

DEVELOPMENT OF A 500-kV PHOTOCATHODE DC GUN

Nobuyuki Nishimori^{1,A)}, Ryoji Nagai^{A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, 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-mura, Naka, Ibaraki, 319-1195

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

^{C)}Hiroshima University, Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8530

^{D)}Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8602

Abstract

A 500-kV, 10-mA photocathode DC electron gun has been developed for the next generation energy recovery linac (ERL) light sources. The high voltage conditioning up to 500 kV has been performed with a cathode electrode and NEG pumps in place. The pressure of the gun chamber reached 6×10^{-10} Pa (N_2 equivalent) with 18000 l/s NEG pumps. The 1/e static life time of NEA GaAs cathode is 1000 hours in a cathode preparation chamber.

500-kV光陰極DC電子銃の開発

1. はじめに

エネルギー回収リニアック(ERL)を用いた次世代光源として、共振器型X線自由電子レーザー(XFEL)[1]、コンプトン散乱を利用した大強度単色X/ガンマ線源[2]、多重ビームラインを持つXFEL[3]が検討されている。これら次世代放射光源の主要開発要素の一つが、0.1-1mm-mradの低エミッタンス、かつ1-100mAの電流を生成できる高輝度・大電流電子銃である。その候補であるDC電子銃、常伝導RF電子銃、超伝導RF電子銃の開発が世界各地で進められている。我々は、米国ジェファーソン研究所(JLab)で9.1mA、エミッタンス8mm-mradのビーム生成の実績[4]を持つDC光陰極電子銃を採用し、その更なる高輝度化、大電流化を目指している。

JLabの実績が示すように、現時点で高輝度・大電流化に最も近い性能を示しているのはDC電子銃である。最大の技術的課題は、電子ビームの高エネルギー化である。500keV以上のビームを生成することができれば、電子ビームの空間電荷力によるエミッタンス劣化を避けることができ、目標とする低エミッタンス化が可能となる[5]。しかしながら、JLabの350kVより高いDC電圧で電子銃を運転することには困難が伴う。その理由は、カソード電極を支えるサポートロッドからの電界放出電子が、チャージアップによりセラミック管を破壊するためである。

我々は、多重分割型セラミック管をガードリングと共に用いることで、電界放出電子によるセラミック管破壊の問題を解決できることを提案し、H21年度に550kVまでの高電圧印加に世界で初めて成功した[6]。H22年度からは、電子ビーム生成を目標に掲げ、カソード・アノード電極のインストール、非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプのインストールを行った。これらビーム生成に必要な部品のインストール後に380kVまでの高電圧印加試験に成功した[7]。

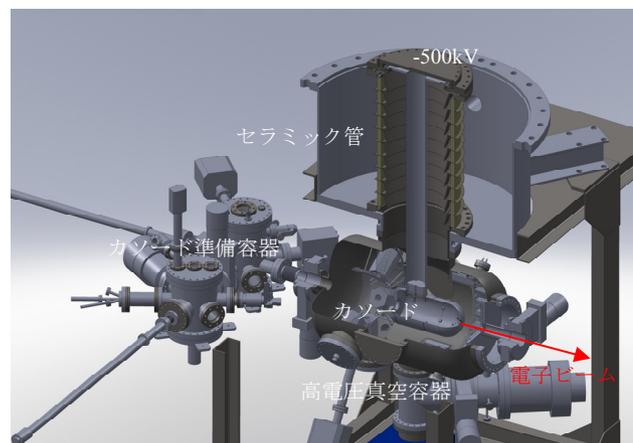


図1: 500-kV 光陰極DC電子銃

H23年度の本報告では、500kVでのビーム生成へ向けた開発の進展状況を次の4つに分けて紹介する。
① 300keVで電子ビーム生成試験を行い、ビームプロファイルの確認と、最大で5.7 μ Aの電子ビーム生成を行った。
② 電子銃真空容器内のNEGポンプを7200 l/sから18000 l/sに増強し、ULVAC社製の真空計AxTRANで真空度 6×10^{-10} Paを計測した。
③ カソード・アノード電極とNEGポンプをインストールした状態で高電圧印加試験を行い、セラミック管への500kV高電圧印加に成功した。これにより、450kVでのビーム生成の目途がたった。
④ 光陰極として用いている負親和性ガリウム・ヒ素(NEA GaAs)半導体の1/e静的寿命を、H22年度までのおおよそ4倍に相当する1000時間に延ばすことに成功した。新たに導入した水素洗浄装置を用いたことによる。

2. 300-kVでのビーム生成試験

H22年7月の高電圧印加試験で、380kV以上の電圧印加を断念したのは、電子銃真空容器の一部の場所で局所的な放射線を観測したためである[7,8]。電界

放出電子が暗電流となって、特定の場所で放射線を発生した。放射線の発生位置から、2000 l/s NEGポンプを覆う高電圧シールドカバーと電極間で暗電流を生じたと考えられる。そこで、電圧印加試験を一時中断し、300kVでのビーム生成試験を先に行うことにした。

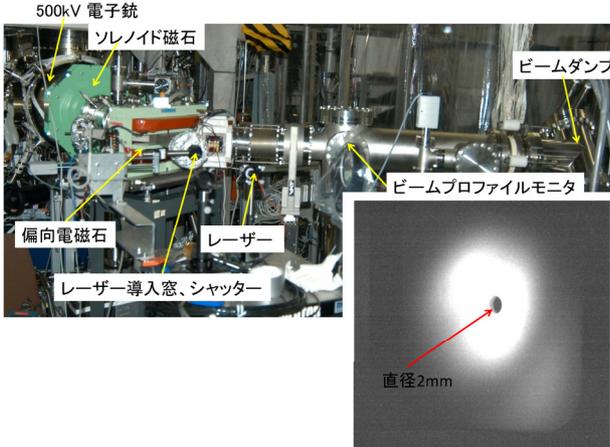


図2: 電子銃下流ビームライン (上) とアルミナ蛍光板で観測したビームプロファイル (右下)。

図2にビーム生成試験用の電子銃下流ビームラインを示す。電子銃直後にステアリング電磁石とソレノイド電磁石を設置し、ビームの軌道調整を行う。アノード電極下流1.2mに60度偏向電磁石を設置し、ビームダンプに導く。60度偏向により、ダンプの際のアウトガスがカソード電極に直接逆流するのを防ぐことができ、ドライブレーザーの入射口を確保できる。図2に示すようにドライブレーザー下流にはシャッターを設け、遠隔操作によりビームのオン・オフを行った。ビームはアルミナ蛍光板とビームダンプ電流で確認した。偏向電磁石直後に設置したステアリング電磁石に交流電流を流し、上下左右にビームを走査した。これにより、ビームダンプでのビーム広がり大きくすることができ、発熱の集中を抑制できる。

図2の右下にH22年10月にアルミナ蛍光板で計測したビームプロファイルを示す。蛍光板の穴のサイズは直径2mmで、ビームサイズは直径1cm程度である。ドライブレーザーの光陰極位置でのサイズは直径数mmである。ビームプロファイルの観測は、アノード電極下流のステアリング、ソレノイド電磁石を用いずに行うことができた。電極のアラインメントが、うまくできていることを示す。最大で5.7μAの電流を生成した。この時のHeNeレーザーのパワーは1.93mWで、GaAs光陰極の量子効率率は0.58%@633nmであった。このビーム生成試験時には、ビームダンプの周囲に放射線遮蔽を設置していなかった。エリア放射線モニタが上昇し10μSv/hを

超えそうになったため、5.7μA以上のビーム生成を差し控えた。ビームプロファイル確認と電流計測をもって、300kVでのビーム生成試験を終了した。

3. NEGポンプのインストールと真空度

300kVでのビーム生成試験後に、電子銃真空容器内のNEGポンプの排気速度を7200 l/sから18000 l/sに増強した。増強の内訳は、カソード・アノード電極周囲の400 l/sのNEGポンプを8台から20台に、カソード電極の後方の2000 l/sのNEGポンプを2台から5台である。ポンプの増強とともに、H22年7月の暗電流発生原因と考えられた、2000 l/sのNEGポンプを覆っていた高電圧シールドを除去した。同時に、2000 l/s NEGポンプ用の各ポートにニップルを追加し、ポンプ本体が高電圧真空容器内に出ないようにした。ニップルの高電圧容器側には新しい高電圧シールドを設置し、カソード電極がNEGポンプを直接見込まないようにした。

高電圧真空容器を180°Cで50時間ベーキングし、NEGポンプの活性化を行ったところ、電子銃真空容器内の真空度 6×10^{-10} PaをULVAC社製AxTRANで計測した。目標としていた 1×10^{-9} Pa以下を達成したことになる。昨年度の 2×10^{-9} Paよりも3倍よくなり、NEGポンプを2.5倍増強した効果が表れた。

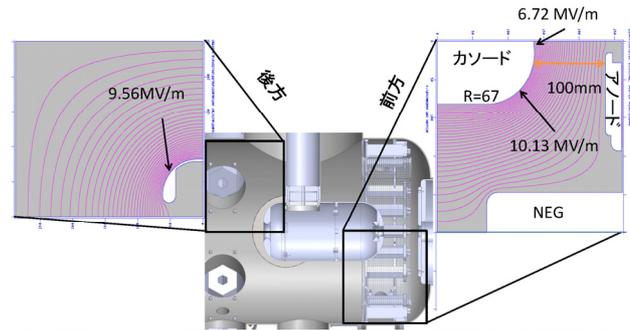


図3: カソード・アノード電極の静電場計算。電極後方のNEGポンプを電子銃容器の外に設置。

ただし、真空度の絶対値についてはいくつか注意が必要である。真空容器内の残留ガスは水素がほとんどであるのに対し、真空計は窒素ガスに対する表示である。ガス種に依存した感度の違いから、水素ガスに対する真空度は表示のほぼ2倍となる。真空計の位置も問題となる。今回の計測では、70ICFのポートにつけたT管に真空計を設置した。真空計は電子銃真空容器を直接見込まないような奥まった位置にあり、圧力は高めに計測されている可能性がある。圧力は目安に過ぎず、光陰極の寿命の長短で議論するしかない。

図3に現在の電極とNEGポンプの配置での静電界計算結果を示す。最大電界はカソード電極の前部

にあり、10.1MV/mである。高電圧メッシュシールドを取り外したことで、後方の最大電界が10.5MV/mから9.6MV/mに減った。

4. 高電圧印加試験

NEGポンプ増強と2000 l/sのNEGポンプの高電圧シールド除去を終え、高電圧印加試験を再開したのがH22年12月である。いくつかのトラブルを克服し、H23年2月には466kVまでの高圧印加に成功した。しかしながら463kVでの放電後、270kV付近から電界放出暗電流による局所放射線を観測するようになった。局所放射線位置と図3の静電界計算結果を比較すると、カソード電極の前方部の電界の最も強くなる付近から暗電流が生じていると考えられた。大気解放して電極の様子を調べたが、穴や尖った部分は特に見つからなかった。ただ、カソード電極に細かい粉塵が付着しているように見えたため、BEMCOTで拭き取った。電子銃容器内部に残留する微細な粉塵が放電でチャージアップし、カソード電極に吸い寄せられたと考えられる。3月6日に再開した高電圧印加試験では、450kVまでの印加に成功した。しかし、順調に試験を進めている最中の3月11日、東日本大震災により中断を余儀なくされた。

高電圧印加試験は1000 l/sのターボポンプも回しながら行っていたため、震災発生直後に慌てて制御室から実験室まで下りて行き、ターボポンプヘッドのバルブを手動で閉じた。揺れがひどくなる中、制御室まで戻る途中に停電となった。停止途中のターボポンプの羽が壁とこすれ、破壊音のような大きな摩擦音がしていた。

3月末の建屋通電後、ターボポンプを再起動したところ、幸いなことに通常運転に入った。電子銃の他の部分についても、震災による直接の破損箇所は、現在まで見つかっていない。3月末に高電圧印加試験を再開したが、450kVより低い電圧から暗電流が発生したため、再び真空作業を行うことにした。電子銃内のセラミック管、ガードリング等に乗っていた粉塵が、震災により落下し放電でチャージアップして電極に付着したと思われる。

5月になりクレーン作業中の余震発生確率が減ってから、真空作業を行った。震災の影響で狂いの生じたカソード電極の再アラインメントも行った。その後高電圧印加試験を再開し、7月に510kVまでの印加に成功した(図4上参照)。これはセラミック管及びカソード・アノード電極間に500kVの電圧を印加したことに相当する。セラミック管の高圧端子とグラウンド間の $500\text{M}\Omega \times 10 = 5\text{G}\Omega$ の抵抗と、セラミック管と高電圧電源間の出力抵抗 $100\text{M}\Omega$ を考慮すると、セラミック管の両端に電圧500kV印加するには高電圧電源に510kV印加すればよい。

480kVに到達した段階で、440kV(セラミック管には430kV)での電圧保持試験を行い、6.5時間の無

放電運転に成功した。この結果から、到達電圧より40kV低い電圧で数時間の連続運転ができることがわかる。今回の高電圧印加試験で510kVに到達したことと併せて考えると、ユーザー運転の目安となる8時間の連続運転をセラミック管電圧450kVで行える目途がたったと言える。H21年度に電極とNEGポンプをインストールしていない状態で、510kV(セラミック管に500kV)で8時間の電圧保持に成功した[6]。その試験は550kVで数分電圧保持ができるようになった後に行った。

図4に示すように、延べ116.5時間コンディショニングを続けたところで、電界放出電子が原因と考えられる暗電流が発生し、局所的な放射線が観測されるようになった。その位置は2月に466kVまで印加した時に観測したのと同様位置である。現在、原因究明中であるが、以前と同様、放電によりプラスに帯電した微細な粉塵が電極に付着したためと考えられる。

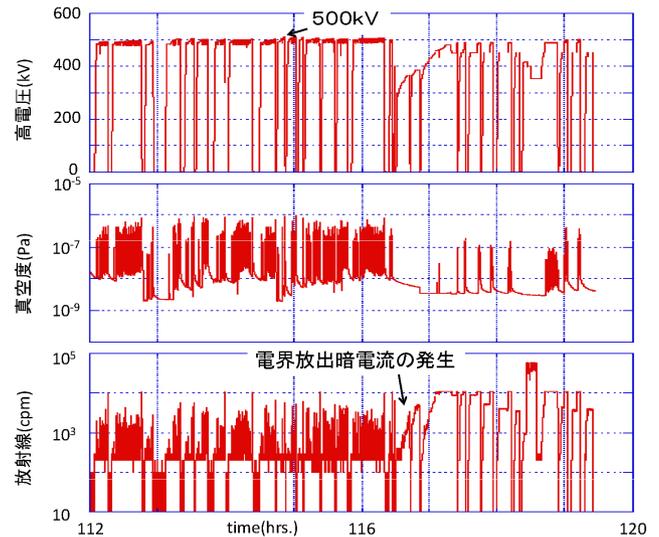


図4: 高電圧コンディショニングの様子。横軸は延べコンディショニング時間を表し、112-120時間についてプロット。上から高電圧、真空度、放射線を表す。115時間でセラミック管両端への500kV印加に成功したが、116.5時間で電界放出暗電流が発生した。

5. NEA GaAs光陰極静的寿命試験

300kVでのビーム生成時のNEA GaAs光陰極の1/e静的寿命 (static life time) は270時間であった。簡単なビーム生成試験を行うことができるが、電荷寿命 (charge life time) 測定には支障が出る。電荷寿命とは、光陰極の量子効率が $1/e$ になった時点で光陰極からビームとして取り出した全電荷量である。JLabでは2000C(クーロン)程度の電荷寿命を計測している[9]。2mAの連続運転で2000C引き出すには、

1,000,000秒（280時間程度）かかり、現在の静的寿命と同程度になる。従って、電荷寿命測定には静的寿命を厳密に見積もる必要がある。

NEA GaAs光陰極の1/e寿命を延ばすには表面の清浄化を行う必要がある。これまで、化学洗浄と500°Cでの熱洗浄により270時間の寿命を達成した。H22年12月までに、原子状水素洗浄装置を光陰極準備システムに導入し、これによる表面清浄化試験を行った。水素の還元反応により、表面の酸化物除去効果がある。

原子状水素を生成するには、RFで生成する方法[10]等があるが、我々はタングステンキャピラリーをDC電源で2000°Cに加熱して原子状水素を生成する装置（MBE-Komponenten GmbH社のHydrogen Atom Beam Source (HABS))を用いた[11]。指向性がよく、イオンフリーの原子状水素を生成できる特徴があり、超格子GaAs光陰極の洗浄にも利用できる。

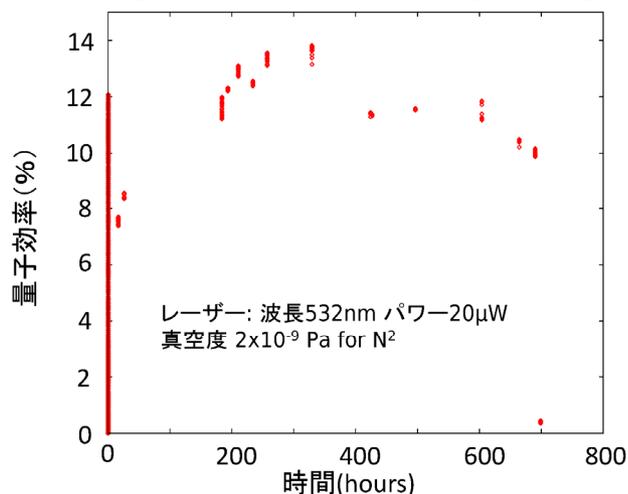


図5: NEA GaAs光陰極の静的寿命曲線。真空度 2×10^{-9} Paの光陰極準備容器内で量子効率を計測。バイアス電圧は40V。700時間で量子効率が急に落ちたのは、電子銃真空容器のベーキングを始めたため。ゲートバルブからのアウトガスにより量子効率が急速に劣化した。

GaAs光陰極をタングステンヒーターを用いて450°Cまで加熱し、さらに原子状水素を7.5分間照射した。水素洗浄装置に流した水素ガスの量は、300 l/sのターボポンプで排気して容器の真空度が 2.4×10^{-4} Paになる程度である。洗浄装置と光陰極間の距離は250mmである。水素照射後、光陰極を450°Cで30分アニールした。手順は文献[11]を参考にした。

洗浄後の光陰極にセシウムと酸素を添加し、量子効率及び寿命の測定を図5に示すように行った。

6. まとめ・今後の予定

次世代放射光源のための500kV光陰極電子銃の開

発を進めている。DC光陰極電子銃の主要な技術的課題である極高真空、高電圧、光陰極寿命について、それぞれ 6×10^{-10} Pa、450kVでのビーム生成の目途、1/e静的寿命1000時間を達成した。KEKに建設中のコンパクトERLでは2012年度中のビーム生成を予定しているが、その電子銃として使える目途がついたといえよう。

今後は、500kVでのビーム生成に向けた開発を継続する。現状のセットアップで高電圧印加試験を継続し、電極とNEGポンプをインストールした状態で、セラミック管500kVの8時間連続運転の早期実現を目指す。同時に、より容易な高電圧印加実現のため、暗電流の種となる電極に付着した微細な粉塵を取り除く技術の開発（希ガスコンディショニング等）や、表面電界強度の低いカソード電極への交換を計画している。光陰極の更なる長寿命化についても、引き続き取り組む予定である。

謝辞

500-kV光陰極DC電子銃の組み立て、ベーキング、高電圧コンディショニング等の作業に御協力頂いた有限会社エアリー瀧山陽一氏に深く感謝致します。

本研究の一部は、科研費基盤 (C) 23540353、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] 島田美帆, 「ERL計画の進捗状況」;坂中章悟 他, 「コンパクトERL建設の進捗状況」, 第8回加速器学会.
- [2] 羽島良一 他, 「コンパクトERLにおけるレーザーコンプトン γ 線の発生と核種非破壊測定実証実験の計画」, 第8回加速器学会.
- [3] J. N. Corlett et al., "Design studies for a VUV-soft X-ray FEL facility at LBNL", Proc. of IPAC'10, 2639 (2010).
- [4] C. Hernandez-Garcia et al., "A high average current DC GaAs photocathode gun for ERLs and FELs", Proc. of PAC05, 3117 (2005).
- [5] I. V. Bazarov and C. K. Sinclair, PRSTAB 8, 034202 (2005).
- [6] R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010).
- [7] 西森信行 他, 「ERL放射光源用500-kV光陰極DC電子銃開発の現状」, 第7回加速器学会, 802 (2010).
- [8] N. Nishimori et al., "Development of a 500-kV photocathode DC gun for ERL light sources", Proc. of LINAC2010, 995 (2010).
- [9] J. Grames et al., PRSTAB 14, 043501 (2011).
- [10] C. K. Sinclair et al., Proc. of PAC97, 2864 (1997).
- [11] D. A. Orlov et al., Journal of Applied Physics 106, 054907 (2009).