

コンパクト ERL の進捗状況

RECENT PROGRESS OF THE COMPACT ERL

中村 典雄^{#,A)}, 阿達 正浩^{A)}, 足立 伸一^{A)}, 赤木 智哉^{A)}, 明本 光生^{A)}, 荒川 大^{A)}, 浅岡 聖二^{A)},
江並 和宏^{A)}, 遠藤 有聲^{A)}, 福田 茂樹^{A)}, 古屋 貴章^{A)}, 芳賀 開一^{A)}, 原 和文^{A)}, 原田 健太郎^{A)},
本田 融^{A)}, 本田 洋介^{A)}, 本間 博幸^{A)}, 本間 輝也^{A)}, 細山 謙二^{A)}, 穂積 憲一^{A)}, 石井 篤^{A)}, 金 秀光^{A)},
加古 永治^{A)}, 神谷 幸秀^{A)}, 片桐 広明^{A)}, 河田 洋^{A)}, 小林 幸則^{A)}, 小島 裕二^{A)}, 近藤 良也^{A)},
Konstantinova Olga^{A)}, 小菅 淳^{A)}, 久米 達哉^{A)}, 松本 利広^{A)}, 松村 宏^{A)}, 松下 英樹^{A)}, 道園 真一郎^{A)},
三浦 孝子^{A)}, 宮島 司^{A)}, 宮内 洋司^{A)}, 長橋 進也^{A)}, 仲井 浩孝^{A)}, 中島 啓光^{A)}, 中西 功太^{A)},
中尾 克己^{A)}, 濁川 和幸^{A)}, 野上 隆史^{A)}, 野口 修一^{A)}, 野澤 俊介^{A)}, 帯名 崇^{A)}, 尾崎 俊幸^{A)},
Qiu Feng^{A)}, 下ヶ橋 秀典^{A)}, 阪井 寛志^{A)}, 坂中 章悟^{A)}, 佐々木 慎一^{A)}, 佐藤 康太郎^{A)}, 佐藤 昌史^{A)},
設楽 哲夫^{A)}, 島田 美帆^{A)}, 篠江 憲治^{A)}, 塩屋 達郎^{A)}, 宍戸 寿郎^{A)}, 多田野幹人^{A)}, 田原 俊央^{A)},
高橋 毅^{A)}, 高井 良太^{A)}, 高木 宏之^{A)}, 竹中 たてる^{A)}, 谷本 育律^{A)}, 飛山真理^{A)}, 土屋 公央^{A)},
内山 隆司^{A)}, 上田 明^{A)}, 梅森 健成^{A)}, 浦川 順治^{A)}, 渡邊 謙^{A)}, 山本 将博^{A)}, 山本 康史^{A)}, 矢野 喜治^{A)},
吉田 光宏^{A)}, Enrico Cenni^{B)}, 羽島 良一^{C)}, 松葉 俊哉^{C)}, 森 道昭^{C)}, 永井 良治^{C)}, 西森 信行^{C)},
沢村 勝^{C)}, 静間 俊行^{C)}, 栗木 雅夫^{D)}, 清宮 裕史^{D)}, Hwang Ji-Gwang^{E)}
Norio Nakamura^{#,A)}, Masahiro Adachi^{A)}, Shinichi Adachi^{A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Dai Arakawa^{A)},
Seiji Asaoka^{A)}, Kazuhiro Enami^{A)}, Kuninori Endo^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Takaaki Furuya^{A)}, Kaiichi Haga^{A)},
Kazufumi Hara^{A)}, Kentaro Harada^{A)}, Tohru Honda^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Teruya Honma^{A)},
Kenji Hosoyama^{A)}, Kenichi Hozumi^{A)}, Atsushi Ishii^{A)}, Xiuguang Jin^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Yukihide Kamiya^{A)},
Hiroaki Katagiri^{A)}, Hiroshi Kawata^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)}, Yuuji Kojima^{A)}, Yoshinari Kondou^{A)},
Olga Konstantinova^{A)}, Atsushi Kosuge^{A)}, Tatsuya Kume^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Hiroshi Matsumura^{A)},
Hideki Matsushita^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Takako Miura^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Hiroshi Miyauchi^{A)},
Shinya Nagahashi^{A)}, Hirotaka Nakai^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Katsumi Nakao^{A)},
Kazuyuki Nigorikawa^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Shuichi Noguchi^{A)}, Shunsuke Nozawa^{A)}, Takashi Obina^{A)},
Toshiyuki Ozaki^{A)}, Feng Qiu^{A)}, Hidenori Sagehashi^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Shogo Sakanaka^{A)}, Shinichi Sasaki^{A)},
Kotaro Satoh^{A)}, Masato Satoh^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Miho Shimada^{A)}, Kenji Shinoe^{A)}, Tatsuro Shioya^{A)},
Toshio Shishido^{A)}, Mikito Tadano^{A)}, Toshihiro Tahara^{A)}, Takaeshi Takahashi^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Hiroyuki Takaki^{A)},
Tateru Takenaka^{A)}, Yasunori Tanimoto^{A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, Kimichika Tsuchiya^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)},
Akira Ueda^{A)}, Kensei Umemori^{A)}, Junji Urakawa^{A)}, Ken Watanabe^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Yasuchika Yamamoto^{A)},
Yoshiharu Yano^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Cenni Enrico^{B)}, Ryoichi Hajima^{C)}, Shunya Matsuba^{C)}, Michiaki Mori^{C)},
Ryoji Nagai^{C)}, Nobuyuki Nishimori^{C)}, Masaru Sawamura^{C)}, Toshiyuki Shizuma^{C)}, Masao Kuriki^{D)}, Yuji Seimiya^{D)},
Ji-Gwang Hwang^{E)}

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

^{B)} The Graduate University of Advanced Studies (Sokendai)

^{C)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{D)} Hiroshima University, ^{E)} Kyungpook National University

Abstract

The recirculation loop of the Compact ERL (cERL) was constructed with the merger and dump sections from July to November in 2013 after commissioning of the injector. All the magnets with their power supplies, vacuum components and monitors were installed and the superconducting main linac already installed in 2012 was carefully connected to the adjacent beam pipes. The commissioning of the entire cERL was started in December 2013 and the beam could be accelerated up to 20 MeV in a short time. The beam recirculation and energy recovery were also achieved without significant beam loss in February 2014. Generation of laser-Compton scattering X-rays is scheduled for the end of FY2014 and generation of THz coherent radiation is planned for FY2015. In this paper, recent progress of the cERL including future developments is reported.

[#] norio.nakamura@kek.jp

1. はじめに

コンパクト ERL (cERL) は、将来光源に要求される良質なビームの生成・加速・周回の実証試験を行うことを目的とする^{[1][2]}。また、鍵となる加速器要素の安定な運転と要求性能実現に必要なビームダイナミクスの解明も目指している。図 1 と表 1 に cERL の配置・構成と基本パラメータを示す。

2012 年 10 月に cERL 加速器室 (放射線シールド) の建設、2013 年 4 月には cERL 入射部の建設を完了させ、4-6 月に入射部のコミッショニングを行った^{[3][4]}。その後、2013 年 7 月から周回部の建設を行い、建設完了後の 12 月には周回部のコミッショニングを開始した。ここでは、ここ約 1 年間における cERL の進捗状況について報告する。

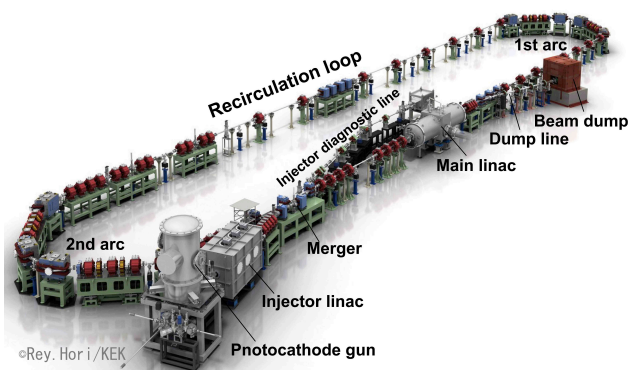


Figure 1: Illustration of the cERL.

Table 1: Parameters of the cERL

Nominal beam energy	35 MeV
Nominal injector energy	5 MeV
Beam current (initial goal)	10 mA
(long-term goal)	100 mA
Normalized emittance	< 1 mm·mrad
RF frequency	1.3 GHz

2. 周回部建設

cERL 周回部は合流部とダンプラインを含めると合計 80 台の電磁石で構成される。その内訳は、2つのアーク部の 45 度偏向電磁石 8 台、四極電磁石 60 台、4 つのシケイン (入射・合流部シケイン、周長補正シケイン、ダンプシケイン) を形成する偏向電磁石 12 台である。全ての四極電磁石は補正コイルを持ち、電源を用意すれば水平・垂直ステアリング電磁石としても機能する。設置に先だてて電磁石の磁場分布及び励磁曲線が測定された^[5]。全ての電磁石にはそれを支持し、なおかつ電磁石の位置や角度を調整できる機構を有する架台 (共通架台もしくは単独架台) が用意された。

これらの 80 台の電磁石と架台の設置では、精密アライメントのために、水平面内位置についてはレーザトラッカー、高さについてはティルティングレベル、水平度については精密水準器をそれぞれ使用した^[6]。電磁石の設置に先立って、加速器室壁面 40 カ所に約 5 m 間隔で Corner Cube Reflector (CCR) 用基準座を基準点として設けた。精密アライメントの結果、最初の電磁石設置における位置と角度の誤差はそれぞれ ± 0.1 mm および ± 0.1 mrad 以内に収まった。図 2 は電磁石アライメント作業の写真である。その後、ビームパイプ設置のために電磁石を半割した後に元に戻す作業を行ったために、設置精度が悪化した。コミッショニングにおいてこれらの誤差による大きな問題はこれまで発生していない。

全ての電磁石用電源は、加速器室の外側にある電磁石システム用スペースに設置された。アーク部の 8 台の 45 度偏向電磁石は直列にコイルが接続されていて、1 台のスイッチング電源 (定格 100 A, 40 V) がこれを励磁する^[7]。一方で、各四極電磁石はステアリング用補正コイルも含めて独立したバイポーラ電源 (定格 ± 5 A, ± 60 V) が励磁する。ステアリング用に水平 38 台 (アーク部偏向電磁石の補正コイル用 8 台を含む)、垂直 37 台が用意された。各シケインでは、電磁石の主コイルは直列に接続されて 1 台の 10 A 電源で、各電磁石の補正コイルは微調整のために別の 5 A 電源で電流を制御する。全ての電磁石電源の電流リップルノイズは 40 ppm 以下である。



Figure 2: Magnet installation and alignment.

ビームダクトの設置は電磁石の半割工程に合わせて行われた。ダクト断面方向の設置精度 (ビーム軸とダクト中心とのずれ) は 0.5 mm 以下である。ビームダクトの材質は SUS316L で、開口形状は直線部が 50 mm の円形、アーク部が水平 70 mm、垂直 40 mm の八角形、ダンプラインが 90 mm ないし 100 mm の円形である。周回部ビームダクトのフランジにはギャップや段差のない特殊フランジを採用した^[8]。約 150 ヶ所にあるこの特殊フランジで真空リークは設置作業において検出されなかった。cERL のビームエネルギーは低く放射光による焼出しが行え

ないため、現場でのベーキングが行えるように電磁石内のビームダクトには厚さ 250 μm のカプトンフィルムヒータを貼付した。同ヒータは非蒸発型ゲッター (NEG) コーティングダクトの活性化 (200 $^{\circ}\text{C}$ で 24 時間) にも利用できる。

主ポンプは NEG ポンプとスパッタイオンポンプ (SIP) であり、特に低い圧力が要求される超伝導空洞周辺のビームダクト内面には厚さ約 1 μm の NEG コーティングを施した。ビーム輸送路に沿った圧力測定は、約 60 台の冷陰極電離真空計 (CCG) と約 50 台の SIP により行う。入射部診断ラインを含めた cERL 全ビーム輸送路は、17 台のゲートバルブにより 18 区間に分かれる。真空インターロックは PLC でのシーケンス制御によって行い、CCG が圧力異常 (1×10^{-5} Pa 以上) を検出した際には当該区間に加え、超伝導空洞両端のセクターバルブを閉じる。真空機器の遠隔操作や監視は EPICS ベースの真空制御システムにより行う。

超伝導空洞はダストの混入により性能が著しく低下する恐れがあるため、前後 2~3 m の区間のビームダクトは細心の注意を払って設置した。予めクラス 10 のクリーンルーム内において全ての真空コンポーネントの他、ボルトや工具類をエアガンで洗浄し、現場の設置作業は移動式クリーンブース内で行った (図 3)。ベーキングおよび NEG 活性化後には、超伝導空洞周辺部と合流部の真空度は 1×10^{-8} Pa 以下にまで到達した。建設スケジュールの都合によりその他の区間ではベーキングは行わず、イオンポンプのみにより到達圧 2×10^{-7} Pa から 1×10^{-6} Pa でビームコミッショニングを迎えた。



Figure 3: Installation of a NEG-coated beam pipe near the SC main linac.

モニタについては、新たに 39 台のストリップラインビーム位置モニタ (BPM) と 24 台のスクリーンモニタが設置された。BPM は加速・減速ビームの通過を考慮して、1.3 GHz、2.6 GHz に最大感度を持つ 2 種類の磁極長のものを適所に配備し、電極フィードスルーには低誘電率ガラスを用いて高速の時間応答に対応させた^[9]。検波回路にはダイナミックレンジの広いログ検波方式を採用した。各スクリーンモニタでは Ce:YAG と OTR のためのアルミ

ニウムの 2 種類のスクリーンを選んで使用できる。可動ファラデーカップ (FC) は水冷された銅ブロックで製作され、入射ビームと合流する前の周回ビームの電流を測定できる。グリッドコップで作られた主ビームダンプはダンプラインの最後尾に設置され、40 kW までの電子ビームパワーに耐えられる。また、FC としてエネルギー回収後のビーム電流測定にも使用する。非破壊型の電流測定モニタとしては、CT と DCCT を配置した。この他、電子ビームのハローを削ってビームロス出局在化させるために、入射直線部の他に、合流部、北直線部、第 1 及び第 2 アーク部に 4 つの水平・垂直コリメータが新たに設置された。機器保護用インターロックとして開発中の高速ロスモニタ^[10]も試験的に導入する。

クライオモジュールに組み込まれた主超伝導加速空洞^[11]は、2012 年に既に加速器室内の所定の位置に設置された。今回の周回部建設において、主空洞クライオモジュールの両端は隣接する真空パイプと連結された。主空洞の RF 源として、30 kW IOT と 16 kW の半導体増幅器を当初は使用したが、より高い安定性を確保するために 2014 年 1 月に IOT を 8-kW の半導体増幅器に置き換えた^[12]。FPGA をベースとしたデジタル LLRF システムが RF システムの制御と安定化のために用意された^[13]。主空洞は 2012 年に一度冷却試験が行われたが、コミッショニング前に再び冷却されてビーム運転に向けての調整・試験が行われた。これはデジタルフィードバック系の立ち上げ・調整が主な目的であり、加速電圧の振幅・位相制御ならびにピエゾチューナーによる周波数制御を確立した。クライオモジュール内の空洞位置の測量も行われ、どちらの空洞も冷却前後での変化は 0.4 mm 以内に収まっていることが確認された^[14]。

図 4 は建設完了後の cERL の写真である。

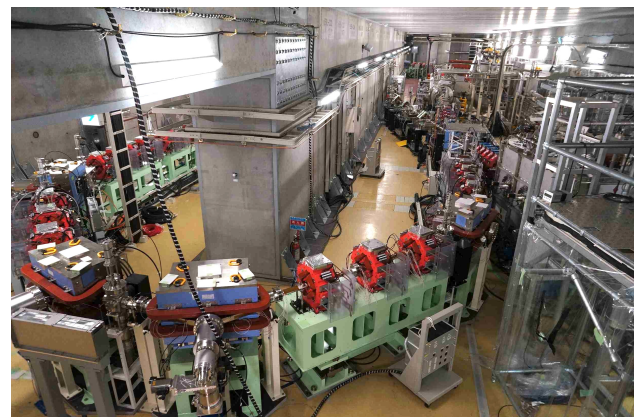


Figure 4: cERL constructed in the accelerator room.

3. ビームコミッショニング

建設された周回部を含む cERL 全体のコミッショニングは、超伝導空洞の冷却・立ち上げ後の 2013 年 12 月 16 日から開始された。コミッショニングの間、主空洞の各加速電圧はフィールドエミッションによる放射線レベルを抑えるために 8.3 - 8.6 MV と

し、入射エネルギーは 2.9 - 3.4 MeV として電子ビームの全エネルギーが約 20 MeV になるように設定された。コミッショニングにおけるビーム調整は通常スクリーンモニターを利用するために、100 ns - 1 μs 幅のマクロパルスを生成する低電流のバーストモード運転にて行った。コミッショニング開始して1週間以内にビームは目標の 20 MeV までの加速に成功し、周回部を経てダンプレインの入口付近まで輸送できた。図 5 はコミッショニング時の cERL コントロール室の写真である。

2014 年 1 月の短いシャットダウン期間中にビームダクトに沿った磁場測定を行った結果、真空度の計測に使う CCG 磁石の磁場が特に加速前や減速後の低エネルギービームの軌道やプロファイルに少なからず影響を及ぼしていることがわかった。また、入射シケインやダンプレインの一部の偏向電磁石の漏れ磁場が隣接する入射部やダンプレインのビームに影響することもこの磁場測定で確認できた。そこで、ビーム調整をよりしやすくするために、これらの有害な磁場の多くを遮蔽するもしくはそれらの磁場源を取り除く作業を行った。その結果として、ビームを以前よりも容易に周回・減速できるように、2 月 6 日にはほとんどロスなしでビームダンプまで輸送できた。図 6 に測定されたビームプロファイルとビーム電流を他のパラメータと共に示す。この時、減速ビームをダンプへと導くダンプレインの偏向電磁石の磁場は入射ビームと同じエネ

ルギーを仮定して設定された。観測された減速ビームの水平位置はダンプレイン入口のスクリーンモニターの中央に観測され、減速ビームのエネルギーが入射エネルギーとほぼ等しいことがわかった。これは、cERL がエネルギー回収に成功したことを意味する。測定された電流も電子銃直後 (Gun FC) とダンプ (Dump FC) ではほぼ同じで、ロスがほとんどないことがわかる。なお、ビームコミッショニングにおけるビーム調整方法等の詳細については別の報告で詳しく述べられている^[15]。



Figure 5: cERL control room in the commissioning

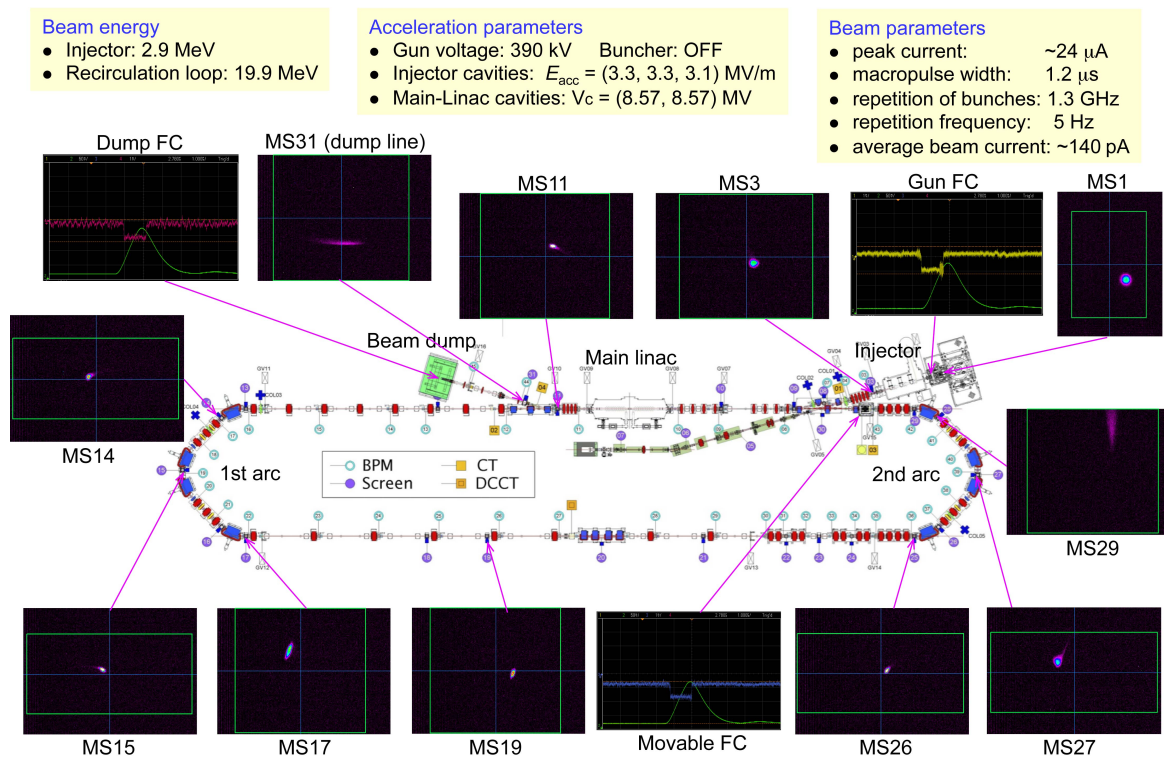


Figure 6: Electron beam profiles at the screen monitors (MS1-31) and beam currents at the Faraday cups (FCs) on February 6 2014, when the decelerated beam in the main linac was transported to the beam dump and the energy recovery was achieved. The beam was clearly observed around the horizontal center position of MS31 at the entrance of the dump line. The beam current measured at the dump FC was almost the same as that at the gun FC.

3月7日には施設検査（申請出力：35 MeV, 10 μ A）が行われ、放射線レベルやインターロック等の検査に無事に合格することができた^{[16][17][18]}。その後、コミッシュニングにおいてさらにビーム調整が進んだ結果、ビーム品質がさらに改善されると共に、2013年度の最後の運転日（2014年3月14日）にCW運転で最大平均電流 6.5 μ A を記録した。2014年5-6月にも約4週間に渡ってcERLは運転され、ビームオプティクスやパラメータ測定のスタディ^[15]、2014年度末に予定しているレーザーコンプトン散乱X線発生のための予備実験、7.7 pC/bunchの高バンチ電荷運転^[19]などが行われた。

4. 利用実験計画

cERLに関して2つの利用実験が計画されている。1つはレーザーコンプトン散乱(LCS)X線発生実験で、上述したように2014年度末に予定されている^[20]。LCS実験用に南直線部に既に8台の四極電磁石が設置され、それを利用して20-30 μ mサイズのレーザービームと効率的に衝突できるように電子ビームを衝突点で極めて小さく絞るLCS専用のオプティクスが用意される^[21]。現在製作中のレーザー共振器^[22]はこの電磁石部の中央に置かれることになる。発生したX線は専用ビームラインを経て加速器室外の実験ハッチ（2014年建設予定）に導かれる。

もう1つはコヒーレントテラヘルツ(THz-CSR)光の発生実験で2015年度からその準備が開始される予定である。第2アーク部の第1偏向電磁石で発生したTHz光はやはり専用のビームラインを経てLCS実験とは別の実験ハッチへと導かれる予定である。第1アークに新たに六極電磁石を追加してバンチ圧縮オプティクスを適用することで100 fs程度の超短バンチの発生が可能になる^[21]。

5. まとめ

cERLは2013年11月に周回部の建設が完了し、12月からそのコミッシュニングが始まった。既に20 MeVまでのビーム加速・周回とエネルギー回収に成功した。CW運転で最大電流6.5 μ Aのビーム周回も達成した。今後は、ビームオプティクスの改善やビームロスの低減を図り、遮蔽の効率的な増強も適宜行いつつ、最大電流を段階的に数年かけて10 mAまで上げていく。また、高バンチ電荷運転を行い、当面の目標である7.7 pC/bunch (CW運転で10 mA)で規格化エミッタンス1 mm-mrad以下のビームを実現する。さらに、LCSX線発生実験とTHz-CSR光発生実験の2つの利用実験が計画されている。特に前者については2014年度末の実験に向けてレーザー共振器などの実験設備の製作あるいは準備が進行中であり、予備実験もcERLを使って行われた。

参考文献

[1] R. Hajima et al. (eds.), "Design study of the Compact ERL", KEK Report 2007-7/ JAEA-Research 2008-032, February 2008.

- [2] N. Nakamura, "Review of ERL Projects at KEK and around the World", IPAC12, New Orleans, May 2012, p.1041.
- [3] K. Haga et al., "Design and construction of cERL accelerator shielding", these proceedings.
- [4] S. Sakanaka et al., "Construction and Commissioning of the Compact ERL Injector at KEK", ERL13, Novosibirsk, September 2013, p.16
- [5] K. Harada, et al., "Magnetic Measurement of cERL and DR", these proceedings.
- [6] T. Kume et al., "Magnet Alignment for the cERL Recirculation Loop", these proceedings.
- [7] K. Harada, et al., "The Power Supply System for the compact ERL", these proceedings.
- [8] Y. Tanimoto et al., "Design of the cERL Vacuum System", IPAC13, Shanghai, May 2013, p. 3315.
- [9] R. Takai et al., "Development of Beam Position Monitors and Screen Monitors for Compact ERL", the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 2013, p.1111.
- [10] H. Sagehashi et al., "Test of detection unit of the cERL high-speed loss monitor", these proceedings.
- [11] K. Umemori et al., "Operation Status of Compact ERL Main Linac Cryomodule", IPAC14, Dresden, June 2014, p.286.
- [12] T. Miura et al., "Performance of RF System for Compact-ERL Main Linac at KEK", IPAC14, Dresden, June 2014, p.2450.
- [13] F. Qiu et al., "Performance of the Digital LLRF System at the cERL", IPAC14, Dresden, June 2014, p.2447.
- [14] H. Sakai et al., "Improvement of the position monitor using white light interferometer for measuring precise movement of Compact ERL superconducting cavities in cryomodule", IPAC14, Dresden, June 2014, p.286.
- [15] M. Shimada et al., "Beam Commissioning of Compact ERL", these proceedings.
- [16] H. Matsumura et al., "Design for the Radiation Protection of the Compact ERL for Recirculating Loop Addition in the ERL Test Facility", KEK Internal 2013-6, September 2013.
- [17] K. Haga et al., "Design for the radiation protection of the cERL", these proceedings.
- [18] K. Nigorikawa and S. Nagahashi, "Personnel protect system of cERL", these proceedings.
- [19] T. Miyajima et al., "Transportation of 7.7 pC/bunch electron beam in compact ERL recirculation loop", these proceedings.
- [20] R. Nagai et al., "Construction of a Laser Compton Scattered Photon Source at cERL", IPAC14, Dresden, June 2014, p.1940.
- [21] N. Nakamura et al., "Optics Design of the Compact ERL Recirculation Loop", the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, August 2013, p.456.
- [22] T. Akagi et al., "Development of an optical resonant cavity for the LCS experiment at cERL", IPAC14, Dresden, June 2014, p.2072.