

KEK コンパクト ERL の現状

PRESENT STATUS OF THE COMPACT ERL AT KEK

加藤龍好^{#,A)}, 阪井寛志^{A)}, 本田洋介^{A)}, 山本将博^{A)}, 島田美帆^{A)}, 谷川貴紀^{A)}, 河田洋^{A)},
超伝導加速器利用推進チーム^{†,B)}

Ryukou Kato^{#,A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Takanori Tanikawa^{A)},
Hiroshi Kawata^{A)}, Utilization Promotion Team based on Superconducting Accelerator^{B)}

^{A)}Innovation Center for Applied Superconducting Accelerators, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The Compact ERL (cERL), which was constructed as a compact demonstration accelerator for the Energy Recovery Linac (ERL), is maintained and operated under the control of iCASA, with the aim of industrial and medical applications of superconducting accelerator technology. Last year, we conducted two beam experiments, one in October and the other in February-March. In the beam experiment in October, an electron beam irradiation experiment on wood was carried out in relation to the efficient production of nanocellulose, which is being carried out with competitive funding from NEDO. Experiments in February and March aimed mainly at establishing CW operation with undulators installed. Here, we report on the status of cERL operation and maintenance in FY2021, as well as an overview of research results.

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、産業利用および医療応用を目的とした加速器開発として位置付けられている[1]。2022年4月より、これまでの研究開発を担ってきた応用超伝導加速器センター(CASA)は、産学連携を担う国際科学イノベーションセンターと統合され、加速器科学分野の研究開発・産業展開・人材育成を統合的に推進するための組織「応用超伝導加速器イノベーションセンター(iCASA)」[2]となった。エネルギー回収型線形加速器の小型実証機として建設されたコンパクト ERL (cERL) [3]は、この

iCASA の管理下で、機構内の横断的な組織である超伝導加速器利用推進チーム[†]と機構外の共同研究者・研究協力者^{††}の協力を得て保守・運営され、超伝導加速器技術の産業利用・医学応用を目指している。

昨年度は10月と2~3月の2回のビーム実験を行った。10月のビーム実験では、NEDOからの競争的資金で実施されている効率的ナノセルロース製造に関連して木材への電子線照射実験を進め、2~3月の実験では主にアンジュレータを設置した状態でのCW運転の確立を目指した。ここでは2021年度のcERL運転と保守の状況、および研究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2021年度までのcERLの運転統計を、Fig. 1 に2021年度の月別運転統計を示す。昨年度10月のビーム実験では、NEDO 先導研究プログラム[4]で「高効率ナノセルロース製造のための革新的量子ビーム技術開発」として採択されたナノセルロース生成のための木材への電子線照射実験を進め、今年2~3月の実験では主にアンジュレータ用の狭い真空ダクトがある状態でのCW運転の確立を目指した(Fig. 1)。今年

[#] ryukou.kato@kek.jp

[†] 超伝導加速器利用推進チーム (KEK)

M. Adachi, D. Arakawa, H. Araki, M. Egi, S. Eguchi, M. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Harada, N. Higashi, T. Honda, Y. Honda, T. Honma, X. Jin, E. Kako, Y. Kamiya, R. Kato, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, T. Konomi, M. Kurata, H. Matsumura, S. Michizono, C. Mitsuda, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, Y. Morikawa, S. Nagahashi, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nigorikawa, T. Nogami, T. Obina, H. Sagehashi, H. Sakai, M. Shimada, T. Shioya, M. Shiozawa, M. Tadano, T. Tahara, T. Takahashi, R. Takai, H. Takaki, O. Tanaka, T. Tanikawa, Y. Tanimoto, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, M. Yamamoto

^{††} KEK 外の共同研究者・研究協力者

R. Hajima, K. Kawase, R. Nagai, M. Sawamura, M. Mori, N. Nishimori, National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

T. Endo, K. Sakakibara, A. Kumagai, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

M. Katoh, M. Kuriki, A. Kano, Hiroshima University

F. Sakamoto, National Institute of Technology, Akita College

度は冷凍機システムの10年に一度の開放検査と長期の電子銃保守のため、2013年の運転開始以来はじめて通年で運転停止を予定している。

Table 1: Operation Statistics in cERL from FY2013 to 2021

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
2019(R01)	3032	1122.2	535.8
2020(R02)	2309	893.7	494.7
2021(R03)	1521	687.6	303.3

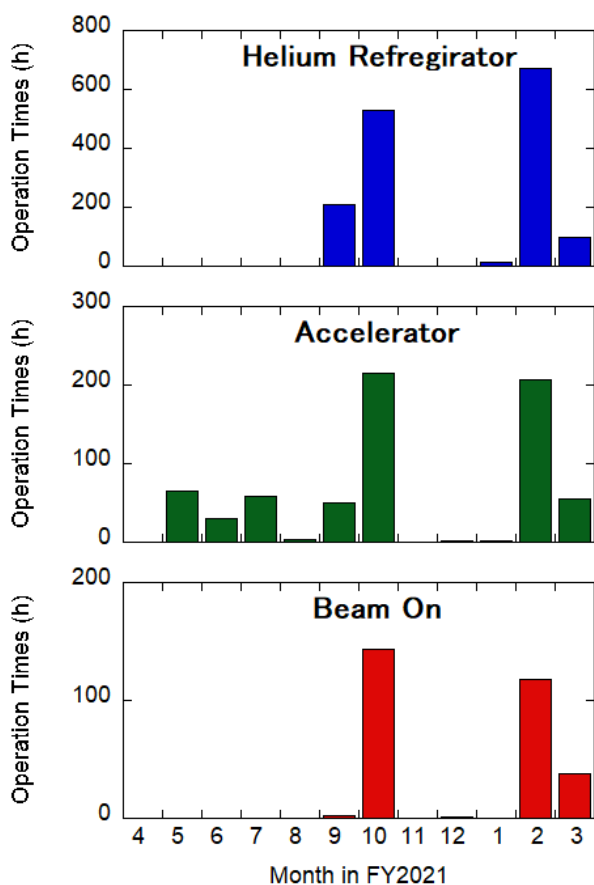


Figure 1: Bar graph of operation statistics in cERL at FY2021.

3. cERL の運転・保守状況と利用展開

3.1 10月運転

照射実験[5]で必要とされる CW モード運転に対応するため、2021年6月に保護抵抗を交換したが、その後の電子銃の高電圧印加試験で予期せぬ放電が発生し、

400 kV 以上での電子銃運転が困難になった。そのため、10月は印加電圧を390 kV に抑えての運転となった。入射部 3.5 MeV、周回部 17.5 MeV で、周回部と入射部のエネルギー比は1:5である。ビーム運転までに電子銃の真空を完全には回復できず、また運転中も QE の劣化が見られたため、1週間毎に再蒸着を行いながらの運転となった。QE はおおむね 1%程度であり、最大電荷量は 40 pC/bunch であった。自由電子レーザー (FEL) 実験時の 60 pC/bunch には到達できなかったが、この電荷量でのバーストモード運転を実施した。アンジュレータ用真空ダクトを設置した状態でビームロスを抑えたエネルギー回収運転を実現することが今回の目的の一つであったが、これを達成できた。その他にバンチ圧縮のための R56 測定やアーク部の分散関数のスタディ、さらに入射部のエミッタンスやバンチ長の測定など、前回のビーム運転で取得できなかった詳細な特性測定が行われた[6-8]。

また、この10月のビーム実験では、NEDOで採択された効率的ナノセルロース生成のための木材照射を行い、平均電流 1 μ A の CW 運転で、1 MGy の照射実験を行った。照射ターゲットとしてスギを利用し、特にナノセルロース生成のエネルギー依存性を調べるために、3.5 MeV と 10 MeV での2種類のビームエネルギーで照射を行い、各々深さ毎のナノセルロースの生成量の違いがわかるような構成とした。照射ターゲットに対するビームの均一性にも注意を払ったうえで、照射の深さ方向の分布を測定できるような線量計も設けた。これらの照射木材は産総研に送られ、ナノセルロース生成の詳細な解析が行われた。

さらに関係者の協力のもとで、ナノセルロース量産のための照射用大電流電子ビーム源として、新たな超伝導空洞技術であるニオブスズ空洞を用いた 10 MeV・50 mA の省電力小型電子加速器の設計を進めた[9, 10]。

3.2 2月・3月運転

10月の周回部と入射部の1:5のエネルギー比でのバーストモード運転でのエネルギー回収の成功を受けて、2月の運転では CW ビームでのエネルギー回収を試みた。我々の目標はアンジュレータを設置した状態で、60 pC の高電荷用 optics での CW モード運転であるが、直前に 81.25 MHz 繰り返しのレーザーが壊れたため、10月同様 1.3 GHz 繰り返しの運転となった。当初、入射部は高電荷用の optics で運転を開始した。しかし CW モード運転時に周回部のビームロスが増大したため、入射部を 1.3 GHz で 1 mA CW 運転を実現したときの 0.77 pC/bunch 用の低電荷 optics に調整し直して、アンジュレータを設置した状態での CW モード運転でのエネルギー回収の問題点を洗い出すことにした。これにより、0.3 mA での CW ビームのエネルギー回収に成功した[11]。その後放射線管理室の立ち合いのもと、0.25 mA の CW モード運転でエネルギー回収を保持しながら、加速器室シールドの外側での放射線量を測定し、シールド外でも 1 μ Sv/h 以下となるビーム運転が実現されていることを確認した。これにより、アンジュレータ用の狭い真空ダクトがある状態でも 1 mA の CW モード運転が可能であることが判った。

3.3 機器のトラブルと対処

2月のビーム実験の際にスクリーンモニターを破損する事故が起きた。大電流運転用のCWモードからビーム調整用のバーストモードへの切り替えのときに、スクリーンモニターを挿入した状態で、CWビームを発生できる条件が残っていたことが原因と判明した。このような運転モード不整合が発生したときの対策として、モード切り替えのロジックを修正し、放射線管理室の立ち合いのもとで新たなロジックの安全性を確認し、ビーム運転を再開した。今年度4月から6月にかけて、この破損したスクリーンモニターの修理作業を最優先で行った。

昨年12月以来、ERL開発棟の雨漏りがひどくなり、2~3月は主要な電子機器に防水シートをかけることで応急的な対策を取りながらの運転となった。原因は屋根に取り付けられた明り取りのためのポリカーボネートが経年劣化で割れを生じてきていることであった。3月の運転終了後に雨漏りの最もひどかった一部の箇所に対して補修工事を行った。2022年度になって雨漏り対策の費用が認められたため、すべての明り取り窓に保護カバーを取り付ける改修工事が行われた[12]。

3.4 その他の研究

前述のビーム実験に基づいた研究以外にも、新たな電子源の開発[13, 14]や、半導体リソグラフィの微細化・高NA化に向けたEUV光源の開発検討[15, 16]、アト秒レーザー光源としての短パルスXFELの検討[17]、機械学習によるビーム調整の自動化[18]、新たなビームロス評価方法の開発[19]、産業利用を前提とした低コストで簡便な構造のアンジュレータ開発[20]などが進められている。

4. まとめ

cERLは機構内の他のプロジェクトとは異なり、民間会社やNEDO等からの大型の外部資金の獲得とそれに応じた機構長裁量により、新たなビームラインの建設や加速器の運転・維持管理を行っている。財源の多くを外部資金に依存しているため、1年から2年といった短期での成果を求められているが、cERL関係者の不断の努力によりこれまでミッションをクリアしてきた。

昨年度は10月と2~3月の2回のビーム実験を行い、NEDOの競争的資金による効率的ナノセルロース製造に関連した木材への電子線照射実験を実施し、電子ビーム照射によるセルロースナノファイバー生成の効率向上のメカニズムを明らかにすることができた。また、アンジュレータ真空ダクトがある状態でも1mA CWモード運転の可能性を示せたことで、ERLベースの高繰り返しFEL実現に向けて大きく前進した。

謝辞

本研究成果の一部は、NEDO 先導研究プログラム／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム「高効率ナノセルロース製造のための革新的量子ビーム技術開発」、JST さきがけ(革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出)「レーザー冷却極低温電子源による超精密ビーム制御」、および光科学技術研究振興財団「広帯域短パルス電子ビームに適応するテーパアンジュレータ型自

由電子レーザーの開発」によるものである。

参考文献

- [1] <https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2022/07/KEK-PIP2022.pdf>
- [2] <https://www2.kek.jp/casa/ja/>
- [3] M. Akemoto *et al.*, “Construction and Commissioning of the Compact Energy-Recovery Linac at KEK”, Nucl. Instrum. Meth. A 877, 197 (2018).
- [4] https://www.nedo.go.jp/koubo/CA2_100294.html
- [5] Y. Morikawa *et al.*, “電子線加速器の産業応用に向けたcERLにおける照射実験”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, TUP027.
- [6] O. Tanaka *et al.*, “コンパクトERL入射器の現状”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, THP057.
- [7] N. Nakamura *et al.*, “cERL アーク部における高次分散関数の影響と測定”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, THP060.
- [8] M. Shimada, “コンパクトERLにおけるアーク部オブティクススタディ”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, FRP056.
- [9] H. Sakai *et al.*, “ニオブスズ超伝導空洞を用いた材料照射用大強度電子ビーム加速器の設計開発”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, TUP028.
- [10] Y. Honda *et al.*, “超伝導線形加速器による大強度電子ビーム照射システムのビーム輸送シミュレーション”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, FRP017.
- [11] T. Tanikawa *et al.*, “大出力CW-FELに向けたcERL運転調整の現状”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, THP023.
- [12] Y. Honda *et al.*, “KEKのERL開発棟の老朽化による雨漏りの発生とその対策”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, TUP041.
- [13] Y. Honda, “レーザー原子冷却による極低温電子源の開発”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, WEOA08.
- [14] T. Konomi *et al.*, “KEKにおける超伝導RF電子銃2号機の横測定試験”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, WEP054.
- [15] O. Tanaka *et al.*, “リソグラフィ用ERL EUV-FELに向けた入射器設計”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, WEP058.
- [16] Y. Honda *et al.*, “ERL型EUV自由電子レーザーの設計状況”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, THP058.
- [17] Y. Honda *et al.*, “バンチエネルギーチャープとテーパアンジュレータを組み合わせた短パルスXFELの検討”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, WEP057.
- [18] A. Kano *et al.*, “コンパクトERLにおける機械学習によるビームオブティクスの自動調整”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, TUP051.
- [19] M. Shiozawa *et al.*, “ガフクロミックフィルムによるビームロス評価”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, THP014.
- [20] K. Tsuchiya *et al.*, “APU型アンジュレータの磁場測定の経験”, presented at PASJ2022, Oct. 2022, FRP022.