

PRESENT STATUS OF SHORT-PULSE HARD X-RAY SOURCE WITH
COMPACT ELECTRON LINAC VIA LASER-COMPTON SCATTERINGH. Toyokawa^A, R. Kuroda^A, M. Yasumoto^A, N. Sei^A, H. Ogawa^A, M. Tanaka^A, H. Ikeura-Sekiguchi^A,
M. Koike^A, K. Yamada^A, F. Sakai^B, T. Nakajyo^B, T. Yanagida^B^A) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-1-1 Umezono, Tsukuba, IBARAKI 305-8568, Japan

^B) Sumitomo Heavy Industries Ltd.

2-1-1 Yatocho, Nishitokyo, Tokyo 188-8585, Japan

Abstract

An intense, quasi-monochromatic hard X-ray beam has been generated via the laser-Compton scattering of a picosecond electron bunch with an intense femtosecond laser pulse. A s-band linear accelerator of 40 MeV and Ti:Sa femtosecond TW laser were used to generate X-rays. We briefly describe the specifications of the electron accelerator and the laser systems, together with some minor modifications we have made during re-installation of the systems to National Institute of Advanced Industrial Science and Technology from Sumitomo Heavy Industries Ltd., on May to November 2005.

産総研における S バンド小型電子リニアックを用いた
レーザーコンプトン散乱硬 X 線装置開発の現状

1. はじめに

平成 7 年より、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託を受けた、技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構(FESTA)と、独立行政法人産業技術総合研究所(産総研:AIST)との共同研究により、「フェムト秒テクノロジー」プロジェクト(第 1 期:平成 7~12 年度、第 2 期:平成 13~16 年度)が実施され、大きな成果を上げた^[1]。同プロジェクトにおいて、分散研のひとつである住友重機械工業を中心として、フェムト秒 X 線源が開発された。

住友重機械工業と産総研は、2005 年より 40 MeV 電子直線加速器とフェムト秒レーザーを用いたレーザーコンプトン散乱硬 X 線源の開発と利用研究を共同で行っている。本装置は現在、産総研つくば中央第二事業所で稼動中である。2006 年度より、X 線収量を増大させるための要素技術開発を本格的に展開するとともに、X 線利用研究を進めている。

同 X 線源は高品質電子ビーム源である S バンドリニアック、低ジッターのフェムト秒 1TW-Ti:Sa レーザ、および高精度時間同期回路などから構成される。電子加速器はオーソドックスなデザインながら、各パーツを十分に吟味することで、現状の技術水準で達成しうる最高レベルの性能である。フェムト秒 Ti:Sa レーザは、再生増幅器、初段マルチパス増幅器、主マルチパス増幅器の 3 段でチャープパルス増

幅するシステムであり、ノイズ低減と高精度同期システムを備えた、極めて高水準なシステムである。レーザーと加速器システムは各所にフィードバック機構を備え、最終的に電子バンチとフェムト秒レーザーは数 ps のジッターで同期する。

産総研では、この装置をタンパク質結晶構造解析やマンモグラフィなどの医療、産業応用、および短パルス性やエネルギー可変性を利用したポンププローブやエネルギー差分計測法などの新たな計測技術開発を行うため、3 年後に現状 10^7 photons/s の収量を約 3 桁増大させることを目標として研究開発を行

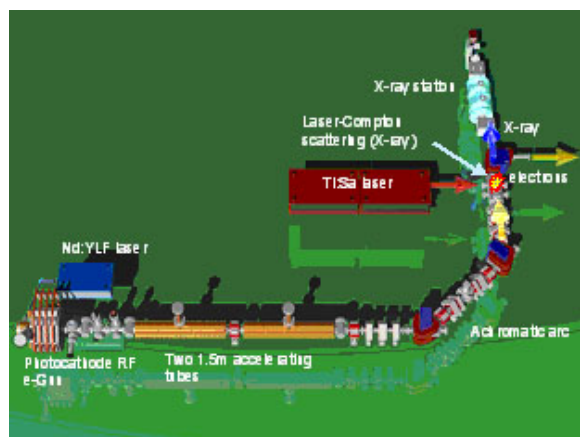


図 1 S バンド小型リニアックレーザーコンプトン散乱硬 X 線発生装置

っている。図 1 にレーザーコンプトン散乱硬 X 線発生装置の概略を、表 1 に主な仕様を示す。

表 1 : レーザーコンプトン散乱硬 X 線装置の主な仕様

Electron:	Energy	~38 MeV
	Charge per bunch	~0.8 nC
	Energy spread	0.2%
	Bunch length	3 ps (rms)
	Beam size	43 μ m x 30 μ m (rms)
Ti-Sa laser:	Rep rate	10 Hz
	Wavelength	800 nm
	Pulse length	100 fs (FWHM)
	Pulse energy	140 mJ
	Spot size	28 μ m (rms)
UV laser:	Wavelength	262 nm
	Pulse length	3 ps
	Pulse energy	150 μ J
X-ray:	Energy	~34.3 keV
	Yield @ 165 deg	10 ⁶ photons/pulse
	Yield @ 90 deg	10 ⁵ photons/pulse
	Stability	~6% (15 min)

2. 装置の移設

本装置の移設に関する具体的な経緯を以下にまとめる。

- 1月('05) FESTA が産総研への移管を正式に申請
- 5月('05) 半導体光陰極システム開発開始。
- 8月('05) NEDO 資産移管の経産省大臣承認
- 10月('05) リニアック移設、放射線施設変更申請
- 11月('05) クライストロン移設
- 12月('05) インターロック設置、LCW 循環装置設置、空調工事開始
- 2月('06) 電子ビーム発生 (21日) @40MeV, 1 nC, 10Hz。施設検査 (24日、合格 27日)
- 3月('06) X線発生 (17日) @40MeV, 1 nC, 10Hz, MCP と電離箱で 3x10⁵ photons/sec 程度の X線を確保

基本的な性能を落とすことなく、電源部のスペースを縮小することで、クライストロンの小型化を行った。その結果、従来別の部屋にそれぞれ設置されていたレーザーシステムと加速器を同じ部屋に配置した。その結果、冷却水と一部の制御系を除く全システムを 10 m 四方のスペースに納めた。RF やラインノイズ等がどの程度 X 線安定度に影響を与えるか懸念されたが、今のところ特に大きな影響はない。

装置の配置を図 2 に示す。電子エネルギーの最大値は 40 MeV であるため、ビームダンプの際には光核反応中性子が発生し、これが放射線遮蔽上もとても影響が大きい。そのため十分に大きな体積と有効長を有するステンレス製の水槽をビームダンプとして用いた。これにより、簡易遮蔽パネルを設置するだけで十分な遮蔽効果が得られた。配置の関係上、ビームダンプ電磁石を右に 90 度回し、以前とは逆方向にダンプした。

移設に伴い、最大 80 kW までの Low conductivity water (LCW) 循環装置を設置した。温度調節範囲、流量をそれぞれ 25 ± 0.5 °C、300L/min とした。6.5kW と 7.5kW の小型チラーをそれぞれ二台ずつ、計 4 台を熱付加に応じて起動させる。加速管と RF 電子銃を除く全てのコンポーネントに LCW を供給する。加速管と RF 電子銃には、それぞれ個別で専用チラーによって高精度温調を行っており、± 0.1 °C で制御している。それぞれ 2856MHz で共振するように LCW 温度は 39.00 °C、および 35.50 °C に調整している。

3. 電子加速器コミッショニング

2006 年 2 月 17 日に移設後初めて電子加速を行った。その後、実験室増床工事等を経て、数週間のシャットダウン期間があったが、それ以外は大きなトラブルもなく順調にコミッショニングが進んでいる。現在、電子加速器のビームのコミッショニングは 20~42 MeV まで完了し、Ti:Sa レーザーとレーザーコンプトン散乱を行う真空槽において 40 μ m 程度のビーム径に収束し、順調に X 線を発生している。

主として achromatic arc の 4 極磁石と偏向電磁石の磁場の組み合わせを最適化して、レーザーコンプトン衝突部でビームの空間ジッターを低減させること、輸送系の 4 極磁石の磁場中心を通しつつ、beam Hallo ができるだけ back ground ノイズに混入しないような optics、および低エネルギー分散ビームに調整し、衝突部において電子ビーム径を最小にするような調整を行っている。

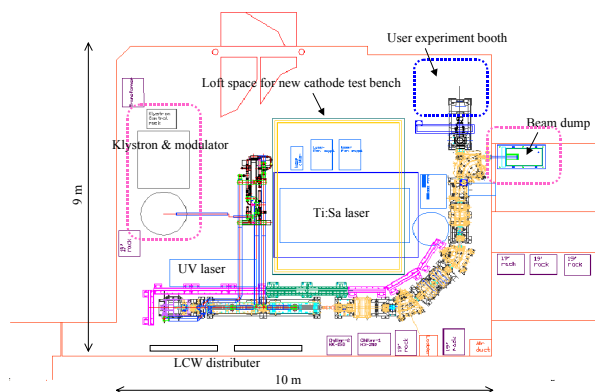


図 2 装置レイアウト平面図。

4. X線収量増加

我々はこの装置のコンパクトさに注目し、これを実験室レベルで導入できる、硬 X 線イメージング装置として製品化しようと考えている。具体的には、3年後をめどに X 線収量を 3 桁向上させることを到達目標としている。そのためのアプローチとして、

(1) マルチバンチレーザーコンプトン散乱、
(2) 半導体カソードの使用、(3) 強収束磁石によるビーム径の縮小、(4) マクロパルス繰り返し数の増加、などを考えている。幾つかはすでに技術開発が進み、幾つかは数値シミュレーションを行うなどして検討を進めている。詳細については関連する詳細報告などを参考にされたい。

高電荷密度バンチに関するシミュレーションの結果を図 3 に示す^[2]。半導体カソードを用いて最大 5 nC のバンチ電荷を与えた時にエミッタンスを最小にするソレノイド磁場を与えている。この結果をもとに、今後ビームラインの再設計を行う予定である。

5. 応用研究

本装置のもう一つの特徴は光源点が数 $10 \mu\text{m}$ のスポットになるということである。このことは屈折コントラスト X 線イメージングにおいてメリットとなる^[3]。装置のコンパクトさも考え合わせると、屈折コントラストイメージング装置として魅力的である。

21 keV の硬 X 線で撮影した鳥の骨の透過撮影像を図 4 に示す。画像は X 線 CCD(Roper Scientific 社製 PI-SCX:1300-2.5-PW)によって撮影した。骨は薄いビニールの袋に封入して撮影したが、その袋のひだが写っていることが確認できる。図の丸いウィンドウは X 線取り出し口に設けられている Be 窓(直径 30 mm、厚さ $500 \mu\text{m}$)である。光源からサンプルまで、およびサンプルから X 線 CCD までの距離はそれぞれ 2.1 m、0.9 m であった。屈折コントラストによるエッジ強調が見られるかどうかは、通常の吸収コントラスト法による比較を行う必要があるが、視野が変わってしまうなど、撮影条件が異なるため、正確なところは確認できていない。現在、様々なサンプルを用いて、屈折コントラスト法によるイメージング実験を行っている^[4]。

この他に、電子バンチをフェムト秒オーダーに圧縮し、偏向電磁石からのコヒーレント THz 光を観測する実験が準備されており、近々検証実験が行われる予定である^[5]。

6. まとめ

S バンド小型リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱硬 X 線発生装置の現状について述べた。

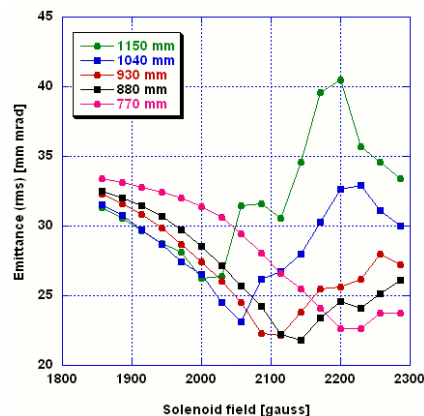


図 3 バンチ電荷 5nC、ビーム径 1.2 mm、バンチ長 8 ps、rf 位相 35 度におけるエミッタンス。

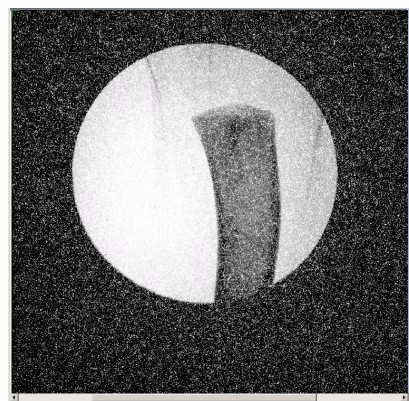


図 4 鳥の骨の X 線透過像。

本装置は 2005 年に移設作業を完了し、2006 年 7 月現在、順調に X 線発生および応用実験が進められている。平行して、X 線収量増加に向けた技術開発が行われており、2006 年度中にマルチバンチ電子加速実験を行う予定である。

参考文献

- [1] NEDO 電子・情報技術開発部平成 16 年度終了プロジェクト事後評価報告資料,
<http://www.nedo.go.jp/denshi/kanmi>
- [2] Kuroda et al., Proceedings of ICFA, accepted for publication.
- [3] K. Mori et al., Jpn. J. Appl. Phys., 41(2002)5490.
- [4] M. Yasumoto et al., Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, to be published.
- [5] N. Sei et al., Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, to be published.