

# 日本大学 LEBRA 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 LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

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>,  
岡崎大樹<sup>A)</sup>, 黒澤歩夢<sup>A)</sup>, 斉藤広斗<sup>A)</sup>, 廣原 匠<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>, Masaki Okazaki<sup>A)</sup>, Ayumu Kurosawa<sup>A)</sup>, Hiroto Saito<sup>A)</sup>, Takumi Hirohara<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 terahertz radiation (THz) 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 each THz wave were installed in the vacuum chamber on the downstream side of the 45 degrees bending magnet of the Free Electron Laser (FEL) and Parametric X-ray Radiation (PXR) beam-line. A dry air system with a glove box and a desiccant air dryer system was introduced into the THz-CER measurement system. As a result, the relative humidity in the measurement system decreased to less than 6 % of relative humidity at 24 °C after the introduction of dry air. Spectral waveform measurements of THz-CER in a low-humidity environment showed a significant improvement in the effect of water absorption. Improvement of the THz-CER transport systems and dry air measurement systems are discussed in this report.

### 1. はじめに

日本大学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との共同研究により加速器の高度化をすすめ、FEL とパラメトリック X 線放射 (PXR)、テラヘルツ波 (THz) 光源開発を行っている。また各光源は日大内外の共同利用研究に提供しており、共同利用実験に用いている。2013 年度からは PXR ビームラインにおける THz 領域のコヒーレント遷移放射 (CTR)、偏向電磁石からのエッジ放射 (CER) 等の基礎測定、輸送光学系の設置、2017 年度から FEL 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 CER 光源開発を進めている。FEL ラインで発生した THz-CER の取出しには穴あきミラーを用いており、FEL 発振状態を妨げることなく取出すことが可能な光学系となっている。さらに大きな特徴として、FEL と THz 輸送光路の交差箇所には ITO (酸化インジウムスズ) 蒸着ミラーを用いることで、FEL 輸送ビームラインへ THz-CER 光を重畳し、FEL と THz の同時輸送可能な光学系としている。2019 年度末に、輸送系に用いていた穴あきミラーをトロイダルミラーへ改良し輸送効率の改善、ビームプロファイル計測用カメラを導入した。しかしアンジュレーターの交換工事や加速器側のトラブル、新型コロナウイルスの影響による構内への入構制限等があったため、FEL ラインでのプロファイル測定、常時立入可能な実験室への輸送試験は遅れている。影響の少なかった PXR ラインでは、FEL と同様に、輸送ライン経路途中の凹面ミラーをトロイダルミラーへ改良し輸送効率の改善を図り、さらに測定時の懸念事項であった空気中の水による吸収影響対策のために、測定系全体を覆う乾

燥空気システムの導入を進めた。乾燥空気システムの導入により、水蒸気の影響を軽減した測定が可能となった。本発表では LEBRA における各ビームラインにおける CER 光源開発状況、各測定結果に関して報告する。

### 2. LEBRA 各ビームラインにおける THz-CER 光源開発

日本大学 LEBRA では、赤外領域の FEL、準単色 X 線の PXR を KEK と共同で開発し、ユーザー利用実験に用いている[1-3]。またこの PXR ライン及び、FEL ラインにおいて AIST と共同で THz 光源を開発しており、将来的には FEL、PXR との同時照射可能なシステムを目指している[4-8]。

PXR ラインでは、ベリリウムターゲット(厚さ 0.1 mm)を用いて前方 THz-CTR、シリコンウエハーにアルミを 1 μm 蒸着したターゲットを用いた後方 THz-CTR、PXR ビームライン下流部ビームダンプ前に設置されている 45°偏向電磁石で発生した THz-CER を用いている。なおこの PXR ラインでの THz 光源は、利用実験での使いやすさを考慮して、放射線量の少ない常時立ち入り可能な実験室への輸送光学系を構築し、ユーザー利用実験へ提供している。

また、FEL ラインでは、PXR ラインにおける THz 光源の開発実績をベースに、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 THz 光を用いたバンチ長評価利用、FEL 制御を目指して、FEL アンジュレーター下流に設置されている 45°偏向電磁石から発生した THz-CER 光源を用いている。このラインでは、45°偏向電磁石と下流側 FEL 共振器ミラー間に FEL と THz を同時に測定できるように、FEL 発振を妨げないよう穴あきミラーを設置した輸送光学系を構築している。

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

### 3. FEL ビームラインにおける THz 重畳ラインと測定系

エッジ放射は、高エネルギーの電子などの荷電粒子が偏向電磁石端面において、運動方向の速度変化に伴って電磁放射される現象であり、90年代の加速器リング直線部において観測される干渉光の原因として知られていた。このエッジ放射は、荷電粒子の軌道方向の加速度運動から放射されると考えて良いので、遷移放射のような同心円分布且つ、ラジアル偏光であり、また放射光にくらべて、波長依存性が緩やかで、赤外領域では高強度であるといった特徴がある。プロファイルとしては、直線部で測定するため、通常は2箇所からの光源の干渉としてリング上の干渉縞が観測される[9]。

エッジ放射は中空構造をしていることから、共振器外部への取出し方法を工夫することで、FELの損失をすることなく取り出すことが可能であり、回折放射とは異なり、放射強度の波長依存性がカップリングの影響を受けにくい。更にTHzの波長領域では、放射光よりも1桁から2桁程度高強度で有り、更にコヒーレント放射化する事で、マイクロパルスあたりの出力も数十nJと期待できる。また一般的なエッジ放射で見られる上流側と下流側からの干渉に関しては、FELの場合、偏向磁石間にアンジュレーターが設置されているため、上流側で発生したエッジ放射は途中でほぼカットされてしまうため、干渉せず利用しやすいといった特徴があることから、THz-CERはFELのビームモニター用に非常に適していると言える。

そこでLEBRAのFELラインにおけるTHz-CER光源の開発では、これらエッジ放射の特徴を生かして、FEL

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-CERを用いたバンチ長評価、利用等を目的に、穴あきミラーを用いた取出し光学系を設置している。設置している輸送光学系をFig. 1に示す。共振器から外部へのCER取出しミラーにはトロイダルミラーを用いており、直径φ74mm(有効径68mm)、FEL透過用孔径24mm、厚さ10mm、水平面曲率半径1515mm、垂直面曲率半径1293mmとしている。穴あきミラー挿入時と全反射ミラー挿入時の反射効率は約70%が確認できており、THz-CERとFEL発振の同時測定可能な光学系である事を確認している[10-12]。

また、CER-THz輸送ビームラインとFELビームラインの交差する重畳部分には、サファイア基板(直径φ76mm、厚さ0.5mm)に酸化インジウムスズ(ITO: Indium Tin Oxide)を400nm蒸着したミラーを設置しており[13]、赤外領域のFELは透過させつつ、1.0THz付近のTHz光を80%反射させている。また、このITOミラーは遠隔からの上下移動可能な構造にしており、ITOミラー挿入時はCER-THz光を反射、退避時はチェンバー後方に取り付けた結晶石英窓[14]を通してCER-THzを外部へ取り出し、モニターとして用いている。プロファイル測定では、これまでトリガー同期測定ができていなかったため、トリガー同期可能なTHz用カメラのPyrocam IIIHR[15]を導入した。しかし、昨年度末にアンジュレーター交換工事や加速器高周波源のクライストロントラブル[16]、新型コロナウイルス感染症の影響に伴う大学構内への入構制限が重なり、FELラインでの重畳輸送試験、加速器本体室内での常時モニターに用いるプロファイル測定が遅れており、引き続き構築を進めている。

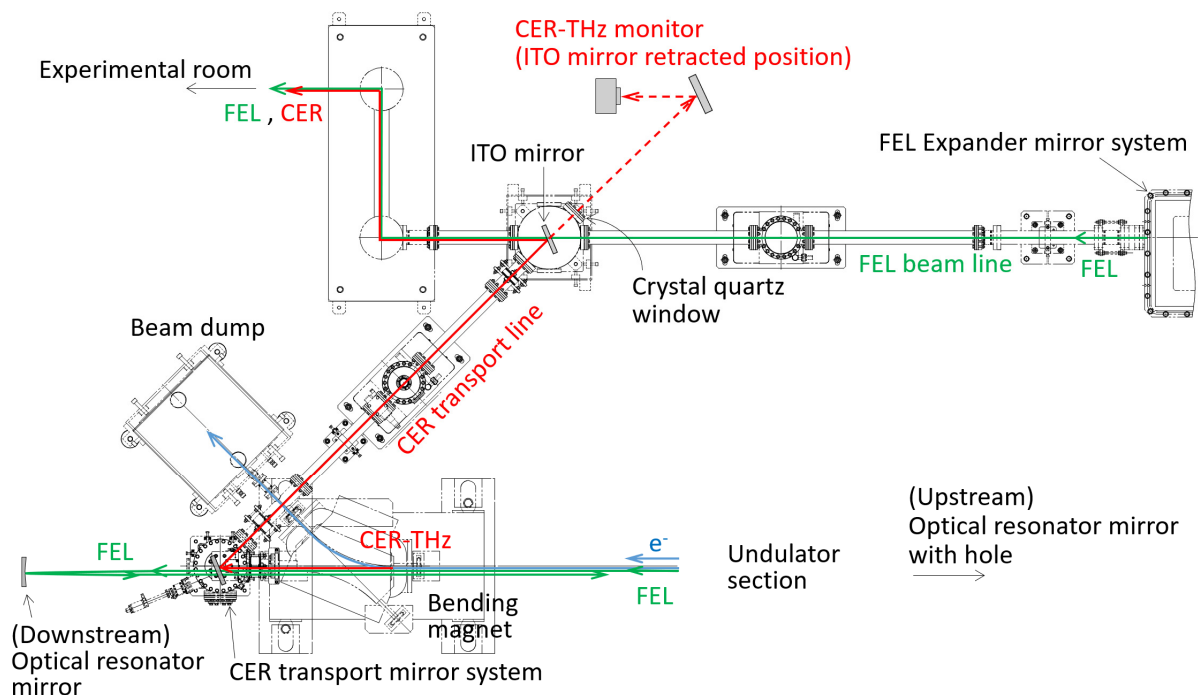


Figure 1: Schematic views of THz-CER transport line and FEL beam line. A part of the mirror of the optical transport system are constructed using toroidal surface mirrors and Indium Tin Oxide (ITO) mirror with the optimized for the transport of the THz[10-12].

#### 4. PXR ラインにおける THz 測定系の構築と改良

PXR ラインでの THz 輸送光学系は、下流側の多目的真空チャンバーに設置されており、PXR ビーム輸送を妨げることなく、PXR ビームライン下流部ビームダンプ前の 45°偏向電磁石で発生した THz-CER、金属ターゲットで発生させた前方 THz-CTR、後方 THz-CTR を搬送する切り替え可能な光学系を用いている[17]。これまでの PXR ラインの THz 輸送系における真空層内に設置していたミラーには、凹面ミラーを用いていたが、FEL ライン同様に、輸送効率を上げるために、トロイダルミラーへ交換した。またこれまで、輸送後の THz 測定系で用いている干渉計とその周囲には、簡易的な覆いをかぶせて測定を行っていた。そのため、大気中の水による吸収の影響が見えており、利用できる波長範囲としては、0.1~2.0 THz 弱であった[17]。そこで大気圧露点-72 °C のエアドライヤー(CKD 製 HD1.5 [18])を用いて、市販のグローブボックス(アズワン製 AFGB-745、サイズ 745×500×604)を改良した測定系を構築した。また、THz 取出口からグローブボックス間もアクリルパイプで接続し、取り出し口から測定系まで全体を乾燥空気で満たせる構造としている。導入した乾燥空気システムと測定系の様子を Fig. 2 に示す。湿度は温湿度計(T&D 製 TR-72wb、高精度温湿度センサ SHA-3151 [19])で測定をしたところ、低湿中では誤差が大きく、数値の変動が目立ってはいるが、6 %程度であった(室温約 24 °C 時)。通常のサンプル等交換時に、通常の空気へ開放を行うが、再度低湿状態にまで回復させるまで、数分で復帰が可能であり、十分な乾燥空気の量が確保できていることも確認できた。

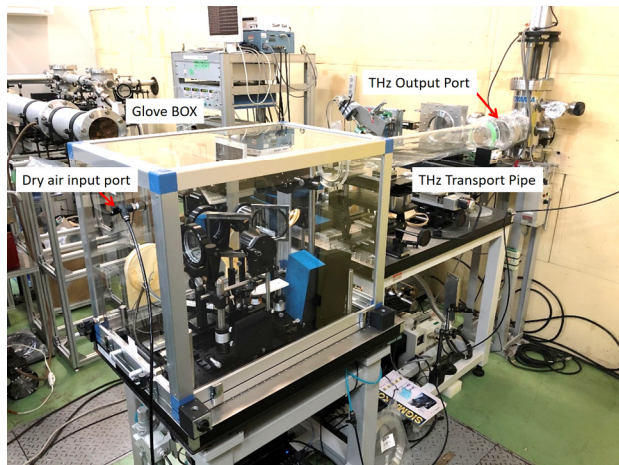


Figure 2: Photographs of the appearance of the THz-CER measurements system, THz transport line and the dry air system.

乾燥空気で満たされたボックス内で測定した THz-CER のスペクトル波形例を Fig. 3 に示す。乾燥空気システムを導入することで、スペクトル測定時にこれまで目立っていた水の吸収による影響を大きく改善できていることがわかる。またノイズレベルも抑えることができおり、利用できる周波数帯域は 4 THz 弱まで広がり、今後のユーザー利用実験での利用に大きく期待できる。現在は薬剤を用いた共同研究を実施テスト準備中である。また

現在の測定機器では低湿度環境中は誤差が大きいことから、スペクトル波形と HITRAN データベース[20]における数値と比較概算すると、実際は 2 %弱まで低下していることが期待できており、薬剤の共同研究も始まっていることから、低湿環境下における湿度測定系の整備も検討をしている。

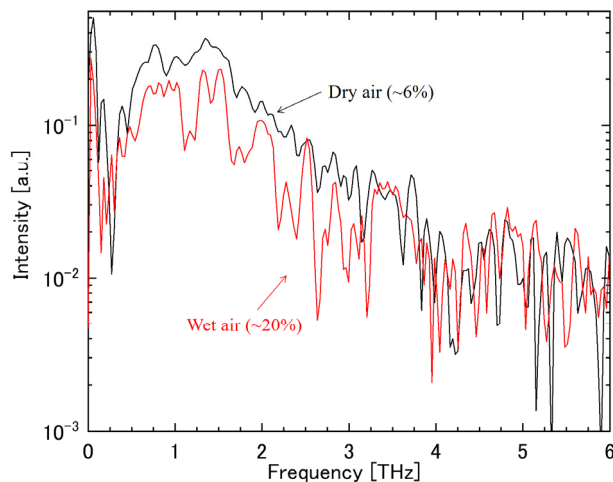


Figure 3: Comparison of THz-CER spectra at the PXR beamline in dry and wet air.

#### 5. まとめと今後の課題

日本大学LEBRAでは、各ビームラインにおいてTHz-CER光源の開発を進めている。FELラインでは、THz-CERを用いたビーム評価利用及び、FEL制御を目指した輸送光学系を構築した。特に、FELラインでのTHz-CER輸送光学系には、穴あきのトロイダルミラーを用い、FEL発振中に損失なしに、THz-CER測定が可能である。このTHz-CER光の常設測定系でビームプロファイル、パワー等をモニターし、FEL発振調整に活用を進めている。FELとTHz-CERの重畳部分には、ITOミラーを用いた重畳輸送光学ラインを構築した。PXRラインでは、乾燥空気測定系を構築し、これまでの測定中に問題であった、大気中の水の影響が抑えられ、利用可能帯域も4THz弱へ広がった。現在は共同利用研究で薬剤を用いた測定を準備中である。

今後の課題としては、FELラインでは、FEL発振とTHz-CERの相関測定、電子ビームバンチ長モニタリングやFEL発振制御への活用を行い、昨年度末からテストが遅れている、重畳試験とビームプロファイル測定を行う予定である。PXRラインでは、PXRラインの輸送光学系ミラー交換に伴う輸送テスト、乾燥空気システム導入による低湿環境下での利用実験、より高強度なTHz光源の開発を計画している。

#### 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。

THz測定系の乾燥空気システム導入にあたり、阪大産研の入澤氏に貴重なご助言をいただきました。深く感謝いたします。

## 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  $\mu\text{m}$ ”, 2002 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 483, 29.
- [4] T. Sakai *et al.*, “Evaluation of Bunch Length by Measuring Coherent Synchrotron Radiation with a Narrow-Band Detector at LEBRA”, Condens. Matter 2020, 5(2), 34; <https://doi.org/10.3390/condmat5020034>
- [5] N. Sei *et al.*, “Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, J. Phys. D, vol. 46, 045104, 2013.
- [6] Y. Hayakawa *et al.*, “X-ray imaging using a tunable coherent X-ray source based on parametric X-ray radiation”, JINST 8, C08001, 2013; doi:10.1088/1748-0221/8/08/C08001
- [7] N. Sei *et al.*, “Characteristics of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA”, in Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, pp. 541-544.
- [8] 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 (2016) 012013.
- [9] G. Geloni *et al.*, “Theory of edge radiation”, DESY 08-118.
- [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] T. Sakai *et al.*, “Development of coherent edge radiation source at FEL beam line in LEBRA”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan.
- [13] Wakasa Electric Industry Co., Lt.; <http://www.wakasadenki.co.jp/>
- [14] Fuji Ideck, Inc.; <http://www.fuji-ideck.co.jp/>
- [15] Ophir Optronics Solutions Ltd.; <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/jp/beamprofilers/products/Beam-Profiling/Camera-Profiling-with-BeamGage/Pyrocam-IIIHR>
- [16] K. Nogami *et al.*, “Status report of 125 MeV electron linac and light source development at Nihon University”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, this meeting.
- [17] T. Sakai *et al.*, “Research and development of the high power THz light sources at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 1-3, 2017, Sapporo, Japan.
- [18] CKD Corp.; <https://www.ckd.co.jp/kiki/jp/product/detail/82/HD?t=list&cid=75&sid=0>
- [19] T&D Corp.; [https://www.tandd.co.jp/product/tr7wbnw\\_series.html](https://www.tandd.co.jp/product/tr7wbnw_series.html)
- [20] The HITRAN Database; <https://hitran.org/>