

## 会議報告

## FEL2013 会議報告

富澤 宏光\*

Report of the 35<sup>th</sup> International Free Electron Laser Conference (FEL2013)

Hiromitsu TOMIZAWA \*

## 1. はじめに

第35回自由電子レーザ国際会議 (FEL2013) が2013年8月26日から30日まで、ニューヨークで開催される加速器関連の国際会議場の定番である Marriott Marquis Hotel にて開催された。今回の会議で特筆すべきことは、会議ホームページのトップに“FEL2013 is going GREEN”と書かれ、貰っても後で処分になることとなる Conference bag や本棚を無駄に占有することになる紙のアブスト集を廃止したことである。会議

予算を効率的に運用して会議を本質的に充実させることが出来るし、資源の節約にもなるのでとても良いことだと感じた。その代わりに、会議プログラムのモバイル用閲覧ページでは、発表中の講演が表示され、iPad を持参した著者には、紙のアブスト集よりも便利であった。

本会議の参加者数は279名で、ポスターを含めた発表件数では、米国39%、ドイツ19%、スイス7%、イタリア6%、日本5%の順であった(写真1)。しかし、スイスは Invited Oral が一つも無く、一方でイタリアは全体の19%、日本は



写真1 会議初日に撮影した集合写真(19か国, 75研究機関の参加者)

\* 公益財団法人 高輝度光科学研究センター XFEL 利用研究推進室  
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), XFEL Utilization Division  
(E-mail: hiro@spring8.or.jp)

13%を占めていたので、世界に対するプレゼンスは後者の方が強かったと言える。今回の会議ではイタリアのプレゼンスが特に高く、Contributed Oralにおいては、全体の17%とドイツを抜いて堂々の2位であった(1位は開催国の米国で不動)。これら統計に基づく順位とは関係なく、著者個人の心象で言わせてもらおうと、2010年頃から次世代のシード型FELが話題の中心となり、今回はイタリアと中国(人)の活躍が特に目立ったように感じられた。

## 2. 会議概要

会議初日は、ChairであるV. Litvinenko氏によるOpening remarkによって幕を開け、毎年恒例のセッションである昨年のFEL prize Talkが行われた。FEL prize受賞者であるJ. Galayda氏が登壇し、現在のLCLSは2-mile Acceleratorの1/3のみを使用しているが、残りの部分を同様にXFELに利用するLCLS-II計画の構想について語った。ビームラインを増やして、捌ききれないユーザ数に対応するというもので、同時に1kHz運転を目指して開発するというものだったが、何となく歯切れが悪いものだった。後で、どうもLCLS-IIは工事が中止され、代わりにBerkeleyの計画であるNGLS(Next Generation Light Source)をSLACのサイト内で実施するというDOE勧告があったという話(非公式)が明らかになった。また、若手に与えられるYoung Scientist FELの受賞者となったD. Ratner氏がSASEのショットノイズ低減を通じてCSR instabilityの抑制をしようという画期的なアイデアを披露した。

FEL prize Talkに続いて、これもまた恒例の“New Lasing”が行われた。新しく発振した世界のFELを紹介するセッションなのだが、最近は少し寂しい感じである。2011年まではDESYのFLASHがこのセッションで毎年、短波長を更新して勢いを感じたが、LCLSやSACLAの完成以降はそれがなくなってしまった。今回は3件あり、最初はイタリアのFERMI@Elettraで、2本目のビームラインFEL-2(2-stage HGHG)に成功した報告であった。1.4 GeVで4 nm( $\sim 1 \mu\text{J/pulse}$ )までの発振に成功しているが、その波長域でのユーザ利用はまだとのことだった。本学会では、

FERMI関係の口頭発表が多く、この講演をしたL. Giannessi氏は、一連のシードFEL光源開発で今回のFEL Prizeを受賞した。

次の発表が、ドイツのELBEで超伝導RF電子銃を用いて赤外のFELが発振したという報告であった。これはNew Lasingというよりは、超伝導RF電子銃が実用機として稼働したということが主な内容であった。CW運転(1 MHz)の超伝導加速器計画にとっては、この超伝導RF電子銃の成功が強い追い風になると思う。最後は、上海のSDUVでEEHG(Echo-Enhanced Harmonic Generation)での進展についてであった。EEHG方式のシードについて説明すると、2段のエネルギー変調システム(変調用外部同期レーザとアンジュレータ)およびシケインを用いることで、1段のみの方式であるHGHG(high-gain harmonic-generation)と比べて、より高次の高調波発生に最適な密度変調を電子バンチに与えることができるというものである。外部レーザによるシード方式で短波長化を目指す方式では、このHGHGが基本形で、この前にエネルギーバンドを刻印する変調・圧縮システムが追加されたのがEEHGと言っても良い。このセッションでFEL業界のトレンドが読めるのだが、今回の内容からシードFELの高次高調波発生(短波長化)と1 MHz程度のCW運転が今後のXFELの潮流だということになりそうだ。

基本的に、その日の前半にあった講演のテーマ内容に対応させたポスターセッションが、午後3時過ぎから2時間ほど割り当てられていた。ここから先は、テーマ毎に著者が気になった発表内容とそれに対する個人的な感想と意見を書いていこうと思う。

まず、Beam physicsのテーマにおいて面白いと思った講演は、V. Petrillo氏の講演で、エネルギーの異なる2つの電子ビームをアンジュレータ内でオーバーラップさせ、FEL相互作用で超短パルス列を発生させるというものだった。もう一件の注目した講演は、R. Ryne氏のシミュレーションに関する講演で、遅延ポテンシャル等を実際の電子数で計算したというもの。一般にはマクロ粒子を仮定するために、計算精度の粒子数依存性が出て来てしまう。素電荷の電子を実際の電子数で計算すればこのような問題はないという話で

ある。近年の計算機の発達で、いつかはこういうことになるとは思ってはいた。新しい思想がないので Beam physics なのかは疑問であるが、計算機実験の手法としては当たり前になるだろう。このテーマでのポスター発表は、講演の内容とは大きく異なり、レーザー加速を用いたものや、磁気回路の機械式アンジュレータではなく、RF アンジュレータやレーザーアンジュレータに関するものが多かった。

Novel Concept & Theory では、一番インパクトがあったと感じたのは、田中隆次氏のアト秒かつテラワットレベルの XFEL パルスを生成する新手法の提案で、これだとシングルパルスで超短パルス圧縮が可能になる。この直前にあった招待講演の D. Dunning 氏はzept秒のパルス列を発生させる手法の提案であったが、他の発表を含めてパルス列のものはユーザ利用が難しく、田中案のシングルパルス発生手法の方が優れた光源となり得る。これから、パルス・コントラストの改善や、さらにzept秒という X 線領域で数サイクルパルスができるようになると、きっと新たなサイエンスがあるように思う。

ビームライン関係では、XFEL がユーザ施設として運営されている昨今の状況では重要と思うのだが、2 件しか講演がなかった。矢橋牧名氏の SACLA のビームラインとイタリアの FERMI の偏光可変のポンプ・プローブ実験ラインの話であった。FERMI は世界で唯一のシード FEL 利用施設であるので、フルコヒーレントを利用した実験を期待して聞いていたのだが、それについての話題は特になかった。現状のシード FEL 光源で利用されているのは、その単色性とスパイク構造のないスペクトルという性質だけであり、ユーザ利用という点で未成熟であると思う。

Long wavelength FEL 関係では、テラヘルツポンプ & X 線プローブの実験など、その高強度性の利用を目指した研究が XFEL 施設でも進んでいるようで、講演でも M. Yurkov 氏や J. Donohue 氏が話していた。XFEL のアンジュレータ後段にアフターバーナのような感じで赤外用アンジュレータを追加して赤外 FEL を短波長用 FEL に対して同期させて発振させることや、偏向電磁石からの CSR を同期の取れたポンプ光源として利用する動きが盛んなようである。

近年の SASE 方式の XFEL 関連の発表に重きをおいた会議運営が原因で、全体として活気が失われているように感じる。本会議において、赤外・テラヘルツ関連の発表は 30 件ほど（全体の約 10%）であった。中でもマイクロトロンを用いた Compact テラヘルツ-FEL での功績で今回の FEL Prize を受賞した Y. U. Jeong 氏 (KAERI) のグループは、本会議に 6 名参加していた。招待講演はドイツ ELBE の M. Gensch 氏による赤外とテラヘルツ光源のレビューがあり、その中で赤外共振器型 FEL の共振器内でパワーを積極的に利用すれば 1 桁程度強度向上が可能で有用であると述べていた（写真 2）。赤外共振器型 FEL が固体レーザーベース光源に対して優位な点は、高繰り返し（～ 3 GHz）でトータル数十 mJ の波長可変赤外パルス列が供給可能な事にあるので、共振器内のパワーを使うことで更なる差別化を図っているものと思われる。非常に反応断面積の小さいクラスタービームを、FEL 光共振器内の高い光強度と高繰り返しレーザーによる多段共鳴励起で電子脱離を引き起こすことで、反射型 TOF-mass にてイオン量変化を計測、クラスタービームの赤外吸収スペクトルを得ることでクラスターの構造決定に利用するという話であった。また、Radboud 大学（オランダ）の B. Redlich 女史のポスターの前で、利用状況について議論したところ、20～80 μm の波長域では、光学レーザー方式の超短パルス光源がないので、潜在的なユーザが多いのではということであった。

ビームモニター関係では、ポスターではあるが、超高速・非破壊計測である EO サンプリングに関する発表も数件あり、通常の電子バンチからの DC 電場を直接測るのではなく、テラヘルツ放射を測る手法についてであった。また、LCLS の T. Maxwell 氏が中赤外分光による電子バンチ構造

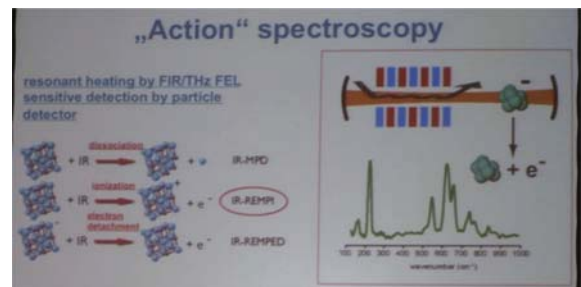


写真 2 M. Gensch 氏の発表スライド

測定(ダブルホーンなど)について簡単に触れていた(テラヘルツよりも内部構造計測には有利)。

電子銃関係では、超伝導と常伝導のRF電子銃の発表だけでなく、ERLの入射器の話がコーネル大学のB. Dunham氏からあった。ERL型X線放射光源用の電子源開発に関しては、かなり進んで来ているがまだ実用には程遠い感じである。彼の発表後の質疑応答で、そのカレントとエミッタンスは、GaAsなのかそれともマルチアルカリのどちらのフォトカソードを用いたのか? という質問が出て、同時に成立しないパラメータを一つの表にして発表していることが露呈したりしていた。とても高い目標を掲げて困難な開発をしているので気持ちは分かるが、コミュニティから有益な意見をもらうには、問題点が明確に分かるように誠意をもって発表すべきであろう。近年実用化されたXFEL電子源であるフォトカソードRF電子銃の開発史になぞらえて言えば、現在のERL型X線放射光源入射器の開発状況は20年前のRF電子銃の状態に酷似している。未だに、使用すべきフォトカソードの種類も電子銃の方式も定まっていない。それでもコーネル大学の最近の研究開発レベルは、他の研究機関を大きく引き離しており、素晴らしいものである。この直後に発表した原研の西森信行氏が中心となって開発した、分割型セラミック管を用いたDC電子銃は、ERL計画が目指す500kVを超える印加電圧を達成しており、この点ではコーネル大学(350kVまでしか達成していない)に対して一步リードしている。会議後に用意されたBrookhaven National Laboratoryのラボツアーに参加した際に、RHICのイオンビーム冷却用のERL試験機(eRHIC計画)を見学したが、こちらは超伝導RF電子銃の開発段階であるようである。

Seeded FEL and Short Wavelength FELsのところでは、FERMIの2-stage HGHGに関する詳細な説明が、E. Allaria氏より冒頭にあり、続いて著者のSCSSでのEOサンプリングロック方式のHHG-seeded FELの試験結果とユーザ利用についての講演があった。この後に、今回のFEL Prizeの若手部門の受賞者であるD. Xiang氏がEEHGの実証試験の試験状況を発表した(写真3)。最後に、上海SINAPのZ. Zhao氏によるEEHGの実験に関する話の中で彼らの提案である

Cooled HGHGの実証試験の準備をしているとの発言があった。

ここで少し解説すると、EEHGではバンチ圧縮を挟んで2段階のエネルギー変調を掛けるため、位相の揃った複数本のエネルギーが異なる立ち上がりの鋭い構造が形成されるので、高次の高調波が強く発生する。これを別の方式でHGHGを基本形として発展させたのがCooled HGHGという賢い方法で、水平方向にテーパーをつけた特殊なアンジュレータを分散部に設置し、そこでエネルギー変調を掛けることで、一本のデルタ関数的な立ち上がりのマイクロバンチを形成し、EEHGと同様に高次高調波の発生効率を改善する技術である。この手法の利点は、変調用のレーザが1台で済むという点にある。中国は、FEL発振機構の原理的な新提案をするまでになっており、我々も単に技術開発に終始することなく、基礎原理においても世界をリードしなければならぬ。

最後に、Applicationsのところでは2色XFELに関して、LCLSのF. Decker氏と理研SACLAの原徹氏がそれぞれの施設の特徴と利用計画について説明した。2色XFELとはシケインを挟んでK値の異なるアンジュレータ・セクションに分け、上流側と下流側で異なる波長でSASEを起こす方法である。2色のパルス間の時間ディレイはシケインによりサブフェムト秒の精度で調整可能である。XFELパルスはエネルギー幅が約0.5%あるので、2色というからにはそれ以上の波長の違いがなければならない。また、ユーザ利用の観点からは、10%以上の2波長の分離がほしいところである。LCLSはアンジュレータ・ギャップが固定なため、数%の分離しかできない。それに対して、SACLAはギャップ可変であるので、2波長の分



写真3 今回のFEL Prizeの受賞者(ハドソン川クルーズ船内のBanquet会場で発表された)

離は最大で 30% も可能である。SACLA では世界初の硬 X 線領域における 2 色 XFEL 発振に成功していて、パルス間ディレイも 0 ~ 40 fs と変えられるので、今後のユーザ利用が楽しみである。

### 3. 次世代光源 NGLS が SLAC に !?

冒頭に若干触れた NGLS が LCLS-II とマージされた計画になるという噂話だが、学会中も参加者達と個人的に議論したりして、いろいろと推察してみたのでそれを述べたい。NGLS は元々、1 MHz の CW 運転の軟 X 線光源の計画で、振り分けで複数のビームラインにフルコヒーレントの X 線パルスなどを供給する計画である。これが硬 X 線光源にアップグレードされた計画になるのではないかと予想している。もちろん、建設・運転コストと土地が用意できればだが、米国なら可能性があるのではないだろうか？ 1 MHz の CW 運転ということは蓄積リング並みのマルチユーザ・マシンとして、例えば 20 ビームラインに 50 kHz で供給できる。これが出来ると、リング光源とライナック光源を区別している垣根がまた一つ取り払われるのではないか。ERL 型 X 線放射光源は、要素技術がまだ成熟していなく、全体としてオーバーテクノロジーであることを考えると、まだプロジェクトとして実施できる段階ではない。しかし、NGLS は現状で挑戦できる範囲にあると思われるし、回折限界リングと大差がない ERL 光源とは異なり、光源の世代を更新するものである。世界の放射光源の将来計画像に影響を与える予感がする。

### 4. おわりに

さて、今後の FEL 国際会議であるが、今回は来年 8 月にスイスのバーゼルで開催される予定である。今まで毎年開催されてきたが、2015 年を最後に 2 年毎に開催されることに決定された。学会内容の質的な向上と維持を考えるとやむを得ない判断と思う。

会議 4 日目の Closing Remarks の後、グランド・セントラル駅に行ってみた。今年の 2 月に 100 周年を迎えたこともあり、窓には大きく“100”の文字が描かれていた（写真 4）。有名な四面時計とボザール様式の建物はレトロな雰囲気と調和し、ノスタルジックな思いに浸ることが出来る。当時のテクノロジーにはどこか温かみを感じる。現代、我々が取り組む加速器のようなハイテック建造物は後の世の人の目にどのように映るであろうか？ 超然とした機能美とミニマリズム・アートの傑作として懐かしんでもらえるだろうか？ この 3 窓に“200”という文字が刻まれる未来に暫し思いを馳せてみた。

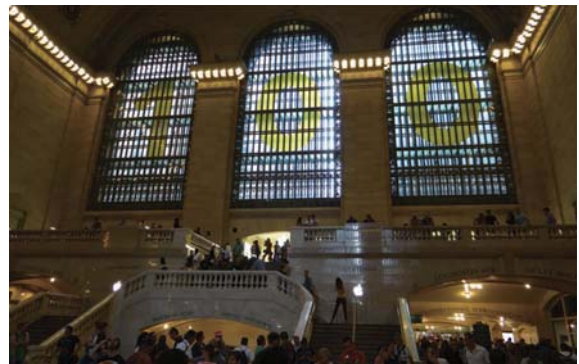


写真 4 100 周年の Grand Central Station