

STATUS REPORT OF THE PHOTOCATHODE RF-GUN SYSTEM AND APPLICATION RESEARCH AT WASEDA UNIVERSITY

Yohei Kawauchi^{#,A)}, Yuji Hosaka^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}, Mizuki Sakamoto^{A)}, Takayuki Yamamoto^{A)},
Yasufumi Yoshida^{A)}, Junji Urakawa^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Hitoshi Hayano^{B)},
Shigeru Kashiwagi^{C)}, Ryunosuke Kuroda^{D)}, Masakazu Washio^{A)}

^{A)} Research Institute for Science and Engineering, Waseda University,
3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University,
1-2-1 Mikamine, Taihaku, Sendai, Miyagi, 982-0826

^{D)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

Abstract

At Waseda University, we have been developing a compact laser photocathode RF gun to generate high quality electron beam for application researches. The RF gun system is composed of BNL type S-band RF cavity with Cs-Te photocathode, a solid-state picosecond Nd:YLF laser to irradiate photocathode and an RF power source. Although our linac system is very compact (about 2m × 2.5m), electron beam generated from the gun has enough energy and charge for application researches. As application research, pulse radiolysis and MRT (Micro planer beam Radiation Therapy) have been conducted. In this conference, the current status and specifications of our electron linac system, results of application researches and future prospective are presented.

早稲田大学フォトカソード RF-Gun システムと応用研究の現状報告

1. はじめに

早稲田大学理工学研究所(RISE)では、ピコ秒パルスレーザーと Cs-Te をフォトカソードに用いた RF-Gun を用いて、高品質電子ビームの生成・評価とその電子ビームを利用した応用研究を行っている。^[1] 本研究室で用いているフォトカソード RF-Gun システムは約 2m×2.5m と非常に小型でありながら、約 5MeV のエネルギーを持つ低エミッタンスの電子ビームを生成することができる。

現在応用研究としては主に、放射線化学反応初期過程の解析を目的としたパルスラジオリシス研究と、放射線を利用したガン治療のためのマイクロビーム生成研究が行われている。パルスラジオリシス研究に関しては、分析光源として Xe ストロボフラッシュランプを用いたナノ秒分解能システム、SC(Super Continuum)光を用いたピコ秒分解能システムの2種類のシステムを導入しており、それぞれにおいてシステムの改善に成功している。マイクロビーム生成に関しては、過去に本研究室でマイクロX線の生成実験を行ったが線量が不足していると考えたため、高い線量が容易に得られる電子線でマイクロビーム生成を行い、表面付近において高い pv 比を得ることに成功した。

本講演では、早稲田大学フォトカソード RF-Gun システム・応用研究の現状と今後の展望を報告する。

2. 早稲田大学フォトカソード RF-Gun

本研究室で用いているフォトカソード RF-Gun システムは大別すると、RF-Gun 本体、カソードに照射する UV レーザーの生成システム、加速空洞に大電力の RF を供給するクライストロンシステムの3つのシステムからなる。

フォトカソード RF-Gun は、カソードに UV 光を照射した際に光電効果で生じる電子を、大電力の高周波で加速する装置である。本研究室で用いられている加速空洞は BNL タイプ(1.6Cell, 共振周波数 2856MHz)と呼ばれるものである。電子は空洞の高電場によりすぐに相対論的エネルギーまで加速されるため、空間電荷効果によるエミッタンスの増大を防ぐことができる。また、2007 年度より量子効率の高い Cs-Te をフォトカソードとして導入した。

カソードに照射する UV レーザーの源は、繰り返し周波数 119MHz、パルス幅 10ps(FWHM)、波長 1047nm の Nd:YLF モードロックレーザーである。ここから得られる CW パルスの IR レーザー光を、LN 変調器を用いたパルストレイン切り出し部、Yb ファイバーアンプ及び LD アンプを用いた増幅部、非線形結晶 LBO, BBO を用いた波長変換部によってパルストレイン状の UV レーザーに変換している。LN 変調器に電圧を印加する時間幅を変えることでレーザーの切り出しパルス数は可変であり、応用実

[#]pj.adesaw.igeom@moegi.waseda.jp

験の目的に応じバンチ数の切り替えが可能となっている。また、マルチバンチ電子ビームはバンチトレインの先端と末端でエネルギーがばらつくという問題点があったが、印加する RF パルスに変調をかけることで、バンチ毎のエネルギー広がりを抑えることに成功している。詳しくは^[2]を参照されたい。現在の電子ビームのパラメータを表 1 に示す。

表 1.現在のビームパラメータ

ビームエネルギー	4.6MeV
電荷量 (1bunch)	2.5nC/pulse
最大バンチ数	100
横方向ビームサイズ(FWHM)	3.5mm(sample)
縦方向ビームサイズ(FWHM)	3.0mm(sample)
バンチ長(rms)	4ps
Q.E.	0.2%

3. パルスラジオリシス

3.1 パルスラジオリシスとは

放射線を物質に照射すると、通常の化学反応と異なる様々な化学反応が起きるが、全体の反応を決定付けるのはナノ秒未満の超高速で起きる初期反応である。放射線化学反応の初期過程を解析する最も有力な手法が、パルス状の放射線を物質に照射することで、誘起された短寿命中間活性種の物理的・化学的性質の時間変化を観測するパルスラジオリシス法である。加速器は容易にパルス状の放射線を得ることができるため、国内外の多くの大学・研究所で加速器を用いたパルスラジオリシス研究が行われている。^{[3][4]}しかし、パルスラジオリシスシステムには非常に大掛かりな施設が必要である。本研究室ではコンパクトなパルスラジオリシスシステムの開発をこれまで行ってきており、ナノ秒の時間分解能を持つシステムとピコ秒の時間分解能を持つシステムを構築してきた。^[5]

3.2 ポンプ・プローブ法

パルスラジオリシスの手法はいくつかあるが、最も汎用性が高い手法は測定試料にパルス状の放射線と分析用の光を照射し、吸光強度の時間変化を測定するポンプ・プローブ法である。放射線照射により中間活性種と呼ばれる短寿命の物質が生成するが、この吸光強度は活性種の濃度に比例する。(Lambert-Beer の法則)ポンプ・プローブ法による吸光を評価する指標として O.D.(Optical Density)がよく用いられ、以下の式で定義される。

$$O.D. = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon c l \quad (1)$$

I、I₀はそれぞれ放射線照射前後の分析光強度、εはモル吸光係数、lは光路長、cは活性種の濃度である。O.D.の時間変化をプロットすることで活性種

濃度の時間変化を見積ることが可能となる。

3.3 分析光

吸光法パルスラジオリシスの分析光源として本研究室では、Xe ストロボフラッシュランプと SC(Super Continuum)光という 2 種類の白色光を用いたシステムを用いている。ナノ秒時間分解能システムにおいては Xe フラッシュランプまたは SC 光を、ピコ秒時間分解能システムにおいては SC 光を分析光としてそれぞれ用いている。Xe フラッシュランプは大強度で短波長領域でも安定性が高い光であり、マイクロ秒オーダーの時間幅を持つため、ナノ秒領域では連続な光とみなすことができる。

一方、ピコ秒オーダーの測定では分析光源の時間幅もピコ秒オーダーでなければならない。SC 光はレーザー光を非線形ファイバに入射することにより発生する非線形光学効果によって得られる短パルスの白色光であり、ピコ秒測定への導入が可能だと考えた。本研究室では非線形ファイバとして PCF(Photonic Crystal Fibre)と呼ばれるファイバを用いている。PCF は一般的な光ファイバと異なり、周期的な空孔を持ち (図 1)、コアと空気の屈折率差で光を通常のファイバより強く光を閉じ込めることができる。また、コアの径は約 5μm と非常に小さく、スポットサイズの小さな光を得ることができる。生成した SC 光のスペクトル測定結果を図 2 に示す。

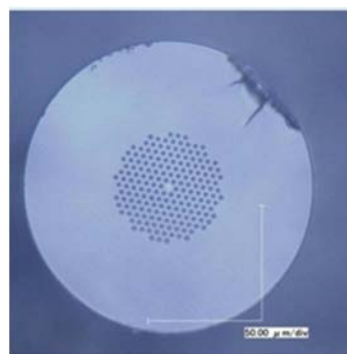


図 1 PCF 端面図

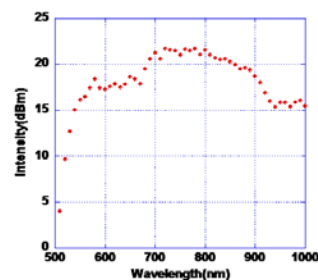


図 2 SC 光スペクトル例

3.4 システム評価実験

構築したパルスラジオリシスシステムの性能評価に、純水が試料として用いられる。具体的には、純水に放射線を照射した際に生成する、水和電子と呼ばれる物質の吸光を測定する。水和電子は可視域で強い吸光を持ち、サブピコ秒オーダーで生成、マイクロ秒オーダーで減衰する活性種であるため、ピコ秒システムの時間分解能・ナノ秒システムのS/N比の評価に用いることができる。本研究室でも、パルスラジオリシスシステムの性能評価のため水和電子の測定を行った。昨年度測定したナノ秒パルスラジオリシス測定(水和電子の減衰)の結果を図3に、ピコ秒パルスラジオリシス測定(水和電子の立ち上がり)の結果を図4に示す。ナノ秒測定においては10バンチの電子ビームを、ピコ秒測定においては1バンチの電子ビームを用いた。

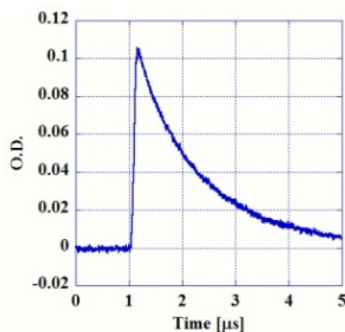


図3 波長 800nm における水和電子の減衰の様子

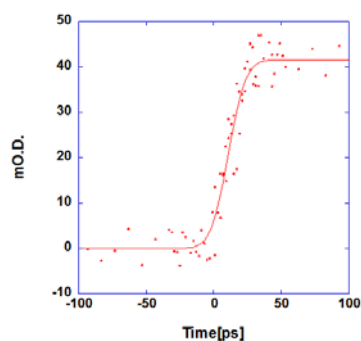


図4 波長 800nm における水和電子の立ち上がり測定

^[5]の報告においてはピコ秒測定時に、非常に高い電荷量の電子ビームを得ることができていたが、残念ながら今回の測定時には当時ほど高い電荷量を得ることができなかった。

そこで電荷量の低下を補いO.D.を増強することを考えた。O.D.の定義式(1)より、光路長がn倍になればO.D.もn倍になる。SC光はスポットサイズが小さく、指向性が高いためセルを複数回通過してもス

ポットサイズがほとんど広がらない。また光が試料セルを複数回通過するのに要する時間はせいぜい数百ピコ～ナノ秒程度であるため、ナノ秒パルスラジオリシスシステムにおいては光路遅延の影響はほぼ無視して考えることができる。SC光を分析光に使い、試料セルを分析光が通過する回数を変えながら波長 800nm における水和電子の O.D.測定を行い、図5に示す通りシグナルが通過回数に比例して増強することを確認できた。

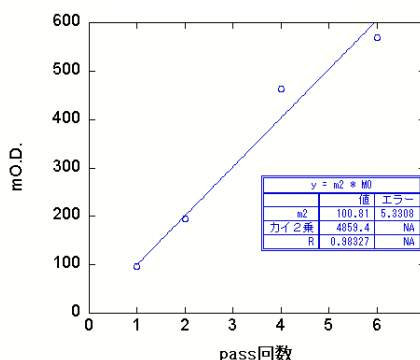


図5 セル複数パスによる O.D.増強

4. MRT 用マイクロビーム生成

4.1 MRT (Microbeam Radiation Therapy) とは

MRT とはすだれ状に切り出されたマイクロビームをガン細胞に照射することで、正常組織への放射線影響を抑えつつガン細胞のみを選択的に死滅させることのできる、現在研究中のガン治療の治療法である。大型の放射光施設を用いた X 線 MRT の研究は報告されている^[6]が、実際に病院へ導入することを考慮すると現状の MRT 施設は大規模過ぎる。

そこで小型なフォトカソード RF-Gun でも十分な線量を得ることのできる、電子線 MRT の検討を行った。電子線は X 線に比べ、飛程こそ短いですが皮膚表面であれば十分な治療効果が期待できると考えた。電子線 MRT を実現するためには、生体内でのビーム拡がりをも最小限に抑え、照射部と非照射部の線量比(pv 比)をなるべく高くする必要がある。生体照射に先立ち、マイクロビームの特性と照射条件の検討を行った。

本研究室でのマイクロビームの生成には、四重極電磁石とスリットを用いた。フォトカソード RF-Gun で生成した電子ビームを四重極電磁石で縦長に絞った後、幅数十 μm のスリットでビームを平行に切り出した。スリット幅はマイクロステージを用い変更可能である。

4.2 GAFCHROMIC FILM を用いたマイクロビーム評価試験

ビームの分布や線量の評価には、GAFCHROMIC FILM という放射線照射に対して着色するフィルム

を用いた。GAFCHROMIC FILM の実効原子番号・密度は人体に近く、生体内でのビームの反応に近いとみなすことができる。まずこのフィルムの特性を確認するため、フィルムへの照射線量(照射時間)を変化させながらフィルムの濃度の変化を見積ること、検量線を作成した。結果を図 6 に示す。実際にマイクロビームをフィルム照射する際には、この検量線を基に線量評価を行った。

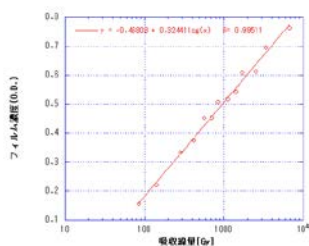


図 6 線量とフィルム濃度の関係

4.3 マルチ照射実験

スリット切り出しにより得られたシングルマイクロビームを、数百 μm ステップで左右にフィルムを移動しながら照射することによりマルチ照射を擬似的に再現した。図 7 はその測定例である。照射間隔とスリット幅を変えながら、それぞれフィルムを用いて pv 比の測定を行った結果を表 2 に、斜めにおいたフィルムとアクリル板を用いて深さ方向での pv 比変化の測定結果を表 3 にそれぞれ示す。スリット幅 20-30 μm 、照射間隔 400-500 μm では、生体表面付近において十分に高い pv 比(10 以上)を得ることができた。

表 2 マルチ照射における線幅、線間隔と pv 比

設定幅 [μm]	照射間隔 [μm]	測定幅 [μm]	pv 比
20	300	25	34.4
20	400	37	131
30	500	59	16.7

表 3 アクリル板を用いた深さ方向の pv 比

スリット幅 [μm]	照射間隔 [μm]	測定幅 [μm]	pv 比 (深さ 0.5mm)	pv 比 (深さ 1mm)
20	20	30	11.3	8.67
30	500	400	26.8	16.7
30	400	400	20.1	5.94
30	500	500	24.2	12.6

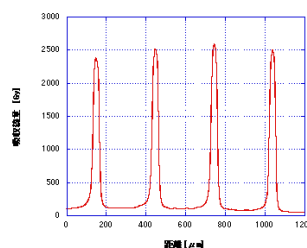


図 7 マルチ照射実験例

5. まとめと今後の予定

本研究室では、早稲田大学喜久井町キャンパスに設置しているピコ秒パルスレーザーと Cs-Te をフォトカソードに用いた RF-Gun を用いて、高品質電子ビームの生成とその電子ビームを利用した応用研究を行ってきた。

パルスラジオリシス研究として、システム構築と水和電子を試料に用いたシステム評価を行った。ナノ秒システムにおいて、SC 光の指向性を生かしたセル複数回セットアップを構築し、シグナルが通過回数に比例して増強することを確認できた。現在、光信号を増幅する検出器の導入を検討している。光信号を増幅することにより、検出器の熱ノイズやビームからの放射線ノイズの影響を抑え、精度の高い測定を行うことが期待される。

MRT 研究として、X 線より飛程が短いものの、小型加速器でも十分高い線量を得る事のできる電子線 MRT の検討を行った。スリットで切り出した電子ビームと平行移動ステージを用い、擬似的にマルチ照射の実現に成功、最適な照射条件の検討を行った。今後実際にマウスに照射することによる放射線治療効果研究に用いる予定である。

また、応用実験をより効果的に行うためにはビームパラメータを精度よく計測することも重要である。特に、RF-Deflector を用いた電子ビームのバンチ長測定について本研究室の西村氏が今回発表しているのでそちらも参照されたい。^[7]

参考文献

- [1] K. Sakaue et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THPS105, 2010.
- [2] Y. Yokoyama et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUPS036, 2011
- [3] E.J.Hart et al., Journal of the American Chemical Society 84, 4090, 1962
- [4] S. Tagawa et al., Chemical Physics Letters, 64, 258, 1979
- [5] R. Betto et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOPS144, 2011
- [6] Slatkin et al., Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 92, 8783, 1995
- [7] Y. Nishimura et al., Proceedings of this conference, WEPS088, 2012