

HIGH VOLTAGE TEST OF A 500-KV DC ELECTRON GUN FOR AN ERL LIGHT SOURCE

Ryoji Nagai^{1,A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Hokuto Iijima^{A)},
Toshiya Muto^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Tsukasa Miyajima^{B)}, Masahiro Yamamoto^{B)},
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 has been designed and is now under fabrication by the collaboration efforts of JAEA, KEK, Hiroshima Univ. and Nagoya Univ. We have adopted a multiple-stacked cylindrical ceramic insulator, because this type of ceramic insulator has shown good stability and robustness at the 250-kV JAEA FEL gun and the 200-kV Nagoya polarized gun. The Cockcroft-Walton voltage multiplier, the ceramic insulator, the vacuum chambers has been fabricated and a high-voltage test will be successfully achieved soon. Up-to-date status of the gun development is presented in detail.

ERL放射光源用500kVDC電子銃の高電圧印加試験

1. はじめに

JAEAでは高出力FEL用ERL開発の成果を引き継ぎ、光量子科学と産業^{[1], [2]}の新しい時代を拓くと期待される次世代光源としてのERLの研究計画を進めている。その光源の性能は高輝度電子ビームにより実現されるものであり、電子銃はERL光源で最も重要なコンポーネントである。

JAEAにおけるERL光源用電子銃の開発は2004年に開始されて、陰極材料に関する研究^[3]、250kV-50mA光陰極DC電子銃の開発^[4]が行われてきた。また、2008年以来、JAEA、KEK、広島大学、および名古屋大学との共同作業で500kV-10mA光陰極DC電子銃の開発を行っている。500kV電子銃は、Compact ERL(KEKに建設計画の実証機^[5])の要件を満たすように設計されている。ここでは、500kV電子銃の高電圧部分の設計と高電圧印加試験について報告する。

2. 高電圧電源

500kV電子銃のための高圧電源は、従来のコッククロフト-ウォルトン(C-W)電源であり、50kW(500kV、10mA)の容量を持っている。電子銃の電源電圧リップルは加速後の電子ビームのバンチごとのエミッタンス、バンチ形状、到着時刻、平均エネルギーのばらつきの主因となる^[6]ことから、電源電圧リップル 10^{-4} 以下を得られるように回路最適化を行った。小型のC-W電源で小さな電源電圧リップルを得るために、250kV電子銃で実績のあるLCフィルタを採用した。この場合のC-W電源の電圧

リップルは次式で与えられる。

$$\Delta V = \frac{1}{16\pi^2 f^2 L_f C_f} \cdot \frac{nI}{2fC_s} \quad (1)$$

ただし、 f は駆動回路の周波数、 n はステージ数、 C_s はステージキャパシタンス、 L_f はフィルタインダクタンス、そして、 C_f はフィルタキャパシタンスである。

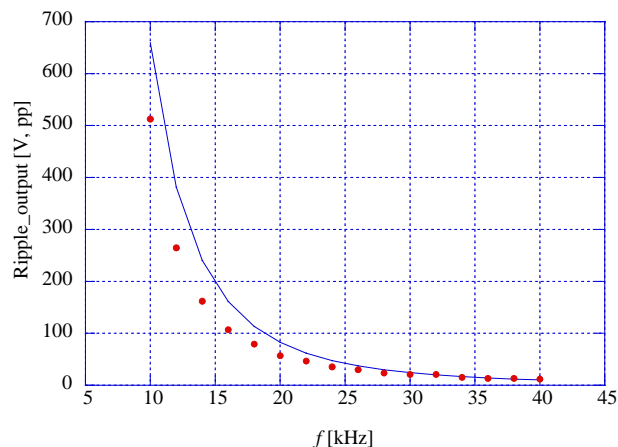


図1. C-W電源の駆動回路の周波数に対する電圧リップルの変化

回路シミュレータ、LTspice^[7]によるリップルの検証も行った。駆動回路の周波数を変えたときの電圧リップルの変化の様子を図1に示す。式(1)からも明らかであるが周波数を上げることで効率的に電圧リップルを低減できることが図からも分かる。図中の青線は式(1)をプロットしたもので、赤丸がシ

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

ミュレータの計算結果である。ただし、シミュレータ、式(1)ともに駆動電源の波形が正弦波の場合であり、実際の回路はPWM波形であるので、この値より電圧リップルが大きくなることが考えられる。駆動波形をPWM波形としたときのシミュレーションを行い回路パラメータの最適化をさらに進める予定である。

250kV-50mA電子銃と500kV-10mA電子銃のC-W電源のパラメータを表1に示す。ただし、リップルの計測値は大気中において出力電圧100kVで最大電流を流すための負荷抵抗を接続して計測したものである。次世代放射光源としてのERL用電子銃に求められる500kV-100mA電子銃の電源においても電圧リップル、 10^{-4} 以下の性能をこれまでと同様の小型のC-W電源で、これらの値をスケールすることで実現可能と考えられる。

表1. C-W電源のパラメータ

| | 250kV電子銃 | 500kV電子銃 |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| 最大電圧 | 250kV | 500kV |
| 最大電流 | 50mA | 10mA |
| 駆動周波数 | 20kHz | 40kHz |
| ステージ | | |
| 静電容量 | 8.4nF | 2.4nF |
| ステージ数 | 6 | 12 |
| フィルタ | | |
| 静電容量 | 1.4nF | 0.2nF |
| フィルタ | | |
| インダクタンス | 1.2H | 2H |
| 電圧リップル (設計値) | 3.5×10^{-5} | 1.2×10^{-5} |
| 電圧リップル (計測値) | 1.9×10^{-4} | 4.8×10^{-5} |

3. セラミック管とガードリング

高電圧のDC電子銃の開発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。セラミック表面での局所的な帯電はsurface flashoverと呼ばれる放電を起こし、これをトリガにして高電圧端とアース間での大きな放電を引き起こす。このような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。これまでの光陰極DC電子銃では、表面にわずかな導電性を持たせたコーティングを施したもののバルク導電性のあるセラミックを用い表面での局所的な帯電を抑えていた。しかしながら、これらのセラミック管を用いた光陰極DC電子銃^[8]では500kVの電圧での安定稼働はまだ一度も達成されていない。

そこで、我々は500kV光陰極DC電子銃に分割型セラミック管を採用した。この型のセラミック管はJAEAの高出力FEL用熱電子銃^[9]と名古屋大学の200kV光陰極電子銃^[10]に採用され十分な実績のあるものである。図2にJAEA高出力FEL用熱電子銃と500kV光陰極DC電子銃用のそれぞれセラミック管の

写真を示す。分割型ではガードリングを有する分割電極により分割されたセラミック管により高電圧を保持し、セラミック表面での帯電やsurface flashoverの影響を最小限に抑えようとするものである。分割型セラミック管は静電加速器では広く一般的に用いられているが、DC電子銃ではセラミック管の中心にサポートロッドと呼ばれる高電圧端がある構造のために複雑なガードリングの設計やセラミック管の大きさが大きくなるという問題があり、これまでの光陰極DC電子銃では採用されなかった。



図2. JAEA高出力FEL熱電子銃用セラミック管(右側)および500kV光陰極DC電子銃用セラミック管(左側)の写真。熱電子銃用セラミック管については分割抵抗、サポートロッドが取り付けたまの状態である。

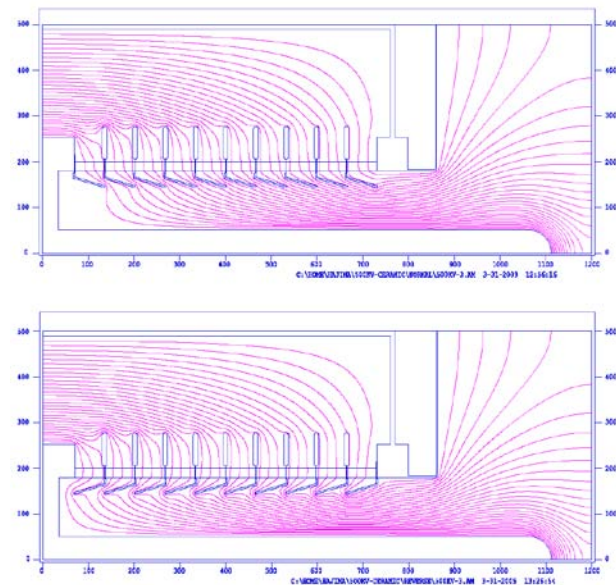


図3. POISSONによる電場分布の計算結果、ガードリング順方向(上)とガードリング逆方向(下)。

セラミック管の分割数、ガードリングの形状の最適化設計を行った結果、分割数を10段とし図3に示すようにガードリングの形状を決定した。セラミック管の各段の長さは65mmであり直径は400mmである。サポートロッドの直径は101.6mmでありガードリングの内直径はサポートロッドのほぼ2.7倍とし

た。図3はPOISSONによるセラミック管の電場分布の結果である。ガードリングを順方向とした場合のガードリング表面とサポートロッド表面でのそれぞれの最大電場は8.4MV/mと7.9MV/mであり、逆方向とした場合は13.7MV/mと8.6MV/mである。各段の分割抵抗は500M Ω とした。このガードリングによりサポートロッドから放出された電子が直接セラミックを叩くことを防ぎ、セラミック表面の局所的な帯電や放電によるセラミック管の損傷を逃れることができる。また、ガードリングを設置することで、真空、セラミック、金属のいわゆるトリプル・ジャンクション部分の電場を低くすることで、この部分からの電子放出も抑制できる。ガードリングの方向については順方向の場合は各部分での電場を小さくでき、逆方向の場合の電場はやや大きくなるが電界やX線により放出される2次電子をガードリングで抑えることができる。セラミック管およびガードリングは両方向の設置が可能な形状で製作されている。ガードリング、サポートロッド、真空チャンバの材質はガス放出速度および2次電子放出係수에配慮しすべてチタン製とした。

4. 高電圧印加試験

上述のC-W電源、セラミック管は+0.2MPaのSF₆ガス中で使用されることを前提に製作されており、高電圧印加試験はそのSF₆ガス中で行った。高電圧印加試験は下記のような手順で行った。

- (1) C-W電源のみでの高電圧発生試験
- (2) セラミック管の高電圧印加試験
- (3) サポートロッドを取り付けた状態での試験

C-W電源のみでの高電圧発生試験は全く放電等を起こすことなく高電圧を安定に印加でき、コロナ電流等の発生も見られなかった。

セラミック管の高電圧印加試験ではセラミック管にガードリングと分圧用高電圧抵抗を取り付けて行った。フォアラインの排気に排気速度0.06m³/sのターボ分子ポンプと排気速度0.2m³/minのスクロールポンプを用いた排気速度1m³/sの磁気軸受け型ターボ分子ポンプによりセラミック管内部と真空チャンバ内の排気を行い、約12時間のベーキングを行うことで6 \times 10⁻⁸Paの真空度に到達した後高電圧の印加を開始した。480kV程度から真空中での小さな放電が現れその後約2時間程度コンディショニングで550kVまで到達し15分間放電などを一切起こすことなく安定に電圧が印加出来ることを確認した。図4にコンディショニング後の印加電圧に対する電流、放射線、真空度の様子を示す。500kV程度からコロナ電流がわずかに発生している様子がみられるがこのコロナ電流の発生箇所はセラミック管とC-W電源を接続している部分のシールドメッシュ部分での放電であり、この部分は今後改良していく予定である。

サポートロッドを取り付けた状態での高電圧コンディショニングは現在進行中であり、約12時間で420kVに達し順調にコンディショニングが進んでいくことから、まもなく550kVに達し安定に電圧を印加できる見込みである。

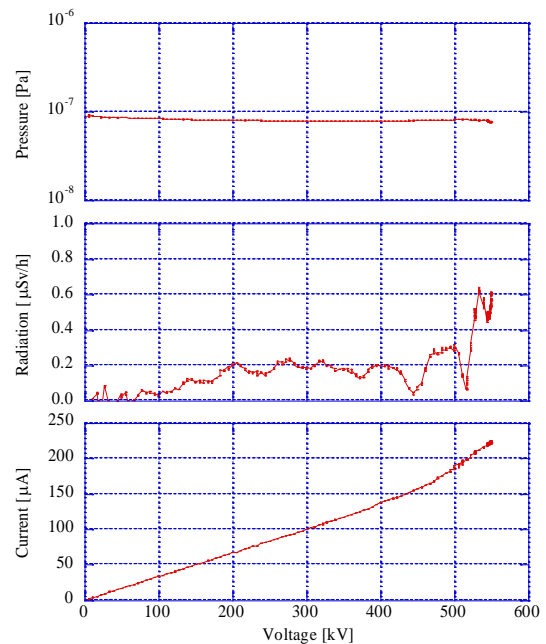


図4. セラミック管単体の高電圧コンディショニング後の印加電圧に対する電流、放射線、真空度

5. まとめ

ERL放射光源用光陰極DC電子銃の主要構成要素である500kV-10mAコッククロフト・ウォルトン型電源(C-W電源)およびセラミック管の製作を行い、それらの高電圧印加試験を行った。C-W電源ではERLのビームダイナミクスから要求される10⁻⁴以下の電圧リップルを達成できた。セラミック管はそれ単体で550kVを安定に印加出来ることを確認した。サポートロッドを取り付けた状態での高電圧印加は現在420kVまでコンディショニングが進んでおりもうまもなく550kVに達する見込みである。今後はこのDC電子銃にNEA光陰極の調製チャンバ繋ぎ500kVでの電子ビームの取り出し試験、光陰極の寿命試験を進めていく計画である。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] Sol M. Gruner, et al., Rev. Sci. Instr. 73 (2002) 1402.
- [2] R. Hajima, T. Hayakawa, N. Kikuzawa, and E. Minehara, J. Nucl. Sci. Technol. 45 (2008) 441.
- [3] T. Nishitani et al., Proc. of FEL-2006 pp.319-322.
- [4] R. Nagai et al., in Proc. PAC-2009.
- [5] R. Hajima et al. (ed.), KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032 (2008).
- [6] R. Nagai et al., Proc. 4th annual meeting of Part. Acc. Soc. of Japan (2007) 676 (in Japanese).
- [7] <http://www.linear-tech.co.jp/designtools/software/#Spice>
- [8] C.K. Sinclair, Nucl. Instr. Meth. A557 (2006) 69.
- [9] N. Nishimori et al., Proc. EPAC-2000, 1672 (2000).
- [10] M. Yamamoto et al., Proc of LINAC-2002, 680 (2002).