

コンパクト ERL 電子銃の高性能化

IMPROVED PERFORMANCE OF THE CERL GUN

西森信行^{#,A)}, 山本将博^{C)}, 羽島良一^{B)}, 森道昭^{B)}, 永井良治^{B)}, 宮島司^{C)}, 内山隆司^{C)}, 本田洋介^{C)}
Nobuyuki Nishimori^{#,A)}, Masahiro Yamamoto^{C)}, Ryoichi Hajima^{B)}, Michiaki Mori^{B)}, Ryoji Nagai^{B)}, Tsukasa
Miyajima^{C)}, Takashi Uchiyama^{C)}, Yosuke Honda^{C)}

^{A)} Tohoku University, 1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi 982-0826

^{B)} QST, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka, Ibaraki, 319-1106

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

Abstract

Beam commissioning of the compact ERL (cERL) was performed from Apr. 2013 to Mar. 2016 for the next generation ERL light source project. The DC photoemission gun at the cERL has stably generated average beam current up to 0.9 mA at 390 kV. The operational high voltage was successfully increased up to 500 kV after installation of an additional two segmented ceramics to the existing ten segmented ceramics. A problem towards 10 mA beam generation at 500 kV is discussed.

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[1]、EUV リソグラフィ用高繰り返し自由電子レーザー (FEL) [2]を見据えた試験加速器として、2013 年 4 月から 2016 年 3 月までコミッショニングが進められた。2015 年度末までに 1mA のエネルギー回収試験を終え[3]、レーザーコンプトン散乱 (LCS) X 線によるイメージング実験[4]、テラヘルツ放射光生成試験も行った[5]。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た。本電子銃の 2015 年夏までの開発状況については第 12 回加速器学会の proceedings [6]等に報告されている。

本報告では 2015 年夏以降の運転、開発状況について紹介する。2 章では、2016 年 2,3 月に行われた cERL の 1mA 運転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後の高電圧コンディショニングと運転状況について報告する。cERL 電子銃は 500kV 運転の実績[7]はあるものの、10 段セラミック管に不具合を生じたため、8 段セラミックとして 390kV で運転を続けてきた。2015 年 7 月、新規 2 段セラミック管を増設し 500kV 運転を再度目指す改造作業を行った[6]。カソード電極とそれを支えるサポートロッド電極の無い状態で 550kV までの高電圧印加に成功した[6]。夏以降に、カソード電極とサポートロッド電極をインストールし、550kV までの高電圧コンディショニング、500kV での高電圧保持試験を行った。cERL 電子銃としては、主に 390kV で運転を行ったが、450kV 運転のデモンストレーションも行った。電子銃の高電圧化により、加速ビームが低エミッタンス化することも実証されている[8]。2016 年 4 月以降も、電子銃のみの運転を続けており、500kV でのビーム生成も行った。現状の問題点として光陰極そのものから発生する暗電流

が観測されており、原因を調査中である。4 章では、将来の 10mA 運転に向けた取り組みについて述べる。また、本稿で詳細は述べないが、FEL 利用を視野に入れた高電荷ビーム生成用電子銃駆動レーザーの開

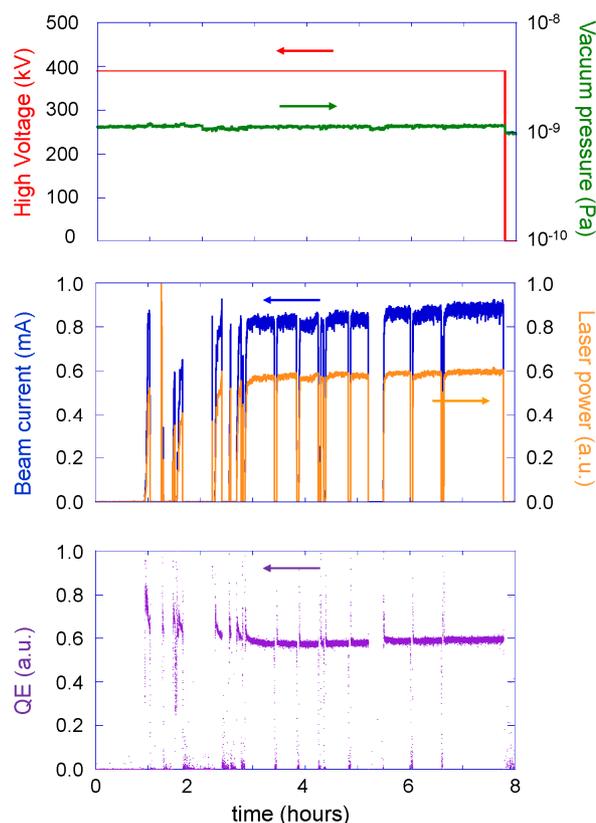


Figure 1: Cathode voltage (red), vacuum pressure (green), beam current (blue), laser power (orange), and quantum efficiency (purple) during CW operation with beam current up to 0.9 mA.

[#] n_nishim@tagen.tohoku.ac.jp

発にも着手している。本発表では、これら cERL 電子銃の高性能化について報告する。

2. CERL での光陰極電子銃運転

2013年4月から2016年3月までの3年間に及ぶcERLの運転中、電子銃に起因するトラブルは一度もなく、順調に電子ビーム供給を行った。Fig. 1に2016年3月29日運転時の電子銃電圧(赤)、真空度(緑)ビーム電流(青)、レーザーパワー(橙)、光陰極量子効率QE(ビーム電流/レーザーパワー)を示す。QEの絶対値は約2%程度である。電子銃の標準的な運転電圧は390kVであった。3年間の延べ運転時間は1500時間を超えたが、電子銃に起因する放電を起こすことはなかった。電子銃真空度は 1×10^{-9} Paという極高真空を維持している。1mA近いビームを生成しても電子銃の真空度に変化はほとんど見られなかった。

Fig.1の例では、ビーム運転開始直後にはQEが急速に劣化しているように見えるが、その後安定になり、途中からむしろ増加に転じているように見える。この日に引き出した電荷は14クーロンであるが、2

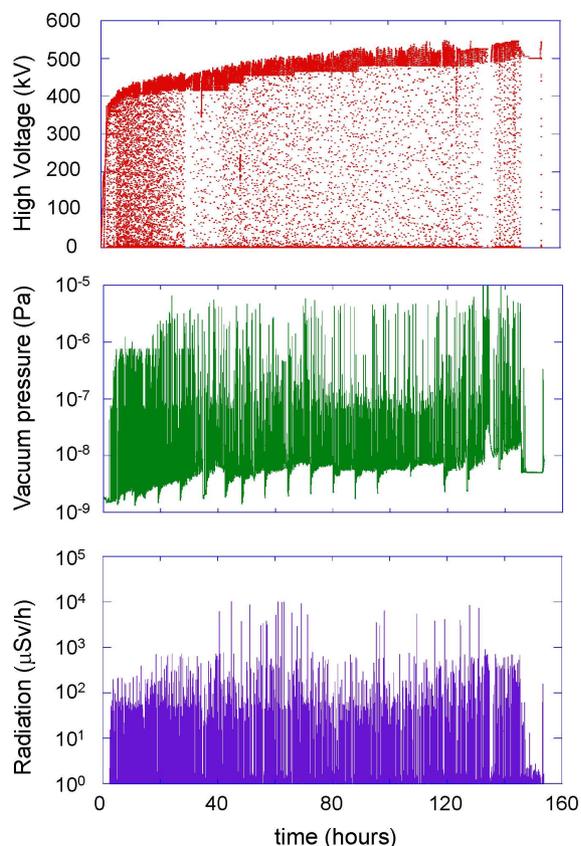


Figure 2: HV conditioning results with central stem electrode and cathode electrode. High voltage (red), vacuum pressure (green), and radiation (purple) during high voltage conditioning.

クーロン引き出し後にはQEは増加に転じている。このようなQEの減少と増加は、cERL電子銃では10 μ Aの施設検査の頃から観測されていた。例えば2014年2月28日の運転では、5 μ Aの電流を数時間生成し計16mCの電荷を引き出すだけで、QEが7.1%から5.7%(最初の80%)に下がった。ところが、翌日には7%近くまで回復した。Fig. 1では、最初のビーム引き出し(横軸1hourの近辺)では5分程度の時間に170mCのビームを生成した。その間、確かにQEは最初の値に比べて85%に減少している。しかしながら、この間の引き出し電荷は2014年時の10倍であり、16mCの引き出し電荷でのQE減少はない。このように、QE減少と引き出し電荷の間に明確な相関が得られておらず、QEの振る舞いについて、理解が不十分である。我々の実験データから電荷引き出し寿命の議論をするのは今のところ困難である。

2016年2月のcERL運転開始前に、光陰極準備容器に高空間分解能QEマップ測定システムを導入した。ビーム生成試験前後のQEマップの詳細な比較が可能になった[9, 10]。これにより、光陰極寿命の理解が異なる観点から進むようになると期待される。

3. 500kV 運転

2015年秋にカソード電極とサポートロッド電極をセラミック管にインストールして、高電圧コンディショニングを行った。すると、180kVという低い電圧から放電が発生し、高電圧コンディショニングが進まないという事態に直面した。セラミック管単体の高電圧試験では、550kVまで放電なしに印加できることを確認していたため、新たにインストールしたサポートロッド又はカソード電極が原因である可能性が高いと考えた。特にサポートロッドはセラミック管の増設に伴い延長の必要があったため、延長サポートロッドを継ぎ足して対応していたが、その継ぎ目から電界放出電流が発生し問題を起こしていることが考えられた。確認のため、電子銃の周囲にポケット線量計を配置し、放電による放射線分布測定を行った。結果、延長ロッド継ぎ目に対応する部分で放射線が高いことが判明した。継ぎ目のないサポートロッドを急遽製作し、2ヶ月後にインストールした。

Fig. 2に高電圧コンディショニングの様子を示す。サポートロッド交換の効果で、400kV近くまで放電せず上昇した。これまでの実績とほぼ同様であり、継ぎ目が原因で180kVで放電していたことが明確になった。その後、コンディショニングを続け550kVまで到達し、500kVで4時間無放電を達成した。これにより500kVでのビーム生成の目処が立った。

このコンディショニング試験中に、放電停止電圧と安定に運転できる電子銃電圧に強い相関のあることを我々は発見した。メカニズムなど詳細については既に論文化されており[11]、本学会で別途発表がある[12]。

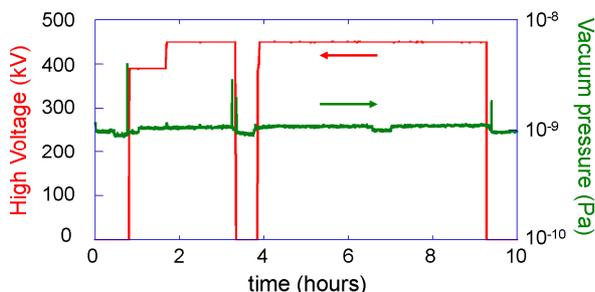


Figure 3: HV test without central stem electrode with additional ceramics. Red is HV and blue is vacuum.

Fig. 3 に 2016 年 3 月末に行った 450kV 運転時の電子銃高電圧と真空を示す。このビーム調整運転では cERL 周回軌道のビーム輸送、エネルギー回収を実施し、エミッタンス測定を行った[8]。安定に運転が出来ていることがわかる。ビーム調整のためバーストモードで運転を行い、電流量は nA 程度であった。ビーム輸送がうまくいけば、CW 運転も可能であったが、1,2 日という限られた時間でビーム調整がそこまで進まなかった。

cERL 運転が終わった 4 月以降に電子銃単独で運転を行った。放電時のダメージを抑制するため、高電圧電源とセラミック管の間に挿入している出力抵抗

抗を 66.6kΩ から 100MΩ に交換した。現在、500kV ビーム生成試験に取り組んでいる。

4. 10mA 運転に向けた取り組み

cERL 電子銃は JAEA において開発され、2012 年に 500kV で 2mA ビーム生成に成功した[7]。当時問題となったのが、最大電流値である。コッククロフト高電圧電源は 10mA 運転仕様であったにもかかわらず、2mA 以上の電流値では電圧降下が発生した。コッククロフト電源に不具合があるのは明らかであった。500kV ビーム生成試験後、直ぐに開始した cERL への移設作業や、ビームコミッションング運転のため、原因をそれ以上調査することは困難であった。高電圧電源の試験を行うためには、500kV で 10mA 流せる負荷が必要であるが、現状の電子銃を用いたビーム生成と異なる負荷（抵抗など）を、新規製作することは予算的にも困難であった。

2016 年になってから、セラミック管増設により 500kV 印加が可能となったため、高電圧電源の調査を再開した。Fig.4 上に示す高電圧電源はコッククロフト電源本体と、その最下段の高周波電圧トランスフォーマー（cERL 電子銃の場合は 25kHz の交流 250V を 24kV に変換）に給電するためのインバータ電源で構成される。コッククロフト電源本体は電子

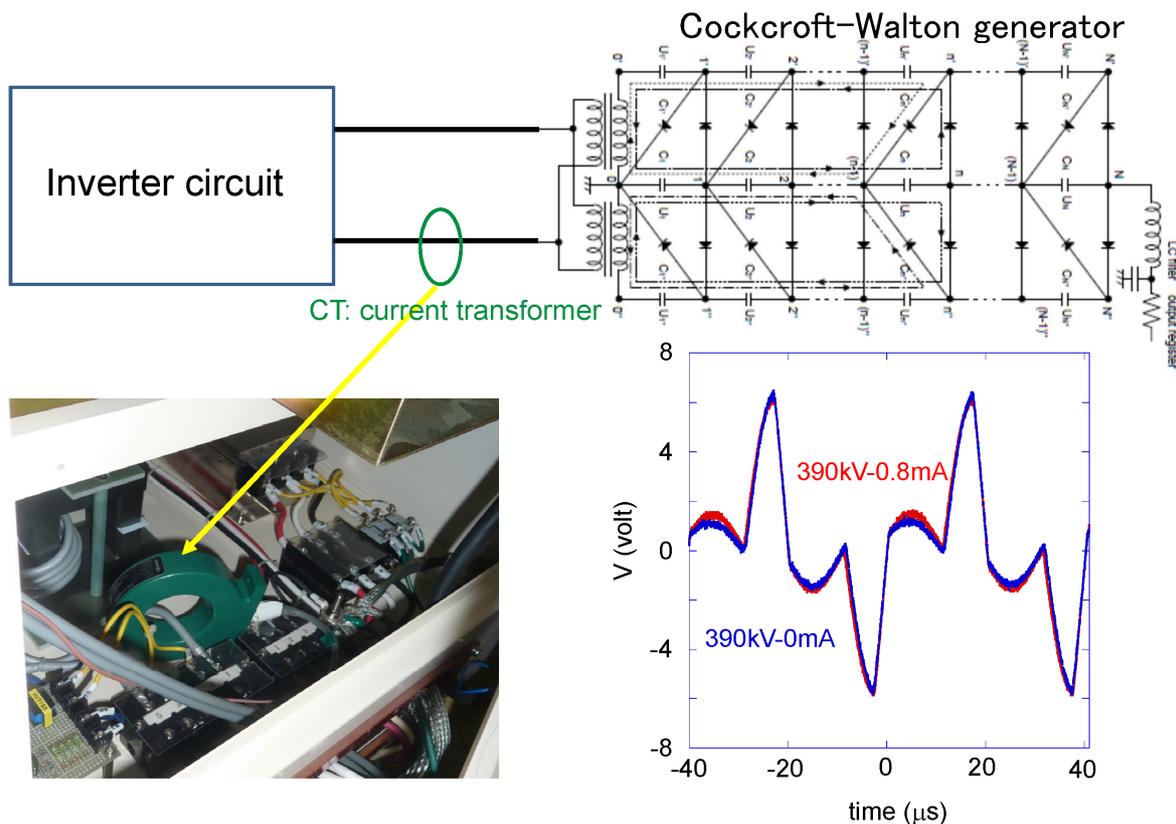


Figure 4: Circuit diagram of Cockcroft-Walton (CW) generator. A current transformer (CT) is used to monitor the electric power provided from the inverter circuit during operation of the CW generator. The bottom right shows waveforms of CT signals during 390 kV with 0 mA beam (red curve) and 0.8 mA beam (blue curve).

銃の SF6 タンク内にあるが、インバータ電源は大気中に置かれている。そこで、Fig. 4 左下に示すようにインバータ電源の出力の一つに CT (カレントトランスフォーマー) を設置して、高電圧印加中のインバータ電源出力の様子を調べた。Fig.4 右下に示すのが 390kV 運転時の CT 波形であり、0mA (青) と 0.8mA (赤) の場合を示している。この結果から、390kV での最大生成電流を推定するのは困難である。そこで、550kV まで印加電圧を変えながら CT 波形を測定した。波形データをまとめるため、各波形の半周期分の面積 (0V を基準とする) を求め、プロットしたのが Fig. 5 である。ほぼ直線状にデータが分布していることがわかる。縦軸のインバータ電源出力は、390kV の 0mA と 0.8mA の差から校正した。

500kV で 2mA 生成に成功した実績から考えた場合の最大供給能力の推定値 (5.7kW) を鎖線で示した。0mA で高電圧 V[kV]を印加した場合、電源回路のフィードバック制御に必要な高電圧電源電流値は $I[\mu A]=0.33V[kV]-0.29$ である[6]。500kV では 165 μA となり、実測値と一致する[13]。ところが、現状のインバータ出力は 500kV-0mA で 5kW に相当するパワーを供給していることになり、フィードバック電流値の 60 倍に相当する 10mA 分の電流が流れている。この電流が観測にかからないコッククロフト電源中のコンデンサやダイオード中を流れているのか、高周波トランスフォーマーでロスしているのか不明であるが、500kV では 5kW にも相当するパワーがコッククロフト電源本体のどこかで失われていることになる。ロスのない理想的な状態では Fig.5 のインバータ電源出力/高電圧の傾きが 1/60 になるべきである。今後、調査を進めるにあたり、空気中でも可能な 100kV 以下で傾きが減る条件を探せばよいと思われる。

高電圧電源を現状のまま使用すると、390kV では 5mA 程度までのビーム生成が可能と推定される。

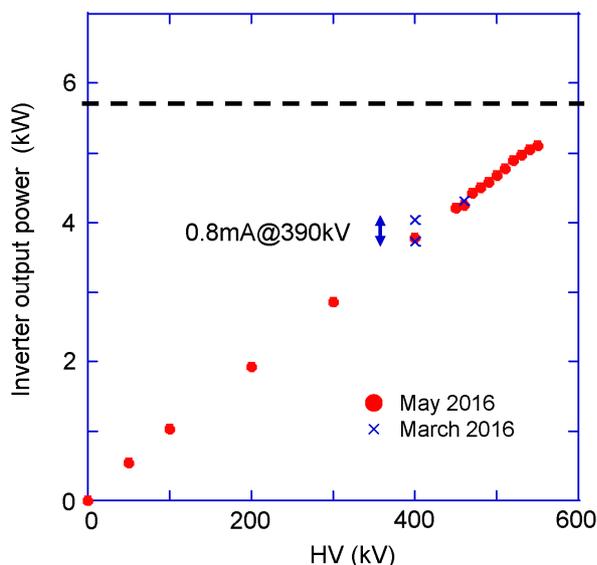


Figure 5: Inverter output power as a function of high voltage of Cockcroft Walton generator.

注意しなければならないのは、電流を増やし過ぎると、電子銃電源の電圧降下が起こることである。数 mA に及ぶ大電流ビーム加速時に電圧降下が発生すると、ビームダイナミクス的にはわずかな影響であっても、ビームハローなどがビームラインに深刻な影響を及ぼす可能性があり、注意が必要である。2012 年 JAEA での電子銃単体試験でも、電圧効果が放電を誘起して光陰極にダメージを与えるなど、影響は深刻であった。現状の装置を用いて 1mA 以上の大電流ビーム試験を行う際には、電子銃電圧を常時監視し、設定電圧より下がった場合にはビームを停止するなどインターロックシステムの構築が必須である。

5. まとめ

2015 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、最大 1mA 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解決のため、電子銃セラミック管の増設を行った。カソード電極などをインストールし、ビーム生成条件下で高電圧試験を行い、550kV までのコンディショニングと 500kV で 4 時間以上無放電を実証した。また、cERL において 450kV ビーム生成も行った。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。

謝辞

電子銃の真空作業、高電圧コンディショニング作業、ビーム生成試験には、NAT 浅川智幸氏、NAT 沼田直人氏、三菱電機 飯島寛昭氏、東日技研 亀田吉郎氏、東日技研 路川徹也氏に御協力頂きました。また、ERL 推進室河田洋教授、KEK 加速器第 7 研究系小林幸則教授、坂中章悟教授をはじめとする cERL 関係者の皆様から多くのご支援を頂きました。本研究の一部は、科研費 15H03594 の成果である。

参考文献

- [1] 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」、第 12 回加速器学会プロシーディングス、WEPOM07, 79 (2015).
- [2] 中村典雄 他、「ERL を用いた高出力 EUV-FEL 光源の S2E シミュレーションスタディ」、本プロシーディングス、TUP074 (2016).
- [3] 坂中章悟 他、「コンパクト ERL におけるビーム電流約 1mA の運転」、本プロシーディングス、WEOM15 (2016).
- [4] 赤木智哉 他、「レーザーコンプトン散乱による小型高輝度 X 線源開発」、第 12 回加速器学会プロシーディングス、THP114, 1331 (2015).
- [5] 本田洋介 他、「cERL 周回部におけるバンチ長と放射スペクトルの測定」、本プロシーディングス、MOP077 (2016).
- [6] 西森信行 他、「コンパクト ERL 電子銃の現状とアップグレード計画」、第 12 回加速器学会プロシーディングス、WEP037, 511 (2015).

PASJ2016 MOP048

- [7] N. Nishimori *et al.*, Appl. Phys. Lett. **102** (2013) 234103.
- [8] 島田美帆 他、「コンパクト ERL におけるエミッタ
ンスおよびオプティックス測定」、本プロシーデ
ィングス、TUP063 (2016).
- [9] 山本将博 他、「大電流 CW ビーム運転前後の半導体
フォトカソード量子効率分布測定」、本プロシーデ
ィングス、MOP043 (2016).
- [10] 亀田吉郎 他、「光陰極の 2 次元高解像度 QE 分布測
定装置の開発」、本プロシーディングス、TUP096
(2016).
- [11] M. Yamamoto and N. Nishimori, Appl. Phys. Lett. **109**
(2016) 014103.
- [12] 山本将博、西森信行、「超高真空における電子刺激脱
離と直流放電現象の関係」、本プロシーディングス、
MOOL07 (2016).
- [13] N. Nishimori *et al.*, “Development of a 500-kV
photocathode DC gun for the ERL light sources in Japan”,
Proc. Of FEL2009, TUPC17, 277 (2009).