

日大 LEBRA における加速器光源の開発とその現状

THE DEVELOPMENT AND THE CURRENT STATUS OF THE ACCELERATOR-BASED LIGHT SOURCES AT LEBRA, NIHON UNIVERSITY

早川恭史^{*,A)}, 早川建^{A)}, 長瀬敦^{B)}, 境武志^{A)}, 宍倉文夫^{A)}, 住友洋介^{B)}, 高橋由美子^{A)}, 田中俊成^{A)}
Yasushi Hayakawa^{*,A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Atsushi Nagase^{B)}, Takeshi Sakai^{A)}, Fumio Shishikura^{A)}, Yoske Sumitomo^{B)},
Yumiko Takahashi^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University

^{B)} College of Science and Technology, Nihon University

Abstract

The Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) at Nihon University is a light-source facility for user studies, which is based on a 125-MeV electron linac. The first light source is a near-infrared free electron laser (FEL) with a wavelength of 1.2 to 6.7 μm . As the second light source, a novel X-ray source based on parametric X-ray radiation (PXR) was developed and has provided a monochromatic X-ray beam from 5 to 40 keV for application studies, mainly X-ray imaging. The width of the electron bunch from the LEBRA linac is approximately 1 ps, which allows for intense coherent radiation in the THz region. To utilize the THz radiation as light sources, a transport devices for THz-wave have been added to the both of the FEL and the PXR beamlines. The LEBRA is a unique facility in the world, covering a very wide wavelength range from THz to X-ray region.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research and Application) は、125 MeV 電子リニアックを基盤とする加速器光源施設である [1]。2023 年現在、共振器型近赤外自由電子レーザー (FEL: free electron laser)、パラメトリック X 線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) を放射源とするエネルギー可変単色 X 線源、数種類のコヒーレント放射現象を利用した THz 領域の光源、という 3 種類の光源を運用している [2]。大学附置の加速器施設で加速器光源を運用している場合、赤外や THz 領域のような長波長域のものが主流であり、THz から X 線領域という広い範囲をカバーし、実際にユーザー利用研究に提供している例は、世界的にも希少である。

LEBRA リニアックは、日本大学放射光利用計画として紫外から赤外までの FEL を共同利用に供するために、当時の高エネルギー物理学研究所 (現高エネルギー加速器研究機構: KEK) から移設されたものである [3]。1998 年に 100 MeV 電子の加速に成功したものの、FEL に用いるアンジュレータ磁石列の放射線減磁が生じ、FEL の発振には至らなかった [4]。計画当初に導入されたアンジュレータは可視～紫外領域での実現を目指し、周期長 24 mm、周期数 100 のハルバック式であった。磁石列交換にあたって、目標とする FEL 発振波長域を近赤外領域とすることにし、1999 年度末に周期長 48 mm、周期数 50 の磁石列への交換が実施された [5]。またこの時期に私立大学に対する拠点形成事業の 1 つである、学術フロンティア推進事業に採択され、従来の加速器棟に隣接する形でユーザー実験棟を新設し、加速器光源の施設としても FEL をユーザー実験室に輸送するラインの整備や、PXR を原理とする新たな X 線源実現のためのビームラインの追加が行われた。

FEL は 2001 年 5 月に波長 1.5 μm でファーストレージングを達成した。その後、共振器ミラー損傷に苦慮したが、2003 年に金属ミラーで安定に飽和した状態での FEL 発振が可能となり、共同利用としてユーザー実験への FEL ビーム供給を開始した。近年では共振器ミラーの寿命を考慮し、波長 1.5 μm 以下での基本波発振を見合わせ、短波長領域は非線形結晶による高調波変換で対応している [6, 7]。

PXR による X 線源は、2004 年 4 月に X 線の発生を確認し、その応用を模索しつつ利用研究への供給を開始した。エネルギー可変で単色というのが特色ではあるが、比較的面積が広く平坦な照射野が得られることから、イメージングが主な応用となっている [8, 9]。単結晶の回折を利用して X 線の屈折や散乱を測定する回折強調イメージング (DEI: diffraction-enhanced imaging) のような先端的な測定手法も実現している [10]。

FEL と PXR に続く、第 3 の光源として THz 光源の開発と応用の開拓を進めている。LEBRA リニアックの電子バンチ長が 1 ps 程度であるため 0.1~4 THz の領域でコヒーレント放射による高強度の放射が期待できる。数サイクルしかない短パルス光源となるため、広帯域の光源となるが、高強度でイメージングや吸収スペクトル測定に適したものとなっている。2017 年に利用研究への提供を開始している [11]。

LEBRA リニアックおよび光源用ビームラインの構成を Fig. 1 に示す。光源用ビームラインは 45° 偏向電磁石 2 台で 90° 偏向する形となっており、最初に FEL 用ビームラインが設置された。学術フロンティア推進事業による PXR 線源の開発に伴い、FEL ビームラインと同様のものが PXR 線源専用として追加された。2 本のビームラインは偏向磁石電源を共用しており、切替式でどちらか一方のみ使用可能な仕様となっている。切替に際して偏向電磁石の消磁が必要となるため、日の途中でビームラインを切り替えるような運用はしていない。各光源からの光は遮蔽壁を通して人が常時立ち

* hayakawa.yasushi@nihon-u.ac.jp

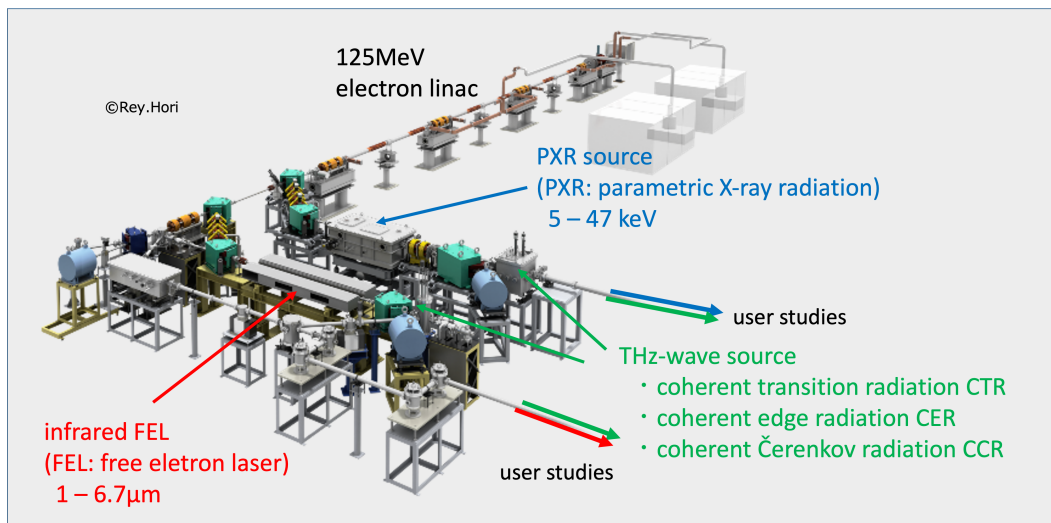


Figure 1: Layout of the LEBRA 125-MeV electron linac and two beamlines for FEL and PXR generation.

入ることができる実験室で取り出し、利用可能となっている。特に FEL 光については、真空ダクトを介して加速器棟の隣のユーザー実験棟まで輸送し、8 室ある FEL 実験室で取り出し可能となっている。末端の FEL 実験室まで 50 m 以上の距離があるため、楕円面ミラーと放物面ミラーを組み合わせて光ビームを平行化する光学系を設置して輸送している。光源となる FEL 共振器の上流側ミラーにある結合孔の位置が固定であるため、光源波長を変えてもアライメントが不要な輸送系となっている。

2. LEBRA リニアックの現状

LEBRA リニアックは 4 m の S バンド加速管 3 本で構成されており、加速可能な最大エネルギーは 125 MeV であるが、放射線施設としての許可申請において 100 MeV を上限としている。電子銃は 100 kV で引き出す典型的な熱陰極電子銃であったが、2010 年から高速グリッドパルサーシステムを導入することで、電子ビームを間引いた運転が可能となっている。FEL 共振器内を光パルスが往復する周波数がリニアックの加速周波数の 128 分周となるように設計されているため、電子ビームバンチもそれに合わせて 64 分周、128 分周できるようにしたものである [12]。電子バンチが間引かれることによりバンチ当たりの電荷量が増え、FEL の増幅が有利となることを狙って導入した。FEL の運用においては、バーストモードの利用が多くなっている。リニアックの主な仕様を Table 1 に示す。マクロパルス繰り返しは最大 12.5 pps 可能であるが、放射線施設の申請上、大規模加速器としての扱いを避けるため、FEL の場合は 2 pps、PXR の場合は 5 pps で運用している。

クライストロンは PV3030A 系統を 2 本使用し、1 号機は入射部のプリバンチャーとバンチャーおよび最初の加速管に、2 号機は第 2、第 3 加速管に用いられている。当初は第 1 加速管の直前に 30 cm 加速管が設置されていたが、100 MeV までの加速に不要であることから現在では撤去されている。このクライストロンの製品仕様上のパルス幅は 2.5 μ s であるが、FEL 発振実現

Table 1: Specifications of the LEBRA Electron Linac

Acceleration frequency	2856 MHz
Maximum energy	100 MeV
Klystron system	PV3030A series \times 2
Macropulse duration	$\leq 20 \mu$ s
Macropulse current	≤ 200 mA
Repetition rate	2 – 5 pps
Maximum beam power	0.8 kW
Normalized emittance	$< 20 \pi$ mm mrad

のためには幅 20 μ s での運転が必要であった。仕様を大幅に超える運転において、当然ではあるが、当初はクライストロン出力窓の損傷が相次ぎ、FEL 発振の目処が立たない状況が続いた。しかしながら、窓近傍で真空排気系を強化し、真空度を改善することで長パルス運転に耐えられることがわかった [13]。これが FEL ファーストレージング達成における重要なマイルストーンとなった。

LEBRA リニアックの特徴として、多数の RF ピックアップタイプの非破壊型ビームポジションモニター (BPM) を設置していることが挙げられる [14]。ストレートライン 7 台、FEL ライン 4 台、PXR ライン 3 台の計 14 台である。これはアンジュレータ磁石列が放射線減磁した経験から、ビームロスの原因となる蛍光板式のビームプロファイルモニターの運用を取りやめることにしたためである。電荷重心を検知するものであるため、電子ビームプロファイルの観測はできなくなったが、マクロパルス内の位置変動が観測可能という大きな利点を持つ。特に 45° 偏向部の位置変動を観測することにより、マクロパルス内のエネルギー変動の測定が可能である。アクロマー調整に非常に有用であり、FEL 運用時における偏向電磁石による磁気バンチングの調整や、PXR 運用における電子ビーム軌道の安定化に、大きく寄与している [15]。

3. 近赤外 FEL の運用と現状

FEL の共同利用開始以降、波長 1.2~5 μm の範囲でユーザー利用に供給していたが、近年、長波長領域の需要が高まっていることを受け、波長 6.7 μm まで供給可能な範囲を拡大した。ただし、光共振器から光を取り出す上流ミラー結合孔のサイズが固定であるため、長波長領域では取り出し効率が下がり、輸送ラインでの回折損失も増加する。また、電子エネルギーも 50 MeV 程度とする必要があるため、エミッタンスが悪く不安定になりやすい問題がある。

逆に短波長領域は、波長 1.5 μm 以下での発振で、共振器ミラー結合孔周辺の損傷が進む傾向が見られたため、この領域での基本波発振は行わないこととし、代わりに $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (BBO) などの非線形光学結晶を用いた 2 次あるいは 3 次高調波で対応することになった。FEL 飽和の達成以来、光共振器には銅基板・銀コートミラーを用いてきたが、短波長域での基本波発振はしないという方針に合わせ、最近では銅基板・金コートミラーを使用している。

FEL 増幅率と飽和する光パワーは、電子バンチのピーク電流と電荷量に強く依存する。また、LEBRA-FEL の光共振器内を光が往復する周期が 44.8 ns であるため、S バンド 2856 MHz のリニアックから供給される電子バンチが共振器内に 128 個あり、互いに相関のない独立した FEL ミクロパルスが 128 系統発生することになる。64 分周または 128 分周で電子バンチを間引くバーストモードを用いると 1 電子バンチ当たりの電荷量とピーク電流が 10 倍以上となり、FEL 発振条件の探索が容易となる。間引かない通常の状態をフルバンチモードと呼んでいるが、FEL マクロパルス全体の強度はフルバンチモードの方が強くなるが、ピーク強度の強いミクロパルスを得るのはバーストモードの方が有利である。

2011 年のバーストモード導入以降、FEL はバーストモードでの運用が増えたが、2017 年に再びアンジュレタ磁石列の減磁が発覚した。バーストモードとフルバンチモードを重ね合わせた重畳モードにおいて電荷量の異なるバンチが混在し、偏向部でのビームロスが多くなり放射線損傷の一因となったと推察している。しばらくは、電荷量が多く FEL 利得が大きいバーストモードによる運用で凌いだだが、2018 年に文科省光・量子飛躍フラグシッププログラム (Q-LEAP) 基礎基板研究「自由電子レーザーで駆動する高繰り返しアト秒光源のための基礎基板技術の研究」(代表: 羽島良一) に参画することになり、アンジュレタの修復を進めることとなった。元々の製造メーカーが事業撤退していたことから、NEMAX エンジニアリング(株)に磁石列交換を依頼し、磁石の費用は Q-LEAP 予算で賄い、ホルダーや交換作業の費用は大学の自己資金から捻出した。磁石列交換の際、磁気回路の見直しを行った結果、周期数が 1 つ減り 49 となっている [16]。現在の FEL のパラメータを Table 2 に示す。

アンジュレタ磁石列交換後、順調に FEL の発振と利用研究への供給ができています。フルバンチモードでは波長にもよるが 30 mJ/macropulse 程度の強度が安

Table 2: Specifications of the LEBRA-FEL System

Undulator configuration	Halbach-type planar
Magnet material	Dy-doped Nd-Fe-B
Period of undulator field	48 mm
Number of periods	49
K-value (rms)	0.7 - 1.4
Resonator length	6718.04 mm
Fundamental wavelength	1.2 - 6.7 μm

定して得られており、バーストモードでは 64 分周で 26 mJ/macropulse という、磁石列交換前を通して過去最大強度を記録している。

応用に関しては、波長選択性や短パルスでピーク強度が強いといった、FEL の特性を利用したものが主流となる。歯学系のユーザーによる人の歯の切削への応用などが代表的なものであるが、照射した物体表面に周期的なパターンが形成される LIPSS (laser-induced periodic surface structure) の研究も精力的に行われている。FEL は特にフルバンチモードでミクロパルスが高繰り返しとなることから、近年、レーザー加工分野で注目されている GHz バーストに相当する効果が現れている可能性が十分ある。

波長選択性を利用した応用として、カーボンナノチューブのカイラリティ制御が早くから試みられてきたが、最近の応用として中赤外域の照射によるセルロースの分解で成果が得られている [17]。

4. PXR 線源の開発と特徴的な応用

PXR は相対論的な電子が周期構造を持つ結晶媒質を通過する際に単色な X 線を放射する現象であり、外見的には X 線 Bragg 回折の入射光子を電子に置き換えたようなものであり、結晶の面間隔と電子が入射する角度 (Bragg 角) で発生する X 線のエネルギーが決まる [18]。電子エネルギーに X 線の波長が依存しないというのが、この種の放射現象としては珍しく、100 MeV の電子リニアックによるエネルギー可変単色 X 線源の実現を考える上で、有力な候補となった。

PXR は他の相対論的な電子による放射現象と同様、 $1/\gamma$ (γ : 電子のローレンツ因子) に起因する広がりを持つ円錐ビームであり、プロファイル内にエネルギー分散を持つ。この X 線エネルギーの変化が線形で、局所的な単色性は極めて高く eV オーダーの分解能であることから、空間チャープと表現し得る特性である。円錐広がりや角度変化と空間チャープのエネルギー変化が Bragg 回折条件で補償し合う関係となり、円錐ビームでありながら、放射源と同じ結晶面を用いて平面波的に回折可能となる。この性質を利用し、LEBRA では 2 結晶型の PXR 発生装置を開発し、X 線のエネルギーを変えても固定ポートから X 線ビームを取り出し可能とした。厳密には 2 結晶が完全に対称な配置では回折されず、僅かな角度デチューンが必要なことを世界で初めて見出し、PXR 線源実用化に成功した [19,20]。2023 年現在においても、専用ビームラインを持つ常設的な PXR 線源は世界唯一である。

PXR エネルギーは放射源として使用する結晶の種類で決まるが、LEBRA-PXR 線源の運用開始から暫くは Si(111) 結晶を用いていた。Si 結晶を採用したのは純度が高く完全性の高い単結晶が入手可能であったことが大きな理由である。比較的原子番号が小さく、ターゲットによる電子ビームの発散や中性子の発生が重元素の Ge などと比べて抑えられることも要因であった。理論的には低次の結晶面を用いたほうが発生光子数が多くなることも、Si(111) を採用した理由の 1 つである。PXR ビームは遮蔽壁を介して実験室に輸送され、線源から 7.3 m の X 線窓から取り出されるが、円錐広がりのため、その地点で直径 100 mm の平坦な照射野を持つ X 線ビームとなっている。この特性のため、イメージングに適したものとなっており、応用もイメージングの手法を用いたものが主流である。そのため、徐々に透過率の高い高エネルギー X 線の要望が高まり、2009 年から Si(220) 面、2022 年から Si(400) 面を利用可能にし、発生エネルギーの範囲を広げていった [21]。Table 3 に LEBRA-PXR で発生可能な X 線エネルギー範囲等を示す。

Table 3: Specifications of the LEBRA-PXR Source

Electron energy	100 MeV
Bragg angle	30 – 5.5°
X-ray energy range:	
Si(111) target	4.0 – 20 keV
Si(220) target	6.5 – 33.5 keV
Si(400) target	9.1 – 47.4 keV
X-ray photon yield	~ 10 ⁷ /s @ 17.5 keV

PXR の応用として、単色性を利用したイメージングがまず挙げられる。LEBRA リニアックは BPM を利用したアクロマト調整により、90° 偏向後の電子ビーム軌道がかなり安定で、PXR の線源点となるターゲット結晶上の電子ビームスポットの位置変動が非常に小さい。リニアックベースの X 線源としては安定性に優れており、X 線量に制約があるものの長時間の撮像である程度カバーすることができる。300 枚以上の投影像を取得し、3 次元断層像 (CT) を得ることに成功している。

LEBRA-PXR 線源からの X 線ビームは水平方向に沿って空間チャープがあるため、それを利用した分散型 XAFS(X-ray absorption fine structure) 分析なども試みられたが、同様に空間チャープ特性を利用した先端的な応用として、回折強調イメージング (DEI: diffraction-enhanced imaging) の実現に成功している。単結晶による回折を用いて試料物質から X 線が受けた屈折や散乱を検知して画像化する手法であり、高い空間コヒーレンスが要求されることから、専らシンクロトロン放射 (SR) 光源施設の中尺、長尺ビームラインで行われている。円錐広がりを持つ PXR ビームを用いて DEI を実現したのは世界で唯一であり、LEBRA-PXR の代表的な応用となっている。また、DEI の手法とエネルギー選択性を組み合わせた、K 殻吸収端を利用した 3 次元元素イメージングにも成功している [22, 23]。

5. THz 光源開発とその応用

LEBRA リニアックは、フルバンチモードで FEL が発振するような条件では、電子バンチ長は半値幅で 1 ps 程度となっている。この電子バンチが何らかの相互作用で電磁放射する際、0.1~4 THz の領域でコヒーレント放射現象による強い放射が得られることが期待できる。これに着目し、2012 年から産業技術総合研究所との共同研究で THz 光源の開発に着手し、THz 光を取り出すためのビームラインの改造を行った。最初は FEL ビームラインの偏向部で発生する、コヒーレントシンクロトロン放射 (CSR: coherent synchrotron radiation) の取り出しと観測を行い、続いて PXR ビームラインに金属薄膜を挿入可能にし、そこで発生するコヒーレント遷移放射 (CTR: coherent transition radiation) を輸送するための光学系を追加した。PXR ビームラインの CTR は実験室まで輸送したところでマクロパルス 1 mJ 程度得られる。また、偏向電磁石磁場の境界を通過する時に発生するコヒーレントエッジ放射 (CER: coherent edge radiation) の取り出しと観測に成功している。CER も CTR とオーダーとしては同程度の強度が得られている。

THz 光を用いた利用研究も 2017 年から開始され、強い強度が得られる PXR ビームラインにおいて、THz 光の透過特性を利用したイメージングや、波のサイクル数が少なく、可干渉性がありながら広帯域なスペクトルを持つ性質を利用し、薬剤などの吸収スペクトル測定を干渉計を用いて実施している。大気中の水蒸気による吸収が測定妨げになることから、ユーザーと協力し、乾燥空気中で実験可能な測定系を整備している [24]。

最近の取り組みとして、FEL ビームラインの改良により、FEL 発振の状態が発生する CER を FEL 輸送系に重畳して運べるようにした。コヒーレント放射を FEL 発振状態のモニターとして利用するのが目的ではあるが、FEL と THz 光の同時利用も視野に入れている。PXR ビームラインにおいては、新たな THz 放射源として誘電体ターゲットを挿入可能とし、コヒーレントチェレンコフ放射 (CCR: coherent Čerenkov radiation) による光源の開発を進めている。PXR ビームラインの THz 輸送系は元々 PXR ビームと重畳して輸送することを想定して設計されているため、将来的には X 線と THz 光の同時利用にも検討したい。

6. 現状の問題点と今後の展望

他の多くの小規模施設と同様、人員不足が深刻化しており、施設運営に影響が生じている。特に私立大学は教員数が学生数に密にリンクしており、少子化の進行とともに入学定員の厳格化が求められる状況においては、教員の新規採用が抑制され、定年に伴う自然減が図られる事態となっている。技術継承という側面では、技術職員が継続的に配置されればよいが、やはり私大では技術職員の必要性が理解されにくいという問題があり、状況は深刻である。大学附置の加速器施設の存在意義が理解され、社会インフラの維持の一環として何らかの対応を訴える必要性を感じる。

設備面の問題点としては、クライストロン電源の老朽化が懸念となっている。コンデンサーやダイオード

などは代替品への交換で対応しているが、制御系の故障等に不安がある。クライストロンまわりが先進的なものに更新されれば、安定な加速器の運用が期待でき、100 MeV 級の電子リニアックの有用性を示すことは十分に可能と考える。3種類の光源施設という面でも世界的にユニークであり、企業ユーザーを含め、学外利用者が増える余地もある。クライストロンおよびその電源は、経常的な予算や通常の規模の競争的資金で更新することは難しいため、近年は少なくなったが、拠点形成事業のような資金獲得を模索したい。

謝辞

電子線利用研究施設の設立に際し、日本大学自身の資金拠出がなければ不可能な事業であったことは言うまでもない。またいくつかの公的資金のサポートも受けてきたが、中でも文科省学術フロンティア推進事業「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」(2000-2007年度)によるところが大きい。また、最近のFELの健全化は、文科省Q-LEAP(JPMXS0118070271)による支援を受けてなされている。

また、故・佐藤勇先生を始めとする、歴代の施設スタッフ、大学院生、共同利用者の不断の努力がなければ一私立大学において加速器光源施設の共同利用は実現しなかったであろう。改めて敬意を表したい。

参考文献

- [1] 日本大学電子線利用研究施設,
<http://www.lebra.nihon-u.ac.jp/>
- [2] 境武志, 放射光 34 (2021) 153;
<http://www.jssrr.jp/journal/pdf/34/p153.pdf>
- [3] K. Hayakawa *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. A 375 (1996) ABS25, doi:10.1016/0168-9002(95)01318-0
- [4] I. SATO *et al.*, “Present Status of LEBRA at Nihon University”, Proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, October 27-29, 1999, Wako, Japan, pp. 37; https://www.pasj.jp/web_publish/sast1999/8AH4.pdf
- [5] K. Hayakawa *et al.*, “日大 F E L 赤外アンジュレーターの製作”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (July 12-14, 2000, Himeji, Japan), pp. 56; https://www.pasj.jp/web_publish/lam25/PDF/12D-04.pdf
- [6] K. Hayakawa *et al.*, “非線形光学結晶を用いた F E L 高調波の発生 II”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 6-8, 2008, Higashihiroshima, Japan), pp. 803; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/TP/TP064.pdf
- [7] K. Hayakawa *et al.*, “LEBRA FEL における非線形光学結晶による可視光レーザーの発生”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 4-6, 2010, Himeji, Japan), pp. 784; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/P_5PM/P_EH_5PM/THPS008.pdf
- [8] 早川恭史, 加速器 6 (2009) 166; <https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F6%2Fp166.pdf>
- [9] Y. Hayakawa *et al.*, J. of Instrumentation 8 (2013) C08001, doi:10.1088/1748-0221/8/08/C08001
- [10] Y. Takahashi *et al.*, X-Ray Spectrom. 41 (2012) 210, doi:10.1002/xrs.2403
- [11] N. Sei *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 56 (2017) 032401, doi:10.7567/JJAP.56.032401
- [12] T. Tanaka *et al.*, “BURST PULSE SUPERIMPOSED ELECTRON BEAM ACCELERATION IN LEBRA FEL LINAC”, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, pp. 3218; <https://epaper.kek.jp/IPAC2011/papers/thpc142.pdf>
- [13] T. Sakai *et al.*, “S バンドクライストロンの長パルス動作の改善”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (July 12-14, 2000, Himeji, Japan), pp. 228; https://www.pasj.jp/web_publish/lam25/PDF/12P-34.pdf
- [14] K. Ishiwata *et al.*, “ビーム位置計測システムの開発 II”, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 20-22, 2005, Tosu Japan, pp.483; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2_lam30/Proceedings/20P093.pdf
- [15] K. Hayakawa *et al.*, “LEBRA Linac の運転制御における BPM の活用”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 2-4, 2006, Sendai Japan), pp. 747; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj3_lam31/Proceedings/F/FP02.pdf
- [16] 早川恭史, 境武志, 放射光 36 (2023) 140; <http://www.jssrr.jp/journal/pdf/36/p140.pdf>
- [17] T. Kawasaki *et al.*, Energy & Fuels 34 (2020) 9064, doi:10.1021/acs.energyfuels.0c01069
- [18] H. Nitta, Phys. Lett. A 158 (1991) 270, doi:10.1016/0375-9601(91)91013-4
- [19] Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, Nucl. Instrum. and Meth. B 227 (2005) 32, doi:10.1016/j.nimb.2004.06.028
- [20] Y. Hayakawa *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. B 252 (2006) 102, doi:10.1016/j.nimb.2006.07.010
- [21] Y. Hayakawa *et al.*, “日大 LEBRA-PXR 線源による 40keV 単色 X 線の生成とその特性”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 583; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEPO/WEPO26.pdf
- [22] Y. Hayakawa *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 22 (2019) 024701, doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.22.024701
- [23] 早川恭史, 高橋由美子, 放射光 33 (2020) 87; <http://www.jssrr.jp/journal/pdf/33/p087.pdf>
- [24] T. Sakai *et al.*, “日本大学 LEBRA 電子線形加速器を用いた高強度テラヘルツ光源の研究開発”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 313; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUP0/TUP013.pdf