

38<sup>th</sup> International Free Electron Laser Conference 会議報告

国立研究開発法人理化学研究所  
先端光源開発研究部門 金城 良太

## 1. はじめに

2017年8月20日から25日、アメリカ合衆国のロスアラモス国立研究所 (LANL/Los Alamos) に近いニューメキシコ州の州都サンタフェにおいて38回目となる自由電子レーザーに関する専門国際会議 38th International Free Electron Laser Conference 2017 が開催された<sup>1)</sup>。ホストは、1993年に光陰極RF電子銃と46 MeVライナックからのビームを使った3次光発振でUV-FELを実現した、ロスアラモス国立研究所である。FEL Conferenceは2015年の37回(韓国太田市、PAL主催)から、それまでの毎年の開催から2年毎の開催となったため、2年ぶりにFELの専門家が一堂に会する会議となる。

サンタフェはスペイン人によって築かれたアメリカの中でも最古の都市のひとつであり、合衆国、アメリカン・インディアン、メキシコ、スペインの文化を融合した独自の文化を持ち、多くの建物はプエブロを模した特徴的なアドビ風建築である。食文化はメキシコ料理をアメリカナイズしたTex-Mexに近い。標高2,000メートルを超えているため、常におならが出そうな感覚である。会場はSanta Fe Conference Centerで、参加者は徒歩圏内のホテルに政府料金で滞在することが可能である。ちなみに岡山県津山市の姉妹都市である。

今回は19カ国から276名が参加し、発表は273件(口頭64件、ポスター209件)、日本人の参加者は17名であった。SACLAからは田中均氏、原徹氏、登野健介氏、金城良太の4名が参加した。金城の本会議への参加は8回目である。日本人の口頭発表はユーザーマシンであるSACLAからの4名のみで、日本におけるFEL研究が心配となった。金城の出身である京大赤外FEL施設からは3件のポスター発表があった。

今回の会議では、特にX線ポンプ+X線プローブに使われる二色FELや、時間コヒーレンスを改善するセルフシードをフレッシュバンチで行うFELのため

の電子ビームマニピュレーションについての報告が多かったように思う。特にLCLSでは、加速器の設計通りの電子ビームで数mJレベルのFELが安定に出ていることやアンジュレータの後ろに電子ビームの診断系があることを利用して、各種電子ビームマニピュレーションの実験を行っている。

本報告では、Prof.、Dr.などの敬称を省略させていただくことをお許しいただきたい。本会議報告は筆者の個人的なメモを元に書かれており、かなり間違いを含んでいると思われるが、正確さよりできるだけ多くのトピックを紹介することを選んだ。興味を持たれた方はWeb<sup>1)</sup>で公開予定のスライドおよびプロシーディングスをご覧いただきたい。本Spring-8/SACLA利用者情報誌の報告では内容を簡単な紹介にとどめ、物理的・技術的な詳細については加速器学会誌第14巻第4号の会議報告に記すことにする。

## 2. 基調講演

はじめに、Madey and Bonifacio Memorials と題して、2016年に亡くなったJohn M. J. Madey氏とRodolfo Bonifacio氏の追悼公演が行われた。Madey氏はFELの発明者と言われており、追悼講演を行ったL. Ellias氏、T. Smith氏らとスタンフォードの電子加速器を用いて最初のFEL増幅を行った。近年ではハワイ大学でCollective Radiation Theoryなどの研究を勢力的に行っており、前々回、前回の会議でもMadeyグループから興味深いポスター発表が行われたことを覚えている。Bonifacio氏はClaudio Pellegrini氏らとともにイタリア(本人曰くシリアン)のFELグループの大家であるが、もともとレーザー応用の出身で、Self Amplified Spontaneous Emission (SASE)、FELパラメータ、Cooperative Lengthなどの重要な概念をFELに導入した。

FEL Prizeセッションでは、前回のFEL Prizeを受賞した、Evgeny A. Schneidmiller氏とMikhail V.

Yurkov 氏の講演があった。二人は Evgeny L. Saldin 氏とともに FEL 理論についての数々の論文を出すとともに、著名な教科書 *The Physics of Free Electron Lasers* を著した功績がある。Saldin 氏については 2006 年に同賞を受賞している。まず Schneidmiller 氏から、電子ビームのチャープとアンジュレータのテーパーについての発表があった。彼らの考案した手法は LCLS での偏光度の高い円偏光の発生や、基本波を抑えた高調波の発生に使用されている。続いて Yurkov 氏から、FEL のコヒーレンスについての講演があった。残念ながら FEL の空間・時間コヒーレンスを 100%にすることは不可能であるという結論であった。

続いて、Young Inventors Prize セッションでも前回の受賞者の講演があった。上海の Hai Xiao Deng 氏は、Phase-merging Enhanced Harmonic Generation (PEHG) と呼ばれるエネルギーブレッドの広い電子ビームでの高調波発生に有効な手法での受賞だったと思うが、今回の講演では、高調波を用いて、a few GeV の電子ビームで XFEL (共振器型 XFEL) を達成するとともにパワーを上げるアイデアについて発表していた。SLAC の Agostino Marineli 氏はレーザーによる電子ビームマニピュレーション (Optical Shaping) で受賞し、LCLS における sub-fs デイレイでの二色などの可能性について語っていた。

### 3. 発表

各施設からの報告は表 1 にまとめた。UV-, SX-FEL 施設では、High Gain Harmonic Generation (HG) と呼ばれる光学レーザーで立てたマイクロバンチからの高調波をシードとして時間コヒーレントな FEL を得る手法が当たり前になっている。より短波長 (4 – 20 nm) でも FERMI のフレッシュバンチを使った 2 段 HG がうまくいっているのだが、Echo-Enabled Harmonic Generation (EEHG) に変更するということが、ユーザーが求める光を作るため電子ビームマニピュレーションのしやすさを選んだということであろうか。

SASE FEL セッションでは、DESY の S. Schreiber 氏から、THz アンジュレータを FLASH の下流に置いて時間的に遅らせた XUV と使う THz-Doubler の話があった。EuroXFEL の谷川氏によると、THz ポンプ

+FEL プローブの需要は結構あるとのこと。原氏からは SACLA の振り分け部における Dual DBA を用いた CSR による横キックの抑制について発表があった。PKU の S. Huang 氏からは、LCLS において 200 as のシングルパルスの発生を実証したとの発表があった。

Seeded FEL セッションでは、SLAC の E. Hemsing 氏から、LCLS での HX/SX セルフシードの結果および LCLS-II での高繰り返し負荷に対応したセルフシードの可能性について発表があった。

FEL Oscillators セッションでは、Duke 大の J. Yan 氏から、Duke Storage Ring FEL において完全な FEL 偏光制御を可能にしたとの発表があった。またいくつかの XFEL についての発表があった。XFEL では高い負荷の下で X 線光学系の性能を維持することが重要な問題であり、ハンブルグ大の学生 I. Bahng 氏からはブラッグ結晶ミラーの熱・機械的安定性の解析結果が示された。APS の Kwang J. Kim 氏からは XFEL のためのダイヤモンドブラッグ結晶ミラーおよび Be Compound Refractive Lens は超高真空であれば 15 kW/mm<sup>2</sup> の X 線にも耐えうるとの APS でのテスト結果が示された。また 6 月に SLAC で開催された XFEL Science Retreat で、Nuclear Resonance Scattering や Nonlinear X-ray Optics への応用に期待が集まったことが述べられた。SLAC の W. Qin 氏からは増幅帯域が 10 meV 程度しかない XFEL に必要な電子ビームを得るためのシミュレーションの結果が示された。

Electron Diagnostics, Timing, Controls セッションでは、Euro XFEL 用に開発された光ファイバーの信号とよく同期した RF 信号を作り出すモジュールや、レーザーコンプトンガンマ線を利用した電子ビーム診断についての発表があった。

Undulators, Photon Diagnostics, Beamline セッションでは、SLAC の D. Coco 氏から、Wavefront Preserving Mirror と名付けられた、形状エラー 0.5 nm RMS、200 W に耐えるミラーの話があった。LCLS-II では平均パワーが 600 W になるとの話であった。金城から、SACLA の真空封止アンジュレータで見つかった局所的かつ数十%の磁場低下についての報告を行った。減磁というよりも電子の直入射に起因し、ハイブリッド構造中で磁石が感じる強い逆磁

表1 各施設からの報告

PAL H. Kang (PAL)	17/06～供用開始、15 keVまで発振、20 fs/2.5 kAで300 uJ。 光学レーザーとの同期精度がよく、タイミングモニタを使った並び替えが不要。 SLEDに熱問題があり繰り返しは30 Hz。温調を導入する。
Swiss-FEL S. Reiche (PSI)	16/12～345 MeV/24 nmでFirst Lasing、スイス大統領による除幕式。 17/05～4.1 nmで発振 (30 uJ)。 ～1 GeVはほぼ完了、1.5 GeVを目指す。秋からは2, 3 keVの供用開始。 18年春～1 Å発振、秋～供用開始を目指す。 APPLE-X アンジュレータを設置してSX ビームラインをコミッショニング。
Euro-XFEL H. Weise (DESY)	17/05～9 ÅでFirst Lasing、2 Åで1 mJ程度。 17/06～14.5 GeV (計画17 GeV) まで超伝導空洞のコミッショニングが進んだ。 ～1 ÅかSASE1実験ハッチ (SPB, SXE) まで届いた。 17/09～Early User Operation 開始。
DCLS (Dailen) W. Q. Zhang (DICP)	16/11～First Lasing。 17/06～供用開始～SASEは90 – 148 nmで150 uJ、HGHCは88 nmで30 uJ程度。 Correction Cavity を入れてバンチ長を短くする予定。
LCLS-II P. Emma (LCLS)	順調にアップグレード中。18/01～電子銃コミッショニング。 19/06～超伝導RFキャビティを冷却、19年中～First Lightを予定。 LCLS-II-HE (High Energy) 計画：20 クライオモジュール追加で8 GeV、13 keV。
FLASH K. Honkavaara (DESY)	16/04～可変ギャップアンジュレータを備えたFLASH2供用開始。 ～Reverse Taper + AfterburnerやHarmonic Lasingの実験なども実施。 HHGシードを止めてFermiで実績のあるHGHCに切り替えか (sFLASH)。 17年～25 TW レーザーでさらに1 GeV 加速 (FLASH Forward)。
SACLA H. Tanaka (RIKEN)	16冬～BL2への振り分け部をCSR横キックの抑制のためのDual DBA化改造。 17夏～BL2供用開始。 ～60 HzパルスにパルスでBL3と2へのビームのエネルギーと時間構造を制御。 16/09～BL1 (SCSS+) C-bandを追加し800 MeVに。
FERMI L. Giannessi (FERMI)	FEL1は100 – 20 nmのHGHC、FEL2は20 – 4 nmの2段HGHCでほぼFourier限界。 次の3 – 5年でLinacを1.5から1.8 GeVにアップグレード。 短パルス化とマルチパルス/多色運転のためFEL2を2段HGHCからEEHGに変更。
Shanghai SXFEL B. Liu (SINAP)	SXFELのTest Facilityを16年からUser Facilityに改造中、19年～供用開始予定。 2段HGHC、EEHG-HGHCを採用しFERMIの成功に習う。 超伝導のHXFELも計画中 (上海LSの地下、全長5.4 km)。
MaRIE R. L. Sheffield (LANL)	Matter-Radiation Interaction in Extremesという5 – 126 keV (3次) XFEL計画。 吸収の小さい高エネルギーX線で試料を破壊せずps フレーム動画撮影。

場による磁化反転であるという結論を述べた。

FEL Applications セッションでは、バイオ、非線形、High Energy Density Science (HEDS) の各分野からバランスよく発表があった。まず登野氏から、SACLAで岡山大学の沈教授らによって行われた光合成タンパクのダイナミクスの観測について発表があった。ElettraのF. Bencivenga氏からFERMIでの4波混合についての発表があった。4波混合実験のユーザー利用環境を整備するとの話であったが、登野氏の印象ではユーザーが使いこなせるだろうかという話であ

った。SLACのL. Fletcher氏からはWarm Dense Matterに関して、液体水素/重水素のジェットのパンププローブで回折とトムソン散乱を計測した結果についての発表があった。

Tutorialセッションは、例年FELの基礎講座に近い話であったが、今回は少し毛色が違っていた。Trieste大学のF. Parmigiani氏からFERMIでのシードの話、SLACのP. Emma氏からはXFELに必要なビームの直進性を得るためのBeam Based Alignmentの話があった。

Advanced Concepts & Techniques セッションでは、SLAC の Alberto A. Lutman 氏からアンジュレータ中で電子ビームの発振する部分を時間的に選択する手法についての発表があった。電子ビームの Head の部分を前段アンジュレータで発振させ、Tail を後段アンジュレータで発振させるなどが可能となり、二色 FEL の生成などに常にフレッシュな電子ビームが使用可能となる。RadiaBeam の A. Y. Murokh 氏から、EUV リソグラフィーの話があった。電子ビームから FEL への変換効率が数十%と非常に高い EUV-FEL を目指すアイデアについての発表である。SINAP の Chao Feng 氏からは、蓄積リングで特殊な HGHG を行いコヒーレント放射を得る方法が紹介された。

FEL Theory セッションは、例年基調講演の次に位置していたが今年は最終日の最終セッションであった。ストラスクライド大学の L. T. Compbell 氏からは、FEL で周波数モジュレーションをかける方法についての発表があった。通常のレーザーと異なりスリッページがあるためやや複雑であるが、例えば周波数にしてメインから 5% ずれたところに強度 10% のサイドバンドを立てる、などが可能であるとの話であった。搬送波にのった FEL にはどんな利用があるのだろうか。

#### 4. サイトツアー、バンケット

サイトツアーは、ロスアラモス国立研究所の Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE) と Bradbury Science Museum であった。ロスアラモスは 1943 年にマンハッタン計画において原爆開発のために作られ、現在では様々な分野の研究を行う世界最大の研究所となっている。見学には申し込み時の履歴書の提出、学会中のインタビュー、バッジオフィスでの顔写真と指紋の登録が必須であった。残念ながらカメラやノート PC の持ち込みは許可されなかったため写真はない。サンタフェからはバスで 45 分ほどであり、研究所の Historical Records の職員が第二次世界大戦末期の核開発の歴史からその後幅広い研究を行う研究所となった今日までの歴史を語ってくれた。標高 2,200 m に位置するため冬には雪が多く降り、水曜日の午後からはスキーを楽しんでその後仕事をするという羨ましい話も聞いた。サイトツアーのあった LANSCE は、プロトン加速器を用いて中性子実験や

ラジオアイソトープの製造を行っている。日本における J-PARC に該当する施設であるがすでに 40 年の歴史を持つ。Bradbury 博物館は、実物大の原爆 (Little Boy、Fat Man) 模型から最新の研究成果までロスアラモスの研究の歴史を展示している。

バンケットは会議場から徒歩 3 分の Eldorado Hotel で行われ、Javier Gonzales サンタフェ市長と Charlie McMillan 第 10 代 LANL 所長 (初代は原爆開発を率いた J. Robert Oppenheimer) から挨拶があった。ピアノ演奏とインディアンフープダンスのショーを楽しみながらの食事の後、FEL Prize の発表があった。今年度の受賞者は、RF Photocathode Gun の発明や Emittance Compensation に貢献のあった、LANL の Dinh Nguyen、Richard Sheffield、Bruce Carlsten の三氏が選ばれた。また Young Investor's Prize には、Fermi においてフレッシュバンチによる二色 FEL やクロスアンジュレータによる FEL 偏光制御の研究を行った Eugenio Ferrari 氏 (現 PSI) と、ストレージリングや FEL におけるマイクロバンチインスタビリティの研究を行った SOLEIL の Eleonore Roussel 氏が選ばれた。FEL Prize の副賞として、FEL の基本方程式である Pendulum Equation にかけて振り子時計が送られた。最後に、FEL2019 の主催であるドイツ DESY の Winni Decking 氏と、2021 の主催であるイタリア Elettra の Luca Gianessi 氏から挨拶が行われた。

#### 参考文献

[ 1 ] <http://fel2017.lanl.gov/>

金城 良太 *Kinjo Ryota*

(国) 理化学研究所 先端光源開発研究部門  
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
TEL : 0791-58-0802 ext 3824  
e-mail : r-kinjo@spring8.or.jp