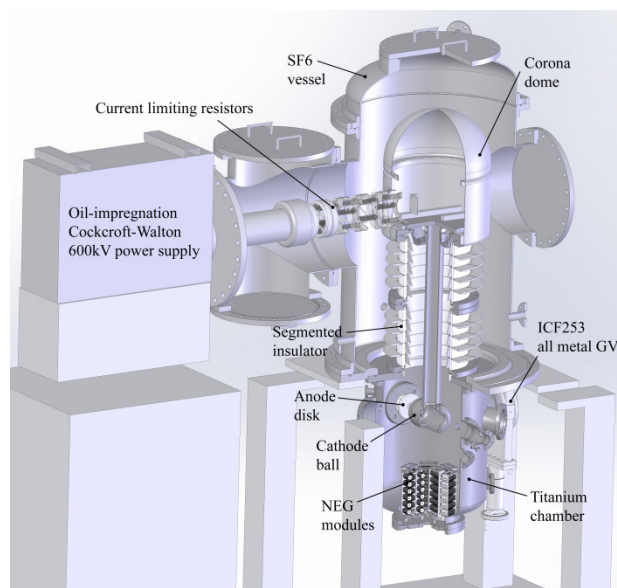


Figure 1: Cross-sectional view of the 2nd 500 kV DC-gun.

(以上)、体積約 $3.3\text{E}-1\text{ m}^3$ である。

粗引き系として、電子銃 chamber 側面の ICF253 ポートに ICF253 のオールメタルゲートバルブを介して 1000 L/s のターボ分子ポンプ(TMP)を直接設置している。これによりコンダクタンスによるロスがほとんど無く、後述する非蒸発型ゲッターポンプ(NEG)活性化時に放出される多量のガスや、ベーキング中にクライオポンプの吸着材より放出されるガ

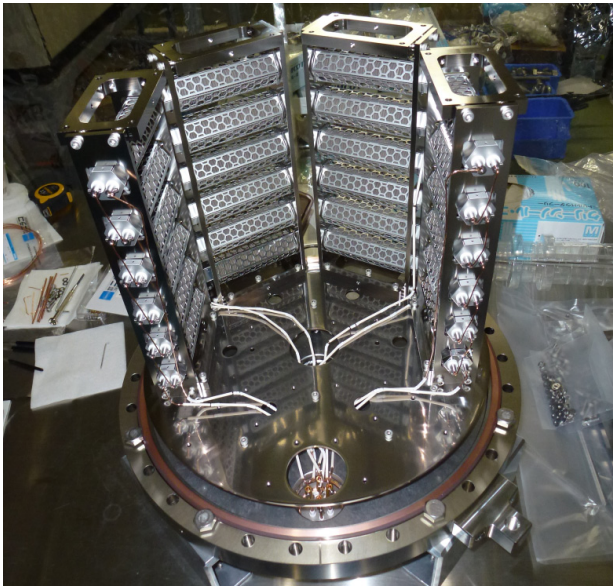


Figure 2: Photograph of NEG modules.

スを効率よく排気する。TMP 下流の排気には 250 L/min のスクロールポンプを使用している。

主排気系には、NEG およびクライオポンプを用いる。具体的には、NEG については SAES 社のヒーター内蔵型カートリッジ C400-2 DSK を 24 個、カタログ値で水素に対する排気速度が合計で 9600 L/s を電子銃底部の ICF406 フランジ上に組み込んでいる。Fig.2 に示すように NEG ポンプ 6 個を直列に配線したものを 4 組並列として電流導入端子へ接続し、端子間に 80 V, 20 A 供給することで活性化を行っている。一方のクライオポンプは、TMP と対向する ICF306 ポートへ接続する。このクライオポンプは、冷凍機と吸着材のある排気部が真真空的に隔離された構造であり、吸着剤も耐熱性の高い固定方法を用いている。これによりクライオポンプ停止状態で排気部を 150~200°C までベーキングすることが可能である。ベーキングを経て室温に戻った状態より冷凍機コンプレッサを駆動する。段階的に J-T 弁の調整を行い吸着材部分の温度が 10K 以下で定常的な排気運転となる。昨年 の 予稿集 に クライオポンプ 単体の排気速度測定結果の詳細を載せているが、排気口径 ϕ 135mm、 $1E-9$ Pa 環境で実測された排気速度として、 CH_4 に対して 1200 L/s、Ar に対して 800 L/s、 CO_2 に対して 1000 L/s の高い排気速度を有している。

カソード電極の前方および後方にはビーム出射および光陰極の着脱のために接続するダクトおよび chamber とを仕切る ICF114 のオールメタルゲートバルブが設置されている。

電子銃 chamber の圧力は Extractor ゲージおよび 3B ゲージ^[5]により測定し、残留ガスの評価には自分自身からのアウトガスやアノードグリッドで発生する電子衝撃脱離 (ESD) の影響を抑えた極高真空仕

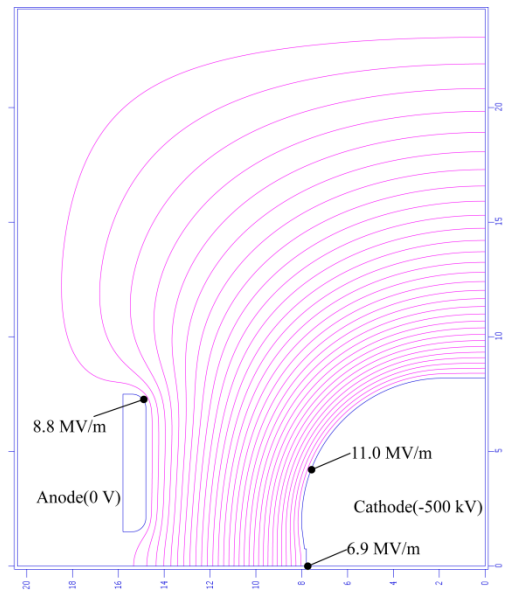


Figure 3: Field map around cathode and anode electrode.

様の Q-mass (WATMASS^[6]) を採用した。

2.2 高電圧系

本装置は、カソード電極を負の電位、アノード電極を接地電位とし、Fig.1 に示されたようにカソード電極はセラミック管最上部から伸びた約 1050 mm のサポート管の先端部に固定されている。今回報告する高電圧試験では、カソードとアノード電極間距離は 70 mm と狭いことが 1 号機と大きく異なる点であり、500 kV 印加時のカソード電極表面の最大電界は約 11.0 MV/m、光陰極表面の加速電界は 6.9 MV/m となる。(Fig.3 参照)

セラミック管の内側および外側はガードリング電極が設置され、外側のガードリング電極の各段は 500 M Ω の抵抗で互いに接続されている。500 kV 時に 100 μ A の電流が流れることで分割された各段に 50 kV が均等に印加されることを保証している。この分圧用抵抗を流れる電流は高電圧電源制御盤へ戻ってモニターできるようになっている。セラミック管の最上部には高電圧電源接続部などの構造に対する電界集中を抑えるためのドーム状の電極が設置されている。

セラミック管周囲は絶縁性を確保するため、 SF_6 ガスで満たすための圧力容器を設置する。この圧力容器側面部には高電圧電源を接続するポートがあり、電源はレール上をスライドさせることで出力部をドーム状電極側面の孔を介してセラミック管最上部と接続する。高電圧電源とセラミック管の接続部の保護抵抗については、昨年 の 報告 時 では この 部分 での コロナ 放 電 の 問 題 に よ り 300kV 以上 の 電 圧 印 加 が 困難な状況であったが、保護抵抗表面の電界を抑える構造を採用することにより解消した。高電圧電源接続後、圧力容器内の大気をスクロールポンプで 10

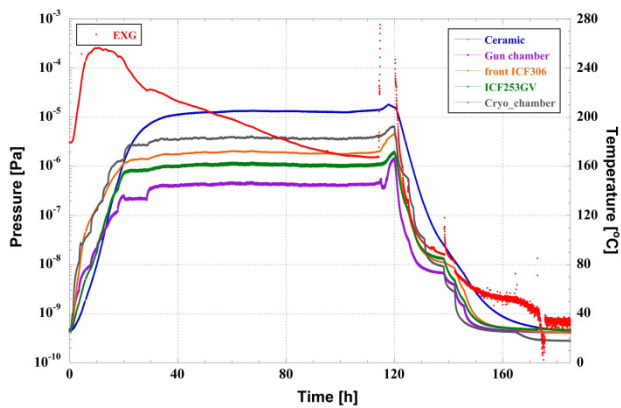


Figure 4: Trend graph of vacuum and temperature during a baking process.

Pa 程度まで排気した後に SF₆ を +0.2 MPa まで加圧充填し、高電圧を印加する準備が整う。

高電圧はインバーター電源で数百 V、20 kHz のパルスが発生させ、昇圧トランスを経て油中に組み込まれた Cockcroft-Walton 回路を介して発生させている。高電圧出力端側を SF₆ ガスで絶縁した状態で、最大 580 kV までの高電圧出力試験を行い、油中および出力部で検出できる 10 nA レベル以上の暗電流は検出されないことを確認している。

高電圧印加中の安全系インターロック動作は、真空、アノード電流（電極間暗電流）、放射線レベルを常時モニターし、設定値以上の状態を検出した際、高電圧出力を自動的に停止する。放射線検知については、電離箱 (FLUKE 製 451P) を電子銃直下に設置し、RS232C 通信を介して遠隔モニターしている。電源、安全系の設定およびモニターは全て EPICS 環境で制御&監視され、運転履歴がサーバー上に保存される。

3. 高電圧および極高真空試験

3.1 エージング (その1)

最初の高電圧エージングは、2013 年 8 月下旬に主排気系が無い状態の粗引き系 TMP 排気状態のみで実施した。電子銃は最初にベーキングを行い、常温に戻した状態の到達圧力は 1.0E-8 Pa であった。

最初の放電は電源電圧 300 kV で発生した。放電によって放射線、真空値は跳ねてインターロックが動作する。この放電と出力停止、再昇圧を繰り返すことで放電電圧が徐々に上昇し、約 5 日間のエージング (放電回数 350 回) によって放電電圧は 500 kV まで上昇したが、放電電圧の上昇はほぼ頭打ちとなった。

記録されているインターロック動作の履歴から、この放電現象は全て真空中で発生し、そのうち 9 割はカソード-アノード間で発生してアノード電流レベル検知によるインターロック動作で停止した。また、放電が発生する直前まではほとんど電極間暗電流も流れず、放電は突如発生していることがわかった。

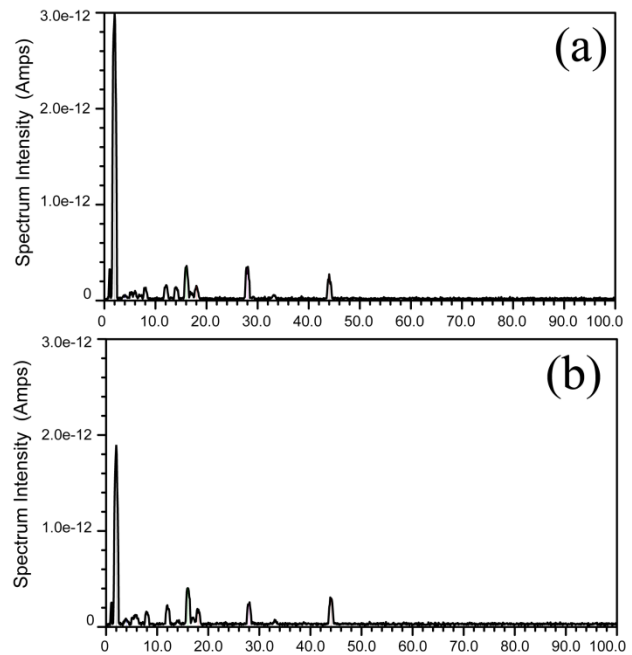


Figure 5: Residual gas spectrum after baking process: (a) a pressure of 2E-9 Pa before the cryopump start, (b) a pressure of 7E-10 Pa just after the cryopump works.

3.2 極高真空の立上げ

次に、電子銃で大電流ビーム運転に必須となる極高真空環境を得るため、NEG ポンプおよびクライオポンプを設置し、150~200°C、約 100 時間のベーキングを経て NEG の活性化、ゲージおよび Q-mass のデガス、クライオポンプの起動を実施した。

最初の NEG 活性化のためか、活性化開始時の残留ガスのスペクトルには高分子のピークが多数見受けられたが、数時間後にはほぼ水素のスペクトルが得られ、活性化終了後、常温の TMP 排気環境で約 2E-9 Pa が得られた。その後、クライオポンプを起動し、吸着材温度が約 80K 程度まで冷えた段階で TMP 口のゲートバルブを閉じ、段階的に J-T バルブを調整しながら吸着材温度が 10K 以下に冷えた状態で到達圧力は 6E-10 Pa であった。ベーキング履歴を Fig.4 に、ベーキング後の残留ガス分析結果を Fig.5 に示す。さらに、到達圧力の変化を確認するために続けてクライオポンプ動作状態で chamber を軽くベークしながら TMP 排気状態で NEG の再活性化を実施、再度室温に戻す追加的なベーキングを施したところ、到達圧力は 4E-10 Pa (窒素換算値) となった。

3.3 エージング (その2) & 暗電流問題

極高真空が得られた状況で、再び高電圧試験を実施した。初期の放電は 230 kV から始まり、放電を繰り返す毎に徐々に放電電圧の上昇が認められたが、放電電圧 310 kV 到達時の放電以降、突如わずか 150 kV の電圧より μ A レベルの電界放出暗電流とそれに伴う放射線が検出されるようになった。ポケット線量計を数台使い、簡易的に放射線の発生源を調査



Figure 6: Photograph of a dust on the cathode ball.

したところ、カソード電極前方上部の左側から発生していることが判明した。エージングによる改善も見られないことから、一度電子銃を大気解放し、セラミック管と一緒にカソード電極を取出して観察したところ、Fig.6のような塵が発生源と推測した付近の場所に付着していた。軽くイオンガン吹きつける程度で除去できるものであった。その他、目視で問題となるような塵や放電痕は無く、カソード電極表面をエタノールを浸したリントフリーベンコート (PS-2) で軽く拭き、最後に乾拭きを行い、電極を再度電子銃へ装着した。その後、3.2 節と同様のベーキング工程(ただし追加ベーキングは実施せず)を経て再び極高真空状態とした。

3.4 エージング (その3)、500 kV 保持試験

高電圧を印加する準備を行った後、2014年7月よりエージングを再開した。初期から放電電圧は 420 kV と高く、また放電電圧の上昇も著しく良好で、放電回数 46 回、実質エージング時間約 8 時間で放電電圧 550 kV に到達した。エージングその1を含む履歴を Fig.7 に示す。グラフからまだ放電電圧の上昇は期待できる状況であったが、高電圧電源の単体試験電圧の上限にも近く、重故障発生のリスクも考えられることから、この状態で加速電圧 500kV の保持試験を実施することとした。

カソード電極の電圧は、上述の分割抵抗を流れる電流が $100 \mu\text{A}$ の時に 500 kV となることから、これに合わせ電源の出力電圧を調整した。保護抵抗 $100 \text{M}\Omega$ が間に接続されていることから電源電圧は加速電圧に対して 2% 高くする必要があり、本実験では電源出力電圧 510.3 kV に調整した。この条件で長時間保持試験を開始したところ、最初は7時間保持後に一度放電が発生し、インターロック動作により出力停止となったが、その後再び同じ条件で保持を続けたところ、延べ約 50 時間、一度もインターロックが動作することなく安定に加速電圧 500 kV の印加ができていた。10 時間連続保持時の結果を Fig.8 に示す。

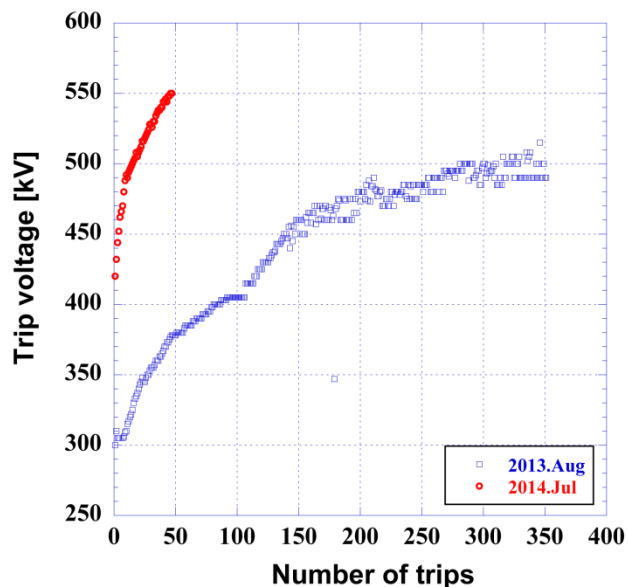


Figure 7: Graph of high voltage conditioning history. Blue square shows the first conditioning result, red circle shows a recent conditioning result.

4. 考察

4.1 真空に関する考察

クライオポンプ起動前後の圧力変化が大きく無いこと、および Fig.5 のクライオポンプ動作前後の残留ガス分析結果から、残留ガスの主成分は水素であり、他の $m/e = 16, 28, 44$ 等のピークはクライオポンプの動作前後で大きく変わらないことから、イオン源のグリッドからの ESD によって発生するガス成分が主要であると推測している。クライオポンプを起動させた状態で NEG を再度活性化することで、最終的な到達圧力が改善していることから、E-10 Pa の環境でクライオポンプの吸着材および NEG の水素に対する平衡圧力の何れかが到達圧力の下限を決めていると考えられる。



Figure 8: Trend graph of 500 kV high voltage holding test. There is no trip or discharge problem during 10 hours.

4.2 放電、暗電流に関する考察

真空中の高電圧電極としてよく用いられる SUS 電極と異なり、本電子銃のチタン電極、200 kV スピン偏極電子銃のチタン・モリブデン電極^[7]、500 kV 電子銃 1 号機のチタン電極^[2]では本試験結果と同様に放電電圧が放電を繰返す毎に連続的に改善する現象が起きている。そして、200 kV 電子銃や本装置では初期の電極間の電界放出 (FE) による暗電流が nA 以下であり、放電の前兆は検出できていない。このような現象について、放電によってその度にエミッションサイトが単調に削られるあるいは鈍るような描像は都合が良すぎて不自然な説明になるように思われる。

放電の最初の引き金は電極からの FE かそれ以外の例えば宇宙線等によるものか不明だが、カソード電極上で発生する電子は陽極側へ加速、衝撃してその内部に含まれているガスを放出し、その一部はイオン化されて再びカソード電極を叩く。本試験 (チタン電極の場合) では、この ESD がその後に放電まで発展するか否かに深くかかわっている可能性があるかと推測している。一般的に ESD によって金属表面から放出されるガスの量は電子のエネルギーと照射線量の積分値に依存し、エネルギーが高い程増加し、照射線量の積分値が増える程減少する^[8]。つまり、放電が発生するためには、ESD で発生するガス放出量にある閾値があると考えれば、放電が発生した後、次の放電が成立するためには、その前の放電電圧よりも高くする必要がある。放電電圧が連続的に改善するのは、繰返しの放電により電極内部に含まれるガスが徐々に減少するためではないだろうか。

一方で、低い電圧で FE 発生トラブルが起きた後にベンコットで拭き取るだけの処置で放電電圧およびその後のエージング時の放電電圧の上昇傾向が改善された点について、拭き取りによって FE 発生条件が変化したことは容易に想像できるが、上述の電極内部に含まれるガス量については拭き取りの効果は全く期待できないと考えられる。今回、順調にエージングが進行したメカニズムについては未だ理解できていない。

5. まとめと今後

500 kV 電子銃 2 号機について、極高真空環境下で 500 kV までのエージングおよび加速電圧 500 kV の保持試験を実施した。途中で発生した放電による暗電流発生の問題については、一度大気解放後に電極をベンコットで拭き取る簡便な対処を行ったのみであるが、その後のエージングで放電電圧は 550 kV まで素早く上昇し、加速電圧 500 kV、電極上の最大電界強度 11 MV/m、カソード表面で 6.9 MV/m の状態を安定に維持できることを確認した。

当初の目標 (運転状態で $1\text{E}-10$ Pa) に対して到達圧力は $4\text{E}-10$ Pa (加速電圧無し) とまだ達成できて

はいないものの、電子銃 2 号機を加速電圧 500 kV で運転できる目途がほぼ立った。今後は、現在立上げ段階のカソード準備装置と接続させてカソードを電子銃へ送り込み、さらにビーム移送およびダンプ部の立ち上げを進め、今年度内に 500 keV ビーム生成試験を開始する予定である。

6. 謝辞

本研究を進める上で、KEK 河田洋 教授、小林幸則 教授、坂中章悟 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・激励を頂きました。三菱電機システムサービスの飯島寛昭氏には真空作業およびクレーン操作等のご協力頂きました。残留ガス分析装置の ESD 低減化のための改造については (有) 真空実験室の渡辺文夫氏よりご指導、ご協力を頂きました。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] 中村典雄 他、「コンパクト ERL の進捗状況」、本プロシーディングス (2014).
- [2] 西森信行 他、「500kV 直流光陰極電子銃の開発」、本プロシーディングス (2014).
- [3] 山本将博 他、「ERL 第二電子銃の開発状況」、第 10 回加速器学会プロシーディングス, 927 (2013).
- [4] 金秀光 他、「ERL 電子銃のための光陰極準備系の開発」、本プロシーディングス (2014).
- [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).
- [6] 渡辺文夫, 「封止残留ガス分析計を用いた新しいガス放出速度測定法」, J. Vac. Soc. Jpn. 51, 347 (2008).
- [7] 山本将博 他, 「NEA GaAs 型フォトカソードを用いた低エミッタンス電子源開発の現状」第 4 回加速器学会プロシーディングス, 179 (2007).
- [8] Oleg B. Malyshev et al., "Electron stimulated desorption from the 316L stainless steel as a function of impact electron energy", J. Vac. Sci. Technol. A 31, 031601 (2013).