

## PRESENT STATE OF PHOTO-CATHODE RF-GUN SYSTEM AT WASEDA UNIVERSITY\*

Tomoko Gowa<sup>1,A)</sup>, Chiaki Igarashi<sup>A)</sup>, Takashi Kashino<sup>A)</sup>, Yuta Kato<sup>A)</sup>, Keita Komiya<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>A)</sup>,  
Tatsuya Suzuki<sup>A)</sup>, Tomoaki Nomoto<sup>A)</sup>, Yoshimasa Hama<sup>A)</sup>, Akihiro Fujita<sup>A)</sup>, Akihiko Masuda<sup>A)</sup>, Aki Murata<sup>A)</sup>,  
Masakazu Washio<sup>A)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>B)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>C)</sup>, Junji Urakawa<sup>D)</sup>, Masao Kuriki<sup>D)</sup>,  
Toshikazu Takatomi<sup>D)</sup>, Nobuhiro Terunuma<sup>D)</sup>, Hitoshi Hayano<sup>D)</sup>, Yoshio Kamiya<sup>E)</sup>, Kiminori Ushida<sup>F)</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> The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (ISIR)

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

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

1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

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

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

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

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

<sup>F)</sup> RIKEN

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

### Abstract

High quality electron beam generation using a table-top size photo-cathode RF-gun system and its application experiments have been developed at Waseda University. This system can generate about 5MeV low-emittance electron beam with bunch length of about 10ps (FWHM). It is applied for a pico-second pulse radiolysis experiment using stroboscopic method and soft X-ray generation based on inverse Compton scattering for soft X-ray bio-microscopy. Now we are installing improved RF-gun system with Cs-Te cathode whose quantum efficiency is about 100 times as high as oxygen-free copper we have used. In this conference, we will report the present state of our RF-gun system and future experimental plans.

## 早稲田大学フォトカソードRF電子銃システムの現状報告

### 1. はじめに

早稲田大学理工学研究所では、フォトカソードRF電子銃を電子源とした高品質電子ビームの生成、及びその電子ビームを用いた応用実験を行っている。加速器システムの全長は約2mと非常にコンパクトである。これまでに、銅カソードを用いて1nCのピコ秒シングルバンチビームの生成に成功しており、放射線化学の初期過程を明らかにするピコ秒パルスラジオリシスシステムの開発や、生きたまま細胞を観察することが可能な生体顕微鏡への応用に向けた逆コンプトン散乱軟X線源の開発研究を進めてきた。

パルスラジオリシス実験としては、現在までにピコ秒の分解能を得ることに成功しており、S/Nの改善及び測定時間の短縮が今後の課題である<sup>[1]</sup>。また、

軟X線生成実験ではすでに水の窓領域(250-500eV)の軟X線の生成・検出に成功しており、今後収量の増加が課題となっている<sup>[2]</sup>。

これらの課題に対して早稲田大学では、銅に比べ約2桁高い量子効率を持つCs-Teをカソードとして導入すべく、カソード交換システムを備えた改良型RF電子銃空胴を高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同で開発した。現在早稲田大学へのインストールを行っており、今後ビームの評価試験等を行っていく。高い電荷量を得られるとともに、電子ビームのマルチバンチ化が可能となり、各応用実験において大きな効果が期待される。

本論文ではRF電子銃システムとその応用実験の現状報告、及び改良型フォトカソードRF電子銃空胴インストール後の展望について報告する。

<sup>1</sup> E-mail: gowashi\_m31@akane.waseda.jp

\* Work supported by MEXT High Tech Research Project HRC707,  
JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (B) (2) 16340079, and JSPS Fellows (19-5789).

## 2. 高品質電子ビーム生成システム

電子ビーム発生システムは、フォトカソードRF電子銃・高周波源・レーザーシステムで構成されている。レーザーによってビームの時間構造が制御できるためシステム全体が非常にコンパクトであり、ビームラインの全長は約2mである。

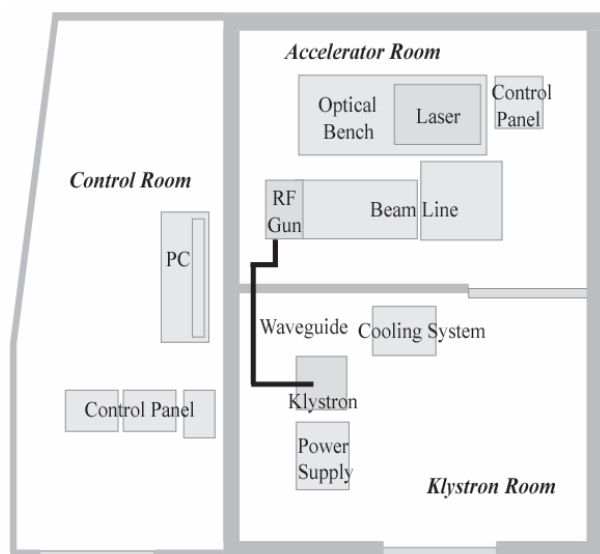


図1：高品質電子ビーム生成システム

### 2.1 フォトカソードRF電子銃

本システムではBNL型1.6セルSバンドフォトカソードRF電子銃を用いて短パルスの高品質電子ビームを生成している。カソードには銅を用いていたが、今夏には新たに導入されるCs-Teカソードでビームを生成する予定である。RF源には最大出力10MWのSバンドクライストロン(トムソン：TV2019B6)と、安定度の高い小型パルス・モジュレーター(日新電機)を使用している。主な電子ビームのパラメータを表1に示す<sup>[3, 4]</sup>。

表1：電子ビームのパラメータ

電荷量	~1nC
パルス幅	10ps~(FWHM)
エミッタンス	3 $\pi$ mmrad~
エネルギー	~4.6MeV

なお、本システムではビームのエネルギーが約5MeVと低いために、エミッタンスなどのビーム診断を行う際には空間電荷効果に配慮しなければならない。そこで、エミッタンス測定には空間電荷効果の影響を受けにくいスリット・スキャン法を採用している。

### 2.2 レーザーシステム

レーザーシステムには、Nd:YLFレーザー(Pulrise-V：住友重機械工業)を使用している。こ

のレーザーは、2つの非線形結晶により基本波1047nmの二倍・四倍高調波を同時に発生することができる。カソード照射には、四倍高調波のUV光(262nm)を用いている。シード共振器部にリファレンスRF信号に対する時間安定化システムを、アンプ後の4倍高調波には強度安定化システムを設置している。また、レーザーシステムをビームラインの近くに設置して光路長を短くすることにより、高い空間安定度を得ている。

応用実験においてもこのレーザーシステムが用いられており、電子ビームとの時間同期が高精度で取れるようになっている<sup>[1, 2]</sup>。

## 3. ビームを用いた応用実験

早稲田大学では、フォトカソードRF電子銃により生成されたピコ秒の高品質電子ビームを用いて、放射線反応の初期過程を解析するパルスラジオリシスシステムの開発と、逆コンプトン散乱による「水の窓」軟X線生成実験を行っている。各実験の現状について報告する。

### 3.1 パルスラジオリシスシステムの開発

早稲田大学ではコンパクトなピコ秒パルスラジオリシスシステムの開発を行っている。パルスラジオリシス法は、放射線化学反応の初期過程を解明するにあたり極めて有用な手段である。

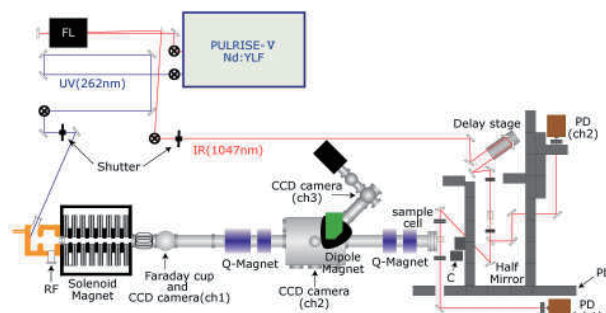


図2：ピコ秒パルスラジオリシスシステム

本システムでは、ポンプ・プローブ法に基づいたストロボスコピック法を採用している。先に述べた電子ビームを励起源として、Nd:YLFレーザーの基本波(1047nm)を増幅し水セルに集光させ生成させた白色光を分析光として用いている。カソード照射用のレーザーと同一のレーザーシステムを用いることにより、高精度な時間同期を取ることが可能となっている<sup>[5]</sup>。

分析光である白色光の安定化や、ビームオプティクス・レーザーオプティクスの最適化などによって、2005年度までに時間分解能16ps、S/N25以上のシステム構築に成功した。しかし、測定に14時間も要したため、測定環境の変化が問題になっていた。そこで2006年度にレーザーの繰り返し周波数を倍増させ、また、データ取得方法の見直しを行った結果、測定時間を3.5時間にまで短縮することに成功した。現

在までのシステム改良の成果を表2にまとめる<sup>[1]</sup>。

Cs-Teカソードの導入により電荷量の大幅な増加が見込めるため、S/Nの大幅な改善が期待される。今後は有機溶媒を使用した本格的なパルスラジオリシス実験を行う予定である。

表2：システム改良の成果

	2003	2005	2006
時間分解能 [ps]	26	16	18
S/N	6.7	26.4	8.6
電荷量 [nC]	1.4	0.95	0.67
測定時間 [h]	24	14	3.5

### 3.2 「水の窓」軟X線の生成

現在、医療や工業、基礎科学などの幅広い分野への応用を目的として、様々な方法による高輝度短パルスX線源の開発が行われている。早稲田大学では、逆コンプトン散乱を用いたコンパクトなパルス軟X線源を開発している。生成システムは図3に示すとおり、ビームラインとレーザーシステムを含めても2m×2.5mに収まる卓上サイズである。

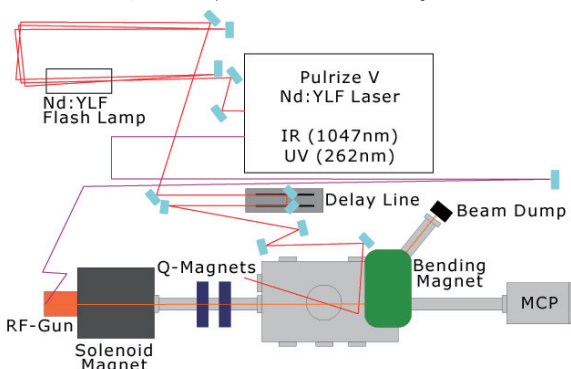


図3：軟X線生成システム

早稲田大学の電子ビームのエネルギーは4.6MeV、用いるレーザー波長は1047nm、パルス長はいずれも約10ps (FWHM)である。この電子ビームとレーザーパルスを用いることにより、生体観測などに大変有効な「水の窓」領域 (250~500eV) に含まれるパルス軟X線を生成することが可能である。この領域ではX線の水による吸収が生体の主要構成元素である炭素や窒素に比べて極端に小さいため、脱水の必要なく生きたままの細胞組織を高分解能で観測できる軟X線顕微鏡への応用が期待されている。エネルギー可変性、準単色性、短パルス性といった逆コンプトン散乱の特徴も、生物学的な利用には有利である<sup>[6]</sup>。

本システムを用いて実際に生成された軟X線シグナルを図4に示す。2006年度にレーザーを3度フラッシュランプに通す3-passアンプ・システムを導入してレーザーパワーを増大したことによって、X線シグナルは大幅に増加した。さらに衝突チャンバーの改良によって制動X線によるバックグラウンドの削減にも成功し、S/Nはそれまでの約90倍となる123を達成した。検出光子数は312/pulse、総発生光子数は $3.28 \times 10^4$ /pulseであった<sup>[2]</sup>。

生成されたX線シグナルを用いて電子ビームとレーザーのインタラクションをより詳細に観察することが可能になり、ルミノシティの衝突角依存性測定や電子ビームの衝突スポットサイズ測定を行った。さらにはX線生成の長時間生成を行い、12時間の連続生成に成功した<sup>[2]</sup>。

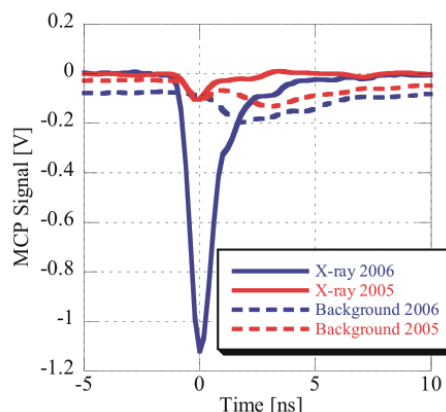


図4：X線シグナルとバックグラウンド

今後は、イメージング検出器による二次元分布測定や、軟X線顕微鏡の実現に向けた感光材料の評価、感光手法の開発を行う。また、Cs-Teカソード導入後は電子ビームのマルチバンチ化<sup>[7]</sup>とレーザーのマルチパルス化も含めて検討していく予定である。

## 4. 今後の展望

今後これらの応用実験の幅を広げることなどを目的として、現在使用している銅カソードより2桁量子効率が高いCs-Teカソードを導入することとなった。そのため、KEKと共同で改良型フォトカソードRF電子銃空洞及びカソード交換システムを開発、現在インストールの段階に入っている<sup>[8]</sup>。今後ビームのパラメータ測定等を行い、今秋からは新たなシステムを用いての応用実験に入る予定である。高い電荷量が得られ、さらに電子ビームのマルチバンチ化が可能になるため、各応用実験においても大きな効果があるものと期待される。

## 参考文献

- [1] K. Komiya, et al., Proc. of this conference, WP09
- [2] A. Masuda, et al., Proc. of this conference, TP52
- [3] R. Kuroda, et al., Japanese Journal of Applied Physics Vol. 43, No. 11A, 2004, pp.7747-7752
- [4] K. Sakaue, et al., Journal of Physics Conference Series 31 (2006) pp229-230
- [5] M. Kawaguchi, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B236 (2005) 425-431
- [6] S. Kashiwagi, et al., Journal of Applied Physics, Vol.98, No.12, 15 December 2005, pp123302 1-6
- [7] Y. Kato, et al., Proc. of this conference, FP17
- [8] A. Murata, et al., Proc. of this conference, FP16