

Compact ERL における長期ビーム運転下での主加速部超伝導空洞性能の推移

LONG-TERM OPERATION WITH BEAM AND CAVITY PERFORMANCE IN COMPACT-ERL MAIN LINAC AT KEK

阪井寛志^{#, A)}, 梅森健成^{A)}, 加古永治^{A)}, 許斐太郎^{A)}, 古屋貴章^{A)}, Qiu Feng^{A)}, 三浦孝子^{A)}, 中西功太^{A)}, 本間輝也^{A)}, 小島裕二^{A)}, 沢村勝^{B)}, 石原将治^{C)}, 今田信一^{C)}, 泰中俊介^{C)}, 沼田直人^{C)}, 山田浩気^{C)}, Hiroshi Sakai^{#, A)}, Kensei Umemori^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Taro Konomi^{A)}, Takaaki Furuya^{A)}, Qiu Feng^{A)}, Takako Miura^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Teruya Honma^{A)}, Yuji Kojima^{A)}, Masaru Sawamura^{B)}, Masaharu Ishihara^{C)}, Shinichi Imada^{C)}, Shunsuke Tainaka^{C)}, Naoto Numata^{C)}, Hiroki Yamada^{C)},
^{A)} KEK, ^{B)} QST, ^{C)} NAT

Abstract

We developed ERL main linac cryomodule for Compact ERL (cERL) in KEK. The module consists of two 9-cell 1.3 GHz superconducting cavities. After construction of cERL recirculation loop, beam operation was started in 2013 Dec. First electron beam of 20 MeV successfully passed the main linac cavities [1]. Beam current increased step by step and currently reached to 1 mA (CW) [2]. Energy recovery has successfully achieved. However, field emission was one of the problems for long term operation [3]. Therefore, the performance of the SRF cavities through long term beam operation has been investigated. In this paper, details of SRF beam operation, degradation, applied recovery methods are described.

1. はじめに

1.1 Compact ERL (cERL)

エネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) の小型実証機であるコンパクト ERL (cERL) は、2013 年から運転を開始し、multi-GeV クラスの ERL 光源の実証機として、KEK に建設された[4]が、2017 年以後、現在は ERL 技術の産業応用を念頭に置いた超伝導加速器利用のための開発を行っている。具体的には ERL 特有の sub-ps 以下の短バンチでかつ 1 mA もの高輝度大電流ビーム運転が可能であることを生かし、テラヘルツ領域[5]から中赤外 FEL[6]の生成によるユーザー利用。EUV リソグラフィのための極紫外の大強度レーザー生成による基礎研究および産業利用[7]、さらに核医学用検査薬の国内での製造やアスファルトの長寿命化のための照射実験[8]など、多くの民間企業や国内外の研究機関と連携して研究開発を進めている。

Table 1: Design parameters of the cERL

Nominal beam energy	35 MeV
Nominal injection energy	5 MeV
Beam current	10 mA (initial goal) 100 mA (final goal)
Normalized emittance	0.1 – 1 mm-mrad
Bunch length (bunch compressed)	1-3 ps (usual) 100 fs (short bunch)

Table 1 に cERL のその設計パラメータを示す。高輝度大電流ビームを生成する 500 kV の DC 電子銃、入射部超伝導空洞で 5 MeV に加速、そして、主加速部超伝導加速空洞によりさらにビーム加速され、周回部を回ったビームは、主加速部緒運動空洞で次のビームへの加速

のためにエネルギー回収され、ビームダンプに最終的に打ち込まれる。

1.2 主加速部クライオモジュール[9]

Figure 1 の左図は 2 つの 1.3 GHz の 9 セル KEK-ERL model-2 空洞[10]を内包した cERL 主加速部クライオモジュールの概略図である。大電流の ERL のビームによる有害な HOM を減衰するためにアイリス部は 80 mm となっている。そのため、Epeak/Eacc 比が 3.0 と高くなっている。また、HOM を吸収するために空洞のビームパイプ径を大きくし、そこから伝搬する HOM を 80 K の温度領域に設置されたビームパイプ型のフェライト HOM 吸収体[11]により吸収する構造となっている。空洞には二枚のセラミック窓を有する入力カップラー[12]からパワーを投入し、そして、周波数チューナー[13]により空洞周波数を制御している。空洞は 2 K に冷却される。それ以外に 5 K と 80 K の熱シールドがあり、空洞全体を 2 K に保っている。5 K のシールド部に磁気シールドも設置されている。RF 振幅と位相は FPGA によるデジタルフィードバックシステムにて、0.01%(rms)の振幅、0.01 度(rms)の位相安定性を達成している。[14]

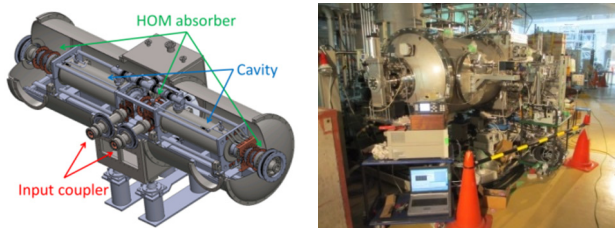


Figure 1: Schematic view of ERL main linac cryomodule (left) and the one placed inside the cERL radiation shielding room (right).

残念ながら、縦測定では性能が 25 MV/m 以上の性能が出ていたが、その後のモジュール試験時にて強い

[#]hiroshi.sakai.phys@kek.jp

フィールドエミッションが観測され、2015 年現在までは両空洞は 8.3 MV/m の加速電場(Eacc)にて抑えて運転している(加速電圧 $V_c = 1.038 \times E_{acc}$)。そのため、cERL ビームは入射部で 2.9 MeV、周回部で 20 MeV の運転を行っている。2015 年の加速器学会にて、その運転現状を話したが、本文ではその後の運転現状について述べる。

1.3 2016 年までのビーム運転現状と空洞性能

2013 年から 2016 年までのビーム運転の履歴と空洞性能の履歴を示す。2013 年 12 月にビーム運転開始後に、2014 年の 2 期、3 期の運転で、CW で 6.5 μ A のエネルギー回収を行う[1]。その後、2015 年の 4 期、5 期で約 CW 100 μ A のエネルギー回収運転を行うとともに、レーザーコンプトン散乱実験を行い、狭帯域の X 線画像を得ることに成功した[15]。2016 年 3 月の 6 期運転にて、DC 電子銃の upgrade を行い、約 1 mA のエネルギー回収に成功した[2]。

空洞の Q 値測定は上記ビーム運転に沿って 2016 年まで数回行った。結果を Fig. 2 に示す。下流側(ML2)は 2012 年の最初の高出力試験ですでにフィールドエミッションによる放射線は存在し、Q 値は低かったが、その後のビーム運転にて、Q 値はさらに悪くなった。ただし、2014 年 5 月から 2015 年 3 月までの間は、性能が低下した後も空洞の性能は維持されていた。空洞性能は後述する pulse processing を用いて維持した[16]。上流空洞の ML1 の空洞性能は徐々に悪化している。2016 年まで、空洞性能が悪化した理由は明らかではない。そのため、2017 年～2019 年に引き続き空洞性能を測定した。

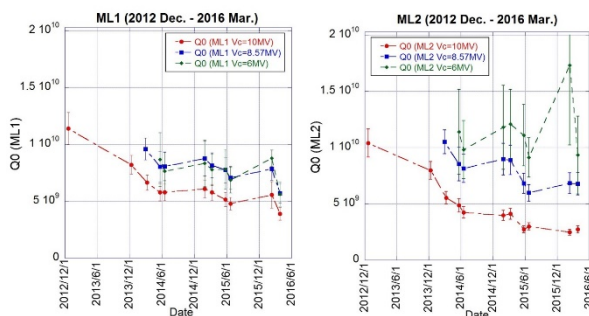


Figure 2: Measurement of the Q-values of 6, 8.57 and 10 MV cavity voltage during long-term beam operation from 2012 to 2016 including high power test of Main linac 1 (ML1) (left) and 2 (ML2) (right).

2. 2019 年までのビーム運転現状と空洞性能

2.1 2017 年から 2019 年のビーム運転

Table 2 は、2017 年～2019 年の最近 3 年間のビーム運転状況を示す。cERL の研究開発は、2017 年から産業用アプリケーションに移行したが、残念ながら、2017 年は Table 2 に示すように研究開発用の十分なビームタイムは得られなかった。2017 年と 2018 年は、短バンチと高荷電ビーム運転のための基礎ビーム研究[17, 18]をメインに行った。2019 年からは RI 生成照射実験のためのビームラインが新たに cERL に建設され、それによる CW

ビームの照射実験が上記基礎ビーム研究と同時に進められるようになった[8]。

Table 2: cERL Beam Operation from 2017 to 2019

Period (operation time)	Energy [MeV]	Current [mA]	Comment
2017/3 7 th phase (3 weeks)	(20→) 17.5	60 pC/ bunch	Degradation of cavity performance. Pulse operation for beam optimization.
2018/3 8 th phase (2 weeks)	17.5	60 pC/ bunch	Pulse operation for THz radiation experiment
2018/6 9 th phase (4 weeks)	17.5	60 pC/ bunch & 1 mA (CW)	Pulse operation for beam optimization & THz radiation experiment & CW beam operation
2019/4 10 th phase (4 weeks)	17.5	60 pC/ bunch	Pulse operation for beam optimization & THz radiation & test of RI beam line
2019/6 11 th phase (4 weeks)	17.5 →19.5	60 pC/ bunch & CW beam ($<10 \mu$ A)	Pulse operation for beam optimization & THz radiation & RI production and irradiation experiment at RI beam line

2.2 ML1 空洞性能推移と性能回復処理

2017 年の 7 期運転にて、ML1 の深刻な空洞性能劣化があった。Figure 3 は、2017 年 3 月 8 日のビーム運転前の空洞調整中に起こった性能劣化の時間的な経緯を示す。空洞冷却後に最初に空洞のプロセッシングを行う際に、ML1 の空洞には CW の電圧をゆっくり上昇させていく。この時は電圧が 5 MV 程度に達すると、ML1 の空

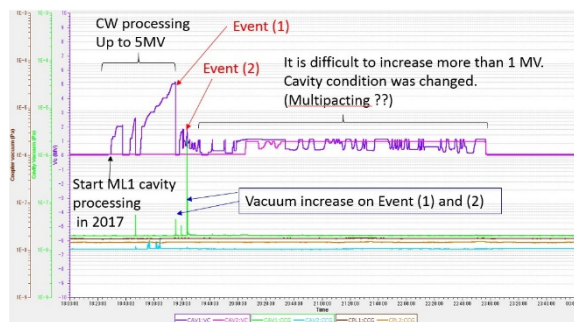


Figure 3: ML1 cavity processing trend on 8th.Mar.2017 before beam operation. Purple (pink) line shows the cavity voltage in ML1 (ML2). Green (line blue) line shows the vacuum inside the cavity of ML1 (ML2). Green (light blue) line shows the vacuum inside the cavity of ML1 (ML2). Brown (Gold) line shows the vacuum in warm side of the input coupler of ML1 (ML2).

洞内の電場が突然落ち込み、ML1空洞内の空洞真空が上昇した。その後、空洞電圧は 1 MV 以上かけることができなくなった。

Figure 4 は、Fig. 3 に示される event(1)および(2)の拡大図を示している。Figure 4 の左図は最初に空洞電圧が落ちたときの最初の RF ダウン事象(event(1))を含む空洞真空悪化時前後の 2 分間の経過を示す。空洞電圧の低下後、ML1 の空洞真空が上昇した。Figure 4 の右図は event(1)の後、空洞電圧が 5 MV より低いときに、大きな真空が増加した際の空洞真空悪化の 2 分間の経過を示す。2 MV の空洞電圧で event(2)が起こった後、空洞電圧が少し落ちるが、空洞電圧が落ちた後の event(2)を含む 20 秒以上の間、真空は通常よりも高い圧力を維持し、このとき ML1 空洞内は長時間の放電現象が起こった。空洞状態は急激に変化することになった。また、これらの事象後に深刻なマルチパケティングが観察されるようになった。

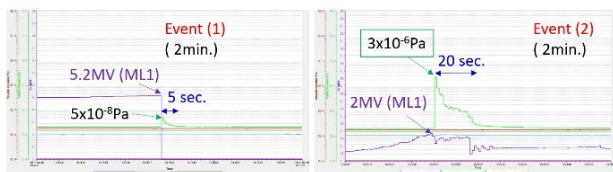


Figure 4: The left (right) figure shows the expanded view around event (1) and (2) denoted in Figure 4, respectively.

Figure 5 に event(1), (2)以降の processing の様子を示す。数 MV レベルで長時間 processing を行った後に、最終的には空洞性能は 6.5 MV まで回復した。但し、今回のこの event が発生する前は最大 11 MV まで到達していたが、この event が行った後は空洞電圧が 6.5 MV に達すると、突然空洞電圧が落ち、それ以上増加しなかった。この後も 7 期~11 期までのビーム運転にて参考文献 [16] に示すような pulse processing を行い、空洞電圧を増加させる処理を合計約 10 時間以上行ったが、この長期間の pulse processing の後、ML1 空洞では 6.9 MV までしか増加できなかった。空洞電圧の制限の理由は今までのフィールドエミッションではなく、熱的なクエンチであった。Event(1)または(2)の後に空洞内にクエンチを引き起こす微粒子が生成され、その結果、低い電界(磁場)で空洞が加熱されることになったと思われる。

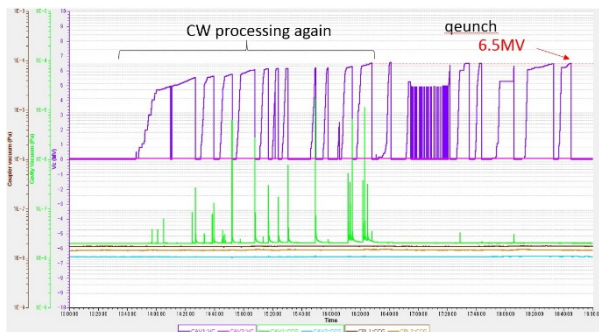


Figure 5: ML1 cavity processing trend again on 10th. Mar. 2017 after field decreasing event as shown in Figure 4.

2.3 ML2 空洞性能推移と性能回復処理

ML2 では幸運にも前述した 2018 年 3 月 8 日の運転での event (1)と(2)において、性能劣化は観測されなかった。しかし、ML 2 空洞は依然としてフィールドエミッションの影響が大きい。ML2 の Q 値は 7 期のビーム運転後に徐々に減少した。そこで 9 期のビーム運転で pulse processing を行った。

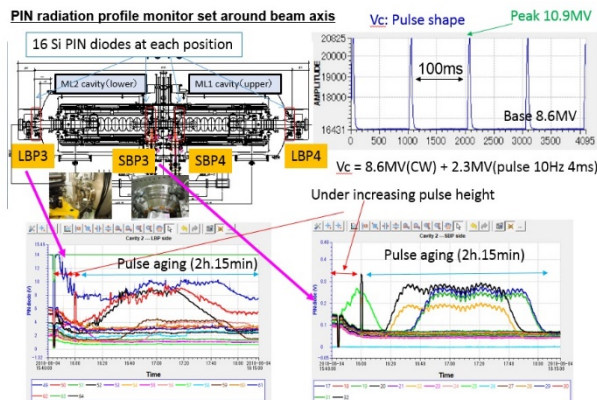


Figure 6: Pulse processing condition for ML2 cavity at 9th phase. Lower figures shows the trend of the PIN diode signals set on the both ends of ML2 cavity under the pulse processing as shown in the upper left figure of this figure.

Figure 6 に pulse processing の様子を示す。8.6 MV の CW の空洞電圧に 10.9 MV までのパルス peak 電圧を加え、高い電圧での process を行った。Figure 6 の右上の図に示すように、このパルス繰り返しは 10 Hz であり、ML2 空洞横の PIN ダイオードの信号が、2 時間の pulse processing 後、全ての PIN ダイオード信号は劇的に減少した。この信号の減少を見届けて、我々は pulse processing を終了した。なお、この pulse processing の効果は後述するように、効果があり、第 10 期、11 期運転前に 2 時間程度と同じ pulse processing を ML2 には行っている。

2.4 2017 年~2019 年の空洞 Q 値測定結果

2017 年は時間がなかったため、Q 値を測定しなかったが、2 つの空洞の pulse processing 後、2018 年と 2019 年に Q 値を各 2 回ずつ測定した。

Figure 7 に、2016 年と 2018 年、2019 年の Q 値の測

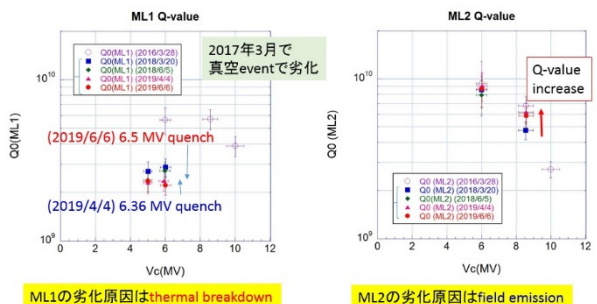


Figure 7: Q-value measurement results of ML1(left) and ML2(right). Horizontal (vertical) axes show the cavity voltage (Vc) and unloaded-Q values of both cavities.

定結果を示す。ML1 について Fig. 3 に示した event が発生した後、2016 年よりも高い Q 値を得ることはできなかった。さらに、ML1 では 10 時間以上の pulse processing を試みたにもかかわらず、2018 年の空洞電圧は、第 8 期、9 期のビーム運転の両方で 6.9 MV までに制限された。また、第 10 期、11 期では Fig. 7 に示すようにさらに 6.5 MV および 6.36 MV までに制限された[19]。それに対し、Fig. 6 に示すように ML2 の pulse processing を行った後は、ML2 空洞の性能は回復した。2018 年 6 月の 8.6 MV での Q 値は pulse processing 後に増加し、2016 年と同じ値に戻った。ML2 ではフィールドエミッションが深刻な問題であったが、今のところ、pulse processing 法で空洞性能を回復&保持できている。この空洞電圧を ML1 で 6 MV と ML2 で 8.6 MV に保ち、2018 年以降 17.5 MeV 運転でビーム運転を開始している。その後、2018 年 6 月にはエネルギー回収条件で再び CW 1 mA のビーム運転を行うことができた [2]。

2.5 3.5kPa 運転による加速電圧増加運転

このような状況で 2019 年 4 月までは 17.5 MeV のビーム運転を行ってきたが、入射部と主空洞の total のエネルギーで決まるエネルギーを熱負荷の状況から判断し、エネルギー回収を含めて周回および照射ビームのエネルギーを最大化するような運転を 2019 年 6 月の運転で検討した。大電荷運転時は入射電子ビームの空間電荷効果の影響を抑えるために入射部は 5 MeV 運転を行っていたが、入射部の超伝導空洞の HOM カプラーによる発熱により熱負荷が空洞電圧に対し、非線形的に増加していった。そこで、1つ目の改善として、入射部のエネルギーを変化させた際の入射部ビームエミッタンスの再計算を行い、入射部のエネルギーを下げてもエミッタンスに影響がないかを確認した後、入射部 4 MeV 運転にて、主空洞のエネルギーを上げることで熱負荷が減るかの実験を行った。Table 3 がその結果である。入射部エネルギーを 5 MeV から 4 MeV に下げて、主空洞の ML1 の空洞を 1 MV 上げ、total energy を変えないようにしたところ、He 流量で 9 m³/h も低くなった。この He 流量をエネルギー換算すると 9.3 W 程度も下がったことになり、2019 年 6 月はビーム条件も含めて入射部の 4 MeV 運転からスタートした。

Table 3: He Flow Measurement Under 4 MeV & 5MeV Injector Beam with 17.5 MeV Total Beam Energy

Total beam energy (MeV)	17.5	
Injector energy (MeV)	5.0	4.0
ML1 Vc (MV)	5.0	6.0
ML2 Vc (MV)	7.5	7.5
He flow (m ³ /h)	87.8	78.9

次に冷凍機の運転状況を変え、さらにエネルギーを上げる検討を行った。2 K 冷凍機は液化機より供給された約 4.2 K の液化 He を減圧して 2 K の超流動 He を発生させる装置である。従来、2 K 運転を保つためには He の圧力を約 3 kPa 程度に保持する必要があるが、実際には 3.0 kPa で 1.986 K、3.5 kPa で 2.039 K と圧力によるそこまで He 温度は変化しない。それに対し、冷凍機側のシステムではヘリウム槽の圧力と実現可能な冷凍機負荷

に比例するため、ヘリウム圧力を少し上げることで熱負荷の上限を上げることの検討を行った。具体的には、我々の場合では 3.0 kPa では 85 m³/h が運転の上限であったが、3.5 kPa では 99.2 m³/h が上限になる。実際に 3.5 kPa での空洞の運転が可能かどうかの試験を行った。

Table 4: cERL ML Condition with Different Total Beam Energy Condition Under 3.9 MeV Injector Beam

Total beam energy (MeV)	17.5	19.0	19.5
Injector energy (MeV)	3.9		
ML1 Vc (MV)	5.5	6.0	6.0
ML2 Vc (MV)	7.6	8.6	9.1
He pressure (kPa)	3.5		
He flow (m ³ /h)	71.9	82.4	90.2

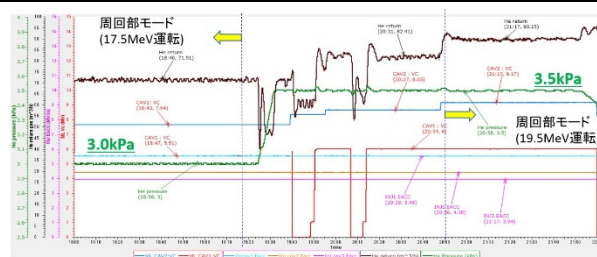


Figure 8: beam operation with 3.5 kPa condition.

Table 4 が 3.9 MeV に入射部を保持した際に周回部および照射部のビームエネルギーがどこまで上げられるかを実験した結果である。17.5 MeV の運転では従来の 3.0 kPa に He 圧力を保持し、その際には He 流量は 71.9 m³/h の流量に収まっていたが、そこから He 圧力を 3.5 kPa に上げて、下流の空洞の電圧を 7.6 MV から 8.6 MV (total 19.0 MeV) および 9.1 MV (total 19.5 MeV) の運転での熱負荷の測定を行った。それぞれ 82.4 m³/h および 90.2 m³/h と最終的に 90 m³/h を超えた運転になったが、その際でも Fig. 8 に示すように加速電圧、および He 圧力変動、He 流量などが 1 時間以上安定に運転が可能であった。この実験結果を受けて、2019 年 6 月の最終週のビーム運転では 19.5 MeV 運転を 3.5 kPa で行い、照射実験や周回ビームのビーム性能評価実験を実施した。

3. まとめと今後

直近 3 年間の cERL 運転中の空洞性能の推移を示した。特に、ML1 空洞は予想外の放電現象を伴う event によって劇的に劣化した。この event 後、長時間の pulse processing にもかかわらず、空洞性能は以前の値には戻らず、空洞性能の原因が熱的なクエンチへと変化した。ML2 空洞の場合、厳しいフィールドエミッション下でも空洞性能を維持することができた。Pulse processing は ML2 の空洞性能を維持するために非常に効果的であった。さらに冷凍機側の運転状況を今の空洞性能に合わせ、3.5 kPa 運転を行うことで、空洞の熱負荷の上限をあげ、空洞による熱負荷増加を最適化することで、加速電圧を増加させることに成功した。

今回の放電イベント中に、長い真空増加減少を観察したが、それにより、HOM 吸収体、入力カプラーのセラ

ミック窓、または ML1 空洞近くの他の真空コンポーネントなどが破損し、ML1 空洞内にいくつかの微粒子を作った可能性が高い。長期的には空洞内部の超純水清浄を施し、根本的な空洞性能回復を行うことを検討するとともに、空洞内部を直接見て、空洞性能劣化の根本的な原因を特定したい。また、今後の 10 mA の大電流エネルギー回収運転に向けてこの空洞性能を保持していく予定である。

謝辞

この長期ビーム運転をサポート頂いた cERL の開発メンバーに感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK” Nucl. Instrum. Method A 877 p.197-219 (2018).
- [2] T. Obina *et al.*, “Recent Developments and Operational status of the Compact ERL at KEK”, Proc. of IPAC’16, Busan, Korea, p. 1835 (2016).
- [3] H. Sakai *et al.*, “High power CW tests of cERL Main-linac cryomodule”, Proc. of SRF2013, Paris, France, p.855 (2013).
- [4] Energy Recovery Linac Conceptual Design Report, KEK Report 2012-4 (2012);
<http://ccdb5fs.kek.jp/tiff/2012/1224/1224004.pdf>
- [5] Y. Honda *et al.*, “High-efficiency broadband THz emission via diffraction-radiation cavity”, Phys. Rev. Accel. Beams **22**, 040703 (2019).
- [6] R. Kato *et al.*, “Development of high-repetition MIR-FEL based on cERL” in Proc. of PASJ2019, Kyoto, Japan, THPI015 (2019).
- [7] H. Sakai *et al.*, “Superconducting Accelerator for ERL based FEL EUV light source at KEK”, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, MOXA04, p.13 (2017).
- [8] 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” in Proc. of PASJ2019, Kyoto, Japan, WEPH015 (2019).
- [9] H. Sakai *et al.*, “Field emission studies in vertical test and during cryomodule operation using precise x-ray mapping system”, Phys. Rev. Accel. Beams **22**, 022002 (2019).
- [10] K. Umemori *et al.*, “Design of L-band superconducting cavity for the energy recovery linacs”, Proc. of APAC2007, Indore, India, p.570 (2007).
- [11] M. Sawamura *et al.*, “Cooling properties of HOM absorber model for cERL in Japan”, Proc. of SRF’2011, Chicago, U.S.A, p.350 (2011).
- [12] H. Sakai *et al.*, “High power tests of KEK-ERL input coupler for main linac under liquid nitrogen condition”, Proc. of SRF2011, Chicago, U.S.A, p.356 (2011).
- [13] K. Enami *et al.*, “Performance evaluation of ERL main linac tuner”, Proc. of IPAC2014, Dresden, Germany, p.2534 (2014).
- [14] T. Miura *et al.*, “Performance of RF system for Compact-ERL Main Linac at KEK”, IPAC’14, Dresden, Germany, p.2450 (2014).
- [15] T. Akagi *et al.*, “Narrow-band photon beam via laser Compton scattering in an energy recovery linac”, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 114701, (2016).
- [16] H. Sakai *et al.*, “Measurement of the cavity performances of Compact ERL main linac cryomodule during beam operation” Proc. of SRF2015, Whistler, Canada, p.592 (2015).
- [17] T. Miyajima *et al.*, “60 pC bunch charge operation of the compact ERL at KEK”, Proc. of IPAC’17, Copenhagen, Denmark, p. 890 (2017).
- [18] Y. Honda *et al.*, “Beam tuning and bunch length

measurement in the bunch compression operation at the cERL” Nucl. Instrum. Method A 875 p.156-164 (2017).
[19] F. Qiu *et al.*, “Status of microphonics on cERL nine-cell cavities” in Proc. of PASJ2019, Kyoto, Japan, WEPH010 (2019).