会議報告

会議報告：Workshop on Energy Recovery Linacs（ERL 2015）

羽島 良一*1・山本 将博*2・中村 典雄*2・阪井 寛志*2・帯名 崇*2

Report of Workshop on Energy Recovery Linacs（ERL 2015）

Ryoichi HAJIMA*1, Masahiro YAMAMOTO*2, Norio NAKAMURA*2, Hiroshi SAKAI*2 and Takashi OBINA*2

エネルギー回収型リニアック（Energy-Recovery Linac; ERL）は，大電流かつ高輝度の電子ビームを高エネルギーに加速できる装置である．1990年代に高出力赤外FELのために開発が始まったERLは，その後，シンクロトロン放射光をはじめとした次世代光源や電子・ハドロンコライダーなど，その利用可能性を広げてきた．超伝導加速器を基盤技術とするILCやXFELといった大型計画との連携もあり，ERLの技術は着実に成熟しつつある．本ワークショップは，ERLの技術的な課題，将来の応用を議論するために隔年で開催されている．今回は，米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）が主催し，BNLに近いStony Brook大学を会場として2015年6月7～12日に開催された．参加者の顔ぶれは，RHICのアップグレードとしてERLを用いた電子・ハドロンコライダー（eRHIC）を計画し，ERLの試作器を建設したBNL，高出力FELで実績がありBNL同様に電子・ハドロンコライダーを計画するジェファーソン研究所（JLAB），次世代光源を目指してERL技術の開発を進めているCornell大学，HZB（ベルリン），Daresbury，北京大学，KEK，JAEAといったERL研究でお馴染みのグループに加え，LHCのアップグレードでERLを検討しているCERNなどから，計114名であった．会議冒頭の全体講演では，1965年にERLを最初に提案したMaury Tigner氏（Cornell大）によるERL 50周年の記念講演を皮切りに，各施設からのトピックスが報告され，その後，5つのワーキンググループに分かれて，発表と議論が行われた．

WG1は，電子銃に関する報告と議論であった．70 mA相当の入射器運転を実証したCornell大では，これまで問題だったエミッタンスのx-y非対称性が電子銃近傍のソレノイド磁石の発生する微小な四極磁場によるものと判明し，補正コイルを導入したところ，非対称性が解消し，電荷量300 pCで規格化エミッタンス（95%）は0.62（水平），0.60（垂直）mm-mradとなった．LCLS-IIの入射器としての要求も満たすものである．BNLの次期計画（eRHIC）は偏極電子とイオンの衝突加速器である．これに用いる平均電流50 mAの偏極電子ビーム源として，20個の光陰極を実装するFunneling DC電子銃が紹介された．電子銃は立上げの段階であり，まだ電圧は数十kVで電流値も数十nAではあるが，2つの光陰極からビームを取り出し，下流の偏向磁場を切り替えてビームを合流する試験の様子が報告された．DC電子銃では，cERL電子銃の運転に関する報告（JAEA西森氏），500 kV電子銃2号機の報告（筆者, 山本）があった．WGのサマリーでは，JAEAとKEKの電子銃がhigh voltage and high gradient frontierとして言及された．超伝導RF電子銃についてBNLとHZDR（ELBE）から，DC-SRFの複合型電子銃は北京大から報告があった．BNLではSRF-gunの立上げが進み，Cs_3Sb光陰極からのビーム生成試験が行われている．現状では陰極プラグ近傍でのマルチパクタの問題があるようだが，約0.8 MeV，0.5 nCの運転を開始した．HZDRのSRF-gunは2014年に立ち上げた2号機に関して，Cuカソードで約9 MV/mの加速勾配で最初の運転を行い，暗電流を

*1 日本原子力研究開発機構　JAEA, Japan Atomic Energy Agency
（E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp）
*2 高エネルギー加速器研究機構　KEK, High Energy Accelerator Research Organization

発生しない加速勾配が1号機の2倍程度まで改善されたが，その後 Cs_2Te 光陰極の導入に伴いフィールドエミッションの増加が問題となっている．北京大ではバーストビームであるが，3.4 MeV，0.55 mA のビームを Cs_2Te 光陰極から安定に引き出している．光陰極に関しては，CsK_2Sb，Cs_3Sb，NEA-GaAs について，BNL，HZB，Stony Brook 大学，Daresbury から報告があった．特に CsK_2Sb についての発表が多く，成膜した光陰極を XRD，XRR，XPS などでその場観察し，結晶構造，各原子の結合状態，成膜方法の違い（蒸着，スパッタ）や基板の種類（Mo，Ta，MgO，Si）と表面粗さの関係，量子効率への影響評価など研究の進捗が報告された．

WG2 では，ビームダイナミックスとオプティクスに関する話題を扱った．今回は，FFAG（Fixed Field Alternating Gradient）ERL に関する発表が多かった．これは，会議ホストの BNL の次期計画（eRHIC）が多重周回 FFAG-ERL を採用したためである．従来の周回毎に異なるアーク部を通す設計を変更し，1.3-5.3 GeV の4ビームと 6.6-21.2 GeV の12ビームを各々集約して2つの FFAG ビームラインで輸送することになった．4倍近いエネルギー比のビームが同じビームラインを周回することになる．この FFAG の試験のために，BNL と Cornell 大が共同で FFAG ERL を Cornell 大へ建設することを提案している．計画では，6 MeV の入射ビームを 70 MeV リニアックで4回加速して 286 MeV とし，4回減速してエネルギー回収する．4周回の加減速は eRHIC の低エネルギー FFAG に対応している．これら2つの ERL 計画のオプティクス設計，軌道補正，シミュレーション結果等が報告された．また，FFAG ではないが，CERN の LHeC 計画における3ターン ERL のオプティクス設計とビームダイナミックス及び ERL 試験機の設計についても発表があった．さらに，マイクロバンチ不安定性に関連する発表も見られた．マイクロバンチ不安定性は，圧縮されたバンチ内で何らかの原因でエネルギー広がりやマイクロバンチが成長する現象であるが，ERL 周回部の CSR 等の影響を入れたシミュレーション結果が報告された．この他，WG4 との合同セッションで Chen Si 氏（KEK）らの空洞 HOM の BBU シミュレーションに関する発表，CSR の影響を抑えるアーク部のオプティクス設計の発表があった．最後のセッションではビームハローとロスに関する議論が行われた．JLAB や Cornell 大ではコリメータ使用の経験がないこともあって，KEK cERL におけるコリメータの有効性について ERL を建設中の施設から多くの質問が集まった．また，ビームロスの原因についても議論があった．cERL の主なロスの起源としてカソードの時間応答などに起因するバンチテールの可能性が考えられているが，詳細な調査や解析はこれからである．次回ワークショップまでの「宿題」になった．大電流 ERL の実現に向け，ビームハローとロスは今後の大きなテーマの1つになるだろう．

WG3 では ERL に必要なビーム診断，ビームロスと制御に関する議論を行った．特に多種多様なビームパターン（CW，Macro pulse，Single Bunch とそれらの組み合わせ）や，数 fC ～ nC にまでわたる広いダイナミックレンジでの測定などを中心に議論がなされた．Daresbury の ALICE では ERL ベースの共振器型 FEL を運転している．マクロパルスごとの FEL 強度変動は 1% 程度ではあるものの，高速赤外線モニタでの測定でパルス内部に 100 kHz 程度の強度揺らぎがあることが判明した．各種診断装置を開発し，ビーム位置との相関やレーザー強度による依存性があることが報告された．今後は診断機器の改善と抑制方法の開発が期待される．BNL の ERL はコミッショニング中であり，診断機器が順調に稼働している様子が紹介された他に，様々な電子ビームパターンに対応したビームロス検出システムとインターロックへの組み込みが紹介された．“pilot macro bunch”の導入など興味深い試みがなされている．また，2台の DCCT を使用した電流差分検出システムも導入されており，今後のビーム運転での検証が待たれる．KEK からは ERL 特有である2つのビームが同じ真空容器を通過する領域でのビーム位置検出に関して，適切な周波数成分と加速器の周長差を利用した時間分離方法が提示され，実際のビーム測定によってこの方式が有効であることが示された．Cornell 大では CW 大電流運転で問題となるイオン捕獲の効果についてビームサイズ測定やイオン電流測定などの結果が報告された．対策として，バンチギャップ挿入やイオン除去電極などの有用性についても理論との比較も含めて測定結果が報告された．この他，ワイヤー

スキャナを高速回転体に取り付けた大電荷ビームプロファイル測定機器について，振動解析や実際のスクリーンモニタとの比較などを通して有用性が示され，聴衆の反応も非常に良かった．WG3 セッション全体を通して“実際に大電流でのビーム運転・調整を行いながら高度なビーム診断機器開発を行う”という当たり前のことの重要性を改めて認識した．

WG4 では超伝導空洞と RF に関しての議論を行った．ERL13 からの大きな飛躍である high-Q 空洞の進展について Fumio Furuta 氏（Cornell 大）から報告があった．LCLS-II のために FNAL で行っている新しい表面処理（窒素ドープ）を施した 1.3 GHz 9 セル空洞にて，従来の 3 倍の Q 値（3.2 × 10^{10}）が 16 MV/m@2 K で得られた．さらに，Cornell 大の 1.3 GHz 7 セル空洞でも低速冷却により，窒素ドープを用いない通常の表面処理（120℃ベーキング + HF 洗浄）で同じく 3.5 × 10^{10} を横測定にて 16 MV/m@2 K で実現した．冷却速度および磁場に対する感度などの点から，これまで到達できなかった high-Q がこの 2 年でどのように実現したのか報告され，大きな議題となった．Cornell 大の空洞では，間もなく行われるハイパワー試験の結果に注目が集まる．cERL クライオモジュールの長期ビーム運転下での空洞性能変遷について阪井（筆者）が報告した．ERL 用 1.3 GHz 9 セル空洞 2 つを有する主加速空洞クライオモジュールは，長期運転中に Q 値が劣化し，8.6 MV × 2 台でフィールドエミッションの増大があったが，2 空洞とも 1.5 ヶ月間は放電等によるトリップなしであった．cERL 空洞の安定運転実現の詳細，今後の大電流化への対応が議論になった．また運転中のフィールドエミッションの低減も全ての ERL に共通した話題として，多くの参加者による議論があった．100 mA 実現に向けての HOM 対策では Cornell 大の入射器試験施設で CW 40 mA（バンチ長 2.7 ps）で 7 セル空洞につけた HOM 吸収体が問題なく動作しており，100 mA に向けた HOM 吸収体開発が順調に進んでいる状況が窺えた．RF 制御に関して，Qiu Feng 氏（KEK）から cERL にて，FPGA での LLRF 制御を行い，RF 振幅と位相の変動を，それぞれ 0.01%以下，0.01° 以下に抑え，ビーム運転でも 0.0065%（rms）のエネルギー安定度を得たとの報告があった．FNAL ではピエゾによるチューナー制御で共振周波数の変動 0.011 Hz（rms）以下を実現している．RF の安定制御に関しては実機 ERL に向けて全く問題ないと結論づけられた．

WG5 では，利用研究の発表と議論があった．光源利用では，次世代リソグラフィ用 EUV-FEL（筆者，中村），核種分析のためのレーザー・コンプトン γ 線源（筆者，羽島），X 線放射光源（KEK 河田氏）について，ERL の特長を生かした利用の展望が示された．Oxford 大学から，レーザー・コンプトン X 線と THz 発生のための小型 ERL の計画が新たに披露された．加速管と減速管を分離することで，1 A 以上の大電流ビームを安定に加速する装置である．光源以外の利用では，BNL，JLAB，CERN の電子ハドロンコライダー計画に加えて，Mainz 大の原子核実験用 ERL（MESA）の建設が進捗している様子が報告された．Cornell 大は，BNL と共同で立ち上げる FFAG-ERL の利用として，ダークマター探査といった素粒子原子核のテーマ，短パルス X 線による構造物性の研究などを広く議論している．WG サマリーでは，「ERL の golden experiment は何か？」の質問に対し，γ 線，コライダー，高出力 FEL に期待するとの回答があった．

次回のワークショップは，2017 年に CERN がホストすることが決まった．