

Basic vacuum test of 500-kV photocathode DC gun components at KEK

Masahiro Yamamoto ^{#,A)}, Takashi Uchiyama ^{A)}, Tsukasa Miyajima ^{A)}, Yosuke Honda ^{A)}, Kotaro Satoh ^{A)}, Shunya Matsuba ^{A,D)}, Yoshio Saitoh ^{A)}, Masanori Kobayashi ^{A)}, Hiroki Kurisu ^{B)}, Ryoichi Hajima ^{C)}, Ryoji Nagai ^{C)}, Nobuyuki Nishimori ^{C)}, Masao Kuriki ^{D)}, Hokuto Iijima ^{D)}, Daisuke Kubo ^{D)}, Makoto Kuwahara ^{E)}, Shoji Okumi ^{E)}, and Tsutomu Nakanishi ^{E)}

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

^{B)} Department of Advance Science and Engineering, Yamaguchi Univ., Ube Yamaguchi 755-8611

^{C)} JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{D)} Grad. Advanced Sciences of Matter, Hiroshima Univ., Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8530

^{E)} Department of Physics, Nagoya Univ., Nagoya, Aichi 464-8602

Abstract

A 500-kV photocathode DC electron gun (2nd 500-kV gun) which can supply the beam of a low emittance ($\epsilon_{n,rms} \sim 0.1$ mm.mrad) and a high average current (> 10 mA) has been developed in collaboration with KEK, JAEA, Hiroshima Univ., Nagoya Univ. and Yamaguchi Univ. The vacuum of the gun chamber has to be lower 10^{-10} Pa level for maintain cathode-lifetime ($> 10^3$ Coulomb ~ 1 day@10mA). A titanium chamber and new material of ceramic were employed to reduce outgassing rate. The result of outgassing rate of the gun chamber is described in this report.

500-kV 光陰極電子源に関する真空特性の評価

1. はじめに

負の電子親和性(NEA)表面状態の半導体カソードを用いる電子源は、カソードの量子効率が高く、また発生直後のビームの熱エミッタンスを低く抑えられるため、高い平均電流かつ低エミッタンスが要求される ERL 用の電子源として有望とされているが、この電子源の一番の問題は、NEA 表面を用いることによるカソード寿命の点であり、mA 級以上の大電流化ではビームと残留ガスの衝突により発生したイオンのカソードへの逆流がカソード寿命を制限する。特に、電子銃内部の電極部周辺で発生したイオンの逆流は防ぎようが無く、現状では実用的なカソード寿命(数千 Coulomb 以上)を得るためには 10^{-10} Pa(以下)レベルの極高真空が不可欠である。

1×10^{-10} Pa の極高真空は、これまでに実現された報告はいくつか存在する^[1]が、そのほとんどが非常にシンプルな構成でガス放出源が少ない条件下で得られており、大型の電極やセラミック管を含む実際の電子銃装置にて 1×10^{-10} Pa の極高真空を実現することは容易ではない。そこで、我々は電子銃を構成する各要素についてガス放出速度を抑えられる材料を選択し、製作した各要素部品の全ガス放出速度評価を現在進めている。本稿では、製作した 500 kV 第 2 電子銃 Chamber およびセラミック管に関する真空特性について述べる。

2. 電子銃 Chamber の製作

500-kV 第 2 電子銃システムの設計に関して昨年の報告にも記載したが^[2]、電子銃 Chamber は、従来のステンレス鋼に比べガス放出速度が低く抑えられ

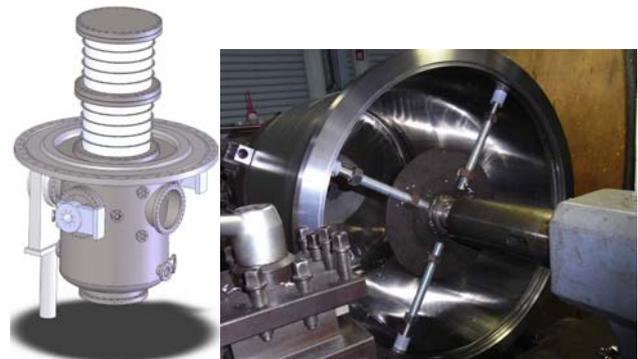


図 1. 電子銃 Chamber とセラミック管が接続した状態の模式図 (左) と Chamber 製作時の様子 (右)。

るチタン材^[3]を用いて製作を行った。Chamber 胴体部の内径は $\phi 628$ mm で厚さ 6 mm の JIS2 種チタンで製作され、最も大口径のフランジは外径で $\phi 720$ mm ある。このフランジ部のシールはメタル O リングを用いるため SUS 程度の硬度のある JIS3 種チタン(鍛造後の焼鈍処理は 750 °C, 1 時間でブリネル硬度 $HB190$ 以上)を用いる。ICF フランジはより硬度の高い 6Al-4V チタン合金(鍛造後の焼鈍処理は 700 °C, 1 時間でブリネル硬度 $HB300$ 以上)を用いて製作した。表面処理は、#400 相当のバフ研磨を施し、溶接部のスケール除去はバフ粉の残留を避けるためワイヤーブラシによる除去のみとし、最終的にシール面を除く全ての部分に対し化学研磨(三愛プラント工業:サンチタン処理)を施した。図 1 に電子銃部の模式図と製作時の様子を示す。

3. 電子銃 Chamber のガス放出速度評価

ガス放出速度の測定方法にはいくつかの方法があ

[#] masahiro@post.kek.jp

るが¹⁴⁾、今回は流量法(スルーポット法) および蓄積法(ビルドアップ法)による測定を実施した。

3.1 流量法による測定

流量法とは、排気系と測定装置の間に既知の小さなコンダクタンス C [m^3/s]をもつオリフィス等を挿入し、その上流部の圧力 $P1$ [Pa]と下流部の圧力 $P2$ [Pa]との差からオリフィス上流部からの全ガス放出速度 Q [$\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$]を求める方法である。

$$Q = (P1 - P2) \times C \quad (1)$$

今回は、ステンレス製 Chamber 内部に $\phi 3$ mm 厚さ 5 mm 相当のオリフィス ($C=6.4\text{E-}4$ m^3/s 、常温素換算)が設置された測定装置(コマヤマエレクトロン製)を用いた。オリフィス前後の真空圧力の測定にはヌードイオンゲージ(NIG)を使用した。オリフィスで仕切られた2つの Chamber はオリフィス穴の他、バルブを介したバイパス管が接続されており、ベーキング実施時の上流部の排気はバイパス管を介して行われる。排気系には、排気速度 300 L/s(H_2)、圧縮比 1×10^4 (H_2)の磁気浮上ターボ分子ポンプ(TMP)、補助ポンプに排気速度 250 L/min のドライポンプを使用した。

● 測定装置単体のガス放出速度

まず、最初に測定装置自身からの全ガス放出速度の測定を実施した。測定装置は 200°C で 50 時間ベーキングが行われ、ほぼ常温になってから 6 時間後(降温開始 24 時間後)において、バイパスバルブを閉め測定を実施したところ、測定装置自身からの全ガス放出速度は 4.2×10^{-10} $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ であった。

● 電子銃 Chamber のガス放出速度

上記のガス放出速度測定装置を電子銃 Chamber 本体の ICF203 フランジに接続し、200°C、50 時間のベーキングを実施した。

降温後(Chamber 温度 30°C)の真空度は 2.6×10^{-6} Pa であったが、その後実施したリーク試験にて電子銃 Chamber とガス放出速度測定装置の接続部 ICF203 フランジよりリークが発生していることが判明した。チタンはステンレスに比べ熱膨張率が約半分程度であり、このような異種材フランジの接続でベーキングによって漏れが発生するリスクは通常と同種材の接続に比べやや高い。今回のリークはボルトの増し締めで止まり、到達真空度はほぼ TMP の排気限界となる 5.0×10^{-8} Pa となった。その時点で、バイパスバルブを閉め、オリフィスの両端の真空度が落ち着くまで 30 分保持後の測定において、上流部の真空度全ガス放出速度は 2.3×10^{-10} $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ であった。

この測定では、電子銃 Chamber 側にオリフィス上流部の測定系が含まれており、今回得られた全ガス放出速度には、オリフィス上流部の測定系からのガス放出の影響も含まれている。今回得られた全ガス放出速度は、先に述べた測定装置自身の全ガス放出速度とほぼ同等であり、大部分は測定装置自身からのガス放出であると推測され、電子銃 Chamber 本体からの全ガス放出速度は 10^{-11} $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ レベルである可能性が高いことが分かった。装置の排気系概略お

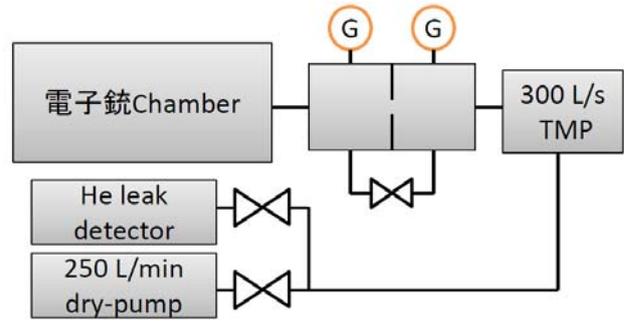


図 2. 流量法によるガス放出速度評価の装置概要図

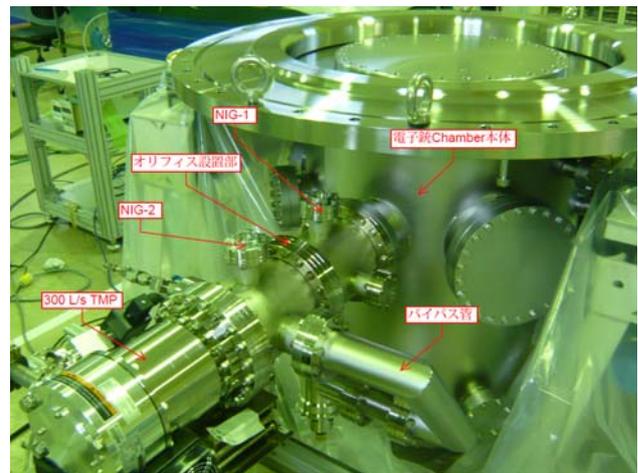


図 3. 流量法によるガス放出速度評価の装置写真および写真を図 2, 3 に示す。

3.2 蓄積法による測定

流量法による測定では、測定装置自身からのアウトガス、真空計の感度係数の差などの影響があり、上記のように 10^{-11} $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 台の測定は容易に行えない。そこで、蓄積法による追加評価を実施した。

蓄積法とは、排気系と評価を実施したい装置の間のバルブを閉じ、一定時間内の容積 V [m^3]をもつ装置内の圧力上昇 $\Delta P / \Delta t$ [Pa/s]を測定することにより全ガス放出速度 Q [$\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$]を評価する方法である。

$$\Delta P / \Delta t = Q / V \quad (2)$$

ここで、電子銃の内容積(V)は 0.245 m^3 、ブランクフランジの表面積を含む内表面積は 2.39 m^2 である。これらの値は電子銃 Chamber の図面上からの計算値であるが、製作後の寸法公差の測定結果より、容積・表面積の誤差は 1% より十分低く抑えられていると推測される。

電子銃 Chamber 内部の真空圧力の測定には、極高真空計(AT ゲージ)¹⁵⁾を使用した。蓄積法によるガス放出速度測定時には、測定開始前に十分な degas を実施し、真空度が元の状態に落ち着いてから測定を実施している。測定時の真空計のエミッション電流は 1mA である。

蓄積法による測定のためのベーキングは下記に示す工程で 2 度行った。1 回目および 2 回目の測定結

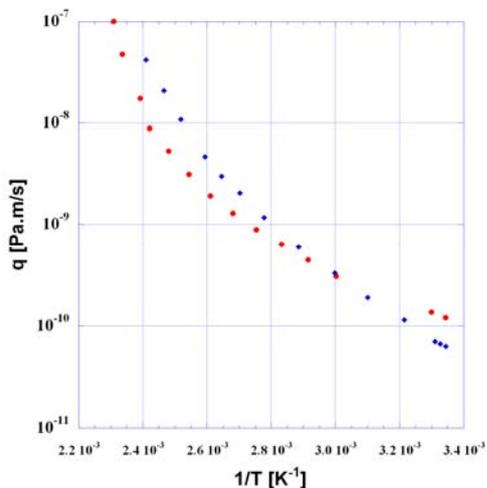


図4. 150°C, 50 時間ベーキング実施後(降温時)のガス放出速度 q と Chamber 壁温度 (逆数) の関係。赤点は1回目、青点は2回目の測定結果。

果を図4に示す。

1度目は、大気開放状態の電子銃 Chamber を 1m 長の ICF114 口のベローズ管・メタルアングルバルブ(合成コンダクタンス約 20 L/s 相当)を介して TMP 口に接続し排気を行う条件にて、150°C, 50 時間のベーキングを実施した。降温時は、定期的に蓄積法によるガス放出速度の測定を実施し、本体温度とガス放出速度の関係を調べた。降温後の到達真空度はベローズからのアウトガスの影響が大きく 1.0×10^{-7} Pa であり、全ガス放出速度 Q は 2.9×10^{-10} Pa·m³/s、表面積で除したガス放出速度 q は 1.2×10^{-10} Pa·m/s であった。

そこで2度目の測定は、ベローズからのアウトガスの影響を抑えるためメタルアングルバルブに直に TMP を接続し(合成コンダクタンス約 100L/s)排気を行った。この作業の際、電子銃 Chamber は純窒素によるパージを行っている。ベーキングは1回目と同様に 150°C, 50 時間実施した。降温後の到達真空度は TMP 排気限界に近い約 6×10^{-8} Pa、全ガス放出速度 Q は 1.5×10^{-10} Pa·m³/s、ガス放出速度 q は 6.3×10^{-11} Pa·m/s であった。このガス放出速度は、真空炉にて高温で十分焼き出しが行われたステンレス製 Chamber^[6]と同等かそれ以下の値であり、作製したチタン製電子銃 Chamber は予定通りガス放出速度が抑えられていることを確認できたと言える。

4. セラミック管の製作・評価

4.1 セラミック素材からのアウトガスの評価

500 kV 電子銃用のセラミック管には、600 kV 以上の耐電圧性能の他、電子銃 Chamber と同等レベルの低アウトガス性能が要求される。セラミック素材の選択を行う際、素材からのガス放出量を見積もるためにセラミックサンプル片を 500°C まで連続的に温度を上げて全ガス放出速度ならびに残留ガス分析を行う昇温脱離法による評価を行った。代表的な従来の高純度で微粒子・緻密なアルミナセラミック 2

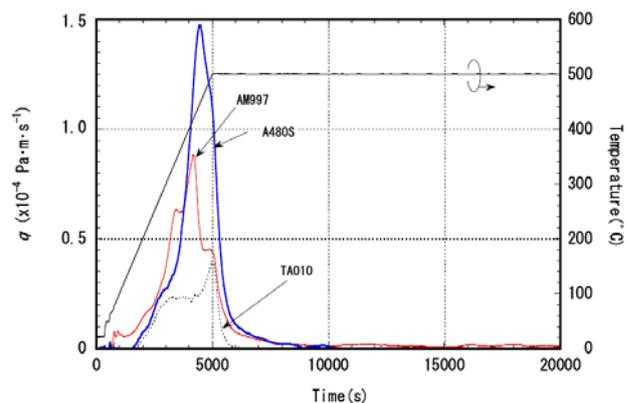


図5. 昇温脱離測定でのサンプルからのガス放出速度と温度の時間変化の様子。

種類、および主成分のアルミナの他に遷移金属成分が混合された耐沿面放電性をもつセラミック (TA010: 京セラ製) について評価を実施した。結果を図5に示す。

今回の昇温脱離法の測定では3種類すべてのサンプルにおいて放出されるガスの主成分は水となっている。極高真空生成の観点では、200°C 程度のベーキングを経た後の常温時の水素のガス放出速度をいかに低く抑えるかが重要であり、今回の測定結果の良し悪しが直接関係するとは断言できないが、今回の昇温脱離の測定で、最もアウトガスが少なく、従来のアルミナより高い耐電圧性が望める TA010 を実機用セラミック管の素材として採用した。

4.2 セラミック管の作製

セラミック管の構造は、名古屋大の 200-kV スピン偏極電子源および JAEA 250-kV 熱電子源で実績のある多段分割方式とし、500 kV 電子銃 1 号機^[7]との互換性を考慮し、セラミック各段の形状は同じとした。ただし、セラミック管 1 組に対する分割を半分とし、2 組合せて使用することで破損・リーク等のトラブルの際、半分を交換して対処できる構成とした。

粉砕・調合されたセラミック原料を加圧成型し焼成されたセラミックは、指定の寸法になるまでダイヤモンド工具による研削が実施される。今回作製したセラミックはメタライズされて接合部となる端面は Ra 1.6mm 相当、側面部は Ra 6.3mm 以下の表面粗さとなっている。研削完了後、カラーチェックを実施し欠陥が無い事を確認し、染料や不純物および加工時に生じた表面歪みの除去のため再度焼成温度よりやや低い温度で焼いた後、接合部となる端面のメタライズが実施される。各部の接合に関しては、分割部は厚さ 0.7mm のコバルト板がセラミック管とろう付けされ、両端のフランジ側は、バックアップリングを挿入し、コバルトとセラミックの間で発生する歪みの集中を緩和させている。本セラミック管両端に付くフランジは電子銃 Chamber と合わせてチタン材(JIS-3 種)を採用していることから、コバルト板とフランジの接合部となるチタン製スリーブとの接合はろう付けによって行った。ろう付け工程後、

ブラスト処理によりろう付け時に付着したセラミック表面の汚れを除去した後、チタン製スリーブとフランジが溶接され完成した。

一般的にセラミック素材自身からのアウトガスは少ないとされているが、実際のセラミック管では、素材自身のアウトガスの他、メタライズやろう付け部、フランジやコバール等の接合構造部分からのアウトガスも考慮する必要がある。電子銃 Chamber と同等のガス放出速度評価を製作した 2 組のセラミック管に対して今後実施する予定である。

5. まとめ・今後

極高真空生成に不可欠な条件の一つであるガス放出速度の抑制のため、チタン製電子銃 Chamber およびセラミック管の作製と評価を行った。ベーキング後の電子銃 Chamber のガス放出速度 q は 6.3×10^{-11} Pa·m/s であった。セラミック管には、昇温脱離による測定で最もアウトガスが少なく、耐浴面放電性をもつ新素材のセラミック TA010 を採用し、ベーキングおよびガス放出速度の評価を実施する予定である。

今後は、電子銃 Chamber にセラミック管、各種電極を製造し設置した状態で全ガス放出速度の評価を行い、平行して極高真空環境においても有効な排気速度が得られるベーカブルクライオポンプについて、ガス吸着量と排気速度の関係を明らかにし、両者の結果から、現状のシステムで 1×10^{-10} Pa(以下)の極高真空生成と維持について実現可能であるかを確かめる予定である。

6. 謝辞

今回の報告内容に関して、チタン製電子銃 Chamber の製作ならびに流量法によるガス放出速度測定に関してはコミヤマエレクトロン(株)のご協力を頂いた。また、セラミック材料からのアウトガス評価に関しては(株)アルバック筑波超材研のご協力を頂いた。この場をお借りして感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] H. Yamakawa, Vacuum 44, 675 (1993)
- [2] M. Yamamoto et al., 第6回加速器学会プロシーディングス
- [3] H. Kurisu et al., J. Vac. Sci. Technol. A21, L10 (2003)
- [4] P.A.Redhead, J. Vac. Sci. Technol. A 20, 1667 (2002)
- [5] H. Akimichi et al., J. Vac. Sci. Technol. A 15, 753 (1997)
- [6] P. A. Adderley et al., Phs. Rev. ST Accel. Beams 13, 010101 (2010)
- [7] R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010)