

10 mA CW ビーム運転に向けた compact-ERL 電子銃の準備状況

CURRENT STATUS OF compact-ERL ELECTRON GUN PREPARATION FOR 10 mA CW BEAM OPERATION

山本 将博 ^{*,A)}, 阪井 寛志 ^{A)}, 内山 隆司 ^{A)}, 長橋 進也 ^{A)}, 田中 オリガ ^{A)}, 倉田 正和 ^{A)},
谷川 貴紀 ^{A)}, 本田 洋介 ^{A)}, 東 直 ^{A)}, 野上 隆史 ^{A)}
Masahiro Yamamoto ^{*,A)}, Hiroshi Sakai ^{A)}, Takashi Uchiyama ^{A)}, Shinya Nagahashi ^{A)}, Olga Tanaka ^{A)}, Masakazu Kurata ^{A)},
Takanori Tanikawa ^{A)}, Yosuke Honda ^{A)}, Nao Higashi ^{A)}, Takashi Nogami ^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Since 2016, the KEK compact-ERL (cERL) has been conducting research and development for industrial applications. In this R&D, a high-intensity EUV-FEL light source combining an ERL and a free electron laser is being developed for use as a state-of-the-art light source for semiconductor lithography. There are various issues to be solved in order to realize this light source, one of which is the stable supply of a high-brightness electron beam at the 10 mA level from the electron gun. The cERL is currently preparing to increase the current of the electron gun.

1. はじめに

KEK で研究開発が進められているエネルギー回収型線形加速器実証機の compact-ERL では 2016 年に 1 mA CW ビームのエネルギー回収周回運転を実証した [1]。その後、様々な実験が進められてきたが、CW ビームの最大電流の上限值はその時から現在まで 1mA のままである。一方で、産業応用の利用を考えたとき、より大きなビーム電流が必要となる。特に現在検討を進めている ERL を利用した半導体露光用 EUV 光源としての 10 kW 級の大強度 FEL 発振 [2] を得るためには、電子銃には 10 mA 相当の安定した高輝度の CW ビームの供給が必要不可欠となる。具体的には、バンチ電荷量 60 pC、繰り返し 162.5 MHz、平均電流 9.75 mA、規格化エミッタンス $\sim 1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 相当以下の電子ビームを数週間以上安定に供給し続けることが目標となる。そこで、早期に電子銃からの 10 mA CW 電子ビーム生成試験を行う環境を整えるため、2019 年度より大電流ビーム生成に関する課題に対して対応・準備を進めてきた。

2. これまでの履歴、問題点とその対処

この章では、現在の CW ビーム電流 1 mA 運転開始後の電子銃の主な履歴と其中で明らかになった問題やその対処についての概要を解説する。

2.1 500 kV 運転

2016 年時の 1mA ビーム供給開始時の電子銃の運転電圧は 390 kV であり、設計電圧 500 kV での運転は出来ていない状況であったが、その後の電子銃の高電圧コンディショニングおよびそこで得られた放電電圧閾値の発見 [3] から、2017 年より 500 kV の安定運転を開始した。その後、後述のインバーター電源更新・調整作業前までの通算時間で 1300 時間以上、500 kV 状態を無放電で保持することができた (Fig.1)。この結果から 500kV 相当の加速電圧の状態では電子銃を長期的に運転する技術は確立できたと考えている。

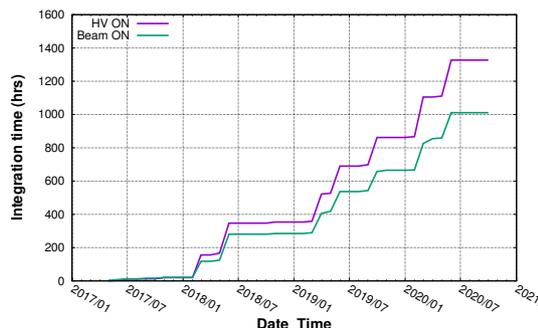


Figure 1: Time history of 500 kV voltage applied and beam delivery time from cERL electron gun.

2.2 高電圧電源

2.2.1 インバーター電源の増強と放電トラブル

一方で、ビーム電流に関してはこれまでの電子銃のビーム運転試験の実績から主に高圧発生部へ電力を供給するインバーター電源およびその間を接続するケーブルの問題から加速電圧 500 kV の状態で出力電流 2mA 以上を供給し続けることが難しい状況であり、2019 年度に最大出力を 10kW (500 kV, 20 mA 相当) となるインバーター電源を製造した。2020 年度にこのインバーター電源を電子銃の高圧発生部と接続し、マッチング・出力調整を行ったが、その過程で高圧電源の電圧・電流のフィードバック配線がされていない状況で出力を行ったヒューマンエラーにより電子銃へ電源電圧の最大値 (およそ 600kV 相当) が瞬時に出力され、大きな放電事象が発生した。

このトラブルにより電子銃の高圧発生部と電子銃高圧部を接続する保護抵抗が焼損 (Fig.2)、電子銃真空も異常放電により真空計がエラーで停止した。その後、真空復旧、高圧発生部の健全性のチェック、従来のインバーター電源での高電圧印加試験を実施したところ、280 kV 以上で電界放出暗電流が増加する状況となった。電子銃真空容器部を大気開放し、内部を調査したと

* masahiro.yamamoto@kek.jp



Figure 2: Resistors in the high-voltage power supply output section of a cERL electron gun that were burned out due to an accidental discharge event.



(a) Current HFT.

(b) Enhanced version of HFT.

Figure 3: Photographs of the current and enhanced versions of the high-frequency transformer (HFT).

ころ特に大きな放電痕などは見つからず、電界放出が疑われるカソード電極表面をリントフリーベンコートでの電極の拭取り、セラミック管内部および chamber 内をイオンガンによるダストの除去を行い、1 週間のベーキング、高電圧印加セットアップ後に高電圧コンディショニングを実施する。この工程で 500 kV 安定印加電圧に到達する前に電界放出源が発生するトラブルが数度発生し、その度に大気開放と電極の拭取りからやり直し、現在は加速電圧 450 kV で運転している。

2.2.2 高周波トランスの増強

インバーター電源の出力増強の他に、その出力を高圧発生部へ引き込む feedthrough 部、および高圧発生部入力部のコッククロフト・ウォルトン回路 (C-W 回路) 入力部に接続するインバーター出力を 1:96 で昇圧する高周波トランスの発熱も問題であることがこれまでの運転で判明した。高周波トランスの発熱は高電圧出力を制限する問題となるため、現状の容量 5kVA もの (Fig.3a) より十分余裕を持たせた 18.5kVA (Fig.3b) とした。

製作した高周波トランスについては、実際の使用環境と同等の条件で 10kW 相当の電力を問題なく伝送できることを確認する試験を実施した (Fig.4)。具体的には、高周波トランスを試験用の SF6 容器内へ設置し、SF6 環境中で上記製作した増強版のインバーター電源

出力をフィードスルーを介して高周波トランスへ入力し、昇圧された 24 kV, 約 30 kHz の出力が高電圧フィードスルーを介して大気側に組み上げられた 1 段の C-W 回路の入力段へ接続、C-W 回路出力として、45kV DC, 210 mA (9.5 kW) の約 5 時間出力を確認した。この時、コアに設置した熱電対により動作中の温度も測定しており、コア温度は約 80 °C であった。この試験結果から、500 kV, 10 mA (5 kW) の出力に必要な電力の伝送はこの高周波トランスで問題無く行える確認ができたと考えている。

2.3 真空リーク

前述の放電トラブルからの復旧作業において繰り返し電子銃のベーキングを行ったが、チタン製の電子銃真空容器とセラミック部と外周の SF6 タンク部を接続するステンレス容器側の接続部で真空リークが毎回発生する問題に見舞われた。これは、線膨張係数がチタンは SUS の約半分と小さいこと、そして問題の接続部は ICF406 と口径が大きいことが原因となっていた。この問題に対しては、これまでのチタン-ステンレスフランジの接続部に厚手のガスケットを使用することでベーキング時のリークを抑えられる経験から使用する銅ガスケットの厚さを通常の 2 mm から 5 mm の厚さに変更することで対応した (Fig.5)。

この対処を行ったことで、その後電子銃ベーキングの際でも真空リークを起こすことが無くなり、ベーキング後は 10^{-10} Pa の極高真空を安定的に得ることができるよう状況となっている。

2.4 入射部 BPM

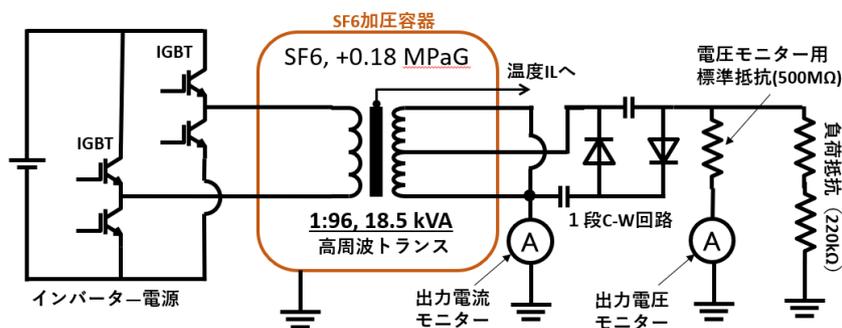
電子銃と入射超伝導加速空洞の間の区間の入射部は約 1m と距離は短い、その領域内に 2 台のソレノイド、5 台のステアリング電磁石、2 台のスクリーンモニター、カソード観察ミラー、可動式ファラデーカップ、ドライブレザー導入部、バンチャー空洞が設置されており、BPM は 2 台のソレノイド位置に配置されていた。この BPM は特に CW 運転時にビームの位置を計測する目的で設置されたものであったが、BPM 電極のフィードスルーに使われているコバルトが磁性体であるため、ソレノイド磁場が歪められ、ソレノイド後方のスクリーンモニターでビームのプロファイルが四角形に歪んでしまう問題がある事がわかった (Fig.6a)。

この問題に対応するため、上記の電子銃真空リーク問題の対処と同時に、入射部の BPM の取外し作業も行い、BPM 電極起因のソレノイド磁場歪の影響を取り除いたが、その後の 2023 年 11 月の運転で特に大電荷運転においてビームのプロファイルが三角形になることが確認された (Fig.6b)。現在、その原因を調査しているが、前述の電子銃真空リーク対処の作業において、電子銃電極の位置アライメントがずれた影響がその原因の一つと考えている。

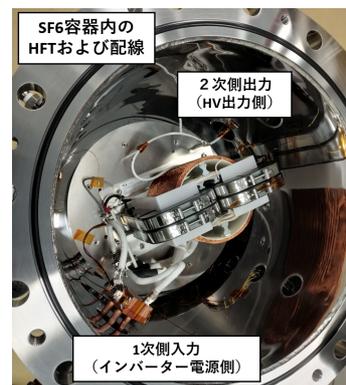
3. CW ビーム運転

3.1 CW ビーム 1 mA エネルギー回収運転

2023 年 11 月の cERL 運転では、挿入光源 chamber へビームを通す条件で初めて 1mA 相当の CW ビームのエ



(a) Circuit connection configuration for HFT testing.



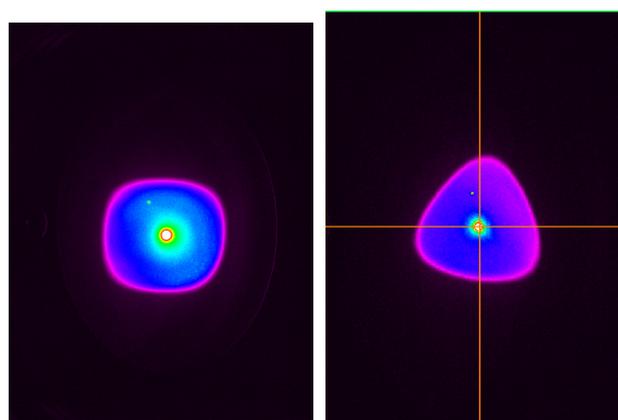
(b) HFT test setup.

Figure 4: Schematic diagram and photograph of the high-frequency transformers output test system.



(a) Photo of current and thick gasket (b) Replacement of new thick gasket.

Figure 5: Photos of the thick gasket introduced to prevent leaks and the replacement of the gasket on the ICF406 flange at the leak location.



(a) (b)

Figure 6: Beam profile at the screen monitor located downstream of the solenoid before and after BPM removal.

エネルギー回収運転が可能となった [4,5]。それまでもこの調整が試みられてきたが、特に垂直方向のビームダクトが狭くなる挿入光源エリアでのビームロスをも十分に抑えられることが難しく、容易ではない状況であった。今後 10 mA の CW ビーム周回、エネルギー回収を行う場合、更なるビームロスの低減の他、追加遮蔽などの検討も必要であり、調整もこれまで以上に難しいと推測される。

3.2 CW ビーム 1 mA 主ダンプ直接輸送運転

一方で、電子銃からの 10 mA の CW ビームの生成は、電子銃の大電流運転時に問題となるフォトカソード寿命の評価や、主加速空洞までの低エネルギー領域の大電流ビーム調整、コリメーターやビームダンプ、ビームロスモニターなど大電流ビーム運転に必要な機器への対策などを進めるために必要である。これをいち早く実現させるため、入射器加速空洞で加速されたビームは、主加速空洞では加速せず、直接ビームダンプへ CW ビームを輸送する運転を検討している (Fig.7)。この方法であれば、ビームエネルギーは入射加速空洞出

口の数 MeV 相当となるため放射線レベルの抑制および遮蔽のし易さの点で問題を解決しやすく、ビーム調整の点からも周回およびエネルギー回収する場合と比べ非常に容易となる。

2023 年 11 月の運転では、これを模擬する 2.9 MeV, 800 μ A (\sim 2.3 kW) の約 4 時間の CW ビーム主ダンプ直接輸送運転も実施した (Fig.8)。このビーム調整において、電子銃からビームダンプまでの輸送調整は比較的容易と思われたが、CW ビーム 1 mA 運転可能なレベルのビームロスを抑えるためには CW ビーム周回運転と同様に入射器直後の 2 台のビームコリメーターの挿入が不可避であった。コリメーター挿入前の主なビームロスは主加速超伝導空洞の手前付近であることが周囲の放射線モニターから推定されたが、この運転時には詳細なビームロス場所・範囲を特定するためのモニターがなく、詳細は不明である。

ダンプラインへ導かれたビームは、ダンプへ入射する少し手前に配置されているラスタリング電磁石によってビームをビームダンプの口径に合うように XY 方向に蹴ってスイープし、ビームダンプ表面が受ける

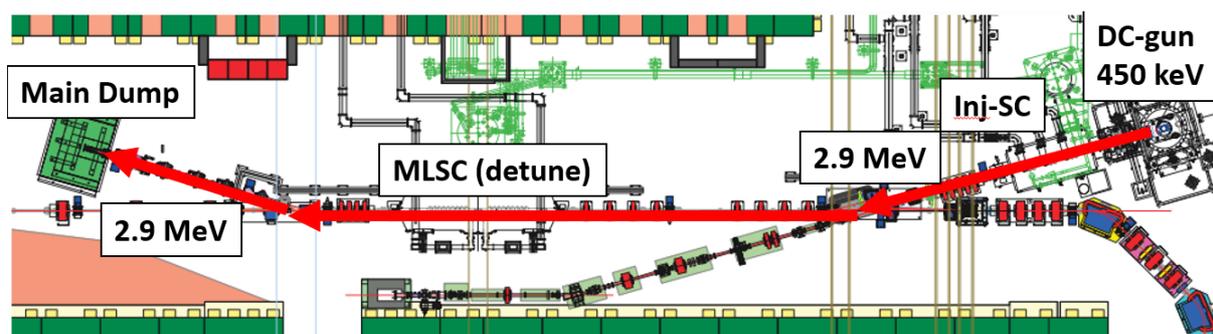


Figure 7: Path diagram of direct CW beam transport to the main beam dump. The beam accelerated at about 3 MeV in the injector superconducting cavity (Inj-SC) is directly transported to the main dump beamline without acceleration in the main linear superconducting cavity (MLSC).

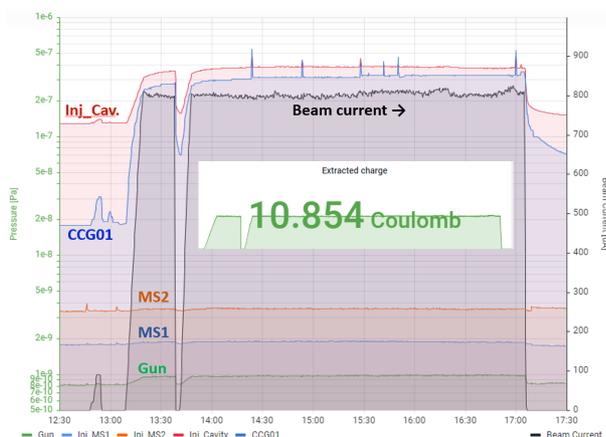


Figure 8: Trend of beam current and vacuum at various locations during main dump CW beam direct transport operation.

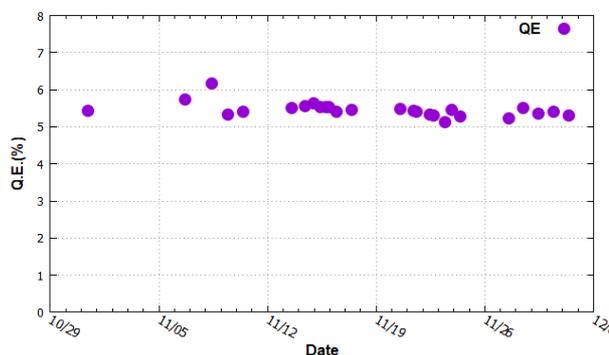


Figure 10: QE history of GaAs photocathode during cERL operation in November 2023.



Figure 9: Photo of the main beam dump and its cooling water pipes.

パワー密度を抑えるビーム制御を行う。ビームをスリーブする範囲はビームダンプ直前のスクリーンモニターおよびビームダンプをファラデーカップとして調整時のバーストビームの電流波形のモニターを行いながら調整を行っている。

これに加え、大電流 CW ビーム運転では、ビームパワーの増加に伴いビームダンプの冷却水の流量および冷却水の温度変化からビームパワーの測定も可能になる。cERL の主ビームダンプは円周方向に 4 等分割さ

れた冷却水経路から構成されている (Fig.9)。それぞれの系統で受けるビームパワーの測定が可能になるため、ビームが均等にダンプへ入射されているかを判断する一つの有用な指標になる。

前述の主ダンプ直接輸送 CW ビーム運転時は、4 系統の冷却水経路のうち、2 系統ずつが直列接続され、それぞれの系統に 15.5 L/min の流量の冷却水が流れ、出入口の温度差が共に 1 °C 観測されている。この時のビームパワーは 2.3 kW であり、上記冷却水が持ち去るパワーの合計 2.2 kW とほぼ一致した。

3.3 カソード寿命

今回のこの CW ビーム運転でのフォトカソードの量子効率 (QE) の低下量は 0.1% 程度であり、供給電荷量は約 11 Coulomb であった。11 月の運転の総供給電荷量は約 30 Coulomb、フォトカソードの QE は概ね 5% 以上を維持した (Fig.10)。フォトカソードへ照射するレーザー位置は、逆流イオンの衝撃が最も起きうる電界中心位置から 2mm 程度離れた位置を選んでおり、この程度の供給電荷量でも QE の著しい低下が起きなかったと考えられる。また、この結果からも電子銃の真空の状態は良好であったことがわかる。

4. まとめと今後

ERLの産業利用として、半導体露光用大強度 EUV-FEL 光源の検討が進められており、電子銃には 10 mA 級の高輝度の CW ビーム供給が求められている。KEK の cERL 電子銃において、この要求を満たすべく高電圧電源の増強、真空リーク問題の対処を進めた。周回部に挿入光源ビームダクトが挿入された状態で 1 mA 級の CW ビームのエネルギー回収運転を達成したが、今後 10 mA 級の運転を達成するためには、ビームロスの低減ならびに放射線対策が必要となり、容易ではないため、最初の 10 mA CW ビーム運転は、主超伝導加速空洞で加速しない主ダンプ直接ビーム輸送で行う検討を進めており、2023 年 11 月に模擬的な 2.9 MeV, 0.8 mA の主ダンプ直接 CW ビーム運転を実施した。

このビーム運転では、主加速空洞手前の領域でビームロスが観測されたが、詳細なビームロス位置を特定するため今後は半導体とシンチレーターを組み合わせた簡易なビームロスモニターを多数分散配置する計画であり、大電流ビーム運転で重要となるビームロス調整を進めていく予定である。また、主ダンプの 4 経路の冷却水温度、流量から各経路が受けるビームパワーの推定が可能であることを確認した。今後の大電流化により数十 kW のビームを受けつづけることになる。長期的に主ダンプで偏りなくビームを安全に受け続けるために、今後、主ビームダンプの冷却水 4 経路はそれぞれ独立に冷却、計測する予定である。

今後の具体的な方針としては、第 1 段階としてビームダンプ直接輸送モードで最大エネルギー 4 MeV, 10 mA (最大ビームパワー 40 kW) 運転を目標とし、現状の改造前の高電圧電源で可能な範囲で電流をあげつつ、2 年目後半で電子銃高圧電源を増強版 (インバーター & 高周波トランス) へ切替、3 年目より電子銃より 10 mA 相当のビーム供給を開始したいと考えている。

またこれに伴い、フォトカソードとしてこれまで利用してきた NEA 表面の GaAs 半導体からより耐久性の

高いアルカリ金属系薄膜へ変更する予定である。これは、GaAs 半導体フォトカソードは初期の量子効率が高い利点はあるが、真空環境に敏感であり、特に今後 1 mA 以上の大電流 CW ビーム生成時は、電子銃近傍の電子ビーム軌道上で発生するイオンの電子銃への逆流、フォトカソードへの衝撃の影響が避けられないことがその理由である。さらに大電流運転時のフォトカソードの寿命の改善策については、米国の LANL、名古屋大学を中心とした研究チームで原子層レベルの保護膜の実装の研究開発も進行中である [6, 7]。

謝辞

電子銃機器の改造・保守に伴う作業について、三菱システムサービスの飯島寛昭氏、NAT の山田浩気氏のご協力を頂きました。東日本技術研究所の路川徹也氏には制御系構築ならびにロスモニター開発のご協力を頂きました。放射線科学センター吉田剛氏、ならびに加速器第 6 研究系濁川和幸氏には放射線見積り・放射線安全に関するご協力を頂きました。皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A* 877, 197-219 (2018).
- [2] N. Nakamura *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 62, SG0809 (2023).
- [3] M. Yamamoto and N. Nishimori, *Appl. Phys. Lett.* 109, 014103 (2016).
- [4] M. Kurata *et al.*, Proceedings of IPAC'24, WEPC22, 2010-2013 (2024). <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2024-WEPC22>
- [5] M. Shimada, PASJ2024, Yamagata, Japan, Aug. 2024, WTSP14, this meeting.
- [6] L. Guo *et al.*, *Scientific Reports* 13, 2412 (2023).
- [7] F. Liu *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 14, 1710-1717 (2021).