

コンパクト ERL 電子銃の現状とアップグレード計画

STATUS AND UPGRADE PLAN OF THE CERL GUN

西森信行^{#,A)}, 永井良治^{A)}, 森道昭^{A)}, 羽島良一^{A)}, 山本将博^{B)}, 本田洋介^{B)}, 宮島司^{B)}, 内山隆司^{B)}, 金秀光^{B)}, 帯名崇^{B)}, 栗木雅夫^{C)}

Nobuyuki Nishimori^{#,A)}, Ryoji Nagai^{A)}, Michiaki Mori^{A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Masahiro Yamamoto^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Tsukasa Miyajima^{B)}, Takashi Uchiyama^{B)}, Xiuguang Jin^{B)}, Takashi Obina^{B)}, Masao Kuriki^{C)}

^{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

Abstract

Beam commissioning of the compact ERL (cERL) has been performed since Apr. 2013 for the next generation ERL light source project, and x-ray generation via laser Compton scattering (LCS) was demonstrated recently. The DC photoemission gun at the cERL has stably generated average beam current up to 80 μ A at 390 kV. The GaAs photocathode used during LCS experiment shows 1/e dark life time of 6000 hours with extracted charge of 6 C. We installed additional two segmented ceramics to the existing ten segmented ceramics to increase the operational voltage at the cERL to 500 kV. High voltage conditioning up to 550 kV was performed for the gun configuration with ceramics only.

1. はじめに

コンパクト ERL (cERL) は、次世代 X 線放射光源、大強度ガンマ線光源、高繰り返し自由電子レーザー (FEL) を見据えた試験加速器として、2013 年 4 月の運転開始以降、順調にコミッショニングが進められている。2014 年度までに 0.1mA のエネルギー回収試験を終え^[1]、レーザーコンプトン散乱 (LCS) X 線発生、イメージング実験も行った^[2,3]。その間、cERL 光陰極電子銃はトラブル無く、安定にビームを供給している。本電子銃の 2014 年春までの開発状況については第 11 回加速器学会のプロシーディングス^[4]等に報告されている。

本報告では 2014 年夏以降の運転、開発状況について紹介する。2 章では、cERL での LCS 実験のコミッショニング中の電子銃運転状況を報告する。3 章では電子銃セラミック管の改造について報告する。本電子銃は 500kV 電子銃として開発され、JAEA においては 500keV 電子ビーム生成に成功したが、KEK に移設後、10 段分割セラミック管の 2 段分に不具合が見つかり、所定電圧の 8 割に相当する 390kV で運転されている。そこで、新規に 2 段セラミック管を増設して 500kV の運転電圧を目指す改造作業を進めている。

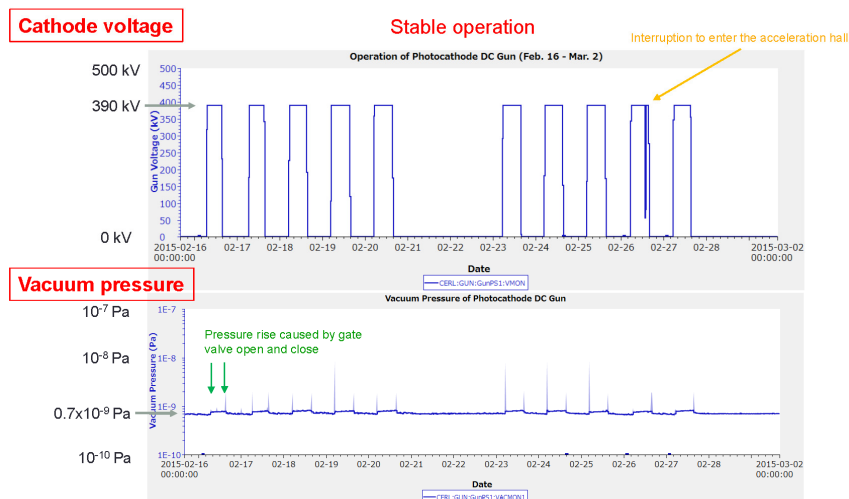


Figure 1: Typical gun cathode voltage and vacuum pressure during two weeks of operation.

[#] nishimori.nobuyuki@jaea.go.jp

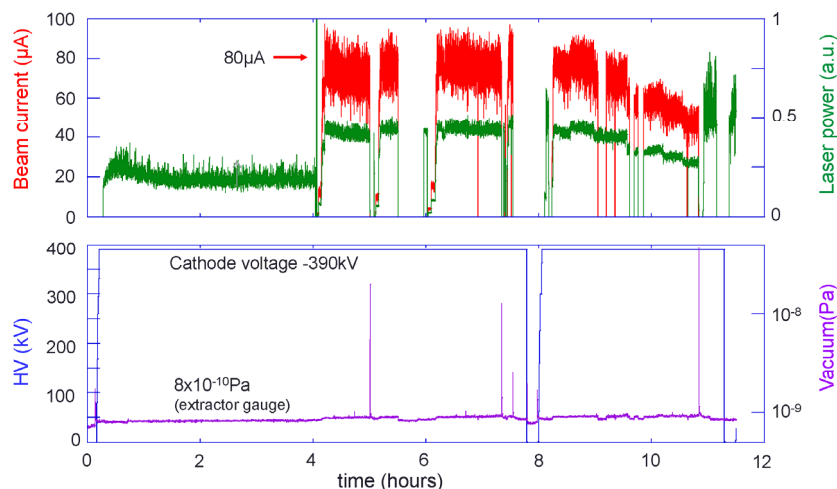


Figure 2: Beam current (red), laser power (green), cathode voltage (blue), and vacuum (purple) during CW operation with beam current up to 80 μA .

2. cERL での光陰極電子銃運転

2013年4月の運転開始以来、過去2年以上に渡り電子銃の放電などに起因するトラブルは一度もなく、順調に運転を続けている。図1に典型的な運転例を示す。運転は週5日で、平日13:00頃から23:00頃までの約10時間、電子銃に390kVの高電圧を印加する。延べ運転時間は1300時間を超えている。電子銃真空度は $1 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 以下を維持している。

図2にLCSビームによるイメージング実験中の電子ビーム電流(赤)、レーザーパワー(緑)、電子銃電圧(青)、真空度(紫)を示す。エネルギー回収後のファラディカップで測定したビーム電流は、レーザーパワーにほぼ比例している。80 μA 程度の電子ビームを数時間に渡り安定に供給し、イメージング画像の取得に貢献した。時折、真空度が上昇しているのは電子銃起因によるものではなく、下流ビームラインに設置したコリメーターでビームの一

部がスクレイプされた時のアウトガスなどによるものである。

図3にLCSコミッショニング中の光陰極の量子効率(QE)の時間変化を示す。光陰極はガリウムヒ素を用いている。2015年1月にセシウムと酸素による表面の活性化を行った光陰極を、電子銃にインストールしたままの状態でも6月末まで用いることができた。7月でも数%のQEが得られていることから、さらに半年は使える見込みがある。光陰極のQEは電子銃直後の可動式ファラディカップで測定した電流値とレーザーの出力から求める。日々の運転開始時と終了時にQEを測定した。また、電子銃駆動レーザーの照射位置を動かしながら測定することで光陰極のQEマップも測定できるようになっている。ビーム生成レーザーは光陰極中心($x=2\text{mm}, y=2\text{mm}$)に対し、オフセット位置に照射されている。cERL電子銃では数 μA を超えるCW運転を行うと、QEが下がる現象が観測されている。一方で、CW運転を

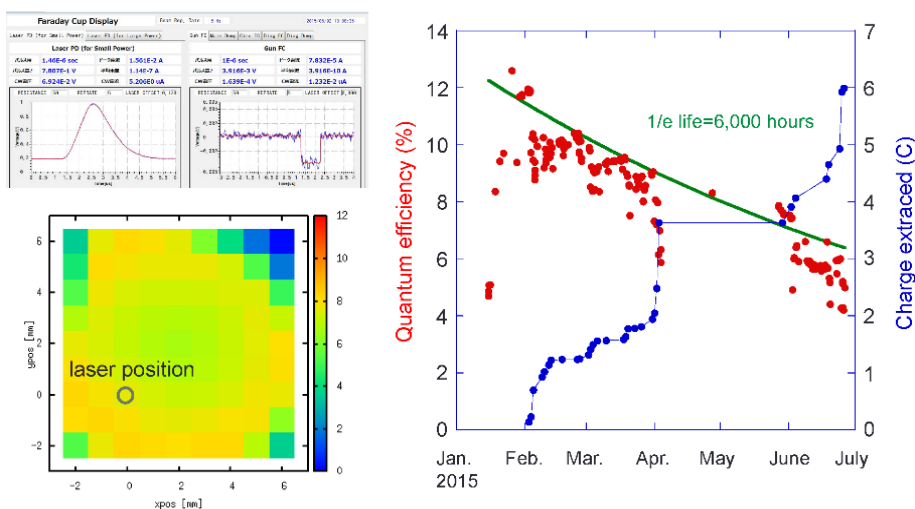


Figure 3: Faraday cup display (top left), QE map of photocathode (bottom left), QE and charge extracted during LCS commissioning from January to July in 2015.

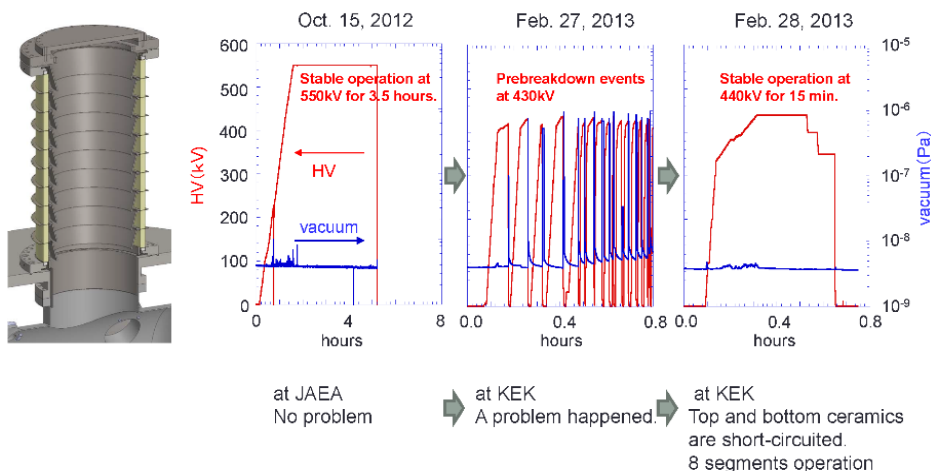


Figure 4: High voltage conditioning without central stem electrode. HV tests with ten segmented ceramics at JAEA (left), at KEK (middle), and that with eight segments at KEK (right).

せずにいると、徐々に QE が回復する。この QE の劣化と回復現象の原因については、よくわかっていない。今後理解を深める必要がある。

cERL 電子銃の運転は、電圧が当初目標の 500kV に届いていないものの、0.1mA の電流においては、極めて安定にビーム供給を続けてきた。光陰極の寿命についても、コミッショニングやイメージング実験にとっては申し分のない性能を示している。1mA 以上のビーム電流で運転を続けたときに、寿命がどうなるかが、今後の課題の一つである。

3. 2 段セラミック管の増設

図 4 に光陰極電子銃を JAEA から KEK に移設前後での高電圧印加試験結果を示す。本試験では、10 段セラミック管及びガードリングの状態をチェックするため、カソード電極及び支えとなるサポート電極を外して試験を行った。2012 年 10 月の移設直前の JAEA 試験では 550kV で 3.5 時間の無放電を実現していた。ところが、cERL への移設直後の試験では 430kV で放電し、更なる電圧印加が困難となった。cERL でのガードリング装着作業時に、10 段セラミック管の最上段と最下段真空側の表面に汚れが付着していることを認めていた。アセトンなどの有機溶剤では除去できなかった。そこで、最上段と最下段の分割セラミック管を短絡し 8 段セラミック管として電圧印加を行ったところ 440kV まで無放電で電圧印加可能ながわかった。この電圧は 10 段で 550kV に相当し、各段に印加する電圧としては最大定格値に達している。その後、カソード電極を付けた状態で 420kV までコンディショニングを行い、カソード電圧 390kV で 2013 年 4 月から運転を続けている。

cERL での 500kV 運転が困難であることが判明後、電圧回復のための様々な手法を提案した。最初に提案したのは、サンドブラストによるセラミック管修理である。10 段セラミック管の最上段、最下段の表面汚れをサンドブラストで除去する。JAERI-FEL の熱電子銃で実績のある手法であった。しかしながら、

コミッショニング中の cERL 電子銃が負うリスクとしては高すぎるという理由で採用されなかった。次に 10 段セラミック管の新規製作を提案したが、高価であるため実現しなかった。現在試みているのが、新規 2 段セラミック管を製作し、既存の 10 段セラミック管に増設する案である。10 段セラミック管より安価であり、JAEA 羽島グループ予算で製作することができた。10 段セラミック管を移動させる必要がないためリスクが比較的小さく、運転電圧 390kV が、ほぼ保証されていることも採用の大きな理由である。

図 5 に改造後電子銃の模式図を示す。今回製作したのはガードリング付 2 段セラミック管、延長サポートロッドである。2 段セラミック管は 10 段セラミック管と同じ素材 (99.8% Al_2O_3 A99P : 品川ファインセラミックス) を用いて、10 段セラミック管と同じ日立パワーデバイスが製作した。ガードリングも 10 段セラミックと同様の設計でチタン製であり、新光産業が製作した。新光産業はサポートロッドやカソード電極を製作しており、延長サポートロッドも製作した。延長サポートロッドと既存サポート

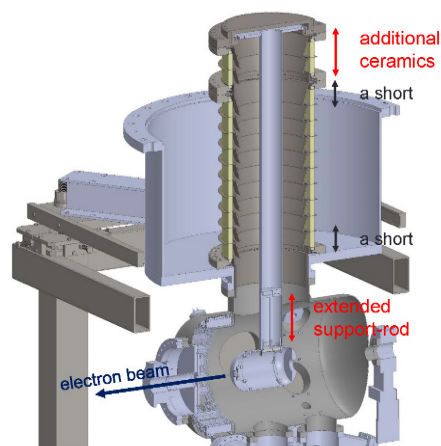


Figure 5: Gun configuration with additional two segmented ceramics.

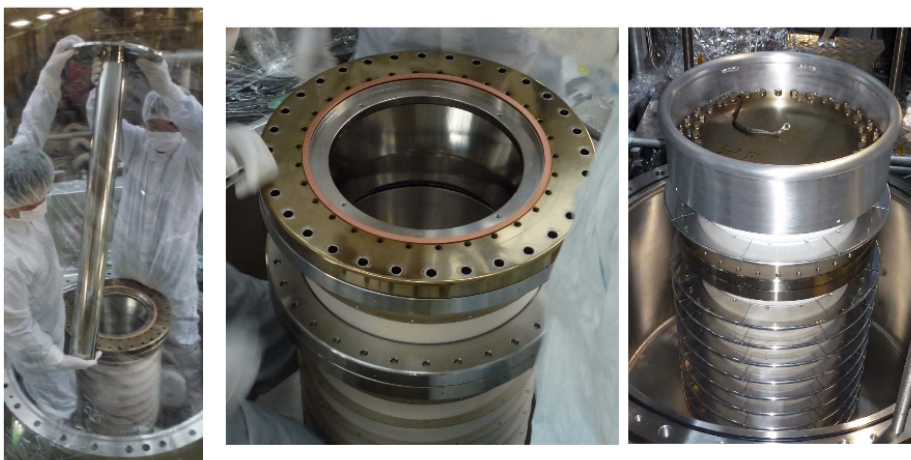


Figure 6: Photos during installation of additional ceramics.

ロッドの継ぎ目の高さは電子銃真空容器と SF₆ タンク容器の継ぎ目を覆う最下段のガードリングの下端部と同じである。仮に電界放出電子がサポートロッドの継ぎ目から発生したとしても、セラミック管を叩いて放電の原因になる可能性は低い。

図 6 に 2 段セラミック管の増設作業の様子を示す。カソード電極とサポートロッドを外した後に 2 段セラミック管を 10 段セラミック管上に設置する。2 段セラミック管のガードリングはあらかじめ設置しておく。10 段と 2 段セラミック間はヘリコフレックスで真空封止した。所定の締め付けトルクは 30Nm 程度だが、リークがあったため最終的に 60Nm にしている。ちなみに、10 段セラミック下部は 35Nm、2 段セラミック管上部は 50Nm が現状の締め付けトルクである。ベーキング後のリークテストでは、セラミック管のリークは $1 \times 10^{-11} \text{Pam}^3$ 以下であり問題ない。図 6 右は、セラミック管外側のガードリング、及びセラミック管上部にコロナリングを取り付けた様子を示す。この状態から SF₆ タンクを被せて、高電圧印加試験を行う。

2 段セラミック管増設の高電圧印加試験の様子を図 7 に示す。真空にアクティビティがやや認められたものの、放電の兆候なしに 550kV まで印加することができた。真空が徐々に良くなっているのは、電圧印加試験直前に四重極質量分析計を起動し、セラ

ミック管内部に SF₆ ガスの漏れ込がないことを確認したためである。2009 年に 10 段セラミック管の最初の電圧印加を行ったが、当時は 500kV に到達する前から放電が起り、500kV より低電圧で真空度が 10^{-5}Pa に達するような放電があった^[5]。今回はそのような放電もなく 550kV まで到達し、550kV で 3 時間以上の無放電を実現した。2009 年の実験では SF₆ タンク側に特に 450kV を過ぎてからコロナ放電が目立った。高電圧電源の電流値が電圧のリニア直線から 450kV を過ぎるとずれたことも証拠となっている。コロナリングに不具合があったためである。また、真空ポンプがターボポンプのみであったのに対し、本試験では NEG ポンプとイオンポンプが増設されている。これらの影響も高電圧試験結果の違いの原因と考えられる。

高電圧電源の電流値を高電圧の関数としてデータをフィットすると $I[\mu\text{A}] = 0.33V[\text{kV}] - 0.37$ が得られた。この値は 2012 年に JAEA で実測した $I[\mu\text{A}] = 0.33V[\text{kV}] - 0.29$ とほぼ同じであった。2012 年は、カソード電極及びサポートロッド有での測定値である。

4. まとめ

2014 年夏以降の cERL 電子銃の運転、アップグレード状況について報告した。cERL 電子銃として、コミッショニングや LCS 実験のために、最大 100 μA 近いビームを安定に供給した。運転電圧が 390kV に留まっている問題を解決するため、新規 2 段セラミック管を既存 10 段セラミック管に増設した。セラミック管単独での高電圧試験を行い、550kV で 3 時間以上無放電であることを実証した。今後はカソード電極をインストールし、ビーム生成条件下での高電圧印加試験、ビーム生成試験を行う。高バンチ電荷運転のための電子銃駆動レーザー開発にも着手しており、本電子銃を用いた高繰り返し XFEL 用の高輝度大電荷電子ビーム生成試験も視野に入れている。

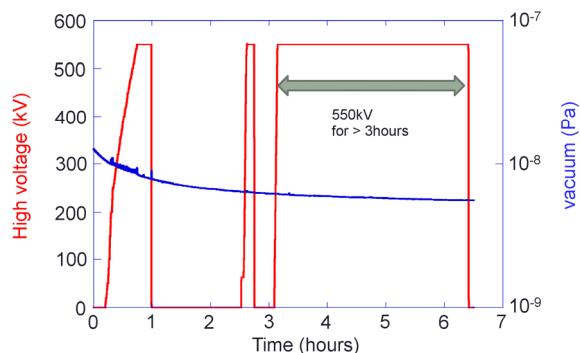


Figure 7: HV test without central stem electrode with additional ceramics. Red is HV and blue is vacuum.

謝辞

2 段セラミック管インストール作業には、三菱電機システムサービス 飯島寛昭氏、NAT 浅川智幸氏、NAT 沼田直人氏に御協力頂きました。

本研究の一部は、科研費 15H03594 の成果である。

参考文献

[1] 高井良太 他, 「コンパクト ERL のコミッショニング状況とビーム利用に向けた取り組み」, 本プロシ

ディンクス.

- [2] 永井良治 他, 「コンパクト ERL でのレーザーコンプトン散乱光源実証実験」, 本プロシディンクス.
- [3] 羽島良一 他, 「レーザー・コンプトン散乱による高輝度ガンマ線の実現とその利用」, 本プロシディンクス.
- [4] 西森信行 他, 「500kV 直流光陰極電子銃の開発」, 第 11 回加速器学会プロシディンクス, 165 (2014).
- [5] N. Nishimori et al., “Development of a 500-kV Photo-Cathode dc Gun for the ERL Light Sources in Japan”, Proc. of FEL2009, TUPC17 (2009).