

■マスタープラン2014 & 放射光光源将来計画討論会報告

ERL 計画およびコンパクト ERL の現状

河田 洋 (高エネルギー加速器研究機構, ERL 計画推進室)

ERL (エネルギー回収型リニアック) 計画は、2005年に KEK の物質構造科学研究所の運営会議のもと「フォトンファクトリー次期光源検討委員会」で国内の関係研究者の議論を経て決定された次期放射光源計画である。その光源の特徴は「汎用性と先端性、連続性と飛躍」という言葉から理解できるように、デイリーツールとしての放射光源と同時にコヒーレント・超短パルス放射光を実現し、放射光科学の飛躍を目指す光源である。

その後2006年4月、KEK 内に ERL 計画推進室が設置され、ERL 加速器の開発研究が、KEK のみならず JAEA や東大物性研等の9つの研究組織にまたがった研究者集団からなる協力チームによって進められている。現在 KEK における ERL 計画に寄与する人員の FTE (常勤換算) は21名に達し、十分に充足しているとは言えないが、KEKB, J-PARC, LINAC, について4番目の開発集団にまで成長してきている。今年度の4月に評価を受けた「KEK ロードマップ」の中には「コンパクト ERL により ERL の加速器技術を実証する。これにより ERL が新たな研究分野を開拓する光源であることを示して、3 GeV-ERL 建設開始を目指す。」という文言が明記されるに至っている。

ERL は、超伝導加速器をベースにした大電流 CW 入射器を心臓部として、超高輝度 (17 pmrad を目標)、短パルス X 線 (0.1~1 ピコ秒) の電子ビームを周回させ、放射光を発生させ、そのエネルギーを回収すると同時に次のエネルギーの低い電子の加速を実現するものである。3 GeV-ERL の Conceptual Design Report (CDR) は2012年度の KEK レポートとして出版し、http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/database/ERL_CDR_full_text.pdf のサイトからダウンロードできる。また、3 GeV-ERL は将来の発展として 1 MHz 程度の高い繰り返しによる共振器型の自由電子レーザー (XFEL-O) をも射程にのせた計画である。ユーザーの方々に馴染みが深い放射光の輝度で言うならば、ERL は 10^{22} (Photons/s/mrad²/mm²/0.1%b.w.), XFEL-O は 10^{27} 程度を目標としており、正に飛躍を現実とする光源である。このような光を用いて、従来の放射光科学が主に展開してきている「Static and homogeneous systems」の物質科学から「Dynamic and heterogeneous systems」への物質科学への更なる広がりを約束しようとするものである。この CDR をもとに、昨年7月に 3 GeV-ERL 計画における国際諮問委員会を開催し、加速器技術及びサイエンスケースに関して助言をいただいている。委員会のア

ジェンダ及び答申内容は以下のサイトを御参照いただきたい。http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/database/ERL_AC/ERL_iac3gev/index.html

一方、ERL の技術開発は、cERL を建設することにより、その開発のためのプラートホームを形成して来た。歴史的には、ERL 推進室発足後、まず開発基地の確立のために cERL を検討し、2008年2月にその CDR を作成した (http://www-lib.kek.jp/cgi-bin/kiss_prepri.v8?KN=200724007&OF=8)。その後、KEK の機構内予算、及び補正予算で部分的な開発を開始し、2010年4月に「ERL 評価専門委員会」で評価頂き (http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/erl_hyouka/index.html)、2012年度末に cERL の電子ビーム運転を目標にして、その建設を開始した。途中に東日本大震災等の開発の中断時期もあったが、2013年4月に cERL の入射部電子ビーム評価運転を開始し、放射線施設検査に合格する (<http://imss.kek.jp/news/2013/topics/0529cERL/index.html>) と同時に入射部の電子ビーム調整運転とその評価を開始している。

cERL の目的は、3 GeV-ERL 光源実機に向けて、高輝度光発生に必要な低エミッタンスかつ大電流の電子ビームの生成、加速、周回の実証を第1の目的とし、そのための ERL コンポーネント (電子銃、超伝導空洞) の開発とそれらの安定な運転の実現を目指している。当面の目標は、35 MeV の加速エネルギーで規格化エミッタンス $1\text{ mm}\cdot\text{mrad}@7.7\text{ pC/bunch}$ (10 mA) である。4月から開始された入射部調整では順調に高輝度電子銃の運転、入射部超伝導空洞の運転を実現し、一週間のうちに無事に施設検査を受けるに十分な加速器性能を確立した。施設検査後、高輝度電子銃、超伝導空洞、バンチャー空洞、冷凍機、電磁石、モニター、コリメータ等の評価を行うとともに、ビーム調整法の確立、そしてエミッタンス、バンチ長、エネルギー拡がりという重要なビーム品質の測定を行ってきている。詳細は加速器学会をはじめとする関係学会で報告するが、例えば微小バンチ電荷に電子ビームのエミッタンスは理論的に予測される限界値を実現していることを検証すると同時にバンチ電荷を増大させたときのエミッタンス測定も開始している。また、各加速器要素はほぼ、それらの性能を確認すると同時に、それらのコントロールソフトウェアの充実を同時進行で進めている。

6月1日の討論会でも今後の予定として報告したが、7月に入り、夏のシャットダウンとなり、周回部のマグネット、真空ダクト、モニター等の設置作業が現場では開始さ

れた。10月末までに周回部の建設作業を終了し、いよいよ、11から12月にかけて、ERLとしての周回運転のコミッションを開始し、今年度中に放射線の施設検査に合格し精力的な調整運転を行う予定である。2014年度は順次、電流値を段階的に増加させ、周回運転でも第1目標である規格化エミッタンス $1\text{ mm}\cdot\text{mrad}@7.7\text{ pC/bunch}$ の実現を目指す。また、cERLは単なる加速器の開発拠点だけではなく、特徴ある利用研究の拠点としても今後運転を継続していくことを考えている。具体的に、一つはレーザー逆コンプトン散乱 X 線ビームラインを建設し、JAEAグループから提案されている核燃料評価の R&D や、広視野とレーザー光共振器による高強度 X 線イメージング研究、そして準単色 X 線による100フェムト秒時間分解 X 線実験を想定している。すでに、JAEA では補助金を獲得し、また続いて他の競争的資金の目処も立ちビームラインの建設は2014年度に行うことが決まっている。二つ目はコヒーレントテラヘルツ放射光を用いた高速ダイナミクス研究である。こちらもすでに競争的資金の目処が立ち、2015年度にビームラインを建設し、研究拠点を構築する予定である。

上記のように、cERL を用いて一歩ずつ ERL の加速器要素の開発を行える状況となってきた。この cERL を用いて、最終ゴールである 3 GeV-ERL の要素開発の更なる R&D は必須である。R&D 項目として、

- 1) 電子銃の開発研究、特にフォトカソード材質、持続性、エミッタンスの実現。
- 2) 超伝導加速器空洞の開発研究、特に主加速空洞におけるフィールドエミッションフリー化、HOM 吸収体開発、空洞多連化、そして大量生産化への見通し。
- 3) ビームダイナミクスに関する研究、特にビームハロー、ビーム安定性、放射線安全性の確立が挙げられる。

特に1)の問題は非常に重要である。KEK, JAEA をはじめとする我々の開発では、DC 電子銃にとって重要な世界的な開発要素であった500 kV の安定印加に関して、分割型セラミックダクトを導入することですでに目処を立てている。世界の施設（コーネル、ジェファーソン、IHEP）は、この技術の導入を開始している。一方、コーネルは、近年、精力的に新しいフォトカソード開発を開始し、従来の GaAs から CsK₂Sb, Cs₃Sb 等のアルカリ・カソードの進展が報告されている。すでに70 mA を超える電子ビームの生成と60 mA で30時間程度のライフタイムが報告されている。我々も、広島大学の研究グループとの協力のもと、マルチアルカリ・カソードの評価テストと、cERL への導入の検討を開始している。このような地道な開発研究

によって、この問題は一歩ずつ解決していくことを目指している。

2)の問題に関しては、何より重要なことは現在導入している2台空洞を搭載した加速空洞でcERLの電子ビーム運転を行い、その経験から数々の問題点を洗い出すことがまず重要である。その運転は今年度末に開始される。その上で、今後の開発項目としてフィールドエミッションフリーを目指した超伝導空洞形状の更なる最適化と組立方法の改善、そして冷却空洞の性能回復手段としてヘリウムプロセスの手法等の検討を現在開始している。また、HOM 吸収体の改善に関しては、現在のフェライトだけではなく、SiC 等の他材質を用いた吸収体の試作を検討している。これらの要素技術の開発を進めながら、多連化として最低限必要となる4台空洞を搭載したモジュールの設計と実現を計画している。また量産体制の構築に関しては、KEK 内の設備を最適化することで実現する具体的な検討が開始された。

3)の問題に関しては、いずれも重要な開発項目であるが、cERL の運転の中で段階的に開発していく項目と考えている。

以上をまとめると、今後 cERL を用いて電流増強を図りつつ、現在の加速器要素の問題点を洗い出す作業を行う。フォトカソード開発に関しては国内の開発拠点を構築すると同時にコーネルをはじめとする国際的な協力関係の下に開発研究を進める。超伝導空洞に関しては、フィールドエミッションフリーを目指した要素開発を行いつつ、4台空洞を搭載したモジュールの設計とその実現を図る。それらの技術要素は cERL に導入し性能を評価すると同時に、利用研究であるレーザー逆コンプトン散乱実験やコヒーレント THz 利用実験にも供される。現在の見通しとしては2014年度から2017年度までの4年間で上記の技術的な目処を立てて、2017年度末に技術設計書（Technical Design Report）を作成することを目標としている。

放射光学会が取りまとめた学会会議のマスタープランの骨子は、

- 1) 3 GeV クラスの第3世代放射光源を第1優先で実現。
- 2) その次の段階で X 線回折限界放射光源である、ERL もしくは SPring-8 II の実現を目指す。

であるが、このスケジュールと整合性があるように、回折限界放射光源計画の一つとして着実に開発を進めていきたい。すなわち、ERL 推進室として ERL の開発研究を今後も続行し、cERL の運転を通してその性能をブラッシュアップしていくことを考えている。放射光ユーザーの皆様のご支援を賜われれば幸いである。