

# DEVELOPMENT OF LASER COMPTON SCATTERING X-RAY AND COHERENT THZ RADIATION SOURCES BASED ON S-BAND COMPACT LINAC AND ITS APPLICATION

Ryunosuke Kuroda<sup>1</sup>, Hiroyuki Toyokawa, Masato Yasumoto, Hiromi Ikeura, Hiroshi Ogawa,  
Norihiro Sei, Masaki Koike, Kawakatsu Yamada,  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

## Abstract

Advanced quantum radiation sources such as a laser Compton scattering X-ray and a coherent THz radiation sources have been developed based on an S-band compact electron 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 40 MeV using the rf source of a 20 MW klystron. The laser Compton scattering 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 based on the electron linac has been also developed instead of a conventional laser based THz source. The designed THz pulse has high peak power more than 1 kW in frequency range between 0.1 - 2 THz. In this conference, we will report present status of our advanced quantum radiation sources.

## 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X線源・コヒーレントテラヘルツ光源の開発と応用

### 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、図1に示すような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X線源[1]、及びコヒーレントテラヘルツ光源の開発と応用研究を行っている。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10m×10mの1つの中規模実験室に集約した形で研究開発を行っている。当小型電子リニアックでは、Sバンド（2856MHz）の20MWクライストロン1台を用いて、Cs-TeレーザーフォトカソードRF電子銃とUVレーザーによって約4MeVの電子ビームを生成し、1.5mの $\lambda/2$ モード定在波（APS型）加速管2本を用いることで、約40MeVまで加速することができる。電子ビームのマイクロパルスの電荷量としては、約1nC/パルス以上、マイクロパルス幅は約3ps(rms)、1マクロパルスあたりのマイクロパルス数は、最大100パルスを達成しており、繰り返し最大50Hzの運転によって、フォトカソード電子源としては最大規模の、5 $\mu$ A以上の平均電流量を得ることができる。加速された電子ビームは、レーザーコンプトン散乱線源の場合、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1ps以下に圧縮し、下流の90度偏向磁石により接線方向にコヒーレントテラヘルツ光を取り出し、応用研究を行っている。

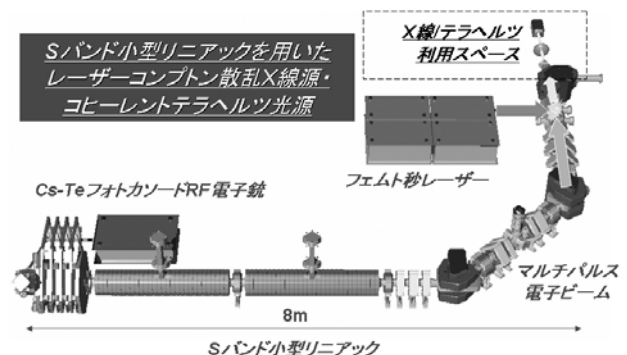


図1：Sバンド小型電子リニアックを用いたレーザーコンプトン散乱X線源及びコヒーレントテラヘルツ光源

<sup>1</sup> E-mail: ryu-kuroda@aist.go.jp

## 2. 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は、図2の概念図に示すように、高エネルギーの電子ビームとレーザー(低エネルギーの光子)を衝突させ、X線(高エネルギーの光子)として弾性散乱させる現象で、この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、装置のコンパクト性にも優れている。本装置における衝突用のレーザーパルスは、チャープパルス増幅(CPA)を用いた高出力 Ti:Sa レーザーによってテラワット級のフェムト秒レーザーを実現している。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。X線の収量としては、 $10^7$  photons/s 以上の光子数を実現している。主な装置の仕様を表1に示す。

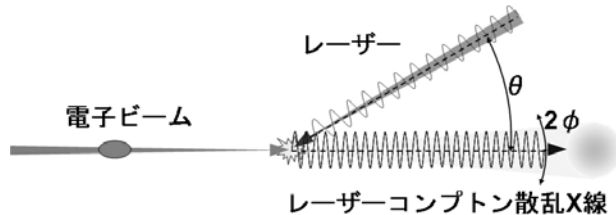


図2：レーザーコンプトン散乱概念図

また、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  $40 \mu\text{m}$  程度)から屈折コントラスト(インライン位相コントラスト)による生体イメージング[2]、高い単色性を用いた吸収端イメージング[3]といったライフサイエンス応用展開を行っている。これまでは、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イメージングに成功しているが、光量不足のため、フラットパネルディテクタ(FPD)などの高分解能のリアルタイム検出器には感度がなく、今後の課題となっている。現在は X 線収量増強のため、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、マルチパルス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の装置アップグレード開発を行っている(図3)。現在までのところ、予備的な実験としては数パルスのマルチパルス X 線生成に成功しており[4]、アップグレード開発が達成した後は、最終的な X 線収量として現状の100倍、 $10^9$  photons/s を目指して開発を進めている。

表1: レーザーコンプトン散乱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)	$40 \mu\text{m}$
	Rep. Rate	10 Hz
Ti:Sa laser	Mode-lock Freq.	79.3 MHz
	Wavelength	800 nm
	Pulse width	100 fs (FWHM)
	Pulse energy	140 mJ
	Spot size (rms)	$30 \mu\text{m}$
	Rep. Rate	10 Hz
UV laser for RF gun	Mode-lock Freq.	79.3 MHz
	Wavelength	266nm
	Pulse length	3 ps
	Pulse energy	10 $\mu\text{J}$ for Cs-Te photo-cathode
	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)

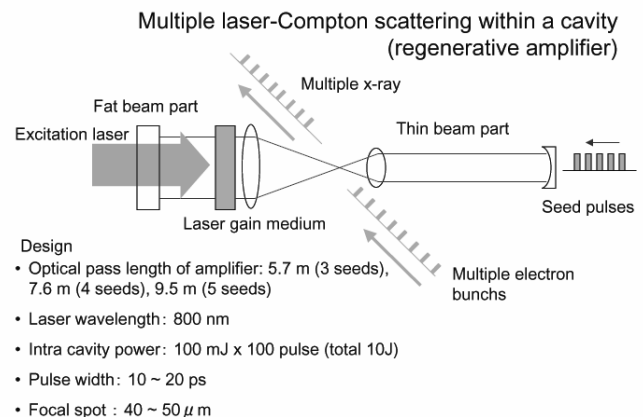


図3：Sバンド小型電子リニアックを用いたマルチ衝突レーザーコンプトン散乱の概念図

### 3. コヒーレントテラヘルツ光源

産総研では、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線源開発だけでなく、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を行っている。本研究においては、Sバンド小型リニアックによりエネルギー約40MeV、電荷量1nC以上の電子ビームを生成し、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）により、1ps(ピコ秒)以下のパルス長(rms)を持つ超短パルス電子ビーム生成のための磁気パルス圧縮を行っている。そして、圧縮したパルス長1ps以下の超短パルス電子ビームを90度偏向磁石を用いて、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放射光パルスを生成している[5-6]。生成した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。応用研究としては、現在、小型加速器ベースのテラヘルツ時間領域分光システム(THz-TDS)[7]、及びテラヘルツ走査型イメージング装置の開発[8]を行っている。図4に、テラヘルツ走査型イメージング装置の実験セットアップとテラヘルツ透過イメージング例(ICカード)を示す。走査型イメージング装置では、ICカードだけでなく、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。

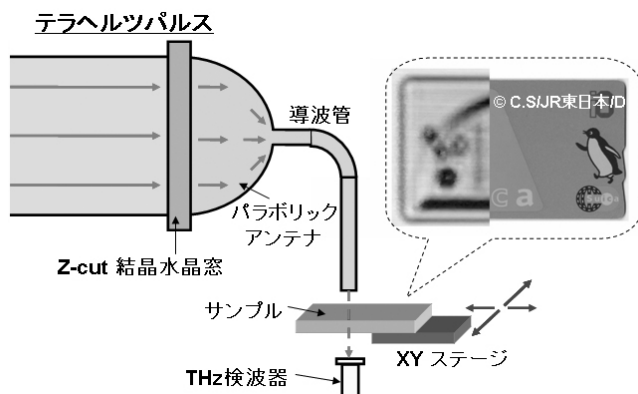


図4：テラヘルツ走査型イメージング装置

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。現在までの所、プローブパルス(フェムト秒レーザー)とのタイミ

ング制御、及び軸外し放物面鏡を用いたテラヘルツパルスの集光実験まで行っている。今後は、THz-TDSを用いたスペクトル計測、及び実サンプルの測定を目指す。

### 4. まとめ

これまで、産総研のSバンド小型リニアックを用いて、レーザーコンプトン散乱X線源、及びコヒーレントテラヘルツ光源の開発を行ってきた。レーザーコンプトン散乱X線源では、既に屈折コントラストや吸収端イメージング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、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などが期待される。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、既に走査型イメージング装置による応用展開を開始しており、ICカードや生体試料の透過イメージングに成功している。そして、加速器ベースの高出力テラヘルツ時間領域分光システムの開発を行うことにより、これまで測定が困難であった吸収の多い生体材料などについても、テラヘルツ吸収スペクトル測定が可能となり、ライフサイエンス分野等への広範囲の展開が期待される。

### 参考文献

- [1] 黒田隆之助 他、日本加速器学会誌「加速器」5巻2号p137-143 (2008)
- [2] H. Ikeura-Sekiguchi, R. Kuroda et al., Appl. Phys. Lett., 92, 131107 (2008)
- [3] K. Yamada, R. Kuroda et al., Nucl. Instrum. Meth. A (2009 in press)
- [4] R. Kuroda et al., Nucl. Instrum. Meth. A (2009 in press)
- [5] R. Kuroda et al., Infrared Physics & Technology, 51, 390 (2008)
- [6] N. Sei, R. Kuroda et al., J. Appl. Phys. 104, 114908 (2008)
- [7] R. Kuroda et al., Rad. Phys. Chem. 77, 1131 (2008)
- [8] R. Kuroda et al., Rad. Phys. Chem. (2009 in press)