

ERL 評価専門委員会報告

平成29年11月24日

1. 経緯と現状の認識

コンパクト ERL (以下 cERL) は、Photon Factory (PF) の将来計画としての 3~5GeV 級の ERL の建設実現へ向けて、その試験加速器として設計開発、建設、試験運転が進められてきたものである。cERL の設計は 2007 年度に開始され、2009 年度から整備が開始された。cERL で達成すべき目標の設定については、2010 年 4 月 17 日付けの ERL 評価専門委員会 (生出委員長) の報告において、2012 年度末までに 35MeV、10mA、入射部エミッタンス $1\mu\text{m}$ を実現する、という目標設定は妥当である、という評価がなされている。東日本大震災などの事情により運転開始が 2013 年度からと大きく遅れたことは残念であったが、これは加速器技術開発の遅れに伴うものではないと理解している。その後、毎年 2 か月弱程度と、KEK 内の予算的事情により必ずしも十分な運転時間ではないものの、運転調整が継続されてきた。その間、放射光科学を取り巻く状況の変化の中、2016 年度に ERL 総括委員会の議論を経て、ERL の次期放射光源としての位置付けが消滅し、cERL も次期放射光源へ向けてのテスト機としての役割は終えた。一方、KEK Project Implementation Plan に基づき、産業利用へ向けた加速器基礎技術開発にその目的を変更している。

本委員会では、上記のような経緯と現状を認識した上で、これまでの ERL 計画における加速器及び利用技術開発について評価を行ない、また、今後の技術開発への提言を行う。

2. これまでの技術開発に関する評価

(1) 加速器構成要素

<全体設計>

cERL は、回折限界放射光源用実機に必要な要素技術開発と実証を目的として当面のビーム性能の目標を規格化エミッタンス $1\mu\text{m}$ 、ビーム電流 CW-10mA、電子バンチ長 1~3psec に定め設計された。ERL の要素技術開発とその実証に必要な開発項目は基本的に全て設計に盛り込まれており、パルス圧縮運転やビーム利用など様々な運転条件に対応可能な柔軟な設計になっている。入射部は高品質なビーム性能を実現するために入念なシミュレーションに基づく設計がなされており、また、周回部のラティス構造は大型機にも適用可能な設計になっており cERL においてその基本性能の検証を行うことができるように配慮されている。全体として、明確な目的に沿った妥当な設計がなされていると認められる。

<電子銃>

電子銃単体として設計目標の 500kV、10mA、 $0.1\mu\text{m}$ (7.7pC)、 $1\mu\text{m}$ (77pC) に向けて順

調に技術開発が進んでいる。特に、分割型セラミック管という独自のアイデアに基づき 500kV 印加可能な電子銃を世界に先駆けて開発できた点は特筆に値する。この電子銃の方式は既にいくつかの海外の施設において採用され始めており、今後、世界標準の技術として定着するものと期待される。また、実使用条件下での運転経験から、放電閾値や各部の帯電に関する貴重な知見を得ており、この分野における最先端の領域を切り拓きつつある。特に最大印加電圧が 500kV を超えてどこまでいけるのか、継続して追求すべきであると思われる。なお、陰極材料として、回折限界光源に向けてエミッタンス特性を重視し半導体系の材料を用いているが、後述する EUV-FEL など今後の開発においてはエミッタンスではやや劣るが寿命の長いマルチアルカリ系の陰極材料を用いるのが適当と思われる。一方、半導体系の陰極材料については、大学などと協力し、長期的に開発を進めるのが妥当と思われる。

<超伝導加速空洞>

超伝導加速空洞単体では要求性能に対し、十分な性能が得られており、ERL に必要とされる空洞そのものの設計・製造技術はほぼ確立されたものと評価できる。一方、その後の組み立て段階での性能劣化が著しく、当初の目標での加速勾配での運転ができておらず cERL の電子エネルギーが 20MeV に止まり目標の 35MeV に達していない原因となっている点は残念である。組み立て段階でのダストの混入を性能劣化の原因としているが、欧米の機関でも同様な問題が認識されているとのことであり、先行して量産体制を構築しつつあるそれらの機関との連携により標準的な組立技術を早急に確立することが望まれる。

なお、回折限界放射光源に向けての最終目標である 100mA のビーム加速のための設計上の工夫がいくつかの技術的困難を生む原因 (HOM カプラー、フィールドエミッションなど) となっているようである。後述する EUV 光源への応用では 10mA 程度のビーム加速を想定して空洞設計を見直すとのことであるが、その方針は妥当であると思われる。なお、cERL 開発を通じて、空洞の劣化を回復させる技術として、パルスエージングの有効性がある程度実証できた点は評価できる。加速器組立後もダストの混入はあり得ることから、この種の手法の開発の継続は強く推奨される。また、海外においては窒素ドーピングといった革新的な手法も発見されているが、残念ながら cERL の開発では、このような革新的な技術の開発までは手が回っていないのが現状である。国際リニアコライダー計画 (ILC) へ向けた技術開発などと連携し、長期的な目標として Q 値のさらなる向上や 4K 冷却での超伝導加速空洞の実現に向けた技術開発を継続的に進める中で革新的な技術が生み出されてくることを期待したい。

<その他の加速器システム>

RF システムについては、KEK において蓄積されてきた技術を活用することで、cERL さらには 3GeV-ERL に求められる位相や振幅の極めて高い安定性が実現されている。これは

ILC に求められる安定度を一桁程度上回るものである。また制御ロジックにおける新しい試みにも取り組んでいる点は評価できる。

ビーム診断、加速器制御、インタロックシステムについても、KEK に蓄積されている技術を活用することで、cERL に求められる性能を実現している。実運転を通じて ERL 特有の 2 つのビームの位置を同時に計測する手法を見出すなど、新しいビーム計測法もいくつか考案され実証されるなどの成果があがっている。その他、電磁石系、真空系なども既存の技術の活用で要求性能を達成しており、これらは KEK の加速器技術の水準の高さを示すものである。

なお、これら加速器要素技術開発で得られた新しい知見・成果は最終的には学術誌への掲載を通じて評価されるべきものである。国内外の研究集会での発表はそれなりに行われており、今後、学術誌での論文発表を通じた成果発表を期待したい。

<冷凍機システム>

冷凍機システムは cERL 全体の消費電力の約半分を占めており、将来の超伝導直線加速器開発においてもその低コスト化は重要な課題となる。cERL の冷凍機システムは、中古の液化器を再利用するなどの努力により、コストを抑えて建設された点は評価できるが、一方で、将来へ向けたコスト削減に関する新しい取り組みまでは手が回っておらず、今後一層の注力を期待したい。冷凍機システムに加え、加速空洞開発、ビームの複数周回方式の検討など、建設・運転コスト削減へ向けた総合的な取り組みが強く望まれる。

(2) 加速器運転・ビーム制御技術開発

財政的な事情により年間 2 か月弱と運転時間が限られる中で、cERL という新しい加速器のコミッショニングを着実に進めてきた点は極めて高く評価できる。大きな障害もなく目標性能達成に向けて運転調整を続けることができたことは、加速器装置の入念な設計と製作の成果である。

目標として掲げた 35MeV、10mA、1 μ m というビーム性能のうち、電子エネルギーについては加速空洞の加速勾配の制約から 20MeV に止まっているが、加速空洞の問題が解決されれば、35MeV の達成に困難はないものと考えられる。

ビーム電流については、放射線変更申請を進めつつ 1 年に一桁ずつ着実に電流値を上げることに成功している。現在、CW-1mA に到達しており、またパルスあたりの電荷量では CW-10mA 運転に相当する電荷量での運転に成功している。次の段階で 10mA 運転へ進む予定とのことであるが、漏洩放射線も現状の遮蔽体で運転に支障のない範囲に抑えられており、放射線安全の観点からもその達成には大きな困難は伴わないことが予想される。以上のことから、当初の目標性能に概ね到達しつつあると判断される。

エミッタンスに関しては、上記の 10mA 相当のバンチ電荷で、入射部については 1 μ m の目標値を達成しており、周回部についても概ね到達している。段階的に電流を上げながらビ

ーム調整法を進めることで、品質を損なうことなくビームを輸送する技術、ビームハローに関する知見、エネルギー回収やバンチ圧縮などの技術が着実に積み上げられつつある点は高く評価できる。今後の継続的な運転時間の確保によりこの世界を先導する技術開発がさらに進むことを期待したい。

(3) 加速器利用技術開発

cERL の低エミッタンス性の活かせるコンプトン散乱 X 線源と短パルス・高繰り返し性を活かせる大強度テラヘルツ光源の実証実験が試みられている。前者においては数 10 ミクロン程度の微小光源という特長を活かした結果が得られている。電子線とレーザーの相互作用はそれほど強いものではないことを考慮すれば、この応用をさらに展開するにはレーザー側の強度の向上が不可欠である。現在、超短パルスレーザーは急速に大強度化・小型化が進んでおり、レーザー分野との学術的・技術的交流と協力関係の継続的な発展による今後の展開を期待したい。また、cERL によるテラヘルツ放射や FEL など他の光源との併用（ポンププローブ法など）も検討に値すると思われ、幅広い学術的共同研究が今後必要不可欠である。また、後者（テラヘルツ光源）は、発生が確認された段階に止まっているが、極めて高強度の広帯域テラヘルツ光の生成が原理的に可能であることから、産業利用も含めた幅広い研究者と密接に連携して、利用法開拓を進めるべきである。

(4) 今後の展望

PF 次期計画としての ERL の位置づけが消滅したことを受けて、今後の ERL 技術の展開として、半導体製造用光源に向け ERL 加速器により駆動される極紫外自由電子レーザーの開発の検討を進めている。高繰り返し自由電子レーザーへの技術展開は超伝導加速器ならではの特長を活かせるものであり、KEK の技術が世界的展開を目指していく上での一つのモデルとして期待される。一方で高い可用性が求められるこの種の技術へ ERL という新しいタイプの加速器を応用することは技術的には大きな挑戦と思われるが、関連企業等と密接に連携して検討を進めた結果として一定の見通しを得ているようである。加速器利用の新しい地平を切り拓く挑戦的な試みであり、成功を期待したい。これまでの cERL における技術開発の結果を見ると、レーザー発振に必要なビーム性能が実現できる可能性は十分に高いと思われる。一方で、加速空洞の製造技術の一層の向上や総合的に見た省エネルギー・低コスト化の取り組みは必須と思われる。なお、極紫外域の高繰り返し自由電子レーザーは産業応用に加えて学術利用面も大いに期待される。従来の PF 利用者に限らない幅広い領域の研究者との連携をすすめるべきであろう。

ERL による EUV-FEL 光源へ向けて、cERL を近赤外領域での高繰り返し自由電子レーザー発振の実証機に改造することが提案されている。これに向け加速空洞を中心とした改造

により電子エネルギー100MeV、ビーム電流 10mA の装置への高度化を目指している。計画の第一段階としてはおおむね妥当と判断されるものの、SASE の原理に基づく自由電子レーザーが世界各地で稼働している現状を考えると、実現を目指す近赤外領域の自由電子レーザーが単なるレーザー発振の実証に止まるのであればやや物足りない。今後の展開を考えると、何らかの利用を検討するか、あるいは cERL の多周回化による電子エネルギーの増強を試み、短波長化の可能性を検討することが必要と思われる。

ERL の利用の展望として、高精度 X 線イメージング、医療用 Tc99 製造、核セキュリティシステムへの応用などが検討されているが、半導体製造用光源の検討と比較して、経済的合理性などの問題が課題となっており、関連企業などと連携して、さらに慎重に検討を行うことが必要と思われる。その際には量産による低コスト化などに関しても考慮する必要がある。

なお、上記の ERL の産業利用の検討は KEK Project Implementation Plan で示された方向性に沿ったものとなっているが、基礎研究・学術利用も併せて考えることは、ERL のような先進加速器の将来の発展にとって必要不可欠である。学術利用の様々な分野への展開の検討とそれに向けた配慮が今後の開発において継続的になされることを強く望む。

3. 今後の技術開発へ向けての提言

まず始めに、東日本大震災や予算の制約による限られた運転時間といった様々な困難を乗り越えて、目指した装置性能を実現しつつある研究者・技術者と、厳しい財政事情にもかかわらずこの研究開発を支援してきた KEK に敬意を表したい。

ERL 計画は、超伝導直線加速器の有する様々な特徴のうち、CW ビーム、超低エミッタンス到達可能性の 2 点を活かしてストレージリングに代わる次世代の放射光源を目指す計画であり、PF リングの後継機と位置付けられ計画が進められてきた。しかし、その間、ストレージリング技術において低エミッタンスへ向けた進展があり、現状の放射光源のエミッタンスの一角先を狙う次世代放射光源候補としては、その建設コストや技術的な成熟度の点でストレージリングに劣ると判断され、PF 次期計画としての役割を終えたものと理解する。

しかしながら、この判断は、超伝導直線加速器が本来持っている、CW もしくは高繰り返しで超低エミッタンスあるいは超短パルスといった高品質のビームを供給できる次世代加速器としての可能性に疑問を投げかけるものでは決してない。ストレージリングは高繰り返しであるが同じビームを繰り返し利用し、また、常伝導直線加速器は新鮮なビームを供給するが低繰り返しであるのに対し、超伝導直線加速器は新鮮で高品質なビームを高繰り返しで供給し続けることができる。これは、自由電子レーザーなどビーム自身に大きな摂動を与えるような利用法において、また、超短パルスビームのように長時間ビーム形状を維持することが困難である場合に決定的に優位である。さらに今後の電子源技術開発によっ

では最先端のストレージリング放射光源でも到達困難な超低エミッタンスへ到達できる原理的な可能性を秘めている。加えて、このような超伝導加速器技術が生み出す高品質ビームの特性は様々な物質科学研究、生命科学基礎・応用研究への展開に決定的と言ってよい優位性を持っている。

このように超伝導加速器技術は従来の加速器の限界を打ち破るキーテクノロジーであり、学術研究は言うまでもなく、産業利用、医療など幅広い分野における今後の加速器利用の発展の基礎となるものである。このことは、既に LCLS-II や Shanghai-XFEL などの次世代 X 線自由電子レーザーの根幹技術として位置付けられていることから明らかである。cERL では高輝度電子源、高品質ビーム輸送技術、エネルギー回収など、超伝導加速器技術利用の幅広い展開を考える際に重要となる要素技術の多くが開発されつつある。その技術は世界的にも最高水準のものである。また、解決すべき課題も具体的に見えてきており、これらに継続的に取り組むことで、この分野を KEK が引き続き先導することができる。KEK は我が国における超伝導加速技術開発の唯一の拠点であり、また、世界的な拠点の一つである。先進的かつ将来性のある加速器技術の開発における世界的な重要拠点として、今後もその役割を果たし、積み上げてきたわが国の貴重な知的財産を活かして行くことは、日本国民に対する KEK の重要な責務と考える。

cERL で開発されつつある先端加速器技術の応用として、半導体製造用極紫外自由電子レーザー (EUV-FEL) 光源は有望な候補と考えられる。超伝導加速器技術の有効性を示す良い機会であり、社会的なニーズに応えつつ技術開発を継続的に進めることができるという点で優れている。これまでの cERL での成果を踏まえさらに開発研究を継続することで、EUV-FEL を発振できる可能性は十分に高いと判断される。一方、安定な運転、建設・運転コストの低減の点で取り組むべき課題もある。これらの課題の解決は、超伝導直線加速器の基礎学術研究・産業応用両面での幅広い展開に必須のものである。EUV-FEL の実現を当面の目標として cERL の技術開発を継続することを強く推奨する。

最後に、開発の継続においては、開発担当者が自身の専門分野に留まることなく積極的に異分野との情報交換・意見交換に取り組み、開発の意義や方向性を常に点検し磨き上げ、新しいアイデアを創出し、成果を社会に発信することに一層努力することを期待したい。

ERL 評価専門委員会委員

(平成 29 年 11 月 24 日)

- 加藤 政博 自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設・教授
- ・花木 博文 高輝度光科学研究センター 安全管理室・室長
- ・熊谷 教孝 高輝度光科学研究センター・名誉フェロー
- ・濱 広幸 東北大学 電子光理学研究センター・センター長
- ・腰原 伸也 東京工業大学 理学院・教授
- ・山口 誠哉 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設・施設長

- ・古川 和朗 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第五研究系・研究主幹
- ・三浦 太一 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 放射線科学センター・教授
- ・長我部 信行 株式会社日立製作所・理事、ヘルスケアビジネスユニット CSO 兼 CTO

○は委員長