

HIGH-VOLTAGE TEST OF A 500-KV PHOTOCATHODE DC ELECTRON-GUN FOR A NEXT-GENERATION LIGHT-SOURCE

Ryoji Nagai^{1,A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Ryoichi Hajima^{A)},
Toshiya Muto^{B)}, Masahiro Yamamoto^{B)}, Tsukasa Miyajima^{B)}, Yosuke Honda^{B)},
Hokuto Iijima^{C)}, Masao Kuriki^{C)}, Makoto Kuwahara^{D)}, Shoji Okumi^{D)}, Tsutomu Nakanishi^{D)}

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

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

^{C)} Hiroshima U., 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8530

^{D)} Nagoya U., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601

Abstract

A 500-kV, 10-mA photocathode DC gun which is designed for next-generation light-sources based on energy-recovery linac has been developed in a collaboration effort of JAEA, KEK, Hiroshima Univ. and Nagoya Univ. We have utilized a segmented cylindrical ceramic insulator and guard-ring electrodes to prevent any damage to the insulator from electrons emitted by the support-rod electrode. The 500-kV gun was successfully conditioned up to a voltage of 550 kV and a long-time holding test for 8 h was demonstrated at an acceleration voltage of 500 kV. The cathode electrode, anode electrode, and beam line apparatuses are now under fabrication and beam tests of the gun will be started soon.

次世代光源用500-kV光陰極DC電子銃の高電圧印加試験

1. はじめに

次世代光源とはこれまでの電子線加速器を基盤とした光源では成し得なかった超短パルス、高コヒーレンスを有する光源のことであり、そのひとつが、エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) を基盤とした光源である。ERLはこれまでにない高輝度かつ高平均電流の電子ビームを高繰り返しで発生するための新型の電子線加速器である^[1]。現在、ERLは高出力自由電子レーザー^{[2],[3]}、次世代X線放射光源^[4]、高フラックスγ線源^{[5],[6]}、高出力テラヘルツ源^[7]のような次世代光源を実現するための加速器として期待されている。ERLでの電子ビームの輝度と電流は電子銃の性能で決まるので、高輝度かつ高平均電流の電子ビームを発生するための電子銃はERLの性能を十分に発揮するために最も重要な要素である。

高輝度の電子ビームを発生する際にもっとも問題となるのが空間電荷力によるエミッタンスの増大である。ERLの要求性能を満たすには電子銃の加速電圧を500kV以上として空間電荷力を十分に小さくする必要がある^{[8],[9]}。また、高輝度の電子ビームを発生するためには、短い間隙に高い加速電圧を印加する必要がある^[10]。そのために、光陰極直流電子銃ではセラミック管の中央にカソード電極を保持するためのサポートロッドが通る構造をとらざるを得ない。このような構造のために、サポートロッドから放出された電界放出電子によりセラミック管に損傷を与えて、高電圧での運転が難しくなっている^{[11]-[13]}。その結果、世界中の研究機関で電子銃開発の努力が

なされているにもかかわらず、これまで500kV以上の電圧での安定な運転は達成されていなかった。われわれは、JAEA、KEK、広島大学、名古屋大学の共同研究により開発した500-kV、10-mA光陰極直流電子銃において初めて500kVの加速電圧の安定な印加に成功した^[14]。われわれの500-kV、10-mA光陰極直流電子銃において採用した高電圧を安定に印加するための手法と高電圧印加試験およびビーム試験に向けたビームラインについて報告する。

2. 高電圧を安定に印加するための手法

直流電子銃においてセラミック管は最も重要な構成要素の一つである。セラミック管では、高電圧に対する絶縁抵抗を保持するだけでなく、安定に高電圧を保持するために、セラミック表面での局所的帯電を避ける必要がある。この局所的帯電による放電は時としてセラミック管に穴を開けるなど重大な損傷を与える。われわれの開発した光陰極直流電子銃は図1に示すように電子銃の高電圧部分を収納する絶縁ガスタンク、高電圧電源、セラミック管、加速電極を収納する真空チャンバから構成されている。ガスタンク中の空気を排気後、SF₆を+0.2MPa(ゲージ圧)まで充填することで、高電圧部分を絶縁している。セラミック管は後述する理由により分割型セラミック管を採用しガードリングを備えている。光陰極直流電子銃では高電圧かつ高電界で電子線を加速するためにセラミック管の中央を高電圧端であるサポートロッドが通っている。これまでの光陰極直流電子銃ではガードリングを備えていないので、サ

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

ポートロッド表面から電界放出により放出した電子がセラミック管表面を叩くことにより局所的帯電が起こり高電圧を安定に印加出来なくなるという問題があり、これが光陰極直流電子銃における最大の開発課題であった。

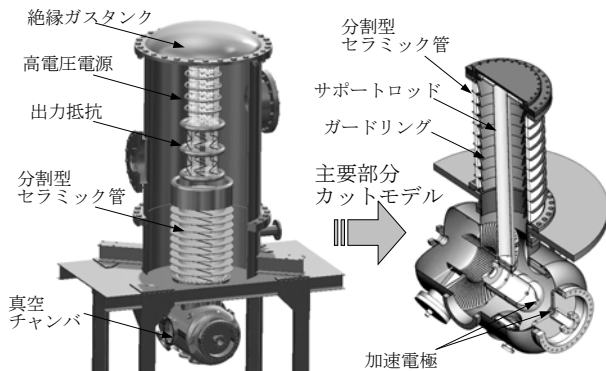


図1. われわれの開発した光陰極電子銃の模式図

アルミナセラミックの2次電子放出係数は2から9と比較的大きいので、セラミック表面での局所的帯電のプロセスについて以下のように考えられる。図2に示すように、サポートロッド表面から放出した電界放出電子によってセラミック表面が叩かれる。すると、叩かれたセラミック表面からは叩いた電子以上の2次電子が放出する。そのためにセラミック表面が正に帯電すると考えられる。さらに放電が続くと帯電した部分に電界放出電子が集中して衝突するので、セラミック管を貫通してしまうといった損傷が起こる。このプロセスに対応する局所的帯電の防止策が3つ考えられる。即ち、(1)セラミック管表面に生じた電荷を逃がす方法（セラミック表面に導電膜を形成する方法^{[11],[12]}）、(2)セラミック管表面の2次電子放出係数を小さくする方法（表面に薄くTiN膜を形成する方法^[15]）、(3)シールド電極により電界放出電子がセラミックを叩かないようにする方法（分割型セラミックとガードリングによる方法^[14]）である。これまでの光陰極DC電子銃では、(1)の方法での高電圧印加が試みられてきたが、500kVの電圧での安定運転はまだ一度も達成されてなかった。

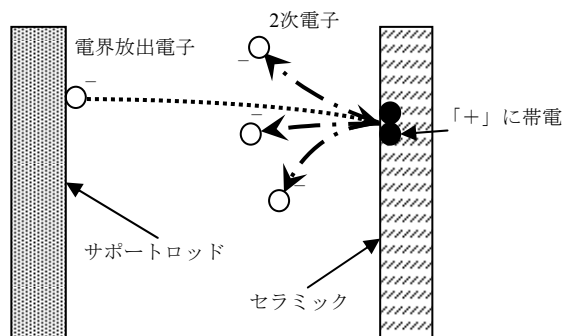


図2. セラミック管表面での局所的帯電のプロセス

そこで、われわれは最も効果的に局所的帯電を防げる方法である(3)の方法を採用した。サポートロッドからセラミック管を完全に遮るようガードリングを設けることで、セラミック管にサポート

ロッドからの電界放出電子が当たらないようにすることができる。また、この方法は別の要因（表面の付着物など）で放電したとしてもセラミック管の損傷を防げるという利点がある。分割型セラミックでは、電子が放出されやすい真空-セラミック-金属のトリプル・ジャンクションを多く有するが、ガードリングによりその部分の電界が緩和されるのでトリプル・ジャンクションからの電子放出の影響は無視できる。分割型セラミック管はセラミックのフープとコパールの板を交互に積み重ねロー付するというもので、セラミックは99.8%の Al_2O_3 を用いた。

電界分布をPOISSON^[16]で計算し、最大電界強度が小さくなるように設計を行った。光陰極直流電子銃における最大の開発課題はセラミック管とサポートロッド間での高電圧の安定な印加であるので、この計算および高電圧印加試験では加速電極は含まれていない。500kV印加した際の最大電界強度はセラミック管の底の端付近でロッド表面が8.34MV/mであり、ガードリング表面が6.83MV/mである。500kVでの一般的な真空間隙での絶縁破壊電界はおよそ10MV/m^[17]であるので、これらの値は十分に許容できる値である。サポートロッドから放出した電子の軌道を上述の電界分布を用いてGPT^[18]で計算し、サポートロッドから放出された電子はガードリングによって完全に遮蔽されセラミック管に直接あたることはないことが確認できた。

3. 高電圧印加試験

われわれの電子銃の高電圧試験の手順と結果について以下に述べる。高電圧、真空中に悪影響を及ぼすホコリなどの侵入を避けるために、クリーンブース内でセラミック管、真空容器などを接続した。その後真空チャンバおよびセラミック管表面に吸着している水分などを除外するために真空排気後190°Cで8時間のベーキングを行った。排気速度1m³/sの磁気浮上型ターボ分子ポンプのフォアラインに0.06m³/sのターボ分子ポンプと0.2m³/min.のスクロールポンプを用いるタンデム構成のターボ分子ポンプで真空の排気を行った。ベーキングの後に真空度は3×10⁻⁸Pa以下まで到達した。

高電圧コンディショニングはベースの真空度5×10⁻⁸Pa以下の条件で行った。コンディショニング時の過剰な放電を避けるために高電圧電源には真空度と放射線量でインターロックをかけ、設定値を超えると電圧を0Vに落とすようにした。真空度のインターロックは5×10⁻⁶Paで働くように設定した。放射線量のインターロックは真空容器から50cm離れた位置で3μSv/hで働くようにした。

また、コンディショニングの際のセラミック管および電極の致命的なダメージを避けるために放電電流を2つの方法で制限した。一つは高電圧電源の100MΩの出力抵抗により放電のピーク電流を制限した。もうひとつは放電の際の平均電流を1μA以下でクリップするように高電圧電源に定電流回路を設けた。図3は放電の際に定電流回路により電流が制限されている様子であり、放電が起こると同時に出力

電流がクリップされて高電圧電源の出力電圧が低下している。この電圧の低下により放電の大きさを十分に小さな値に制御しながら、コンディショニングを進めることができ、約110時間のコンディショニングで最大印加電圧550kVまでのコンディショニングに成功した(図4参照)。また、実運転を想定し、500kVの加速電圧で8時間、無放電で安定に電圧が印加できることが確認できた。

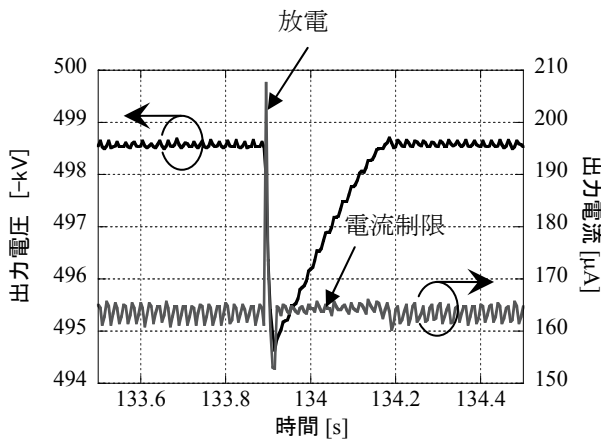


図3. 放電時の定電流回路による電流制限の様子

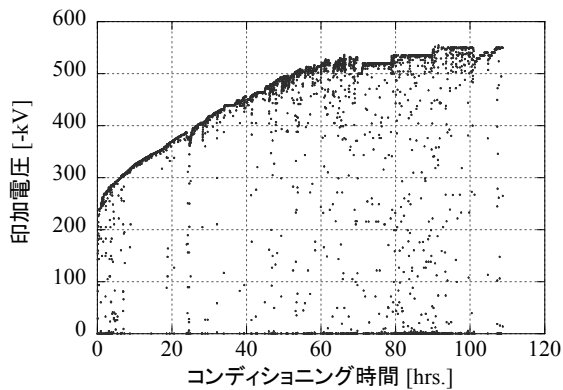


図4. 550kVまでの高電圧コンディショニング

4. ビーム試験用ビームライン

高電圧の安定な印加に成功し、現在、500kVでのビーム引き出し試験を行うための加速電極、ビームラインの組み立て等を行っている^[19]。安定にビームが引き出せた後に、NEA光陰極の寿命試験を計画しており、このために、このビームラインは5kW(500kV×10mA)のビームダンプを備えている。また、光陰極の寿命は真空度に極めて敏感であるので、陰極付近で極高真空を得るためのNEGポンプを陰極付近に配置している。さらに、ビームラインにもNEGポンプユニットを備え、ビームダンプは60度偏向した位置に配置し、陰極を直接見込まないようにすることで、ビームダンプで発生したガスによる真空度の劣化を抑え、NEA光陰極の寿命計測が行えるようにしている。

5. まとめ

われわれはERL型次世代放射光源用に開発した500-kV光陰極DC電子銃の高電圧印加試験を行った。この結果、550kVまでのコンディショニングに成功し、加速電圧500kVで8時間の電圧保持試験に成功した。この電子銃の加速電圧は次世代X線光源や高輝度γ線源のためのERLに必要な性能を十分に満たしているものであり、これにより高輝度電子ビームの発生が可能となる。500-kV電子銃開発の最大の難関である高電圧の安定な印加に成功したことで、電子銃は完成へと大きく近づいたといえる。高電圧印加の成功の鍵は分割型セラミック管とガードリングである。ガードリングによりセラミック管がサポートロッドから放出される電界放出電子から保護され致命的なダメージを受けることなく高電圧コンディショニングを成功することができた。

現在、カソード電極、アノード電極、NEGポンプ、ビームラインの組み立てを行っており、まもなく500kVビームを引き出しての試験を開始する予定である。

本研究の一部は、科研費基盤 (B) 20360424、文部科学省受託研究：量子ビーム基盤技術開発プログラム、KEK大学連携支援事業の成果である。

参考文献

- [1] R. Hajima, Proceedings of 2009 Particle Accelerator Conference, MO4PB101, (2009).
- [2] G. R. Neil, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 557, 9 (2006).
- [3] E. J. Minehara, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 557, 16 (2006).
- [4] S. M. Gruner, et al., Rev. Sci. Instrum. 73, 1402 (2002).
- [5] R. Hajima, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 608, S57 (2009).
- [6] V. N. Litvinenko, et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 36, 1799 (2008).
- [7] K. Harada, et al., Infrared Phys. Technol. 51, 386 (2008).
- [8] R. Hajima and R. Nagai, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 557, 103 (2006).
- [9] I. V. Bazarov and C. K. Sinclair, Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 034202 (2005).
- [10] I. V. Bazarov, et al., Phys. Rev. Lett. 102, 104801 (2009).
- [11] K. Smolenski, et al., AIP Conf. Proc. 1149, 1077 (2009).
- [12] C. Hernandez-Garcia, et al., AIP Conf. Proc. 1149, 1071 (2009).
- [13] L. B. Jones, et al., AIP Conf. Proc. 1149, 1084 (2009).
- [14] R. Nagai, et al, Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010).
- [15] N. Matsuda, et al., J. Vac. Soc. Jpn. 30, 446 (1987) (in Japanese).
- [16] J. H. Billen and L. M. Young, LA-UR-96-1834 (1996).
- [17] P. G. Slade, The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application (CRC Press, Boca Raton, FL, 2007).
- [18] M. J. de Loos and S. B. van der Geer, Proceedings of EPAC-1996, pp. 1241-1243, (1996).
- [19] N. Nishimori, et al., in Proc. 7th annual meeting of Part. Acc. Soc. of Japan