

# 日本大学 LEBRA FEL ビームラインにおけるコヒーレントエッジ放射源の開発

## DEVELOPMENT OF COHERENT EDGE RADIATION SOURCE AT FEL BEAM LINE IN LEBRA

境 武志<sup>#, A)</sup>, 清 紀弘<sup>B)</sup>, 早川恭史<sup>A)</sup>, 住友洋介<sup>A)</sup>, 早川 建<sup>A)</sup>, 田中俊成<sup>A)</sup>, 野上杏子<sup>A)</sup>, 高橋由美子<sup>A)</sup>,  
小川博嗣<sup>B)</sup>, 植原 爽<sup>A)</sup>, 木村将記<sup>A)</sup>, 岡崎大樹<sup>A)</sup>, 黒澤歩夢<sup>A)</sup>  
Takeshi Sakai<sup>#, A)</sup>, Norihiro Sei<sup>B)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Yoske Sumitomo<sup>A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>,  
Kyoko Nogami<sup>A)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Hiroshi Ogawa<sup>B)</sup>, Sou Uehara<sup>A)</sup>, Masaki Okazaki<sup>A)</sup>, Ayumu Kurosawa<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University  
<sup>B)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

### Abstract

Development of a 125 MeV S-band electron linac for the generation of Free Electron Laser (FEL), Parametric X-ray Radiation (PXR) and coherent terahertz waves (THz waves) has been underway at LEBRA of Nihon University as a joint research with KEK and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). The coherent edge radiation (CER) transport systems of the each THz wave were installed in the vacuum chamber on the downstream side of the 45 degrees bending magnet of the FEL beam-line. A part of the mirror of the optical transport system is constructed using Indium Tin Oxide (ITO) mirror with the optimized for the transport of the CER-THz. A sapphire substrate with a thickness of 0.5 mm sputtered with 400 nm of ITO was placed in the FEL line. In order to increase the CER-THz transport efficiency, the mirrors of the CER transport mirror system were replaced from concave mirrors to toroidal surface mirrors. Improvement of the new CER-THz transport beam-lines are discussed in this report.

### 1. はじめに

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 LEBRA では、高エネルギー加速器研究機構と産業技術総合研究所 (AIST) との共同研究により加速器の高度化、自由電子レーザー (FEL)、パラメトリック X 線放射 (PXR) 光源開発、その応用利用、テラヘルツ波光源開発を行っている。

2017 年度末からは、AIST との共同研究として、アンジュレーター下流側に設置している 45° 偏向電磁石で発生させた THz 領域のコヒーレントエッジ放射 (CER) の開発を開始した。発生させた CER は、FEL の発振状態を妨げることなく取り出すことが可能な穴あきの凹面ミラーを用いており、この CER 輸送光学系を用いて外部取出しが可能である。輸送光学系設置直後は、発生源近傍での基礎測定を優先するため、真空配管の接続は加速器本体室のみで止め、測定を進めていたが、FEL ビームラインへ重畳できるように、2018 年度末に FEL ビームラインへの真空配管接続を行った。この接続に伴って、FEL と CER の重畳部には、ITO 蒸着ミラー (酸化インジウムスズ蒸着ミラー) を採用し、その設置を行い、重畳光学系のシステムを新たに立ち上げた。さらに既に設置していた、穴あき凹面ミラーからトロイダルミラーへ変更を行い、輸送効率を上げるように改良した。これらミラーの改良、及び、重畳用 ITO 光学ミラーの設置により、常時立ち入り可能なユーザー実験室への CER-THz の輸送が可能なビームラインが構築できた。本発表では FEL ラインへ設置した CER-THz 輸送系の光学系改良の状況と各測定結果に関して報告する。

### 2. LEBRA 125 MeV 電子線形加速器と各 THz 光源

日本大学 LEBRA では、KEK との共同研究で 125 MeV 電子リニアックを用いて 0.4~6.0  $\mu\text{m}$  の FEL、準単色 X 線の 4~34 keV の PXR 光源開発を行い、ユーザー利用実験に用いている [1-3]。2011 年からは AIST との共同研究で THz 光源開発を PXR ライン、FEL ラインでそれぞれ開始した [4-7]。

PXR ラインの THz 光源にはこれまでチタン薄膜、ベリリウム板を用いて開発を進め、現在はシリコンウエハーにアルミを 1  $\mu\text{m}$  蒸着したターゲット及び、ベリリウム板を用いている。これら金属ターゲットに電子ビームを当てて強度の強い THz 帯のシンクロトロン遷移放射 (CTR) を発生させている。また PXR ラインの最終偏向電磁石で発生した CER も用いている。これら THz 光源は利用実験での使いやすさを考慮し、常時立ち入り可能な実験室への輸送系を構築し、ユーザー利用実験へ提供している。

また FEL ラインでの THz 光源の開発では、初期段階にはアンジュレーター上流側に設置されている 45° 偏向電磁石で発生した THz 帯のシンクロトロン放射 (CSR) をベースに開発を進めていたが、これまでの PXR ラインにおける THz 光源の開発をベースに、FEL ラインでの CER-THz 光源は、アンジュレーターを通過した電子ビームから放射される CER-THz を用いてバンチ長評価利用、FEL 制御を目指して輸送光学系を設置した。またこの強度の高い CER 光源は将来的にユーザー利用も可能なように想定し、2017 年度には株式会社ヤマ協力の下、CER-THz 輸送ミラーとチェンバーを設置した。Table 1 に LEBRA 加速器の基本仕様、及び FEL、PXR、各 THz 光源の仕様を示す。

<sup>#</sup> sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

Table 1: Specifications of the LEBRA 125 MeV Electron Linac and FEL, PXR and THz Light Sources

Maximum Beam Energy	125 MeV
DC gun voltage	-100 kV
RF frequency	2856 MHz
Klystron peak RF power	20 MW
Number of klystrons	2
Macropulse duration	5 ~ 20 $\mu$ s
Repetition rate	2 ~ 12.5 Hz
Macropulse beam current	200 mA
Energy spread (FWHM)	0.5 ~ 1 %
FEL wavelength	0.4 ~ 6.0 $\mu$ m
PXR energy	4 ~ 34 keV
THz wavelength	0.1 ~ 2.5 THz
FEL line	CER
PXR line	CTR, CER, CSR

### 3. FEL ビームラインにおける CER-THz 光源開発

FEL ビームラインにおける CER-THz 光源開発の主な目的は、前章でも述べたように、アンジュレーターを通過した電子ビームのバンチから放射されるコヒーレント放射

スペクトル測定から電子ビームの状態をモニタリングし、バンチ長評価利用、FEL 制御である。そこで本目的のため、2017 年度に FEL ラインでの CSR-THz、PXR ラインでの各 THz 光源開発に基づき、FEL アンジュレーター下流に設置されている 45°偏向電磁石と下流側 FEL 共振器ミラー間に FEL の発振を妨げることなく、THz も同時に測定できるように、全反射ミラーに加え、穴あきミラーを設置した。既に知られているように、CER-THz は環状分布を有する。すなわち、穴あきミラーを用いる事で FEL ビームの回折損失なしに FEL の光キャビティからの取出しが可能となる。

ただし偏向電磁石は元々 CER 光源として考慮した物では無かったため、磁石内の真空チャンバーの寸法制限があり、開口直径は、水平面放射角約 30 mrad までとなっている。これまで行った CER-THz 光源近傍での CER の測定では、強度とスペクトル測定をおこない、強度としては、全反射ミラー挿入時 0.5 mJ/マクロパルス、波長範囲としては、0.1 ~ 2.5 THz が得られている。電子ビーム条件は、ビームエネルギーが 57 MeV、マクロパルス幅は 18  $\mu$ s、繰返しが 2 Hz、FEL 発振波長 5.4  $\mu$ m であった。また THz のパワー測定には THz の波長領域で校正されている Ophir 製の 3A-P-THz[8]を用い、スペクトル測定では干渉計を構築し、パイロ検出器の THZ10[9]を使用した。また、穴あきミラー挿入時の THz 光の強度は、全反射ミラー挿入時と比較して約 70 %の反射効率が確認できており、THz 反射用ミラーに穴あきミラーを用いる事で、CER-THz と FEL 発振の同時測定が可能な光学系である事が確認できている[10, 11]。

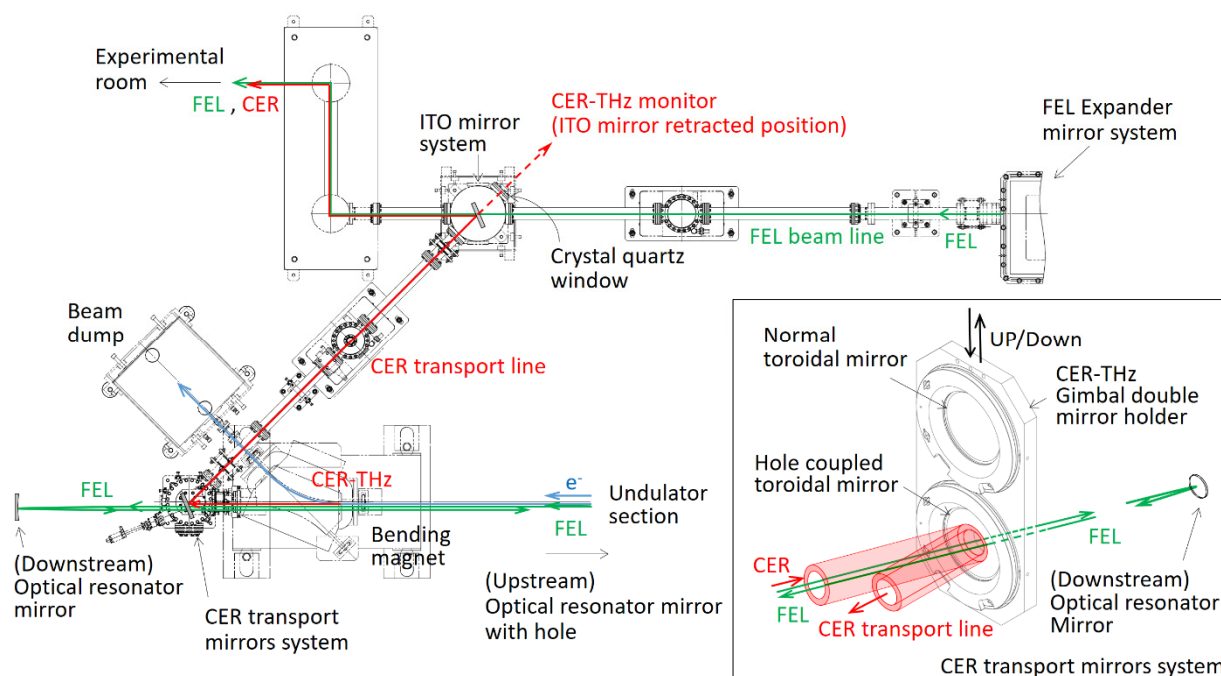


Figure 1: Schematic views of CER-THz transport line and FEL beam line. A part of the mirror of the optical transport system is constructed using Indium Tin Oxide (ITO) mirror with the optimized for the transport of the THz. In order to increase the CER-THz transport efficiency, the mirrors of the CER transport mirror system were replaced from concave mirrors to toroidal surface mirrors.

#### 4. FEL ライン CER-THz 輸送システムの改良

CER-THz 光源近くでの基礎測定を完了し、PXR ビームラインの THz 光源同様、常時立ち入り可能な実験室への輸送を目的に、2019 年 3 月に CER-THz 輸送ラインと FEL 重畳光学ミラー内蔵チャンバーのラインを真空配管で接続した。CER-THz ビームラインと FEL ビームラインの重畳部分にはサファイア基板(直径  $\phi$  76 mm、厚さ 0.5 mm)に酸化インジウムスズ(ITO: Indium Tin Oxide)を 400 nm 蒸着したミラーを設置した[12]。この ITO ミラーは取り付け前の透過試験において、赤外領域の FEL は透過させつつ、1.0 THz 付近の THz 光源は 80% 反射することを確認した。また、この ITO ミラーを設置しているチャンバーにはミラーを上げ下げさせる駆動機構がついており、挿入時は CER-THz 光を反射、退避時はチャンバー後方に取り付けた結晶石英窓[13]を通して CER-THz を外部へ取り出し可能としている。

さらに、昨年度設置済みのアンジュレーター下流側の THz 輸送光学系からの輸送効率を上げるため、元々設置していた凹面ミラーからトロイダルミラーへの交換を行った。ミラーのサイズは、凹面ミラーと同様として、直径  $\phi$  74 mm(有効径 68 mm)、FEL 透過用の穴径は 24 mm、厚さ 10 mm とし、水平面曲率半径を 1515 mm、垂直面曲率半径を 1293 mm とした。ミラー交換後も FEL の発振状態を維持しつつ、CER-THz の同時測定が可能であり、FEL 発振状態の初期調整や発振状態のモニターなどにも有効活用している。また ITO ミラー退避時に後方へ取り出した CER-THz に対して、ビームプロファイル、パワー等測定が常時モニターできるように、取り出しポート下部に光学系等を常設するための整備を進めている。Figure 1 に FEL ライン CER-THz 輸送系のミラーシステムと重畳光学系までの全体の概要図を示す。

ITO ミラーを用いて FEL ラインとの重畳ラインができたことで、FEL と THz のポンププローブ測定など新たな応用実験の可能性など期待される。

現時点で、実験室への重畳輸送テストはまだ未実施であり、光源点近傍での CER-THz 輸送システムを用いた輸送試験は成功しているが、重畳輸送に関しては 2019 年秋以降テストを開始予定である。またそれに加えて整備が遅れている水蒸気対策の超乾燥空気システムも並行して準備を進めている。

#### 5. まとめと今後の課題

CER-THz 光を用いたバンチ長評価利用、FEL 制御を目指した THz 輸送光学系を FEL アンジュレーター下流側の 45° 偏向電磁石と下流側 FEL 共振器ミラー間に設置している。この光学系は FEL の発振を妨げることなく、CER-THz と FEL 発振の同時測定が可能な光学系となっている。2018 年度末に CER-THz 光源点近くでの基礎測定を完了させ、輸送光学系と FEL ラインへの真空配管接続を行った。また輸送光学系での輸送効率を上げるため、凹面ミラーからトロイダルミラーへ交換を行った。FEL ラインとの重畳用光学系にはサファイア基板(直径  $\phi$  76 mm、厚さ 0.5 mm)に ITO を 400 nm 蒸着したミラーを設置した。この ITO ミラーは、赤外領域の FEL はほぼ透過させつつ、1.0 THz 付近の THz-CER は 80% 反射させる事が可能である。また ITO ミラー退避時は、後方の

結晶石英窓を通して外部へ取り出しが可能であり、CER-THz のビームプロファイル、パワー測定等常時モニター可能な光学系を構築している。FEL と CER-THz の重畳輸送試験は 2019 年秋以降テストを開始であり、ユーザー利用実験に用いる事ができるよう準備を進めている。

#### 謝辞

本研究開発の一部は JSPS 科研費 16H03912、JP19H04406 の助成を受けて行いました。

#### 参考文献

- [1] K. Hayakawa *et al.*, "Operation of Near-infrared FEL at Nihon University", Proceedings of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, pp. 114-117, 2007.
- [2] Y. Hayakawa *et al.*, "Dependence of PXR beam performance on the operation of the pulsed electron linac", NIMB, vol. 266, Issue 17, pp. 3758-3769, 2008.
- [3] Y. Hayakawa *et al.*, "First lasing of LEBRA FEL at Nihon University at a wavelength of 1.5  $\mu$ m", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 483, pp. 29, 2002.
- [4] N. Sei *et al.*, "Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA", J. Phys. D, vol. 46, pp. 045104, 2013.
- [5] Y. Hayakawa *et al.*, "X-ray imaging using a tunable coherent X-ray source based on parametric X-ray radiation", doi:10.1088/1748-0221/8/08/C08001.
- [6] N. Sei *et al.*, "Characteristics of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA", in Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, pp. 541-544, 2014.
- [7] Y. Hayakawa *et al.*, "Project on the superposition of beamlines for parametric X-ray radiation and coherent transition radiation in the THz region at LEBRA", Journal of Physics: Conference Series 732, pp. 012013, 2016.
- [8] Ophir Optonics Solutions Ltd.; <http://www.ophiropt.com/laser-measurement/laser-power-energy-meters/products/Laser-Thermal-Power-Sensors/High-Sensitivity-Thermal-Laser-Sensors/3A-P-THz>
- [9] <https://www.pyrosensor.de/Standard-924644.html>
- [10] T. Sakai *et al.*, "Development of High Power Coherent Terahertz Wave Sources at Lebra 125 MeV Linac in Nihon University", LINAC2018, Beijing, China, pp.78-80, 2018.
- [11] N. Sei *et al.*, "Coherent Edge Radiation Sources in Linac-Based Infrared Free-Electron Laser Facilities", LINAC2018, Beijing, China, pp.154-156, 2018.
- [12] Wakasa Electric Industry Co. Ltd; <http://www.wakasadenki.co.jp/>
- [13] Fuji Ideck, Inc.; <http://www.fuji-ideck.co.jp/>