

12th Hard X-ray FEL Collaboration Meeting

公益財団法人高輝度光科学研究センター

XFEL利用研究推進室 先端光源利用研究グループ 籾内 俊 毅

1. はじめに

12th Hard X-ray FEL Collaboration Meeting が2025年5月19日から21日の日程でスイスのシュトースで開催された。この会議は、日本、アメリカ、ドイツの3拠点の硬X線自由電子レーザー（XFEL）関係者によって2007年に初めて開催されたものである。当時はXFELの稼働前であり、XFELの加速器技術と利用技術に関する共通課題の解決に向けた協力や、人材の交流によるXFEL科学技術の推進を目的として企画された。現在でも、XFEL施設間の科学的または実践的な情報共有と協力関係の維持発展が本会議の主な目的である。

近年では、2019年にアメリカLCLSが主催した第10回の会議の後、新型コロナウイルス感染症の影響を受けてしばらく開催が見送られていたが、2023年にEuropean XFELの主催で再開された。第12回目の開催となる今回の会議には、現在稼働中のLCLS、SACLA、PAL XFEL、European XFEL、SwissFELの5つのXFEL施設に加え、中国上海に建設中のSHINEの関係者が参加した。主催機関であるSwissFEL（PSI）と隣国のEuropean XFEL/DESY以外の機関からは各機関10名程度が参加し、

SwissFELの30名、European XFELの20名とあわせて全参加者は90名程度であった。

なお、対面での会議開催が見送られていた期間においても、European XFEL/DESYが中心となって、オンラインで“Virtual Hard X-ray Collaboration Meeting”が毎月のように開催されていた。ここでは各回1時間程度の講演の他、各施設の運転・整備や技術開発の状況が短く報告されるなど、対面での交流が難しい状況においても情報交換や交流はある程度維持されていた。ただ、やはりオンラインと対面とでは得られる情報には違いがあることを今回も実感した。

本会議は、同時並行で行われる加速器技術のセッションとX線計測・利用技術のセッションの他、各施設の最新情報の報告と、加速器及びビームラインの双方に関係する話題について議論するための全体セッションで構成されている。また、40名程度の希望者に対しては、会議後にPSI（SwissFELとSLS）の見学ツアーが開催された。

2. 会議内容

会議の冒頭では、主催機関であるSwissFELから、開催にあたっての挨拶と会議の全体像の説明が行われた。それに続く形で各機関からの施設報告が行われた。ここでは、各施設から利用運転や最新の高度化の状況と将来計画などが報告されたが、今回もっともインパクトがあったのはEuropean XFELからの報告であったと思う。LCLSに続いて2番目に行われた彼らの施設報告では、昨年新しくディレクターになったThomas Feurer氏が登壇した。ただ、筆者が会期を通して最も聴衆の注目を集めたと感じる彼らのXFEL-O（XFEL Oscillator）プロジェクトの最新の進展に関する2ページのスライドについては、直接実務者から報告がなされた。このプロジェ



図1 会議場の様子（オープニングセッション）

クトはアンジュレーターを挟んでダイヤモンドの結晶を使って共振器を組み、X線増幅を目指す研究開発である。稼働中のXFEL施設としてはEuropean XFELでのみ実用可能なMHzの繰り返し電子バンチを活用している。今回の報告は、会議の前日の実験において、この共振器型のXFELにおけるエネルギー増幅が初めて確認されたというものであり、参加者から非常に強い関心を集めた。ところで、今回LCLSの施設報告ではLCLS-IIの現在の運転状況(33 kHzの繰り返し周波数で、400-1000 eVの光子エネルギー帯において最大500 μ J程度のパルスエネルギーを達成)や、引き続き計画されているLCLS-II-HEへのアップグレード計画について報告がなされていた。実はLCLS-IIの最初の光が確認されたのは、前回この会議がドイツで開催されている最中であつた。当時、LCLSの速報を聞いて参加者から拍手が起こったと記憶している。このような、まさに最新の情報の共有の場に立ち会えることは純粋に面白い。

この報告に次いで目立ったトピックとしては、アト秒XFELの生成と評価が挙げられる。LCLS、European XFEL、SACLA、SwissFELにおいて、軟X線や硬X線のアト秒FELの発生と特性の診断に関する研究が精力的に行われている。このトピックの注目度と目覚ましい進展具合は、最終日の全体セッションのタイトルが当初予定の「Short pulses」から「Very Short pulses」に急遽変更された様子からも見て取れる。PAL XFELや建設中のSHINEにおいては、まだ実験や検証には至っていないものの、すでにシミュレーションなどの検討が開始されているということであり、サブフェムト秒パルスの開発と利用に向けた取り組みが今後一層活発になることを感じさせた。

ところで、ある機関の施設報告においては、高電圧モジュレーターの不具合とそれによって引き起こされたインシデントが、その後の対応とともに具体的に紹介されていた。本稿の冒頭で紹介したVirtual Collaboration Meetingにおいても、いくつかの機関から冷却水や電気関係の事故、装置の不具合などが何度か紹介され共有されていた。このような、いわば「目立った成果」ではないものも含めて情報共有

されるところは、この会議が一般的な科学的な会議と趣が異なっていることを実感させられるところである。

施設報告の後は、2日目の夕方まで加速器技術とX線計測・利用技術の両分野に関するセッションが平行に開催された。今回の会議では各分野で以下の3つのセッションテーマが設定された。

【加速器技術】

- Setup and quality assurance procedures
- Coherence enhancement
- FEL timing and synchronization

【X線計測・利用技術】

- X-ray optics and diagnostics
- Applications of AI
- Large data handling

なお、この会議では、セッションごとに1-2名のコンビーナー（主には主催機関に所属する研究者）が割り当てられる。各機関の参加者らは、コンビーナーから各セッションで共有、議論するトピックを会議開催前に案内され、セッションでの報告の依頼を受ける。当日のセッション構成や流れはコンビーナー次第である。各施設の参加者が順に発表して発表毎に質疑が行われる一般的な学会に近い形式の場合もあれば、各施設から提出された資料を取りまとめてコンビーナーが発表し、その他の時間を議論に充てる形式が取られる場合もある。いずれにしても情報共有や議論の満足感が、コンビーナーの事前準備と当日の采配に大きく依存するのが実情である。

今回、筆者はX線計測・利用技術側の3セッションに参加した。以下ではこれらのセッションで報告、議論されたことのうち、特に筆者の印象に残ったことを紹介する。

超伝導加速器を用いるLCLS-IIが動き始めたこともあって、高繰り返しX線パルスによる光学素子への熱負荷やパルス毎の特性評価技術に関する話題がやや目立ってきているように感じた。また、極限集光ビームの実現とその評価については、引き続きSACLAに優位性があり、信頼性の高い波面計測技術とそれを活用した自動調整技術などについて共同研究の可能性も含めて議論が行われた。反射系光学素子ではなく、屈折レンズを用いたX線集光に関連

して、ダイヤモンドレンズの開発状況や評価結果が DESY との共同研究として European XFEL から紹介された。ベリリウムレンズの入手が困難になっている現状を踏まえると、今後の動向を注視したいトピックである。一方で、1つのセッションでここに記した以外のトピックについても各機関が取り上げていたため、個々のトピックについて深く議論されなかったことが惜まれる。

人工知能 (AI) を活用した自動調整の利活用の事例は、X線計測・利用技術側の枠での開催にも関わらず、加速器運転に関連したものが目立っていた。機械学習 (ML) を用いた加速器運転は、SACLA では日々の調整と運転に使用されており、X線パルスの特性最適化や安定運用に大きく貢献している。一方、LCLS と European XFEL より自動調整用ソフトウェアの共同開発の取り組みなどが紹介されたものの、実際の運転に AI/ML がどの程度うまく活用されているかという点では施設間で大きな差があるように感じた。X線特性診断に AI をどのように活用できるかについては、主に SwissFEL から取り組みが紹介されたが、まだかなり初期の試験段階であるように見受けられた。しかし、SACLA の加速器やビームライン調整、極限集光調整にも様々な自動調整がうまく利用されている状況を踏まえると、AI/ML にどのような活用法があるかは継続して検討すべきであろう。

これらのパラレルセッションの議論のサマリーについては、閉会前の最後の全体セッションで、各セッションのコンビーナーから簡単に報告された。それによると、加速器側のセッションでも AI/ML 技術の活用やソフトウェアの開発について議論がなされたとのことであった。また、Coherence enhancement のセッションでは、先に紹介した European XFEL の XFEL-O について詳細が報告されたということであった。なお、このサマリーセッションの前には、全体セッションとして前述したアト秒 XFEL に関する情報共有とパネルディスカッションが行われた。

3. 施設見学 (PSI)

会議終了後には、PSI にて SwissFEL と SLS を見

学するツアーが希望者向けに開催された。あいにく会議2日目から連日天候がすぐれなかったため、時折強く雨が降る中での見学となった。

ツアーでは、まず回折限界リングとしてアップグレードが行われた SLS2.0 の蓄積リング収納部内と3つのビームラインを見学した。ビームラインの立ち上げを行なっている最中であつたにもかかわらず、この日の午前中は見学のために運転を中断させていたようである。見学したビームラインの1つである物質科学関連の回折実験ビームライン (ADDAMS: ADvanced Diffraction for Materials Science) は、ちょうど見学に前後してファーストビームの導入が計画されていたらしく、見学前日に初めて光がハッチまで導入されたことをビームライン担当研究員がやや興奮気味に教えてくれた。

続いて訪れた SwissFEL では実験ホール側から入室し、加速器の最下流部付近までを歩いてさかのぼって見学することができた。時間が限られる中ではあつたが、5つの全エンドステーションを見学することができた。SLS ではタンパク質の結晶構造解析の自動測定システムを詳細に見せてもらったが、それと同じ装置が SwissFEL にも導入されており、本格的に運用されればハイスループット化に大きく貢献しそうである。SwissFEL の実験ハッチは比較的広く、各ハッチにポンプ・プローブ実験用の光学レーザーが設置されている割には、スペースに余裕があるように感じられた。そのような環境において、大型の装置でも比較的簡便に置き換えられる

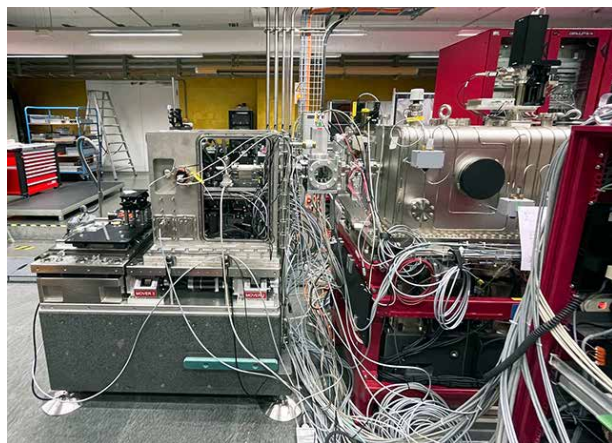


図2 SwissFEL の Cristallina エンドステーションに設置されたシリアルフェムト秒結晶構造解析のセットアップ

ように考慮して設計されている点、定型実験を効率的に行えるようにハードとソフトの両面の工夫されている点は大変参考になった。

4. おわりに

本会議は世界のXFEL施設の関係者が一堂に会して行われるものであり、各施設の最新の動向を一度に知ることができる貴重な機会である。また、数日間にわたって参加者らとセッション外でも交流できる機会があることで、施設間の共同研究につながるような議論が行えるところも有益である。

なお、次回の会議が2026年9月に韓国においてPAL主催で開催される予定であることが本会議の最後に案内された。今後SHINEの整備が順調に進めば、次々回は中国での開催となる見込みである。

藪内 俊毅 YABUUCHI Toshinori

(公財) 高輝度光科学研究センター
XFEL利用研究推進室 先端光源利用研究グループ
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 050-3502-4815
e-mail : tyabuuchi@spring8.or.jp