

## ■ 会議報告

### 次世代光源の国際ワークショップ (FLS2012) 報告

宮島 司 (高エネルギー加速器研究機構)

島田美帆 (高エネルギー加速器研究機構)

FLS2012 (Workshop on Future Light Sources) は2012年3月5日から9日に米国のジェファーソン研究所 (Jefferson Laboratory, JLAB, バージニア州ニューポートニューズ市) で約150名の参加者の下に行われた。FLSはICFA (International Committee for Future Accelerators) のワークショップとして開催されており、前回のFLS2010は米国のSLACで開催され、FLS2012への参加は次世代光源開発の2年間の成果を知る上で良い機会となった。会場となったJLABのあるニューポートニューズ市は、大西洋岸のバージニア半島の南東端に位置し、造船の町として有名である。JLABでは超伝導リニアックを用いた加速器開発が活発に進められており、主に原子核物理実験のためのCEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) 加速器と、エネルギー回収型リニアック (Energy Recovery Linac, ERL) を用いた赤外線およ

び紫外線の自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) 加速器が稼働しており、ワークショップでの施設見学では従来の貯蔵リング型の放射光源とは異なった施設を見学することができた。

FLS2012ワークショップは、Plenary session と次世代光源開発で重要となる7つのトピックを扱った Working Group で構成された。7つの Working Group は、1: Compact Light Source, 2: ERL Based Light Source, 3: Electron Sources, 4: FEL Based Light Source, 5: Storage Ring Based Light Source の光源加速器の形式別のグループと、光源加速器開発において共通した開発要素である6: Timing and Diagnostics, 7: Undulators and Insertions に分けられた。FLS2012の初日のPlenary session では、JLABのHugh Montgomery氏によるJLABの紹介の後に、同じくJLABのGeorg Neil氏によって米国DOEによる放射光源



図1 FLS2012会場での集合写真<sup>1)</sup>

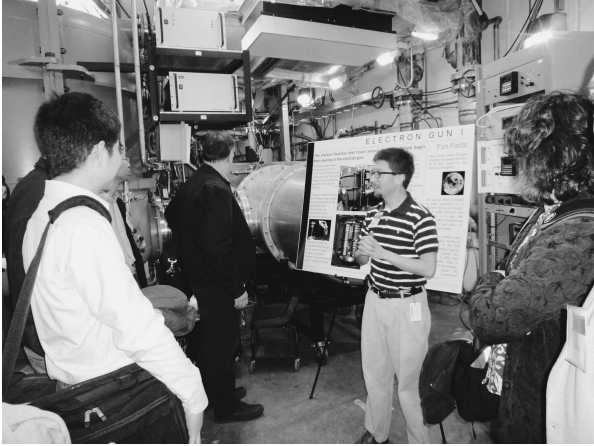


図2 FEL 加速器室内に設置された DC フォトカソード電子銃見学の様子

開発の歴史について紹介があった。1974年の貯蔵リング型光源 SSRL (SLAC) から始まり、2009年にリニアック型自由電子レーザーの LCLS (SLAC)、そして2015年稼働予定の最先端の貯蔵リング型光源である NSLS-II (BNL) まで着実に開発が進み、さらにユーザー数も右肩上がりに増え続けており、放射光源はサイエンスにとって重要なツールとして定着していることが示された。ただし、次世代光源開発はユーザーのためのツールを開発するという視点を忘れてはならないという点にも触れており、光源開発に携わる者として常に意識すべきことであると改めて感じた。Neil 氏の発表の後には、硬 X 線の回折限界でのサイエンスについてのワークショップ (XDL011) 報告と、X 線レーザーによるサイエンスと次世代光源でのビームラインについての発表が行われ、光源開発だけでなくそれを利用するビームライン開発も着実に進められていることが紹介された。

各 Working Group の紹介の前に、FLS2012への日本からの参加者について紹介する。FLS2012には東北大学から浜広幸氏と柏木茂氏、JAEA から西森信行氏、KEK から坂中章悟氏、阪井寛志氏、本報告の執筆者である宮島、島田が日本から参加した。宮島、島田は主に ERL Based Light Source と Electron Sources の Working Group に参加していたため、これら以外の Working Group については Summary talk から得た情報を中心に紹介したい。

Compact Light Source WG では平均して20名が参加し、12件の口頭発表が行われた。主なトピックはレーザー・プラズマ加速、逆コンプトン散乱 (keV-MeV photons)、超伝導 RF 加速器、Compact rings、Compact Undulators、Science with compact sources である。これらの中で印象的であったのが、Carl B. Schroeder 氏 (LBNL) の発表したレーザー・プラズマ加速器によるコンパクト X 線 FEL であり、3 cm で 1 GeV 加速可能な加速勾配など、小型光源として有望そうな印象を与えていた。その他に関心

を惹いていたのが、W. S. Graves 氏 (MIT) が発表した、ナノメートルスケールの突起を配置したカソードを利用した Super-Radiant X-rays である。これはカソードから横方向にドットの配置をもつ電子ビームを取り出した後、エミッタンス交換により縦方向の密度変調に変換し、近赤外レーザーとの逆コンプトン散乱により、電子数の2乗でスケールされる Super-Radiant X-rays を生成するものである。この発表は多くの参加者の関心を惹き、空間電荷効果の影響や小さい横方向エミッタンスが必要ではないか等の質疑やコメントがあった。

ERL Based Light Source WG では、Cornell ERL, ALICE (Daresbury Laboratory), cERL (KEK), BERLin-Pro (HZB), JLAB ERL/FELs のステータス報告の他に、他の Working Group とのジョイントセッションを含めて25件の口頭発表があった。Storage Ring とのジョイントセッションでは、PEP-X (SLAC) や SPring-8 II など Ultimate Storage Ring (USR) の設計が各施設で進められていることが報告され、周長6.28 km の Tevatron (Fermilab) の跡地を使った案では、ERL の性能を上回る予想となっていることが示された。FEL とのジョイントセッションでは、ERL 光源加速器を用いた X-ray Free-Electron-Laser Oscillator (XFEL) 運転について2件の発表があった。Ryan R. Lindberg 氏 (ANL) によって、XFEL 発振によるエネルギー広がりやエミッタンス増加を運転パラメータによっては小さくすることが可能であり、チャレンジングであるが貯蔵リングにおいても XFEL が実現可能であることが示された。さらに Cornell 大学の ERL project でも XFEL を導入する可能性が報告され、XFEL が ERL の重要なオプションであると認識されている様子であった。その他の話題としては、加速器中のビームを如何に表現するかという Modeling と、放射線レベルを増大させるビーム損失の起源となり如何に抑制するかが鍵となる Unwanted beam についての報告があった。Modeling については既に ERL の運転が開始されている ALICE では、低いエネルギーの電子ビームを空間電荷効果を含んだ粒子トラッキングコードである ASTRA と GPT の2つを使ってシミュレーションし、レーザーのスポットサイズの測定やエミッタンスの実験値と計算値の比較などを行っていることが報告された。Unwanted beam については、JLAB, PITZ (DESY), ELBE (HZDR) での診断についての3件の口頭発表があり、その起源 (Beam Dynamics に起因、レーザーのゴーストパルス、レーザー散乱・タイミング差、電界放出) や超伝導・常伝導 RF 電子銃からの暗電流の測定方法・結果についての報告がなされ、Unwanted beam の診断と抑制が ERL 開発での重要なテーマとして各施設で認識されていることがわかった。Working Group の全体的な印象として、前回の FLS2010 と比べて、若干 ERL の評価が高まった印象であった。

Electron Sources WG では20名程度が参加し、22件の口頭発表があった。Working Group では、如何に高輝度化を進めていくかということと、電子銃の運転における高口バストネスと低コストを如何に実現するかということに焦点が当てられ、活発な議論が行われた。その他に、6次元位相空間(スライスと全体)の輝度について如何にユーザーが必要とする光の品質をビームパラメータに焼き直すかということと、どの加速形式(DC, 常伝導・超伝導 RF 電子銃)でも共通の問題となっている電界放出電流が重要なテーマとなった。Working Group では各施設での開発の進捗が報告され、着実に進んでいる印象を受けた。これらの中で特に印象に残ったのが、Plenary session での Ivan Bazarov 氏(Cornell)による Photoinjector についての発表であった。Cornell 大学では ERL の入射器のテストが進められており、最大電流 52 mA が達成されており、また規格化エミッタンス  $0.8 \pi \text{ mm mrad}$  が  $80 \text{ pC/bunch}$  という大電荷で実現されているという目覚ましい成果を上げている。またフォトカソードについての国際的なコラボレーションが進められており、2012年10月に Cornell 大学で第2回目のフォトカソードのワークショップが開催される予定である。

FEL Based Light Source WG では35名程度が参加し、29件の口頭発表があった。5つのセッションが設けられ、Soft X-ray FELs, Hard X-ray FELs, X-ray FEL Oscillators, FEL Theory, Test Facilities and Design Concepts について議論が行われた。SLAC の LCLS でのテラワットを目指した開発(seeding + tapered undulator), Soft X-ray FEL のテスト施設の計画, Echo-Enabled Harmonic Generation (EEHG) の実証実験, XFEL の検討や、理論ではエミッタンス交換によるバンチ圧縮など着実に開発が進んでいる印象であり、FEL が今後放射光にとってますます身近になっていくことを予感させるものであった。Plenary session では Herman Winick 氏(SLAC)による“The Genesis of the LCLS”という発表があり、LCLS の始まりからどのように検討が進んで行ったかが報告された。1992年頃の活発なメールのやり取りなどが紹介され、計画が固まっていく様子がわかり大変興味深くまた個人的にとっても勉強になった。

Storage Ring Based Light Source WG では、Joint session を含めて28件の口頭発表があった。中心となる話題はやはり低エミッタンスを目指したリング開発であった。エミッタンスを下げる方法としては、基本磁場配列(例えば SPring-8 では DBA, Double-Bend Achromat が用いられている)として Multi-bend achromats が検討されており、7-BA ラティスが紹介された。ラティス設計で重要となってくるのが力学口径の改善である。最適化方法として Multi-objectives Genetic Algorithms (MOGA) を使う方法が流行のようであった。解析的なアプローチも進んでおり PEP-X の力学口径の改善方法についての発表があり、

USR に向けて開発が活発に進んでいることが感じられた。Storage ring では USR 開発が一つの方向性となっており、Tevatron サイズの USR の検討結果の報告や、また ERL と USR の比較も行われ、それぞれの特徴が確認されつつある。日本からは、東北大学の浜氏が、3 GeV で低エミッタンスを目指す東北放射光計画についての報告を行った。SPring-8/Riken からの発表はなかったが、R. Hettel 氏(SLAC)の発表の中で SPring-8 II 計画が紹介された。

Timing and Diagnostics WG では、7件の口頭発表があった。主なテーマは、高いダイナミックレンジでのイメージング, Ultrafast Photon diagnostics, レーザー・プラズマ加速での診断についてであった。FEL ではタイミングジッターや安定度が重要であり、タイミングシステムの現状が報告された。また、FEL では進行方向プロファイルの診断も重要となり、Bernhard Schmidt 氏(DESY)によって FLASH での Fast Bunch Profile Monitoring が紹介された。FEL や ERL など放射光の短バンチ化が進む方向にあり、タイミングや診断はますますチャレンジングになっていくが、それに合わせて開発が進められていることが感じられた。

Undulators and Insertions WG では、Joint session を除いて10件の口頭発表があった。今回の WG で紹介されたのが、必要な Undulator の周期長、ギャップおよび K 値、新たな構造の Undulator 開発(超伝導 Undulator, DELTA Undulator), 放射線ダメージの測定である。超伝導 Undulator の開発状況について Jim Clarke 氏(Daresbury Laboratory)から報告があり、6.4 mm ギャップをもつ DELTA Undulator については Heinz-Dieter Nuhn 氏(LCLS)から報告があった。また Nhun 氏からはさらに LCLS の Undulator システムの設置場所における放射線量の測定結果について報告があった。

次に施設見学について紹介する。7日(水)の午後に見学時間が設けられ、参加者は数台のバスに分乗して制限エリアに入域し、バスの中から CEBAF 加速器の外観を見学した後に、JLAB ERL/FELs 加速器の見学となった。FEL 加速器は地下に造られており、フロア内に DC フォトカソード電子銃、超伝導空洞、ERL 周回部ビームラインがコンパクトに設置されている。ビームラインの高さは日本で良く使われている床上 1.2 m よりもかなり低い位置に設定されていた。JLAB ERL/FELs は既にユーザー実験も開始されており、FEL の光を使った幾つかの実験室を見学することができた。加速器室内で ERL 運転におけるビーム損失やビーム調整方法などを JLAB のスタッフと話しているとあっという間に時間が過ぎてしまったが、稼働中の ERL 加速器の見学とスタッフとの議論はとてつ有意義なものであった。

FLS2012 全体を通して感じたことであるが、今も新しい放射光源やユーザーが増え続けており、明るい印象を持った。最も発表件数が多かったものは FEL であったが、

高輝度を狙う貯蔵リングや小型放射光源の新しい進展など、ヴァリエティに富んだ興味深いトピックが多くあった。ERLについては Cornell 大学で瞬間的ではあるが52 mAの大電流を達成したことなど大きな進展があった。また、Unwanted beam の検討も開始され、GeV クラス ERLの X 線光源を見据えた研究が進んでいることが伺えた。

最後に、FLS2012のワークショップ報告からは外れてしまうが、KEK から参加した坂中氏、阪井氏と本報告の執筆者である宮島、島田は FLS2012の翌日10日(土)にカナダのバンクーバーにある TRIUMF 研究所で開催された TRIUMF-KEK ERL Technology Workshop に参加してきた。このワークショップは、ERL 加速器が計画されている TRIUMF と、ERL で共通する技術開発についての情報交換を行うことを目的としたものである。JLAB から

バンクーバーまでの移動は、ニューポートニューズを昼頃に出発し、アトランタとポートランドでの2回の飛行機乗り継ぎで9日(金)の深夜に TRIUMF 研究所のドミトリーに到着というものであった。翌日は午前9時からワークショップ開始であり、ハードなスケジュールであったが、建設中の電子線形加速器や原子核物理実験ホールの施設見学を含めて有意義な議論を行えた。FLS2012と TRIUMF でのワークショップに参加して、世界各地で次世代加速器開発が活発に行われていることを肌で感じることができ、日本でもユーザーのツールとして最適な次世代光源開発を続けることの重要性を改めて強く認識することができた。

1) [http://www.jlab.org/conferences/FLS2012/FLS\\_2012.jpg](http://www.jlab.org/conferences/FLS2012/FLS_2012.jpg)