

KEK コンパクト ERL の現状

PRESENT STATUS OF THE COMPACT ERL AT KEK

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

Abstract

The present status of the compact ERL (cERL) at High Energy Accelerator Research Organization (KEK), including machine troubles and recent progress of of beam dynamics studies, are reported. The cERL was operated less than 400 hours due to shortage of funds. Generation and transportation of the high bunch charge of 40 pC without energy recovery, evaluation of the bunch length and the normalized emittance for several bunch charges, the bunch compression and THz generation for 2 pC bunch charge, beam halo and beam loss studies, and beam timing measurements using HOMs in injector superconducting cavity were conducted in FY2016.

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ッ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) のコンパクト ERL (cERL) は、ERL の技術実証を目的とした超伝導加速器である[1]。KEK では PF と PF-AR に代わる将来光源として ERL 加速器をベースとした 3 GeV ERL 光源計画を策定し、その技術面・運用面での問題の解決と ERL 技術の実証のために cERL を建設した。cERL は 2013 年から運転を開始し、これまで 4 年間運用されてきた。この間に加速器の CW 運転に伴ういくつかの問題が顕在化し、その都度解決方法を模索しつつ開発を進めてきた。結果として、毎年平均ビーム電流は 1 桁ずつ

増加し 2016 年 3 月には周回ビーム電流 0.9 mA のエネルギー回収運転を達成した[2]。cERL の典型的な運転パラメータを Table 1 に示す。

他方蓄積リング型光源では、ハイブリッドマルチバンドアクロマート (HMBA) 方式の考案により、広い安定領域と現実的な六極磁場の強さの下で、100 pm rad クラスの低エミッタンスビームを実現できることが示された。これは従来 ERL 光源に期待されてきた多くの放射光科学での成果が蓄積リング型で早期に実現可能であることを示しており、短パルス性を除いて ERL 光源が持っていた優位性の多くが失われることになった。KEK でも HMBA 方式の蓄積リング型光源の検討が進められた[3]。その結果、改訂された KEK ロードマップでは 3 GeV ERL 光源計画の代わりに 3 GeV 蓄積リング型高輝度光源計画を推進することになった[4]。

これにより cERL は ERL による次期光源計画の R&D 機としての役割を失い、現時点での KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) では、外部資金を獲得することにより、産業利用・産業応用を念頭に置いた開発を目指すという位置づけに代わって

[#] ryukou.kato@kek.jp

[†] 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, T. Akagi [on leave], 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, A. Kosuge [on leave], 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. Noguchi [on leave], 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, S. Matsuba [on leave], M. Mori, R. Nagai, M. Sawamura, T. Shizuma

Tohoku University

N. Nishimori

Hiroshima University

M. Kuriki, L. Guo

る[5]。このような状況の変化の中で cERL の予算は大きく削減され、2016 年度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。しかしながら関係者の不断の努力により、年度後半の追加予算により運転経費が認められて 2・3 月期の運転が可能になった。本年会では、このような状況下で行われた 2016 年度の cERL の運転の概要と機器のトラブル、マシンスタディの状況について報告する。

Table 1: Typical Operational Parameters of cERL

| | |
|----------|-------------------------|
| ビームエネルギー | 19.9 MeV |
| 入射エネルギー | 2.9 - 6 MeV |
| 電子銃エネルギー | 390-450 keV |
| バンチ繰り返し | 1.3 GHz or 162.5 MHz |
| 最大平均電流 | 1 mA |
| 運転モード | CW or パルス |

2. 運転の概要

前節で述べたように 2016 年度は 2・3 月期 (2/20 ~3/31) のみの運転となった。予算の都合により年度当初に運転計画を立案できなかったことから、放射線の変更申請を必要とするビーム電流の増強は行わず、最大平均電流 1 mA 以下での運転となった。Table 2 に 2013 年度から 2016 年度までの cERL の運転統計を示す。冷凍機の運転時間はこれまで年 3,000 時間程度であったがこれは 3 分の 1 まで減少した。cERL の運転時間 (電子銃単独運転を含む) は建設後少しずつ伸びてきていたが、これも半分以下となっている。運転時間が短くなっても、超伝導空洞を冷却に要する時間やエージングに必要な時間は変わらないため、実際にスタディに使用できる Beam On 時間はさらに短くなり、これまでの 1/3 から 1/4 であった。

Table 2: Operation Statistics in cERL from FY2013 to 2016

| 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 |

また、2016 年度の運転状況のデータを棒グラフにしたものを Figure 1 に示す。運転経費確保の目途が立たなかった 4 月から 6 月にかけては冷凍機を使用しない電子銃の単独運転のみが行われた。その後、夏季停止期間を挟んで、10 月末に追加予算の配分が確定し、5 週間の冷凍機運転と運転員の確保が可能

になった。cERL のマシンスタディを PF と PF-AR の運転が停止する 3 月 10 日以降に定め、2 月 20 日から空洞冷却を開始した。

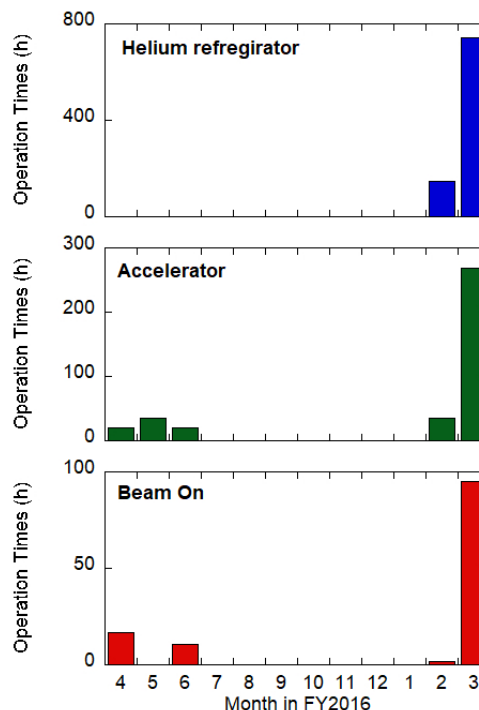


Figure 1: Bar graph of operation statistics in cERL at FY2016.

11 月末に開かれた打合せで「大バンチ電荷での低エミッタンス運転」を今期の目標とすることが提案され、基本方針として、i) バンチ電荷として 60 pC を目標とする、ii) 空間電荷効果の影響を緩和するために入射器のエネルギーを上げる、iii) マージャーによる入射エネルギーへの制約を避けるために、エネルギー回収運転はしないこと、が合意された。

3. 運転と機器トラブル

3.1 電子銃の準備

2 月の前半に電子銃のカソードクリーニングと活性化、超伝導空洞の RF カップラーの常温エージング、および個々の機器のインターロック動作試験を行い、2 月 15 日から電子銃の単独運転 (高圧印加試験) に入った。最初はカソードを装填せずに 500 kV の高電圧を安定して印加できることを確認した。その後カソードを装填しての試験に移行したが、350 kV 付近での放電によりカソードのほぼ全表面で QE がゼロになるトラブルが発生した。このカソードを取り出して見ても放電痕は確認できなかった。予備のカソードを活性化し、高圧印加試験を継続した結果、470 kV 付近から Field Emission の増大が観測されたため、これを避けて今期の運転は印加電圧 450 kV で行うことにした。

3.2 超伝導空洞の冷却とエージング

2月20日から超伝導空洞の冷却を開始したが、加速器室外の冷凍機から加速器室内のクールボックスにつながる配管の封じ切りの断熱真空が悪化しているのが見付き、再度真空排気を行った。また冷却中にクライオモジュールの断熱真空層の真空窓にひび割れが見つかったことから、急遽冷却を中止して昇温、2月25日に真空窓をブランクフランジに交換した。交換作業は小一時間で終了し、そこから真空排気を開始、2月26日の午後から再冷却に入った。取り外した真空窓には真空側から入ったと考えられる亀裂がみとめられ、これは大気側にもつながっていた。亀裂が入った原因はわかっていない。

バンチャー空洞のエージングと電子銃の単独運転を行いながら、超伝導空洞の冷却を進めた結果、3月6日の朝には運転可能な温度に到達した。午前中にインターロックの総合試験を行い、午後から入射器空洞のエージングを開始した。翌7日の日中は入射器空洞のパルスエージングを、夕方からは主空洞の入力カップラーエージングを行った。3月8日からは主空洞のCWエージングに入った。主空洞ML1のCWエージングが5MVまで進んだ時にクエンチが起き、これをきっかけに1MV近辺でチューナーのロックが外れる事象が見られるようになった。3月9日も継続して原因を調査した結果、1~2MVでField Emission または Multipacting が発生している可能性が考えられた。対策として3MVでのCWエージングを行うことでこの現象は解決した。その後に行った主空洞ML2のCWエージングは順調に進んだ。3月10日に主空洞ML1のCWエージングを継続したが6.5MV付近のクエンチで停止するようになってしまったため、パルスエージングに切り替えて9MVまでエージングを進めた。今回のトラブルにより主空洞ML1の熱負荷が増大したことから、ML1の加速電圧を5.0MVとし、ML2の加速電圧7.5MVよりも低く抑えて運転することにした。

今期の運転では空間電荷効果の影響を緩和するために、入射器出射後の全エネルギーをこれまでの2.9MVから5MVまで上げた。これにより主加速空洞を出た後の全エネルギーは17.5MVとなる。エネルギー回収運転では周回部と入射部の合流点にあるマージャーにより両者のエネルギー比が固定されていたが、今回はエネルギー回収を行わないことで、大バンチ電荷運転に最適な入射器エネルギーを選択することにし、翌週3月13日から31日までのマシンスタディに入った。

3.3 マシンスタディとトラブル

スタディ第1週(3/13~3/17)の運転では、電子銃のソレノイドスキャン、入射器空洞#1、#2、#3の位相調整、バンチャー空洞の位相調整を行った。電子銃に450kVを印加し、入射器空洞#1の加速電界を6.9MV/mにしたとき、入射器の下流側で放電が発生し、真空度が悪化する事象が起きた。これは電子銃からのビームのOn/Offに関係なく起きていた。入射器空洞#1からの放射線にモニターが反応し、このと

き電子銃電源の電流値も跳ねていることから、入射器空洞#1のField emissionが何らかの引き金になって、電子銃からビームが引き出されていると考えられる。入射器空洞#1の加速電界を6.5MV/mに落とすと発生しないことが判ったため、以降はこの値で運転した。

第2週(3/20~3/24)の運転では、診断ラインへの40pC輸送調整の後、Slit-scanによるエミッタンス測定と偏向空洞によるバンチ長測定、Q-scanによるエミッタンス測定をおこなった後、合流部調整と主空洞調整を行い、第1アークを経て南側直線部までのビーム輸送とCTRの確認を行った。このとき電子銃Faraday Cup (Gun FC)で測定された電荷量と診断部FC (Diag FC)で測定された値が高バンチ電荷(40pC)時に大きく異なり、15%程度減少してみえることがわかった。入射器空洞から診断部までの経路上にロスモニタを配置して確認したが、この区間ではほぼビームロスがないことが判明した。またGun FC、Diag FC、診断部ビームダンプで測定されたビーム電流の時間波形にも変化がみられた。入射器空洞よりも前でロスが発生しているか、Gun FCで2次電子放出が測定されている可能性が指摘されたが、解決には至らなかった。また、診断ラインの偏向電磁石を使ってエネルギー広がり測定した際に、時間-エネルギー空間でビームが2つに分裂しているように観測された。バンチ電荷が7.7pCのパルススタッキングの時から見えていたという指摘もあり、次回以降の運転でスタッキングによるビームの一様性を改善して確認することにした。

スタディ第3週(3/27~3/31)の運転では、バンチ圧縮とコヒーレント遷移放射(CTR)によるテラヘルツ(THz)計測、入射器空洞のHOMカップラーを用いたビームタイミングモニター[6]、高バンチ電荷でのビームハローのスタディ[7]が行われた。この週は診断ラインでビーム調整中に主空洞ML1が単独で2回、ML1とML2が両方同時に落ちる事象が発生した。診断ラインで発生した放射線が主空洞のアークセンサーにあたっている可能性が考えられた。この現象は、主空洞の電圧を下げることにより発生しなくなった。

また電子銃の励起用レーザーのオシレータでジッター異常が発生した。これは162.5MHzの発振器でサイドバンドが多量に見られる事象で、ノイズによりモードロックが不安定になる。今期の運転前のレーザーの立ち上げ調整でも発生していたトラブルであり、ミラーの洗浄により回復している。

4. 今期の運転で得られた知見と成果

4.1 電子銃の450kVでの安定運転

cERLで使用している光陰極電子銃はQST(JAEA)で開発されたものが移設されている[8]。QSTで行われた試験では500kVの高電圧印加が確認されていたが、移設に伴い絶縁セラミック管(全10段)中の最上段と最下段に不具合が発生し、この2段を短絡して390kVで運用してきた。2015年7月から11月に

かけて、上部に 2 段の絶縁セラミック管を増設し、伸長されたサポートロッドを組み込んだ。2016 年 2 月～3 月の運転では、ビーム電流 1 mA のエネルギー回収運転の確立を優先させるために、電子銃電圧は 390 kV に抑えて運転を行い、マシンスタディの最後の 2 日間だけ 450 kV での試験運転を行った。今期は 3 週間のスタディ期間を通じて 450 kV での運転が行われたが、下流側の真空悪化に伴う停止が一度起きただけで、高電圧に起因するトラブルは発生しなかった。

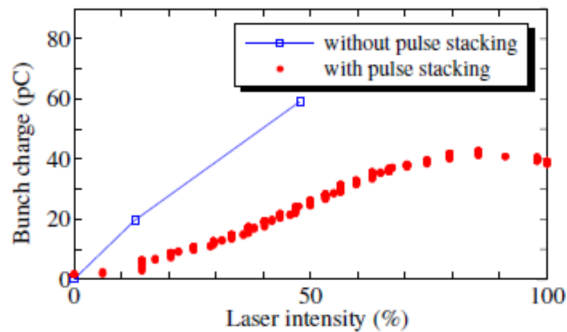


Figure 2: Bunch charge generated from photocathode electron gun with and without pulse stacking of excitation laser.

4.2 高電荷バンチの生成

cERL の電子銃は GaAs カソードが使用され、電子銃に取り付けた状態で実測された量子効率 (QE) は 3% 程度であった。運転期間中は毎日 QE の測定をおこなっているが、その低下は非常に小さかった。励起用レーザーの出力パルス波形は 3 ps (rms) の時間幅を持つガウス分布であり、50 %出力で今回の運転目標である 60 pC のバンチ電荷を発生できる。空間電荷効果の影響を避けるため、励起レーザーパルスを 8 個に分割し、パルス・スタック (時間をずらしながら重ね合わせる) により、31ps の時間幅 (FWHM) を持つフラットトップ分布を実現した。しかしこのパルス・スタックの操作によりカソードに入射するレーザー強度が 1/3 に減少した。結果的に、Figure 2 に示すようにレーザー出力を 100%にしても、発生可能な電荷は 40 pC であった。これが今回目標とした低エミッタンス運転での最大バンチ電荷となった。

4.3 バンチ長測定

入射器診断ラインの 2.6 GHz 偏向空洞とその下流側のスクリーンを用いて測定されたバンチ長は、0.4, 1.0, 20, 40 pC の各バンチ電荷にたいして、計算値と非常に良い一致を示している (Figure 3)。

4.4 エミッタンス測定

入射器診断ラインまでのオプティクス調整を行った後、Slit-scanner を用いてエミッタンス測定を行った (Figure 4)。バンチ電荷 1.0, 7.7, 20, 40 pC に対し

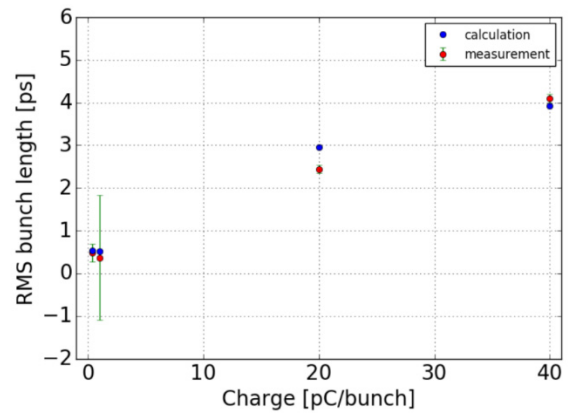


Figure 3: Bunch length measured by a deflecting cavity on the injector diagnostic line. The measured bunch lengths (red circles) are in good agreement with the simulated ones (blue circles).

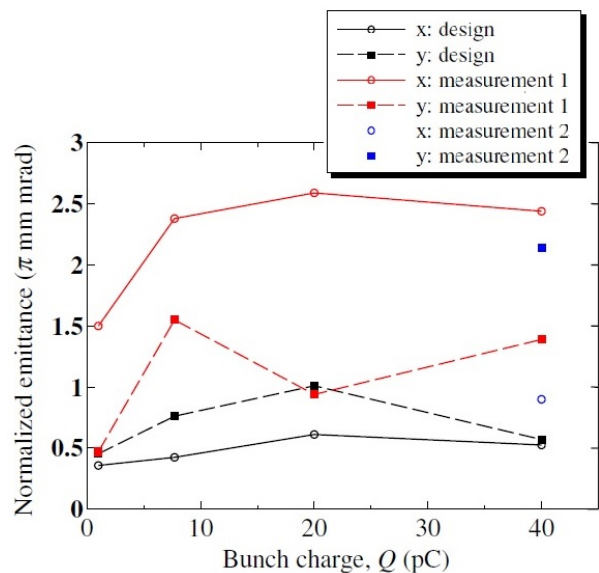


Figure 4: Bunch emittance measured by a slit-scanner on the injector diagnostic line.

て、Slit-scanner 上で垂直方向のビームサイズを絞った条件で測定した規格化エミッタンスが図中の measurement 1 (赤の実線、破線) である。この値は GPT を用いたシミュレーションの結果 (黒の実線、破線) よりも、水平方向で 3~5 倍、垂直方向で 1~3 倍となっている。40 pC のバンチ電荷に対して、Slit-scanner 上で水平方向のビームサイズを絞った条件で測定した規格化エミッタンスが図中の measurement 2 (青○、青■) であり、水平・垂直の規格化エミッタンスの大小関係が逆転している。今回の測定では 40 pC のバンチ電荷に対する規格化エミッタンスは 0.9~2.4 π mm mrad であるが、輸送条件に対する依存性が強く出ており、最適なビーム輸送調整ができているとはいいがたい。

4.5 バンチ圧縮とTHz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、バンチ圧縮の試験とそれにより増大するTHz光の計測を行った。バンチ電荷を2.0 pC/bunchとし、第1アークのR56と上流側の6極磁石をスキキャンして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て干渉波形を測定した。バンチ形状をガウス型と仮定し、低周波数遮断フィルターモデルを用いた時間領域での干渉波形へのフィッティングによりバンチ長を評価している。主空洞ML2の加速位相を+12度としたとき、最短バンチ長 250 ± 50 fsが得られている。実際のバンチ長はガウス型とは限らないが、昨年よりも信頼性の高いバンチ長評価手法が確立されたと考えている。また将来的な赤外光源開発を目指して、共振器型コヒーレント回折放射(CDR)を用いた広帯域のTHz源開発[9]も進められており、その装置がこの夏季停止期間中にcERLに組み込まれる予定である。

4.6 上記以外の成果と将来的な利用

本年会で発表がなされたcERL関連の研究成果を文献[6,7,9,10]に、長期にわたる超伝導空洞の運転から得られた知見についての発表は文献[11, 12]にまとめておく。またERLの光源利用としてのEUV-FELに関する発表は文献[13,14]に、将来的なERLの利用のアイデアは文献[15]にあるので、そちらを参照されたい。

5. まとめ

放射光施設の将来計画が3 GeV ERL光源から3 GeV蓄積リング型高輝度光源に移行し、維持・運転経費が削減されたことから2016年度は昨年度に比べて大幅な運転時間の減少となった。しかし数々の制約の中で、印加電圧450 kVでの電子銃の安定な運転とバンチ電荷40 pCを達成し、当面の目標である500 kV, 60 pC運転まで、あと一歩のところまで来ている。ビーム制御に関しては、縦方向は低電荷から高電荷まで計算と測定が良い一致を示しており、ほぼ制御方法が確立できたと考えている。横方向の制御に関してはまだ計算と測定の差が大きく、今後も低エネルギーでの調整の経験を積み重ねる必要がある。

cERLを取り巻く状況は厳しく、今年度はまだ運転の目途が立っていないが、年度末の運転を目指して努力を続けている。

参考文献

- [1] T. Miyajima *et al.*, “60 pC Bunch Charge Operation of the Compact ERL at KEK”, in Proceedings of IPAC'17, MOPVA019.
- [2] T. Obina *et al.*, “Recent Developments and Operational Status of the Compact ERL at KEK”, in Proceedings of IPAC'16, TUPOW036.
- [3] K. Harada *et al.*, “Design of the 3GeV light source of HMBA type lattice with short straight section”, in Proceedings of the 13th Annual Meeting of PASJ, 2016, MEOM16.

- [4] https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/roadmap2013-J_1.pdf
- [5] <https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>
- [6] T. Okada *et al.*, “Beam timing measurement using HOMs in injector superconducting cavity at cERL”, this conference, TUP092.
- [7] O. Tanaka *et al.*, “Beam halo and beam loss studies at the KEK compact ERL”, this conference, THOM09.
- [8] N. Nishimori *et al.*, Phys. Rev. STAB 17, 053401 (2014).
- [9] Y. Honda *et al.*, “Broadband THz source by means of resonant CDR system”, this conference, WEP004.
- [10] T. Hotei *et al.*, “Influence of laser mirror on high charge beam generated by photocathode electron gun”, this conference, TUP033.
- [11] S. Imada *et al.*, “High power RF pulsed conditioning in cERL injector cryomodule”, this conference, WEP041.
- [12] H. Yamada *et al.*, “Long operational experience with beam in cERL injector cryomodule”, this conference, WEP044.
- [13] N. Nakamura *et al.*, “S2E simulation of an ERL-based EUV-FEL source for lithography”, this conference, TUP016.
- [14] T. Ota *et al.*, “Development of HOM absorbers for CW superconducting cavities in energy recovery linac”, this conference, TUP040.
- [15] M. Shimada, “Proposal of sharing of CW superconducting linac with ILC injector and photon light source”, this conference, WEP002.