

光陰極直流電子銃無塵化技術の開発

DEVELOPMENT OF A DUST-FREE TECHNIQUE FOR A HIGH-FIELD PHOTOCATHODE DC ELECTRON GUN

永井良治 *A)、沢村勝 A)、西森信行 A)、羽島良一 A)

Ryoji Nagai *A), Masaru Sawamura A), Nobuyuki Nishimori A), Ryoichi Hajima A)

A)Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

In order to realize a high-brightness and monochromatic light source based on accelerator technologies, increasing of the cathode surface field of an electron gun is mandatory. Dust-free technique is a key technology to realize a high-field electron gun. We propose a new style dust-free technique. In this paper, R&D status and result of the preliminary test of the dust-free technique are reported.

1. はじめに

これまでの加速器技術開発において、電子ビームの高輝度化、加速器の小型化を目的とした加速器要素の高電界化が進められてきた。表面に付着したダストが原因と思われる電界放出が高電界化の障害となっていた。この問題を解決するために様々な方法での表面清浄化技術が試みられてきた。特に超伝導加速器の技術開発では、高圧純水洗浄などのクリーン技術^[1]の開発により大きな性能向上がなされた。光陰極直流電子銃の開発においても、これまでの加速器要素開発と同様に、ダストにより電子の引き出し電界が制限されるという問題が生じている^[2]。真空中の高電圧絶縁性能にダストが関わっていることは一般的に知られている^[3,4]が、ダストに起因すると思われる現象は、それ自体に不明な点が多く、十分な対策が講じられていない。

これまでの光陰極直流電子銃の開発では、超伝導加速器でのクリーン技術を参考に、組み立て前の電子銃部品の表面を高圧純水洗浄およびガスブローによりダストを除去し、組み立てをクラス 100 以下のクリーンブース中で行うことで、電子銃真空容器中へのダストの混入を防止するという方法を採用してきた。しかし、組み立て工程中でのダストの混入を完全に防ぐことができず、高電圧 (500 kV 程度以上) かつ高電界 (数 MV/m 以上) でダストの影響が現れ、電子ビームの引き出し電界が制限されている。この問題を解決し、最先端の電子ビーム駆動型光源で要求されている電子ビーム性能^[5]を得るには、真空高電圧でのダストの挙動を解明し、ダストに起因する問題を解決する必要がある。そこで本報告では、これまでの無塵化手法の問題点について検討し、新たな手法の提案をする。また、新たな手法による無塵化のための予備試験を行ったのでその結果についても報告する

2. 高電界光陰極直流電子銃と無塵化技術

日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、電子ビーム駆動型光源用加速器として期待されているエネルギー回収型リニアック (ERL)^[6]の電子源として光陰極直流電子銃の開発を行ってきた^[2,7]。ERL は超伝導加速器を主加速器とし、高輝度、大電流電子ビームの CW 加速が可能な加速器である。従って、ERL 用の電子源とし

ては高輝度、大電流電子ビームを CW で生成可能である必要がある。現在の加速器技術でこれを達成する方法として、半導体光陰極を備えた光陰極直流電子銃を選択した。光陰極直流電子銃は半導体光陰極から高繰り返しレーザーにより引き出された電子を電極間に印加された直流電界により加速することで高輝度、大電流電子ビームを CW で生成する電子銃である。高輝度の電子ビームを得るには、空間電荷力によるエミッタンスの増加を抑えるために 500 kV 程度以上の加速電界が必要であるとされ^[8]、JAEA では、直流高電圧を安定に印可するための問題を解決し、光陰極直流電子銃により 500 kV での電子ビーム生成に成功している^[2]。

この光陰極直流電子銃の開発過程において、高電圧 (500 kV 程度以上) かつ高電界 (数 MV/m 以上) でダストの影響と思われる放電、電荷放出が発生し高電圧印可が困難になった。そこで、電極間隙を広くし、電極に印可する電界を低くすることで、この問題を解決した。その結果、500 kV を印可した際に得られる光陰極表面の電界は 5.8 MV/m^[2]に制限された。電子銃で生成される電子ビームのエミッタンスと陰極表面の電界の間には Fig. 1 に示すような関係があり^[9]、高輝度の電子ビームを生成するには陰極表面に高電界を印可し、電子ビームを引き出す必要がある。電子ビームの熱エネルギーが小さいことで超低エミッタンス電子ビームを得られることが光陰極直流電子銃の特徴であるが、熱エネルギーが 80 meV 程度であったとしても、バンチ電荷 77 pC を超える電子ビームで規格化エミッタンス 0.1 mm-mrad 以下の電子ビームを生成するには 10 MV/m 程度以上の引き出し電界が必要であることが、この図から分かる。高電圧かつ高電界で動作する光陰極直流電子銃を実現するには、電子銃を無塵化することで、ダストに起因する放電、電界放出の問題を解決する必要がある。

3. 無塵化手法の提案

上述のように、高電界光陰極電子銃を実現するには真空容器中のダストを完全に除去し、ダストに起因する放電や電界放出の問題を解決するために、これまでの、高圧純水洗浄やエアブローにより、無塵化した部品をクリーン環境下で組立てるといった手法を採用してきたが、問題を解決できていない。これまでの無塵化手法の問題点は大きく 2 点あると考えている。まず、1 点は最終段階の真空容器組立行程におけるダクトの混入のモニタが

*nagai.ryoji@jaea.go.jp

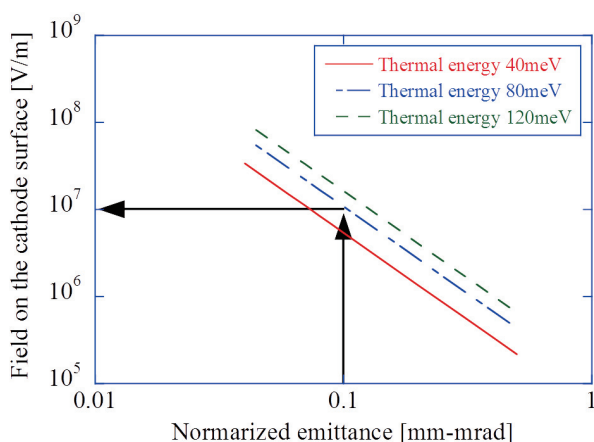


Figure 1: Normarized emittance vs electric field on the cathode surface.

不十分であったことである。もう 1 点は、最終組立工程においてはダストの混入を極力防ぐという、考え方で無塵化を行われてきたために、組立後の真空容器から混入したダストの除去方法が検討されていないことである。

真空容器中へのダスト混入のモニタについては、クリーンブース内のダクトをモニタしているのみで、真空容器への混入の有無のモニタを行っていない。また、用いているパーティクルカウンタについても、クリーンルームで用いられている通常のパーティクルカウンタであり、検出できるダストの最小粒径は $0.3 \mu\text{m}$ であり、ナノメートルオーダーの微小なダストはモニタ出来ない。そこで、Fig. 2 に示すように、組立時の真空容器にクリーンなガスをフローし、凝縮粒子カウンタ^[10]を用いてナノメートルオーダーのダストも含んだ組立時のダスト混入をモニタすることを提案する。

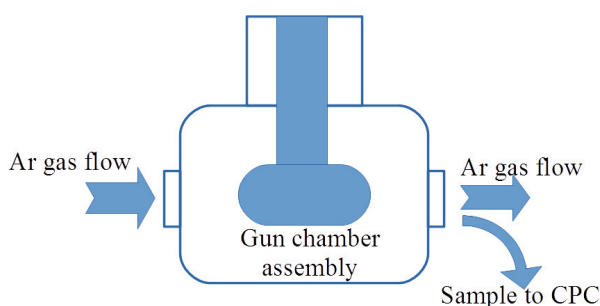


Figure 2: Schematic view of the dust monitoring method by a CPC.

組立後の真空容器から混入したダスト除去する方法としては繰り返し排気を行う方法^[11]や容器内へのガスブロー^[12]が知られているが、小さなダスト、特にナノメートルオーダーのダストが帯電して吸着する可能性があるため、これまでに知られている方法では不十分である。また、帯電、吸着したダストの除去方法としては大気中であれば、イオンガンなどでイオン化したガスをブローすることでの除電が効果的であるが、通常のイオンガンはグロー放電などによりガスをイオン化してい

るので、真空中では使用できない。そこで、真空窓を通して真空容器中に紫外線を照射してガスをイオン化する紫外線アイオナイザを用いてイオン化ガスのブローと真空排気を繰り返し行う方法を提案する。

4. 予備試験

ここで提案した無塵化手法が実際に機能するかを段階的に確認するために、アクリル製の容器を用いて、簡単な予備試験を行った。アクリル容器に HEPA フィルタを介した清浄な空気をフローしながら、通常のパーティクルカウンタと凝縮粒子カウンタでダストの様子をモニタすることで、ガス置換の効果および通常のパーティクルカウンタと凝縮粒子カウンタの差を確認した。また、今回の予備試験は大気中で行ったので、イオンガンを用いたガスブローの効果についても確認した。

予備試験は Fig. 3 に示すようなセットアップで行った。アクリル容器 (容積、約 5300 cc) に 2 段の HEPA フィルタを介した空気をポンプで流し (5 l/min)、アクリル容器から流れ出る空気の一部を通常型パーティクルカウンタ (リオン社製、KC-01C) と凝縮粒子カウンタ (TSI 社製、CPC 3776) で計測することでアクリル容器中のダストをモニタするというものである。空気の出口にも、逆流によるダストの混入を防ぐために HEPA フィルタを取り付けてある。アクリル容器側面には直径 10 mm 程度のガスブローのための栓を設けてあり、ここから通常のイオンガンでガスブローした。また、ガスブローする際のダストの混入防止のためにアクリル容器近傍にクリーンパーティション (日本エアテック社製、ACP-896-AH) を設置した。

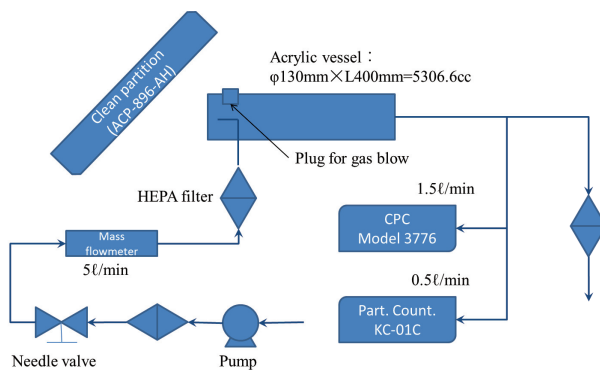


Figure 3: Diagram of the setup for the preliminary test.

大気中のダストを含んだ空気をアクリル容器中に導入するために、清浄な空気を流すためのポンプとクリーンパーティションを停止して、アクリル容器側面の栓を約 10 分間開放した。その後、栓を閉じてポンプを起動し、アクリル容器中の空気を清浄な空気に置換した。その結果を Fig. 4 に示す。約 10 分間の置換により、両方のカウンタの指示はほぼゼロになった。この結果から、アクリル容器中の空間に漂っているダストは空気の置換によりを取り除けることが分かった。また、通常のパーティクルカウンタと凝縮粒子カウンタでは約 100 倍の差があることから、真空容器中に混入するダストをモニタする場合は凝縮粒子カウンタを用いたナノメートルオーダーのダストまでのモニタが無塵化のために

有用であると言える。

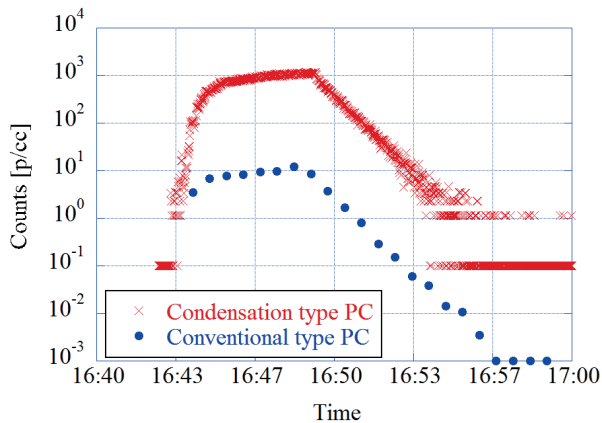


Figure 4: Result of the clean air permutation test.

次に、イオン化ガスブローによる壁面に付着したダストの除去効果を確認するために、清浄な空気をフローするポンプ、クリーンパーティションを動作させた状態で、側面の栓からイオンガンによりイオン化ガスを繰り返しブローした。1回のブローは約5秒間行った。その時の凝縮粒子カウンタでのダストのカウント数の変化の様子を Fig. 5 に示す。ピークの高さが交互に変化しているのは、ブローするたびにダストの付着位置が移動しているためと推測され、また、ブローを繰り返すことで付着していたダストが減っていく様子が分かる。このように、イオン化ガスをブローし、容器内に舞い上がったダストを含むガスをサンプルすることで、アクリル容器の壁面に付着しているダストもモニタ出来ること、さらに、舞い上がったガスを繰り返し置換することで、壁面に付着し容器内に滞留しているダストも除去できることがこの試験から分かった。

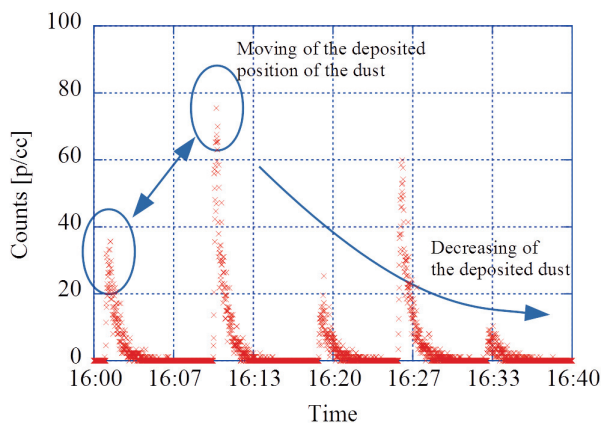


Figure 5: Result of the gas blow test.

5. まとめ

真空中の高電圧絶縁性能にダストが関わっていることは一般的に知られているが、ダストに起因すると思われる現象は、それ自体に不明な点が多く、十分な対策が講じられていない。これまでは、超伝導加速器のク

リーン技術を参考に、組み立て前の電子銃部品の表面を高圧純水洗浄およびガスブローによりダストを除去し、クリーンブース中で組み立てを行うことで、電子銃真空容器中へのダストの混入を防止してきた。しかし、組み立て工程中でのナノメートルサイズの微小なダストの混入を完全に防ぐことができず、電子ビームの引き出し電界が制限されていたと思われる。そこで、この問題を解決し、最先端の電子ビーム駆動型光源で必要な電子銃を実現するために、凝縮粒子カウンタによるナノメートルオーダーのダストの真空容器組立時のモニタと、イオン化ガスブローと繰り返し排気により真空容器からのダスト除去を提案した。この手法による無塵化の実証のための予備試験を行い、アクリル容器を用いた予備試験では提案した方法でダストのモニタおよび無塵化が可能であるという結果が得られた。今後は電子銃の真空容器を用いて、無塵化試験を行い、さらに、無塵化により高電界、高電圧の安定な直流電圧印加が可能になることを実証していく計画である。

参考文献

- [1] Hasan Padamsee, "RF Superconductivity", Wiley-VCH (2009).
- [2] N. Nishimori et al., Appl. Phys. Lett. 102, 234103 (2013).
- [3] R. V. Latham, "High Voltage Vacuum Insulation: Basic Concepts and Technological Practice", Academic Press, London, (1995).
- [4] William T. Diamond, J. Vac. Sci. Technol. A 16, 707-719 (1998).
- [5] "Energy Recovery Linac Conceptual Design Report", KEK Report 2012-4 (2012).
- [6] R. Hajima, et al., Rev. Acc. Sci. and Tech. 3, 121-146 (2010).
- [7] R. Nagai, et al., Rev. Sci. Instr., 81, 033304 (2010), N. Nishimori, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 17, 053401 (2014).
- [8] I. V. Bazarov and C. K. Sinclair, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 8, 034202 (2005).
- [9] I. V. Bazarov, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 11, 040702 (2008).
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Condensation_particle_counter.
- [11] 前羽良保、他、真空、33、909-915 (1990).
- [12] 前羽良保、他、真空、33、419-423 (1986).