

■会議報告

エネルギー回収型リニアックの国際ワークショップ (ERL2011) 報告

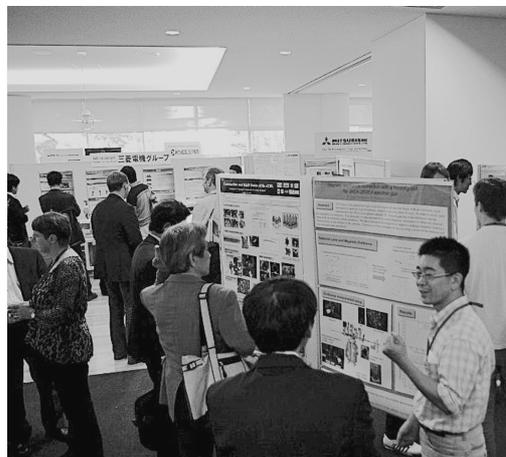
中村典雄 (高エネルギー加速器研究機構)
山本将博 (高エネルギー加速器研究機構)
梅森健成 (高エネルギー加速器研究機構)
高井良太 (高エネルギー加速器研究機構)

ERL2011は2011年10月16-21日に高エネルギー加速器研究機構(KEK)で120名を越える参加者の下に行われた。3月11日の東日本大震災の影響で開催や外国からの参加について懸念された時期もあったが、それを乗り越えて初めての日本での開催となった。ERL研究者の底力を感じたとともに、ERL2011の日本人スタッフの尽力と海外の関係者及び参加者の熱意と協力に感謝したい。

ERL2011は、Plenary Sessionと5つのワーキンググループ(WG)のParallel Sessionで主に構成された(WG1: Electron Sources, WG2: Beam Dynamics, WG3: Superconducting RF, WG4: Instrumentation and Control, WG5: Unwanted Beam Loss)。Plenary Sessionは、いかにしてKEKのERL光源計画を実現していくかという興味ある鈴木機構長の講演で始まった。それに続いて、光源用ERLと素粒子原子核物理用ERLの各レビューと各WGからのParallel Sessionの紹介があった。一般の放射光ユーザーにとって特に興味ある話題としては、BESSY-IIを有するドイツのHZB(Helmholtz-Zentrum Berlin)でERL試験機であるBERLinPro(Berlin Energy Recovery Linac Project)の予算が昨年末に認められたことであろう。2日目からは各WGで話題性のある研究開発(超伝導電

子銃、3次元コヒーレント放射の計算、超伝導空洞製作、大電流入射部、ビームハロー)や足立伸一氏(KEK)をはじめとしたERL利用・応用の講演が行われた。今回はこれまでと異なり、各施設での現状報告を極力省略して、共通性かつ話題性のあるテーマを多く取り入れるとともに、各WGの生の声により時間を割くことになった。ERLワークショップでは、各WGの世話人(コンビナー)2名が最初から内容・構成を考え、講演者への依頼も含めてParallel Sessionを組み立てていくという重要な役割を担っている。日本からは、WG2では中村典雄(KEK)、WG3で古屋貴章氏(KEK)、WG4では帯名崇氏(KEK)が世話人を務めた。ERL2011ではこの他に、初日にコンパクトERL(cERL)の建設、電子銃や超伝導空洞の開発が行われているERL開発棟、AR南棟、超伝導リニアック試験施設棟(STF)の見学があった。また、ポスターセッションの導入や全発表のアブストラクト掲載など、これまでにない初めての試みもなされた。

WG1からは、口頭20件、ポスター12件の発表があった。Cornell大学からは入射部の大電流試験に関する報告があった。これまでにGaAsカソードで25 mA、CsK₂Sbカソードで20 mAのビーム供給が行われ、これらの大電流



ERL2011会場(KEK研究本館)前での集合写真(左)とポスターセッションの様子(右)

運転ではイオンの backbombardment に曝されるカソード中心からずれた位置にレーザーを照射してビームを生成した。また、GaAs カソードが短寿命であったために、カソードは CsK₂Sb に変更するとのことであった。25 mA 試験時にはビームダンプ部で穴が開くトラブルが発生したようである。カソード励起レーザーに関しては、1.3 GHz、520 nm で平均出力60 W 以上の発振に成功したという報告があった。

米国の J-Lab (Thomas Jefferson National Accelerator Facility の略称) からは、同じく米国の BNL (Brookhaven National Laboratory) にて成膜された CsK₂Sb カソードを J-Lab へ vacuum suitcase にて移送し、最高で 20 mA のビーム引出しを行った報告があった。数 mA の出力にて GaAs との寿命比較のデータも示されていたが、明確な差が見られていない。セラミック管を真空容器内部に配置する Inverted Gun の開発状況についての報告があり、カソード電極材料にニオブを採用し、225 kV までエージングを行った後、200 kV でのビーム生成試験に成功している。今後、350 kV 以上の Inverted Gun の開発に取り組む予定であることも報告された。BNL からは、超伝導 RF 電子銃 (SRF-gun) の開発に関する報告があった。2 台の異なる SRF-gun の開発が進行中である。1 つは half-cell 構造の 703 MHz の SRF-gun で、カソードが無い状態ではあるが、加速電界 25 MV/m までは field emission (FE) が無いことが確認されていて、今後クライオモジュールに組込まれる予定である。もう 1 つの 113 MHz 1/4 波長型共振器 (QWR) 空洞は、コヒーレント電子冷却用の電子銃として Niowave 社と共同で製作され、2012 年早々にも電子ビーム生成試験が行われるとの報告があった。また、J-Lab へ移送した CsK₂Sb カソードを成膜した装置および使用済みのカソードを SEM や XRD で分析した結果についての報告もあった。

HZB からは BERlinPro 用の SRF-gun 開発の現状について報告があった。空洞端面に蒸着された鉛薄膜をカソードとしている。2011 年 4 月に最初のビームの取出しに成功しているが、加速電界 15 MV/m あたりから FE が立ち上がるため、それ以下の条件で数 pC 生成した結果について報告があった。JAEA からは西森氏より 500 kV 電子銃の現状について主に高電圧コンディショニングに関する報告があった。電極、排気系全て設置した状態でのコンディショニングは 526 kV まで到達している。KEK からは AR 南棟で行われている電子銃の極高真空系の評価、カソード評価試験結果およびレーザー系の開発に関するポスター発表が行われた。

WG2 では、口頭 28 件、ポスター 5 件の発表があった。口頭発表には期間中の 2 件の飛び入り発表も含まれている。まずは、稼働中の ERL を有する 3 施設、J-Lab、イギリスの Daresbury Lab (Daresbury Laboratory)、ロシアの BINP (Budkar Institute of Nuclear Physics) からのビー

ムダイナミックスに関する報告から始まった。先行する施設だけに学ぶべきところは多いが、各施設共に ERL の利用実験や機器開発・調整を抱えており、その中でビームダイナミックスを系統的に研究することの難しさを感じた。ERL 実機にも大いに関係するビームダイナミックスの課題を cERL の運転を通してどう解決していくべきかを改めて考えさせられる報告でもあった。

2 日目からは、進行中や提案中の ERL 計画の発表があり、光源関係では北京大学、HZB、中国科学院高能物理研究所 (IHEP) の 3 つの ERL 試験機、Cornell の 5 GeV ERL 光源、BINP の MARS (Multi-turn Accelerator-recuperator Radiation Source)、JAEA の LCS-ガンマ線源などのオプティクス設計とビームダイナミックス研究の現状と課題が示された。KEK からは島田美帆氏から cERL 並びに 3 GeV-ERL 光源のオプティクスに関する発表があった。IHEP は北京に第 3 世代放射光源のオプションとしての ERL 計画があり、その試験用小型 ERL の建設を計画しているとのことである。また、素粒子原子核物理関係では、ドイツのヨハネス・グーテンベルグ大学マインツの MESA (Mainz Energy Recovering Superconducting Accelerator)、BNL の RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) のアップグレード計画である電子イオン衝突型加速器 eRHIC、CERN の LHC (Large Hadron Collider) のアップグレード計画である LHeC (Large Hadron electron Collider) に加えて、J-Lab FEL-ERL での暗黒物質研究に関する計画の発表があった。改めて多数の計画と多種の利用研究があることを実感した。

ビームダイナミックスの個別の研究では、BNL で行われた真空チェンバーによるコヒーレント放射 (CSR) の遮蔽効果の実験、各種ウェーク場によるエネルギー広がりへの影響評価、マルチターン ERL でのビームブレイクアップの計算、CSR ウェーク場などの計算コードや計算機シミュレーションに関する発表などがあった。WG5 との合同セッションでは、Touschek 散乱やビームビーム効果など、ビームダイナミックスの観点からのビームロスについての発表があり、WG1 との合同セッションでは入射部のオプティクス最適化やエミッタンス制御について、宮島司氏 (KEK) を始めとして 5 件の発表が集まった。どちらも ERL にとって不可欠なテーマであり、最後まで熱の入った議論が行われた。

WG3 においては、超伝導加速空洞のシステム開発に関して議論が行われた。KEK、Cornell 大学、BNL、HZB、Daresbury Lab での ERL 開発の報告があった。超伝導空洞の開発は順調に進められており、ERL で要求される加速性能は満たしつつある状況にある。しかし一方で、モジュールアセンブリやビーム運転に起因した FE による性能劣化も報告され、CW 運転を行う ERL では、空洞性能の劣化、冷凍機負荷の増大、放射線、装置へのダメージなどの諸問題を引き起こす FE の抑制が、非常に重要な課題で

あることを再認識させられた。

大電力入力カップラーの開発も大きな進展が示された。BNLの超伝導電子銃入力カップラーでは、704 MHzながらも125 kW 定在波（500 kW 透過波に相当）でのRF運転に成功した。KEKの入射部空洞入力カップラーは50 kW までの安定運転が達成されている。いくつか改良を重ね、167 kW 以上のパワー投入を目指してさらに開発が続けられていて、今後の進展が注目される。バンチ長の短いERLでは、広帯域での強力な高次モード（HOM: higher order mode）減衰も重要な課題である。それぞれ工夫を凝らし、RF吸収体を用いたビームパイプ型HOMダンパーやCW用に改良したHOMカップラーの開発を進めている。最近では、低温でも広帯域で優れたRF吸収特性を示すカーボンナノチューブやグラファイト系の材料をSiCに混ぜたビームパイプ吸収体の開発が行われており、こちらも今後が期待される。現在運転されている冷凍機およびクライオモジュールについての報告もあり、空洞の共振周波数を変化させるmicrophonicsの影響についても議論がなされた。今後は、Cornell大学での主加速部モジュール、cERLでの入射部および主加速部モジュールも開発され、ビーム運転が予定されているので、非常に興味深いところである。

WG4はビーム診断と制御、WG5はビームロスとマシン保護が主要テーマであったが、互いに共通する話題も多いことから、同じ会場を使用している合同セッションとなった。

ビーム診断関連では、Cornell大学、BNL、KEKの各ERL施設から現状と今後のスケジュールについて報告があったのははじめ、XFEL施設SACLAのビームモニタに関する発表があった。ERLとXFELではビームの繰り返しや平均強度が異なるものの、ビームコミッショニングにおける経験談やサブピコレベルのバンチ長計測の手法は大変参考になる。今回の発表でも、バンチ長が100 fs以下で顕在化するコヒーレント遷移放射のスクリーンモニタへの影響と対策、逆にその放射特性を利用したバンチ長計測の可能性など、ERLにも活かせる有益な情報を多く含んでいた。その他にも、最短385 psの間隔で通過する加速・減速ビームの位置を個別に切り出すことを可能にする高速ゲートスイッチの開発状況や、フェムト秒オーダーのジッターを目標にした高安定タイミング分配システムの発表があり、件数は少ないながら有意義なセッションとなっ

た。唯一残念だったのは、J-LabやDaresbury Labで実際に稼働中のERL施設から報告が無かった点である。ERLにおけるビーム診断には、広いダイナミックレンジへの対応やビームハローの精密計測など、未だ多くの課題が残されている。次回のワークショップでは、各施設の経験を踏まえた、より具体的に活発な議論を期待したい。

ビームロス関連では、米国のJ-Lab ERL、ドイツのHZDR (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf)にある超伝導電子リニアックELBE、Daresbury LabのERLであるALICE、日本のSACLAから各施設で使用しているビームロスモニタおよびマシン保護システムについての紹介があった。SACLAからは、ビームロスが引き起こすアンジュレータの減磁メカニズムのレビューと、それを最小限に止めるためのビームハローモニタの提案もあり、参加者の関心を集めていた。また、定常的なビームロスや発熱は、ビームハロー、CSR、ウェーク場といったビームダイナミクス上のテーマを主原因とすることから、会議4日目の午後にはWG2との合同セッションが行われた。ビームロスモニタの最近のトレンドは、光ファイバーと光電子増倍管(PMT)を組み合わせて使用するものである。これは、ビームロスによって発生する荷電粒子がファイバー内を通過する際に生じるチェレンコフ光を検知する仕組みで、従来のイオンチェンバーや電流モニタの差分を利用した方法よりも検出感度、時間応答、空間分解能（ビームロス位置の特定）、設置コストといった多くの面でメリットを持つ。出力信号の絶対値校正には、カラーセンターの形成による透過率の低下やPMTゲインの劣化をどう補正するかという難点があるが、うまくクリアできればリアルタイム線量計としての応用も期待できる。このタイプのロスモニタは、既にSACLAで使用されている他、KEKのcERLでも採用が検討されている。

ワークショップの最終日には、次回のワークショップが2013年にロシアのBINPで開催されることが発表され、河田組織委員長からG. Kulipanov氏にワークショップ・レベルが渡された。Kulipanov氏が提案している5 GeV ERL光源計画(MARS)がロシアで大型計画の1つにリストアップされているということで次期ワークショップへの強い意気込みが感じられた。また、ドイツのHZBや米国のBNLなどもその次の開催を検討していて、これからのERLの広がりや発展を期待させるワークショップであった。