

KEK コンパクト ERL の現状

PRESENT STATUS OF THE COMPACT ERL AT KEK

加藤龍好[#], KEK 応用超伝導加速器センター 超伝導加速器利用推進チーム[†]

Ryukou Kato[#], On behalf of Utilization Promotion Team based on Superconductive Accelerator, CASA[†]

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Research and development of energy recovery linac (ERL) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK) is positioned as a project for industrial use and technology transfer to industry in KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP). ERL's test accelerator, compact ERL (cERL), has been operated by the "Utilization Promotion Team based on Superconductive Accelerator", a cross-sectional organization within KEK. This team has been reorganized under the Center for Applied Superconducting Accelerators (CASA) newly established this year. Research and development of 99 Mo production and research on increasing the life of asphalt began as a privately funded project at the beginning of last year. By March this year, the construction of the irradiation beam line was completed, and irradiation research using the electron beam of cERL began operation in June. In December last year, a proposal for developing a mid-infrared free electron laser using cERL was adopted by the NEDO project. Aiming for FEL oscillation, developing undulators and preparing for installation.

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パ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) [2]は、これまで先端加速器推進部の下に位置づけられた機構内部の横断的な組織(超伝導加速器利用推進チーム[†])により維持管理、運営されてきた。このチームは、今年度新たに発足した応用超伝導加速器センター[3]の下に再編され、センターの組織として cERL の開発と利用を押しすすめることになった。昨年度はじめに民間資金による委

託研究として始まった 99Mo 製造に関する研究開発とアスファルトの長寿命化の研究は、本年 3 月までに照射部ビームラインの建設を完了し、4 月の変更申請を経て、6 月から本格的な運用を開始した。また昨年 12 月に cERL を用いた中赤外自由電子レーザー開発の提案が、NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」[4]に採択されたため、今年度 2 台のアンジュレータを製作し、来年 3 月以降本格的に cERL の高輝度電子ビームを用いて FEL 発振を目指すことになった。

本年会では、このような状況下で行われた 2018 年度の cERL の運転状況と 2019 年 4 月と 6 月に行われたマシINSTAディの成果の概要について報告する。

2. cERL の稼働状況

Table 1 に 2013 年度から 2018 年度までの cERL の運転統計を示す。2014 年度から 2015 年度までは、2 ヶ月運転が年に 2 回ほど実施されてきたが、2016 年度からは年度当初に配分される予算が維持費のみとなり、年度後半の追加予算の配分を待って運転計画を立てていたため、3 月期のみ運転となっていた。2018 年度は外部資金を得て照射部ビームラインを建設することになり、年度

[#] ryukou.kato@kek.jp

[†] KEK 応用超伝導加速器センター 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, 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

当初から維持費に加えて 1 ヶ月分の運転経費が認められた。年度後半のビームライン建設を考慮して、6 月にビーム運転が行われた (Fig. 1)。今年度は外部資金による 2 つのプロジェクトが進行しているため、4 月、6 月、10 月、3 月に計 4 回の運転が予定されている。

Table 1: Operation Statistics in cERL from FY2013 to 2018

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
2018(H30)	945	347.5	172.5

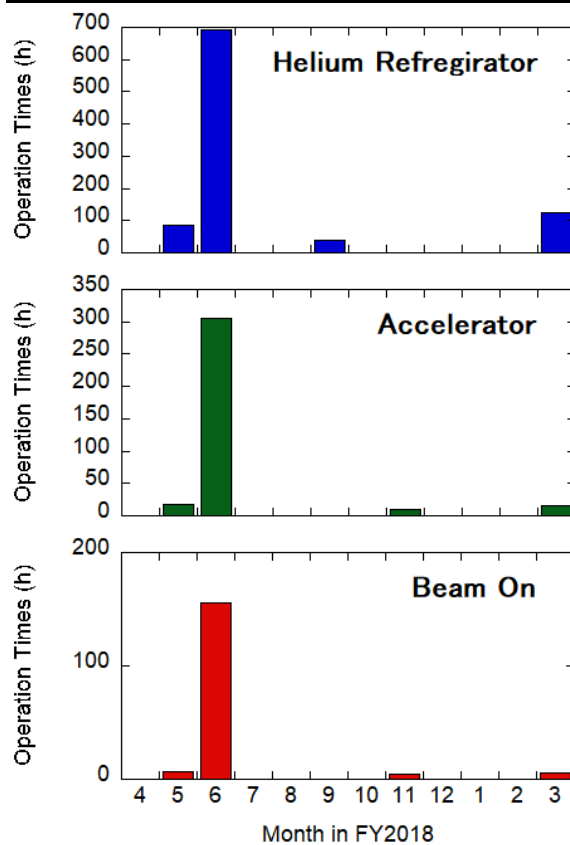


Figure 1: Bar graph of operation statistics in cERL at FY2018.

3. 外部資金による 2 つのプロジェクトの進展と cERL 運転の成果

3.1 照射部ビームラインの建設と RI 製造、電子線照射試験 (新規プロジェクト)

医療用 RI 製造のための基礎実験や、アスファルト改質、再生などの産業利用を念頭に置いた理化学的研究を目的として、cERL に照射部ビームラインが建設された [5-7]。これは民間出資による委託研究である。このビー

ムラインは 2018 年度後半より建設を開始し、2019 年 3 月に完成した。4 月 5 日から試験運転を開始し、4 月 12 日に施設検査を受け、4 月 17 日付で合格となった。4 月中は機器の較正やビーム調整手法の確立、空のターゲットに対する照射試験が行われた。5 月には一旦運転を休止し、cERL 加速器室の空調に HEPA フィルタを取り付ける工事が行われ、2019 年 6 月より、99Mo 製造、アスファルトへの照射実験が行われている。照射部モード利用時のビームパラメータを Table 2 に示す。照射時の利用目的に応じて最大エネルギー制限が異なる。

Table 2: Beam Parameters of the Irradiation Mode

ビームエネルギー	
(RI 製造)	21 MeV (Max)
(理化学的研究)	10 MeV (Max)
バンチ繰り返し	1.3 GHz
平均電流	10 μ A (Max)
運転モード	CW or Burst

3.2 自由電子レーザーによる高平均出力中赤外光源の開発 (新規プロジェクト)

KEK は NEDO (新エネルギー産業技術総合開発機構) からの競争的資金を得て、赤外 FEL プロジェクトを開始した [8-11]。このプロジェクトの目的は、KEK にある cERL を用いて赤外 FEL を建設し、その FEL を産業用レーザーに必要な加工データベースを構築するための光源として使用することである。この計画では cERL の南側直線部に周期長 24 mm、全長 3 m アンジュレータを 2 台設置し、電子エネルギー 17.5 MeV、バンチ当たり 60 pC の電荷量のと、波長 20 μ m で約 1 μ J のパルスエネルギーの光を発生する。FEL 用にあらたに導入される 81.25 MHz 繰り返しの電子銃レーザーを用いて CW 運転したときの平均ビーム電流は 5 mA となるが、このときの平均レーザー出力は最大 100 W 程度と予想される。現在、FEL シミュレーションと並行して、ビームスタディを行い、cERL での FEL 発振に必要なとされるビーム条件、運用時の技術課題の解決に取り組んでいる [12, 13]。cERL-FEL で要求されるビームパラメータを Table 3 に示す。

Table 3: Beam Parameters of the cERL-FEL

ビームエネルギー	17.5 -19.0 MeV
エネルギー拡がり	0.1% (RMS)
規格化エミッタンス	3 mm mrad
バンチ電荷	60 pC
バンチ長	0.5 - 1 ps (FWHM)
繰り返し	81.25 MHz

3.3 高強度広帯域テラヘルツ光源の開発

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[14]。今回、RCDRとして、わざと曲率半径をずらした非共焦点共振器を組み込むことで、RCDRの共鳴ピークの強度が低下し、広帯域同時発振が損なわれることを確認した。また広帯域テラヘルツ光を放射線シールドの外に輸送し、ユーザー利用するためのテラヘルツ光輸送ラインを構築した[15]。

3.4 上記以外の研究成果

前述の研究開発以外にも、長期ビーム運転下での主加速器部超伝導空洞性能の推移[16]や、超伝導空洞のマイクロフォニクスの状況[17]、大電荷バンチ生成のためのコヒーレントパルススタッキングによる電子銃励起レーザーの時間整形[18]、ビームコリメータと60 pC電子ビームに対するウェーク場評価[19]、超伝導空洞用のHOMダンパーの研究[20]などcERLやERLに関連した多くの研究に加えて、運転時消費電力の調査[21]なども行われている。

4. まとめ

cERLは今年度から応用超伝導加速器センターの所屬となり、これまで以上に産業利用や産業界への技術移転を積極的に推進することが期待されている。昨年からの民間資金の導入で建設を進めてきた照射部ビームラインの完成により、99Mo製造に関する研究開発、アスファルトの長寿命化の実験が本格的に開始された。また、これと並行してNEDOプロジェクトである高平均出力中赤外自由電子レーザー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] M. Akemoto *et al.*, “Construction and Commissioning of the Compact Energy-Recovery Linac at KEK”, Nucl. Instrum. Meth. A 877, 197 (2018). doi:10.1016/j.nima.2017.08.051.
- [3] <https://www.kek.jp/casa/ja/>
- [4] https://www.nedo.go.jp/koubo/IT3_100064.html
- [5] N. Higashi *et al.*, “Commissioning of irradiation beam line in cERL”, this conference, FROH09.
- [6] K. Harada *et al.*, “Construction and first beam test of the new industrial application beamline at cERL in KEK for the RI production and electron beam irradiation”, this conference, WEPH015.
- [7] Y. Morikawa *et al.*, “Development of target cooling system in cERL electron beam irradiation section”, this conference, WEPH017.
- [8] R. Kato *et al.*, “Development of high-repetition MIR-FEL based on cERL”, this conference, THPI015.
- [9] K. Tsuchiya *et al.*, “Development of the tandem undulators for the cERL-FEL”, this conference, FRPI018.
- [10] Y. Honda *et al.*, “Options for upgrading IR-FEL at cERL”, this conference, WEPI021.
- [11] F. Sakamoto *et al.*, “Numerical analysis of MIR Laser right from cERL-FEL by using Genesis code”, this conference, THPI014.
- [12] M. Shimada *et al.*, “Bunch compression operation for IR-FEL at the compact ERL”, this conference, WEPI017.
- [13] O. Tanaka *et al.*, “High bunch charge injector operation of cERL for infrared free electron laser test”, this conference, FRPI025.
- [14] Y. Honda *et al.*, “Cavity design comparison for the resonant coherent diffraction radiation”, this conference, WEPI020.
- [15] Y. Honda *et al.*, “Construction of terahertz beam line

- utilizing coherent diffraction radiation at cERL”, this conference, FRPI014.
- [16] H. Sakai *et al.*, “Long-term operation with beam and cavity performance in Compact-ERL main linac at KEK”, this conference, WEPI019.
- [17] F. Qiu *et al.*, “Status of microphonics on cERL nine-cell cavities”, this conference, WEPH010.
- [18] Y. Honda *et al.*, “Temporal shaping of laser pulse for photocathode gun utilizing coherent pulse stacking”, this conference, FRPI028.
- [19] O. Tanaka *et al.*, “A wake fields evaluation for beam collimators and the 60 pC electron beam at the Compact ERL at KEK”, this conference, FRPI022.
- [20] T. Ota *et al.*, “Development of HOM absorbers for cw superconducting cavities in energy recovery linac”, this conference, FRPI004.
- [21] Y. Honda *et al.*, “Electricity consumption in the operation of cERL”, this conference, THPH020.