

## コンパクト ERL 入射部の建設と周回部の建設状況

### CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF CERL INJECTOR AND STATUS OF CERL RETURN LOOP

坂中章悟<sup>#, A)</sup>, 足立伸一<sup>A)</sup>, 明本光生<sup>A)</sup>, 荒川大<sup>A)</sup>, 浅岡聖二<sup>A)</sup>, 江並和宏<sup>A)</sup>, 遠藤有聲<sup>A)</sup>, 福田茂樹<sup>A)</sup>, 古屋貴章<sup>A)</sup>, 芳賀開一<sup>A)</sup>, 原和文<sup>A)</sup>, 原田健太郎<sup>A)</sup>, 本田融<sup>A)</sup>, 本田洋介<sup>A)</sup>, 本間博幸<sup>A)</sup>, 本間輝也<sup>A)</sup>, 細山謙二<sup>A)</sup>, 穂積憲一<sup>A)</sup>, 石井篤<sup>A)</sup>, 加古永治<sup>A)</sup>, 神谷幸秀<sup>A)</sup>, 片桐広明<sup>A)</sup>, 河田洋<sup>A)</sup>, 小林幸則<sup>A)</sup>, 小島裕二<sup>A)</sup>, 近藤良也<sup>A)</sup>, 久米達哉<sup>A)</sup>, 松本利広<sup>A)</sup>, 松村宏<sup>A)</sup>, 松下英樹<sup>A)</sup>, 道園真一郎<sup>A)</sup>, 三浦孝子<sup>A)</sup>, 宮島司<sup>A)</sup>, 長橋進也<sup>A)</sup>, 仲井浩孝<sup>A)</sup>, 中島啓光<sup>A)</sup>, 中村典雄<sup>A)</sup>, 中西功太<sup>A)</sup>, 中尾克己<sup>A)</sup>, 濁川和幸<sup>A)</sup>, 野上隆史<sup>A)</sup>, 野口修一<sup>A)</sup>, 野澤俊介<sup>A)</sup>, 帯名崇<sup>A)</sup>, 尾崎俊幸<sup>A)</sup>, Qiu Feng<sup>A)</sup>, 阪井寛志<sup>A)</sup>, 佐々木慎一<sup>A)</sup>, 下ヶ橋秀典<sup>A)</sup>, 佐藤康太郎<sup>A)</sup>, 佐藤昌史<sup>A)</sup>, 設楽哲夫<sup>A)</sup>, 島田美帆<sup>A)</sup>, 篠江憲治<sup>A)</sup>, 塩屋達郎<sup>A)</sup>, 宍戸寿郎<sup>A)</sup>, 多田野幹人<sup>A)</sup>, 高橋毅<sup>A)</sup>, 高井良太<sup>A)</sup>, 竹中たてる<sup>A)</sup>, 谷本育律<sup>A)</sup>, 飛山真理<sup>A)</sup>, 土屋公央<sup>A)</sup>, 内山隆司<sup>A)</sup>, 上田明<sup>A)</sup>, 梅森健成<sup>A)</sup>, 渡邊謙<sup>A)</sup>, 山本将博<sup>A)</sup>, 山本康史<sup>A)</sup>, 矢野喜治<sup>A)</sup>, 吉田光宏<sup>A)</sup>, Cenni Enrico<sup>B)</sup>, 高木宏之<sup>C)</sup>, 羽島 良一<sup>D)</sup>, 松葉俊哉<sup>D)</sup>, 永井良治<sup>D)</sup>, 西森信行<sup>D)</sup>, 沢村勝<sup>D)</sup>, 静間俊行<sup>D)</sup>, 栗木雅夫<sup>E)</sup>, 飯島北斗<sup>E)</sup>

Shogo Sakanaka<sup>#, A)</sup>, Shinichi Adachi<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Seiji Asaoka<sup>A)</sup>, Kazuhiro Enami<sup>A)</sup>, Kuninori Endo<sup>A)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>, Takaaki Furuya<sup>A)</sup>, Kaiichi Haga<sup>A)</sup>, Kazufumi Hara<sup>A)</sup>, Kentaro Harada<sup>A)</sup>, Tohru Honda<sup>A)</sup>, Yosuke Honda<sup>A)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>A)</sup>, Teruya Honma<sup>A)</sup>, Kenji Hosoyama<sup>A)</sup>, Ken-ichi Hozumi<sup>A)</sup>, Atsushi Ishii<sup>A)</sup>, Eiji Kako<sup>A)</sup>, Yukihide Kamiya<sup>A)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>, Hiroshi Kawata<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>A)</sup>, Yuuji Kojima<sup>A)</sup>, Yoshinari Kondou<sup>A)</sup>, Tatsuya Kume<sup>A)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumura<sup>A)</sup>, Hideki Matsushita<sup>A)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>, Takako Miura<sup>A)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>, Hirotaka Nakai<sup>A)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Kota Nakanishi<sup>A)</sup>, Katsumi Nakao<sup>A)</sup>, Kazuyuki Nigorikawa<sup>A)</sup>, Takashi Nogami<sup>A)</sup>, Shuichi Noguchi<sup>A)</sup>, Shunsuke Nozawa<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Toshiyuki Ozaki<sup>A)</sup>, Feng Qiu<sup>A)</sup>, Hiroshi Sakai<sup>A)</sup>, Shinichi Sasaki<sup>A)</sup>, Hidenori Sagehashi<sup>A)</sup>, Kotaro Satoh<sup>A)</sup>, Masato Satoh<sup>A)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>A)</sup>, Miho Shimada<sup>A)</sup>, Kenji Shinoe<sup>A)</sup>, Tatsuro Shioya<sup>A)</sup>, Toshio Shishido<sup>A)</sup>, Mikito Tadano<sup>A)</sup>, Takeshi Takahashi<sup>A)</sup>, Ryota Takai<sup>A)</sup>, Tateru Takenaka<sup>A)</sup>, Yasunori Tanimoto<sup>A)</sup>, Makoto Tobiyama<sup>A)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>A)</sup>, Takashi Uchiyama<sup>A)</sup>, Akira Ueda<sup>A)</sup>, Kensei Umemori<sup>A)</sup>, Ken Watanabe<sup>A)</sup>, Masahiro Yamamoto<sup>A)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>A)</sup>, Yoshiharu Yano<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>A)</sup>, Enrico Cenni<sup>B)</sup>, Hiroyuki Takaki<sup>C)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>D)</sup>, Shunya Matsuba<sup>D)</sup>, Ryoji Nagai<sup>D)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>D)</sup>, Masaru Sawamura<sup>D)</sup>, Toshiyuki Shizuma<sup>D)</sup>, Masao Kuriki<sup>E)</sup>, Hokuto Iijima<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Sokendai, the Graduate University for Advanced Studies

<sup>C)</sup> University of Tokyo (ISSP/SRL) Institute for Solid State Physics Synchrotron Radiation Lab.

<sup>D)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>E)</sup> Hiroshima University (HU/AdSM) Graduate School of Advanced Sciences of Matter Department of Quantum Matter

#### Abstract

The Compact Energy Recovery Linac (cERL) is under construction at KEK for the future 3-GeV ERL project. During the past year, we have finished key devices, such as a 500-kV DC photocathode electron gun and superconducting (SC) cryomodules for the injector and for the main linac. We installed these devices into a shielding room of the cERL, and carried out high-voltage or high-power tests successfully. In the April of 2013, the 5-MeV injector of the cERL was completed. During April to June in 2013, we commissioned the cERL-injector successfully, and carried out beam tuning and studies. During July to November, 2013, we will construct the return loop of the cERL.

#### 1. はじめに

KEK は 3 GeV エネルギー回収型リニアック

<sup>#</sup> shogo.sakanaka@kek.jp

(ERL) を将来建設し、共同利用研究のために運転する事を目指している<sup>[1, 2]</sup>。3 GeV ERL のための加速器技術の確立を目指し、コンパクト ERL (cERL) を建設中である。コンパクト ERL では、ERL 放射光源に必要とされる、低エミッタンスかつ

大電流の電子ビームの生成、加速、およびビーム周回を実証する予定である。コンパクト ERL の設計パラメータを Table 1 に、配置計画図を Figure 1 に示す。

Table 1: Design Parameters of the Compact ERL

Beam energy (injector)	5 MeV
(return loop)	35 MeV
Beam current (initial goal)	10 mA
(future goal)	100 mA
Normalized beam emittance	< 1 mm-mrad
(at 7.7 pC/bunch)	
RMS bunch length (usual)	1-3 ps
(with compression)	< 150 fs
RF frequency	1.3 GHz

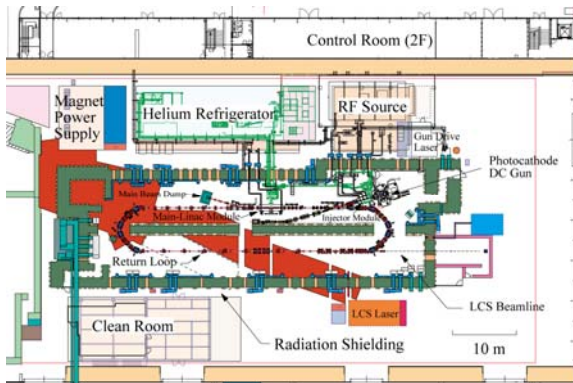


Figure 1: Design layout of the Compact ERL.

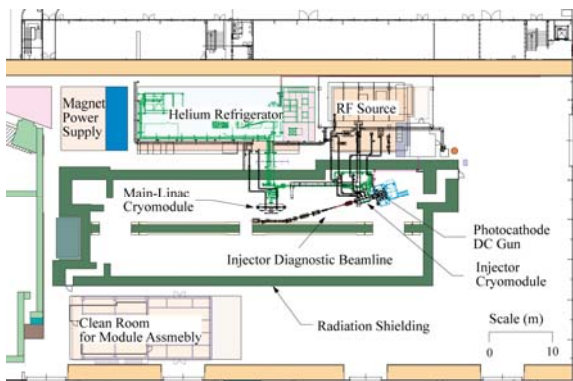


Figure 2: Layout of cERL in April, 2013.

コンパクト ERL は、入射部、主リニアック、およびエネルギー回収のためのビーム周回部で構成される。cERL 入射部では、バンチの繰り返し周波数 1.3 GHz (CW) の高輝度電子ビームを 500 kV 光陰極直流電子銃を用いて生成し、バンチャー空洞でバンチを圧縮した後、入射器超伝導空洞で約 5 MeV まで加速する。ビームは合流部を通じて周回部に入射され、主リニアックで約 35 MeV まで加速された後、周回部を 1 周して主リニアックに戻される。ビームは主リニアックで約 5 MeV まで減速された後、

ビームダンプに入る。コンパクト ERL では、ERL 放射光源に必要な要素技術をほぼ全て試験する事ができる。コンパクト ERL では、過去 1 年間に次のような進展があった：

- コンパクト ERL を設置する放射線シールド (コンパクト ERL 加速器室) を建設
  - JAEA 第 1 電子銃でのビーム生成に成功し<sup>[3,4]</sup>、cERL への移設を完了。第 2 電子銃も開発中<sup>[5]</sup>。
  - 電子銃励起用レーザーシステムを開発し<sup>[6]</sup>、cERL レーザー室に設置
  - 入射器空洞<sup>[7]</sup>モジュールが完成し、cERL に設置後、大電力試験に成功<sup>[8]</sup>
  - 主加速空洞モジュールが完成し、cERL に設置後、大電力試験に成功<sup>[9,10]</sup>
  - 入射器、ビーム診断ライン、入射部ビームダンプから成るコンパクト ERL 入射部が 2013 年 4 月に完成。配置図を Figure 2 に示す。
  - 冷凍機システム、入射器用 RF システム<sup>[11]</sup>、制御システム等が完成
  - 2013 年 4 月から 6 月まで cERL 入射部のコミッションを行い<sup>[12]</sup>、ビームエネルギー約 5.6 MeV、ビーム電流約 300 nA までのビーム運転に成功。入射器からのビームの性能 (ビームエミッタンス、バンチ長等) を評価<sup>[13,14]</sup>
  - 2013 年 7 月より、主リニアックを含むビーム周回部<sup>[15]</sup>を建設中
- 本稿では、cERL の進捗状況について述べる。

## 2. コンパクト ERL 入射部の建設

コンパクト ERL を設置する加速器室を 2012 年 3 月から 9 月にかけて KEK ERL 開発棟内に建設した。コンパクト ERL 加速器室は、加速器から発生する放射線を遮蔽する鉄筋コンクリート製ブロックから成り、横壁の厚さが 1.5 m、天井の厚さが 1 m ある。床面積約 60 m×20 m を占める。加速器室内の空調、換気、照明、排水の各設備も設置した。加速器室の外観を Figure 3 に示す。



Figure 3: Members of the ERL team in front of the cERL accelerator room.

高輝度電子ビームを生成する 500 kV 光陰極直流電子銃は、1 号機 (第 1 電子銃) が原子力機構が開

発された。移設前の 2012 年 10 月に JAEA において、カソード電圧 500 kV で 1.8 mA のビーム生成に成功した<sup>[3,4]</sup>。また印加電圧 180 kV で 10 mA のビーム生成にも成功した。その後、2012 年 10 月からコンパクト ERL への移設を開始した。cERL での組立後、カソード印加電圧約 410 kV までのコンディショニングを行い、印加電圧 390 kV でビーム運転に使用している。印加電圧が移設前に比べてやや下がった理由は、分割型セラミックの最上段と最下段に汚れによると見られる耐圧低下が発生したため、今後研磨により耐圧回復を試みる予定である。コンパクト ERL に設置された第 1 電子銃を Figure 4 に示す。



Figure 4: Injector of the Compact ERL including the photocathode DC gun and an injector cryomodule.

電子銃の光陰極を励起するためのレーザーシステムは、繰り返し 1.3 GHz (CW)、波長 532 nm、大電力 (ビーム電流 10 mA、カソード量子効率 1% の場合、平均電力約 2.3 W が必要) の光パルス安定して発生する必要がある。繰り返し 1.3 GHz の CW ビームが基本であるが、マシンスタディではビームのマクロパルス運転も必要である。これらが可能なレーザーシステムを開発した<sup>[6]</sup>。これを cERL 加速器室横のレーザーハット内に設置し、光陰極電子銃までレーザー光を輸送した。

第 1 電子銃を運転に使用している間にも電子銃の開発を進めるため、第 2 電子銃<sup>[5]</sup>を KEK で開発している。電子銃チャンバーと 600 kV 高圧電源が完成し、AR 南棟の電子銃開発エリアにおいて高電圧印加試験を行っている。

電子銃からのビームは、入射器空洞モジュールで約 5 MeV まで前段加速される。入射器空洞では、最大電流 10 mA (将来は 100 mA) のビームをエネルギー回収なしで加速する必要があり、大電力入力カップラーの開発が課題の一つである。また、超伝導空洞に RF を連続的 (CW) に投入するため、高次モード (HOM) カップラーの発熱対策も重要である。入射器空洞モジュールには、2 セル超伝導空洞<sup>[7]</sup>が 3 台収納され、各空洞当たり、入力カップラー 2 個と高次モードカップラー 5 個を備えている。

2012 年 4 月より、2 台の 2 セル空洞、入力カップラー、高次モードカップラー等を ERL 開発棟内のクリーンルームで組み立て、クライオスタットへの

組み込みを行った。完成したクライオモジュールを 2012 年 6 月に cERL に設置し、7 月に 2K コールドボックスと接続した。8 月に高圧ガス完成検査を受け、冷却可能になった。設置後の入射器空洞モジュールを Figure 4 (図の左側) に示す。

入射器空洞の冷却および低電力での特性測定を 2012 年 9 月と 2013 年 1 月に行った。冷却時の共振周波数変化、機械式およびピエゾチューナーの動作試験、2 個のカップラー間の位相調整、Q 値の測定等を行い、良好な結果を得た。続いて 2013 年 2 月に大電力試験を行った<sup>[8]</sup>。3 台の空洞全てについて、RF のデューティー比 10% の場合に 15 MV/m、CW 運転時に 8 MV/m の加速電界が発生できることを確認し、cERL の運転に必要な性能を達成した。2 セル空洞本体の性能としては、15 MV/m 以上の高加速電界で運転できる。一方、HOM カップラーのフィードスルーでの発熱が予想より大きく、CW 運転で加速勾配を上げると HOM カップラー周辺での超伝導状態が破れ、ヘリウム消費量が大きくなることが判明した。ただし、クエンチは局所的に留まっており、空洞本体は超伝導状態に保たれている。後述する cERL 入射部のビーム運転では、加速勾配  $E_{acc} = 7.1$  MV/m (CW) で長時間安定に運転できた。

電子銃と入射器空洞の間の約 1.1 m の区間には、レーザー導入チャンバー、バンチャー空洞、スクリーンチャンバー、2 台のソレノイド電磁石等を設置した。バンチャー空洞は無酸素銅製の 1.3 GHz 単セル空洞で、(光速電子に対して) 最大加速電圧約 190 kV を発生できる。この区間は、電子銃のカソード劣化を避けるために極高真空仕様での設計、製作、ベーキングを行い、ビーム運転中で約  $2 \times 10^{-9}$  Pa の圧力を達成した。この区間の主要なチャンバーはクリーンルーム内で組み立て、現場に簡易クリーンブースを設置して組み込んだ。

入射器空洞モジュールの下流に、加速した電子ビームのエミッタンス、バンチ長、エネルギー幅等を評価するための入射器診断ビームラインを設置した。入射器コミッション時には、これらの診断装置を用いてビーム特性の評価を行った<sup>[13,14]</sup>。入射器診断ラインを Figure 5 に示す。



Figure 5: Diagnostic beamline for the cERL injector.

入射部用の 1.3 GHz RF 源<sup>[11]</sup>として、300 kW クライストロンを 1 台、25 kW クライストロンを 1 台、

20 kW IOT を 1 台設置した。高精度で RF 電圧を安定化するため、FPGA を用いたデジタルローレベルシステムを開発し、使用している。大電力 RF は、RF 源から WR650 導波管を用いて加速器室内に導入した。入射器近傍には、電子銃、2K コールドボックス、入射器空洞モジュール、レーザー光路等が密集して設置されており、導波管系はそれらを避けて設置する必要があった。これらの機器配置は、3 次元 CAD を用いて設計した。

cERL の冷凍機システムは、液化冷凍機 TCF200、圧縮機、精製器、液体ヘリウム貯槽、減圧排気ポンプ系、2 台の 2K コールドボックス、回収圧縮機等から成る。2K コールドボックス内に溜めた液体ヘリウムを減圧排気し、それに連結された超伝導空洞に 2K 液体ヘリウムを供給する。8 組の減圧排気ポンプが設置されており、絶対温度 2K において 80 W までの熱負荷に対応できる。液化冷凍機は、ヘリウム液化率 250 リットル/時の能力を有する。冷凍機システムを Figure 6 に示す。



Figure 6: Helium refrigerator system for cERL.

cERL 主リニアックで用いられる主空洞モジュールには、2 台の 9 セル超伝導空洞、高次モードを吸収するためのフェライト吸収体、ベローズモジュール、入力カップラー等が収納される。2012 年 8 月から 10 月にかけて、主要部分をクリーンルーム内で組み立て、連結された空洞ストリングをクライオモジュールに組み込んだ。完成したモジュールを 10 月に cERL に設置し、2K コールドボックスとの接続を行い、高圧ガス完成検査を受けた。設置された主空洞モジュールを Figure 7 に示す。

2012 年 11 月から 12 月にかけて、主空洞モジュールの冷却、低電力、および大電力試験を行った<sup>[9,10]</sup>。大電力試験の結果、2 台の空洞はどちらも、1 台あたり 13.5–14 MV の加速電圧を 1 時間以上保持する事ができ、cERL で使用出来ることが判った。ただし、空洞からの field emission は期待したより低い加速電圧 8-10 MV 程度から出始めた。これらの結果より、主空洞モジュールは、空洞 1 台当たりの加速電圧約 10 MV (加速勾配約 10 MV/m) でコンパクト ERL に使用可能である。一方、ERL 放射光源で目指している 15 MV/m で使用するためにはまだ性能不足で、空洞組立時の塵の混入を防ぐ等の R&D をさらに進める必要がある。他方で、ERL 放

射光源の設計において加速勾配をやや下げる設計変更も選択肢として検討している。

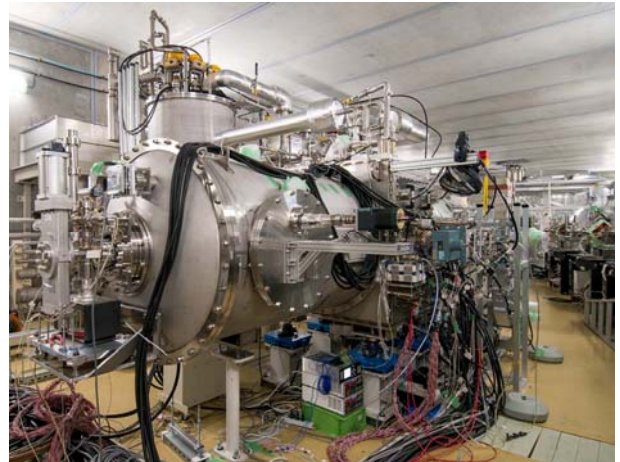


Figure 7: Main-linac cryomodule.

2013 年 4 月に、cERL 入射部の本体と共に、放射線安全システムや EPICS ベースの制御システムが完成した。文部科学省への放射線申請については、2012 年 12 月にコンパクト ERL 入射部 (最大ビームエネルギー 6 MeV、最大出力 6 MeV $\cdot\mu$ A)<sup>[16]</sup>を申請し、2013 年 3 月に承認された。これを受け、KEK 内での放射線主任者検査を受け、2013 年 4 月 22 日から cERL 入射部のビーム調整運転を開始した。

### 3. cERL 入射部のコミッショニング<sup>[12]</sup>

cERL 入射部の初期調整では、主にスクリーンモニターを用いてビーム診断を行った。このため、励起レーザーにゲートをかけ<sup>[6]</sup>、電子銃からマクロパルスのビームを出力した。典型的なビームパルスは、マクロパルス幅 1  $\mu$ s、マクロパルスの繰り返し 5 Hz、マクロパルス内のバンチ数 1300 (繰り返し 1.3 GHz)、ビームの平均電流 150 pA、バンチ当たりの電荷約 23 fC である。電子銃のカソード電圧は 390 kV を用いた。

4 月 22 日から 26 日までの運転で、電子銃から 390 keV ビームを生成し、入射器加速空洞で約 5.6 MeV の運動エネルギーまで加速に成功し、加速されたビームを入射部ビームダンプまでほぼ損失なく導いた。さらにビームのマクロパルス幅を 1.6 ms まで伸ばすことでビーム電流を約 200 nA まで上げることに成功し、連休に入った。連休明けの 5 月 13 日から運転を再開し、放射線サーベイ等を行った上で、5 月 23 日に原子力安全技術センターによる施設検査を受け、27 日付けで合格した。施設検査では、ビームエネルギー約 5.6 MeV、ビーム電流約 300 nA で運転した。放射線レベルは、cERL 加速器室外でバックグラウンドレベル、加速器のすぐ横でも最大約 400  $\mu$ Sv/h であり、ビームは低い損失でダンプまで輸送できている。

施設検査後の 5 月 24 日から 6 月 7 日までは、主に低バンチ電荷でのビーム性能の評価を行った。電子銃からの 390 keV ビームのエミッタンスをソレノイドスキャン法で測定した結果、バンチ電荷約 10

fC/bunch 程度の場合、規格化エミッタンス  $\varepsilon_n = 0.070 \pm 0.007$  mm-mrad の結果を得た<sup>[13]</sup>。これは、カソードの熱エミッタンスから期待される値に近い。

ビームを運動エネルギー 5.6 MeV まで加速した後のビームエミッタンスは、スリットスキャン法とウェストスキャン法で測定した。低バンチ電荷において、規格化エミッタンス  $\varepsilon_n = 0.195 \pm 0.005$  mm-mrad の結果を得た<sup>[13]</sup>。加速後は多少のエミッタンス増大が見られるが、今後さらにビーム調整を進め、より低エミッタンスを目指す。縦方向位相空間でのビーム特性も評価した<sup>[14]</sup>。

2013 年 6 月 11 日から 6 月 28 日までは、励起レーザーのピーク強度を上げ、バンチ大電荷 (7.7 pC/bunch 以下) でのビーム性能の評価を行った。バンチ電荷を上げると、空間電荷効果が重要となるため、ビームエミッタンスはレーザーパルス幅にも依存する。スタディ中のレーザーパルスとしては、ガウス型短パルスモード (3 ps rms) と、パルス整形モード (比較的平坦な時間構造で、FWMH 幅 16 ps) の 2 通りを用いた。今のところ、加速後 (約 5.6 MeV) のバンチ電荷 7.7 pC/bunch での規格化エミッタンスとして、 $\varepsilon_n \approx 0.8$  mm-mrad 程度の値が得られている<sup>[13]</sup>。cERL の初期目標である規格化エミッタンス 1 mm-mrad (@7.7 pC/bunch) は一応達成した。今後、空間電荷効果、バンチャー空洞と入射器空洞の電磁場による影響、バンチ長の影響等を詳しく理解し、ビームシミュレーションで得られている 0.2-0.3 mm-mrad 程度の規格化エミッタンスを目指して性能向上を行う予定である。

4 月 22 日から 6 月 28 日まで cERL 入射部を運転し、運転当初はハードウェアの初期故障によるトラブルもあったが、全般的には非常に安定に運転できた。特に、光陰極直流電子銃と入射器超伝導空洞は非常に安定であった。電子銃では、放電による運転中断は 1 度だけであった。6 月 21 日に 1 度だけ起きた放電では、バンチャー空洞の電圧をやや高めにした時に、電子銃下部に設置した放射線モニターのレベルが閾値 20  $\mu$ Sv/h を超え、電子銃の高電圧が停止された。バンチャー内で小規模な放電が起き、電子銃の放電を誘発したものと推測し、バンチャー空洞のエイジングを十分行うことにしたところ、再発していない。入射器超伝導空洞に関しては、空洞が原因による運転中断はほぼ無かった。

#### 4. 周回部の建設と今後の予定

2013 年 7 月から cERL 入射部の運転は一旦終了し、主リニアックを含む周回部<sup>[15]</sup>の建設を行っている。周回部の電磁石、架台、真空チェンバー、ビームモニター<sup>[17]</sup>等の製作が完了した。2013 年 7 月末現在で、周回部の電磁石等を設置するための床への罫書き作業が終了し、ベースプレートや架台を設置するためのアンカー打設作業を行っている。8 月から電磁石用ベースプレートと架台の設置、電磁石設置、電磁石アラインメント、真空チェンバーの設置、ケーブル配線、追加遮蔽の設置、安全システムの入替え等を順次行う予定である。現時点では、2013

年 11 月半ばから主空洞および入射器空洞のコンディショニングと試験を行い、12 月中旬に cERL 周回部のコミッショニングを開始する予定である。放射線申請については、周回部を含むコンパクト ERL (最大ビームエネルギー 35 MeV、最大出力 350 MeV- $\mu$ A) の申請を原子力規制庁に申請中である。大電流での運転で重要なビーム損失量に関するデータを得るため、当初は最大電流 10  $\mu$ A 程度で cERL の運転を開始し、2~3 回の変更申請を経てビーム電流 10 mA を実現する予定である。

2014 年度には、cERL 南直線部にレーザーコンプトン散乱 (LCS) 用レーザー共振器を設置し、発生する X 線を利用するビームラインと実験室を設置する予定である。この実験は、文部科学省の核セキュリティ強化等推進事業補助金を受けて JAEA が中心となって行う。

コンパクト ERL では、短パルスビームから強力なコヒーレント・テラヘルツ光を発生することが可能で、テラヘルツ光源としても非常に期待されている。テラヘルツ用ビームラインを整備し、利用する計画も急速に進める予定である。

#### 参考文献

- [1] “KEK ロードマップ 2013”, 平成 25 年 5 月 24 日, <http://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/>
- [2] N. Nakamura, “Review of ERL Projects at KEK and Around the World”, IPAC2012, p. 1040.
- [3] N. Nishimori et al., Appl. Phys. Lett. **102**, 234103 (2013).
- [4] 西森信行, 他, “光陰極直流電子銃から 500keV-mA 電子ビームの生成”, these proceedings, MOOT03.
- [5] 山本将博, 他, “ERL 第二電子銃の開発状況”, these proceedings, SUP034.
- [6] 本田洋介, 他, “ERL 試験加速器研究施設入射部における光陰極電子銃用レーザーシステムの開発”, these proceedings, SAP107.
- [7] K. Watanabe et al., “Development of the superconducting rf 2-cell cavity for cERL injector at KEK”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Research A **714** (2013) 67.
- [8] E. Kako et al., “High-Power Test of Injector Cryomodule for Compact-ERL”, IPAC2013, p. 2340.
- [9] 梅森健成, 他, “ERL 主加速部超伝導空洞の開発”, these proceedings, SUP042.
- [10] 阪井寛志, 他, “Compact ERL 主加速部超伝導空洞クライオモジュールのハイパワーテスト”, these proceedings, MOOT09.
- [11] 三浦孝子, 他, “cERL 入射器の高周波システム”, these proceedings, SUP051.
- [12] 宮島司, “compact ERL 入射器のコミッショニング運転”, these proceedings, MOOT13.
- [13] 本田洋介, 他, “ERL 試験加速器入射部における横方向ビーム性能評価”, these proceedings, SUP011.
- [14] 本田洋介, 他, “ERL 試験加速器入射部における縦方向ビーム性能評価”, these proceedings, SUP010.
- [15] 中村典雄, 他, “コンパクト ERL 周回部のオプティクス設計”, these proceedings, SAP021.
- [16] 松村宏, 他, “ERL 開発棟におけるコンパクト ERL 入射部の新設に伴う放射線安全対策”, KEK Internal 2013-1.
- [17] 高井良太, 他, “コンパクト ERL 用ビーム位置モニターとスクリーンモニターの開発”, these proceedings, SAP024.