

# 早稲田大学における高品質電子ビーム発生とその応用

柏木 茂<sup>1,A)</sup>、石川裕記<sup>A)</sup>、大島 崇<sup>A)</sup>、黒田龍之助<sup>A)</sup>、濱 義昌<sup>A)</sup>、  
矢田 明<sup>A)</sup>、鷲尾方一<sup>A)</sup>、早野仁司<sup>B)</sup>、浦川順治<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 早稲田大学理工学総合研究センター

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

現在、早稲田大学理工学総合研究センターでは平成 11 年度のハイテク・リサーチ・センタープロジェクト採択を受け、喜久井町キャンパスにおいて「高品質電子ビームの発生とその物性・反応研究への応用」と題した研究プロジェクトを遂行している。本プロジェクトでは、フォトカソード RF 電子銃により短パルス高品質電子ビームを生成し、放射線物理化学分野などにおける様々な応用実験を計画している。2001 年度には、加速器システムの立ち上げを行った後、RF 電子銃で生成された電子ビームとレーザー光との散乱による X 線生成実験を行う予定である。また、その他にもパルスラジオリシス実験などの応用実験も行っていく予定である。本研究では、喜久井町キャンパスにおける、RF 電子銃システムおよび X 線発生実験の準備状況などについて報告する。

## 1. はじめに

高輝度でかつ高品質の電子ビームは、幅広い研究分野で必要とされており、こうした高品質電子ビームを生成する一つの方式として、フォトカソード RF 電子銃がある。近年、目覚ましいレーザー技術の進歩により、世界各国で安定に高品質の電子ビームが生成できるフォトカソード RF 電子銃が開発されてきている。フォトカソード RF 電子銃の場合、レーザーの時間構造で電子ビームを発生でき、バンチャーなどのバンチ圧縮システムがいらないためシステムが大変コンパクトにできるといった利点がある。早稲田大学理工学総合研究センターでは、このフォトカソード RF 電子銃を中心としたコンパクトな電子発生装置を構築し、それにより生成される短パルスで高品質な電子ビームを用いた様々な応用実験を行っていく。

本研究プロジェクトでは、昨年 9 月に早稲田大学喜久井町キャンパス内に建設を完了した新研究棟地下 2 階に、フォトカソード電子銃を主とした高品質電子ビーム発生システムを構築している（図 1）。これまでに、高周波源・レーザーシステムを含むフォトカソード RF 電子銃システムのインストールを完了した。現在、今秋のビーム実験開始を目標に、

クライストロン電源の動作確認、インターロックシステムの構築などを行っている。また、それらと平行してフォトカソード RF 電子銃より生成された電子ビームを精度良く評価するためのビーム診断システムや今年度後半に計画している逆コンプトン散乱による軟 X 線生成実験、ピコ秒電子ビームによるパルスラジオリシス実験のシステム設計も行っている。

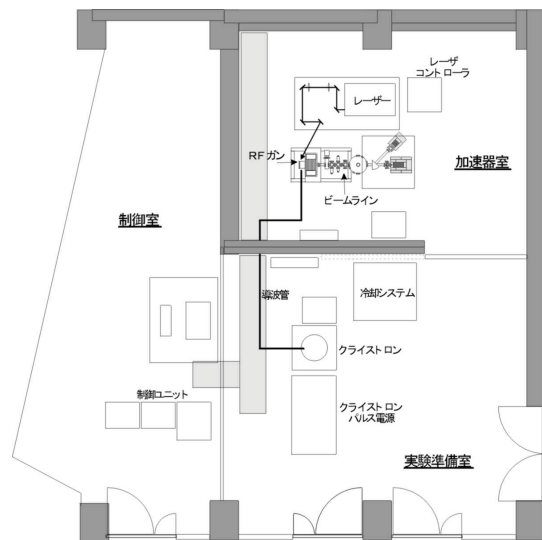


図 1：喜久井町キャンパス内の研究室レイアウト

## 2. 高品質電子ビーム発生システム

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。本プロジェクトでは、特に RF 電子銃以外に加速システムを設けないためシステム全体が非常にコンパクトであり、ビームラインの長さは約 2m である。

### 2.1 フォトカソード RF 電子銃・高周波源

本プロジェクトでは、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で開発された 1.6 セル S バンドフォトカソード電子銃を用いて、短パルスの高品質電子ビームを生成する<sup>[1][2]</sup>。カソードには、高い量子効率を期待できるマグネシウムカソードを使用する<sup>[3]</sup>。このマグネシウムカソードは BNL の試験加速器施設 (ATF) に

<sup>1</sup> E-mail: shigeruk@mn.waseda.ac.jp

において、レーザークリーニングを行うことにより、これまで2年間以上にわたり高い量子効率で安定に動作することが実証されている。我々も、このマグネシウムカソードを使用することにより、高電荷の電子ビームを生成し、X線生成実験などに使用する。

今回、RF電子銃空洞製作はKEK 工作センターで行った。そして、測定器などに悪影響を及ぼす暗電流の軽減のため、ダイヤモンド切削による超精密加工を行った。金属表面からの暗電流放出の原因として、微小突起と絶縁性不純物などが考えられているが、今回の空洞製作では鏡面加工を施すことにより、前者の微小突起を極力なくす努力をした。空洞の洗浄はヘキサンを用いて行い、また空洞の運搬の際には窒素パックなどを施し、不純物の付着などができる限りないようにした。しかし、以上のことだけでは洗浄や加工後の表面状態の維持に関する配慮は十分ではなかったと思われる。

高周波源にはトムソン製 S バンドクライストロン (TV2019B6) を使用し、最大出力は 10MW である。クライストロンパルス電源は日新電機 (株) で製作され、出力パルス電圧 170kV、パルス幅 (半値幅) 4.5  $\mu$ s、パルス繰り返し周波数 25pps である。クライストロン出力電圧パルスの振幅ジッターは、測定の結果 20000 パルスに対して約 0.38% (p-p) であった。

クライストロン出力の RF は、SF<sub>6</sub> を封入した導波管を通して RF 電子銃空洞に供給される。また、クライストロンに RF 電子銃空洞からの反射波が戻らないように、サーキュレータを空洞入力前の導波管部に使用している。

一方、PARMELA や MAGIC などを用いたシミュレーションも行っている。我々は、RF 電子銃空洞内での空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑えるため、できる限り高い加速勾配によって運転することを予定している。しかし、シミュレーションの結果から、加速電場を大きくした時に動径方向への電場によるエミッタンス悪化もあることが分かってきた<sup>[4]</sup>。このエミッタンス悪化は、初期のビームサイズ (レーザーのスポットサイズに依存)、電荷量などにも関係しているため、今後詳しく調査していく予定である。

## 2.2 レーザーシステム

本研究プロジェクトでは、住友重機械工業 (株) により開発された、全固体 Nd:YLF レーザー (Pulrise-V) 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 2 倍・4 倍高調波を同時に発生できる。RF 電子銃用の照射には、4 倍高調波の UV 光を用いる。このレーザーシステムは、シード共振器部にリファレンス RF 信号 (119MHz) に対する時間安定化システム、アンプ後の 4 倍高調波 (UV 光:262nm) には強度安定化システムを含んでいる。RF 電子銃の照射レーザーには、時間 (タイミング) 安定度、強度安定度、空間安定度が要求される。本システムでは高い空間安定度を得るために、レーザーシステムをビームラインのすぐ横に設置し、レーザ

一筐体から RF 電子銃までの光路長をできる限り短くした (図 2 参照)。

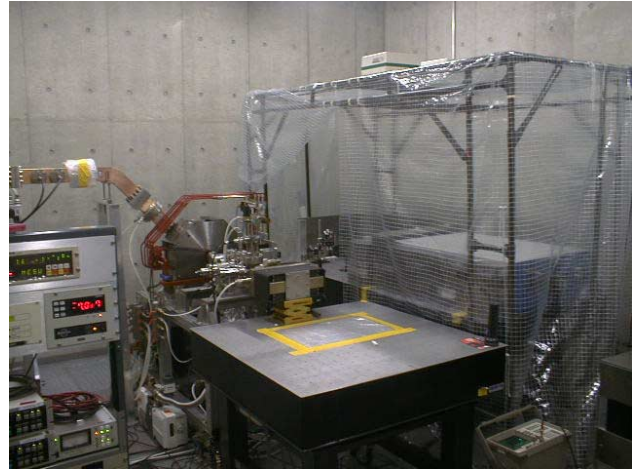


図 2 : 加速器室内風景

しかし、加速器ビームラインの近くにレーザーを設置すると、加速器より発生する放射線や電磁ノイズによりレーザーが不安定になることが懸念される。そこで、RF 電子銃のすぐ近くにレーザーを設置した場合のシード光 (119MHz) の時間安定度と強度安定度を時間領域復調法により測定した<sup>[5]</sup>。測定では、RF 電子銃に高周波を供給している場合としていない場合について測定を行い比較を行った。その結果、時間安定度については高周波の入力に関係なく、リファレンスシグナルに対して約 0.3ps といった大変良い安定度があることがわかった。一方、強度安定度について高周波を入力している場合は約 0.1%、高周波を入力していない場合は約 0.03% と約 3 倍の差があることが分かった。この原因については現在調査中であるが、ポンプのレーザーダイオードが放射線や電磁ノイズの影響を受けている可能性も考えられる。そのため、レーザー筐体やコントローラに適切なシールドを施す事を検討している。今回の安定度測定結果はシード光についてのものであり、時間領域復調法での積分区間も 0.1Hz ~10kHz としたため短時間の安定度測定結果である。今後、実際に RF 電子銃のカソード照射に用いる UV 光 (25Hz) について長時間の安定度測定を行っていく予定である。

## 3. 応用実験

本プロジェクトでは、RF 電子銃により生成されたピコ秒の電子ビームを用いた応用実験を計画している。我々のシステムでは、前述したように RF 電子銃以外に加速システムがないため、ビームエネルギーは約 5MeV、パルス幅が 10ps (FWHM) である。2001 年度から 2002 年度にかけて、将来軟 X 線顕微鏡への応用を目的としたパルス軟 X 線生成実験および、高速の物理化学現象の探求を目的としたパルスラジオリシス実験を計画している。いずれの実験も、良く制御された安定した電子ビームおよびレーザー光が必須である。ここで、現在計画しているパルス軟 X 線生成実験について述べる。

### 3.1 軟 X 線発生実験

我々は、X 線発生の方法として LSS (Laser Synchrotron Source) を用いることにした。この方法は、短パルスの電子ビームとレーザーパルスの逆コンプトン散乱により X 線を発生させる方法である<sup>[6][7]</sup>。LSS の特長として、短パルスで高輝度の X 線が発生でき、発生される X 線のエネルギーおよび強度も調整可能、リニアックを主としたコンパクトなシステムにできるなどが挙げられる。近年、LSS による X 線・ $\gamma$ 線生成実験は世界各国で盛んに行われてきている。

早稲田大学における X 線発生実験の特徴としては、約 5MeV の電子ビームと Nd:YLF レーザーの基本波 (波長: 1.047  $\mu$ m) の散乱により、生態観測などに非常に有効な 250~500eV 程度の軟 X 線を生成することである。この軟 X 線領域には、「水の窓」と呼ばれる水の吸収に比べ、たんぱく質や核酸の線吸収係数が格段に高い領域があり、この領域の X 線を用いれば水による吸収の影響を最小限にして生態の観測を行うことができる。また、この「水の窓」領域付近には生態を構成する主な元素 (酸素、窒素、炭素) の K 吸収端があるため、それぞれの元素の生体内における分布を軟 X 線により観察することも可能である。つまり、エネルギーの異なる軟 X 線により撮影されたイメージのコントラストから、生体内のある特定元素の分布を知ることができる。

本研究プロジェクトでは、X 線顕微鏡への応用を考え、異なる波長の軟 X 線生成実験を行う。生成される X 線のエネルギー (波長) を変える方法には、電子ビームエネルギーまたはレーザー波長を変えるなどがあるが、今回は衝突角度を変えることにより、X 線のエネルギーを変化させる。図 3 に現在デザインしている衝突部のレイアウトを示す。

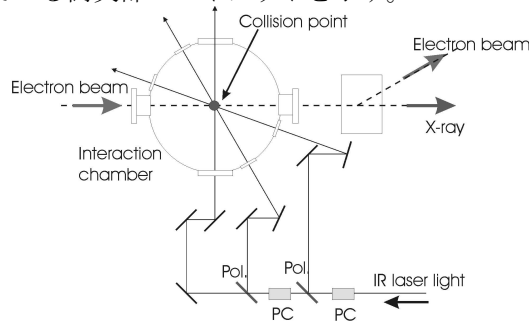


図 3 : X線生成用衝突部レイアウト

ポッケルセルとビームスプリッターを組み合わせることで、パルスごとに衝突角度を変えることが可能である (光路長は前もって調整する)。衝突角は 90、60、20 度 (0 度が正面衝突に相当する) を計画しており、表 1 に示した電子ビームとレーザーのパラメータを用いると各衝突角度で生成される X 線の最大エネルギーは 227、340、440MeV (図 4)、全 X 線光子数は大よそ  $10^5 \sim 10^4$  photon/pulse である。我々は、まずマルチチャンネルプレートを用いて X 線観測を行い、シミュレーションの計算結果との比

較を行う。また、X 線顕微鏡への応用のためには、更なるシステムの性能向上および高い集光効率の X 線光学系が必要である。

#### Electron bunch

Beam energy	5.0 MeV
Bunch charge	3.0 nC
Bunch length (FWHM)	10 ps
Beam size at focal point ( $\sigma_x/\sigma_y$ )	100/100 $\mu$ m

#### Nd:YLF laser

Wave length	1.047 $\mu$ m
Energy/pulse	4 mJ
Pulse length (FWHM)	10 ps
Beam size at focal point ( $\sigma_x/\sigma_y$ )	30/30 $\mu$ m

表 1 : 電子ビームとレーザーのパラメータ

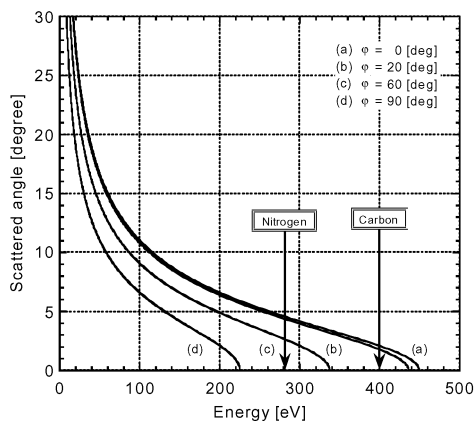


図 4 : 生成 X 線のエネルギーと角度分布および窒素と炭素の K 級終端

## 4. おわりに

本研究プロジェクトは、国内外の多くの方々のご指導やサポートによって行われてきています。RF 電子銃製作および運転に関しては、BNL の Ilan Ben-Zvi 教授、X. J. Wang 博士から大変貴重な指導を頂きました。また、KEK の人見工作センター長、舟橋義聖、高富俊和、渡辺勇一、各氏には空洞製作で多大な協力をして頂きました。KEK 加速器研究施設の陳教授には MAGIC コードについて指導頂きました。そして、レーザーシステムに関して、遠藤彰氏、青木康氏をはじめとする住友重機械工業 (株) の方々、フェムト秒テクノロジー研究機構の方々に、技術的な指導・サポートをしていただきました。著者一同、ここに感謝致します。

## 参考文献

- [1] X. J. Wang et al., Physical Review E 54-4, p. 3121 (1996).
- [2] X. Qiu et al., Phys. Rev. Lett. 76 No. 20, p. 3723 (1996).
- [3] T. Srinivasan-Rao et al., J. Appl. Phys. 77 (3) 77 (3), p. 1275-1279 (1995).
- [4] R. Kuroda et al., Proceedings of EPAC 2000, p. 1666
- [5] H. Tsuchida, Opt. Lett. 23, p. 286 (1998).
- [6] W. Leemans et al., "Femtosecond X-rays from 90° Thomson scattering", Proceedings of PAC 1995, p.174
- [7] S. Kashiwagi, et al., NIM A 455, p. 36-40 (2000)