

# KEK コンパクト ERL の現状

## PRESENT STATUS OF THE COMPACT ERL AT KEK

加藤龍好<sup>#</sup>, KEK 先端加速器推進部 超伝導加速器利用推進チーム<sup>†</sup>  
Ryukou Kato<sup>#</sup>, Utilization Promotion Team based on Superconductive Accelerator<sup>†</sup>  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

The present status of the compact ERL (cERL) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), including recent progress of of beam dynamics studies, are reported. The goal as the cERL is realization of CW operation at an average current of 10 mA, and in order to achieve this, in March and June 2018, stable operation of the electron DC gun at applied voltage of 500 kV, burst mode operation of 60 pC was achieved, and the 1 mA CW operation was reproduced. In development of THz light source for use of cERL, we demonstrate resonator type coherent diffraction radiation. Furthermore, as projects aimed at industrial use and technology transfer to industry fields, we have started research and development of 99 Mo production and research on long life of asphalt. Preparations for the construction of the beam line of the irradiation section are underway aiming for irradiation beam operation in 2019.

### 1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (ERL) は高エネルギー加速器を CW で運用したときに問題となる i) ビーム加速エネルギーの持続的な供給、ii) ビームダンプエネルギーと周辺放射化の低減、を同時に解決する技術であり、常に電子源からフレッシュビームを供給し続けることで、低エミッタンスで短バンチの高品質ビームを、高平均電流で利用することが可能になる。

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) におけるエネルギー回収型リニアック (ERL) の開発研究は、KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) のなかで、産業利用や産業界への技術転用を目的としたプロジェクトとして位置付けられている[1]。ERL の試験加速器であるコンパクト ERL (cERL) は、KEK 内部の横断的な組織 (超伝導加速器利用推進チーム<sup>†</sup>) により維持管理され、CW 運転の電流指標である 10 mA 運転を目指した要素技術開発や運転試験、高平均電流・短バンチの特徴を生かした THz 光源開発が行われている[2]。2017

年度は 2016 年度同様に当初の運転経費はゼロとなり、保守維持費のみが配分されたが、年度後半の追加予算による運転経費が認められて 2018 年 3 月の運転が可能になった。2018 年度は 2 年ぶりに年度初めからの運転経費が認められたため、6 月に 1 か月間の運転時間を確保し数々のスタディを行うと同時に、電流増強にむけた 1 mA CW の運転の再開と放射線レベルの確認を行った。これに加えて、超伝導加速器の産業利用として、今年度から民間資金による核医学検査用 RI 生成試験やアスファルトの長寿命化の試験を開始することになった。

本年会では、このような状況下で行われた 2017 年度の cERL の運転状況と 2018 年 3 月と 6 月に行われたマシンスタディの成果の概要について報告する。

### 2. cERL の方針と産業利用への展開

KEK-PIP[1] の中で ERL の技術開発は、超伝導加速器の産業利用や産業界への超伝導加速器技術の転用を目的としたプロジェクトとして位置付けられ、外部資金により開発を継続することが謳われている。これを踏まえて、今年度以降の cERL の開発方針と

<sup>#</sup> ryukou.kato@kek.jp

<sup>†</sup> KEK 先端加速器推進部 超伝導加速器利用推進チーム — 機構内の共同研究者・研究協力者

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

M. Adachi, S. Adachi, M. Akemoto, D. Arakawa, S. Araki, S. Asaoka, E. Cenni [on leave], K. Enami, K. Endo, S. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, T. Hotei, K. Hozumi, A. Ishii, X. Jin, E. Kako, Y. Kamiya, H. Katagiri, R. Kato, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, Y. Kondou, T. Konomi, T. Kubo, T. Kume, T. Matsumoto, H. Matsumura, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao, K. Nigorikawa, T. Nogami, S. Nozawa, T. Obina, T. Okada, T. Ozaki, F. Qiu, H. Sagehashi, H. Sakai, S. Sakanaka, S. Sasaki, K. Satoh, M. Satoh, Y. Seimiya, T. Shidara, M. Shimada, T. Shioya, T. Shishido, M. Tadano, T. Tahara, T. Takahashi, R. Takai, H. Takaki, O. Tanaka, T. Takenaka, Y. Tanimoto, N. Terunuma, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, J. Urakawa, K. Watanabe, M. Yamamoto, N. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida

— 機構外の共同研究者・研究協力者

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

R. Hajima, M. Mori, R. Nagai, M. Sawamura, T. Shizuma, N. Nishimori

Hiroshima University

M. Kuriki, S. Matsuba, L. Guo

して以下の項目を掲げている。

- High charge 低エミッタンスビームの実現
- 10 mA の ERL 運転の実証
- 99Mo 製造に関する研究開発
- <200 fs 電子ビームによる THz 発生と利用に向けた研究開発

このなかで我々にとっての大きな技術課題である 10 mA エネルギー回収運転に向けて、ERL ビーム調整の確認と低減すべき放射線発生ポイントの絞り込みのために今年 6 月に cERL を運転し、1 mA CW 運転を再現できた (Figure 1)。

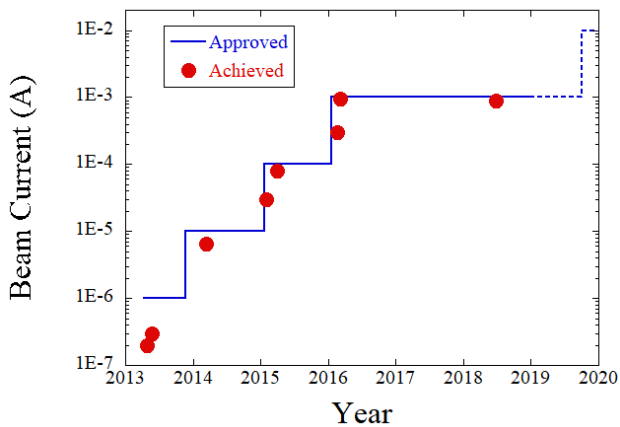


Figure 1: History of achieved beam current for CW operation mode.

また、これまで超伝導加速器技術の産業利用への展開として Figure 2 を示してきた[3]。このなかで“医学応用小型高精細 X 線源”と“単色高強度  $\gamma$  線発生装置”の開発は、cERL でのレーザーコンプトン X 線の開発によりその一部を実証できた。今年度は残された課題のひとつである 99Mo 製造の試験に着手する。

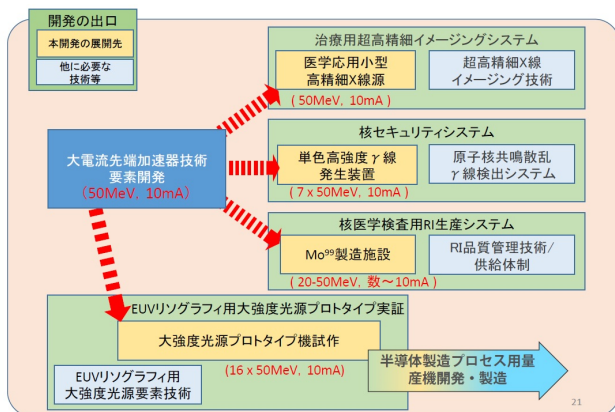


Figure 2: Industrial application of superconducting accelerator technology.

Table 1: Operation Statistics in cERL from FY2013 to 2017

年度	冷凍機運転時間(h)	cERL 運転時間(h)	BEAM ON 時間(h)
2013(H25)	3195	643.0	439.0
2014(H26)	2931	873.6	509.2
2015(H27)	2786	924.0	438.8
2016(H28)	892	380.9	123.7
2017(H29)	555	275.3	124.7

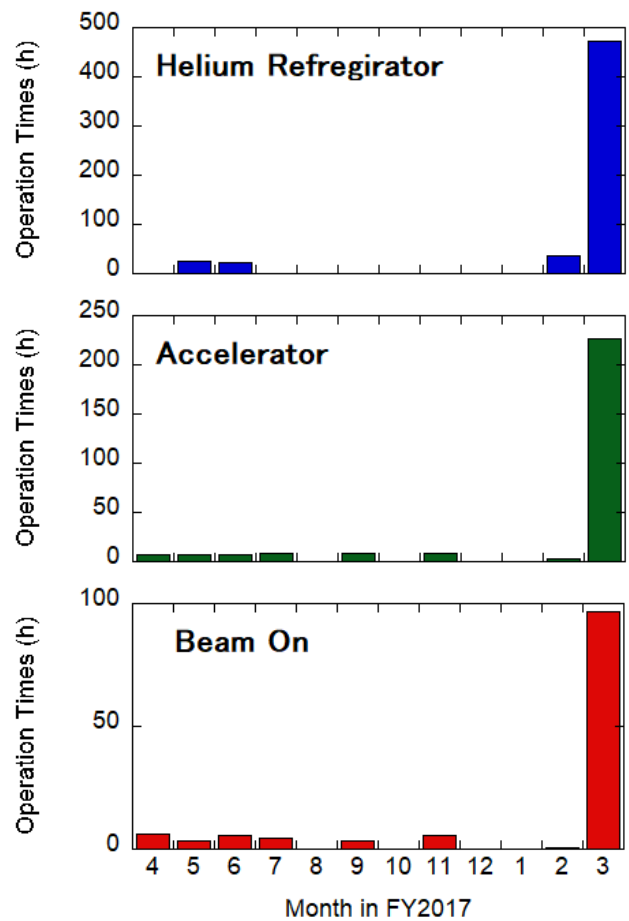


Figure 3: Bar graph of operation statistics in cERL at FY2017.

### 3. 運転状況

Table 1 に 2013 年度から 2017 年度までの cERL の運転統計を示す。2017 年度は運転経費確保の目途が立たなかった 4 月から 12 月にかけては電子銃の単独運転のみが行われた (Figure 3)。その後、年が明けて 1 月末に追加予算の配分が確定した。この予算により 3 月期 (3/12~3/31) の運転が可能になったが、超伝導空洞の冷却期間も含めて、わずか 3 週間の運転となった。そのため、冷凍機の運転時間で 300 時間以上、cERL の運転時間で 100 時間以上減少している。このような状況の中で昨年度と同レベルの Beam On 時間が確保できたのは、土日休日も休まず運転を続けたことによる。共同利用マシンと異なり、

少数の運転メンバー、サポートメンバーがほぼ常駐する形での運転となった。

## 4. 今期の運転で得られた知見と成果

### 4.1 1 mA CW 運転の再現

10 mA の ERL 運転の実証にむけて、2018 年 6 月の運転で 1 mA CW 運転の再現と放射線レベルの確認を行った。長年の運転によって、徐々に超伝導空洞の性能が劣化してきており、現在エネルギー回収運転が可能な主空洞の加速電圧は、ML1 が 6 MV、ML2 が 8.6 MV となった。周回エネルギーは 2016 年 3 月の 20 MeV から 17.6 MeV に低下したが、0.9 mA CW 運転を安定に 2 時間継続することができた。2018 年 6 月の運転のパラメータを Table 2 に示す。

Table 2: Typical Operational Parameters of cERL

ビームエネルギー	197.6 MeV
入射エネルギー	3.0 MeV
電子銃エネルギー	500 keV
バンチ繰り返し	1.3 GHz
最大平均電流	1 mA (max)
運転モード	CW or Burst

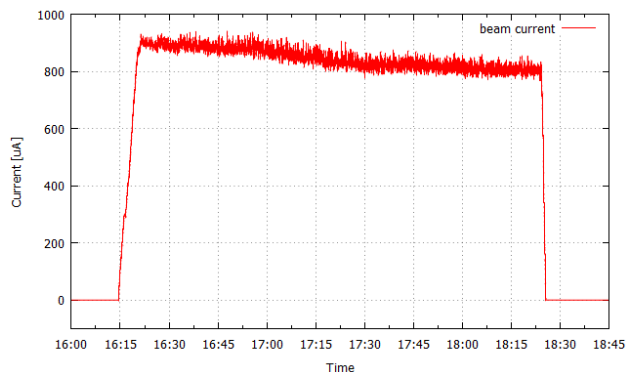


Figure 4: Stability of beam current from the DC-gun during 1 mA CW operation.

### 4.2 DC 光陰極電子銃での 500 kV 長時間安定印加

2016 年 3 月の cERL 1 mA CW 運転[4]では運転中に電子銃で放電が起きない加速電圧 390kV で運転が行われていたが、その後、追加のコンディショニングを経て加速電圧 500kV の状態で調整運転を進め、2018 年 3 月および 6 月の cERL 運転およびそれまでの電子銃単独運転において累計 369 時間以上の間、一度も放電を起こすことなく加速電圧 500 kV を維持し続けることに成功した[7]。2018 年 3 月の cERL 運転では 500 keV の burst beam を供給し、同年 6 月には 500 keV で 1 mA 相当の 1.3 GHz CW beam の供

給を実現した。Figure 4 に CW 運転時に電子銃から入射される電流値の時間変化を示す。

### 4.3 高強度広帯域テラヘルツ光源

cERL の低エミッタンス、短バンチ、高繰り返しというビーム特性を生かし、穴あき導体標的を用いたコヒーレント回折放射 (CDR) の発生や共振器型回折放射 (R-CDR) の実証試験を行っている。RCDR では、Zero-CEP が可能な共焦点設計された共振器により、広帯域の THz 発振を観測した[5]。また、共振器長をスキャンすることで、鋭い共鳴ピークが存在を確認するとともに、放射に伴うビームの減速を確認した。現在この広帯域テラヘルツ光を利用するためのテラヘルツ光輸送ラインの設計を進めており、来年度にインストールする予定である[13]。

### 4.4 エミッタンス測定

CW 運転 (およそ 800  $\mu$ A) が終了した直後に南側直線部で測定したエミッタンスは水平 0.42 mm mrad、垂直 0.26 mm mrad であった。このときのバンチ電荷量は 0.6~0.7 pC である。これまでは、コリメータでエネルギーのずれたテールをカットするために、あえて入射器空洞に斜めに入射して、キックを与えていた。これがエミッタンス増加の原因となっていたが、今回は入射器空洞の中心を通過しつつ、ビームロスを抑えることができた。大電流に耐えられる低ビームロスと低エミッタンスの運転が共存できることが示された[9]。バンチ圧縮時 (バンチ電荷は 1.2 pC) に R56 を変えて南側直線部で測定された最小エミッタンスは水平 1.5 mm mrad、垂直 0.8 mm mrad であった。この測定では  $\Delta R56=0$  m が最も THz 光強度が強い点であり、 $\Delta R56=0.6$  がアイソクロナス条件である。

### 4.5 バンチ長計測

短バンチかつ低エミッタンスのビームを利用するためバンチ電荷を 1.2 pC/bunch とし、第 1 アークの R56 と上流側の 6 極磁石をスキャンして CTR の強度が最大になるパラメータを探し、マイケルソン干渉計を用いた干渉波形測定を行った。これまでの運転での最短のバンチ長は 200 fs 以下と推定される[8]。

### 4.6 HOM カプラーが電子ビームに与える影響の定量評価

CST によって空洞内電磁場分布を再現し、数値的・実験的に cERL 2cell 超伝導空洞のカプラーキックの影響を定量評価した[6]。cERL で観測されていたビームプロファイルの歪みは、空洞内電磁場分布の非対称性が原因であり、それはカプラーの存在に起因している。cERL 2cell 空洞のカプラー配置では、電磁場分布の非対称性を引き起こしている主要因は HOM カプラーであると結論付けられる。

### 4.7 上記以外の成果と知見

上記以外に本年会で発表がなされた cERL 関連の研究を文献[10,11,12]に、超伝導入射器クライオモジュールの運転記録についての発表は文献[14]にま

とめておく。また ERL の光源利用としての EUV-FEL と ERL で必要とされる HOM アブゾーバーに関する発表は文献[15,16]にあるので、そちらを参照されたい。

## 5. まとめ

cERL の加速器としての目標は平均電流 10 mA での CW 運転の実現であり、それを旨として 2018 年 3 月・6 月の運転で、印加電圧 500 kV での電子銃の安定な運転、バーストモードでのバンチ電荷 60 pC を達成し、1 mA CW 運転を再現した。cERL の利用に向けた THz 光源開発では、共振器型回折放射を実証し、THz 光輸送ラインの設置準備を進めている。cERL の KEK 内での位置付けは、産業利用や産業界への技術移転を目的としたプロジェクトにかわり、民間資金による 99Mo 製造に関する研究開発、アスファルトの長寿命化の研究が開始された。これを受けて 2019 年の照射ビーム運転を目指して、照射部ビームラインの建設準備が進められている。

## 参考文献

- [1] <https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>
- [2] Y. Honda *et al.*, arXiv:1807.06195, accepted for publication PRL.
- [3] 河田 洋、cERL 評価専門委員会 (2017 年 10 月 27 日)。
- [4] 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”，第 13 回日本加速器学会, WEOM15, (2016).
- [5] Y. Honda *et al.*, “Lasing of a broadband THz FEL based on the resonant coherent diffraction radiation”, this conference, WEOLP04.
- [6] T. Hotei *et al.*, “Evaluation of coupler kick of cERL injector cavity for high brightness beam realization”, this conference, THOM09.
- [7] M. Yamamoto *et al.*, “Long-term stable operation of a 500 kV DC electron gun at compact-ERL”, this conference, FROM03.
- [8] M. Shimada *et al.*, “Bunch length measurements during bunch compression at the Compact ERL”, this conference, WEP027.
- [9] M. Shimada *et al.*, “Measurements of beam optics and emittance at the Compact ERL recirculation loop”, this conference, WEP028.
- [10] T. Miyajima *et al.*, “Improvement of optical functions and emittance compensation for space charge dominated electron beam in the compact ERL at KEK”, this conference, WEP032.
- [11] Y. Kameta *et al.*, “Development of equipment monitoring system for PF and cERL”, this conference, WEP095.
- [12] T. Michikawa *et al.*, “Development of web base electronic log and picture log system”, this conference, WEP102.
- [13] Y. Honda *et al.*, “Plan of terahertz beam line utilizing coherent diffraction radiation at cERL”, this conference, THP022.
- [14] S. Imada *et al.*, “Operational record of cERL injector cryomodule during cool-down”, this conference, THP051.
- [15] N. Nakamura *et al.*, “ERL-FEL based high-power EUV light source for lithography”, this conference, WEP128.
- [16] T. Ota *et al.*, “Development of HOM absorbers for CW superconducting cavities in ERL”, this conference, THP055.