

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

平 義隆, 黒田 隆之助, 安本 正人, 田中 真人, 池浦 広美, 清 紀弘,
小川 博嗣, 三浦 永祐, 豊川 弘之#, 山田 家和勝

Yoshitaka Taira, Ryunosuke Kuroda, Masato Yasumoto, Masahito Tanaka, Hiromi Ikeura, Norihiro Sei,
Hiroshi Ogawa, Eisuke Miura, Hiroyuki Toyokawa#, and Kawakatsu Yamada
National Institute of advanced Industrial Science and technology (AIST)

Abstract

The S-band Compact Linac is an electron linear accelerator in National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). It consists of a photocathode rf-gun, two APS acceleration tubes, and achromatic arc section. The electron beam can be accelerated up to 42 MeV. Outline and the recent progress of the research studies on generation and application of coherent terahertz radiation, laser Compton scattering, and photon-induced positron annihilation spectroscopy are described.

1. はじめに

独立行政法人産業技術総合研究所（産総研; AIST）には、フォトカソード RF 電子銃を備えた S バンド小型リニアック施設（Figure 1）がある。我々は当該加速器を用いて超短パルス電子ビームを生成し、コヒーレントテラヘルツ光源の開発^[1]、レーザーコンプトン散乱 X 線源の開発^[2]、及び光子誘起陽電子消滅分光法の開発^[3]等を、大学、独法等研究機関、民間企業等と共同で行っている。本施設は加速器、クライストロン、レーザー装置等を 10 m×10 m の実験室に全て納めている。

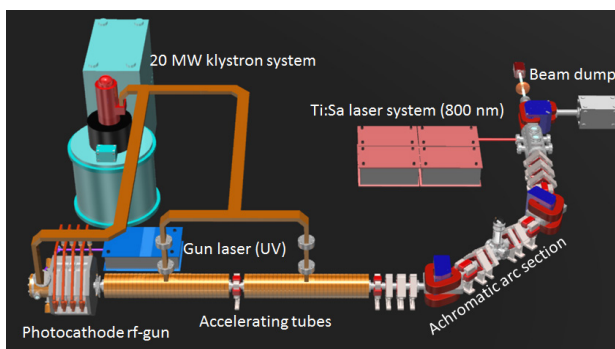


Figure 1: S-band compact electron linac of AIST.

フォトカソード RF 電子銃では、カソードに紫外波長域のレーザーを照射することで、レーザーの時空間構造を反映した光電子を発生する。当所の電子銃では電荷量 1~5 nC、最大エネルギー 4 MeV の電子パルスが発生する^[4, 5]。その電子パルスを APS 型 $\pi/2$ モード定在波加速管によって最大 42 MeV まで加速する。加速した電子ビームは、2 台の偏向電磁石と 4 台の四極電磁石から構成されるアโครマティックアーク部で 90 度偏向させつつ色収差等の補正を行い、バックグラウンド放射線を低減しビーム位置を安定させた後に、各種実験に供する。

h.toyokawa@aist.go.jp

当施設の特長は、高密度・超短パルス電子ビームが利用できることである。コヒーレントテラヘルツ光源では、アーク部で磁気パルス圧縮を行い、パルス幅を 1 ps 以下に圧縮する。パルス圧縮された電子ビームは、曲率半径 500 mm の 90 度偏向磁石によって偏向し、テラヘルツ領域のコヒーレントシンクロトロン放射（CSR）を発生させる。あるいは薄い金属板に照射してコヒーレント遷移放射光（CTR）を発生させる^[6, 7]。

光子誘起陽電子法では、ピコ秒オーダーの電子パルスをタングステンや鉛などの金属板へ照射して、高エネルギーの制動 X 射線が発生し、更にこれを超短パルス陽電子に変換して、陽電子消滅法を用いた材料分析手法に関する研究を行っている。材料中に生成した空孔型格子欠陥や不純物析出などを、本手法によって、遠隔・非破壊で検出することが可能である。材料の健全性を極初期の段階で診断する手法として活用できるのではないかと考えている。

2. コヒーレントテラヘルツ光源

エネルギー約 40 MeV、電荷量 1 nC の電子ビームを 1 ps 以下のバンチ長(rms)に圧縮し、CSR や CTR などでテラヘルツ光を発生する。発生したテラヘルツ光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各種実験を行う。CSR はイメージング応用、CTR は時間領域分光 (THz-TDS) へ応用している^[8]。

最近行った研究では、300 fs の超短電子パルスをアルミニウム薄膜ターゲットへ通過させて CTR を発生し、テラヘルツカメラや、検波器の走査スキャンによって、テラヘルツ光の電場強度分布を画像として撮影した^[9]。実験装置のセットアップを Figure 2 に示す。

CTR はラジアル（動径）偏光であり、偏光子を回転させながらテラヘルツカメラでビームプロファイルを連続的に撮影することで、偏光特性を動画で確認することができた。また、CTR をレンズで集光し、焦点前後で、検波器を用いてビームプロファイルを

測定した。検波器の応答感度には偏光依存性があり、これを利用して偏光ベクトルが動径方向(radial)～軸方向(longitudinal)へと変化する様子を画像で測定したところ、理論から予想される特性と一致することが確認された。

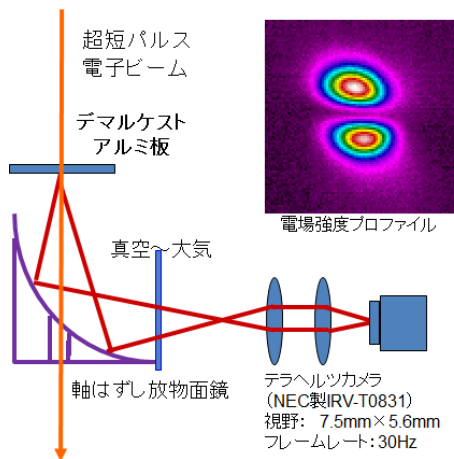


Figure 2: Experimental setup for THz profile imaging.

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、エネルギー可変で単色性の良い短パルス X 線源であり、光源サイズも数十 μm と小さいことが特長である。産総研の装置では、X 線エネルギーは 10~40 keV、収量は 10^7 photons/s である。これまでに医用イメージングに関する実験的な研究を行い、インライン位相コントラスト法や動画撮影などを行った^[10-12]。

同 X 線を用いて、人体等価材料（ポリウレタン・エポキシ樹脂）で作製された人体頭部ファントムを用いた血管造影実験を行った結果を Figure 3 に示す。ファントム内部に模擬血管が配置され、内部には造影剤として硫酸バリウムが封入されている。X 線エネルギーをバリウムの K 殻吸収端 (37.4keV) に合わせ、37.4~39.1 keV の X 線を照射して透過像を測定した^[13]。現在、X 線の収量増加を目指して、マルチ衝突レーザーコンプトン散乱の実験を行っている。

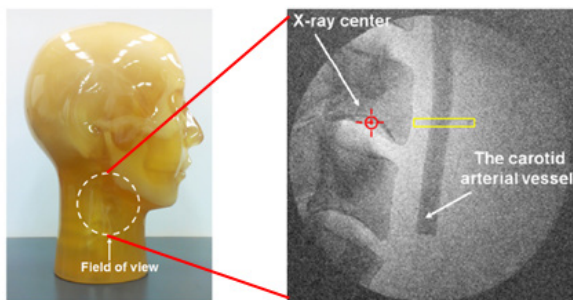


Figure 3: Human head phantom and the transmission-ray radiograph around carotid artery^[13].

4. 光子誘起陽電子法

バンチ長 3 ps、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に収束照射し、高エネルギーの制動 X 線ビームを発生させることができる。発生した高エネルギー制動 X 線を、コリメータによって細いビームに絞り、これを試料へ照射する。X 線光子は、試料を構成する原子や原子核の電磁場を介して、電子 - 陽電子対生成反応を起こし、高い確率で陽電子に変換される。その結果、高密度の陽電子が試料内部に生成される。この陽電子を物性測定に用いることで、外部から陽電子を打ち込む方法では到達不可能な、深い位置における、あるいは材料全体における陽電子消滅分光法を行うことが可能となる。この手法を我々は光子誘起陽電子法と呼んでいる。バルク材料や、金属構造物等の内部で発生した空孔型格子欠陥の濃度分布を、非破壊で可視化する手法への応用を目指して研究を行っている。

Yb をドープした Lu_2O_3 セラミックシンチレータを用いた陽電子寿命測定システムを開発して、陽電子寿命の基準材料であるイットリア安定化ジルコニア (Yttria-stabilized zirconia; YSZ) を用いた陽電子消滅寿命測定を行ったところ、理論値と一致する値が得られた^[3]。YSZ の陽電子消滅寿命曲線を Figure 4 (a) に示す。現在、素子のアレイ化と、それを用いた陽電子寿命-断層イメージング法の研究を進めているところである。本手法の概念図を同図(b)に示す。

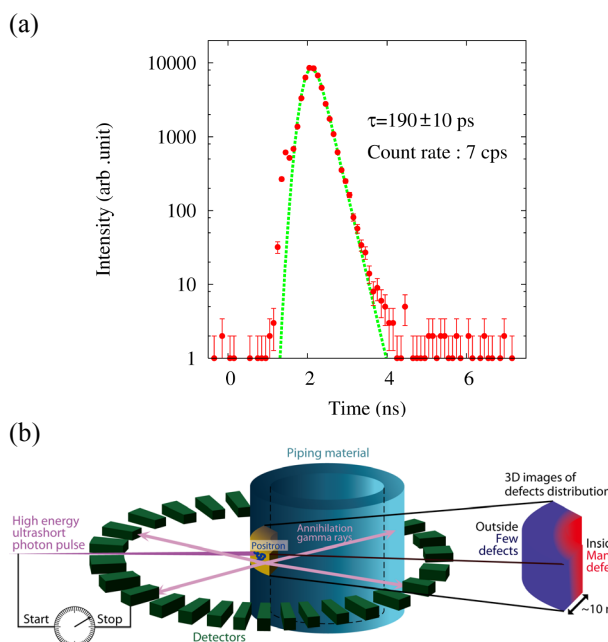


Figure 4: (a) positron lifetime of YSZ measured with a Yb: Lu_2O_3 ceramic scintillation detector, and (b) system drawing of the lifetime-sensitive positron emission tomography (LTS-PET)^[3].

5. まとめ

当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、及び超短パルス制動

X線源の開発と利用研究を、大学、研究機関、民間企業等と共同で実施している。

コヒーレントテラヘルツ光源の利用研究では、透過イメージング、時間領域分光、画像を利用した偏光特性の研究などを行っている。今後は偏光を利用して、物性を高感度で計測する手法や、それらのイメージングを行う研究へ展開する予定である。

レーザーコンプトン散乱 X線は医用イメージングへの応用を目指している。

光子誘起陽電子法では陽電子寿命測定システムを構築し、さらにビームスキャン等によって空孔型格子欠陥濃度の空間分布を測定する手法の確立に取り組んでいる。バルク材料や、金属構造物等の内部で発生した空孔型格子欠陥の濃度分布を、非破壊で可視化する手法への応用を目指して研究を行っている。本研究を発展させ、配管の応力腐食割れや内・外面腐食の兆候、過酷環境下にある材料の余寿命予測の高精度化に貢献したいと考えている。

参考文献

- [1] R. Kuroda et al., *Infra. Phys. Tech.* 51, 390, 2008.
- [2] 黒田隆之助 他, *加速器*, 5 巻 2 号, 137, 2008.
- [3] Y. Taira et al., *J. Inst.* 9, C05036, 2014.
- [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] N. Sei et al., *J. Appl. Phys.* 104, 114908, 2008.
- [7] R. Kuroda et al., *Rad. Phys. Chem.* 77, 1131, 2011.
- [8] M. Kumai et al., *Proc. of PAC 2011*, 2190, 2011.
- [9] Y. Taira et al., *Vibrational Spectroscopy*, in press.
- [10] H. Ikeura-Sekiguchi et al., *APL* 92, 131107, 2008.
- [11] R. Kuroda et al., *Nucl. Instr. Meth. A* 637, S183, 2011.
- [12] K. Yamada et al., *Nucl. Instr. Meth. A* 608, S7, 2009.
- [13] R. Kuroda et al., *Nucl. Instr. Meth. B* 331, 257, 2014.