

解 説

次世代放射光源用光陰極 DC 電子銃の開発

永井 良治*1・羽島 良一*2・西森 信行*2・武藤 俊哉*3
 山本 将博*3・本田 洋介*3・宮島 司*3・栗木 雅夫*4
 飯島 北斗*4・桑原 真人*5・奥見 正治*5・中西 疆*5

Development of a Photocathode DC Electron-Gun for Next-Generation Light-Sources

Ryoji NAGAI*1, Ryoichi HAJIMA*2, Nobuyuki NISHIMORI*2, Toshiya MUTO*3,
 Masahiro YAMAMOTO*3, Yosuke HONDA*3, Tsukasa MIYAJIMA*3, Masao KURIKI*4,
 Hokuto IJIMA*4, Makoto KUWAHARA*5, Shoji OKUMI*5 and Tsutomu NAKANISHI*5

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 500-kV gun consists of a Cockcroft-Walton generator, a segmented cylindrical ceramic insulator, guard-ring electrodes, a support-rod electrode, a vacuum chamber, and a pressurized insulating gas tank. The cathode electrode, anode electrode, and beam line apparatuses are now under fabrication and beam tests of the gun will be started soon.

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) は超低エミッタンスかつ高平均電流の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⁾を実現するための加速器として期待されている。ERL の電子ビームのエミッタンスと電流は電子銃の性能で決まるので, 超低エミッタンス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。

負の電子親和力 (Negative Electron Affinity; NEA) の表面を持つ半導体光陰極を備えた DC 電子銃は超低エミッタンスかつ高平均電流の電子ビームを発生可能であり⁸⁾, そのような電子銃は多くの研究機関で

ERL のために開発が行われている⁹⁻¹²⁾。これらの電子銃の開発目標は平均電流が 10 から 100 mA, 規格化エミッタンスが 0.1 から 1 mm mrad である。空間電荷効果によるエミッタンスの増加を抑え, これらの性能を達成するためには, 電子銃の加速電圧は 500 kV 以上である必要がある^{13,14)}。さらに, 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¹⁵⁾。そのために, 光陰極 DC 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⁹⁻¹¹⁾。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関わらず, これまで 500 kV 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 500-kV, 10-mA 光陰極 DC 電子銃を

*1 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency
(E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp)

*2 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency

*3 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

*4 広島大学 Hiroshima Univ.

*5 名古屋大学 Nagoya Univ.

JAEA, KEK, 広島大学, 名古屋大学の共同研究により開発した. その電子銃は ERL 技術を基盤とした次世代放射光源の要求性能を満たすよう設計されており, 現在, KEK サイトに建設中の実証機であるコンパクト ERL¹⁶⁾ に用いられる予定である. われわれは, 500-kV 電子銃において, 最大印加電圧 550 kV までのコンディショニングに成功し, 加速電圧 500 kV での 8 時間保持試験に成功した¹⁷⁾. 本電子銃はコッククロフト-ウォルトン型高電圧電源 (C-W 電源), 分割型セラミック管, ガードリング, サポートロッド, 真空チャンバ, 絶縁ガスタンクで構成されており, サポートロッドから放出した電子によるセラミック管の損傷を防ぐために分割型セラミック管とガードリングを採用した. 電子銃の設計と高電圧印加試験の詳細について以下に述べる.

2. 電子銃の設計

2.1 高電圧電源

本 500-kV 電子銃では容量 5 kW (500 kV × 10 mA) の C-W 電源を高電圧電源として用いている. 電子銃の加速電圧リップルは駆動回路の周波数の 2 倍の周波数で現れ, 電子ビームを最終エネルギーまで加速した後のエミッタンス, バンチの時間形状, バンチの到着時刻, 平均エネルギーをそれぞれ変動させる主因となるので, リップルは十分に小さくする必要がある¹⁸⁾. そこで, 電源は電圧リップルを 1×10^{-4} 以下に抑えるように回路パラメータを最適化した. この C-W 電源では電圧リップルを抑えるために LC フィルタを採用し, 駆動周波数を通常のものより高い 40 kHz とした. 正弦波で駆動される LC フィルタ付きの C-W 電源の電圧リップル (peak-to-peak) は次のように与えられる.

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

ただし, f は駆動周波数, n は段数, C_s は一段当たりの静電容量, I は出力電流, L_f と C_f はフィルタのパラメータである. 図 1 に式 (1) と回路シミュレータ, LTSpice¹⁹⁾ から求めた駆動周波数に対する電圧リップルの値をプロットしたものを示す. 実線が式 (1), 点が LTSpice により求めた電圧リップルの値である. 駆動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分かる. C-W 電源および駆動回路は日新パルス電子科で製作したものであり, 回路パラメータをまとめて表 1 に示す. 図 2 に絶縁ガスタンクの上蓋に取り付けられた状態の 500-kV 電子銃用 C-

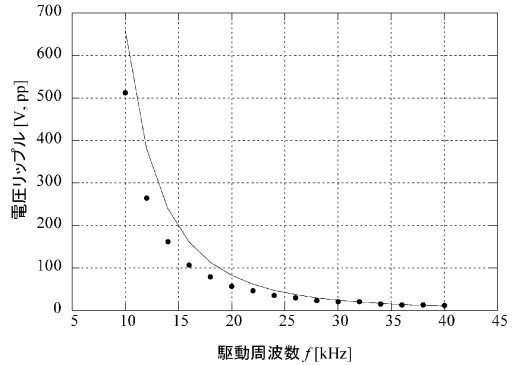


図 1 駆動周波数に対する C-W 電源のリップルの値

表 1 C-W 電源のパラメータ

最大加速電圧	500 kV
最大印加電圧	550 kV
最大電流	10 mA
駆動周波数	40 kHz
一段当たりの静電容量	2.4 nF
段数	12
フィルタ静電容量	0.2 nF
フィルタインダクタンス	2.0 H
リップル (設計値)	1.2×10^{-5}

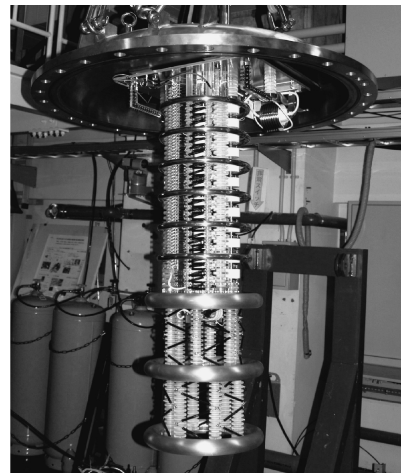


図 2 絶縁ガスタンクの上蓋に取り付けられた状態の 500-kV 電子銃用 C-W 電源

W 電源の写真を示す. 高さは出力抵抗を含めて 1250 mm である. この型の電源は ERL 用電子銃の最終目標値 500 kV × 100 mA に対してもスケール可能であり, 電圧リップルを 1×10^{-4} 以下に保つことができる.

高電圧コンディショニング時のセラミック管および電極の損傷の可能性を可能な限り小さくするために, コンディショニング時の出力抵抗は 100 MΩ を用い

た. 運転時の出力抵抗はダイオードの保護のために 66.6 kΩ とした. さらに, 遅い放電に対する保護および放電の持続時間を出来るだけ短くする目的で駆動回路に定電流回路を設けた. コンディショニング時は出力電流を最小限に抑え放電の影響を最小限に抑えられるようにした.

2.2 分割型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. 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. 光陰極 DC 電子銃は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るために, サポートロッド表面から放出した電界放出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. 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や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ようとしていた^{9,10)}. しかしながら, これらのセラミック管を用いた光陰極 DC 電子銃では 500 kV の電圧での安定運転はまだ一度も達成されてなかった.

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 3 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^{9,10)}), (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²⁰⁾), (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¹⁷⁾) である.

そこで, われわれはセラミック管が複雑になるという欠点はあるものの, 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. (3)の方法と従来の方法との比較を図 4 に示す. サポートロッドからセラ

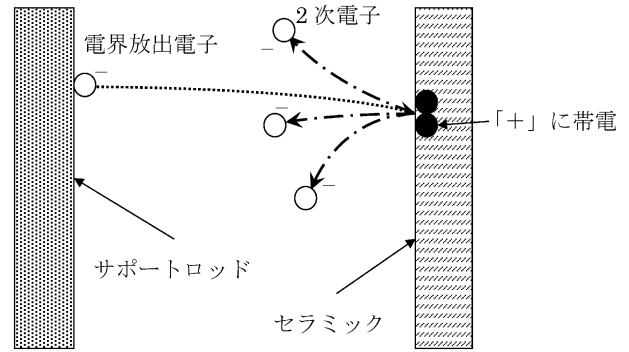


図 3 セラミック管表面での局所的帯電のプロセス

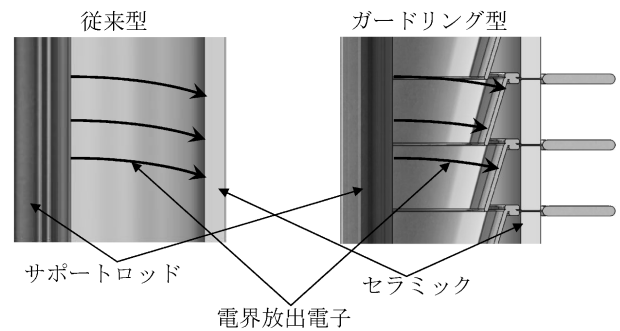


図 4 従来型セラミック管とガードリング型セラミック管

ミック管を完全に遮るように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バールの板を交互に積み重ねロー付するというもので, JAEA の高出力 FEL 用 250 kV 熱電子銃²¹⁾と名古屋大学の 200 kV 光陰極電子銃²²⁾に採用され十分な実績のあるものである. 図 5 に JAEA 高出力 FEL 用熱電子銃用と 500-kV 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. 図 6 にガードリング取り付け前後の分割型セラミック管の写真を示す. セラミックは 99.8% の Al₂O₃ (品川ファインセラミックス(株)製 A99P) を用いロー付は日立原町電子工業(株)で行なわれた.

ガードリングはそれぞれのコバールフープの内側と外側に取り付けられている. 内側のガードリングは前述のようにサポートロッドから放出した電子からセラ

ミック管を保護するためのものであり、サポートロッドとの相対的形狀は光陰極 DC 電子銃を 500 kV で安定に運転する上で重要である。ガードリングの設計において、ガードリングとサポートロッドの表面電界強度が最小になるようにセラミック管の分割の段数とガードリング、サポートロッドの形状を決定した。最適化後の形状は、一段の長さは 65 mm で 10 段、セラミック管の外径は 400 mm で厚さが 20 mm、サポートロッドの直径は 101.6 mm となった。隣同士のコバルト板はセラミック全体にわたって電圧が均一に印加されるように 500 M Ω の抵抗で接続した。

ガードリングの設計の際、電界分布は POISSON²³⁾ で計算した。サポートロッドが 500 kV の場合の計算結果を図 7 に示す。高電圧印加試験はセラミック管、サポートロッド、ガードリングの高電圧性能を確認するためのものである。この計算にはカソード電極、アノード電極は含まれていない。図 7 に示すようにガードリングは 2 つの方向に取り付け可能な形状とした。順方向取り付け構成ではサポートロッドおよびガードリングの表面電界強度を小さくするのに適し

ている。この場合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 8.34 MV/m であり、ガードリング表面が 6.83 MV/m である。500 kV での一般的な真空間隙での絶縁破壊電界はおよそ 10 MV/m²⁴⁾ であるので、これらの値は十分に許容できる値である。反転方向取り付け構成では最大電界強度はやや大きくなり、ロッド表面で 8.67 MV/m であり、ガードリング表面で 13.9 MV/m となる。この方向での取り付けは X 線によるセラミックからの 2 次電子放出を抑えるのに適しているが、この電界強度はやや挑戦的な値である。これらの構成の際のサポートロッド先端付近の最大電界強度は 14.3 MV/m であるが、実際の運転時にはカソードおよびアノード電極を取り付けることで 10 MV/m 程度以下に緩和される。

サポートロッドから放出した電子の軌道は上述の電界分布を用いて GPT²⁵⁾ で計算した。順方向取り付けの際の計算結果を図 8 に示す。図 8 から分かるように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。

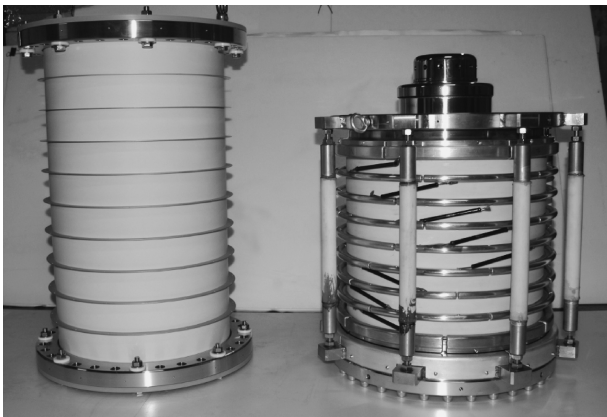


図 5 500 kV 光陰極 DC 電子銃用 (左) と JAEA 高出力 FEL 用熱電子銃用 (右) セラミック管

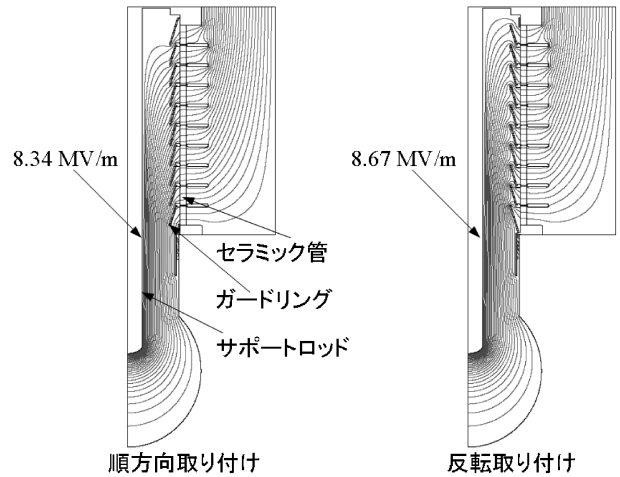


図 7 POISSON による電界分布の計算結果

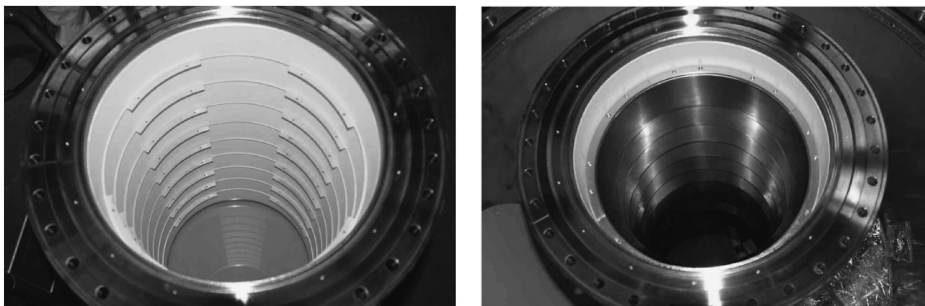


図 6 ガードリング取り付け前 (左) 後 (右) のセラミック管

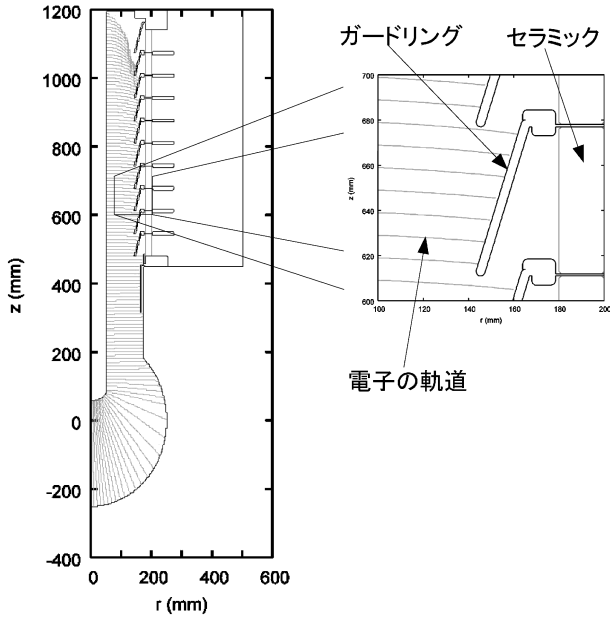


図8 サポートロッドから電界放出された電子の軌道計算結果

真空中の金属電極間の絶縁破壊電界は電極間隔, 金属材料, 表面処理に依存する²⁴⁾. 絶縁破壊電界は電極間隔が広がるに連れて下がっていき, この効果は全電圧効果として知られている^{26,27)}. 狭い電極間隔の場合でのSUS, 銅, モリブデン, チタン電極についての暗電流の系統的計測がされており, この結果はモリブデン陰極とチタン陽極の組合せが最も高い絶縁破壊電界であることを示している²⁸⁾. われわれの500-kV電子銃のように電極間隔が広い場合に, 全電圧効果がどのように影響するかが明確ではないが, 狭い電極間隔での良好な結果から電極材料としてチタンを採用した. われわれが電極材料および真空容器に採用したチタン合金は特別な化学研磨が施されており, 150°Cで20時間ベーキングした後のガス放出速度は 6×10^{-13} Pa m/sである²⁹⁾. このガス放出速度は通常のSUSに対して2-3桁少ないものである³⁰⁾. NEA表面をもつ光陰極の長寿命運転においては非常に高い真空度が求められるので, ガス放出速度の少ない材料で電子銃を構成することは絶縁破壊電界を高くすることのみならず, 高い真空度を保つうえでも重要である³¹⁾.

500-kV電子銃の最終設計は図9に示すようにガードリング付き分割型セラミック管, カソード電極, アノード電極, サポートロッド, 真空容器から構成される. 高電圧回路, 出力抵抗, セラミック管は図10に示すように, 直線状に配置されて絶縁ガスタンク中に収納されている. 高電圧の不均一な電界の集中を避けるために, このように同軸状の配置にしている. ガス

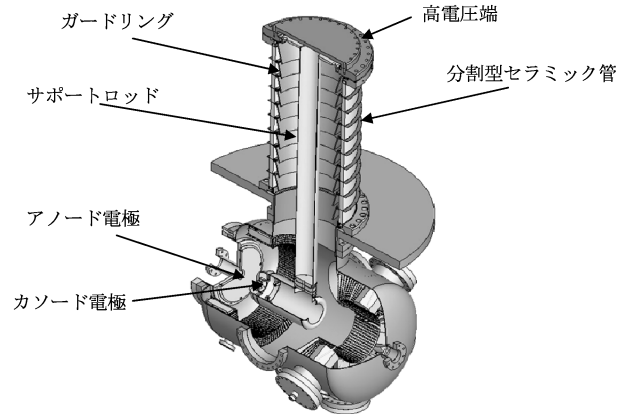


図9 500-kV電子銃の最終設計

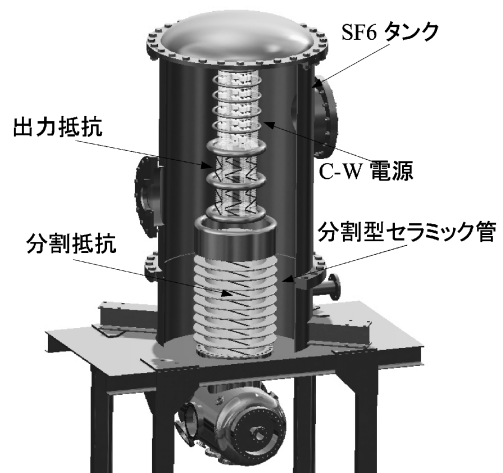


図10 SF6タンクに収納されている電子銃

タンク中の空気を排気後 SF_6 を +0.2 MPa (ゲージ圧) まで充填することで, 高電圧回路を絶縁している.

3. 高電圧印加試験

500-kV電子銃のガードリングを順方向の構成で組み立て, 高電圧試験を行った. 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後に排気し 190°C で8時間のベーキングを行った. 排気速度 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ の磁気浮上型ターボ分子ポンプのフォアラインに $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ のターボ分子ポンプと $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 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^{-8} Pa 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^{-8} Pa 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 C-W 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

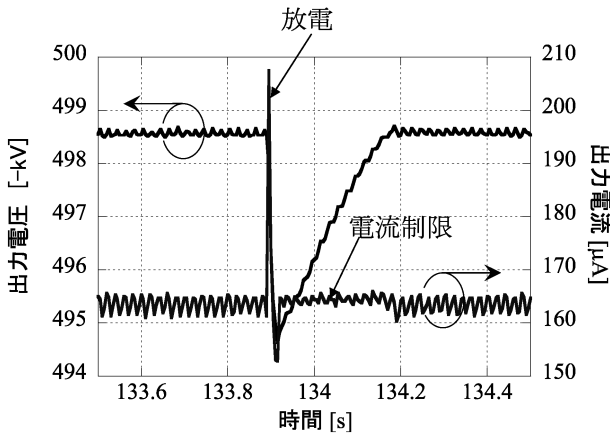


図11 放電時の定電流回路による電流制限の様子

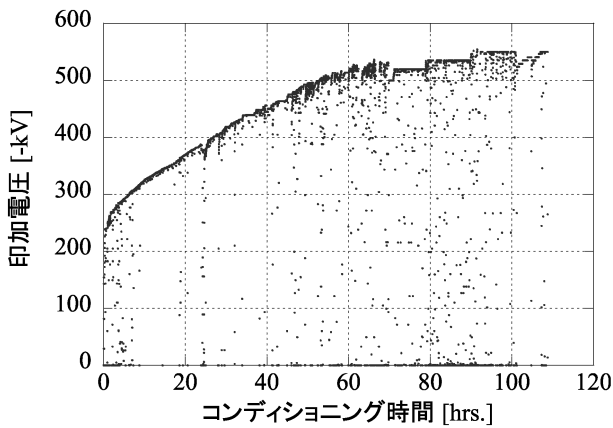


図12 550 kV までの高電圧コンディショニングの様子

電圧を 0 V に落とすようにした。真空度のインターロックは 5×10^{-6} Pa 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 50 cm 離れた位置で $3 \mu\text{Sv/h}$ 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 C-W 電源の 100 M Ω 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 1 μA 以下でクリップするように C-W 電源に定電流回路を設けた。C-W 電源からは電源のフィードバック抵抗とセラミック管に取り付けた分割抵抗に流れる以外の電流が 1 μA 以下になるように定電流回路で電流を制限しながらコンディショニングを進めていった。図 11 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 C-W 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た。

図 12 にコンディショニング時間に対する印加電圧

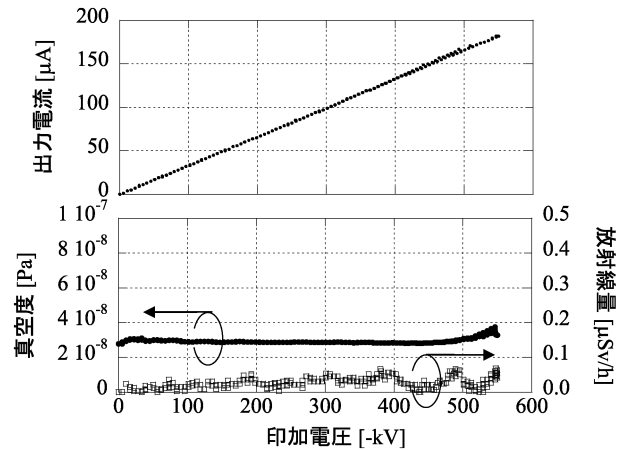


図13 コンディショニング後の印加電圧に対する電流、真空度、放射線量の挙動

のプロットを示す。高電圧の放電は印加電圧約 250 kV から現れ、500 kV まで約 4 kV/h の速さでコンディショニングが進んだ。500 kV を超えてからは慎重を期して、さらにゆるやかにコンディショニングを進めた。その結果、約 110 時間のコンディショニングで最大印加電圧 550 kV までのコンディショニングに成功した。

550 kV までコンディショニングした後に約 3 分間で 0 から 550 kV まで印加電圧を上げながら電流、真空度、放射線量の挙動を観察した。その結果を図 13 に示す。出力電流は電圧の増加に対して線形に増加しており、余分な電界放出電流がほとんどないことが分かる。真空度はベース真空度を保ったままで最大印加電圧まで到達している。放射線量は環境のバックグラウンド値である 0.03 から 0.07 $\mu\text{Sv/h}$ であった。このように、真空度および放射線量の挙動からも電界放出電流が十分に小さく無視できる程度であることが分かる。

実際の運転を想定して C-W 電源の出力電圧 510 kV で 8 時間の保持試験を行った。出力抵抗による電圧降下により、C-W 電源の出力電圧 510 kV は加速電圧 500 kV に相当する。結果を図 14 に示す。真空度、放射線量が電圧を保持している間、バックグラウンドレベルに保たれていたことから、放電や電界放出電流の増加がなく安定に電圧を保持できていたことが分かる。電圧保持試験の際のサポートロッド先端部分の最大電界は 14.3 MV/m と POISSON により見積もられる。この電界はカソード電極、アノード電極を取り付けた後には 10 MV/m 程度に緩和される。即ち、この保持試験の結果から 550 kV 以上での運転が可能であると考えている。

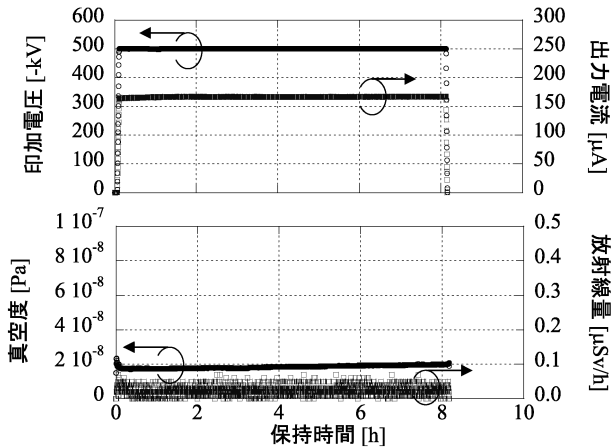


図14 8時間高電圧保持試験の結果

4. 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、550 kV までのコンディショニングに成功し、加速電圧 500 kV 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荷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。また、この成功の結果から化学研磨を施したチタン電極は真空中の大きな間隔の電極間の高電圧絶縁において良好な材料と表面処理であることがわかった。

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 500 kV 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, MO4PBI01, (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) C. Hernandez-Garcia, et al., Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, pp. 3117–3119, (2005).
- 9) K. Smolenski, et al., AIP Conf. Proc. 1149, 1077 (2009).
- 10) C. Hernandez-Garcia, et al., AIP Conf. Proc. 1149, 1071 (2009).
- 11) L. B. Jones, et al., AIP Conf. Proc. 1149, 1084 (2009).
- 12) N. Nishimori, et al., AIP Conf. Proc. 1149, 1094 (2009).
- 13) R. Hajima and R. Nagai, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 557, 103 (2006).
- 14) I. V. Bazarov and C. K. Sinclair, Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 034202 (2005).
- 15) I. V. Bazarov, et al., Phys. Rev. Lett. 102, 104801 (2009).
- 16) KEK Report No. 2007-7/JAEA-Research 2008-032 (2008) (in Japanese), edited by R. Hajima, et al.
- 17) R. Nagai, et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010).
- 18) R. Nagai, et al., Proceedings of the Fourth Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 676–678, (2007) (in Japanese).
- 19) <http://www.linear-tech.co.jp/designtools/software/#Spice>
- 20) N. Matsuda, et al., J. Vac. Soc. Jpn. 30, 446 (1987) (in Japanese).
- 21) N. Nishimori, et al., Proceedings of EPAC-2000, pp. 1672–1674, (2000).
- 22) M. Yamamoto, et al., Proceedings of LINAC-2002, pp. 680–682, (2002).
- 23) J. H. Billen and L. M. Young, LA-UR-96-1834 (1996).
- 24) P. G. Slade, The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application (CRC Press, Boca Raton, FL, 2007).
- 25) M. J. de Loos and S. B. van der Geer, Proceedings of EPAC-1996, pp. 1241–1243, (1996).
- 26) W. T. Diamond, J. Vac. Sci. Technol. A 16, 707 (1998).
- 27) W. T. Diamond, J. Vac. Sci. Technol. A 16, 720 (1998).
- 28) F. Furuta, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 538, 33 (2005).
- 29) H. Kurisu, et al., J. Vac. Soc. Jpn. 49, 254 (2006) (in Japanese).
- 30) H. Kurisu, et al., J. Vac. Sci. Technol. A 21, L10 (2003).
- 31) J. Grames, et al., Proceedings of PAC-2005, pp. 2875–2877, (2005).