

## 会議報告

## 第30回 FEL 国際会議 (FEL2008) 報告

前坂 比呂和\*

## Report on the 30th International Free Electron Laser Conference (FEL 2008)

Hirokazu MAESAKA\*

## 1. はじめに

第30回 FEL 国際会議 (FEL2008) に参加したので、その内容について報告する。この会議は毎年開催されており、今年は2008年8月24日(日)から29日(金)まで韓国の慶州 (Gyeongju) 市にておこなわれた。主催者は Pohang Accelerator Laboratory (PAL) である。

慶州市は韓国南東部の都市で、古代国家新羅の首都であった歴史のある街である。会場は慶州ヒルトンホテルで、市郊外の普門湖 (Pomun-ho) のまわりに観光団地として開発されたところに建っていた。

参加者数は約200人で、日本から約30名、韓国から約60名、アメリカから約50名、ドイツから約30

名、などであった。参加者の集合写真を写真1に示す。

タイムテーブルを表1に示す。1コマ1時間50分のセッションが1日に4つおこなわれ、合計でオーラルセッションが11、ポスターセッションが2であった。その他のイベントとして、日曜日の夕方にレセプション、水曜日に施設見学とその夜にバンケット、金曜日の午後に市内観光がおこなわれた。

以後、各セッション・行事について述べるとともに、とくに発表の多かったX線FEL施設については別の章を立てて状況をまとめることにする。

## 2. オーラルセッション

オーラルセッションは、表1に示されているように

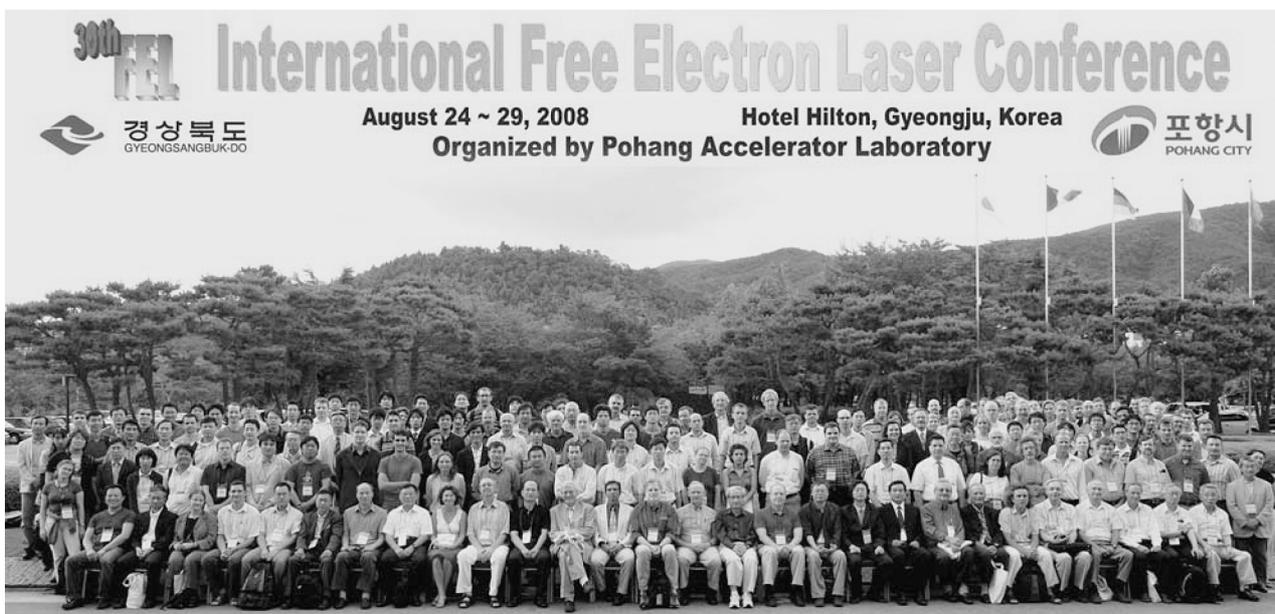


写真1 FEL2008の集合写真

\* 理研播磨

(E-mail: maesaka@spring8.or.jp)

表1 FEL2008 のタイムテーブル. オーラルセッションを太字で示した

	Mon.	Tue.	Wed.	Thu.	Fri.
9:00-10:50	Opening and New Lasing	<b>Long Wavelength FELs</b>	Facility Tour	<b>FEL Technology I</b>	<b>FEL Operation</b>
11:10-13:00	<b>FEL Prize Lectures</b>	<b>X-ray FELs</b>		<b>FEL Technology II</b>	Closing Remarks
14:00-15:50	Poster	Poster		<b>High Power FELs</b>	City Excursion
16:10-18:00	<b>FEL Theory</b>	<b>Storage Ring FELs</b>		<b>FEL Applications</b>	



写真2 オーラルセッションの様子

FEL の波長や、理論・技術などで分類されてセッションが分けられている。件数は全部で約 50 件であった。会場はホテル 1 階の結婚式場のようなところであった。オーラルセッションの様子を写真 2 に示す。以下の節では、各セッションについて、筆者の印象に残ったものを中心に報告する。

## 2.1 New Lasing

New Lasing セッションは通例最初に登場し、この 1 年で新しく FEL 発振した施設の発表がある。今年は 2 件で、DESY の FLASH がエネルギーを増強して 7 nm 以下で FEL の飽和に達したことと (第 4 節参照)、京都大学エネルギー理工学研究所の赤外線 FEL (KU-FEL) が初めて発振したことが伝えられた。

KU-FEL は、線形加速器からのマルチバンチ電子ビームを使った共振器型の赤外線 FEL である。具体的には、4.5 セルの熱陰極型 RF 電子銃と S バンド 3 m 加速管でエネルギー最大 40 MeV、マクロパルス幅 4.2  $\mu$ s の電子ビームをつくり、全長 1.6 m・周期長 40 mm のアンジュレータでレーザー発振させる。調整の

結果、波長 13.2  $\mu$ m で飽和に達したことなどが報告された。

## 2.2 FEL Prize Lecture

FEL Prize Lecture セッションでは、前年の FEL 賞受賞者による講演がおこなわれる。前年の FEL 賞は UCLA の James Rosenzweig 氏と BNL の Ilan Ben-Zvi 氏の二氏に贈られた。授賞理由は、SASE<sup>1</sup>-FEL の先駆的研究で、具体的には、SASE-FEL の理論的研究、VISA での可視～近赤外の SASE-FEL の実験、フォトカソード RF 電子銃の開発が評価されたようである。講演は Rosenzweig 氏ひとりによっておこなわれ、SASE-FEL においてビームパラメータ (エミッタンスなど) と FEL のパラメータ (ゲイン長など) との関係の講義と VISA 実験で得られた結果が紹介された。

## 2.3 FEL Theory

FEL Theory セッションでは、新しい性質をもつ FEL 光の作り方のアイデアと、FEL の性能向上についての方策が示された。たとえば、クロスアンジュレータ<sup>2</sup>を利用した FEL の偏光特性などの理論的考察、X 線 FEL においてパルス幅がアト秒台のパルス列を作る方法、X 線 FEL の出力パワーを安定化するために加速器の安定度に対する感度を下げる方法などが提案された。筆者の印象としては、FEL の基礎理論・シミュレーションツールなどはもう完成していて、それらをベースにアイデアを出すのが現在の流れであるように思われた。

## 2.4 Long Wavelength FELs

ここでは、遠赤外線 FEL や THz 光 FEL の最新情報や今後の計画などが報告された。最新情報としては、フランスの CLIO から遠赤外線 FEL の出力パ

<sup>1</sup> Self-Amplified Spontaneous Emission

<sup>2</sup> 水平と垂直のアンジュレータを組み合わせたもの

ワーに波長依存性があることや、アメリカの Vanderbilt 大学からスミスペール放射による THz 光源において出力パワーが非線形に増幅することが報告された。今後の計画としては、京都大学のシード型 THz-FEL の計画、オランダ Nijmegen 研究所の遠赤外線 FEL 計画、韓国 PAL のフェムト秒 THz 光源の状況が報告された。

## 2.5 X-ray FELs

X 線 FEL 関係の発表は第 4 節を参照されたい。

## 2.6 Storage Ring FELs

ここでは、蓄積リング型 FEL の最新結果が報告された。イタリア ELETTRA における紫外線 FEL の高調波発生に関する報告、岡崎の UVSOR において FEL 相互作用でバンチプロファイルを変調して THz 光が得られたこと、一般のリング型 FEL での FEL 発振に起因するビーム不安定性などの発表があった。

## 2.7 FEL Technology

このセッションでは、FEL の要素技術についてさまざまな発表があった。このセッションは発表数が多いため 2 コマの時間が割かれている。そのなかでも半数以上が X 線 FEL に絡んだものであった。X 線 FEL 関係は第 4 節に譲ることにして、それ以外の発表についていくつか紹介する。

ドイツの ELBE から超伝導空洞のフォトカソード RF 電子銃の報告があった。これは CW の電子銃で、カソードは常伝導 (Cu または  $\text{Ce}_2\text{Te}$ )、レーザーの繰り返しは 100 kHz である。現状ではバンチあたり 10 pC 程度でエミッタンスは  $2 \mu\text{m}$  程度のものである。

また、新しいアンジュレータとして、ソレノイド磁場中に高温超伝導体を並べて短周期アンジュレータを作る方法が示された。質疑でもコメントがあったが、この方式だと軸方向にも磁場ができるので、それに注意する必要があるだろうと感じられた。

## 2.8 High Power FELs

高出力 FEL のセッションということであるが、主に ERL 関係の発表であった。まず、Novosibirsk の常伝導の ERL による THz-FEL の報告があった。すでに波長  $120\sim 240 \mu\text{m}$  で 500 W の出力があることと、2 つの周回軌道をもつ ERL の試験をおこなっていることが示された。そのほか、フォトカソード RF 電子銃のレビューや、JLab の ERL におけるタイミングジッタ測定の発表があった。また、レーザープラズマ加速による電子ビームの生成に関する発表もあった。

## 2.9 FEL Applications

このセッションでは、FEL の利用についてのさまざまな発表がなされた。FLASH において極紫外

FEL に遠赤外線 FEL を組み合わせて極紫外 FEL 光の時間プロファイルを測定する方法、ハドロンビームの電子冷却に FEL を利用する方法、FLASH の軟 X 線 FEL を利用した磁性の研究、赤外線 FEL の分光による物性研究、ERL ベースの FEL による機械加工などの発表があった。

## 2.10 FEL Operation

FEL Operation セッションでは、筆者の印象として、New Lasing ほどではないがこの 1 年で性能が大きく向上した施設が選ばれていたように思われる。本セッションの発表の 6 件中 4 件が X 線 FEL 関係であり、これは第 4 節にまとめる。残りの 2 件は、ドイツの ELBE での赤外線 FEL の安定化と、スウェーデンの MAX-lab のシード型紫外線 FEL の報告があった。

## 3. ポスターセッション

ポスターセッションは月曜と火曜の午後に計 2 回あった。ポスターセッションの様子を写真 3 に示す。ポスター会場は 2 セッション分のすべてのポスターを同時に掲載できるようになっていたため、ポスターは会議期間中ずっと貼り出すことができた。ポスターの件数はアブストラクトブックでは約 170 件だったが、実際は約 130 件だったようである。そのためか、ポスターの掲示板には空白が目立っていたように思われた。各ポスターの内容については非常に多岐にわたるので省略することにする。

## 4. X 線 FEL

本節ではとくに発表の多かった X 線 FEL 関係のものをまとめる。日本の XFEL/Spring-8 (含 SCSS 試験加速器)、アメリカの LCLS、ドイツの FLASH について紹介し、その他の計画などについて触れる。



写真 3 ポスターセッションの様子

#### 4.1 XFEL/SPring-8

SPring-8 サイトで運転中の SCSS 試験加速器 (極紫外線 FEL) と建設中の X 線 FEL の実機に関して口頭発表が合計 3 件あった。

SCSS 試験加速器からは、まず、X-ray FELs セッションにてシード実験の結果が報告された。波長 160 nm でシードするとその基本波が増幅されるのに加えて高次の高調波が出現することが確かめられた。これは将来の軟 X 線領域のシード型 FEL が実現できる可能性が高まったことになると言えよう。また、FEL Operation セッションでは、波長 50~60 nm において SASE-FEL が飽和に達したことが発表された。これまでの加速器の安定化・アンジュレータの修理・ビーム調整の経緯と、FEL の飽和を裏付けるデータが示された。X 線 FEL 実機建設についても X-ray FELs セッションで報告があり、建設が順調に進んでいること、X 線 FEL に必要とされる厳しい性能も最近の研究開発によって満足しつつあることが示された。

#### 4.2 LCLS

LCLS 関係では、FEL Technology セッションにてアンジュレータの開発状況とスクリーンモニタからのコヒーレント OTR 光の検出の 2 件、FEL Operation セッションにて加速器部分の調整の発表があった。

LCLS の加速器は順調に調整が進んでおり、規格化エミッタンスはバンチ圧縮後で  $1 \mu\text{m}$  程度と目標を達成できているようである。ほかにも、電子ビームの位置のふらつきはビーム径の約 10%、時間ジッタは 46 フェムト秒と測定され、ビームの安定度も問題なさそうである。また、アンジュレータも量産が進んでおり、磁場・駆動機構なども要求性能を満たしているとのことであった。そして、2009 年夏に最初の放射光をだす予定である。

#### 4.3 FLASH

FLASH からは、まず、New Lasing セッションにて、6.5 nm という世界最短波長でレーズングしたことが報告された。その後、X-ray FELs セッションにて軟 X 線 FEL の波面の測定結果、FEL Technology セッションにて、電子銃試験機 PITZ の結果・電子ビームの到達時間ジッタの測定結果・Optical Replica 法によるビームの時間プロファイル測定の発表があり、最後に FEL Operation セッションにて、全体の状況と電子銃の状況について報告があった。全部で 7 件の口頭発表ということで盛りだくさんであった。

FLASH は 2007 年の夏に加速モジュールを追加して 1 GeV まで加速できるようにした。加速勾配は平

均で約 25 MV/m、いいものでは 30 MV/m に達している。電子銃については、マルチバンチで順調に運転されている。Ce<sub>2</sub>Te カソードの寿命はおおよそ 1 か月のようなものである。FEL については、加速モジュール追加後の 2007 年 10 月に 6.5 nm のレーズングを達成し、現在は波長 7~27 nm でユーザー運転が 24 時間体制でおこなわれている。今後は、加速モジュールを追加して 1.2 GeV にすること、3.9 GHz の 3 次高調波空洞の導入による縦方向エネルギー分布の線形化、シード実験などが予定されているようである。

#### 4.4 その他

X 線 FEL 関係で上記 3 施設以外では、韓国 PAL の X 線 FEL 計画の発表があった。また、将来のアイデアとして、X 線の光共振器と ERL を組み合わせてレーザー発振させる方法、フェムト秒以下の超短パルスビームを作ってパルス内のモード数を 1 つにする方法<sup>3</sup>の 2 つの発表があった。

### 5. その他の行事

#### 5.1 施設見学

会議の中日にあたる水曜日は、まる一日施設見学がおこなわれた。まず、慶州からバスで 2 時間以上かけて大徳 (Daeduk) 研究団地にある韓国原子力研究所を訪れた。そこで小型の THz-FEL、レーザープラズマ加速器の研究施設、大強度陽子加速器の試験施設などを見学した。THz-FEL での様子を写真 4 に示す。次に、近くにある KSTAR というトカマク施設を見学した。ここでは核融合関連のプラズマ実験がおこなわれている。最後に、また 2 時間以上かけて浦項 (Pohang) に向かい、PAL の放射光施設を見学した。

#### 5.2 レセプション・バンケット

会議開催前日の夕方にはレセプション、水曜日の夜にはバンケットがおこなわれた。レセプションはホテル脇のプールサイド (屋外) にて立食形式でおこなわれた。バンケットは、ホテルの横にある芝生広場 (屋外) にて着席のビュッフェ形式でおこなわれた。乾杯したあと、来賓挨拶があり、伝統舞踊などが披露された。

#### 5.3 FEL 賞

この会議では毎回 FEL 賞が贈られている。今回は

<sup>3</sup> 一般の SASE-FEL ではパルス内の異なる部分で独立にレーザー増幅が起こるためスペクトルや時間分布に複数のスパイクが現れる。すなわちモード数が 1 より大きくなる。



写真4 施設見学で訪れたKAERIのTHz-FEL施設



写真5 FEL賞を受賞したKrinsky氏(左)とFEL若手賞を受賞したRöhrs氏(中)。この写真はバンケットでおこなわれた授賞式のものである

Samuel Krinsky氏に授与された。彼はSASE-FELの理論研究や高利得高調波FEL(HGHG-FEL)の開発などに貢献したことが認められた。さらに、FEL若手賞がHamburg大学のMichael Röhrs氏に贈られた。彼はFLASHでトモグラフィの手法を用いて電

子ビームの多次元位相空間分布を測定したことが評価された。バンケットでの授賞式の様子を写真5に示す。

#### 5.4 市内観光

金曜日の午後、すべてのセッションが終わったあとに慶州市内観光がおこなわれた。慶州郊外の佛國寺(Bulguksa Temple)という奈良時代に建てられた寺を見たあと、大陵苑(Daerungwon)と呼ばれる古墳群を見て、さいごに、国立慶州博物館を訪れた。

#### 6. おわりに

2008年8月に韓国でおこなわれたFEL2008国際会議について、筆者の記憶の限り報告させていただいた。

会議を終えて本稿をまとめた印象として、さまざまな形式・波長のFELが世界各国で盛んに研究されていることが改めて感じられた。筆者はX線FELの研究をおこなっているが、さまざまなFELの多岐にわたる発表はたいへん良い勉強になった。

ただひとつ感じたこととしては、この会議は世界各地のFEL施設からの発表を寄せ集めただけのように思えた。誰かがレビュートークまたはサマリトークをしたほうがまとまるのではないかとも思われる。

さて、次回のFEL国際会議はイギリスのLiverpoolにおいて、Daresbury研究所の主催にておこなわれる。日程は2009年8月23日(日)~28日(金)である。

#### 謝辞

本報告をまとめるにあたり、SPring-8サイトから参加した大竹雄次先生、原徹先生、田中隆次先生、富澤宏光先生には原稿の確認をしていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。