

## Plan of Multi-Pulse X-ray Source Based on Inverse Compton Scattering and Present Status at Waseda University\*

Chiaki Igarashi<sup>1, A)</sup>, Tomoko Gowa<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>, Yoshimasa Hasa<sup>A)</sup>, Akihiko Masuda<sup>A)</sup>, Naoya Mitsuda<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>, Kiminori Ushida<sup>B)</sup>, Junji Urakawa<sup>C)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>C)</sup>, Akihiro Oshima<sup>D)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>D)</sup>, Ryunoyuke Kuroda<sup>E)</sup>,

<sup>A)</sup>Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)  
3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555

<sup>B)</sup>RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

<sup>C)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>D)</sup>Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (ISIR)

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

<sup>E)</sup>The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

<sup>F)</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

### Abstract

A table-top sized X-ray generation system based on inverse Compton scattering has been developed at Waseda University. We have already achieved to generate inverse Compton scattered X-rays with the system, and have been planning to establish a multi-pulse X-ray generation system for the purpose of enhancement of generated photons. Firstly, we have installed a new photocathode RF-gun equipped with an improved type RF cavity and a Cs-Te cathode in place of a Cu cathode. A new cathode can achieve high quantum efficiency which is necessary to produce multi-bunch electron beams. In addition, we have designed multi-pulse UV laser system for generation of multi-bunch electron beams. For future plans, we will investigate beam loading compensation, and then carry out a multi-bunch electron beam generation experiment, moreover, we will consider a design of multi-pulse collision laser generation system.

## 早稲田大学における逆コンプトン散乱X線源のマルチパルス化計画と進捗状況

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の概要

早稲田大学では、フォトカソードRFガンを用いた高品質ビーム生成を行っており、またそれを用いた応用研究のひとつとして生体観測用顕微鏡に応用可能な逆コンプトン散乱軟X線源の開発を行っている。軟X線生成には既に成功しており、現在、軟X線生成実験及び高強度化に取り組んでいる。2006年にはバックグラウンド低減や衝突用レーザーの高強度化に対する取り組みにより、S/Nの向上、及び生成軟X線の高強度化に成功している<sup>[1]</sup>。さらなる生成軟X線の高強度化に向けて、昨年より軟X線生成システムのマルチパルス化に取り組んでおり、その

ためには電子ビーム及び衝突用レーザー双方のマルチパルス化が必要となる。現段階では、マルチバンチ電子ビームの生成に取り組んでいる。電子ビームのマルチバンチ化に向けて改良型RF空洞を備えたCs-TeフォトカソードRFガンの導入をしており、マルチバンチ電子ビーム生成を行う予定である。

#### 1.2 逆コンプトン散乱X線

逆コンプトン散乱とは、レーザーと電子ビームを衝突させることで、レーザーの光子にエネルギーを与えてX線領域の光を得る現象である。

逆コンプトン散乱X線は準単色性、短パルス性、エネルギー可変性、コンパクト性などの優れた特徴を持ち合わせている。また、早稲田大学で生成され

\* Work supported by MEXT High Tech Research Project HRC707, JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (B)(2) 16340079.

<sup>1</sup> chiaki.autumn@toki.waseda.jp

るX線のエネルギーは水の窓領域 (250~500eV) と呼ばれるエネルギー領域に属しており、その領域では水の吸収係数が生体の主要構成元素 (炭素・窒素) に比べて極めて小さいという特徴があるため、脱水の必要なく高解像度での細胞観測が可能な軟X線顕微鏡への応用が期待される。

## 2. 逆コンプトン散乱軟X線生成システム

早稲田大学の軟X線生成システムを図1に示す。

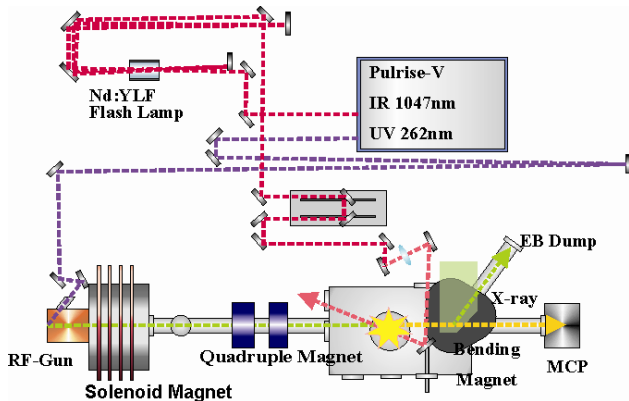


図1 逆コンプトン散乱軟X線生成システム

レーザー光源としてPultriseVのNd:YLFレーザーを用い、4倍高調波(UV、262nm)をカソード照射用に用いている。RFガンで生成された電子ビームはソレノイド電磁石、四極電磁石を経て衝突点に収束させる。また衝突レーザーには、同じPultriseVの基本波(IR、1047nm)用い、外部で増幅した後タイミン調整用のディレイラインを経て衝突点に集光している。衝突直前のミラーは可動式で衝突角を変更することで生成軟X線のエネルギー調節が可能になっている。生成した軟X線は、ビームライン下流のMCPを用いて検出し、電子ビームは衝突後に偏向電磁石によってビームラインから分離しビームダンプへと導かれる。

## 3. 逆コンプトン散乱軟X線のマルチパルス化計画

### 3.1 逆コンプトン散乱X線の高強度化

これまで、我々は逆コンプトン散乱を用いたシングルパルス軟X線の生成実験を行い、生成X線の高強度化に取り組んできた<sup>[1]</sup>。しかしながら、細胞観測の実現のためには現システムでの生成X線の光子数では不十分であり、さらなる高強度化が求められる。高強度化の手段のひとつとして、これまでに衝突用レーザーの高強度化を行ってきた。しかし衝突レーザーの高強度化は光学系への負担が大きく、非線形光学効果による影響からも制限される。また電子ビームの電荷量の増大はビーム制御を困難にし、バックグラウンドを増大させる。

そこで我々は逆コンプトン散乱軟X線生成システムのマルチパルス化に取り組んでいる。システムの

マルチパルス化により、衝突回数が増加し、単位時間当たりの生成光子数の収量が增大する。1000pulses/trainの軟X線が生成出来れば、単純に単位時間当たりの生成X線光子数は1000倍となる。システムのマルチパルス化には電子ビーム及び衝突用レーザー双方のマルチパルス化が必要であり、現在は電子ビームのマルチバンチ化に取り組んでいる。

### 3.2 Cs-TeカソードRFガンの導入

2007年にマルチバンチ電子ビーム生成を目的として改良型RF空洞を備えたCs-TeカソードRFガンを導入している<sup>[2]</sup>。Cs-Teカソードは昨年度まで用いていたCuフォトカソードに比べ約2桁量子効率が高い。照射用マルチパルスUVレーザーのアンプに対する要請が軽減できるため、マルチバンチ電子ビームの生成が期待できる。また、高いQ値を持った改良型RFガン空洞の導入により、電子ビームのエネルギーが5.3MeVまで向上した。これにより500eV程度までの軟X線が生成可能となり、水の窓領域全体をカバーできるようになった。現在、導入したCs-Teカソードを用いてシングルパルスの軟X線生成に取り組んでいる。

また、CAINを用いて新ガンでのパラメータで生成X線のシミュレーションを行った。図2は発生時と検出X線のエネルギースペクトルを示す。発生時はエネルギー幅が広いが、ビームライン0°方向に検出器が設置してあるため検出されるX線はほぼ単色であることがわかる。また、図3には検出器が受光する2次元強度分布を示す。

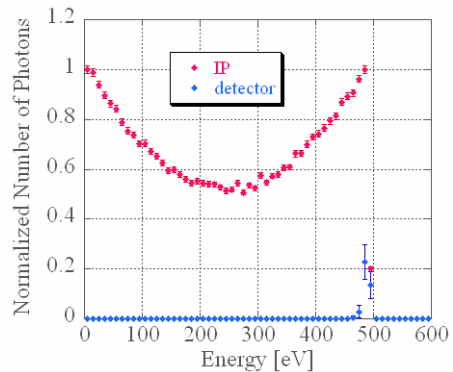


図2 生成軟X線のエネルギースペクトル

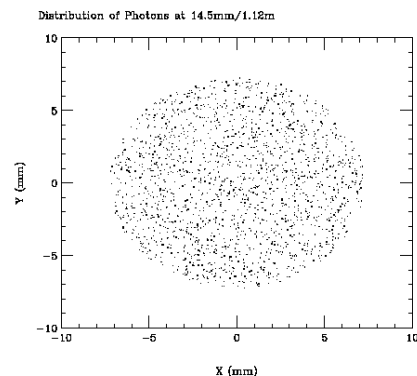


図3 検出軟X線の2次元強度分布

### 3.3 カソード照射用マルチパルスUVレーザー

マルチバンチ電子ビーム生成にはカソード照射用UVレーザーのマルチパルス化を行う必要がある。マルチパルスUVレーザーの生成システムの設計を図4に示す。

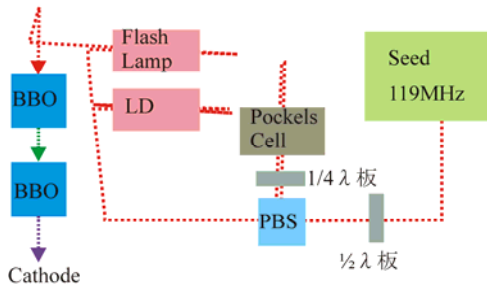


図4 カソード照射用マルチパルスUVレーザー生成システム

システムはパルス切り出し部、2段階増幅部、波長変換部からなり、光源としてPultrixVの1047nm、119MHzレーザーを用いる。パルス切り出しではポッケルスセルと波長板を用いて繰り返し周期5Hzで100~1000pulses/trainの切り出しを行う。増幅部ではレーザーダイオード (LD) とフラッシュランプを用いて2段階でレーザーパワーを増幅する。その後、波長変換部で2つのBBO結晶を用いて4倍高調波の262nmUVレーザーを得る。

### 3.4 ビームローディング補正

マルチパルスUVレーザーを照射して生成されたマルチバンチ電子ビームはRF空洞で加速される。この際に空洞内に蓄積されるRFのパワー及びビームローディングなどによってバンチトレイン内の電子ビームにエネルギー差が生じる。ビームローディングとは前方のバンチの影響で後続のバンチが減速力を受けることである。

マルチバンチトレインにおいてN+1番目のバンチが受けるビームローディングを含めた空洞内の加速電圧は次のように表される。

$$V = \frac{2\sqrt{\beta R_s P_0}}{1 + \beta} (1 - e^{-t/t_f}) - V_{b0} \frac{1 - e^{-(N-1)\tau}}{1 - e^{-\tau}} + \frac{V_{b0}}{2}$$

$$V_{b0} = \frac{\omega_0 R_s q}{2Q_0}$$

$\beta$ は結合定数、 $R_s$ はシャントインピーダンス、 $t_f$ はフィリングタイム、 $P_0$ は入射RFのピークパワー、 $\omega_0$ は共振周波数、 $q$ はビームの電荷量、 $Q_0$ は無負荷Q値を表す。また、 $\tau$ はバンチ間隔 $t_b$ を用いて $\tau = t_b/t_f$ と表される。これより計算される空洞内の加速電圧とビームローディングによる影響を含めたビームが受ける加速電圧を図5に示す。また、表1に計算に用いたパラメータを示す。

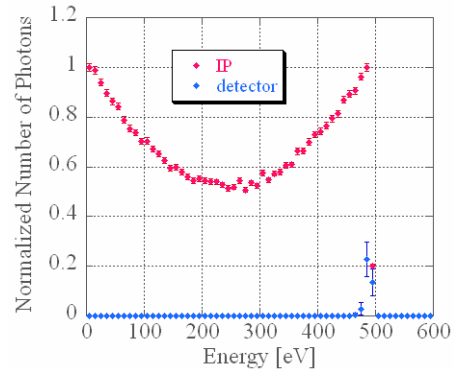


図5 ビームローディングによる加速電圧への影響

表1 計算に用いたパラメータ

フィリングタイム	0.67 $\mu$ s
バンチ間隔	8.4ns
RFピークパワー	10MW
シャントインピーダンス	6.5M $\Omega$
電荷量	700pC
バンチ数	100bunches
入射タイミング	2.0 $\mu$ s

### 3.5 衝突用マルチパルスIRレーザーの開発

マルチパルス軟X線源開発のためには衝突用IRレーザーのマルチパルス化が必要になる。KEK (高エネルギー加速器研究機構) との共同研究のLUCX (Laser Undulator Compact X-ray source) 実験<sup>[3]</sup>では衝突用レーザーとしてパルスレーザー共振器を開発し、導入している。パルスレーザー共振器は2枚の凹面鏡内にモードロックパルスレーザーを蓄積し、増幅させるシステムであり、衝突点で高強度かつウェストサイズの小さなレーザーパルスが生成可能である。我々はこのシステムを元にした衝突用レーザーの導入を検討している。

## 4. まとめと今後の予定

昨年は電子ビームのマルチバンチ化のために必要な高量子効率を得られるCs-Teフォトカソードを備え、さらに空洞構造にも改良を施した新RFガンを導入した。また、マルチバンチビーム生成に必要なカソード照射用マルチパルスUVレーザーシステムを設計し、マルチバンチ電子ビームのエネルギー補正技術についても検討を行った。

今後はCs-TeフォトカソードRFガンを用いてマルチバンチビーム生成試験に取り組み。また、衝突用レーザーのマルチパルス化についても検討していく。さらに生成X線の実用化に向け2次元強度分布測定及び集光光学系の構築についても検討していく。

## 参考文献

- [1] A.Masuda, et al., Proceedings of 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug. 1-3, 2007.
- [2] T.Suzuki, et al., Proceedings of This Meeting. (TP121)
- [3] K.Sakaue, et al., Proceedings of This Meeting. (WO26)