

## ■ 会議報告

エネルギー回収型リニアックに関する国際ワークショップ  
(ERL-2005)

羽島良一 (日本原子力研究所関西研究所)

諏訪田剛 (高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設)

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) に関する国際ワークショップ (ERL-2005) が 3 月 18 日～23 日に米国ヴァージニア州の Thomas Jefferson National Accelerator Facility (JLAB) にて開催された。本ワークショップは、将来加速器を議論する国際組織である ICFA (International Committee for Future Accelerators) が主催する一連のワークショップの一つ (The 32nd Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop) として、JLAB, Cornell Univ., Brookhaven Lab., Daresbury Lab. の共催で開かれた。2002 年 5 月には同シリーズのワークショップ (The 24th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop) が SPring-8 で開催され、次世代放射光源について議論されたのは記憶に新しいところである。

今回のワークショップは ERL に関する初めての国際ワークショップであり、これまで様々な会議やワークショップで断片的に議論されてきた ERL の技術開発の現状と課題を集中的に話し合う場として、世界中の加速器研究者から大きな注目を集めて開催された。参加人数は 158 名であり、うち日本からは 10 名であった。次世代放射光に関連する項目を中心に会議の様子を報告する。

会議初日は全体講演として、現在運転中の 3 つの ERL 施設の報告があった。JLAB と原研は、それぞれ 160 MeV, 17 MeV の超伝導 ERL を運転しており、高出力自由電子レーザー、コヒーレント放射光 (テラヘルツ, ミリ波) の発生と利用を進めている。Budker 研究所 (ロシア) では、12 MeV の ERL (唯一の常伝導 ERL) を使って、テラヘルツ帯の FEL 発生を行っている。さらに 50 MeV の電子エネルギーを得るために、4 周回の ERL へ改造する作業が始まっており来年には完成する。全体講演の後半は、エネルギー回収技術に基づく加速器の将来計画として、高出力 FEL, X 線放射光源, 原子核実験用高エネルギー衝突加速器の紹介, さらに、要素技術のレビューとして、電子銃/入射器, ビーム動力学, 超伝導空洞, タイミング同期とビーム診断について講演があり、最後に超伝導空洞の大規模生産 (工業化) への課題が示された。

ERL を用いた放射光施設としては 2 つの計画がすでに資金を獲得している。Daresbury Lab. (英国) では 700 MeV の放射光源 4GLS が計画されており、2006 年 3 月ま

でプロトタイプ (35 MeV-ERL) を完成させる予定である。放射光源 (700 MeV) についても設計研究の予算が手当てされている。Cornell Univ. では 5-7 GeV の ERL 放射光源が計画されているが、このほど入射器建設予算として \$18M の予算が認められた。この入射器は放射光源で使用可能なように、100 mA の大電流連続入射と、0.1 mm-mrad の規格化エミッタンス (X 線放射光がコヒーレントになる条件を満たす) を実現する設計になっている。

会議の二日目からは 4 つのワーキンググループ (WG) に分かれて個別の課題について議論が続けられた。WG-1 は電子銃と入射器 (Electron Guns and Injector Design) についてである。次世代放射光で用いられるフォトカソード DC 電子銃の開発に関しては、JLAB-ERL (10 mA) をベースにして 100 mA まで電流を増大させる場合の様々な問題点が検討された。十分なカソード寿命を得るには、高い真空度を達成することに加えて、逆流イオン (ion back-bombardment) の効果を抑止するために電極の暗電流を減らす必要が指摘された。C. Sinclair (Cornell) は電極を特殊な誘電体でコーティングすることで暗電流を減らすアイデアを披露した。西谷 (原研) はカソードを成膜する MBE (分子線エピタキシー) 装置と電子銃を連結し、カソード表面を清浄に保ったまま電子銃へ装着できるシステムを採用し、さらに超格子構造の半導体カソードを用いることでエミッタンスの改善が図れるとの提案を行った。Cornell, 原研ともにこれらのアイデアに基づいた電子銃を開発中である。

また、入射器の設計では多数のパラメータを最適化し低エミッタンス電子ビームを得る必要があるが、I. Bazarov (Cornell) は、遺伝子アルゴリズムを用いて 20 以上のパラメータを同時に最適化する方法が有効であることを示した。彼の設計では、80 pC の電子バンチ (100 mA の平均電流に相当) で 0.1 mm-mrad の規格化エミッタンスが得られており、従来の値よりも 1 桁小さなエミッタンス (2 桁高い放射光輝度に対応) となっている。

WG-2 は電子ビーム動力学と輸送系 (Optics and Beam Transport) についてである。このワーキンググループでは、大電流の電子ビームを安定に加速し、エネルギー回収するための技術課題について議論がなされた。低エネル

ギー（入射）電子と高エネルギー（周回）電子の合流部で生じる空間電荷効果による入射電子のエミッタンス劣化は、ジグザグ合流方式を用いることで抑止できるとの提案が V. Litvinenko (Brookhaven) からなされた。また、大電流加速の障害となるビーム・ブレイクアップ (BBU) の抑止には、電子ビームを (x, y) 平面上で回転させるような輸送系が有効であるとのアイデアが T. Smith (Stanford) から出され、この方法に基づいたビーム輸送系の改造作業が JLAB-ERL で進められている。この改造により BBU の閾値電流が100倍になり、不安定現象は解消される見込みである。

電子ビーム軌道の安定化については、V. Lebedev が CEBAF (6 GeV 超伝導リニアック) における例を紹介した。長時間の変動（気温、潮夕作用など）と短時間の変動（主に商用電源の周波数成分）のそれぞれについてフィードバックを施すことで、広い周波数帯域に渡って10  $\mu\text{m}$  以下の位置精度で軌道安定性が（運動量分散のある位置で）得られている。高分解能のビーム位置モニタを用いれば、さらに高い安定度を得られ、次世代放射光源の要求を満たすことが可能であるとの結論であった。

WG-3 は超伝導空洞と RF 制御 (SRF and RF Control) についてである。超伝導空洞形状の最適化、クライオモジュールの設計、カップラーやチューナーの設計、RF 源の選定などの話題は、すでに稼働中の超伝導リニアック (TESLA test facility, CEBAF など) に加えて、急速に立ち上がりつつある国際リニアコライダ (ILC) の研究成果を大いに参考にしながら議論が進められた。これらのコンポーネントに関しては、ERL の主加速器にとって技術的

な障害は基本的に存在しないが、低コスト化を目指す工夫が必要であるとの認識が示された。ERL 固有の問題として、大出力の HOM (超伝導空洞の高次モード) を効率的に取り出す技術が必要である。梅森 (KEK) は半径方向に設けたスロットで HOM を取り出す手法を提案し試作装置における測定結果を報告した。蓄積リングで用いられているような、ビームパイプにフェライトを配置して HOM を取り出す方法も有効であり、いくつかの方式を併用すれば所要の性能が得られる見込みである。

WG-4 はタイミング同期とビーム診断 (Synchronization, Diagnostics, and Instrumentation) についてである。超伝導加速器の特徴のひとつに高い位相安定性（電子バンチのタイミング安定性）がある。すでに20-65 fs (1.5 GHz の位相で0.01-0.03度) の安定性が複数の加速器で得られている。ERL 放射光を用いた時分割実験で鍵となる電子バンチと外部レーザーの同期には、基準信号の安定な分配システム（フィードバックを施した光ファイバー）に加えてレーザーと RF の高精度な同期技術が必要となる。これらすべてを含んだタイミング精度として、100 fs は容易に実現可能、10 fs も十分に到達可能との力強い展望が示された。

最終日の全体講演では各ワーキング・グループのまとめが報告された。実質四日半の会議であったが、各セッションともに議論が白熱し、内容の濃いワークショップであった。このワークショップをきっかけにして、ERL の研究開発がいっそう加速されることが十分に予感させられた。今回の成功をうけて、2年後に Daresbury Lab. にて ERL-2007 が開催されることが決まった。



ERL-2005参加者集合写真 (Lia Merminga 博士の御厚意により掲載)