

■ 会議報告

第32回 FEL 国際会議 (FEL2010) 報告

原 徹 (独立行政法人理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部)

第32回 FEL 国際会議は、2010年8月23～27日の5日間、スウェーデンのマルメにおいて、MAX-lab と Uppsala の FEL center の主催で開催された。マルメは、コペンハーゲンから海上にかかる橋を渡って電車で約30分のスウェーデン南部に位置し、人口は27万人、スウェーデン第3の都市である。今年の会議への参加者は約300名で、58件の口頭発表と約200件のポスター発表があった。

会議は恒例となっている FEL 賞受賞者の記念講演ではじまった。前年の FEL 賞受賞者である SLAC (アメリカ) の D. Dowell 氏がフォトカソード電子銃のエミッタンス限界について、P. Emma 氏が CSR など linac におけるエミッタンス増加のメカニズムについての講演を行った。SLAC や PSI (スイス) などで測定されているフォトカソードのエミッタンスは、理論値よりも常に2倍程度大きい値になっており、何か解明されていない物理があるのではないかとのことであった。続く FEL の new lasing セッションでは、FLASH (ドイツ) 加速器改造後の4.45 nm での発振、SPARC (イタリア) のシード型 FEL におけるレーザー増幅、SCSS (日本) の61.5 nm のシード型 FEL など、新たに得られた FEL 発振の成果が報告された。

以下大まかに会議でのいくつか発表内容を、極めて主観的印象交えて紹介する。会議のプログラムとその他多くの発表については、会議のホームページ ([http://](http://fel2010.maxlab.lu.se/)

fel2010.maxlab.lu.se/) に発表資料とプロシーディングが公開されているので参照されたい。

・施設報告

SINAP (中国) の実験報告の後、XFEL/SPring-8 (日本)、PSI、EuroFEL (欧州) の計画について発表があった。SINAP は、運転開始から1年半足らずの間に SASE、HGHG、ECHO と次々に実験を行っており、中国が FEL を積極的に推進している様子が伺えた。PSI は試験加速器施設が立ち上がり、X線 FEL である SwissFEL のほうも順調に計画が進んでいるようである。

FEL 計画の報告で特に印象的だったのは、PSI、Po-hang (韓国)、SINAP などが、加速器として C-band の採用を検討している点である。C-band は日本独自の技術で、実用化されている加速管やクライストロンの周波数は 5.7 GHz である。ヨーロッパ標準の C-band 周波数は 6 GHz (S-band は 3 GHz) になるのだが、PSI はこれまで日本で開発されてきたコンポーネントを採用するため、ヨーロッパ標準を捨てて周波数を 5.7 GHz に変更するようである。また PSI が C-band を採用する理由は、高加速勾配が得られるだけでなく、電気代が S-band に比べ安いという点を重視しているようである。

・短波長 FEL

短波長 FEL は、昨年 X線 FEL 発振に成功した LCLS



会議参加者による記念撮影

(アメリカ)と、加速器改造を終えたばかりの FLASH の発表が目立った。LCLS は、もともと高エネルギー実験用だった SLAC 線形加速器の下流1/3を使っているが、更に上流側の1/3を使って、軟 X 線 FEL を立ち上げる次期計画を紹介していた。また現在設置されている33台のアンジュレータのうち、後半10台のアンジュレータギャップを広げ、2次高調波を増幅する after-burner の実験結果を報告した。今のところ5台のギャップを広げて実験したところ、ほぼ予想した通りの増幅を確認したということである。この after-burner の運転には、電子ビームのエネルギーブレッドを増加させて電子バンチ内の microbunching instability を打ち消す laser heater が不可欠であり、laser heater を入れないと after-burner の増幅率が著しく落ちるとのことである。Microbunching instability は LCLS 運転開始当初からの問題で、電子バンチについた密度変調によるコヒーレント放射により、加速器に設置したスクリーンモニターが全く使えない状態になっている。この microbunching instability が、フォトカソード RF 電子銃共通の現象なのか、LCLS 固有の問題なのかははっきりとしていないが、世界初の X 線 FEL を実現させた施設の影響力は大きく、無駄になるかもしれない laser heater があちこちの FEL 計画で採用されつつある(無駄にならないかもしれないが)。ちなみに熱電子銃を使っている SCSS では、この問題は起こっていない。

FLASH の加速器改造はビームエネルギーの増強だけでなく、非線形補正用高調波空洞の設置、安定性向上のためのフィードバック整備、電子銃の交換など多岐におよんでいたようである。まだ改造後日が浅いためか、加速器を十分調整しきれていない印象が残った。

・時間コヒーレンスの改善 (SASE からの脱却)

FEL 会議のセッション分けは毎年少しずつ異なるのであるが、今年は初めてシード型 FEL に関するセッションが独立に設けられた。昨年、一昨年の会議あたりから既に SASE の実現はもう当たり前で、これからは FEL 光の時間コヒーレンスをいかに改善するかが話題の中心になっていたが、今年の会議でもガス高次高調波を用いたシード型 FEL やビーム ECHO など、多くの発表があった。

FLASH の加速器を用いて波長30 nm 付近のシード型 FEL を目指す sFLASH は、独立のアンジュレータを設置し実験を開始したが、シード光の増幅はまだ確認されていないようである。

ビーム ECHO は、昨年の会議で Stupakov 氏が提案した時間コヒーレンスの改善方法で、外部からのコヒーレント光で電子バンチにエネルギーモジュレーションをかけた後バンチ圧縮器でオーバーバンチさせ、更にもう一度コヒーレント光とバンチ圧縮器を用いて位相空間の電子分布を回転させることにより、コヒーレント光の波長よりも短い周期で電子バンチに密度変調を生成する方法である。ビーム ECHO はシード光源のない X 線領域に使えること

から、そのアイデアは注目されていたものの、その実現性に疑問をいただく人は少なくない。しかしながら、いずれもまだ FEL 発振にはほど遠いものの、今年は早くもいくつかの実験データが SLAC や SINAP から発表されており、X 線領域の SASE からの脱却を目指し精力的に研究が進んでいることを感じさせた。

DESY (ドイツ) のグループは、新しい self-seeded FEL のスキームを提案していた。Self-seeded FEL とは、上流のアンジュレータからの SASE を分光器で狭帯域化した後、下流アンジュレータのシード光として用いるアイデアである。従来の案では、分光器でシード光を切り出すために複数の結晶が必要で、かつ電子バンチがシード光パルスと重畳するように大がかりなシケインを設置しなければならなかった。DESY のグループの提案は逆転の発想で、シード光を切り出すのではなく、バンド幅の広い SASE スペクトルに狭帯域の穴を開けることにより時間コヒーレンスを改善しようというものである。これなら1枚の結晶に SASE を透過させるだけで済む。個人的には、何段もの複雑な構成を必要とする ECHO よりも、この方式のほうがより現実的なのではないかと感じた。

・THz 光源

分子研 UVSOR では、THz で強度変調を掛けた外部レーザーパルスをアンジュレータ内で電子バンチと重ねることにより、THz のエネルギー変調を電子バンチにつけ、下流の偏向電磁石から準単色コヒーレント THz 光を取り出すことに成功した。レーザーパルスの強度変調周波数を変えれば、それに応じて THz 光の波長を変えることができ、更に2パルスのレーザー光を用いて THz 光スペクトルを干渉させた狭帯域化の実験結果も示された。これら加速器とレーザーを用いた THz 光生成の精密な制御は、これまであまり例がないのではなかろうか。

10年ほど前までは長波長 FEL といえば赤外や遠赤外が中心で、マイクロ波 FEL は20年前の話題であったが、最近では小型加速器を用いた THz FEL の研究が盛んに行われている。惜しむらくは、X 線領域におけるタンパク質構造解析に匹敵するような利用分野がまだ現れないことだろうか。

・レーザー wakefield 加速器

レーザー wakefield 加速器など、加速器小型化の技術開発は最近の流れである。LMU (ドイツ) の発表では、レーザー wakefield 加速器で加速した200 MeV 電子ビームをアンジュレータに通し、17 nm の放射光発生実験の報告があった。レーザーの技術が進み6 J-30 fs 程度のレーザーパルスが実現できれば、レーザーとプラズマの相互作用がバブル領域とよばれる領域に入り、高エネルギーで低エミッタンスのビーム加速が可能になるそうである。近い将来、レーザー wakefield 加速器を用いた小型 FEL (発表者はテーブルトップは言い過ぎで、バンケットテーブルぐらいと表現していたが) が実現するかもしれない。

研究発表の他に、専門家以外（といっても全員 FEL の専門家といえばそうなのだが）を対象とした tutorial 講座が今年の会議から設けられている。今年のテーマは、FEL の物理（FEL はいかにして動作するか）、ガス高次高調波の発生原理と特徴、X 線 FEL の加速器、FEL で使われるモニターの 4 つであった。特に初日の B. McNeil 氏による FEL 物理の講座には、地元高校生約 10 人も招待され、会議参加者に混じって講演に耳を傾けた。どの講演も直感的に非常にわかりやすく説明がなされ、普段理解しているつもりの原理も、違った見方や説明があるものだと感心して聞いていた。

バンケットは港近くのレストランで行われ、今年度の FEL 賞と若手奨励賞の発表があった。FEL 賞は、現在世界中で最も広く使われている FEL シュミレーションコードの制作者である PSI の S. Reiche 氏が受賞した。若手奨励賞は、博士課程学生として SCSS のシード型 FEL 実験に参加し、その成果を論文にまとめた G. Lambert 氏（現所属はフランス LOA）が受賞した。XFEL/SPRING-8 関係者にとっては、半ば身内の受賞であり喜ばしい限りである。

会議のツアーは、隣町ルンドにある MAX-lab とルンド大学レーザーセンターの見学であった。MAX-lab には MAX-I, II, III と 3 つの放射光リングがあり、また入射器を使った FEL 施設も併設されている。MAX-lab といえば、超低エミッタンスの次世代蓄積リング MAX-IV 計画があるが、建設現場は見学時にはまだ手つかずのまま、2010 年中に建設が開始されるらしい。MAX-IV の電磁石は、偏向電磁石と四極や六極を一体として 1 つの鉄ブロックから削り出して製作され、更に BPM までも内包している。うわさには聞いていたが、展示してあった鉄ブロックの大きさを見るととても 3 GeV リングの電磁石とは思えない大きさで、断面がわずか 30 cm 四方程度しかない。聞いてみると、真空ダクトの外径も 25 mm 程度で、XFEL/SPRING-8 で使っているダクトとはほぼ同じサイズで

あるらしい。蓄積リングの真空ダクトといえば、平べったい楕円ダクトをすぐ思い浮かべるが、超低エミッタンスなのだから入射さえ何とかなればこれで問題ないのである。恥ずかしながら筆者はこれまで MAX-lab は名前ぐらいしか知らなかったのだが、非常に先進的な独自の発想で加速器の開発を行っていると感じてしまった。

さて今年の会議全体の印象であるが、今年の LCLS 成功のような大きな話題はなく、ECHO のような注目される新しいアイデアの提案もなかったように思える。ある年配の方がおっしゃっていたが、昔（多分 1980, 1990 年代）の FEL 会議といえば小規模施設が工夫を凝らし、多種多様なアイデアや実験結果を発表していた。それが最近、X 線や軟 X 線の大規模施設の発表ばかりが目立つ傾向にある。逆の見方をすれば、これまであまり世間から注目されなかった FEL が、X 線や軟 X 線領域のレーザーを実現できると社会に認知されたことにより、大きな予算が投入され大規模な計画が進められるようになったということであるのかもしれない。また昔は FEL 会議とともに開催されていた FEL 利用者ワークショップが、いつの頃からかなくなってしまい、今年の会議では FEL ユーザーの参加があまりなかったように思える。ユーザーにしてみれば、自分達の専門分野の会議で発表することの方が重要であると考え、加速器や光源の話題が中心の FEL 会議から足が遠ざかることは理解できる。しかし、既に稼働している LCLS や来年運転が開始される XFEL/SPRING-8 等でこれから利用実験が進む中、ユーザーと加速器側の交流を促進するためにも、ユーザーの参加を促すようなプログラム編成など、会議の運営にも改善すべき点があるように思える。

次回 2011 年の FEL 国際会議は、2011 年 8 月 21～26 日まで上海で開催される。その翌年の 2012 年は、京都大学、理研、JASRI が中心となって京都で開催されることが決まっている。