

## ■動向

## European XFEL 実験記

片山哲夫 (高輝度光科学研究センター), 大和田成起 (高輝度光科学研究センター)

European XFEL は DESY キャンパスからハンブルグ郊外まで全長 3 km 以上にわたる巨大な X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設であり, 建設にヨーロッパ各国が出資している。その最大の特徴は超電導加速空洞によって最大 4.5 MHz の高繰り返しで XFEL 発振が可能となる点であり, 他の XFEL 施設 (LCLS@米国, SACLA@日本, PAL-XFEL@韓国, Swiss-FEL@スイス) に比べてフラックスが劇的に増大する。従って, これまでの XFEL では困難だった (共鳴, 非共鳴) 非弾性 X 線散乱などの Photon hungry な実験が可能になると期待されている。European-XFEL ではパルスレインが 10 Hz 毎に発生するバーストモードと呼ばれる特徴的なパターンで XFEL が供給される。Early user experiment としてユーザー運転が開始された直後の 2017 年 9 月時点では, 時間間隔が  $1 \mu\text{s}$  (1 MHz) の 30 パルスがパルスレインとして採用されており, 1 秒あたり 300 パルスの XFEL が利用可能であった。レインあたりのパルス数を増やしていく (最大 2700 パルス) には, 漏洩検査の他にアンジュレータへの電子線ダメージの低減といったクリアすべき課題があるようである。

European XFEL で稼働しているビームラインは, FXE (Femtosecond X-ray Experiments) と SPB/SFX (The Single Particles, Clusters, and Biomolecules/Serial Femtosecond Crystallography) の 2 つであり, 12 時間シフトで交互にビームラインを交代しながら実験を行うスタイルである。この度 SACLA から片山・大和田の両名が実験に参加する機会を得ることができたため, その様子を簡単に紹介したい。

2017 年 9 月 15 日~18 日の期間, European-XFEL の公式のユーザー実験 (Early User Experiment) に片山が参加した。実験を行う建物はドイツのハンブルグ空港から電車とバスで 1 時間半程度かかるシェーネフェルトにあり, 閑静な環境に囲まれている。まさに共用運転が始まったばかりのタイミングだったので宿舎や食堂などは整備されておらず, 我々を含め, 外部からの実験参加者は皆, 徒歩 20 分程度の一番近いホテルに宿泊しているようであった。宿舎や食堂は今後整備されていくようであるが, 初めて訪れる参加者にとっては状況を良く確認しておく必要がある。今回参加したのは FXE 最初のユーザー実験で, PI は

Wojciech Gawelda 氏であった。FXE はポンプ (同期レーザー)・プローブ (XFEL) 計測に特化したビームラインであり, X 線分光, X 線散乱, X 線回折の実験が想定されている。ビームラインの X 線光学機器は高繰り返しの XFEL によって発生する熱に耐えなければならない。この対処のため, 放射線耐性の高いダイヤモンド光学素子の採用や, 冷却機構の組み込みが進められており, 統一されたコンセプトでビームライン全体が構築されている。今回の実験内容は, 検出器を含めた各種機器の動作確認や FXE の主目的であるポンプ・プローブ X 線計測の検証であった。コミッショニングで完了しきれなかった内容も含まれていたが, SACLA でもそうであったように最初期の運転では珍しいことではないと思われる。今後のどの程度のスピードで各要素技術が開発・整備されていくのが重要であろう。実験では 9.3 keV, 400~500  $\mu\text{J}$  の XFEL を用いた。日をまたいでもビームポインティングが大きくなることはなかったが, パルスエネルギーは加速器の調子次第で安定している時と不安定な時があった。検証実験として Fe(bpy)<sub>3</sub> の光誘起スピントロニクスオーバーを対象に X 線発光分光と X 線散乱の計測を行った。3 シフト目の最後に, 光誘起の X 線発光スペクトル変化の検出に成功したが, ここまで時間を要したのは主に XFEL と同期レーザーの空間オーバーラップの確保に手間どったためである。この苦労は SACLA でも経験してきたので予想はしていたのだが, 高繰り返しの XFEL では特有の課題が発生することもわかった。

XFEL を利用する実験は SFX に代表されるように基本的に破壊型になる。ここでいう破壊型とは, 試料の構造 (原子配置) が不可逆的に壊れることだけでなく, たとえ試料の構造は保持されることがわかっていても, XFEL (同期レーザー) 照射によって生じる電子遷移とその緩和には有限の時間がかかるため, その間, 電子構造は基底状態のそれとは異なっている。最初のパルスで生じた変化が戻らない内に次のパルスが照射されると本来とは異なる電子構造をプローブすることになり, 正しい実験データを取ることができない。このため, 溶液を対象としたポンプ・プローブ実験では, 通常インジェクターからのジェットを使うことで, パルス毎にフレッシュな試料を照射領域に供給する。フレッシュな試料を供給できるかどうかは, ジェットの速度, XFEL (同期レーザー) の径, 繰り返し周波数に

よって決まる。例えば、繰り返し周波数を1 MHz、同期レーザーの集光径を50  $\mu\text{m}$  と仮定すると、ジェットの水の速度は50 m/s以上になければならない。実際、今回得られたデータにはX線（同期レーザー）ダメージがあると解釈されており、これを解決する要素技術は、高繰り返しXFELのサイエンス開拓に重要な役割を果たすと考えられる。（片山）

今回私（大和田）が参加したのは、11月16日から21日にかけてSPB/SFXハッチで行われる予定だった、同期レーザーとXFELのタイミング測定の実験（PI：佐藤篤志氏）である。「予定だった」と書いたのは、なんと実際にはこの実験は行われなかったためである。輸送ミラーのベント機構や加速器に不具合が生じ、その交換・調整に伴うコミッシング時間の確保が必要との理由らしい。海外のXFEL施設、しかもユーザー運転を開始したばかりのEuropean XFELでの実験ということで楽しみにしていたのだが、当日の朝に中止になったと聞いて非常に残念に思ったものである。ビームタイムは5シフト（12時間×5日間）あったので、なんとか実験できるようにならないかと期待していたが、納品されたばかりのフェムト秒レーザーにも不具合があることがわかり、残念なことに最後まで実験が行われることはなかった。なお同期レーザーの不具合は、ビームタイム後に速やかに解決されたそうである。今回は、キャンセルとなった実験のかわりにコミッシングが行われることとなり、光軸調整や集光調整、検

出器の試験などの様子を見学させていただくこととなった（内容はいずれも非常に地味なので、詳細は割愛させていただく）。立ち上げ期らしいトラブルも何度かあったが、コミッシングは概ね順調に進んでいた。ひとつ印象的だったのが、研究員の勤務時間が8時間と決められていることだ。施設側のビームタイムだったせいもあるのだろうが研究員も決められた時間を守ることができているようであった。10人足らずの研究員で3ビームラインを同時並行に運用しているSACLAと比べて、European XFEL人材の豊富さを見せつけられた気がした。

気になる滞在環境については、2017年11月時点でも宿舍や食堂はサイト内に整備されておらず、近くにあった大きなレストランも火事で全焼という有様であったが、サンドイッチなどの自販機は備えられているため、最低限の食事に困ることはなさそうだ。また、宅配の弁当なども利用できる（私が利用したところはかなり大盛りで、味が濃かったが）。宿舎に関しては、ユーザーオフィスに依頼すれば近隣のホテルを予約してくれるようであるが、徒歩で20分程度かかってしまう。一方で、バスを利用すればアルトナなどの大きな街からでも20~30分程度で通えるので、サイト内の設備が充実するまでは、そちらの方が良いかもしれない。

最後になったが、今回の滞在中でお世話になった方々、特に佐藤篤志氏、中堤基彰氏、谷川貴紀氏、牧田実香子氏にこの場を借りて感謝の意を示したい。（大和田）