

話 題

コンパクト ERL コミッショニングの進捗状況

島田 美帆^{*1}・宮島 司^{*1}・中村 典雄^{*1}・コンパクト ERL コミッショニンググループ^{*1-5}

Present Status of the Compact ERL Commissioning

Miho SHIMADA^{*1}, Tsukasa MIYAJIMA^{*1}, Norio NAKAMURA^{*1} and cERL commissioning group^{*1-5}

Abstract

Compact Energy Recovery Linac (cERL) project is ongoing at KEK in order to demonstrate the ERL performance which satisfies various advanced requirements of future light sources. The cERL injector with its diagnostic beamline was constructed and its initial commissioning was successfully done at June 2013. The cERL recirculation loop with a main superconducting linac, merger and dump sections was then constructed. The commissioning with the loop has been started from December 2013. In the commissioning, a significant progress has so far been made. In this paper, we will report the status of the cERL commissioning including the construction work.

1. はじめに

将来光源への応用に向けてエネルギー回収型リニアック (ERL: Energy Recovery Linac) の持つ優れた性能を実証するために、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) や日本原子力研究開発機構 (JAEA) などを中心にコンパクト ERL (cERL) 計画が精力的に進められている。2013 年 4 月までの放射線シールドと cERL 入射部の建設に続き、4～6 月にはそのコミッショニングに成功した。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 月から周回部のコミッショニングを開始した。ここでは、cERL の建設も含めた cERL のコミッショニングの進捗状況について報告する。

2. コンパクト ERL の概要

ERL は、周回後のビーム加速エネルギーを高効率で回収しつつ、良質で大強度のビームを様々な利用研究に提供できる加速器として世界的に期待されている¹⁾。有望な応用例として、高輝度・短パルスのシンクロトロン放射光源や高繰返し

の自由電子レーザー (FEL) などがあり、ERL によって超低エミッタンスあるいは超短バンチの電子ビームを供給することで実現できる。KEK においても 3 GeV の高輝度・短パルス放射光源と 6～7 GeV の共振器型 X 線 FEL を組み合わせた光源計画 (PEARL: Photon Factory ERL Advanced Research Laboratory) を推進している²⁾。cERL 計画^{3,4)}では、このような将来光源に向けて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。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関連する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。光陰極 DC 電子銃からの電子ビームは、3 台の 2 セル超伝導加速空洞から成る入射リニアック (入射加速空洞) で最大 6 MeV まで加速され、合流部で周回部に入射される。その後、2 台の 9 セル超伝導加速空洞から成る主リニアック (主加速空洞) で最大 35 MeV まで加速し、2 つのアーケ部を経て再度主リニアックまで戻ってくる。加速位相と 180 度だけずれた減速位相のタイミングで戻して主リニアックでエネルギーが回

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: miho.shimada@kek.jp)

^{*2} 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency

^{*3} 総合研究大学院大学 Sokendai, the Graduate University of Advanced Studies

^{*4} 広島大学 Hiroshima University

^{*5} Kyungpook National University

取された後、減速したビームはシケインでダンプラインに導かれて終端のビームダンプで捨てられる。

cERLの当面の目標はバンチ電荷 7.7 pC (CW 運転でビーム電流 10 mA) で規格化エミッタンス 1 mm·mrad である。ビームの平均電流は放射線の遮蔽が不十分である可能性があるため、 μA レベルから始めて 10 mA まで段階的に増やしていく予定である。バンチ長は通常の運転では 1~3 ps とし、バンチ圧縮モードで約 100 fs を目標とする。2014 年度末にはレーザーコンプトン散乱 X 線発生・利用実験, 2015 年度にはコヒーレントテラヘルツ光発生・利用実験が予定されて

いる。将来の主加速空洞の増設 (計 8 台) で最大 125 MeV, さらに周回部を 2 ループにすることで最大 245 MeV までビームエネルギーを上げることが可能になる。

図 2 に cERL 建設場所 (ERL 開発棟) の配置図 (図中は設置予定のものも一部含まれる) を示す。cERL はコンクリートで放射線遮蔽された加速器室内に設置され, 室外にはヘリウム冷凍設備, クリーンルーム, RF 源, 各種電源, レーザー室などが配備されている。

以下の章では時系列に沿って, cERL 入射部コミッションング, 周回部の建設と主加速空洞の立ち上げ, さらに周回部コミッションングについて報告する。

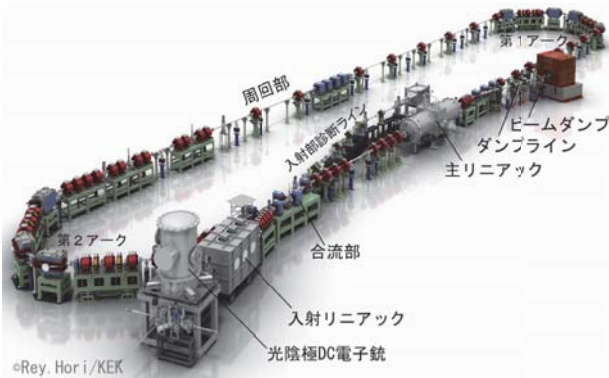


図 1 コンパクト ERL (イラストレーション)

表 1 cERL パラメータ

最大周回部エネルギー	35 MeV
最大入射部エネルギー	6 MeV
ビーム電流	10 mA (長期目標 100 mA)
規格化エミッタンス	0.3 mm·mrad (7.7 pC) 1 mm·mrad (77 pC)
バンチ長	1~3 ps (通常) ~100 fs (バンチ圧縮)
RF 周波数	1.3 GHz

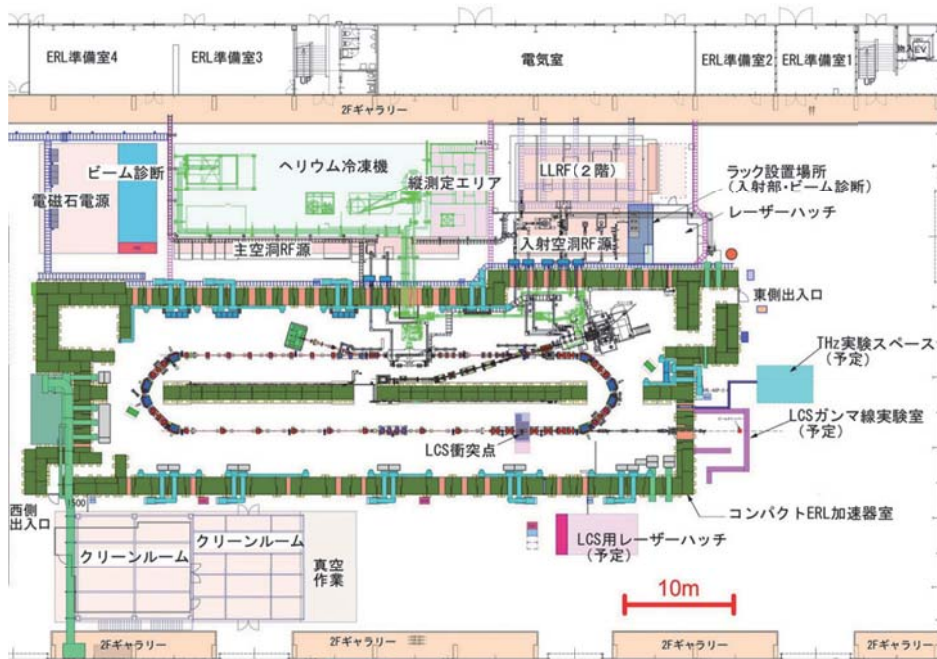


図 2 ERL 開発棟の配置図。緑色の放射線シールド (加速器室) の中に cERL が設置されている。

3. 入射部コミッショニング

cERL 入射部コミッショニングは 2013 年 4 月 22 日から 6 月 28 日までの凡そ 2 か月間に渡って実施された⁵⁾。このときのビームライン構成は JAEA で開発された 500 kV 光陰極 DC 電子銃, 2 台のソレノイド電磁石, バンチャー空洞, 3 台の 2 セル超伝導入射器加速空洞, 5 台の四極電磁石, ビーム性能を診断するための入射部診断ラインとそのビームダンプとなっており, 周回部へビームを合流するための 3 台の偏向電磁石はこの段階では設置していない。入射部コミッショニングでは最大ビーム運動エネルギー 6 MeV および平均電流 $1 \mu\text{A}$ で放射線施設検査を申請した。

放射線施設検査に必要なビーム調整運転の他に, ビーム性能評価試験として, 1. 電子銃での高品質ビームの生成, 2. 入射加速空洞でのビーム加速, 3. ビーム品質を保持したビーム輸送の 3 つの目標を定め, ビーム試験を実施した。

次に, 上流側から装置とビーム性能の検証結果について紹介する。電子銃については, JAEA での単体試験において 500 kV の電圧印加とビーム引き出しに成功していたが⁶⁾, cERL への移設後にセラミック絶縁体にトラブルが発生したため, cERL での運転では電圧を 390 kV に下げて運転することとした。低エミッタンス電子ビームを生成するためのカソード材質として, Negative Electron Affinity (NEA) 表面を持つ GaAs 光陰極を採用し, 533 nm 波長のレーザーで励起して電子を生成した。光陰極から低エミッタンス電子ビームが生成されていることを検証するために, 空間電荷効果の影響を無視できる 10 fC/bunch という非常に低いバンチ電荷でビームを生成し, 電子銃直下流に設置されたソレノイド電磁石を用いてウェストスキャン法でエミッタンスを測定した。測定された規格化 rms エミッタンスは 0.07 mm-mrad であり, GaAs 光陰極で期待されるエミッタンス⁷⁾ とほぼ同程度であることが確認された。

電子銃で生成された電子ビームは超伝導加速空洞で加速される。ビーム試験では, 3 台の入射加速空洞を 7 MV/m の加速勾配で運転し, 加速位相調整後に電子ビームを運動エネルギー 5.6 MeV まで加速することに成功した。その後, 入射部診

断ライン終端のビームダンプまで導き, ビームロスがほとんどない状態で輸送していることを確認した。これらの電子ビーム生成・加速・輸送調整は 5 日間で達成された。5 月 23 日には最大ビーム出力の凡そ 2 割に当たる平均ビーム電流 200 nA での運転を達成し, 5 月 27 日付で検査合格となった。その後の運転で装置とビームの性能評価試験を実施した。

電子銃は 390 kV の印加電圧での運転で凡そ 2 か月の運転期間中に一度も放電などのトラブルもなく, 極めて安定であった。入射加速空洞も加速勾配 7 MV/m の運転で, 極めて安定であった。超伝導空洞を 2 K に保つための液体ヘリウムの冷凍機の運転にあたっていくつかのトラブルがあったが, それでも停止時間は数時間程度と短く, 深刻な問題とはならなかった。このように, ERL 加速器で鍵となる装置である光陰極 DC 電子銃, 超伝導空洞ともに安定に運転できることが確認された。

次に, 入射加速空洞による加速後にスリットスキャン法でのエミッタンスの測定を行った。空間電荷効果を無視できる 10 fC/bunch のバンチ電荷では, 規格化 rms エミッタンスは 0.17 mm-mrad と測定された。理想的な条件での粒子トラッキングシミュレーションでは 0.1 mm-mrad と予想していたのに対し, 測定されたエミッタンスはこれよりわずかに大きい値ではあるが, 十分小さい値となっている。

バンチ電荷が 7.7 pC/bunch の測定では空間電荷効果と思われる現象が現れたが, 水平・垂直方向ともに 1.0 mm-mrad 以下のエミッタンスを得た。当初の目標を達成することができたが, 空間電荷効果を取り入れた粒子トラッキングシミュレーションでは水平・垂直方向ともに 0.3 mm-mrad と予想されており, 実測値は 3 倍ほどとなっている。輸送中のビームプロファイル変化を **図 3** に, エミッタンスのバンチ電荷依存性の測定結果を **図 4** に示す。

エミッタンス増大を抑制するには, 輸送条件の最適化が必要となる⁸⁾。しかしながら, 空間電荷効果の現れるバンチ電荷領域でのビーム試験は, 期間中の最後の 1 週間しか行わなかったため, まだ十分な時間を取ることができていない。今後のビーム試験でエミッタンス増大を抑えたビーム輸送条件の探索を行う予定である。

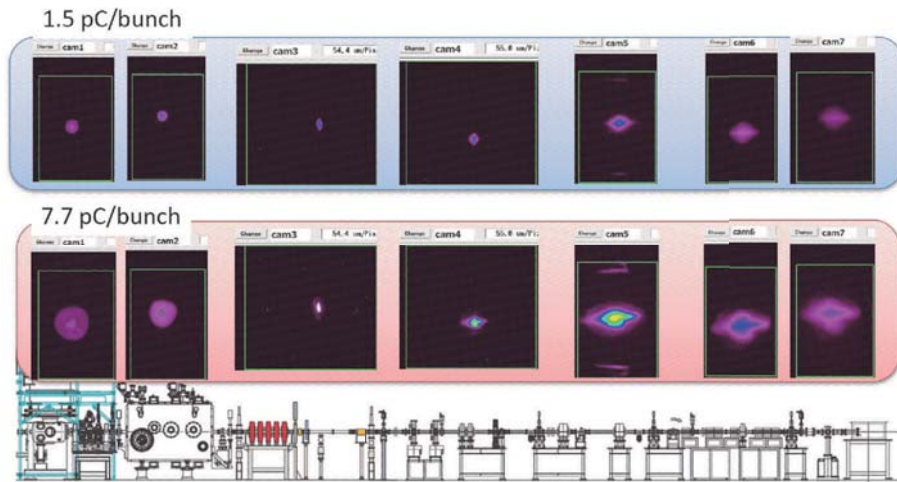


図3 cERL 入射部と診断ラインの配置図とスクリーンで測定したビームプロファイル. 輸送の条件が同じであっても, 空間電荷効果により電荷量 (1.5 pC/bunch, 7.7 pC/bunch) によって異なるビームプロファイルになる.

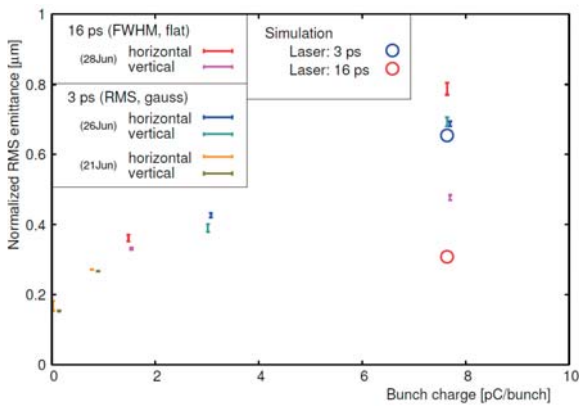


図4 入射部診断ラインでのエミッタンス測定結果. 空間電荷効果の影響を受けない低バンチ電荷から, 7.7 pC/bunch まで変化させたときのエミッタンス変化を示す. 電子ビームを生成する励起レーザーの時間構造を, 3 ps の rms ガウス分布と, 16 ps の FWHM 一様分布に変えて測定した. 輸送条件はバンチ電荷に依らず同一条件としているため, バンチ電荷を上げた時にエミッタンスが増加する. 低エミッタンス輸送にはバンチ電荷に合わせた輸送条件が必要となる.

4. 周回部建設と主加速空洞立ち上げ

4.1 電磁石設置とアライメント

cERL 周回部は合流部とダンプラインを含めて合計 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 (入射シケイン, 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. 四極電磁石は補正コイルを持ち, 水平・垂直ステアリン

グ電磁石としても機能する. 8 台の 45 度偏向電磁石は直列に接続され, 1 台のスイッチング電源 (定格 100 A, 40 V) で励磁する. 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) で励磁する. 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, 各電磁石のサブ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.

これらの 80 台の電磁石の設置は, 短期間に集中する他工程との干渉を避けながら, それらに先立って完了させる必要があった. そこで, 全体的な工程を短縮するために, 精密アライメントの後に, ある程度の位置変動を許容した上で電磁石を半割し, ビームパイプを設置した. 加速器室壁面のビームライン上方約 500 mm の位置には 1.5 inch の Corner Cube Reflector (CCR) 用基準座を約 5 m 間隔で 40 カ所設置している. 電磁石の設置に先立ち, レーザトラッカ T3 (API: 測定範囲半径 20 m, 3 次元位置精度 5 ppm) によりこれらの全周測量を行い, 4 回の繰返し測定の平均値を基準値として用いた. この際, 既設の入射加速空洞, 主加速空洞, 入射部ビームラインを構成する電磁石上の測量基準座についても座標値を求め, 新規に建設する周回部ビームラインと問題無く接続できることを確認した.

電磁石の精密アライメントでは, 電磁石上に取り付けた測量基準座上の CCR 中心位置および方位角の設定目標を加速器室壁面上の測量基準点か

ら求められた設計値に対して、それぞれ ± 0.1 mm および ± 0.1 mrad 以内とした。水平面内位置についてはレーザトラッカ T3、高さについてはティルティングレベル N3 (Wild: 1 km 往復差 ± 0.2 mm)、水平度については精密水準器 DL-M1 (新潟精機: 測定範囲 ± 5 mm/m, 読み取り分解能 0.01 mm/m)をそれぞれ用いた。さらに、測量基準座の無い一部の電磁石については、トータルステーション NET05X (ソキア: 測角精度 0.5 arcsec, 測距精度 1 mm + 1 ppm) を用いて、電磁石の割面や端面位置を合わせた。図 5 は電磁石アライメント作業中の写真である。

ビームパイプ設置後、戻された電磁石基準座位



図 5 アライメント中の電磁石

置と方位角のずれ量を最終測量により評価した。その結果を図 6 (a) と (b) に示す。これらから、今回設置した電磁石において ± 0.5 mm 程度の位置精度と ± 0.2 mrad 程度の水平精度および 1 mrad 未満の水平面内方位精度が得られていることが確認された。原点付近および 77 m 地点以降において見られる y 軸方向 (鉛直上下方向) のオフセットは壁面の測量基準の高さずれによるものと考えられる。

最終測量時のずれ量の拡大は電磁石半割り時の再現性のずれ、ビームパイプのベーキング時の熱による電磁石の位置変動などによるものと考えられる。これまでのビーム調整運転においても、これらのずれによる問題は発生していない。

4.2 ビームダクトの設置と真空排気

周回部 (約 92 m)、入射加速空洞より下流の入射・合流部 (約 4 m)、ビームダンプに向かうダンプライン (約 5 m) のビームダクトの設置を電磁石の半割り工程に合わせて行った。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

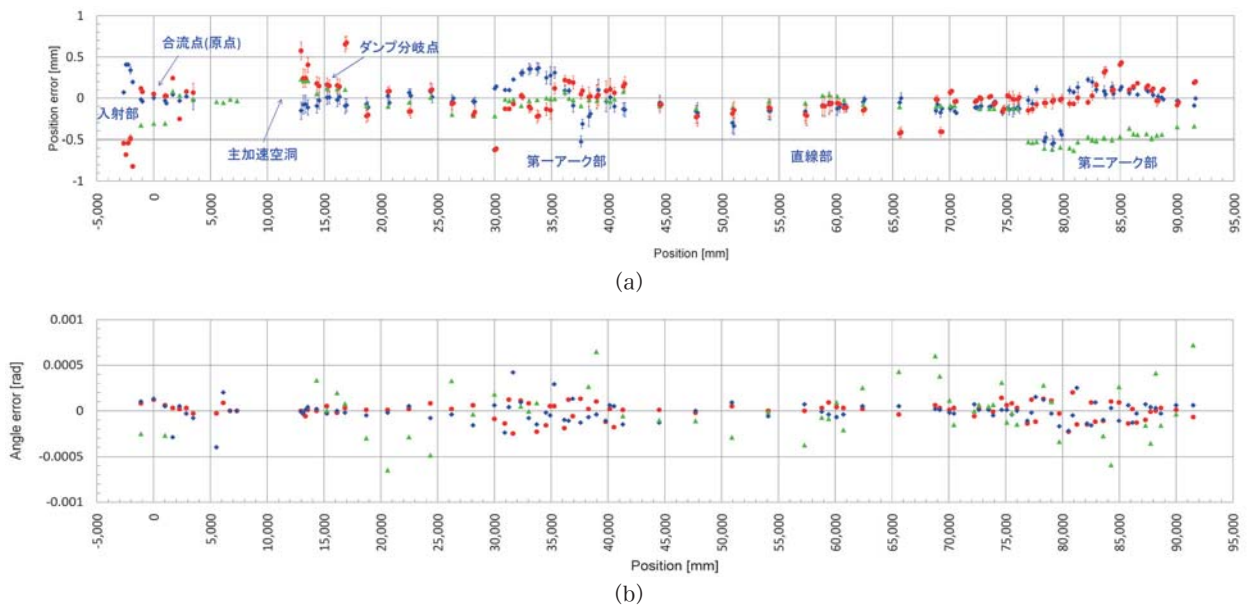


図 6 (a) 半割り戻し後の精密測量時の位置ずれ量 (mm), 横軸は合流する点を原点として反時計回りにとった周回部ビームライン上位置を示し, マイナス方向は入射部ビームライン上位置を示す。◆: ビーム進行直交方向水平面内のずれ (x 軸), ▲: ビーム進行直交方向鉛直面内のずれ (y 軸), ●: ビーム進行方向ずれ (z 軸) を示す。 (b) 半割り戻し後の精密測量時の方位角ずれ量 (rad), ◆: x 軸周り水平角ずれ, ▲: y 軸周り方位角ずれ, ●: z 軸周り方位水平ずれを示す。

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⁹⁾。設置作業において、約150ヶ所ある特殊フランジで真空リークは検出されなかった。

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7)。

主ポンプは非蒸発型ゲッター(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、超伝導空洞両端のゲートバルブを閉じる。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。

cERLはビームエネルギーが低いいため放射光による光焼出しが行えないため、現場でのベーキングが不可欠である。このため、電磁石内に設置した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。同ヒータは四極電磁石内に設置したNEGコーティングダクトの活性化



図7 超伝導空洞周辺部の真空機器設置作業

(200°Cで24時間)にも用いる。

建設スケジュールの都合により、ベーキングおよびNEG活性化は超伝導空洞周辺部と合流部のみ行い、 1×10^{-8} Pa以下の圧力に到達させた。その他の非ベーキング区間は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。

4.3 主加速空洞の立ち上げ

主加速空洞¹⁰⁾は、2012年夏から秋にかけてモジュールアセンブリ作業が行われた。2台のLバンド9セル超伝導空洞を有し、入力カップラー、高次モード減衰器、周波数チューナー、ゲートバルブ等の組み込みを行った。完成したクライオモジュールはcERL加速器室内に設置され、ヘリウム冷凍機と連結された。図8にクライオモジュール概念図と実際に設置された様子を示す。

まずは、冷却試験を行った。フェライトからなる高次モード減衰器を急冷すると熱歪みにより損傷する恐れがあるため3 K/hourという比較的ゆっくりとしたスピードで冷却を行った。4 Kまで冷却してヘリウムの液溜めを行ったのち、真空ポンプにて減圧を行い2 Kまで冷却できることが無事確認された。

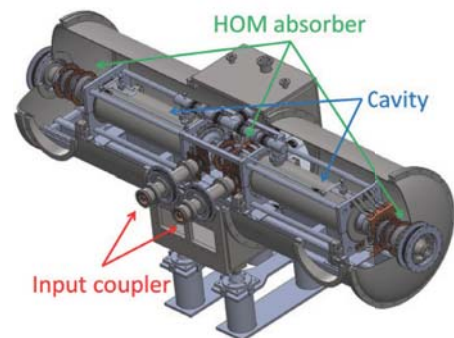


図8 (上) 主加速部クライオモジュール概念図と(下) cERL加速器室に設置された主加速部クライオモジュール。

周波数チューナー等、各種コンポーネントの性能確認を行ったのちに、2012年冬に大電力試験を行った。各空洞に15 MV以上の加速電圧をかける事ができたが、両空洞ともに8 MVという低い電圧からフィールドエミッションの発生が観測され、また、それに伴い空洞Q値の劣化も観測された(図9)。細心の注意を払ったが、モジュールアセンブリ作業においてゴミ混入等を起こしてしまった可能性がある。

クライオモジュールは、その後、室温まで昇温された後、2013年冬に再冷却され、ビーム運転に向けての調整が行われた。ここでは、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。

5. 周回部コミッショニング

周回部はTBA (Triple Bend Achromat) に似た180度のアークと光源利用を予定している長い直線部からなる。エネルギー広がりによってバンチ長が変化しないように、アイソクロナスの条件を課している。その周回部を含めたコミッショニングは2013年12月の1週間と2014年1月から3月中旬までに渡って合計約2カ月間のビームコミッショニングを行った¹¹⁾。電子銃は入射部コミッショニングと同様に390 kVで立ち上げ、バンチあたりの電荷量10～100 fC、パルス長

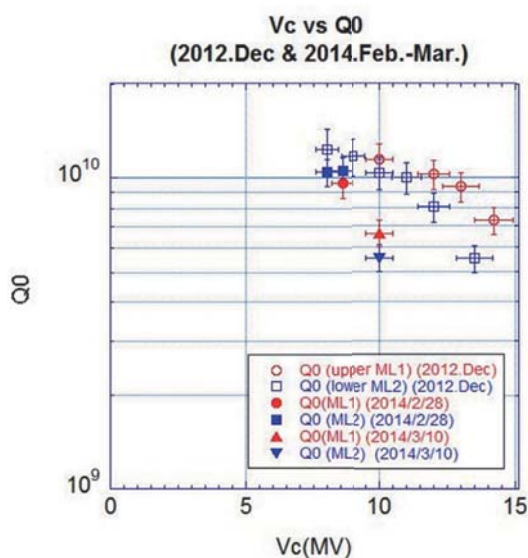


図9 空洞Q値 vs 加速電圧。2012年冬ならびに2014年の運転時における空洞Q値の測定結果を示す。赤が上流空洞、青が下流空洞を示している。

1 μ sのバースト構造、平均電流は数100 pAでビーム調整を行った。主加速空洞はフィールドエミッションによる放射線量増加が懸念されたため、運転加速勾配を1空洞あたり8.5 MVに抑えている。合流部シケインは入射部と周回部の運動量比が1:7を基準として設計していたことから、入射・周回エネルギーをそれぞれ2.9 MeV・20 MeVと定め、当初の35 MeVのおよそ60%程度で運転を開始した。

最初の1週間のコミッショニングで20 MeVまで加速されていることを45度偏向電磁石で確認した。しかし、周回ビームの軌道調整中に、入射シケインの電磁石BMAG05(図10参照)の漏れ磁場が入射ビームを蹴ってしまうことがわかったため、磁気シールドを追加して対策を行った。また、CCGの磁石がエネルギーの低い入射ビームの軌道やプロファイルを変えていたことがわかった(図11)。CCGに関しては磁石を取り外して改善を試みるほかに磁気シールドによる遮蔽の検討などを行っている。その他、シールド外のクレーンがその位置によってはビームに悪影響を与えることがわかった。

これらの環境磁場対策を施した後に周回ビームの再調整を開始し、合流部の周回ビームの軌道から、入射・周回電子の運動量比が設計通りであることを確認した。電子銃直後および周回後の可動ファラデーカップ(FC)の応答がほぼ同じであ

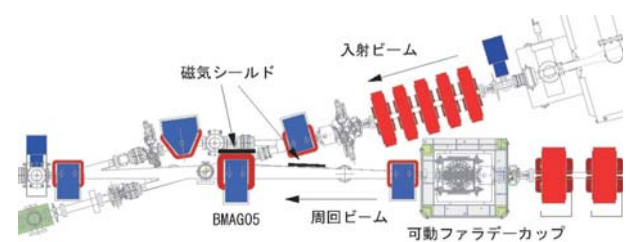


図10 入射・合流部シケインのラティス。周辺の磁気シールドと可動ファラデーカップの配置も示す。

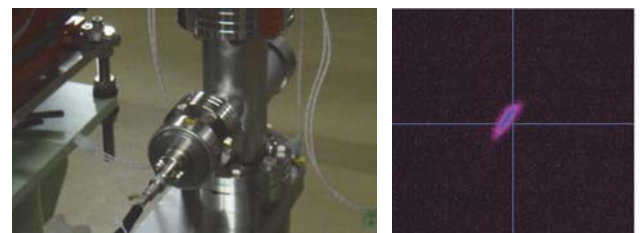


図11 (左)ダクトからおよそ20 cmの位置にあるCCGの磁石。(右)入射ビームがCCGの付近を通過したときのxyに相関のあるビームのプロファイル。

ることから、20 MeV 周回ビームを大きな電流のロスなく輸送できていると考えてよい。

合流部以降では周回ビームが入射ビームと同じパスを通過するため、スクリーンのような破壊型のモニタを使用することができない。そこで、BPM による2ビームの測定を試みた。その模式図を図12に示す。周回ビームは主加速空洞で減速位相に合わせるために入射ビームと位相が π だけずれるように周長を合わせており、基本的には1.3 GHzの信号が発生しない。しかし、ビーム軌道調整時は、切れのいいバースト構造になっているため、パルスの先頭は入射ビームのみが、後尾では周回ビームのみが通過するタイミングでそれぞれのビーム位置を測定できる。周回部の長さはおおよそ92 mであるため、その時間幅は300 ns程度である。図12に示すように、BPMの信号は階段状になっており、2つのビームを区別できることがわかる。この信号を参考にしながらビームの軌道調整を行い、ダンプライン入口のスクリーンで減速したビームを観測した。このダンプライ

ンに導く偏向電磁石 BMAD01 の励磁電流からほぼ入射ビームと同じエネルギーまで減速していることを確認した。そのときの周回部の各スクリーンや FC の応答を図13に示す。

エネルギー回収効率を上げるためには、周長(周回時間)の調整を行い、周回したビームが再び空洞に入るタイミング(位相)を調整する必要がある。図14に示すように、(a) アーク内のステアリングと (b) 周長補正シケインの2か所で調整を行った。このビーム調整では平均電流が少なく、主加速空洞のビームローディングによる測定は不可能であったため、減速後のビームのエネルギーが最小となる点を探した。その測定結果が図14(d)である。偏向電磁石 BMAD01 による曲げ角が最大となる軌道があり、周長を調整するひとつの指針となることがわかった。

主加速空洞の運転は1空洞あたり8.5 MV、2台で17 MVのCW運転を行っているが、そのビーム運転中のローレベルRF系は、振幅で約0.02%、位相で約0.02度の安定度を達成しており、cERL

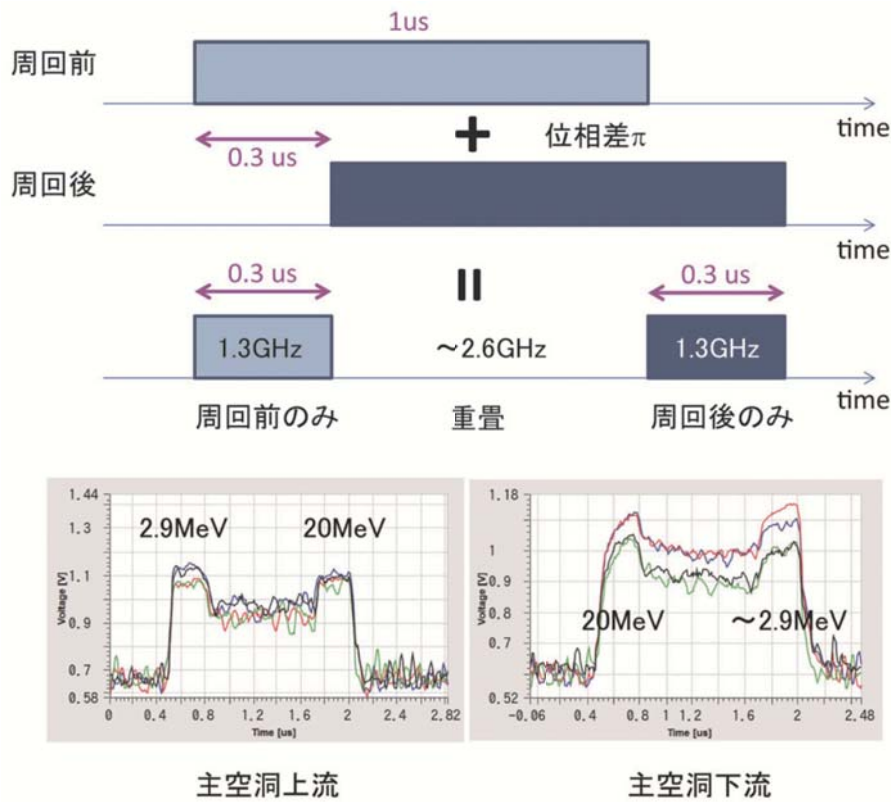


図12 バースト運転時のBPMによる2ビームの測定結果。BPMの信号処理はログアンプを使用している。2.9 MeVビームが十分光速に近くないためにBPMの位置によって位相差が完全に π になっていないことから、重畳されている時間帯も信号が見える。

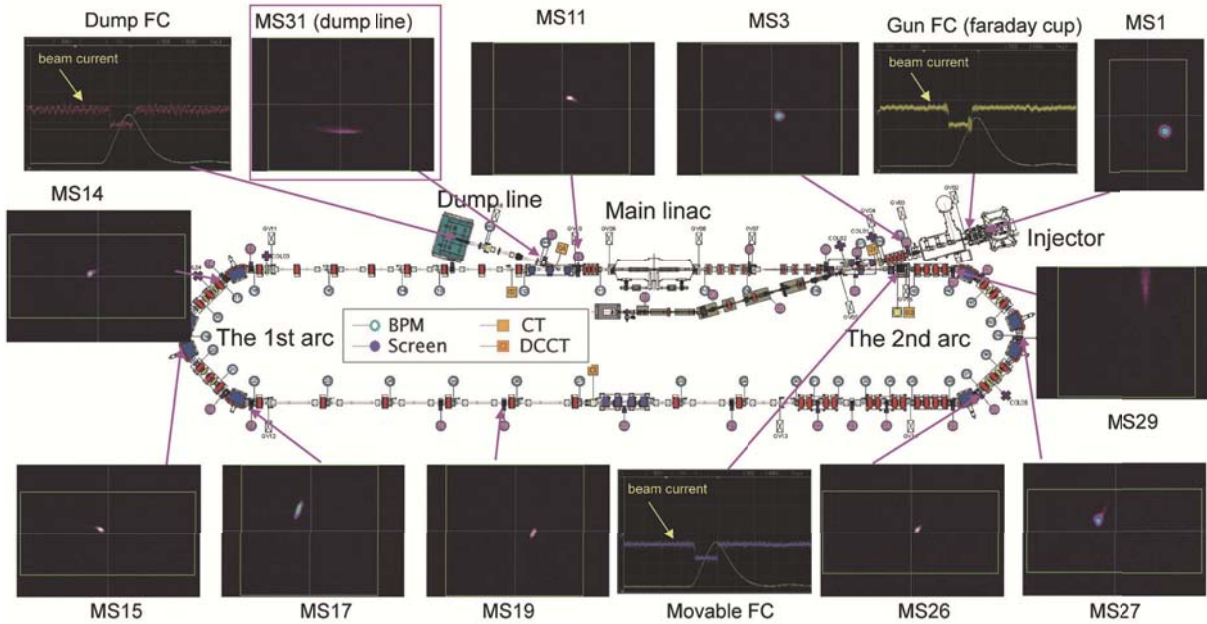


図 13 初めて減速ビームを確認した時のビームのスクリーン画像とファラデーカップの応答。

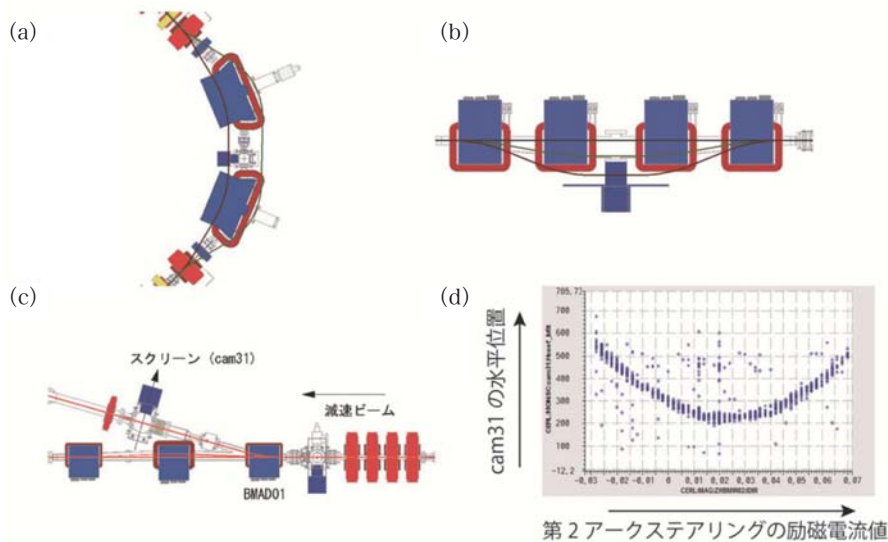


図 14 (a) アーク内のステアリングによる周長補正, (b) 周長補正シケインによる周長補正, (c) ダンプライン付近のラティス, (d) 第2アークステアリングの励磁電流と偏向電磁石 BMAD01 を通過後のビーム水平位置の関係。

に要求される安定度を十分に満たしている。

平均電流を上げるための大きな問題のひとつが周囲の放射線量を下げることである。平均電流が数 μA の CW 運転で 2014 年 3 月 7 日の放射線施設検査を行い、無事合格することができた（申請は最大エネルギー 35 MeV、最大電流 10 μA ）。3 月最終日の運転では、最大電流 6.5 μA の運転においても低い放射線量での運転を実施することができた。これは、12 月からの運転では使用していなかったバンチャーを起動したこととオプティクスのマッチングによってビームロスが減少

したためと思われる。短いバンチ長では 1.3 GHz の RF のカーブの影響が少なくなり、エネルギー広がりが小さくなっていることを偏向電磁石で確認している。

エネルギー回収をより直接的に証明するため 6.5 μA 運転の主加速空洞におけるエネルギー回収の試験を行った（図 15）。“ビーム負荷運転”では、上流空洞で加速、下流空洞で減速をすることによって、ビームを周回せずにビームダンプへ導いている。つまり、エネルギー回収無しの時の空洞の振る舞いを示している。図の縦軸には入力

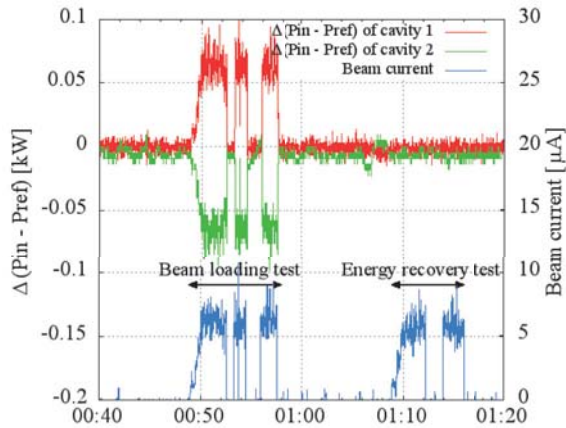


図 15 “ERL 運転 (Energy recovery test)” および “ビーム負荷運転 (Beam loading test)” における主加速空洞の入力 RF パワーと反射 RF パワーの差の変化量 $\Delta(\text{Pin} - \text{Pref})$ を示す。Cavity 1 および cavity 2 はそれぞれ上流および下流の空洞を示す。

RF パワーと反射 RF パワーの差の変化量 $\Delta(\text{Pin} - \text{Pref})$ を示す。ビーム負荷運転において、ビーム加速を行う上流空洞では、ビームに RF パワーを与えているため $\Delta(\text{Pin} - \text{Pref})$ が正に、ビームを減速する下流空洞は、ビームから RF パワーをもらうため、 $\Delta(\text{Pin} - \text{Pref})$ が負となる。一方で“ERL 試験”では、ビーム有り / 無しにかかわらず、 $\Delta(\text{Pin} - \text{Pref})$ に変化が見られないことから、測定誤差の範囲内でエネルギー回収がうまく行っていることが確認できる。

主加速空洞に関してはビーム運転中にも時折、放射線量の増加が観測されることがあった。またそれと同時に、図 9 に示すように空洞の Q 値が徐々に劣化していく様子も観測されている。対応策として、パルスエイジングを試みている。これは、8.5 MV・CW の加速電圧のベースの上に 2.5 MV 程度の電圧をミリ秒オーダーのパルスで上乗せする手法である。空洞のフィールドエミッションによって放射線量が増大した際には、パルスエイジングを行うことにより放射線量を半分程度に減らすことに成功している。

オプティクス調整にはまだ課題が残っている。分散関数の測定によって、アーク部がアクロマトかつアイソクロナスの条件からわずかにずれていることが判明している。また、一部の四極電磁石の応答が磁場測定の結果と合わない個所があるほか、周長補正シケイン通過後に水平軸のカップリングが発生しており、現在、原因究明を進めていると

ころである。また、BPM やスクリーンなどのモニタ類の較正、エミッタンスや twiss parameter などの測定などを並行して進行中である。

6. まとめ

およそ 2 カ月の入射部コミッショニングの後、周回部の建設が 5 カ月の短期間で終わった。その後、主加速空洞の大電力試験などを経て、2013 年 3 月にエネルギー回収の実証に至った。主な開発要素である光陰極 DC 電子銃や超伝導加速空洞の運転は非常に安定していることも分かった。現在はビームオプティクス調整が進行中である。

短期的な目標として、2014 年度末に行われるレーザー逆コンプトン散乱による X 線生成に向けて、オプティクスのマッチングなどの詳細なスタディを継続していく予定である。そして、将来光源の実現に向けて必要不可欠なハードウェアの R&D、ビームロスの低減や空間電荷効果のビームダイナミクス解明と低エミッタンス化など、様々な課題について取り組んでいく。

参考文献

- 1) N. Nakamura, “Review of ERL Projects at KEK and around the World”, Proc. of IPAC12, New Orleans, pp.1040-1044.
- 2) “Energy Recovery Linac Conceptual Design Report”, KEK Report 2012-4, KEK, October, 2013, URL: <http://ccdb5fs.kek.jp/tiff/2012/1224/1224004.pdf>
- 3) 羽島良一, 中村典雄, 坂中章悟, 小林幸則 編集, 「コンパクト ERL の設計研究」, KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032.
- 4) 羽島良一, 中村典雄, 坂中章悟, 小林幸則, 「エネルギー回収型リニアック次世代放射光源のための要素技術開発とコンパクト ERL の建設」, 加速器 **6** (2009) 221-227.
- 5) S. Sakanaka, et. al., Proceedings of ERL2013, Novosibirsk, Russia, p.16 (2013).
- 6) N. Nishimori, et. al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **17**, 053401 (2014).
- 7) S. Matsuba, et. al., J. Appl. Phys. **51**, 046402 (2012).
- 8) J. Hwang, et. al., Nucl. Instrum. and Meth. A **753**, 97 (2014).
- 9) Y. Tanimoto, S. Asaoka, T. Honda, T. Nogami, T. Obina, and R. Takai, Proceedings of IPAC2013, p. 3315.
- 10) K. Umemori, et. al., Proceedings of IPAC2013, Shanghai, p.2349 (2013).
- 11) N. Nakamura, et. al., Proceedings of IPAC14 to be published.