

# 日本大学電子線利用研究施設における高強度コヒーレントテラヘルツ波光源開発

## DEVELOPMENTS OF HIGH POWER COHERENT TERAHERTZ WAVE SOURCES AT LEBRA LINAC IN NIHON UNIVERSITY

境武志<sup>#, A)</sup>, 清紀弘<sup>B)</sup>, 田中俊成<sup>A)</sup>, 早川恭史<sup>A)</sup>, 住友洋介<sup>A)</sup>, 野上杏子<sup>A)</sup>, 高橋由美子<sup>A)</sup>, 早川建<sup>A)</sup>, 小川博嗣<sup>B)</sup>  
Sakai Takeshi<sup>#, A)</sup>, Norihiro Sei<sup>B)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Yoske Sumitomo<sup>A)</sup>, Kyoko Nogami<sup>A)</sup>,  
Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Hiroshi Ogawa<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 the terahertz (THz) wave source has been underway at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University in collaboration with National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. The new THz wave transportation line have been constructed on the same axis as the FEL beam line. The transport mirror system of the coherent edge radiation (CER)-THz wave to the FEL beam-line was installed in a vacuum chamber at downstream of the undulator. This mirror system is possible a simultaneous measurement of FEL and CER-THz wave. The wavelength range of CER-THz is about 0.1 to 2.5 THz, and the average intensity of the CER-THz wave obtained at the output port of beam line in the accelerator room has been 0.5 mJ/macro-pulse. The new CER-THz transport beam-lines and the characteristics of the CER-THz waves 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、1994 年度から高エネルギー加速器研究機構との共同研究において電子線形加速器の高度化を進め、自由電子レーザー (FEL) 及び、パラメトリック X 線放射 (PXR) の各線源開発を行ってきた。また 2011 年度からは、独立行政法人産業技術総合研究所 (AIST) との共同研究を開始し、テラヘルツ (THz) 波光源の開発を行っている。これまでに FEL ビームライン上流側に設置されている偏向電磁石で発生させた THz 光の基礎測定、応用利用、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、輸送光学系の設置を行ってきた。これらの THz 光源開発を踏まえ、新たに FEL ビームラインにおけるアンジュレーター下流側の偏向電磁石で発生している THz 帯の CER を輸送する光学系を設計した。この光学系は FEL の利用実験、また FEL 発振を妨げることなく FEL 発生時の電子ビームのパルス特性を測定することなどを目的とし、輸送ミラーを 2 つ用意し、片方は中空凹面ミラーとした。その他 THz 光源同様、ユーザー利用を想定し、既設の FEL 輸送ラインへ重畳させる光学系も設計製作し、基礎測定を始めた。本発表では、新たに構築した FEL ライン下流側偏向電磁石における CER-THz 輸送ミラーとその CER の基礎測定結果に関して報告する。

### 2. LEBRA リニアックと各光源

日本大学 LEBRA リニアックは、100 kV DC 電子銃、バンチャー、S バンド 4 m 加速管 3 本から構成されており、加速エネルギーは 40~100 MeV、繰り返し 2~12.5 Hz、ビームパルス幅 5~20  $\mu$ s である。また 2010 年から

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

通常のフルバンチモード運転に加え、64 分周、128 分周のバーストモード運転が可能となっている。FEL 発振波長は基本波として、1000~6000 nm が利用可能である。また非線形結晶を利用し 400~1200 nm の波長範囲でも利用が可能であり、可視から近赤外領域までがユーザー利用実験に用いられている[1, 2]。PXR に関しては、Si(111)結晶、Si(220)結晶を用いて、5~34 keV の範囲が利用可能であり、コンピュータ断層撮像などへの応用利用に用いられている[2-4]。THz 光源に関しては、2011 年度から独立行政法人産業技術総合研究所との共同研究を開始し、FEL ライン上流側での THz 光源開発を行ってきた[5]。2016 年からは FEL ラインでの THz 光源開発の結果を踏まえ、PXR ライン上で高強度 CTR、CER 光源開発を開始し、波長範囲 0.1~2.5 THz、出力パワー 1 mJ が得られ、国内加速器広帯域光源として最大強度を達成している[6, 7]。また、2017 年からは FEL ライン上流側と PXR ラインでの THz 光源開発の経験を活かし、FEL ラインのアンジュレーター下流側偏向電磁石で発生している THz 領域の CER-THz 輸送ライン新設を行った。

### 3. FEL ライン下流側コヒーレントエッジ放射 テラヘルツ波輸送光学系

#### 3.1 FEL 下流側偏向電磁石真空チャンバー

アンジュレーター前後に設置している偏向電磁石内の真空チャンバーは、電子ビームのアンジュレーターへの輸送と、ビームダンプへ輸送することだけを目的としており、もともと CER-THz 波の輸送を想定した作りとなっておらず、ビームに対して上下左右方向の高さが低く、配管も細いものが用いられていた。よって、そのまま使用した場合、電子ビーム輸送に関しては問題無いが、偏向電磁石入口で発生している CER-THz 波に関しては、その一部がチャンバー、ダクト部で削られ、大部分が輸送

されないことがわかった。そこで、電磁石磁極上下幅と、後部輸送路の設置状況を考慮し、可能な限り取出口を広げたチャンバーへ新規交換することとした。チャンバー製作、磁極の半割、再設置等の作業が伴うため、株式会社トヤマ協力のもと行った。製作した真空チャンバーの立体図を Fig.1 に示す。取り出し口は設置できる寸法の上限から、水平面 30 mrad の放射角をカバーできるように開口幅を広げた。その他のポートは既存のビームラインと互換性をもたせ、同じ配置としている。

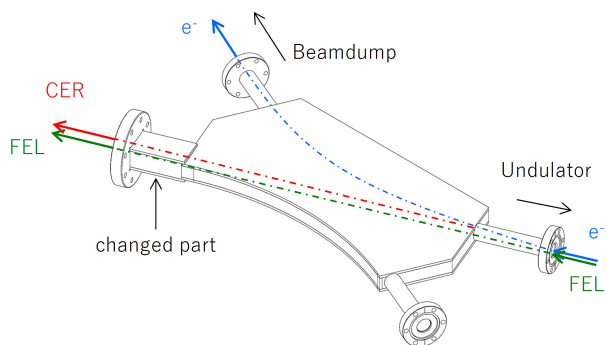


Figure 1: Schematic view of the changed vacuum chamber at the FEL beam line downstream bending magnet.

### 3.2 FEL ラインテラヘルツ波輸送路と輸送ミラー機構

CER-THz 波を用いた「バンチ長評価利用」、「FEL 制御」を目指した輸送光学系とするため、アンジュレーター下流側に設置している偏向電磁石で発生させたテラヘルツ帯の CER 輸送光学系の設計製作と 3.1 節で述べた真空チャンバーに交換し、Fig. 2-(a)に示す CER-THz 輸送系と光学ミラーを整備した。ただし、現時点では、発生点付近での基礎測定を先行し、実験室内での測定系構

築のため、真空排気は行っているが、FEL ビームラインへの接続配管は行っていない。

FEL エキスパンダーシステムから実験室への輸送ラインに重畳するための合流部の真空チャンバーとミラーには、2012 年度に設置していた上流側の偏向電磁石で発生させた CSR 輸送重畳用チャンバーを移設し、再利用した。この移設に伴い、上流側でのテラヘルツ領域の CSR のユーザー利用実験はできなくなるが、強度としては、CSR で得られていた強度に比べて、CER-THz で得られる強度は桁高く、また波長範囲も広いいため、今後の利用実験には下流部での CER を用いる事で問題ないと判断し、移設した。

CER-THz 輸送ミラーは、ユーザー利用実験、FEL と THz 波の重畳輸送を考慮し、Fig. 2-(b)に示すように FEL 発振を妨げることが無いように、全反射用凹面ミラーに加えて、中空凹面ミラーを配置した。偏向電磁石で発生した CER-THz はよく知られているようにラジアル偏光である。そのため、中心部に特異点を持ち、特異点からの偏光方向が放射状な空間分布で放射されるため、中心部分のミラーは必要が無い。そこで、中空ミラーを用いることにより、FEL を穴に透過させつつ、CER のみを反射させることが可能な構造とした。この構造を用いることで FEL 発振と CER-THz の同時測定、調整が可能となる。反射鏡に開けた穴径は  $\phi 25 \text{ mm}$  とし FEL 共振器内の FEL 蓄積時に遮らない寸法とした。またこのミラーは完全退避も可能であり、全反射、中空ミラーへの各モードへの切り替えは遠隔から数十秒で変更可能である。ミラーのアライメントは、設置後大きく変更することが無いため、設置後のレーザーを用いたアライメント時に微調整ができるような構造とした。アライメントには真空チャンバー外部からベローを介し、真空対応のロッドが挿入された機構とし、各ミラーに用意した回転、あおり調整ツマミを回せる構造とした。設置完了後の上流のアンジュレーター

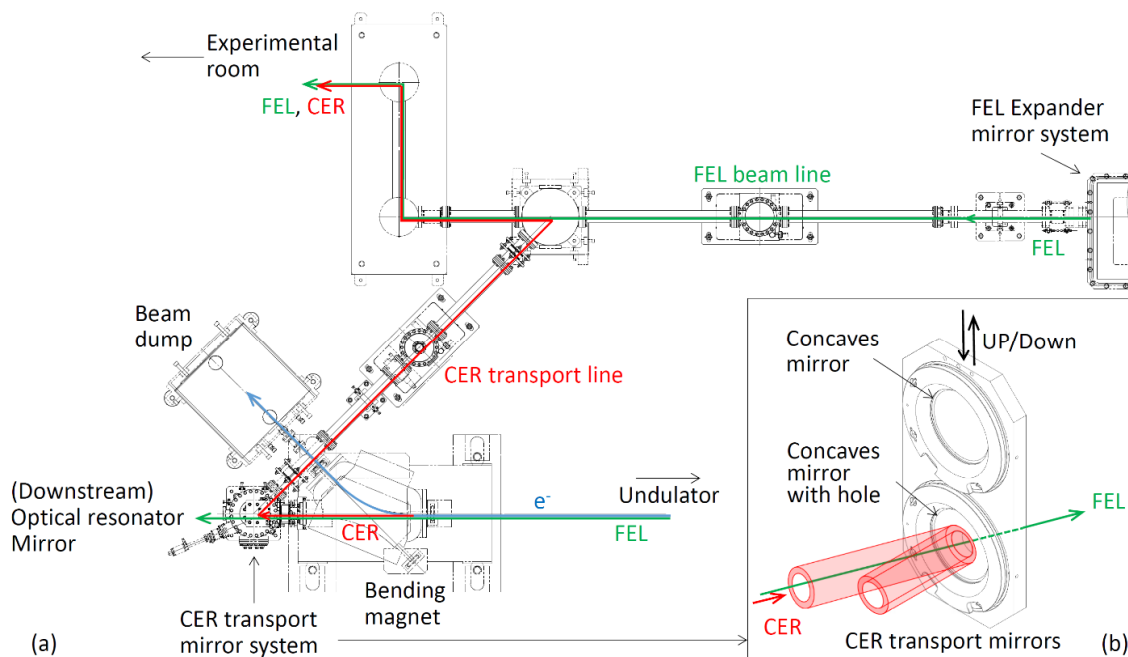


Figure 2: (a) FEL beam line, CER-THz transport line and CER-THz wave transport concaves mirrors system. (b) Transport mirrors system consists of the total reflection concave mirror and the concave mirror with hole.

側から見た輸送機構の様子を Fig. 3 に示す。図はまだ磁石の上面磁極を戻す前の状態である。

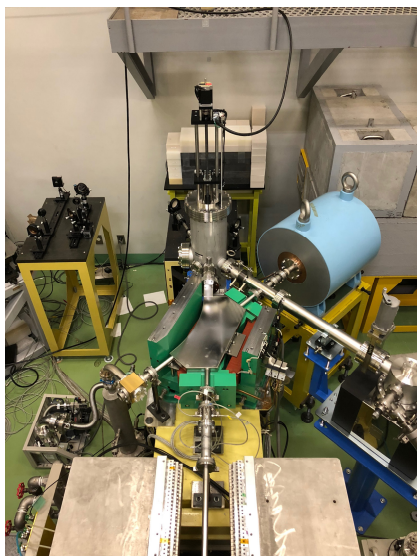


Figure 3: CER-THz transportation line as viewed from the upstream side after installation.

### 3.3 コヒーレントエッジ放射テラヘルツ波の基礎測定

発生点近傍にて CER-THz の基礎測定を行った。測定箇所としては、新設の輸送ミラー後、FEL ビームラインとの合流部直前の CER-THz の輸送路部を接続せず、取出口に藤アイデック製の結晶石英窓を取付けを行った[8]。はじめに、干渉計を用いてスペクトル測定を行った。測定には Sensor und Lasertechnik 製の THz10 を 2 台用い、1 台はモニター光とした[9]。Figure 4 に CER-THz のスペクトル測定例を示す。測定の結果、波長:0.1~2.5 THz の範囲まで出力が確認できた。次に、テラヘルツ波帯でパワー校正されている Ophir 製のパワーセンサー 3A-P-THz を用いて、パワー測定を行った[10]。測定の結果、全反射ミラー使用時に 0.5 mJ 得られた。また中空ミラー挿入時は全反射時に比べて約 70%を輸送可能であることが確認できた。中空凹面ミラーを用いることで、

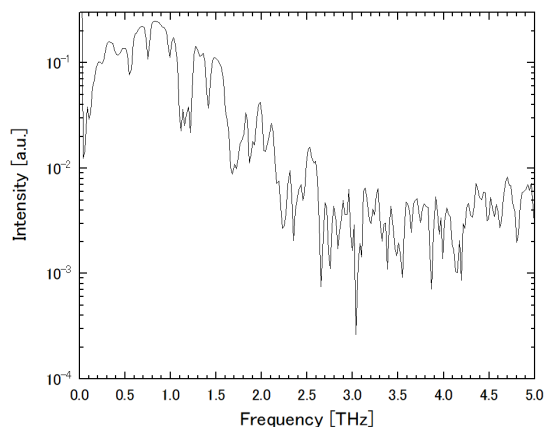


Figure 4: Spectrum of CER-THz measured using an interferometer.

FEL 発振を妨げることなく FEL 発振と同時に CER-THz スペクトル波形、パワー測定に成功した。このように FEL 発振と CER-THz を同時測定する事により、今後は FEL 発振時の電子ビームのパルス特性、FEL 調整運転が可能となった。ただし、現状の測定系では、大気水蒸気の吸収による影響があり、乾燥空気等の測定環境が必要であることもわかった。基礎測定終了後、他の利用実験等を考慮し、FEL ビームラインの重畳用チャンバーへ接続し、重畳輸送試験を行う予定である。

## 4. まとめと今後の課題

産総研との共同研究において、CER を用いた「バンチ長評価利用」、「FEL 制御」を目指し、CER-THz 光源輸送光学系を新たに設置した。ユーザー利用実験、FEL と THz 波の重畳輸送を考慮し、FEL ライン下流側偏向電磁石チャンバーを改良した。CER はラジアル偏光で中空状に放射されるため、中空ミラーを用いることにより FEL と THz 波の同時観測が可能であることから、輸送光学ミラーには全反射凹面用ミラーと、中空凹面ミラーを配置した。輸送路途中の取出口にて CER-THz 測定を行い、波長は 0.1~2.5 THz、パワーは全反射ミラー挿入時 0.5 mJ を達成した。また中空ミラー挿入時は約 70%を輸送可能であった。中空凹面ミラーを用いることで、FEL 発振を妨げることなく FEL 発振と同時に CER スペクトル波形の測定に成功し、CER-THz の同時測定により、FEL 発振時の電子ビームパルス特性、FEL 発振時のリファレンス光とすることなどが可能となった。今後は、FEL ビームラインへ接続し、FEL との重畳輸送試験を計画している。

## 謝辞

本研究開発の一部は JSPS 科研費 JP16H03912 及び、JP16K17539 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”, in Proceedings of FEL 2007, Novosibirsk, Russia, p114-117.
- [2] Y. Hayakawa *et al.*, “Dependence of PXR beam performance on the operation of the pulsed electron linac”, NIMB, Vol 266, Issue 17, 2008, p.3758-3769.
- [3] K. Nogami *et al.*, “Status of Electron Linac and Light Source at LEBRA in Nihon University”, in these proceedings.
- [4] Y. Hayakawa *et al.*, “Computed tomography utilizing LEBRA-PXR source at Nihon University”, in these proceedings.
- [5] N. Sei *et al.*, “Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, J. Phys. D, 46 (2013) 045104.
- [6] N. Sei *et al.*, “Characteristics of Transported Terahertz-wave Coherent Synchrotron Radiation at LEBRA”, in Proceedings of FEL2014, Basel, Switzerland, p541-544.
- [7] N. Sei *et al.*, “Millijoule terahertz coherent transition radiation at LEBRA”, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 032401 (2017).
- [8] <http://www.fuji-ideck.co.jp/>
- [9] <https://www.pyrosensor.de/Standard-924644.html>
- [10] Ophir Optronics 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>