

産総研 S バンド小型リニアック施設の現状

PRESENT STATUS OF S-BAND COMPACT LINAC FACILITY AT AIST

黒田隆之助^{1#}, 平義隆¹, 立花充章², 安本正人¹,

田中正人¹, 池浦宏美¹, 三浦永祐¹, 豊川弘之¹, 山田家和勝¹

Ryunosuke Kuroda^{1#}, Yoshitaka Taira¹, Mitsuaki Tachibana², Masato Yasumoto¹

Masahito Tanaka¹, Hiromi Ikeura¹, Eisuke Miura¹, Hiroyuki Toyokawa¹, Kawakatsu Yamada¹,

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

²Waseda University 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

Abstract

A laser Compton scattering (LCS) X-ray, a coherent THz radiation and a short-pulse bremsstrahlung gamma-ray sources have been developed on the basis of an S-band compact linac at AIST. All of system is built in one research room about 10 meters square. The electron beam can be accelerated up to about 42 MeV using the rf source of a 20 MW klystron. The LCS X-ray source using a TW Ti:Sa laser can generate a hard X-ray pulse which has variable energy of 10 keV - 40 keV with narrow bandwidth by changing electron energy and collision angle for medical and biological applications. The coherent THz radiation source using ultra-short electron beam has been also developed instead of a conventional laser based THz source for various imaging and spectroscopy applications. The THz pulse has peak power of more than 1 kW in frequency range between 0.1-2 THz. The short-pulse bremsstrahlung gamma-ray source using a short-pulse electron beam with a W-target can generate a short-pulse gamma-ray with less than 1 ps pulse width. The gamma-ray has been applied to the photon-induced positron annihilation lifetime spectroscopy (Pi-PALS) for the defect analysis of metal materials. In this conference, we will report present status of AIST S-band compact linac and its applications.

1. はじめに

独立行政法人産業技術総合研究所(産総研:AIST)では、S バンド小型リニアック施設において、超短パルス電子ビームを用いた 3 種類の光源、レーザーコンプトン散乱 X 線源^[1]、コヒーレントテラヘルツ光源^[2]、及び超短パルス γ 線源^[3]の開発と利用研究を行っている。本施設は、電子源、加速管、電磁石、マイクロ波源、光源レーザー装置等全てのコンポーネントを、約 10 m×10 m の 1 つの中規模実験室に集約している。20 MW の S バンド (2856 MHz) クライストロン 1 台を用いて 3 つの加速セクション (RF 電子銃、2 本の加速管) に高周波 (RF) を分配供給している。電子ビームの生成では、まず Cs-Te レーザーフォトカソード RF 電子銃^[4-5]と UV レーザーによって、1 nC、約 4 MeV の電子ビームを生成し、1.5 m の $\pi/2$ モード定在波加速管 (APS 型) 2 本で最大 42 MeV まで加速することができる。加速した電子ビームは、レーザーコンプトン散乱 X 線源の場合、アクロマティックアーク部 (2 個の偏向電磁石と 4 個の四極電磁石) によって 90 度偏向され、Q トリプレットによりレーザーとの衝突点に集光照射することで X 線を発生させている。また、コヒーレントテラヘルツ光源では、加速した電子ビームをアクロマティックアーク部において、磁気パルス圧縮により 1 ps 以下に圧

縮し、下流の 90 度偏向磁石によりコヒーレント・シンクロトロン放射 (CSR) として取り出す場合と、金属ターゲットからのコヒーレント遷移放射光 (CTR) をビーム軸から垂直方向に取り出す場合があり、テラヘルツ利用研究を行っている。超短パルス γ 線源では、バンチ長 1 ps 以下の電子ビームとタングステンターゲットとの制動放射により生成している。以上のような装置開発及び利用研究においては、これまで多くの大学、研究機関、民間企業等と連携し合い、発展的な展開を行っている。

2. コヒーレントテラヘルツ光源

産総研 S バンド小型リニアック施設では、電子ビームの超短パルス化を行うことにより、コヒーレント放射による高出力テラヘルツ光源の開発と利用研究を行っている^[2]。エネルギー約 40 MeV、電荷量 1 nC 以上の電子ビームを、アクロマティックアーク (2 個の偏向電磁石と 4 個の四極電磁石) の圧縮モードで、1 ps (ピコ秒) 以下のバンチ長(rms)を持つ超短パルス電子ビームを生成している。圧縮したバンチ長 1 ps 以下の超短パルス電子ビームを 90 度偏向磁石によって偏向させ、電子ビームの接線方向に高出力のテラヘルツ(THz)領域のコヒーレント・シンクロトロン放射光 (CSR) パルスを生成している^[6-7]。また、超短パルス電子ビームを金属ターゲットに集光照射することでテラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射光

[#]ryu-kuroda@aist.go.jp

(CTR) も生成可能である。最近では、誘電体チューブを用いたコヒーレントチェレンコフ放射光 (CCR) の生成も行っている^[2]。これらの高出力コヒーレント・テラヘルツパルスは、低損失の単結晶水晶窓 (z-cut) によって大気中に取り出している。利用研究としては、テラヘルツ CSR はイメージング応用、テラヘルツ CTR は、テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) への適用を行っている^[8-9]。テラヘルツイメージングでは、テラヘルツ検波器と併用した走査型イメージングで、これまで、生体組織の透過イメージング、植物の水分布の経時変化など、従来光源では透過測定が難しい材料を比較的短時間でイメージングすることに成功している (Figure 1)。また、テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS) では、EO サンプリング法によりテラヘルツパルスの時間波形を計測し、フーリエ変換によりスペクトルが得られるが、サンプルの有無によってその差分を取ることで、サンプルの THz 領域の吸収スペクトルが測定できる。これまでに、実環境においてサブテラヘルツ領域までのスペクトル測定に成功している^[2]。

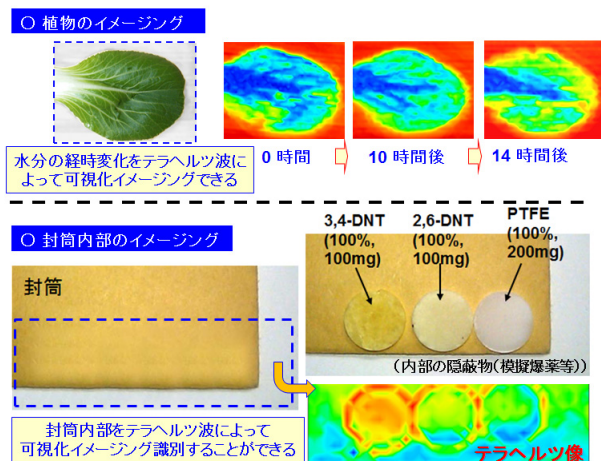


Figure 1: Examples of THz imaging.

また、S バンド小型リニアック施設においては、コヒーレント THz 遷移放射光 (THz-CTR) とマイケルソン干渉計及び検波器を用いた FT-THz 分光法の開発を行っている。これまでに、0.1THz 帯の検波器と BPF を用いた実験においては、BPF による想定された周波数ピークが得られ、マイケルソン干渉計の原理実証に成功している。また、乱反射・多重反射防止の遮蔽体を設置することでカットオフ周波数以下のバックグラウンドを低減させることにより S/N 比の向上にも成功している。現在は、広帯域検波器を用いた実験を勧めており、光学遅延の精度向上と THz 強度の安定化を行うことで、広帯域での FT-THz 分光法の確率を目指して行く。

上記のようなテラヘルツ分光・イメージングの利用研究としては、郵便物等に隠蔽された爆発物や麻薬などの不正禁止薬物を、実環境で検出するテラヘルツ検査装置の開発である。これまでに、財務省関

税中央分析所からの受託で“高出力テラヘルツ光源を用いた不正薬物・爆発物探知に係る調査研究”を実施しており、封筒内サンプルに対し、サブテラヘルツでのイメージングや、分光スペクトル測定に成功している。しかし、実用化のためには、広帯域化と精度の向上、及び装置の小型化が必須となるが、加速器ベースのテラヘルツ波のポテンシャルは、その強度の強さから、産業ニーズは高いと言える。

3. レーザーコンプトン散乱 X 線源

レーザーコンプトン散乱 X 線は、エネルギー可変性、単色性(数%のエネルギー幅)、短パルス性、微小光源性など優れた性質を持っており、装置規模も大規模放射光施設と比べ、電子のエネルギーが 1/100 以下ですむため、小型光源として期待されている (Figure 2)。本施設においては、電子ビームと衝突させるレーザーは、79.33 MHz の Ti:Sa モードロック発振器 (800 nm) をチャープパルス増幅 (CPA) し、約 140 mJ/pulse で 100 fs (FWHM) のテラワットレーザーを用いている。電子パルスとレーザーパルスは、高精度の時間・空間同期システムにより衝突させ、エネルギー約 10~40 keV において任意の単色性の高い X 線パルスを生成することができる。正面衝突に近い系では、X 線の収量として 10^7 photons/s 以上の光子数を実現している。

利用研究としては、レーザーコンプトン散乱 X 線源の特徴である微小光源性 (約 40 μ m 程度) からインライン位相 (屈折コントラスト) による生体イメージング、高い単色性を用いた吸収端イメージングといったライフサイエンス応用への展開を行っている。イメージングの空間分解能は検出器に依存しており、これまで X 線 CCD、イメージングプレート (IP)、X 線 II+HARP カメラなどを用いた高分解能のイメージングに成功している。しかし、フラットパネルディテクタ (FPD) などの高分解能でリアルタイムな検出器には光量が不足しており、今後の課題となっている。そのため、現在は従来のシングルパルスによるレーザーコンプトン散乱ではなく、マルチバンチ電子ビームと再生増幅器型レーザー共振器を用いたマルチ衝突レーザーコンプトン散乱 X 線源の開発を行っている^[10-11]。

3.1 インライン位相コントラストイメージング

産総研では、茨城県立医療大との共同研究において、インライン位相コントラスト法 (屈折コントラスト法) を用いた骨組織の高精細イメージングの研究を行っている。これまでにラットの腰椎を用いたマイクロフォーカス X 線管との比較^[12]や、基節骨折^[13]、卵巣摘出マウスの後肢^[14]などのイメージングに成功しており、将来の骨疾患の早期診断の実現を目指している。

3.2 造影剤を用いた血管造影

レーザーコンプトン散乱 X 線では、その準単色性を利用し、造影剤吸収端（例えばヨウ素造影材の K 殻吸収端）にピンポイントに合わせた血管造影が実現できる。産総研では、国立循環器病研究センターや東海大との共同で、例えば家兎の耳の血管造影をリアルタイムで撮影することに成功している^[14]。500 μm 程度の血管造影を 1 フレーム/秒のリアルタイム動画撮影の場合、ピコ秒 X 線（パルス幅約 3 ps(rms)）は、10 パルス/秒で照射されるため、照射時間は 30 ps 程度となる。X 線収量増強後は、更に高精細な低侵襲リアルタイムイメージングの実現が期待される。

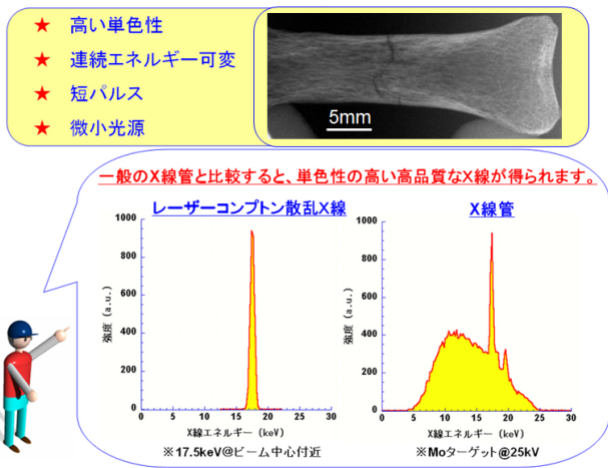


Figure 2: Characteristics and imaging example of LCS-X-ray.

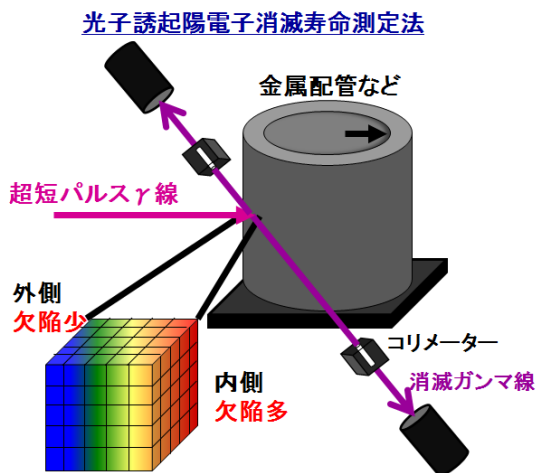


Figure 3: Schematic drawing for the defect analysis of the piping material using Pi-PALS.

4. 超短パルス制動 γ 線源

超短パルス γ 線源では、バンチ長 1 ps 以下、エネルギー数十 MeV の電子ビームを、タングステンターゲット

ットに収束照射し、制動放射により超短パルスの γ 線領域の制動放射光を生成している。この超短パルス γ 線を用いることで、MeV-X 線イメージング研究や、その超短パルス性を利用した光子誘起陽電子消滅法(Pi-PALS)への応用を行っている^[3]。光子誘起陽電子消滅法では、材料（バルク金属など）の欠陥測定を行っており、金属配管等の非破壊劣化診断の実現を目指している(Figure 3)。

5. まとめと今後の展望

以上のように、産総研Sバンド小型リニアック施設では、コヒーレントテラヘルツ光源、レーザーコンプトン散乱 X 線源、及び超短パルス γ 線源の開発と利用研究を、多くの大学、研究機関、民間企業等と行ってきた。レーザーコンプトン散乱 X 線源では、インライン位相コントラスト法や吸収端イメージング法などを用いたライフサイエンス応用展開を開始しており、今後は、マルチ衝突レーザーコンプトン散乱による光源のアップグレード開発を達成することで、リアルタイム且つ高分解能の生体イメージングの実現等が期待される。将来、レーザーコンプトン散乱 X 線源が、一般の病院等での高度医療診断などの飛躍的な発展に繋がる事が期待されている。

また、コヒーレントテラヘルツ光源では、特徴に応じて CSR と CTR を使い分けた利用研究を行っている。これまでにテラヘルツ CSR を用いた走査型イメージングによる様々なサンプルの透過イメージングに成功している。テラヘルツ CTR では、サブテラヘルツ領域ではあるが、EO サンプリング法による時間領域分光に成功している。加速器ベースの高出力テラヘルツは、これまで測定が困難であった吸収の多い生体材料や、封筒内部の実環境分析など、ライフサイエンス分野や安全安心技術の分野などにおいて、広範囲での展開が期待される。超短パルス γ 線源では、これまでに光子誘起陽電子消滅分光により金属サンプルの寿命測定に成功しており、金属配管等の実環境材料に対する非破壊劣化診断の実現が期待されている。

参考文献

- [1] 黒田隆之助 他, 加速器, 5 巻 2 号, 137, 2008
- [2] M. Kumai et al., Proc. of IPAC 2012, 37, 2012
- [3] Y. Taira et al., Rad. Phys. Chem. 2013, in press
- [4] N. Terunuma et al., Nucl. Instr. Meth. A, 613, 1, 2009
- [5] R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A 593, 91, 2008
- [6] R. Kuroda et al., Infra. Phys. Tech. 51, 390, 2008
- [7] N. Sei et al., J. Appl. Phys. 104, 114908, 2008
- [8] R. Kuroda et al., Rad. Phys. Chem. 77, 1131, 2011
- [9] M. Kumai et al., Proc. of PAC 2011, 2190, 2011
- [10] R. Kuroda et al., Proceedings of EPAC'08, 1878, 2008
- [11] R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A 608, S28, 2009
- [12] H. Ikeura-Sekiguchi et al., APL 92, 131107, 2008
- [13] R. Kuroda et al., Nucl. Instr. Meth. A 637, S183, 2011
- [14] K. Yamada et al., Nucl. Instr. Meth. A 608, S7, 2009