

PROGRESS IN CONSTRUCTION OF THE COMPACT ERL

Shogo Sakanaka^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Yukinori Kobayashi^{A)}, Hiroshi Kawata^{A)}, Ryoichi Hajima^{B)}

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

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

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

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

Abstract

In order to demonstrate key technologies for the ERL light source, we are constructing the Compact ERL (cERL) at KEK. Both the ERL-development building and related equipments survived the “Great East Japan Earthquake” at March 11, 2011. We continue constructing the cERL and carrying out R&D effort. We report up-to-date status of the construction and the R&D effort.

コンパクト ERL 建設の進捗状況

1. はじめに

エネルギー回収リニアック (ERL) は、ビームの 6 次元エミッタンスを極限まで小さくでき、かつ大強度のビームを加速できる装置である。この特性を生かし、蓄積リングの限界を超える超高輝度放射光源として期待されるとともに^[1]、共振器を利用した究極の X 線自由電子レーザーを駆動する加速器としても待望されている^[2,3]。電子エネルギー約 150 MeV、平均電流 10 mA クラスの ERL は、既に米国 Jefferson Laboratory (JLab) で安定に稼働している。ERL を利用した超高輝度 X 線光源を実現するためには、JLab 等で実用化されている加速器技術に加えて、電子ビームの低エミッタンス化、大電流化をはかり、かつ大規模な超伝導加速システムを安定に稼働させる事が必要である。

KEK/JAEA を中心とする ERL 開発チームは 2006 年から ERL の開発研究を着実に進め、主要要素のプロトタイプが完成しつつある^[4]。また、試験用 ERL (コンパクト ERL) の建設も進行中である。本稿では、主要要素の開発状況とコンパクト ERL 建設の進捗について報告する。

2. 主要要素の開発状況

2.1 高輝度 DC 電子銃

原子力機構を中心に開発中の 500 kV DC フォトカソード電子銃 1 号機^[5]では、2010 年 10 月にカソード電圧 300 kV を印加してビーム電流 5.7 μ A までのビーム引き出し試験に成功した。その後、NEG ポンプを増強 (排気速度: 18000 リットル/s) し、カソード真空容器内の真空度 6×10^{-10} Pa を達成した。高電圧印加時に field emission の原因となっていると推定された NEG ポンプのメッシュシールド部の改良も行った。2011 年 2 月に高電圧試験を行い、カソード電極を取り付けた状態で最大 466 kV までの高電圧印加に成功した。その後東日本大震災が発生したが、大きな被害はなく、再度真空立ち上げ、高圧コ

ンディショニングを行っている。高電圧試験中の 500kV 第 1 電子銃の写真を図 1 に示す。また、陰極表面の磁場による磁気エミッタンスの補償についての実験も行った^[6]。

KEK を中心に開発中の 2 号機に関しては、到達真空度約 10^{-10} Pa を目標とした極高真空の達成に向けた取り組みに特に力を入れている^[7]。絶縁セラミック管、電子銃容器のガス放出速度の測定を単体で行い、引き続きそれらを組み上げ、ベーク前後でのガス放出速度の測定を行った。また、極高真空領域でのペーカブルクライオポンプの排気速度の測定も行っている。電子銃用高圧電源 (最大電圧 600 kV、ビーム電流 10 mA) の製作も進行中である。また、名古屋大学から移設された 200 kV フォトカソード電子銃を利用し、ビームエミッタンスと時間応答のカソード材料依存性の測定や、カソード寿命、量子効率 (Q.E.) 分布の評価も行っている^[8]。

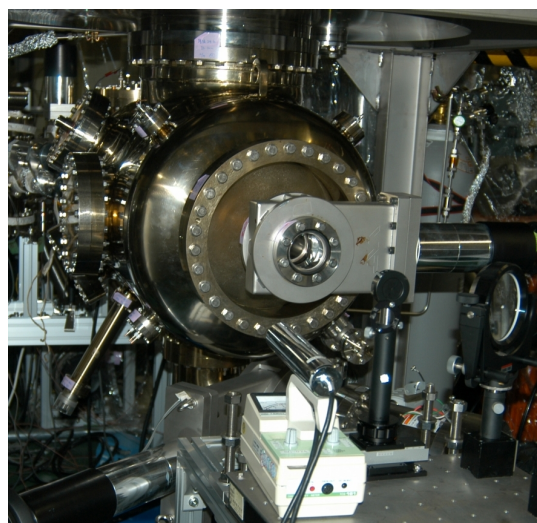


図 1 : 500 kV 第 1 電子銃の高電圧印加試験

2.2 電子銃用ドライブレーザー

コンパクト ERL の当初目標である 10 mA のビームを生成するためには、波長約 530 nm、平均出力 1.5 W (量子効率 1.5%を仮定)、パルス幅約 16 ps、繰り返し周波数 1.3 GHz のレーザーパルスが必要である。電子銃の試験のため、市販の 1.3 GHz レーザー発振器、ファイバー増幅器等を組み合わせたシステムを用い、現時点で平均レーザー出力約 80 mW (波長 530 nm) が得られている^[9]。さらに、このシステムを大電力化する取り組みを行っている。他方、ERL で最終的に必要とされるビーム電流 100 mA に必要なレーザーを目標とした開発も行っている。現在のところ、フォトニック結晶ファイバー増幅器を用いて、波長 1030 nm、繰り返し周波数 85 MHz のレーザー光を 31 W まで増幅することに成功している。さらに Nd:YVO₄ を用いたレーザー発振器で繰り返し周波数 1.2 GHz、波長 1064 nm、パルス幅 27 ps のパルス光が得られた。加えて、上述のフォトニック結晶ファイバー増幅器を用いて 1.2 GHz のパルス光を最大平均出力パワー 8 W まで増幅することができた^[10]。

2.3 入射器用超伝導空洞^[11,12]

ERL 実機の入射器用超伝導空洞では、最大 100 mA の電子ビームをエネルギー約 500 keV から約 10 MeV (cERL では 5 MeV) まで加速する必要があり、ビーム負荷が大きいことが特徴である。cERL では、3 台の 2 セル空洞を用い、空洞当たり 2 本の入力カップラーを用いる予定である。加速勾配は約 15 MV/m、カップラー当たりの最大通過電力は 100~170 kW を目標として開発を進めている。高次モードは空洞当たり 5 個の HOM カップラーを用いて減衰される。

2010 年度には 2 台のプロトタイプ空洞を製作して縦測定試験を実施した。その結果、空洞単体では約 40 MV/m までの加速勾配を達成した。この時、CW 運転で高加速勾配を維持するには HOM カップラーの発熱対策、冷却強化が必要と判明したため、これらの改良を行っている。2011 年度前半に、cERL 用クライオモジュールに組み込むための 3 台の 2 セル空洞 (#3-5) が完成した (図 2)。実機 1 号機 (空洞 #3) の縦測定試験を行った結果、空洞全体が液体ヘリウムに浸かった状態で 30 MV/m まで、HOM カップラーがヘリウム外に出た場合でも 16 MV/m までの加速勾配を達成した。

入力カップラーについては、2010 年度に 2 台のプロトタイプの大電力試験を行い、パルス運転で 100 kW まで、CW 運転で 50 kW、30 分間などの試験を行った。大電力 CW 運転時の冷却などに課題があるが、当初の cERL 運転に必要な性能の目処はついた。2011 年度前半に実機で用いる 6 台の入力カップラーが完成し、2011 年秋以降にエイジングを行う予定である。

3 台の超伝導空洞を収納するクライオスタットの設計も進めており、2012 年前半からクライオモジュールの組み立てを始める予定である。



図 2 : 完成した 3 台の入射器超伝導空洞

2.4 主加速器用超伝導空洞^[12-15]

ERL の主加速空洞では、加速勾配 15~20 MV/m の加速勾配と共に、beam breakup (BBU) 不安定性を抑制するための高次モード減衰が求められる。2010 年度には 2 台のプロトタイプ 9 セル空洞を製作し、縦測定試験を行った。9 セル空洞 2 号機では、20 MV/m 以上の加速勾配を達成し、9 セル空洞特有の空洞製造・表面処理の問題が解決しつつある。2011 年度前半には、実機に組み込むための 9 セル空洞 2 台 (#3, #4) が完成した。引き続きこれらの表面処理を行っている。

入力カップラーについては、以前のヒートサイクル試験で RF 窓部にリークが発生したため、改良を行った。改良後、常温から液体窒素温度までのヒートサイクル試験を 10 回行い、リークが発生しない事を確認した。さらにプロトタイプの入力カップラー 1 台について、RF 窓を液体窒素温度に冷却した上で大電力・全反射試験を行った。その結果、20 kW CW で 16 時間の連続試験に成功した。

9 セル空洞の高次モードは、空洞両端のビームパイプに取り付けた HOM ダンパーで減衰させる設計である。HOM ダンパーは、約 80K の低温で動作させる必要がある、ビームパイプの内側にフェライトを HIP で接合した HOM ダンパーを開発中である。

2 台の 9 セル空洞を収納するクライオモジュール、チューナー等の開発も進行中である。

2.5 RF 源^[16-18]

cERL では、1.3 GHz, CW 出力の多様な RF 源が用いられる。まず入射器のバンチャー空洞用に 20 kW IOT (Inductive Output Tube) が、入射器超伝導空洞 No. 1 用に 30 kW クライストロンが、入射器空洞 No. 2 と No. 3 用に 300 kW クライストロンが用いられる。主加速空洞 (初期は 2 台の 9 セル空洞を使用) 用には 30 kW 出力の IOT が用いられる。これらのうち、バンチャー用の IOT を除いて、管球と高圧電源は全て調達済みである。

2010 年度には、ERL 開発棟（旧名称：東カウンターホール）内で 300 kW クライストロン用高圧電源（52 kV, 11 A 出力）の立ち上げ・調整を行い、270 kW までの RF 出力を確認した。続いて、150 kW CW までの試験が可能な入力カップラー試験スタンドを構築し、入射器用カップラーの試験を行った。また、30 kW IOT と高圧電源の立ち上げを行い、約 30 kW までの RF 出力を確認した。引き続き 30 kW IOT を用いた主加速空洞入力カップラー用の試験スタンドを構築し、大電力試験を行った。

2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生し、ERL 開発棟内では天井照明が落下するなどの被害があり、暫くの間作業が中断したが、5 月の連休明けから RF 源の立ち上げ・試験を再開した。現在は 30 kW クライストロンと高圧電源の立ち上げ作業を行っている。

空洞内の RF 電圧の振幅・位相を高精度で制御するためのデジタル・ローレベル系の開発も進めている。FPGA を用いたデジタル制御ボード等を試作し、評価を行った。その結果をフィードバックし、ボードの改良を進めているところである。また、cERL 建設のための立体回路系の設計も進行中である。

2.6 ヘリウム冷凍機

超伝導空洞を絶対温度 2K に冷却するためのヘリウム冷凍機システムを構築中である。ERL 開発棟内に TCF200 ヘリウム液化冷凍機、3000L 液体ヘリウム貯槽、減圧排気ユニット、2K コールドボックス等を設置し、隣接する低温棟内に循環圧縮機を設置した。これらの設備は、2010 年 8 月に茨城県の完成検査に合格した。その後立ち上げ試験を行い、想定していた 250 リットル/時以上の液化能力があることを確認した。3 月の大震災後にも冷凍機システムは問題が無いことを確認した。今後は 2K システムの立ち上げを行う予定である。

3. コンパクト ERL の建設

3.1 概要

cERL は 2012 年度末のコミッショニングを目標として建設が進められている。現時点での仕様として、入射器出口のビームエネルギー 5 MeV、周回部のエネルギー 35 MeV、規格化エミッタンス 1 mm-mrad、最大ビーム電流 10 mA を当初目標として設計を進めており、コミッショニング後にはビームエネルギー、ビーム電流等をアップグレード可能な設計としている。コミッショニング時（周回エネルギー 35 MeV）の cERL 機器配置設計を図 3 に示す。

cERL では、ERL 放射光源の技術実証に加えて、レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線（LCS- γ 線）の発生と核種非破壊測定の実証試験^[19]を行う予定である。この実証実験のための逆コンプトン散乱装置および γ 線実験室を設計に組み込んである。この実験室は、同じく逆コンプトン散乱で発生させる超短パルス X 線を利用する時分割実験およびイメージング実験用にも共用できるような設計とする。また、

バンチ圧縮時に発生するコヒーレント・テラヘルツ光を利用する実験室も併設可能である。

cERL は、当初 1 重ループの周回部を建設し、将来 2 重ループ目を設置できるスペースを確保してある。北側（図 3 の上方）の直線部には、2 台の 9 セル超伝導空洞を収納するクライオモジュール 1 台が設置される。将来は、空洞 4 台収納モジュール 1 台と、空洞 2 台収納モジュール 1 台を増設可能で、ビームエネルギーを 125 MeV（1 ループの場合）まで増強できる。

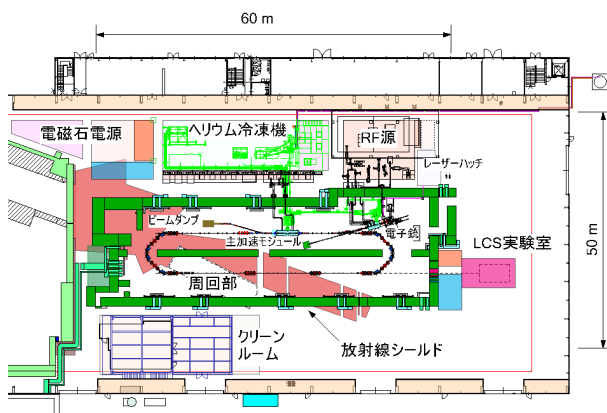


図 3：コンパクト ERL の運転開始時の機器配置案（1 重周回ループ、周回エネルギー 35 MeV）

3.2 ビーム光学設計^[20]

運転開始時の周回エネルギー 35 MeV に焦点を定めた詳細なビーム光学設計を進めている。空間電荷効果が特に重要である電子銃から、バンチャー、入射器空洞、マージャー、主加速空洞までを空間電荷効果を取り扱うことができるコード GPT を用いて最適化し、その後のビーム周回からダンプまでを elegant コードを用いてシミュレーションしている。elegant では、周回部でのコヒーレント放射光の影響を取り込むことができる。シミュレーションに用いるレーザーパルス長等のパラメータについても、できるだけ現実に近い値を取り込んでいる。

現時点では、入射器のマルチオブジェクト最適化がまだ十分とは言えないが、GPT シミュレーションの出口（主加速空洞を 1 回目に通過する出口）で規格化エミッタンス 0.5 mm-mrad、rms バンチ長 0.74 mm（バンチ当たりの電荷：7.7 pC）が得られている。GPT コードの出力結果を elegant コードに渡し、start-to-end シミュレーションを行い、周回部のビーム光学系の設計と最適化を進めているところである^[20]。入射部と整合させた周回部（主加速空洞出口からビームダンプまで）のビーム光学関数を図 4 に示す。またビームの減速についても、空間電荷効果を取り入れたシミュレーションを進めている。

2010 年度には cERL 用偏向電磁石のプロトタイプを製作した。残り 7 台の偏向電磁石と大多数の 4 極電磁石を 2011 年度に製作する。真空部品についても、2011 年度に一部を調達中である。

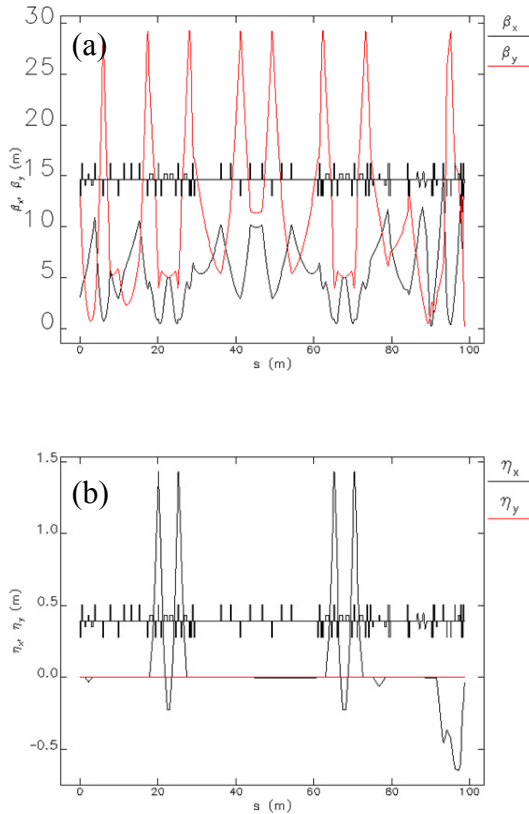


図4：入射部と整合した周回部のビーム光学関数。
(a) ベータatron関数、(b) 分散関数

3.3 ERL 開発棟と放射線シールド

KEK 東カウンターホールは、2009 年度に建物の大幅改修を行い、2011 年度から ERL 開発棟と名称が変更された。2010 年度後半には、ERL 開発棟内に残っていた残留放射化物、特に陽子ビームライン直下に敷かれていた厚さ 9 mm の放射化した鉄板（表面線量率は 1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下）とモルタルの撤去作業や、ピット内に残されていたホウ素入りビーズ、ケーブル等の撤去作業を行った。これらの作業は、グリーンハウスを設置した上で、作業者の内部被爆を防ぐ装備（タイベックスーツ、防塵マスク等）を着用して実施した。鉄板の撤去後、床の放射線サーベイを行い、放射線レベルが高い部分に赤色のペイントを施した。

3 月 11 日の大震災では、建物本体に大きな損傷はなく、天井照明のカバー落下、天井のリベット脱落等の軽微な被害のみであった。2011 年 5 月時点での ERL 開発棟内を図 5 に示す。

cERL は大強度 CW リニアックであり、蓄積リングや通常型のパルスリニアックと比べて大きなビーム損失が発生する可能性がある。放射線遮蔽の方針としては、ビーム損失をできるだけ数カ所のコリメータ付近に局在させること、コリメータ周囲を鉄・鉛等で局所遮蔽すること、加速器を収納する放射線シールドを厚くすること、などで効果的に遮蔽

を行う方針である。シールド内には高速のビームロスモニターを配置し、大きなビーム損失を検出した場合にはビームを高速で停止することで機器の健全性と安全を確保することも予定している。

現時点では、ビーム損失量として、マージャー部と第 1 アークのコリメータ（分散あり）で 1 μA まで、入射器出口と主リニアック出口、第 2 アーク部のコリメータで 0.1 μA までのビーム損失を想定し、必要な放射線遮蔽の検討・シミュレーションを進めている。ビーム損失の想定については、今後加速器シミュレーションの結果などを反映させる予定である。

cERL を収納する放射線シールドは、鉄筋コンクリート製で、横壁を厚さ 1.5 m、天井を厚さ 1 m とする。将来の組み替え・撤去等の際の利便性を考え、ブロック形状のコンクリートを組み合わせて構築する。放射線シールドの機械的強度、耐震性、床の耐荷重は非常に重要で、構造計算をもとに設計を進めている。耐震性を検討する上での水平・垂直加振力として大きめの 0.5 G を仮定し、シールド構造および止め金具等の設計を行っている。放射線シールドの建設は 2011 年秋に着工し、2012 年夏頃に完成する予定である。



図5：2011 年 5 月現在の ERL 開発棟内。写真左手に冷凍機システムが設置されており、右手のスペースに cERL が建設される。赤色ペイントが施された床は、弱く放射化された部分を示す。

4. まとめ

2012 年度末のコミッショニング開始を目標に、cERL の建設と主要要素の開発が着実に進んでいる。高輝度電子銃では、300 kV の高電圧を印加したビーム引き出しに成功し、極高真空の達成に向けた準備も進めている。入射器用と主加速器用の 2 つの超伝導クライオモジュールも、2012 年度末に完成する予定で開発が進んでいる。RF 源については、管球と高圧電源の調達がほぼ終わり、調整試験と cERL 用立体回路の構築に向けた準備、デジタルローレベル系の開発等を行っている。液体ヘリウム冷凍機についても液化に成功し、想定以上の性能を

確認し、現在絶対温度 2K のためのシステムを整備している。ERL 開発棟内では残留放射化物の撤去が完了し、放射線シールドの設計がほぼ終了した。放射線シールドは 2011 年秋から 2012 年夏の期間に建設される予定で、建設後に cERL の周回部等の機器が設置される。一部の機器（クライオモジュール等）については、シールドが一部完成した時点で設置され、性能試験を始める予定である。

口頭発表およびポスターFE-09, Tsukuba, Jul. 12-13, 2011

参考文献

- [1] See, for example, D. Bilderback et al., New J. Phys. 12 (2010) 035011
- [2] K.-J. Kim, Y. Shvyd'ko, S. Reiche, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 244802
- [3] R.R. Lindberg and K.-J. Kim, PAC09, pp. 1198-1200
- [4] 島田美帆, "ERL 計画の進捗状況", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TULH09, Tsukuba, 2011
- [5] 西森信行 他, "500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, MOPL05, Tsukuba, 2011
- [6] 永井良治 他, "JAEA-250kV 光陰極電子銃における磁気エミッタンス補償", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS106, Tsukuba, 2011
- [7] 山本将博 他, "ERL 高輝度電子源のための極高真空系の開発と評価", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS160, Tsukuba, 2011
- [8] 松葉俊哉 他, "NEA-GaAs フォトカソードのエミッタンス及び時間応答測定", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, MOPS073, Tsukuba, 2011
- [9] 本田洋介 他, "高輝度電子銃関係の進捗状況", 第 28 回 PF シンポジウム, ポスターFE-03, Tsukuba, Jul. 12-13, 2011
- [10] 笠原亮 他, "ERL 光陰極電子銃励起用 Yb ファイバーレーザーシステムの進捗状況", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS064, Tsukuba, 2011
- [11] K. Watanabe, E. Kako, S. Noguchi, M. Satoh, T. Shishido, Y. Yamamoto, "Status of Development of the cERL Superconducting Injector Linac", LINAC10, pp. 401-403, Tsukuba, Sep. 12-17, 2011
- [12] K. Umemori et al., "Construction of cERL Cryomodules for Injector and Main Linac", Proceedings of SRF2011, FRIOA06, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [13] H. Sakai et al., "High Power Tests of KEK-ERL Input Coupler for Main Linac Under LN2 Condition", Proceedings of SRF2011, TUPO005, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [14] E. Cenni et al., "Vertical Test Results on KEK-ERL 9-Cell L-Band Superconducting Cavity", Proceedings of SRF2011, THPO034, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [15] M. Sawamura et al., "Cooling Properties of HOM Absorber Model for cERL in Japan", Proceedings of SRF2011, TUPO003, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [16] S. Fukuda et al., "RF Source of Compact ERL in KEK", IPAC10, pp. 3981-3983, Kyoto, May 23-28, 2010
- [17] T. Miura et al., "Low-Level RF System for cERL", IPAC10, pp. 1440-1442, Kyoto, May 23-28, 2010
- [18] 三浦孝子 他, "KEK における cERL の高周波源", 第 7 回加速器学会年会プロシーディングス, pp. 927-929, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [19] 羽島良一 他, "コンパクト ERL におけるレーザーコンプトン線の発生と核種非破壊測定実証実験の計画", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS040, Tsukuba, 2011
- [20] 島田美帆 他, "cERL のラティス設計および CSR による逆コンプトン軟 X 線源", 第 28 回 PF シンポジウム,