

会議報告

FEL conference 2010 参加報告

稲垣 隆宏^{*1}・前坂 比呂和^{*2}

Report on FEL Conference 2010

Takahiro INAGAKI^{*1} and Hirokazu MAESAKA^{*2}

Abstract

The 32 nd International Free Electron Laser Conference FEL 2010 was held in Malmö, Sweden from August 23 to August 27, 2010. Around 300 participants presented splendid research in FEL science during over 60 presentations and close to 250 posters. In this article, we report the overview of the conference, including some personal impressions.

1. はじめに

2010年8月23日から27日まで、スウェーデンのマルメ (Malmö) 市にて Free Electron Laser Conference (以下, FEL conference 2010) が開催された。会議の proceedings と講演原稿は、下記の Web ページにて公開されている。本報告には、筆者の理解不足や誤解があるかもしれないので、情報についてはそれぞれ確認されたし。

FEL conference 2010 Web ページ
<http://fel2010.maxlab.lu.se/>

2. 会議の様子

FEL conference は毎年8月頃に開かれる国際会議で、今年で32回目を迎える。32年前と言うと1970年代であり、読者の中にもまだ生まれていない方がいらっしゃるのではないかと。日本では Photon Factory がやっと建設された頃であり、既にその頃には自由電子レーザーが提唱され、盛んに議論されていたのだと思うと、歴史の蓄積を感じる。

今年の FEL conference は、スウェーデンの MAX-lab と Stockholm Uppsala FEL Center との共催で開催された。参加者は総勢300名ほど。半分以上はヨーロッパからの参加者で、日本からは20名ほどの参加があっ

た。FEL conference では、どちらかと言うと FEL 理論やシミュレーションによる設計など、電子ビームがアンジュレータに入射した後の話が多く、筆者のような加速器のハードウェア屋には少しハードルが高かったが、世界の動向を知ることができ、とても勉強になった。

会場となるマルメ市は、スカンジナビア半島の最南端に位置する港町である。海峡を隔てた対岸にはデンマークの首都コペンハーゲンがあり、橋とトンネルで結ばれている。参加者はまずコペンハーゲン国際空港に降り、地下駅から電車に乗る。海峡を渡る長い橋を通して30分ほどでマルメ中央駅に着く。マルメの中心街には、歴史を感じさせる北欧風の重厚な建物が多く、天を見上げるようなゴシック調の尖塔もそびえ立っている。そんな街並みを20分ほど歩いた所にある近代的な高層ホテルが会場である (図1)。

今回の FEL conference 2010 では、月曜から金曜の昼まで講演が組まれ、金曜の午後に施設見学、という日程であった。総数60件ほどの口頭講演は全て同じ会場で、招待講演 (各20～30分)、一般講演 (各15分)、New Lasing 速報講演 (各5～10分)、チュートリアル (1時間) から構成される。チュートリアルでは、月曜は FEL の動作原理について、火曜は短波長レーザー光生成 (HHG: Higher Harmonic Generation) 技術について、水曜は FEL の加速器について、木曜は FEL の診

*1 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 RIKEN SPring-8 Center, XFEL project (E-mail: inagaki@spring8.or.jp)

*2 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 RIKEN SPring-8 Center, XFEL project (E-mail: maesaka@spring8.or.jp)



図1 会場となった Hilton Malmö City Hotel
(奥の高層の建物)

断モニター機器について、それぞれ専門家による丁寧な解説があり、良い勉強になった。良い企画だと思う。ただし、チュートリアルという名前からして、学生や若手を中心かと思いきや、各界の大御所が軒並み出席していたりして、講演する方もなかなか大変だったのではなかろうか。

講演はまず、昨年の FEL prize を受賞した SLAC/LCLS の David Dowell 氏と Paul Emma 氏のレクチャー講演から始まった。次に、「New Lasing」と題して、5分から10分の速報講演が行われた。以降は、以下のように13種類にテーマ分けされてそれぞれ4～5件ずつの講演が行われた。

「現状報告」「FEL理論」「蓄積リングとERL-FEL」「短波長FEL」「FEL Oscillator & 長波長FEL」「シードFEL」「短パルス長FEL」「入射器・ライナック」「同期と安定性」「新コンセプト」「アンジュレータとビームライン」「X線光学と検出器」「FEL光利用」

ポスター発表は、月曜から木曜まで毎日13時半～15時までの時間が当てられていた。60件ほどの件数なので、全部見て回っても時間の余裕があった。また、直後に30分のティータイムがあるので、コーヒーやデザートをつまみながら引き続き議論が続けられる。ゆとりのあるスケジュールと会議の雰囲気はとても良かったと思う。ただし、ポスター会場が狭く混雑して長居しづらかったのは残念であった。

初日夕方のレセプションはホテルを離れ、中世ゴシック建築の公会堂を借り切って行われた。外国では時々行われるが、このような歴史的建造物の中で飲み食い

するのは、日本では考えられない。たとえば姫路城や神戸の異人館を借り切って宴会ができるのだろうか？どなたか先例を作ってはいただけぬか。

バンケットは、港近くの海岸沿いにあるレストランで行われた。メイン料理はヘラジカのステーキであったらしい。気づかず美味しく平らげてしまった。バンケットの終盤には、今年度の FEL prize の発表もあった。今年の受賞者は、FELシミュレーションコード Genesis の作者である Sven Reiche 氏 (PSI, スイス)。Genesis が FEL 業界で広く普及していることを考えると、妥当な受賞と思う。若手対象の奨励賞は、SPring-8 の 250 MeV 試験加速器で行われたシーディング実験をまとめた Guillaume Lambert 氏 (LOA, フランス)。筆者達にとって半ば身内の受賞は喜ばしい事である。

3. 講演・発表から

講演とポスター発表のうち筆者の印象に残った点を列記する。まず実質的に講演の半数以上を占める短波長シングルパス FEL 関連から。

3.1 LCLS (アメリカ SLAC)

昨年の FEL conference では、LCLS の SASE (自己増幅) レーザー発振成功の話題一色であったらしい。その後、順調にユーザー運転に移行し、マシンスタディ的な話は今回ではほぼ出尽くした感があった。加速器としては、電荷量を絞って極低エミッタンスを目指したり、2バンチ運転をテストしたりしていただくくらいか。光源部では、2次高調波用 After burner (下流に更にアンジュレータを追加) が計画されている。計画の半分アンジュレータが設置され、その効果が予定通り見えているとのことであった。次期計画「LCLS-II」では、2マイルライナックの更に上流側に入射器を新設して、2本目のビームラインを作るという計画が紹介された。

3.2 FLASH, Euro-XFEL (ドイツ DESY)

FLASH は昨年より増設が行われ、今年の夏より第3次運転が始まった。エネルギー 1.2 GeV への増強、3.9 GHz の3次高調波空洞の導入が行われ、4.45 nm で SASE 光が出たことが報告された。また、sFLASH というシーディング設備も追加され、そのアンジュレータから 38.4 nm の SASE 光が出る所まで確認した。現在、シード光と電子ビームとの同期や軌道などを調整中、とのことであった。また FLASH では、更なるユーザー利用に対して追加のビームラインを作る計画もあるようだ。Euro-XFEL は、目下、土木工事中。光ビームラインの設計についての講演に加えて、各種設計のポスター発表があった。

3.3 SPring-8 XFEL

「New Lasing」講演では、250 MeV 試験加速器にて 61 nm のシーディングに成功したことが報告された。8 GeV XFEL の建設状況については、順調に建設が進んでいる様子が報告された。プロジェクトの最終年度を迎え、加速管やアンジュレータを始め多くの機器が設置を完了している。Cバンド加速器では大電力試験にて、設計を超える 40 MV/m もの加速電界が得られている事が報告された。XFEL では、秋から RF 系の運転、来年にビームコミッションの予定である。また、バンチ長測定のための CSR 光測定や EO サンプリング法の開発、アンジュレータの放射線による減磁を未然に防止するためのビームハローモニタの開発についての発表もあった。

3.4 計画中のコンパクト X 線 FEL

スイス FEL 計画 (PSI)、上海 FEL 計画 (SSRF/SINAP) についての講演があり、それぞれ計画の概要が紹介された。両計画は共に、SPring-8 XFEL に似たコンパクトな FEL を目指している。Cバンド高電界加速器と短周期アンジュレータ (おそらく真空封止型) を用い、レーザー波長 0.1 nm、電子ビームエネルギー 6 GeV 程度、全長 600~900 m の施設を計画している (但し電子銃はともに RF 電子銃)。彼らはおそらく、今後の SPring-8 XFEL の調整運転に非常に注目しているはずである。良い先例となれるよう、責任を感じる。

また、韓国 PAL の FEL 計画のポスター発表もあった。電子エネルギーは少し高めの 10 GeV にて、X 線と軟 X 線の 2 種類の SASE-FEL ラインを用意する計画である。但し、加速器の周波数選択も含めてまだマシン設計が固まっていない印象であった。

3.5 シード型 FEL, HGHG, ECHO

FEL の理論や研究対象としては、SASE 型 FEL は既に飽和 (?) 気味で、短波長・短時間長のレーザー光によるシード型 FEL や、自己シード型 FEL、マイクロバンチを圧縮して高調波を生成する HGHG (High Gain Harmonic Generation)、更に複合させた ECHO 型 FEL (EEHG と呼ぶ) などの研究が現在、花盛りである。

シード型 FEL では、先に書いた sFLASH や SPring-8 の試験加速器に加えて、Elettra (イタリア) の FERMI や、Frascati (イタリア) の SPARC, MAX-lab (スウェーデン)、上海 SINAP の DUV-FEL などで試験が行われ、多数の成果が報告された。LCLS では LCLS-II に向けて、自己シーディング、あるいは ECHO 型 FEL 等が検討されている。SLAC では LCLS とは別に、リニアコライダー試験機 (NLCTA) を用い

て ECHO 型 FEL の研究がなされている。波長としては可視光領域だが、HGHG 型 FEL 光や ECHO 型 FEL 光がクリアに見えているようだ。

3.6 長波長 FEL

講演では、ドイツの ELBE 施設で使用されている赤外線 (4~250 μm) FEL の紹介が印象に残った。30 MeV の超電導加速器を用い、CW で 40 W くらいのレーザー光を出力して実験に利用されているとのこと。この施設では同じ建屋内に、150 TW のパルスレーザーがあったり、100 Tesla 近い磁場が発生できる設備があったり、素人目にも何やらすごい実験ができそうに思った。

3.7 蓄積リング FEL, ERL

講演では、まず分子研 UVSOR リングでの THz CSR の報告があった。シードレーザー光にモジュレーションを与えることにより CSR 光 (Coherent Synchrotron Radiation) を増幅する説明はわかりやすく、今後の応用性も広いように感じられた。試験中に“誤って”2パルスのレーザーが入射したことで、モジュレーションが生じて今回の発展につながった、との逸話は、印象も抜群であった。

Elettra (イタリア) の 0.75 GeV リングでは、活発にシード型 FEL の研究が進められている印象だった。100 nm を切る高調波生成を実現したり、ポンププローブ実験を始めたり、蓄積リングでここまで達成されているのは驚きである。蓄積リングでは他にも、既存蓄積リングを低エミッタンスに改造した場合の FEL ゲインについての検討があった。

ERL では、Jefferson Lab (アメリカ) の 135 MeV-ERL で波長 700 nm の CW レーザー光を実現したとのこと。今後のエネルギー増強計画や数 GeV クラスの非対称配置案についての講演もあった。

最近注目の FEL oscillator については、X 線領域では ANL (アメリカ) で、軟 X 線領域では LBNL (アメリカ) で検討が進められている。共振器を構成する鏡として、X 線ではシリコンやダイヤモンドのブラッグ反射を、軟 X 線では多層膜鏡を用いるが、いずれもやはり反射率と耐久性を実機レベルでどこまで高められるかが最大のポイントであろう。

3.8 その他

アンジュレータ関連の講演にて、FEL 光の波長を変えるのに、1) 電子のエネルギーを変える、2) ギャップを変えて磁場の強度を変える、ほかに、3) 磁石の周期長を変える、のが効果的だとの講演があった。周期長を可変にする具体的な機構についての検討はなく残念だったが、周期長を変えられるアンジュレータとい

うのは面白いと思った。FEL のビームラインが複数になり電子のエネルギーを簡単には変更できない場合など、何らかの方法で周期長を変えられると、より広範囲な波長を選択することができ便利かもしれない。

「新コンセプト」で必ず挙げられるレーザーウエーク加速については、LMU（ドイツ）における開発の紹介があった。実用にはまだ遠いながらも、200 MeV 位に電子が加速され、下流のアンジュレータにて 10 数 nm の光を生成できているようだ。

今回のポスター発表で最も異色だったのが、「シャツのポケットに入る FEL」という発表である。これは Smith-Purcell FEL という、周期的な溝の近傍を電子が通過する際に光を放出する効果を利用したもので、表面に数百マイクロンの溝の掘られた長さ数 cm ほどの銅ブロックが THz 光の光源となる。これと、ダイヤモンドの電界放出アレーを金属板に貼り付けた電子源、ア

ノード電極およびコリメータの働きをする金属板数枚とをプラスチックロッドで固定するだけで、本当に手のひらに乗る大きさ、軽さの装置が完成する（図 2 参照）。実物がポスターに貼り付けられており、まじまじと観察した。なるほど従来の加速器と比較すれば、画期的に簡素で小型、軽量、安価であろう。もちろんこいつの外側には真空容器と真空ポンプがあって、それがでかいのだけどね、と発表者の方は笑っていたが、実際、この装置の動作試験をし、THz 光の生成もできているようである。この装置、自分でも作れそうで興味をそられる。何か用途次第で大きな需要に繋がったりしないものか。

4. 施設見学 MAX-lab

金曜の午後は、隣町ルンドにある Max-lab を見学した（図 3）。MAX-lab は国立の研究所だが、隣に位置するルンド大学が実質的に運営している。ルンド大学はスウェーデンでも名門の大学であり、例えば原子の分光スペクトルを表わすリュードベリ定数で知られる Rydberg 博士を輩出している。

MAX-lab の加速器は、3 つの蓄積リング MAX-I (550 MeV)、MAX-II (1.5 GeV)、MAX-III (700 MeV)、および入射器となる 380 MeV の線型加速器から成る。最も大きな MAX-II リングの内側には FEL 試験ラインがあり、線型加速器から直接入射された電子ビームを用いてシード型 FEL の実験が行われている。これらの技術をもとに、次期大型施設 MAX-IV (1.5 GeV と 3 GeV) を近隣に新たに建設することが決まっている。今回は線型加速器と MAX-I、MAX-III は運転中のため立ち入りできず、MAX-II と FEL 試験ラインを見学さ



図 2 超小型 Smith-Purcell FEL 試作品

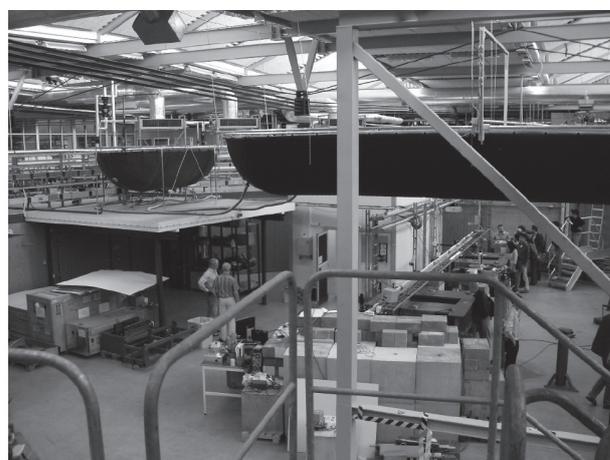
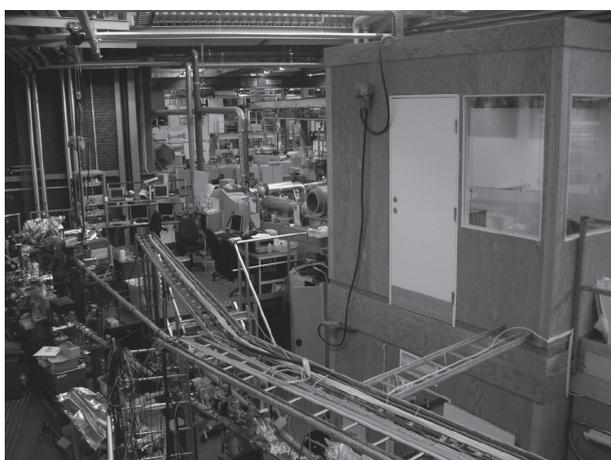


図 3 MAX-lab の様子。左：MAX-II リングの実験ビームラインと木材パネルでできた控室。右：MAX-II リングの内側、FEL 試験ラインが右奥から手前のビームダンプまで延びる。2 つの青い架台が、FEL 試験用のアンジュレータである。天井の天窓からは自然光が差しこんでいる。

せてもらった。

レンガ造りの玄関を抜けるとまず MAX-II の実験ホールに入る。まず印象的だったのが、ユーザーの準備室や控室が全て木造のプレハブ小屋だったこと。北欧では木材が入手しやすいのか、道具棚や工作室の机等も至る所、木製品ばかりである。挙句、蓄積リングの壁も木でできているように見え、びっくりした。さすがに遮蔽壁はコンクリートでできており、外側に木材のパネルを貼り付けているとのこと。

周長 90 m の MAX-II リングは、諸外国にもありそうな中規模クラスの蓄積リングである。リングの内側にある入射ラインと FEL 試験ラインは、地面を這うように低く設置されている。これは線型加速器が地下に設置されているためでもあるが、ビームラインが低いと架台も簡素で済み、作業の都合もよさそうである。また、ビームの走るダクトはむき出しになっており、偏向部の周囲など所々を鉛で覆った程度の遮蔽しかされていない。リングに入射する時と FEL の試験をする時は、リングの外側に退避するらしいが、なんともおおらかな放射線対策である。実際、マシンは 10 pps で設計されているが、放射線の制限のため入射は 1 pps で行っているとのこと。それでも現状の運転には事足りるのだろうか、必要以上の設備投資はしないという方針が徹底している。

加速器の制御室はこれまた、木造プレハブの小部屋に、コンピュータのマルチ画面と制御ラック、数台のスクリーンモニタ画面、5～6 台のオシロスコープが

置かれ、一見どこかの実験ハッチのような雰囲気である。ここで全ての加速器をコントロールしているとは、驚きの簡素さである。蓄積リングのビーム入射は毎日 2 回。夕方に入射した後は、実験ユーザーを残して加速器のスタッフは皆、帰宅してしまうそうである。あとはユーザー任せ。マシンに信頼性があり、ユーザーが良く教育されているからだ、と加速器スタッフ談。10 数名という加速器スタッフでこれだけの加速器を運転し、更に FEL や MAX-IV という新しい加速器の設計や開発に携わることができるのは、ユーザーとの間に、信頼関係が十分に築かれているお陰であろう。MAX-lab とは逆に、日本の放射光施設ではユーザーはお客様、施設は営業マシンとして扱われ、近年の利用料徴収の流れと相まってますます分業化が進んでいるように思う。ユーザーが使いやすいよう利便を図るのも良い事ではあるが、ユーザーに任せられる所は省力化して、加速器スタッフの労力は加速器の性能向上や新技術の開発に向けるべきだろうか、などと思いながら見学を終えた。

5. 最後 に

次回の FEL conference は 2011 年 8 月 21 日から 26 日まで、上海にて開催される。翌年の 2012 年は京都にて開催され、京都大学と理研、SPring-8/JASRI が中心となって運営すると聞いている。その際はぜひ、多数の皆様のご参加とご協力をお願いしたい。