

第2回 XFEL3 極ワークショップ報告 (Report on the 2nd XFEL 3-Way Workshop)

矢橋牧名, 田中 均 (理研・JASRI X線自由電子レーザー合同計画推進本部)

X線自由電子レーザー (XFEL) は, その超高輝度・コヒーレント・超短パルス特性を活かして最先端の光科学を開拓することが期待されている。日本においては, SPring-8 キャンパスにて, 理研・JASRI の合同チームが XFEL 施設 (加速エネルギー 8 GeV) の建設を進めている。この建設プロジェクトは 2006 年度から 2010 年度までの 5 年にわたる計画で, 国家基幹技術に指定されている。2011 年度には, 供用運転が開始される予定である。この XFEL には, 日本独自の加速器・光源システム (真空封止アンジュレータ, 低エミッタンス熱電子銃・多段バンチ圧縮システム, 高加速勾配 C バンドライナック) が用いられている。この R&D のために, 2005 年に SPring-8 Compact SASE Source (SCSS) 試験加速器 (加速エネルギー 250 MeV) が建設され, 2008 年 5 月からは, 極紫外領域 (波長 50 nm 近傍) の FEL の利用運転が開始されている。

世界に目を向けると, XFEL 建設プロジェクトは, 米国の SLAC 国立加速器研究所 (SLAC), ドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) においても進められている。これに SPring-8 を加えた 3 施設間の国際協力を進めるために, 3 極コラボレーションの枠組みが 2007 年に立ち上げられ, SPring-8 において第 1 回の XFEL3 極ワークショップが開催された。これに続く第 2 回のワークショップは, 2009 年 2 月 27, 28 日, SLAC にて開催された。本ワークショップは一方通行的に発表を行うのではなく, 共通の問題に関し議論を行うことを目的としており, 初日冒頭の 3 施設の現状報告以外は全てディスカッション (現場見学を含む) にあてられている。今回, ホストである SLAC は, 彼らの XFEL 施設 (Linac Coherent Light Source, LCLS) のコミッショニングの最中であり, 特に加速器グループは非常に多忙の様子であったが, 活発な議論とともに運転現場等の見学も行うことができ, 充実した二日間であった。

初日は, 午前中に各施設から現状報告がなされた。SLAC からは, J. Hastings, J. Arthur, P. Emma が報告を行った。ライナック部分のコミッショニングは昨年終了し, 現在はアンジュレータ部分のビームチューニングを行っている。最近, アンジュレータの磁石列がない状態で, 電子ビームのエネルギーを 4~14 GeV の間で変えながら軌道調整を行う, いわゆる “Beam Based Alignment (BBA)” により ミクロンオーダーの精度が達成された

(詳細は後述)。また, 電子バンチ内での不安定現象であるコヒーレント放射光の影響で, 遷移放射光 (OTR) によるビームプロファイル計測ができないという問題が以前より指摘されているが, この対策として, 入射部においてレーザーヒーターが導入され, エネルギーブレッドを 6 keV から 40 keV 程度に増加させることで, コヒーレント放射光の抑制が観測されたという報告があった (詳細は後述)。繰り返しレートは, 設計性能は最大 120 Hz であるが, コミッショニング中は 10 Hz で行われる予定である。3 月上旬にアンジュレータ磁石列をインストールし, 5 月から 7 月にかけて 1 keV 付近の軟 X 線領域において FEL のコミッショニングを行う。さらに, 2009 年 9 月に原子分子光学 (AMO), 2010 年前半に軟 X 線 (SX) のステーションの利用実験が開始され, 2010 年秋には硬 X 線 FEL を利用する X 線ポンプ・プローブ (XPP) ステーションの利用が始まる予定である。

DESY からは, W. Decking, T. Tschentscher, K. Tiedtke が報告を行った。DESY サイトでは, 硬 X 線 FEL の European XFEL (E-XFEL) の建設とともに, 極紫外~軟 X 線領域の FEL 装置である Free-electron LASer in Hamburg (FLASH) の利用運転が 2005 年から行われている。E-XFEL は 2014 年にコミッショニングを開始し, 2015 年に利用運転を予定している。現在トンネルの建設工事が始まったところである。超伝導加速管の性能向上が進んでおり, 最近では 25 MV/m 程度の加速勾配が得られている。マルチバンチ運転時の分光器への熱負荷が高くなること (マクロバンチ内の平均パワー: 10 kW) への対策として, 薄いダイヤモンド結晶を用いた分光器が検討されているが, まだ有効な解は得られていない。FLASH においてはユーザー運転は年間で 3,000 時間を超えているが, 同程度の時間をマシンスタディ及びビームラインスタディに割り当てている。ユーザー運転の中で, 加速器調整に 2 割近い時間を要している。長時間の調整を要する原因は, 電子バンチの中で, 実際に FEL 発振に関わっているコアの部分のチャージ量が 10% 程度に過ぎず, 90% がバックグラウンドになっていることである。前者の割合を増やすために, 2009 年の秋からのシャットダウン時に 3.9 GHz 補正空洞の導入を予定している。この結果, パルスエネルギー, パルス幅はともに増加することが期待される。また, 同じ時期に, 波長 30 nm のシーディングのための改造も行われる。ただし, シード運転時はマルチバンチの利用

はできない。さらに、将来計画として、より短波長領域のフルコヒーレント光を発生させるために High Gain Harmonic Generation (HG) ラインを新設することが検討されている。

SPring-8 からは、石川、新竹、田中均、矢橋が報告を行った。XFEL 建設、SCSS 試験加速器の現状が報告され、実機のコンポーネントの建設が順調に進んでいること、また試験加速器が高い安定性と信頼性を有していることが強調された。また、コラボレーション項目として試験加速器の利用が提案された。

午後は、加速器、利用に分かれて議論を行った。加速器では、アンジュレータ周りの技術的課題が集中的に議論された。特に印象に残ったのは、LCLS で最近ようやく目処がついた、リング加速器のビーム応答解析法の線型加速器版とも言える BBA によるアンジュレータ部の精密軌道調整の成果である。130 m のアンジュレータ部を数ミクロンの精度で直線に設定することが求められる。4 極電磁石と Radio Frequency Beam Position Monitor (RFBPM) の水平・垂直オフセットをフィッティングパラメータとし、各オフセットの線形応答関数を用いて、制約条件を経験的に最適化しながら数ミクロンの精度で軌道を収束させることに成功したのは驚異的である。フィッティングの妥当性は、電子ビームエネルギーを 4 GeV~13 GeV まで 4 段階に変化させ、全てのエネルギーで得られたオフセット分布が一致することで保証される。若干の不定要素は、各エネルギーでの電子ビーム空間分布の違いによる RFBPM の誤差が軌道設定に入り込む可能性であるが、これが小さければ、SPring-8 でも検討に値する。

利用系では、LCLS のフロントエンドエンクロージャ (FEE、フロントエンドコンポーネント・偏向ミラー等の収納部)/AMO コミッショニング、X 線スプリット・ディレイライン、Shack-Hartmann 型 Wavefront Sensor, Start to End (S2E、アンジュレータから光学系、サンプルを経て検出器に至る) シミュレーション等のテーマが取り上げられた。FEE/AMO コミッショニングは、2009年5月から7月に行われる予定であり、他施設からの参加も歓迎している。X 線スプリット・ディレイラインは、光子相関分光 (PCS) を行うために Grubel (DESY) らが開発を進めている。Si 511 反射 (ブラッグ角 $45^\circ @ E = 8.4 \text{ keV}$) を 8 枚組み合わせる。最大ディレイ幅は現在の装置では 2.84 ns となっているが、さらに大きくとるためには、ビームの偏向方向を水平にすることが考えられる。このとき、水平偏光を垂直偏光に切り替えるためにダイヤモンドの移相子を導入する必要がある。また、DESY のバンチ間隔は 200 ns もあり、ここまでカバーするディレイラインは現実的ではない。バンチ間隔を小さくするために、SPring-8 で検討されている方式と同様の、隣接する RF パケットの利用が提案された。さらに、重要な開発要素として薄型シリコン結晶 (例えば、厚さ 6 μm 程度) がある

が、これは日本が全面的に協力して進めることとなった。Wavefront Sensor は FLASH で開発が進められている。特に、ファーフィールドにおける波面計測をビームフォーカスのプロファイル測定に応用するための検討が進められている。視野を大きく ($\sim 15 \text{ mm}$) とするために、焦点から 8 m 下流の位置にセンサーをおいて計測を進めている。アクリルガラス (PMMA) を用いたアブレーションを利用した破壊型計測との一致も良好ということである。S2E シミュレーションでは、SLAC において、停留位相法等に基づく 2 次元のコードの開発が進められている。日本では、大阪大学のグループにより、集光プロファイルを求めるための波動光学に基づくシミュレーションが既に行われている。この場合の対象は 1 次元であるが、計算と実測が良く一致していることが強調された。このあと、実験ホールの見学が行われた。レーザー用の光学定盤、制御ラック等の設置が着々と進んでいた (図 1~3)。

2 日目の午前中は、利用系はテーマ毎に 4 班に分かれて議論が行われた。Y. Feng, H. Sinn, 矢橋らは、XFEL の共通光学系・診断系の議論を行った。強度・位置モニターとして、SLAC, SPring-8 ともフォイルの後方散乱を用い

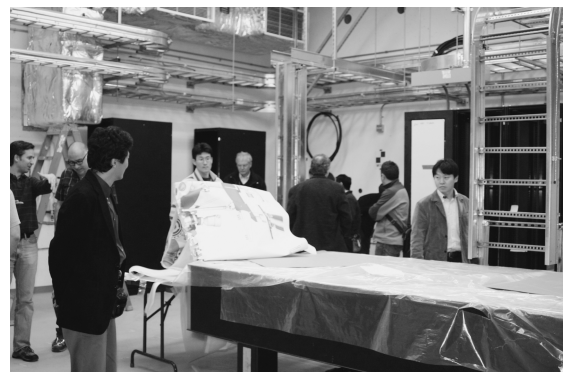


図 1 Near Experimental Hall (NEH) 実験ハッチ上階に設置された同期レーザー室



図 2 Far Experimental Hall (FEH) へ続く光輸送路。NEH 付近のコンクリート穴から先の輸送路を覗いた風景。



図3 FEH の内部。トンネルの内寸は幅15 m、長さ80 m、高さ10 mあり、SCSS 試験加速器を5セット以上並べることが可能である。



図5 強烈なC-OTRの燦めき！ 右側のスクリーンの左下YAGXRAY と表示された緑枠内の発光がC-OTR。この形状は電子ビームの空間プロファイルを全く反映していない。



図4 巨大なアンジュレータホールでの記念撮影。前列向かって左から、大竹雄次、田中隆次、新竹積（理研 XFEL）、Paul Emma（SLAC）、後列左から、Winfried Decking（DESY）、田中均、前坂比呂和（理研 XFEL）。真空チェンバーは最下流のフルエネルギービームダンプまで繋がっており、電磁石、モニター、アンジュレータ架台等、アンジュレータ以外の全ての必要な機器が据え付けられた状態であった。訪問翌週から20台のアンジュレータが設置される予定。

ることを計画している。SPring-8 ビームラインにおいて、共同でテストを行うことが提案された。また、SPring-8 において工藤らにより開発された高速シャッター（60 Hz のパルス列から任意のパルスを取り出す）と、XFEL の照射損傷が少ないと期待される CVD ダイアモンドに大きな関心が寄せられた。

加速器グループは、運転中にも関わらず特別にアンジュレータホールの見学が許可され、さらに制御室で実際のビームチューニングの様子を見学することができた（図4）。一番の収穫は、SCSS 試験加速器では見られない可視領域のコヒーレント遷移放射（C-OTR）の状況を直に見ることができたことである。この現象は、SLAC で観測されて以来、FEL 業界で繰り返し議論が戦わされてきた問題である。SLAC 側は普遍的なビーム不安定性であると主張、一方で私たちの立場は、SCSS 試験加速器の運転において一度も発生していないことから、LCLS の入射器に固

有の問題（エンジニアリングに付随する問題）との主張である。第一ドックレグ（DL1、バンチを時間方向に圧縮しない様設計された、犬の足の形をした輸送路）の下流、1 段目のバンチ圧縮器（BC1、バンチを時間方向に圧縮することを目的に作られたシケイン型のビーム輸送路）の上流に設置された OTR モニターで135 MeV の電子ビームが発する C-OTR がまるで太陽のように激しく燦めく状況（図5）は、SCSS 試験加速器で OTR 発光から電子ビームの射影エミッタンスを評価してきた私たちには想像できないものであった（目にしなければとうてい理解できない！）。Charge Coupled Device（CCD）画面の大部分の出力は飽和し、光の中心部の CCD は焦げ付いていた事からも、その発光の激しさが想像できる。レーザーヒータ（レーザーと小型シケインを用いて電子ビームの密度変調を取り除く装置）の出力を高め、C-OTR がほぼ抑制された小さく弱々しい発光状態から比較し、光強度は数桁以上増大しており、サブミクロンスケールの密度変調が電子ビームの時間方向に顕著に生じている事が実感できた。会議では報告されなかったが、レーザーヒータ導入後も、BC2 以降では C-OTR が未だに観測されている事実も分かった。C-OTR を作るサブミクロンスケールの密度変調は、結局レーザーヒータによって消し去ることができなかった訳である。DESY の FLASH でも、RF ディフレクターによる電子ビームの時間方向密度分布に櫛状構造が見られた事実をこの見学の後に Decking から教えて貰った。FLASH の SASE FEL が不安定である本質は、オーババンチ（バンチを時間方向に圧縮する過程で、非線形によりバンチ先頭が湾曲し、スパイク上の高密度部がバンチ先頭付近で発生する）状態での運転にあるのではなく、実はこの辺りにあるのだろうか。熱電子銃を採用した SCSS 試験加速器では、未だに観測されたことがない C-OTR を発生させる密度変調は、フォトカソード RF 電子銃に由来する可能性が高く、あらためて熱電子銃の安定性を痛感すると共に、安定な FEL 運転を左右する鍵になる可能性もあると感じ

た。

午後に会議のサマリーがまとめられた。加速器グループにおいては、各施設でタイムラインと装置構成が大きく異なるため、議論がかみ合わない点も多いが、お互いの現場を見学し意見交換をすることは非常に有用であり、今後も継続すべきであるという結論が新竹により述べられた。利用系では、薄型結晶の開発 (Si 111, 110等も含む)、位相子等の光学素子の開発、Wavefront SensorのAMOコミッションへの応用 (ハッチの制約から集光点からセンサーまでの距離を長くとることが難しく、かつ小型のセンサーが必要という問題はあるが)、Wavefront シミュレーション (強く減衰させた場合を含む) 等のアイテムについて、継続してコラボレーションを行う。今回は2010年4月頃に、ドイツ DESY にて開催の予定である。

筆者らが全体を通して最も強く印象に残った点は、欧米と日本のプロジェクト体制の違いを再認識させられたこと

である。特に、ドイツではXFEL実機の利用はかなり先にも関わらず、FLASHとは独立して専属の研究者を置くほど、マンパワーを充実させている。詳細なR&Dを可能とする一方で、プロジェクトの方向性の軌道修正は容易ではないという印象を受けた。これに対して、日本のスリムな体制は、小回りが利き無駄が少ないが、多くの課題に対し包括的に取り組むことは難しい。それを補うためにも、今後一層国際協力を進めることが、我々にとって非常に重要かつ有益であると感じた。また、国際協力は色々な装置自体並びに装置の実際の運転状態に触れる機会をも与え、人間の欠落した創造性を補うということも痛感した。

謝辞

ワークショップに参加した理研 X線自由電子レーザー計画推進本部の前坂比呂和氏、大竹雄次氏の撮られた写真を使用させて頂いたことに感謝致します。