

東大ライナック・レーザー施設報告 2015

STATUS REPORT OF LINAC/LASER FACILITY OF UNIVERSITY OF TOKYO IN 2015

上坂充^{*A)}、山下真一^{A)}、神野智史^{A)}、上田徹^{A)}、土橋克広^{A)}、橋本英子^{A)}、關義親^{A)}、
小山和義^{A)}、田儀和浩^{B)}、大槻祥平^{B)}、四宮権一^{B)}、岡元勇人^{B)}、
草野 讓一^{C)}、田辺英二^{C)}、吉田光宏^{D)}、夏井拓也^{D)}

Mitsuru Uesaka^{*A)}, Shinichi Yamashita^{A)}, Satoshi Jinno^{A)}, Toru Ueda^{A)}, Katsuhiko Dobashi^{A)}, Eiko Hashimoto^{A)},
Yoshichika Seki^{A)}, Kazuyoshi Koyama^{A)}, Kazuhiro Tagi^{B)}, Shohei Otsuki^{B)}, Kenichi Shinomiya^{B)}, Hayato Okamoto^{B)},
Joichi Kusano^{C)}, Eiji Tanabe^{C)}, Yoshida Mitsuhiro^{D)}, Takuya Natsui^{D)}

^{A)}University of Tokyo, Nuclear Professional School

^{B)}University of Tokyo, Department of Nuclear Engineering and Management

^{C)}Accuthera Inc.

^{D)}High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The linac/laser facility of Nuclear Professional School, University of Tokyo is equipped with several accelerators; S-band linacs, heavy irradiation system, and X-band linacs. New fiber laser oscillator and regenerative amplifier are installed for the laser driver of the photocathode RF gun of a 18 MeV S-band linac. TEM system is installed at a beamline of 1.7MeV tandetron (RAPID) for in-situ measurement of irradiation field. Portable X-band (9.3GHz) 950 keV linac and 3.95 linacs have been developed for transmission nondestructive test of thermal-shielded-pipe used at petrochemical complex and PC (Prestressed Concrete) for bridges. These systems have been successfully performed on-site. Project of neutron source based on electron linac is started with X-band 30 MeV linac. Furthermore, a new fiber laser driver for nano-mm-size and attoseconds beam source for advanced radiation biology under design and development.

1. はじめに

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻ライナック・レーザー施設は、Sバンドツインライナック、重照射装置、およびXバンドライナック群を備えている。これらは専攻スタッフの開発・維持管理のもと、一部は全国共同利用にも供されている。平成27年度の共同利用テーマを表1に示す。現有装置の活用に加えて、Xバンド電子ライナック中性子源や放射線生物学用誘電体加速ナノサイズビーム源など新規計画も進めている。以下、それぞれの装置を用いた研究・開発状況を個別に述べる。

2. Sバンドツインライナック

Sバンド18 MeVライナックはレーザー駆動の短パルス電子銃を持ち、放射線化学反応をピコ秒スケールで超高速測定することができる。平成25年から据え付け調整を行ってきたErファイバーレーザーが本格的に稼働し、着々と成果が出始めている。特に18 MeVという高エネルギーである利点を生かし、分厚い金属製高温高压容器を用いて原子炉内に近い状態の水や熔融塩を対象とした超高速測定を実施してきている。これらの成果は国際会議で招待講演として発表されている。

Sバンド35 MeVライナックは共同利用研究に供されている。平成26年の保守期間には、春先に故障したマイクロ波前段アンプと劣化が進んだ冷却水配管の樹脂製接合部品の交換を行った。平成27年6月末にはRF導波管と加速管の間にあるセラミックス製隔壁から僅かなリークが生じ、1か月間共同利用を停止した。当該の隔壁はもちろんのこと、大気解放されたため熱電子銃も

交換し、現在真空引きやエイジング等のメンテナンスを進めている。



Figure 1: Er fiber laser for S-band photocathode RF-gun.

3. 重照射棟 (HIT)

重照射棟 (High Fluence Irradiation Facility: HIT) は重イオンビームを加速するタンデトロンとファンデグラーフ加速器が設置されている。

1.7 MV タンデトロン (RAPID) には、東北大と共同で TEM による照射その場観察システムを導入した。RBS 用ビームラインの延長工事を行い、隣接する電子線構造測定室にある透過型電子顕微鏡へ接続した。現在、試運転を行っており、今年度中に本格稼働する予定である。

3.75 MV ヴァンデグラーフ加速器については、東日

* uesaka@nuclear.jp

Table 1: Themes of Joint Use Experiments with S-band Linac

テーマ番号	テーマ名	研究テーマ代表者	専攻内幹事
27L-01	水溶液の放射線効果の研究	工藤 久明 (東大)	山下 真一
27L-02	パルス&プローブ法を用いる超高速反応の研究	上坂 充 (東大)	山下 真一
27L-03	不定比金属組成を制御した高温超伝導体のピンニング特性に及ぼす電子線照射効果	寺井 隆幸 (東大)	鈴木 晶大
27L-04	高温・超臨界溶媒の放射線化学	室谷 裕佐 (阪大)	山下 真一
27L-05	フォトカソード RF 電子銃の高性能化	上坂 充 (東大)	上坂 充
27L-06	高速応答シンチレータの開発と性能評価	浅井 圭介 (東北大)	山下 真一
27L-07	パルスラジオリシス法による銅タンパク質の電子移動反応の研究	高妻 孝充 (茨城大)	山下 真一
27L-08	原子炉鉄鋼材料のマイクロ組織発達モデル化に資する照射欠陥挙動分析手法の開発	村上 健太 (東大)	村上 健太
27S-01	フェムト秒ライナックのためのマシンスタディ	上坂 充 (東大)	上坂 充
27H-01	BepiColombo 水星探査機搭載用宇宙塵測定器の較正実験	柴田 裕実 (京大)	神野 智史
27H-02	プロトン照射における帯電物性に関する基礎研究	三宅弘晃 (東京都市大)	村上 健太
27H-03	超高速微粒子衝突現象に関する研究	柴田 裕実 (京大)	神野 智史
27H-04	放射線誘起蛍光体における LET 効果の解析	越水 正典 (東北大)	村上 健太
27H-05	ジルコニウム合金の強度に対する照射の影響	三原 武 (JAEA)	神野 智史
27H-06	原子炉構造材料の照射劣化機構の研究	藤井 克彦 (INSS)	村上 健太
27H-07	圧力容器鋼および炉内構造物モデル合金の熱時効・照射におけるナノ組織変化に関する研究	関村 直人 (東大)	村上 健太
27H-08	組合せ照射概念に基づく照射欠陥発達挙動の研究	関村 直人 (東大)	村上 健太
27H-09	Zr 合金のイオン照射試験および微細組織評価	村上 健太 (東大)	村上 健太
27H-10	タングステンにおける欠陥による水素捕捉挙動に関する研究	小田卓司 (ソウル大)	村上 健太
27H-11	先進原子炉構造材の照射効果	阿部 弘亨 (東北大)	村上 健太
27H-12	軽水炉圧力容器鋼の経年照射脆化メカニズムの解明	山本 琢也 (福井大)	村上 健太
27H-13	陽電子ビームを用いた照射下欠陥挙動のその場観察	土田 秀次 (京都大)	神野 智史
27H-14	低放射化フェライト鋼の照射下相安定性に関する研究	濱口 大 (JAEA)	村上 健太
27H-15	固体飛跡検出器の校正実験	福田 祐仁 (JAEA)	神野 智史
27H-16	Study on Physical Characteristic Changes of Neutron Damaged Tungsten for Fusion Plasma Facing Material	KIM, Gon-Ho (ソウル大)	村上 健太

本大震災による直接的な損傷に対して修理を完了したが、RF イオン源の過電流など新たな不具合が複数見つかってきている。納入メーカーがすでに加速器事業から撤退しているという困難もあるが、これらの部品の交換をひとつずつ進めている。



Figure 2: In-situ observation system with TEM at 1.7 MeV tandetron (RAPID).

4. Xバンドライナック群

ブランケット棟小型ライナック室には4台のXバンドライナック(950 keV、3.95 MeV、6 MeV、30 MeV)が設置されている。

4.1 6 MeV ライナック

NEDO プロジェクトにより設置された 9.3 GHz (1.5 MW) のマグネトロンを使用した 6MeV ライナックである。癌治療用の加速管や RF サーキュレータなど加速器構成要素の試験、X線検出器の開発に利用している。

4.2 可搬型 950 keV 小型 X 線源

日本学術振興機構 (JST) による平成 22 年度の拠点整備事業により、Xバンドライナックベースの可搬型 X 線源が整備された^[1]。これらは社会インフラ等の非破壊検査への応用を目指しているものである^[2]。

そのうち一台は、9.3 GHz (250kW) のマグネトロンを使用した 950 keV の X 線源である (図 3)。筐体は、X線ヘッド、RF ユニット、コントロールラックの3台で構成されており、総重量は 400kg 以下である。RF ユニットと X 線ヘッドはフレキシブル導波管で接続されており、配置に自由度を持たせてある。



Figure 3: 950 keV X-ray source based on X-band Linac.

950 keV 小型 X 線源は放射線障害防止法に定められる 1 MeV 以上の放射線発生装置では無いため、同法の制約を受けずに運用可能である。

平成 26 年 12 月、三菱レイヨン大竹事業所（広島県大竹市）および三菱化学水島事業所（岡山県水島市）において、化学プラント蒸留塔内部構造の透過撮像試験を行った。狭隘なプラント現場に適応するため、装置のさらなる小型化・軽量化・遠隔操作化を進めた。また、X 線照射方向を 3 次元空間内で微調整するために X 線ヘッド用 4 軸駆動ステージを開発した。フラットパネル検出器を用いて、いままで困難であったプラント実配管内部を流れる液体の動画撮影や気液二相イメージングに成功した。

実験室内においては、X 線非破壊検査技術の高性能化・高機能化を進めた。

回転運動をする対象物に同期して X 線を照射し、擬似的な静止画像を取得するシステムの開発を行った。回転体のモデル機を製作し、この機構の回転周波数と X 線源の RF 周波数を同期して撮像した画像が図 4 である。回転数 2400 rpm で高速回転する円板の穴が鮮明にとらえられている。



Figure 4: X-ray transmission image of rotating plate measured by synchronous irradiation technique.

このほか、コンクリート橋切り出しサンプルを試験体として、部分角度 CT や複数の連続断層像から 3 次元形状を再構成する Tomosynthesis 解析、後方散乱 X 線を利用したイメージング手法の開発にも着手している。

4.3 可搬型 3.95 MeV 小型 X 線源

もう一台は 9.3 GHz (920 kW) のマグネトロンを使用した 3.95 MeV の X 線源である。平成 17 年の放射線障害防止法改定時に、橋梁検査に限って 4 MeV 未満の放射線装置の管理区域外使用が認められた。本機は最大 2 Gy/min(焦点位置から 1 m) の X 線を発生でき、500 mm 厚のコンクリート橋梁内部の可視化を短時間で実現する。

平成 27 年 1 月、土木研究所（茨城県つくば市）構内において、橋梁撤去部材を試験体として X 線透過像撮影試験を行った。これは日本初の管理区域外での可搬型 X 線源の使用であった。試験体周りに X 線源システム・検出器・架台を 3 時間以内で設置し（図 5）、肉厚 400 mm を超えるプレストレストコンクリート橋梁部材を数秒程度で撮像することに成功した。図 6 に橋梁フランジ部（厚さ 400 mm）の X 線透過像（撮影時間 1 s）を示す。



Figure 5: On-site non-destructive measurement of bridge structure with 3.95 MeV X-band Linac.



Figure 6: X-ray transmission image of bridge flange.

今後は、複数の実橋梁での撮像試験を開始し、現場観察の実績を積み上げていく計画である。

4.4 11.424 GHz 30 MeV ライナック

本機は、11.424GHz(50MW) のクライストロンを用いた電子線源であり、平成 13 年度から 5 年間行われた、文部科学省「先進小型加速器の要素技術の普及事業」の成果物である。平成 24 年度よりこの 30 MeV の電子ビームを利用した中性子源計画が始まっている。

東京大学東海キャンパスでは、平成 23 年 3 月に弥生炉の運転が停止され、現在廃炉措置が行われている。炉

心内部は核燃料使用施設であることから、炉心内部に加速器を設置することによってプルトニウムやウラン・アメリカウムなどのデータの測定を行うことが可能になる。特に、福島第一原発の炉心に残っている溶融燃料の分析を行うことは、廃炉措置、ひいては福島の復興に向けて非常に重要な課題である。

核データの精度向上のためには、100 ns 程度の短パルスで中性子を大量発生させ、高分解能・高統計 TOF 測定を行う必要がある。そのため、中性子発生ターゲットとモデレータの候補となるいくつかの物質について、モンテカルロシミュレーションを用いて設計を検討した。その結果、タングステンターゲットとポリエチレンモデレータの組合せに最大エネルギー 35 MeV の電子線をビームパワー 300 W で入射させた場合、 8.0×10^{11} n/s の中性子強度が得られることがわかった [3]。

5. レーザー駆動誘電体加速器

レーザー駆動誘電体加速器 (Dielectric Laser Accelerator; DLA) は、数 mm での電子の加速を実現し、今後大きなブレイクスルーとなる可能性を秘めている。特に、放射線生物研究への応用を目指して DLA の設計を進めている。たとえば、図 7 に示すように、従来とは比較にならない超小型の加速器から出るマイクロ径の電子ビームを用いて 1 個 1 個の細胞を狙い撃ちすることができれば、いまだよくわかっていない低線量放射線の生物影響の解明につながるものと期待される。

DLA では、レーザーパルスによって透過型回折格子近傍に生成される定在波に似た電界の電子進行方向成分を加速に利用する。加速電界強度を決定する大きな要因は入射レーザー強度と格子の回折効率である。

従来、入射レーザー強度は誘電体の光学破壊限界強度まで高めることができると考えられていたが、短パルス領域では非線形効果による波面の歪みの影響が大きいことが新たにわかった。この非線形効果を考慮して、レーザー光強度・パルス幅・誘電体中の光路長に対する条件をシミュレーションにより求めた [4]。

一方、回折効率はレーザー波長と格子定数の組合せによって決まり、この条件はある速度の電子が受ける加速勾配にも影響する。電界の基本波成分のみを考えた場合、幅広い電子速度にわたって十分な回折効率と加速勾配を両立させることはできない。しかし、高調波成分まで考慮し、これを非相対論的速度の電子加速に利用すれば問題を回避できることを示した。

また、駆動用レーザーに対する負担を軽減させるため、電子の動きに同期してレーザーを時間・空間的に局在化して照射する方法を考察した。DLA で 1 MeV の電子を得るためには、エネルギーが 1 mJ でパルス幅が 5 ps のレーザーパルス 10 対に分けて照射すれば可能であることを示した。分割多パルス照射は光学配置が難しいので、短パルスレーザーを斜め入射する方式を考案し、シミュレーションによる解析を進めている。

今年度は、DLA に加えて誘電体壁にパルス高電圧を発生させてイオンを加熱する (Dielectric Wall Accelerator; DWA) の研究も開始した。いくつかの誘電体ウェハ上に回路の試作を行い、誘電体の物性と高電圧パルス回路の特性を調べている。

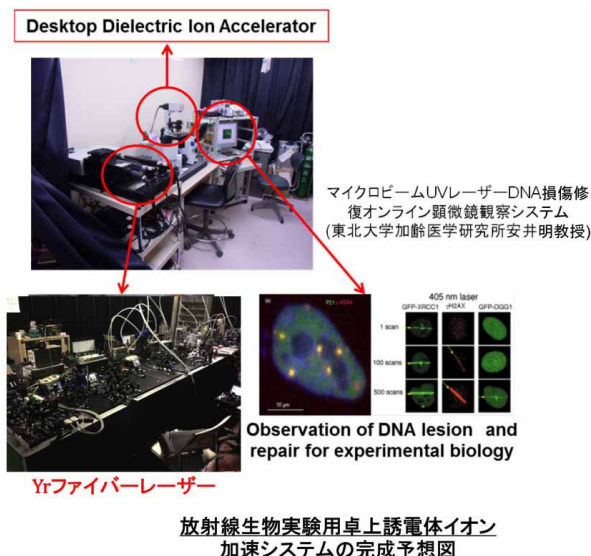


Figure 7: Conception picture of desktop dielectric ion accelerator system for radiobiological experiment.

6. 謝辞

本研究へ日頃からの協力いただいている、高エネルギー加速器研究機構吉田光宏氏、夏井拓也氏、日本原子力研究開発機構 羽島良一氏、西森信行氏、松葉俊哉氏に、に厚く感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Uesaka, "Commissioning of portable 950 keV /3.95 MeV X-band linac X-ray source for on-site transmission testing" Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.26, 2012.
- [2] M. Uesaka, et. al, "Achievements of on-site inspection of social and industrial infrastructures by 950 keV/3.95 MeV X-band linac X-ray source", 本プロシーディングス, FROL02, 2015.
- [3] K. Tagi, et. al, "Development on Incident Part of X-band Linac Neutron Source", 本プロシーディングス, THP003, 2015.
- [4] K. Koyama, et. al, "Parameter study of a laser-driven dielectric accelerator for radiobiology research", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 47, 234005, 2015.