

会議報告

38th International Free Electron Laser Conference 会議報告

金城 良太*

Report on 38th International Free Electron Laser Conference

Ryota KINJO*

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¹⁾。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、2年ごとの開催となったため、2年ぶりの会議となる。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。今回は19ヵ国276名が参加し、発表は口頭64件、ポスター209件、日本人参加者は17名であった。

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実験を行っている。

本報告ではProf., Dr.などの敬称を省略することをお許しいただきたい。本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Web¹⁾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。

2. 基調講演

初めにMadey and Bonifacio Memorialsとして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の発明者とされており、追悼講演を行ったL. Elias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などの研究を精力的に行っており、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氏らと共にイタリア(本人曰くシシリアン)のFEL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

* 理化学研究所 RIKEN SPring-8 Center
(E-mail: r-kinjo@spring8.or.jp)

Evgeny L. Saldin 氏と共に FEL 理論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 Afterburner のための Reverse Taper 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 Investigator 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 Energy Spread 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、今回の講演は、Harmonic Lasing を用いて a few GeV の電子ビームで XFEL を達成するとともに Gain Cascading で共振器型 FEL のゲインとパワーのトレードオフを克服しようというアイデアで以前 Kwang J. Kim 氏が示した計算と同じゲイン条件で 10 倍近いパワーを得られるとのことであった。SLAC の Agostino Marinelli 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、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) に変更するというので、ユーザ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、S. Schreiber 氏か

ら、バンド幅の狭い 3 次 FEL を二段目のシードとして利用する Harmonic Lasing Self Seed で FLASH のスペクトル幅が 1/1.3 (理論的には 1/1.8) になった話や、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。Euro XFEL 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。理研の原氏からは SACLA の振り分け部における Dual DBA を用いた Coherent Synchrotron Radiation (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、Nonlinear Bunch Compression と Reverse Taper だけで 200 as のシングルパルスの発生を LCLS で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。UCLA の Claudio Emma 氏からは、Fresh Slice のセルフシードおよび Harmonic Lasing への応用についての発表があった (Fresh Slice については後述の Lutman 氏の発表を参照)。アリゾナ大学の W. Graves 氏からはビームを回折格子に通して横方向に密度変調を作り、エミッタンス交換で縦方向のマイクロバンチに変換してコヒーレント放射を得る話があった。1 keV を目標に今年から実験を開始するとのことである。SLAC の J. Wu 氏からは Post Saturation テーパのオンライン最適化についての話があった。セパトリックスの変形に伴って光と電子の位相を調節するとよい、ジグザグテーパーがピークパワーを 2 倍にするなど面白い結果であった。オンラインでやる理由について質問され、シミュレーションよりマシンに最適化アルゴリズムをかける方が早いと回答していた。

FEL Oscillators セッションでは、デューク大学の J. Yan 氏から、Duke Storage Ring FEL において 2 セットの Crossed Helical Undulator を用いて完全な FEL 偏光制御を可能にしたとの発表があった。ハンブルク大学の学生 I. Bahns 氏からは Euro XFEL での XFELO に向けたブラッグ結晶ミラーの熱・機械的安定性の解析結果、APS の Kwang-J. Kim 氏からは XFELO のための

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 コミッショニングは完了, 1.5GeV へ 17 年秋からは 2, 3 keV の供用開始, 18 年秋~1 Å 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 が 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, HGHG 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 シードをやめて Fermi で実績のある HGHG 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 年冬~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 年夏~BL2 供用開始~60 Hz パルス to パルスで BL3 と 2 へのビームエネルギーを制御 16/09~BL1 (SCSS+) C-band を追加し 800 MeV に
FERMI L. Giannessi (FERMI)	FEL1 は 100-20 nm の HGHG, FEL2 は 20-4 nm の 2 段 HGHG ではほぼ 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 HGHG 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 HGHG, EEHG-HGGG を採用し FERMI の成功に倣う 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

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^2 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 月にあった 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 に必要なフラットチャープかつロングバンチを得るための S2E 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, LANL の A. Malyzhenkov 氏からは逆 Compton フォトンの位相空間分布を計測し Wigner 関数を用いて逆問題を解くことで, 電子の 6 次元位相空間分布を得る手法の提案があった。光のエミッタンスを考えたガンマ線だと思われるが計測の困難さはどの程度だろうか。

Undulators, Photon Diagnostics, Beamline セッションでは, SLAC の D. Cocco 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%もの磁場低下について、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 JASRI の登野氏から 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 FREMI 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。トリエステ大学の F. Parmigiani 氏からシードの話があったがほぼ FERMI の話であった。また SLAC の P. Emma 氏からは XFEL に必要なビーム直進性を得るための Beam Based Alignment の解説があった。

Advanced Concepts & Techniques セッションでは、SLAC の Alberto A. Lutman 氏から Dechirper を軸外して通すことで時間依存の y キックを電子ビームに与え、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。PSI の Edward Prat 氏から Optical Klystron を用いたレーザー不要の Laser Heater の提案とそれを利用した入射器の Energy Spread の計測についての話があった。RadiaBeam の A. Y. Murokh 氏から EUV リソグラフィの話があった。Inverse FEL の知見を元に Tapering Enhanced Stimulated Superradiant Amplification

(TESSA) を用いて数十%の効率の EUV-FEL を目指すとの話で、飽和パワーより高い EUV シード光をどのように用意するのか疑問であったが、一段目の FEL を集光し二段目にパワー密度の高いシードとして入れるとのことである。SINAP の Chao Feng 氏からは蓄積リングでコヒーレント放射を得る方法が紹介された。PEHG に似た手法で Energy Spread の代わりに Transverse Emittance が増大する。レーザーフェムトスライスをずらすことでダンピングを待つとのことだが、どちらのダンピングが早いのだろうか。マイクロバンチの位相がエネルギー依存性を持たず高いピーク電流を得られる利点がある。タイトルに Steady State Micro Bunching とあるが、Radiator の後の 2nd Modulator でモジュレーションを戻すという意味で、前回 D. Ratner 氏が発表したものと同一ではない。

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最終日の最終セッションであった。SLAC の P. Baxevanis 氏から、Enhanced SASE には多くの最適化すべきパラメータがあるため解析解を作ったとの話、CSU の H. Freund 氏からは楕円アンジュレータ中の FEL 方程式を定式化したとの話があった。ちなみに理研の田中氏によるコード SIMPLEX では以前から実装済みである。テルアビブ大学の R. Ianculescu 氏からは Murokh 氏の発表でも話題となった TESSA の理論的な解説があった。LANL の P.M. Anisimov 氏から、Quantum FEL についての発表があった。高エネルギーフォトンになると Quantum FEL を考慮する必要があるといういつもの話であったが、LANL が MaRIE を計画している関連であろう。ストラスクライド大学の L.T. Campbell 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、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、残念ながら電子機器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から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。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施設ですでに 40 年の歴史を持つ。Bradbury には、実物大の Little Boy, Fat Man が展示されている。

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あと、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 に貢献した LANL の Dinh Nguyen, Richard Sheffield, Bruce Carlsten の三氏が選ばれた。また Young Scientist FEL Award 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 方程式にかけて振り子時計が贈られた。最後に FEL 2019 の主催 DESY の Winni Decking 氏と、2021 の主催 Elettra の Luca Giannessi 氏から挨拶が行われた。

参考文献

- 1) <http://fel2017.lanl.gov/>