

会議報告

ERL-09 (ICFA Beam Dynamics Workshop) の会議報告

山本 将博*¹・島田 美帆*¹・沢村 勝*²・羽島 良一*³

Report of the ICFA ERL-09 Workshop

Masahiro YAMAMOTO*¹, Miho SHIMADA*¹, Masaru SAWAMURA*² and Ryoichi HAJIMA*³

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) は、次世代高輝度光子源 (X線, γ 線, テラヘルツ) や高エネルギー物理実験用加速器の性能を飛躍的に高める技術として注目され、世界中で研究開発が進められている。国際 ERL ワークショップは、ICFA (International Committee for Future Accelerators) の支援を受けて、2年に一度、ERL 研究者が一堂に会して、それぞれの研究成果を報告し、今後の研究開発の進め方を議論する会合である。2005年の米国ジェファーソン研究所 (JLAB), 2007年の英国ダレスベリー研究所の開催に続いて、今回は、米国コーネル大学の主催で会議が行われ、約150名の参加者を集めた。

ERLの研究開発を進めている主なグループは、以下の通りである。米国、ジェファーソン研究所 (高出力 FEL), コーネル大学 (次世代放射光), ブルックヘブン研究所 (高エネルギーイオンコライダー用, 電子冷却), アルゴンヌ研究所 (次世代放射光)。イギリス, ダレスベリー研究所 (次世代放射光)。ドイツ, ベルリン放射光施設 (X線放射光源)。日本, 共同チーム (次世代放射光)。中国, 北京大学 (次世代放射光)。ロシア, ブドカー研究所 (高出力 FEL)。

初日の基調講演を除いて、会議の大部分は3つのワーキンググループに分かれて議論が行われた。WG1=高輝度電子銃, WG2=ビームダイナミクス, WG3=超伝導空洞である。本稿では、山本が WG1,



図1 ERL-09 ワークショップ参加者の集合写真

*¹ 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization*² 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency*³ 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency (E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp)

島田が WG2, 沢村が WG3 の様子を報告する。

ERL 用の高輝度電子銃は、DC 電子銃、超伝導 RF (SRF) 電子銃が開発中である。DC 電子銃に関しては、コーネル大学、JLAB (FEL と CEBAF)、ダレスベリー、JAEA の計 5 グループより報告があった。DC 電子銃における最大の課題は、高電圧セラミック管である。ERL 放射光源では 500 kV 電子銃が必要であるが、これまでの実績は JLAB-FEL、ダレスベリーの 350 kV が最高である。ERL 用 DC 電子銃では構造上、セラミック内部にカソード電極を支えるサポート管が存在するため、ここからの電界放出電子がセラミックに当たりチャージアップを起し、セラミック破損の原因となる。

これを解決するため、JLAB、コーネルグループはセラミック管を真空容器の内側に配置する Inverted 方式を提案している。一方で、JAEA にて立上げ段階にある 500 kV 電子銃では、多段分割型セラミック管を採用し、適切な形状のガードリングを設置することで、この問題の回避を試みている。今後のこれらの成否が注目される。

光陰極表面 (NEA 表面) の寿命に関しては、JLAB-FEL グループで 350 kV 運転において 550 クーロン (@5 mA)、CEBAF グループで 100 kV 電子銃において約 1000 クーロン (@10 mA) が得られている。寿命は電子銃の真空度とビーム電流値に依存するので、極高真空の達成が必須である。JLAB-CEBAF グループは、極高真空でイオンポンプがガス放出源となる実験結果を示した。今後の真空排気系の設計に有益な示唆を与える結果である。

SRF 電子銃に関しては、Rossendorf (ドイツ) での SRF 電子銃の試運転に続き、BNL、ウィスコンシン大学、Helmholtz Zentrum Berlin (HZB)、北京大学、企業 1 社 (Niowave) から装置製作、設計研究の報告があった。SRF 電子銃では、電界放出によるカソード表面への影響 (QE 寿命低下) を受けにくい Cs₂Te がベースとなっている。1 A 級の平均電流を目指している BNL グループは、可視レーザーで駆動可能な K₂CsSb を採用し、さらに、ダイヤモンド薄膜での二次電子増倍を経て、効率よく低エミッタンスビームをつくる研究開発が進められており、ERL-09 では J. Smedley 氏より K₂CsSb にて 1 mA、ダイヤモンドの薄膜通過後の最終出力で 40 mA (@2 mm²) が実際に得られている報告があった。電子ビーム生成時の初期エミッタンスの点では NEA-GaAs カソードが有利と思われるが、1 A 級の大電流用として BNL の電子

銃は魅力的である。

渡川和晃氏から SPring-8/RIKEN SASE-FEL 用電子銃に関する発表があった。パルス運転の 500 kV 熱電子銃であり、ERL 用とは異なるが、長期間安定した低エミッタンスビームの発生は、今後の ERL 電子銃の開発にも参考になる報告であった。

WG-2 ではビームダイナミクスを中心とした議論が行われた。前回の ERL07 ではビーム診断系が独立した WG として設けられていたが、今回は WG2 にて、ビーム診断の話題も取り扱うこととなり、発表内容は多岐にわたった。

ERL07 と大きく異なったのは、マルチ・ターン ERL (2 ループ以上) に関する発表が多かったことである。これは、建設・運転コストを抑えるために、2 回以上加速と減速を繰り返す方法であり、ワンループでは見られなかった新しい検討課題について議論があった。2 ループの構成では、線形加速器にエネルギーの異なる 4 本の電子ビームが通るため、そのオプティクスの計算およびビーム診断が困難であることについて意見の一致があった。また、一つの RF バケットに複数のバンチを入れることについても多くの議論があった。特に、加速空洞の HOM による影響が大きくなり、ビームの許容最大電流値がおよそ 1/4 になるといったシミュレーション結果について、白熱した議論があった。

シミュレーションについては、入射器、周回部およびアンジュレータなどに分割し、最適な計算コードで解を探し出す start-to-end (S2E) が今後重要になるとの見解が示され、実際に適用した結果について報告があった。その他、機器の設置誤差、Touschek 散乱、挿入光源や CSR を初めとした wake の影響など、様々なトピックについて詳細な計算結果が報告された。

稼働中の ERL については、ダレスベリー研究所の ALICE が電子銃から入射合流部までの距離を伸ばしてビーム診断系を充実させることについて議論があった。ビームの質が劣化することが懸念されるが、試験加速器としては、豊富な診断系を備えることの優先順位が高いと判断したためである。

個人的には、4 ループ ERL の検討が進んでいる Novosibirsk の発表がキャンセルされたことが残念だったが、非常に興味深い発表・議論に参加できて有意義な時間を過ごすことができた。

WG3 は超伝導加速器を構成するクライオモジュール

ル, 空洞, 入力カップラー, HOM ダンパー, チューナなどが議論された. コーネルでは, 入射器用の2セル空洞5台を1つのクライオモジュールに組み込み, 電子銃と組み合わせて4 mA のビーム試験を行った. しかし時間とともに超伝導空洞の Q_0 が低下する現象が見られ, 特に端の空洞での Q_0 の低下が大きいとの報告があった. 同様な Q 値の低下はBNL, ダレスベリーからも報告されている. BNLは703 MHzの5セル空洞を製作し縦測定で20 MV/m, Q 値 10^{10} を得ていたが, クライオモジュール組み込み後試験の結果は Q 値が1桁以上悪くなっている. ダレスベリーでは現在使用中の超伝導空洞は縦測定で良好な空洞特性が得られていたが, クライオモジュールに組み込んだ後の運転で加速電界が9~11 MV/m まで下がっている. Q 値測定の問題や, 静的熱侵入増加による空洞フランジ部分の温度上昇に伴うBCS抵抗の増加や空洞のクライオポンプとしての吸着などが考えられるが, 各モジュールともビームパイプHOMダンパーを用いており, HOMダンパーのフェライトからのダストによる汚染が原因の可能性もある. その場合HOMダンパーの設計も大きく変わってくる可能性もあり, 原因究明が進められている.

日本のグループ(KEK/JAEA/ISSP)では入射器用の2セル空洞と主加速器用の9セル空洞の試作機の試験結果が報告された. 2セル空洞はHOMカップラーによるHOM対策を行っており, 縦測定では最大電界30 MV/m, 15 MV/mで8時間の連続運転の結果が報告された. ビームパイプHOMダンパーが多い中, HOMカップラーによるアプローチとしてその可能性に関心も高かった. 9セル空洞ではフィールドエミッションのため縦測定で最大電場17 MV/mにとどまるとの結果が報告された.

JLABではアンペア級の加速空洞を目指し導波管タイプのHOMダンパーを採用しているが, 導波管部分のエンド構造を含む5セル試作空洞を製作し, 縦測定での最大電界は20 MV/m以上で, HOM減衰効率も良く, kW級のHOM減衰が可能であるとの報告があった.

ダレスベリーのERL試験機(ALICE)では5機関との国際協力のもと2010年にモジュールの交換を予定し, 空洞にはコーネルデザインの7セル空洞を導入する. HOMダンパーに関してはコーネルでのフェライト脱落を受けて, 材料の変更やタイルサイズを小さくするなどの改良が行われているが, 空洞メーカー(ACCEL)での製作過程でタイルのロウ付けの際に

割れが発生するなどのトラブルが発生している. 日本のグループからは8種類のフェライトの吸収特性の温度依存性を調べ, HIP加工と櫛歯構造によるHOMダンパーを製作中との報告を行った.

HOM吸収材料としてカーボンナノチューブを混ぜたセラミックが良好な吸収特性を持つとの報告があり, 周波数特性や低温特性などの計測が進行中であるなど, 新しい吸収材の提案があった.

またコーネルではモジュール内での残留磁場によるビームプロファイルの歪みが観測されたが, 昇温後消磁することで解決している.

空洞HOMに関して, コーネルではHOM吸収体特性の変化や空洞の変形により影響を調べるためにクラスタ計算機で120並列の計算を行い, 空洞変形により1桁以上HOMインピーダンスが悪くなるという計算結果が報告されるなど, 実機における実際のHOM減衰を評価しようという試みがなされていた.

カップラーやチューナに関してはレビュー的な発表で具体的な実験結果が少なかったと思われる.

会場としてホールを使った他のWGと違い, WG3は教室に椅子を並べ, プロジェクターも壁に映すなど, こじんまりした会場で行われたこともあり, 発表者と参加者の距離が近く, 発表の途中から質問, 議論が活発に交わされ発表時間を大幅に超過するなど(さすがに時間をオーバーし過ぎるのはまずいと思ったか, 後半から残り時間札で発表者を促すようになったが), 通常の国際会議と違いワークショップならではの雰囲気であったが, WG議長(コンビナー)が発表者をほぼ決めてしまい, 発表希望がかなわなかった方もいたことは残念であった.

前回の会議(105名)に比べ, 参加者が大きく増え, また, 北京大学, BESSYがERL計画を新たに立ち上げるなど, ERL研究の裾野が広がりつつあるのは心強い印象を持った.

次回の会議, ERL-11が日本で開催されることとなった. 今回のERL-09の運営方法については, 会議中, 会議後に様々な意見が出された. 発表者を少数に絞って議論の時間を多く取るべきか, 多数に発表の機会を与えて新しいアイデアを汲み取るべきか. WG議長(コンビナー)の選出方法とその権限. 議論を深めるための会場のサイズなどである. 次回の日本での開催では, これらの教訓を生かして会議の運営にあたりたい.