

Present Status of Compact Hard X-ray Source via Laser-Compton Scattering with S-band linac

Ryunosuke Kuroda^{1,A)}, Hiroyuki Toyokawa^{A)}, Masato Yasumoto^{A)}, Hiromi Ikeura^{A)}, Hiroshi Ogawa^{A)},
Norihiro Sei^{A)}, Masahito Tanaka^{A)}, Masaki Koike^{A)}, Kawakatsu Yamada^{A)},
Fumio Sakai^{B)}, Terunobu Nakajyo^{B)}, Tatsuya 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 (SHI)

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

Abstract

A quasi-monochromatic X-ray pulse has been generated via the laser-Compton scattering (LCS) with an electron bunch and a laser pulse. The LCS hard X-ray source based on a compact S-band 40 MeV linac and a Ti:Sa TW laser system has been developed at AIST and it has been applied to the industrial and biological uses. We plan to increase the x-ray intensity up to two-orders than the current one. We described the present status and of our LCS X-ray source, its applications and its upgrade plans.

産総研における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線発生装置の開発と利用の現状

1. はじめに

現在、独立行政法人産業技術総合研究所（産総研：AIST）では、住友重機械工業（株）と共同で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線装置の開発と利用を行っている。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。

この装置の前身は、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、産総研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）における大きな成果の一つであり^[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（株）を中心として開発されたものである。そして、プロジェクト終了後、装置の実用化を達成するため、産総研へ移管し、装置のアップグレード開発と利用研究の促進を行っている^[2-3]。

レーザーコンプトン散乱硬X線発生装置は、平成17年10月から移設を開始し、平成18年2月27日付で施設検査に合格、同年3月に移設後初のレーザーコンプトン散乱硬X線生成に成功している。本装置は、リニアックはもちろん電磁石、マイクロ波源、レーザー装置等全てのコンポーネントを約8m×約8mの面積に納められ、1つの中規模実験室に設置することが可能である。本装置では、図1のように、Sバンド(2856MHz)レーザーフォトカソードRF電子銃とNd:YLF-UVレーザーによって約4MeVの電子ビームを

生成し、1.5mの1/2モードSバンド定在波加速管2本により約40MeVまで加速し、アクロマティックアーク部によって90度偏向されQトリプレットにより衝突点に収束させる。衝突用のTi:Saレーザーは、発振器からのモードロックレーザーをストレッチャー、再生増幅器、プリアンプ、及びメインアンプにて、チャープパルス増幅を行い、コンプレッサーにてフェムト秒まで圧縮した後、集光させ、電子ビームと衝突させる。電子ビームはビームダンプに捨てられ、利用ゾーンにて生成したレーザーコンプトン散乱による硬X線を用いた利用研究を行っている。尚、電子ビームとレーザーは、高精度時間同期システムにより制御され、低ジッターでの衝突を実現し、安定なX線生成を実現している。



図1: 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X線発生装置

¹ E-mail: ryu-kuroda@aist.go.jp

産総研では、更に本装置を用いた医療や産業分野での実用化に向けたアップグレード開発を行い、X線収量を増加させることにより、将来的にアンジオグラフィーやマンモグラフィーなどのイメージング技術への応用、及びタンパク質の構造解析等への応用を目指している。

2. レーザーコンプトン散乱硬X線発生装置の現状と利用

2.1 X線発生装置の現状

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高輝度硬X線発生装置では、これまでシングルパルス硬X線により透過吸収、及び屈折コントラストイメージング等の利用実験を行ってきた^[4]。本装置の主な仕様を表1に示す。生成可能なX線のエネルギーは、電子ビームのエネルギーを20~42eVまで変化させることにより、10~40 keVの可変な準単色のX線が生成可能である。X線収量としては、165度衝突時に全エネルギーで約 10^7 photons/s程度で、フェムト秒X線の利用の際は、90度衝突を行い、収量は約 10^6 photons/s程度ある。

表1: レーザーコンプトン散乱硬X線発生装置の主な仕様

Electron beam	Max. Energy	20 ~ 42 MeV
	Bunch charge	1 nC
	Energy spread	約 0.2%
	Bunch length	3 ps (rms)
	Spot size (rms)	43 μ m \times 30 μ m
	Rep. Rate	10 Hz (Max 25 Hz)
Ti:Sa laser	Mode-lock Freq.	79.33 MHz
	Wavelength	800 nm
	Pulse width	100 fs (FWHM)
	Pulse energy	140 mJ
	Spot size (rms)	28 μ m \times 28 μ m
	Rep. Rate	10 Hz
UV laser for RF gun	Mode-lock Freq.	79.33 MHz
	Wavelength	262 nm
	Pulse length	3 ps
	Pulse energy	150 μ J
	Rep. Rate	10 Hz (Max 25 Hz)
X-ray	Collision angle	165 deg
	Max. Energy	10 ~ 40 keV
	Yield	10^7 photons/s @ 10Hz
	Pulse width	3 ps (rms)
	Stability	約6% (p-p, 15 min)
	Energy Bandwidth	約4% @ 2.5mrad 約10% @ 7.5mrad
	Collision angle	90 deg
	Max. Energy	20 keV
	Yield	10^6 photons/s @ 10Hz
Pulse width	150 fs (rms)	

2.1 X線発生装置利用の現状

本装置を用いて、これまで透過吸収、及び屈折コントラストX線イメージングを行ってきた。測定可能な試料の大きさは、X線取り出し窓（ベリリウム窓）や検出器の位置で制限されるが、3cm~5cm程度である。現状のセットアップでは、衝突点の下流約2m地点に約3cmのベリリウム窓を設置している。分解能は検出器（X線CCDカメラ；ROPER SCIENTIFIC, PI-SCX:1300-2.5-PW）の分解能に制限されるため60~80 μ m程度であるが、電子ビームとレーザーのスポットサイズが光源の大きさを決めているため、高分解能の検出器を用いれば、30 μ m前後も期待できる。X線のエネルギーは10 keV~40 keVと可変であるため、図2のような20 keVのX線での生体試料イメージングだけでなく、18 keVのX線を用いて、図3の点灯管のようなプラスチックと金属が混在した試料に適したX線のエネルギーで非破壊イメージングを行うことが出来る。更には、光源の準単色性から金属等の吸収端を狙った吸収端イメージングも行うこと可能である。今後は、X線収量を増強し、フラットパネル検出器等を用いることが出来れば、リアルタイムの非破壊イメージング画像の取得も期待できる。また、本装置の利用に関して、所内でのイメージング研究だけでなく、茨城県立医療大や広島大学等と個別に共同研究を結び、様々な応用研究を行っている。

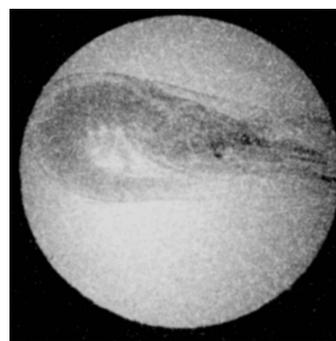


図2: 桜海老のX線像@20keV

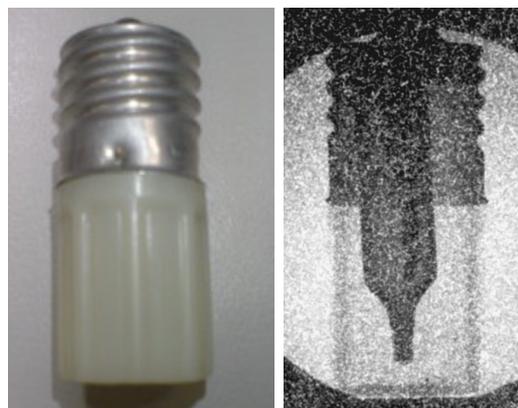


図3: 点灯管の写真(左)とX線像(右)@18keV

3. レーザーコンプトン散乱硬X線発生装置収量増強計画の進捗状況

現在更なるX線収量増加のため、小型マルチパルス全固体レーザーを用いたマルチバンチ電子ビーム生成、及びマルチ衝突レーザー共振器の開発研究を行っており、更にはマルチ衝突レーザーコンプトン散乱によるマルチパルス硬X線生成研究を行っている。これまで、マルチパルスレーザーについては、約1 m×0.7 mに収まる規模の小型全固体レーザーを開発した。このマルチパルスレーザーは、79.33 MHzのNd:YVO4発振器、LD励起Nd:YAGプリアンプ、AO変調器、LD励起Nd:YAGメインアンプ、波長変換結晶を用いて約8 μJ/pulse×100 pulse@UVを実現している。マルチバンチ電子ビーム生成については、上記マルチパルスレーザーを用いて約0.6nC/bunch×100 bunch @Mgカソードを達成しているが、カソードの寿命が大変短いため、更に安定で高輝度なマルチバンチ電子ビームを生成することを目的として、高量子効率のCs-Teカソードを導入するための小型ロードロックシステムを、KEK、早稲田大学と共同で開発した。図4にRF電子銃に小型ロードロックシステムを装着した際のイメージ図を示す。Cs-Teの蒸着はKEKにて行い、カソードピースを真空を保持したまま産総研に輸送し、RF電子銃へと装着している。これまで産総研において、Cs-Teカソードの量子効率率は約0.7%を達成しており、上記マルチパルスレーザーを用いて、約1.5 nC/bunch×100 bunchのマルチバンチ電子ビーム生成に成功し、更には、約40MeVまで加速し、アクロマティックアークにて90度偏向後、衝突点にて集光することに成功している。今後は、更なるビームローディング補正研究を行う予定である。

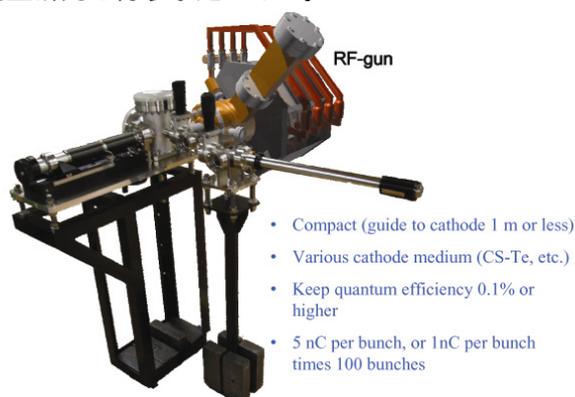


図4: Cs-Teカソード導入用小型ロードロックシステム

また、マルチ衝突レーザー装置の開発については、これまでにマルチ衝突キャビティの設計を行い^[5]、現在、衝突チャンバーの製作を開始したところである。この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の概念図を図5に示す。これは、Ti:Saレーザー発振器からのモードロックレーザーを数パルス切り出し、ストレッチャーにより約10ps

程度まで広げ、それをSeed光として、再生増幅器型の共振器で増幅しながら、そのビルドアップ波形とマルチバンチ電子ビームを衝突させるものである。このレーザー共振器により平均100 mJ/pulse×100 pulse、約10 Jの蓄積を目指す。この100pulseの電子ビームとレーザーとのマルチ衝突によって、レーザーコンプトン散乱硬X線の収量を2桁(10⁹ photons/s)以上増強することを目指している。

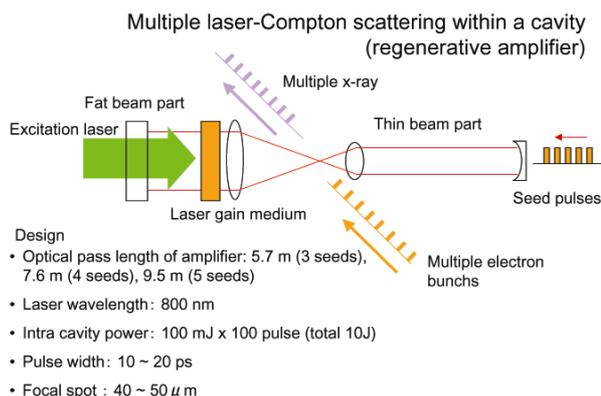


図5: マルチ衝突レーザー共振器を用いたマルチ衝突レーザーコンプトン散乱X線生成の概念図

3. 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線発生装置では、これまで約10⁷photons/sの硬X線を生成し、測定試料の種類によってX線エネルギー(10~40keV)を任意に選択したイメージングが可能な段階まで開発が進んでいる。更には、準単色・微小光源であることから屈折コントラスト法による高コントラスト・高分解能イメージングも可能である。今後は、マルチ衝突レーザーコンプトン散乱によってX線収量を増強し(2桁以上)、リアルタイムな非破壊イメージングを実現していき、学術分野だけでなく、医療や産業分野での実用化を目指していく。

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/kanmin/index.html>
- [2] H. Toyokawa et al., Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (2007) 30,
- [3] R. Kuroda et al., International Journal of Modern Physics B 21(2007) 488,
- [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 (2006) 726,
- [5] R. Kuroda et al., Proceedings of Particle Accelerator Conference 2007 (PAC07) (2007) 1022,