

## ■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-2007)

羽島良一 (日本原子力研究開発機構)  
坂中章悟 (高エネルギー加速器研究機構)

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-2007) が5月20日-25日に英国の Daresbury Laboratory 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 41st Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop) として開かれた。ERL ワークショップとしては2005年3月 (米国, JLAB) に続いて第2回目ということになる。

エネルギー回収型リニアック (ERL) は、低エミッタンスの電子ビームを大電流で連続的に加速できることから、次世代 X 線放射光源、大出力 FEL、原子核実験用イオン冷却装置、大強度  $\gamma$  線源など、様々な加速器への応用が期待されている。本ワークショップは、ERL に必要な加速器技術とビーム物理を網羅的に議論すべく開催された。参加人数は105名であり、うち日本からは8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、ERL に期待される応用とそれを支える技術についてレビュー講演が行われた。

ERL 型の赤外 FEL は、日米露の施設 (JAEA, JLAB, Budker) が稼働中である。JAEA では、エネルギーアク

セプタンスの拡大による FEL の高出力化を進めている。JLAB では、14 kW の FEL 出力を達成し、本来の目標であるミサイル迎撃用の0.1-1 MW の FEL 装置の開発に着手している。Budker では、ERL を2ループ構成へ改造する工事を進めている。これは、1本の加速管を使って、2回加速、2回減速するものであり、多重周回の ERL として最初の装置になる。これら施設は、いわば、第1世代の ERL であるが、個々の施設が独自の工夫を加えながら次世代につながる技術開発を展開する“test facility”の役割を果たしている。

ERL-FEL の新しい計画として以下が紹介された。米国の National High Magnetic Field Laboratory が波長  $2\ \mu\text{m}$  から 2 mm までをカバーする ERL-FEL を計画しており、NSF から工学設計の予算を獲得している。高強度磁場と波長可変赤外光を組み合わせた物質科学の研究が目的である。会議のホストである英国 Daresbury 研究所では、次世代放射光源: 4 GLS の一部に VUV, XUV 領域の FEL 装置を組み込む予定であり、プロトタイプ機 (ERLP) では、赤外 FEL の運転がまもなく始まる。さらにアジアでは、北京大学、韓国原子力研究所が赤外領域の ERL-FEL を計画している。

放射光源では、前回のワークショップで披露された計画、



ERL-2007参加者集合写真

Daresbury, Cornellに加えて、日本 (KEK/JAEA/ISSP) と Argonne が今回のワークショップで新たに名乗りを上げた。Argonne の計画は、APS を 7 GeV-ERL にアップグレードするものである。既存のリング (入射器含む) とビームラインには全く手をつけずに、リングの外側に超伝導リニアックを建設することで、施設の運転停止期間を最小限にして、輝度とコヒーレンスを 2 桁向上でき、7 GeV 電子を使った XFEL も可能な計画である。

二日目以降は 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 は電子銃と入射器についてである。ERL 放射光源用電子銃の本命であるフォトカソード DC 電子銃 (250 kV 以上) は、すでに運転中の JLAB-ERL (350 kV) に加えて、Cornell (750 kV), Daresbury (350 kV) が電子ビームの引き出しに成功し、建設中の JAEA (250 kV), JLAB-test-stand (500 kV) を加えて世界で 5 台の装置が存在している。最も高い性能を目指している Cornell の電子銃は、5 mA までの試験を完了し、設計値 (35 meV) に迫る 40 meV の熱エミッタンスを得ている。ただし、DC 電圧は 330 kV までしか印加できておらず、目標値 750 kV 到達まではセラミック絶縁管の改良などの課題が残されている。電極を高圧超純水洗浄し暗電流を低減する (Cornell)、カソード劣化の要因となるイオンを電極で剥ぎ取る (JLAB), GaAs にアルミを混晶することでカソード寿命を伸ばす (JAEA) といった新しい試みも始まっている。電子銃は、ERL の性能を左右する最重要の機器であるが、所定の性能を達成するのは容易でない。半導体光陰極における光電子発生過程の理解と適切な制御、極高真空技術の向上、高繰返しドライブレーザの開発など、各グループが精力的に取り組んでいる。これらの進捗を見守りたい。

電子ビーム動力学と輸送系を扱う WG-2 では、低エミッタンス大電流電子ビームの発生、輸送における諸問題が議論された。コヒーレント放射光 (CSR) の発生による電子ビームエミッタンス劣化とエネルギー広がり増大については、小口径ダクトによる遮蔽を期待する案 (Cornell, Hoffstaetter), ビームエンベロープをうまく選んでエミッタンス劣化を抑制する案 (分子研, 島田) が発表された。これらの数値計算、理論解析は着実に進展しており、実験的な検証が待たれる。電子ビームの軌道に沿ってイオンが捕獲される結果生じる不安定現象は、蓄積リングでも経験済だが、ERL ではさらに顕著になると指摘されている。これを回避する方策として、電子軌道に沿って多数の電極を配置する方法 (Hoffstaetter), バンチ列に空白部を設ける方法 (KEK, 坂中) が提案された。ANL の K-J. Kim 氏による新しいアイデア、ERL ビームを使った共振器型 XFEL が提案された。7-GeV ERL の電子ビームパラメータ (バンチ圧縮しない) を用いて計算したところ、時間/空間ともに 100% コヒーレントな 1 Å X 線の発振が可能であり、また、SASE 方式と異なりパルス当たりの X

線エネルギーを小さくできる (制御できる) 利点が示された。ERL 放射光源の拡張可能性として、今後、議論されるだろう。

WG-3 では超伝導空洞と高周波機器について議論された。前回のワークショップで提示された ERL 専用超伝導空洞の開発課題に沿って、各プロジェクトでコンポーネントの開発が始まっている。その一部はすでに実を上げつつあり、議論も熱気を帯びた。空洞開発では、日本のグループ (KEK/JAEA/ISSP) による新型空洞が注目を集めた。高次モード不安定性の閾値が 600 mA と、TESLA 型空洞に比べて 10 倍大きな値が数値シミュレーションで得られている。4 極高次モードを偏心フルートで取り出すという新しい試みも取り入れられており、まもなくプロトタイプ空洞ができあがる。空洞の高性能化によって、2-loop ERL の構成も現実的なオプションとなった。一方、Cornell で開発中の RF 振幅位相の制御装置を JLAB-ERL で試験したところ、loaded-Q が  $10^8$  と極めて高い条件 (制御周波数帯域が極めて狭い) でも安定に動作したことが報告された。これに加えて、複数の空洞を 1 台の RF 源で駆動できるとする報告もあり、ERL の運転に必要な RF 電力を、さらに節減できる可能性が示された。ところで、ERL 実用機では、長時間にわたりビームを止めることのない連続運転が求められる。このような高い健全性を実証する目的で、超伝導空洞の耐久試験プロジェクトが国際協力のもと開始された (米英独の 5 機関が参加)。7 連空洞 2 台からなるモジュールを製作し、ERL 運転の実条件で長時間の耐久試験を行う予定である。

WG-4 はタイミング同期とビーム診断についてである。開催日時が「ビーム診断に関するワークショップ (DIPAC 2007)」と重なったため、参加者を大幅に欠き、4-5 名程度の参加者で開かれた。それでも、Convenor の K. Jordan 氏 (JLAB) の卓越した腕により、興味深い発表と実質的な議論が行われた。WG2 との合同セッションで K. Jordan 氏が JLAB FEL のビーム診断系について、KEK の飛山氏が ERL 実証機のビームモニタ系について、ANL の C. Yao 氏が APS の ERL upgrade 計画とビームロスについて発表した。その後の WG4 単独セッションでは、装置開発、運転手順を含めた有用な経験を共有する方法など、ERL に限らず現加速器のどこでも問題となっている事柄などについて、具体的な議論があった。また、現在立ち上げつつある Daresbury の ERLP での具体的な経験をもとにした、テストスタンドについての深い議論があった。また、FLASH 加速器での 2 種類の進行方向ビームプロファイル測定法 (LoLa 空洞を使った Phase Space Tomography と、Electro-optical 法) の比較、LCLS でのタイミングシステムなど、実際稼働している加速器での興味深い発表があった。全般に、特に新しいアイデアがあふれている発表ではなかったが、実際の加速器での経験を元にした地に足がついた発表が多く、これからの ERL 加

速器モニター、タイミング系設計に極めて有用な発表、議論に恵まれたという印象をもった。

本稿では触れなかったが、放射光以外にも原子核実験用のイオン冷却器、リニアコライダー用の偏極陽電子発生装置などにも ERL の利用が提案されており、これらに向けた装置開発も進んでいる。前回のワークショップから 2 年が経過し、ハードウェアの開発が着実に進展していることが見てとれた。今回の会議では、放射光源を含めた

ERL 実用化のために、今後クリアすべき課題（電子銃が最も大きな課題である）が整理され、それに向けていくつかの処方箋が示された。研究開発に携わる各国グループの奮闘を期待したい。次回のワークショップは、Cornell にて 2009 年に開催されることが決まった。

原稿の執筆にあたって、JAEA 西森信行 (WG-1)、KEK 飛山真理 (WG-4) 両氏にお手伝いいただいた。感謝申し上げます。

## ■ 書評

### 「放射光 X 線磁気分光と散乱」 橋爪弘雄, 岩住俊明 編集

アイピーシー出版部, B5 版 255 ページ, 定価 5,000 (本体) + 税

田中良和 (理化学研究所・播磨研究所)

放射光科学の進歩とともに X 線の利用研究は大きく発展し、また現在も日進月歩の進歩を遂げつつある。そのなかでも特に磁性研究への利用は、X 線と磁気モーメントとの相互作用が電荷と比較し微少であるという欠点を克服し、多様な研究領域に広がり、さらに現在も新しい研究開発がやむこともなく続けられている。

本書は、いままで培われてきた一また現在行われつつある放射光 X 線による磁性へのさまざまな利用研究の成果をひとつの本に編集されたものである。それぞれ章は、その分野の第一線の研究者が執筆されている。本書のひとつの特徴として基礎編と応用編と大きく二つに分類されることが挙げられる。基礎編は初学者が学びやすいように多くのページを割き、原理が懇切丁寧に書かれている。また応用編では、最新の研究成果がまとめられている。特に基礎編では、放射光利用がはじまった頃に大きく発展し、成熟しつつもいまなお多くの研究成果があげられている分野が集められている。その内容は、第 1 章 磁気円・線二色性 (MCD, MLD)、第 2 章 磁気 X 線弾性散乱、第 3 章 X 線発光分光と磁性、第 4 章 磁気コンプトン散乱、第 5 章 オージェ電子分光である。応用編は、第 6 章 XMCD の物質科学への応用、第 7 章 磁気 EXAFS、第 8 章 X 線磁気イメージング、第 9 章 表面・界面・微粒子の磁性研究、第 10 章 高圧下の磁性研究、第 11 章 強磁場下の磁気散乱、第 12 章 核共鳴散乱による磁性研究、第 13 章 X 線

磁気方向二色性となっている。全体を眺めれば、現在行われている放射光をもちいた磁性研究がほぼ網羅されていると考えられる。若干内容が古い記述も見られるが、放射光科学の急速な発展を鑑みればしかたないことであろう。

本書は、これから放射光を用いて磁性研究を始めようとしてされている学部 4 年生から大学院生の方々にとっては、入門書としておおいに活用できるであろう。また、自らの研究を発展させるために近い将来、放射光を使ってみたいと考えられている研究者の方々にも、一読されることをお勧めしたい。さらにこの分野の第一線で活躍されている研究者の方々にも、ハンドブックとして座右に置かれることをお勧めする。

放射光の磁性研究への利用はよく中性子散乱と比較されるが、それと比べ放射光はまだ歴史が浅く、開発の余地はまだ広大であると考えられる。まえがきにも書かれているように 10 年ほど前に発行された“X-ray Scattering and Absorption by Magnetic Materials (Lovesey and Collins 著, Oxford Univ. Press)”という教科書的洋書があるが、それと本書を比較するとこの 10 年でもいかに放射光の磁性への利用研究がおおきく発展してきたか認識させられる。また、今後第 4 世代光源 XFEL の利用がはじまれば、新たな飛躍があるであろう。その意味で、本書が放射光 X 線の利用研究のひとつのマイルストーン的教科書として、多くの読者に読まれることを期待する。