

DEVELOPMENT OF EXTREME HIGH VACUUM SYSTEM FOR HIGH BRIGHTNESS ELECTRON SOURCE OF ERL

Masahiro Yamamoto ^{#,A)}, Hajime Yoshida ^{B)}, Hiroki Kurisu ^{C)}, Tohru Honda ^{A)}, Yasunori Tanimoto ^{A)}, Takashi Uchiyama ^{A)}, Takashi Nogami ^{A)}, Masanori Kobayashi ^{A)}

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

^{B)} AIST, Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563

^{C)} Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, Ube, Yamaguchi 755-8611

Abstract

A high brightness electron gun is under development to meet the requirements for the Energy Recovery Linac (ERL). The gun utilizes a GaAs-type photocathode to which a dc high voltage of 500 kV is applied, and requires an extreme high vacuum of below 1×10^{-10} Pa to preserve a Negative Electron Affinity (NEA) state on the cathode surface for a sufficiently long period of time. All of the vacuum components in the gun system (a titanium chamber, a couple of ceramic insulators, guard rings, etc.) should have a low outgassing rate, and the pumps should function under the extreme high vacuum. In order to understand the actual performance of the vacuum system, we have precisely performed a measurement of the outgassing rate by rate-of-rise (RoR) method, as well as a pumping speed measurement of a bakeable cryopump using a standard conductance element.

ERL 高輝度電子源のための極高真空系の開発と評価

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy Recovery Linac, ERL) では、低いエミッタンスかつ高い平均電流の電子ビーム生成が可能な電子源が不可欠である^[1]。入射器において、 $1 \pi \text{ mm mrad}$ 以下の低い規格化エミッタンスの電子ビームを生成するため、電子源には、負の電子親和性 (Negative Electron Affinity, NEA) 表面状態の半導体光陰極を用いる。このカソードは、適当な波長のレーザー光により価電子帯から伝導帯へ電子を励起し、伝導帯の基底準位付近にある冷たい電子群を、NEA 表面を介して真空中へ取出すことが可能であるため、電子ビーム発生直後のエミッタンスを低く抑えることが可能であり、また量子効率も近赤外領域において数~10%程度と高いため^[2]、レーザー系に対する負荷が一般的に用いられる金属の光陰極と比較し大きく軽減され、ERL に必要とされる低エミッタンス・高い平均電流の CW 電子ビームの供給に対して有利な特長がある。しかしながら、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 相当以上の状況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^{[3],[4]}。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必要になると推測される^[5]。

1×10^{-10} Pa の極高真空を生成するためには、①真空容器内の全ての構造体からの全ガス放出速度を抑え、②極高真空環境においても高い実効排気速度を有する排気系を用いることが要求される。本稿では、

製作した 500 kV 第 2 電子銃装置^[6]の全ガス放出速度の評価、およびペーカブルクライオポンプの排気速度の評価について述べる。

2. 全ガス放出速度の評価

2-1. 電子銃部の全ガス放出速度測定系

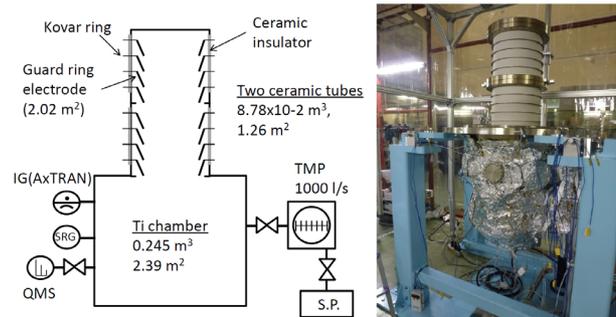


図 1: 全ガス放出速度評価系の概略図 (左) と装置の写真 (右)

電子銃部は真空容器材質としてガス放出速度を低く抑えられるチタン材を用いており^[7]、真空容器内側の総表面積は 2.39 m^2 、容積は 0.245 m^3 である。500 kV 以上の高電圧状態を保持するため、高圧耐電圧性能を有するアルミナ系セラミック (京セラ製:TA010、2 組の総表面積 1.26 m^2 、容積 $8.78 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 相当) を使用し、さらにセラミック部内部はセラミック管での絶縁破壊・真空リークの問題を防ぐため、多段に分割されたセラミックの各所に図に示すようなチタン製のガードリング電極(総表面積 2.25 m^2 相当)を設置する。これらは、ICF253 オールメタ

ルゲートバルブ(VAT 製 48146-CE01)を介して接続された粗排気系にて排気される。粗排気系として、1000 L/s の磁気浮上ターボ分子ポンプ (Edwards 製 STP-1003) および 250 L/min スクロールポンプ (アネスト岩田製 ISP-250) を使用した。このような大きな排気速度で排気する理由は、主排気系として 10^4 L/s 相当以上の非蒸発型ゲッター(Non Evaporable Getter, NEG)を使用し、NEG の活性化時に放出されるガスを効率よく排気するためである。内部の圧力の測定は、極高真空計(ULVAC 製 AxTRAN)およびスピニングローター真空計(SRG)(ライボルト製 VISCOVAC VM211)を用い、残留ガス分析には INFICON 製 H100M を超低アウトガス化として改良された WATMASS^[8](有限会社真空実験室製)を使用している。今回の全ガス放出速度の測定は、全てビルドアップ法 (rate-of-rise method) により行った。全ガス放出速度評価系の概要および装置の写真を図 1 に示す。

2-2. 各構成部品単体での簡易的な評価

電子銃を構成する各部品からのガス放出量を見積もるため、主要な部品についてはそれらを全て組み上げる前の段階で単独で簡易的な評価を実施した。評価の際、重要な圧力の測定について一般的には測定器自身からの放出ガスまたは排気作用の影響が無い信頼性の高い圧力測定が可能な真空計の一種である SRG を使用するが、適正な圧力測定範囲が中～高真空領域(10^{-1} ~ 10^{-5} Pa)に限られるため、全ガス放出速度が小さく、真空容器の容積が大きい系では測定に時間がかかる欠点がある。このため、簡易的な測定では、超高真空領域の測定が可能な電離真空計による測定を行った。電子銃部のチタン製真空容器は、150°C, 50 時間、セラミック管は 200°C, 100 時間のベーキングが実施され、室温状態に戻った後の全ガス放出速度結果を表 1 に示す。

各構成部品のベーキングは 2 回以上実施し、各ベーキングの間は大気開放 30 分以上のイニシャライズを実施している。測定には、電子銃真空容器には AxTRAN(測定時 emission 電流 1 mA)、セラミック管には Canon-ANELVA 製 NIG-2TF(測定時 emission 電流 4 mA)を使用した。初回よりも 2 回目の方がいずれも全ガス放出速度は低下しており、ベーキングによって材料内部に含まれるガス(主に水素)の濃度が低下していることが推測される。

表 1: 各構成部品の全ガス放出速度の簡易測定結果

	単位: Pa m ³ /s	
	1回目	2回目
電子銃 Ti chamber	1.52×10^{-10}	1.27×10^{-10}
セラミック管 #1	4.24×10^{-10}	2.59×10^{-10}
セラミック管 #2	2.87×10^{-10}	2.08×10^{-10}

圧力の測定値はN₂換算値を使用

2-3. 組上げ後の全ガス放出速度・残留ガス分析結果

前述の単体によるベーキングおよびガス放出速度の評価が実施された各構成部品と新たにチタン製のガードリング電極を図 1 右の写真のように組上げた

後、約 110 時間排気後の圧力は 1.5×10^{-7} Pa であり、この時の簡易的な全ガス放出速度測定の結果は 2.8×10^{-9} Pa m³/s であった。その後、チタン製真空容器 150 °C、セラミック管 200 °C で 100 時間のベーキングを実施した。ベーキング中の残留ガス分析結果を図 2 に示す。

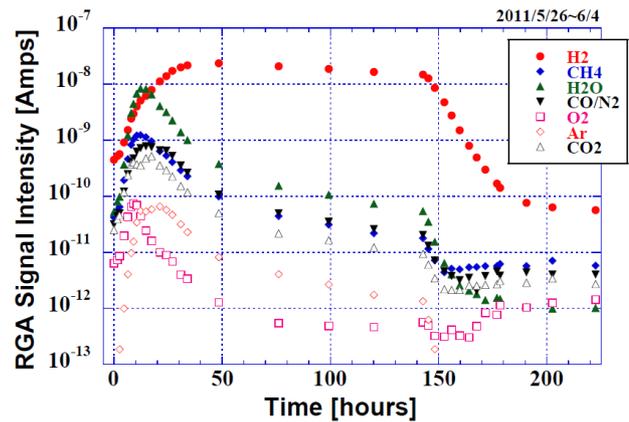


図 2: ベーキング時の残留ガス分析結果

昇温開始後約 40 時間で定常状態となり、その後 100 時間保持する。その間、NEA 表面にとって悪影響を及ぼす水の分圧はゆっくりではあるものの減少し続け、1 桁程度低下している。降温後に $m/z=16, 28, 32, 44$ の若干の上昇が見られるが、He リークディテクタでのリークの検出は確認されず、降温時に多数操作したゲートバルブからの放出ガス、および今回使用した粗排気系において、TMP 下流部からの大気成分の逆拡散の影響が見られているものと推測される。ゲート弁を閉じた封じ切りの状態での分析では、放出ガスの 95%以上が水素であった。降温後、十分室温に下がった状態の圧力は 7.1×10^{-9} Pa であり、この時の簡易的な全ガス放出速度測定の結果は 3.3×10^{-10} Pa m³/s (H₂ 換算値) であった。

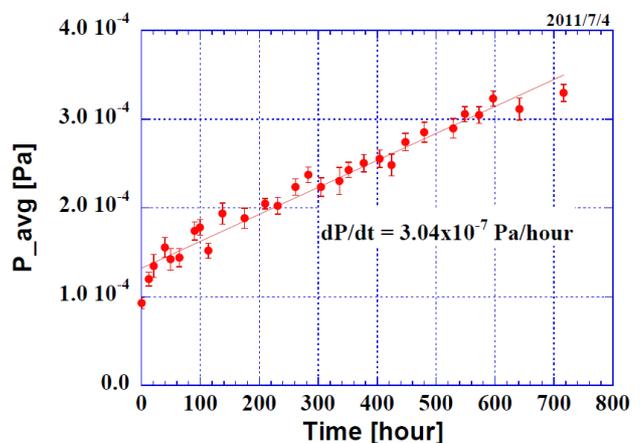


図 3: SRG 測定によるビルドアップ時の圧力上昇の測定結果 (SRG 圧力換算設定は N₂)

より正確に全ガス放出速度を評価するために、その後 SRG によるビルドアップ測定を実施した。その際は、電離真空計の電源は OFF の状態とし、QMS 接続口のバルブも閉じてこれらからのアウト

ガスの影響が無い状態で測定を行っている。測定開始から1カ月間のビルドアップ法による測定の結果を図3に示す。測定開始時に既に 1×10^{-4} Pa 程度の値となっているのは、計測系が最初からもつオフセットの影響である。ここでの測定で重要な点は、測定期間中の圧力上昇速度であるため、このオフセット値は結果に影響しない。約700時間の封じ切りによる圧力上昇の傾向は線形であり、1時間あたり 3.04×10^{-7} Pa の上昇速度となった。QMS測定より放出ガス成分はほぼ水素であること、およびSRG測定でのビルドアップ試験の結果と真空容器の体積から、SRG指示値に対して H_2 ガスとして補正求められる全ガス放出速度は 1.05×10^{-10} Pa m³/s である。

2-4. 考察

SRGによる測定では、電離真空計による個別および組み上げ後の簡易測定よりも低くなる結果となった。特にセラミック管の結果には大きな差があるが、これは簡易的な測定の場合、測定系からの放出ガスが大部分を占めていたことを示唆しており、今回採用したセラミック管およびガードリング電極そのものからの全ガス放出速度は十分に低く抑えられていると推測される。今回、このような低い全ガス放出速度が得られた要因として、①低アウトガス材料として電子銃真空容器およびガードリング電極にチタン材を採用したこと、②セラミック材料として、昇温脱離法による測定で最も放出ガスの小さい京セラ製TA010を採用したこと、③ろう付けや溶接の接合部にガス溜まりとなるような大きな欠陥がないこと、④これまでのベーキングの繰り返しによる脱ガス効果が挙げられる。また、アウトガスとは直接関係ないが、フランジの接合部をできる限り真空容器素材であるチタンに合わせたことも、ベーキングによるリークの発生を抑える上で有効であった。

3. 排気速度の評価

3-1. 排気速度の評価系

排気速度の評価については、今回測定対象としたベークブルクライオポンプ^[9]にチタン製真空容器を接続し、内部の圧力を測定するための2つの極高真空計(エリコンライボルト製エクストラクターゲージ、およびULVAC製AxTRAN)を設置している。また、精密なガス導入を行うため、産総研によって開発された「標準コンダクタンスエレメント(Standard conductance element)^[10]」が接続されている。このエレメントは微小な孔のある焼結フィルターが使用されており、孔の径が1 μm以下と小さく、 10^4 Pa以下という比較的高い圧力領域において、孔の内部では分子流条件が成り立つためコンダクタンスが一定となり、広い圧力範囲でフィルター上流部の圧力に比例したガス導入量が得られる。また、ガス導入系上流部の圧力が高いため真空の扱いが容易になる。エレメント上流部の圧力測定にはガス種に依らない高精度な圧力測定が可能な隔膜真空計(Capacitance Diaphragm Gauge, CDG)であるMKS製バラトロン

(626B11TCE)を用いた。排気速度評価系の概要を図4に示す。

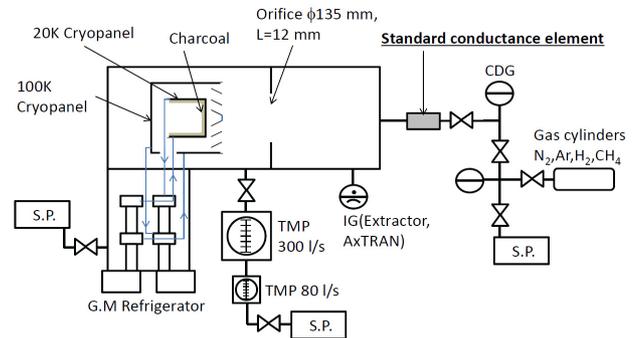


図4: 排気速度評価系の概略図

3-2. 排気速度の測定原理および測定条件

排気速度 S は、ガスの導入量 Q とそのときの真空容器内の圧力 P から求めることができる。

$$S \text{ [m}^3/\text{s]} = \frac{Q \text{ [Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s]}}{P \text{ [Pa]}}$$

この測定の要は、正確なガス導入量と圧力の測定であり、電離真空計を利用する場合、導入するガス種によって感度が異なるため補正が必要となる。ガス導入量を決める上で重要なエレメントのコンダクタンス C は産総研において校正されており、今回使用したエレメントは $T_0=300.5$ K において $C = 3.03 \times 10^{-10}$ m³/s である。エレメント上流部の圧力 P_f と比較し、内部の圧力 P が十分小さい場合のガス導入量 Q は次式で与えられる。

$$Q \text{ [Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s]} = P_f \text{ [Pa]} \cdot C \text{ [m}^3/\text{s]} \cdot \sqrt{\frac{28}{M_a}} \sqrt{\frac{T \text{ [K]}}{T_0}}$$

ここで、 M_a は導入するガスの分子量、 T はガス導入時のエレメントの温度、 P_f はエレメント上流部の圧力である。排気速度の圧力依存性の測定は、最初にガス導入前の真空容器内の圧力 P_0 を測定し、ガス導入後の真空容器内の圧力 P との差をとり正味の圧力上昇分に、導入したガスに対する電離真空計の比感度係数 α をかけた値でそのときのガス導入量 $Q(P)$ を割って算出した。

$$S_{(P)} = \frac{Q(P_f)}{\alpha \cdot (P - P_0)}$$

α は窒素に対して1であるが、他のガス種によって値は異なり、また真空計によっても値は異なる。今回使用したAxTRANおよびExtractor真空計について、産総研にて実測された下記表2に示す値を用いてガス導入時の圧力を計算した。

表2: 各ガス種・真空計に対する比感度係数

	AxTRAN	Extractor
H ₂	0.48	0.45
CH ₄	1.69	1.56
Ar	1.43	1.41

3-3. ベーカブルクライオポンプの排気速度評価

クライオポンプの排気作用として、低温凝縮(cryo-condensation)、低温吸着(cryo-sorption)、凝縮する層によって吸着気体の埋め込み(cryo-trapping)の3つがある。ベーカブルクライオポンプは、吸着剤を十分加熱し脱ガスを行うことにより、特に低温吸着による排気限界を通常のクライオポンプより低くできるポンプである。

電子銃にはクライオパネル4 Kのベーカブルクライオポンプの使用を予定しているが、ここでは予備的な試験として、クライオパネル20 Kのベーカブルクライオポンプを用いた試験を実施した。排気速度評価試験を行う前の準備段階として、クライオポンプは、200~230°Cで約80時間のベーキングを実施し、室温に戻った後にクライオポンプを起動し排気を行う。今回、冷凍機起動前の真空容器内圧力は約 1×10^{-7} Paであった。冷凍機起動後、約2時間後より有効な凝縮・吸着作用による排気が開始し、粗排気系と切り離す。その後はクライオポンプ単独での排気状態となり6時間以上経過後、内部の圧力が十分平衡状態となった後に排気速度の評価試験を行っている。測定開始前の圧力は 1.2×10^{-9} Paであった。

H₂, CH₄, N₂, Arの4種類の導入ガスに対する排気速度の測定結果を図5に示す。測定時、ガスの導入はN₂, Ar, CH₄, H₂の順に実施し、各測定は前に導入したガスが十分に排気された後に実施している。ガスの導入は、エレメント上流部に800~1000 Pa程度のガスを導入し、徐々に排気しながら真空容器へのガス導入量を減らす方向で測定を実施している。また、この結果の容器内圧力Pの測定値としては、AxTRANでの測定結果を使用しているが、Extractor真空計においても同様の傾向を示している。(今回の試験では、Extractor真空計の測定値を使用した場

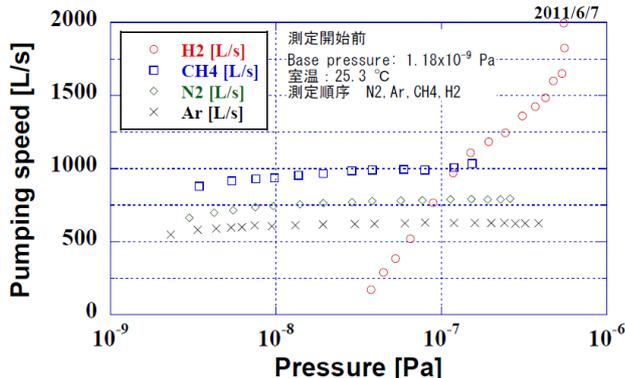


図5: ベーカブルクライオポンプのH₂, CH₄, N₂, Arに対する排気速度測定の結果。(真空容器内部の圧力値はAxTRANの指示値を使用。)

合、 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ Paの範囲でN₂に対して排気速度が $10 \pm 1\%$ 低い結果となった。)

3-4. 考察

結果より、CH₄, N₂, Arに対する排気速度は 10^{-9} Pa領域においても高く、吸着剤表面への低温凝縮および低温吸着による排気がなされていると推測される。その一つの証拠として、クライオポンプの排気口のコンダクタンス(N₂, T=300 Kに対して $1.53 \text{ m}^3/\text{s}$)と導入したガスに対する実測された排気速度より、ポンプに入射した分子数N₀に対する排気された分子数N_pから求められる分子の排気確率(N_p/N₀)は、この3種のガスについてはほぼ0.5程度と一定である。

一方で、H₂に対しては 10^{-7} Pa領域の段階で既に排気速度は著しい減少の傾向にあり、 10^{-8} Pa以下の領域においてはほとんど排気能力を示さない結果となった。その要因の一つは、水素の蒸気圧は20 Kにおいては 10^5 Paと前述の3種のガスと比較しても桁違いに高く、低温凝縮による排気ができないことにある。また、ベーキングにより吸着剤の脱ガスを行ったといえども、吸着剤自身に含まれる水素が極高真空生成のうえでまだ十分に低い状況ではないため、 10^{-8} Pa以下の領域で吸着と脱離がほぼ平衡状態となり排気速度が急激に低下していると推測される。以上の結果より今回の真空容器内の到達圧力は吸着剤に残留している水素(低温吸着の限界)により制限されていることは間違いなさそうである。

4. まとめ・今後

今回、ほぼ実際の電子銃構成となる状態での全ガス放出速度評価を行い、SRG計測による約700時間のビルドアップ試験の結果、全ガス放出速度は 1.05×10^{-10} Pa m³/sと低く抑えられていることを確認し、極高真空生成に必要な一つの条件である低アウトガス化はほぼ達成していると言える。今後、未装着であるカソード、アノード電極を設置した場合の最終評価を実施する予定である。

電子銃へ設置するベーカブルクライオポンプは、最終段のクライオパネルを4 Kまで冷却可能な設計となっており、水素の蒸気圧と比較すると 10^4 Pa以下と大幅に低く抑えられ^[1]、低温吸着による排気も期待できる。今後、同じ評価系を使用して排気速度の評価を実施し、 10^{-10} Pa領域においても十分な排気速度が得られることが確認できた時点で電子銃装置へ組み込み、H₂に対して約 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 相当の排気速度を有するNEGとの組合せによって 1×10^{-10} Pa(以下)の極高真空生成に挑む予定である。

5. 謝辞

本実験は多数回・幾日ものベーキングを行って得られた結果であり、PF光源スタッフ並びに三菱システムサービスの皆様の多大なるご協力に支えられた。また、アウトガスを抑えるため溶接部の無いガードリング電極の製造にあたっては多くの困難があったが、コミヤマエレクトロン(株)、(株)北嶋絞製作所の皆様のご尽力により無事完成となった。

この場をお借りして感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] R. Hajima, N. Nakamura, S. Sakanaka, Y. Kobayashi, “コンパクト ERL の設計研究”, KEK Report 2007-7, JAEA-Research 2008-032, Feb. 2008
- [2] C. K. Sinclair et al., Proc. Particle Accelerator Conference, Vancouver, B.C., Canada, (1997) 2864.
- [3] K. Aulenbacher et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A **391**, (1997) 498.
- [4] C. K. Sinclair et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, (2007) 023501.
- [5] J. Grames et al., Proc. Polarized Ion Sources, Targets and Polarimetry (PSTP2007), New York, (2007) 110.
- [6] M. Yamamoto et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, (2010) 802. [in Japanese]
- [7] H. Kurisu, K. Ishizawa, S. Yamamoto, M. Hesaka and Y. Saito: ”Application of Titanium Materials to Vacuum Chambers and Components,” Journal of Physics: Conference Series **100**, (2008) 092002.
- [8] F. Watanabe and Akinari Kasai, J. Vac. Sci. Technol. A **13**, (1995) 497.
- [9] H. Yamakawa, Vacuum **44**, (1993) 675.
- [10] H. Yoshida et al., "New leak element using sintered stainless steel filter for in-situ calibration of ionization gauges and quadrupole mass spectrometers", Vacuum (2011), doi:10.1016/j.vacuum.2011.02.013 [in press]
- [11] R. E. Honing and H. O. Hook: RCA Review (Sept. 1960) p.363