

STATUS OF THE PHOTOCATHODE ELECTRON RF GUN APPLICATION STUDIES AT WASEDA UNIVERSITY*

Kazuyuki Sakaue^{†A)}, Tatsuro Aoki^{A)}, Junji Urakawa^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{C)}, Ryunosuke Kuroda^{D)},
 Kunio Shinohara^{A)}, Tatsuya Suzuki^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Hitoshi Hayano^{B)},
 Ryosuke Betto^{A)}, Yuji Hosaka^{A)}, Yukihisa Yokoyama^{A)}, 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

We have been developing a high quality electron rf gun for application researches. As an application researches, we are performing soft x-ray generation via laser-Compton scattering and pulse radiolysis researches for studying early reactions of radiation chemistry. They were seemed to be possible due to the successful installation of Cs-Te photocathode. Recently, we are studying about new technique for both applications, such as nano-bunched electron beam production for coherent laser-Compton scattering and super continuum light generation by photonic crystal fiber. Moreover, we are considering our rf gun for applying for cancer treatments using fine flat parallel gamma-ray beam. The status of our rf electron gun and results of application researches will be presented at the conference.

早稲田大学フォトカソードRF電子銃における応用研究の現状と今後の展望

1. はじめに

早稲田大学ではレーザーフォトカソードRF電子銃によって高品質な電子ビームを生成し、その応用研究として、レーザーコンプトン散乱軟X線生成研究・パルスラジオリシス研究・放射線医療へ向けた基礎研究などを行っている。フォトカソードとして、高量子効率なCs-Teを採用することに成功したことを受け、^[1] 応用研究の幅を広げることが出来たとともにさらなるステップアップを進めている。

レーザーコンプトン散乱研究としては、これまでの問題であったX線収量を増大させるために電子ビームのマイクロバンチングによるコヒーレントコンプトンX線生成の実証試験を検討している。マイクロバンチングの手法としては、ナノメートルレベルの空間フィルタと横方向と縦方向を変換するキッカー空胴を利用する“Slit & Kick法”を利用する予定で、現在設計研究を進めている。まずは、長波長のレーザーと数100nm程度のナノバンチ生成によって真空紫外領域でのコヒーレントコンプトン光の生成から始める予定である。放射線化学過程解明のためのパルスラジオリシス研究では、スーパーコンティニウム光を用いたシステムの開発状況を、がん治療応用へ向けた放射線源として、微小平板ビーム生成を行っている。本研究会では、早稲田大学加速器システムの現状及びそれぞれの応用研究に関する現状と今後の展望を報告する。

2. 早稲田大学CS-TE RF電子銃システム

早稲田大学ではレーザーフォトカソードRF電子銃開発を行ってきており、最近では改良型RF電子銃空胴の早稲田大学への設置及びCs-Teカソードでの電子ビーム安定生成を行った。^[1] その結果図1に示すような高輝度電子ビームを生成することに成功している。図2に

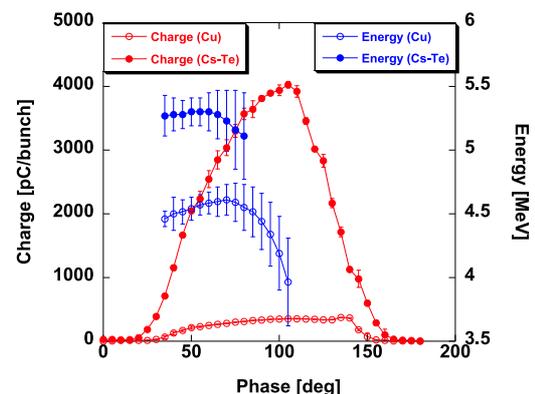


図1: Cs-TeカソードRF電子銃において測定した位相プロット

は、空胴への入射RFパワーに対する電子ビームのエネルギーを示す。空胴のQ値が大幅に改善されたことにより、加速効率が2割程度向上している。詳細は^[2]を参照されたい。

この成功を受け、我々はマルチバンチ電子ビーム生成

* Work supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (A) 10001690, (B) 09005349, and JST Quantum Beam Program

[†] kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

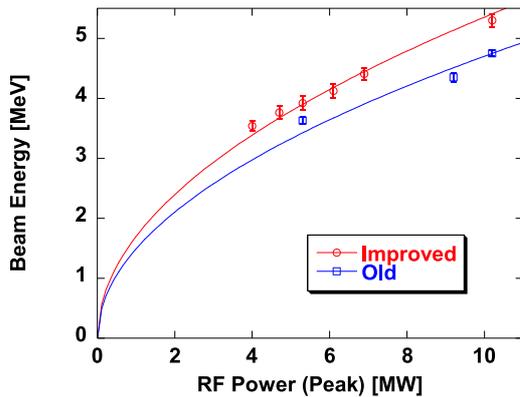


図 2: 空胴に印加する RF パワーに対する生成電子ビームエネルギー

に取り組み始めた。フォトカソード RF 電子銃では、カソード照射用の UV レーザーをパルス列に生成することによって、マルチバンチビームの生成が可能である。これまでに、以下の図 3 に示すようなレーザーシステムを構築し、マルチバンチビーム生成に至っている。モードロックレーザーから生成された 119MHz の

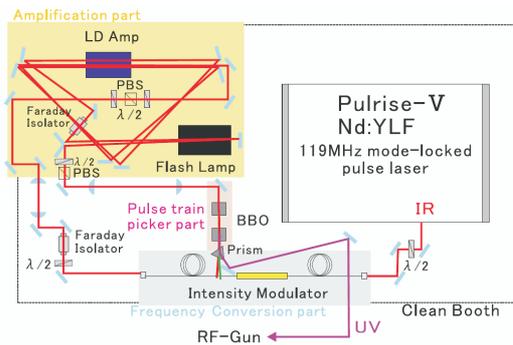


図 3: パルス列 UV レーザーシステムの構成図

パルスレーザーは一度ファイバ内に導入され、LN 変調器によってパルス列に強度変調を受ける。その後、LD 励起の増幅モジュール・フラッシュランプ励起の増幅モジュールを通過し、波長変換されて UV 光となる。これによって生成したマルチバンチ電子ビームの信号を以下に示す。100bunches/train のマルチバンチビームの生成に成功し、そのエネルギー補正に関して RF 強度変調法によって実現している。詳細は本研究会の [3] を参照いただきたい。

3. RF 電子銃を用いた応用研究

以上のように、シングルバンチ運転・マルチバンチ運転ともに順調に研究が進行しており、これらを用いた応用研究を開始し始めている。我々が現状行っているビーム応用研究としては、

- レーザーコンプトン散乱による軟 X 線生成
- 放射線反応の解析のためのパルスラジオリシス実験
- ガン治療のための微小平板ビーム生成

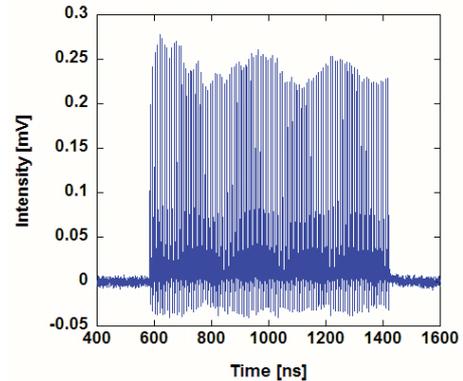


図 4: FCT を用いて測定したマルチバンチビームの信号

である。以下、項目ごとにその現状について述べる。

3.1 レーザーコンプトン散乱による軟 X 線生成

我々はすでに 5MeV の電子ビームと 1047nm のレーザー光を衝突させることによって軟 X 線領域の X 線生成・検出に成功している。[4] 最終的な目標は軟 X 線顕微鏡としての利用研究であるが、そのために必要な X 線量 (100nm の分解能を要求) と比較すると約 5 桁の収量の向上が必要となる。そこで電子ビームのマルチバンチ化によって単位時間あたりの相互作用回数を向上させるとともに、電子ビームのナノバンチ化によって位相の揃った軟 X 線の生成を検討している。電子ビームから生成する光の波長に対して、電子ビームの進行方向の長さが十分短い場合には生成光の位相が揃い、電子の数に比例した光強度でなく、電子数の 2 乗に比例した光強度が得られることが知られている。ただし、本研究の場合にはバンチ長をナノメートル以下にする必要があるため、直接バンチングによって実現することは極めて困難である。そこで、以下の図 5 の概念図のような手法を用いて電子ビームの進行方向に生成波長と一致した強度分布を生成することで、コヒーレントな光を生成することを検討している。最先端の微細加工技術を用いるこ

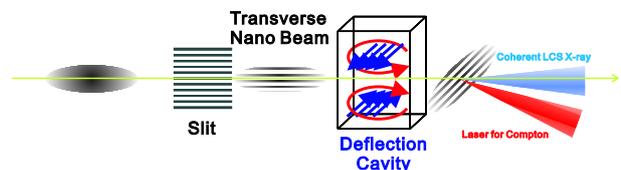


図 5: Slit & Kick 法概念図

とで、 $1\mu\text{m}$ を切るスリットを作製することは容易に可能である。そこで、その微細スリットによって電子ビームの横方向にナノメートルオーダーの強度変調を施す。その電子ビームを偏向空胴、Deflecting Cavity を通すことで横方向と縦方向を交換する。偏向された電子ビームの中心のみを用いれば、進行方向にナノメートルの濃淡のついた電子とレーザーとのレーザーコンプトン散乱が可能である。我々はこの手法を“Slit & Kick 法”と呼んでいる。

これまでにナノスリットを作製を開始しており、まずは $1\mu\text{m}$ 幅での横方向強度分布の実現を目指す。また、

本 Slit & Kick 法は検討段階であり、より良い手法・本手法の最適化を行っていく予定である。

3.2 放射線反応の解析のためのパルスラジオリシス実験

パルスラジオリシス研究としては、これまでにナノ秒の分解能^[5]、ピコ秒分解能^[6]システムを構築してきた。しかしながら、生成量の少ない放射線生成物を観測したり、未知の生成物に対して詳細な解析を行うためには不十分であった。特に問題となっていたのが、生成物をプローブするスペクトルの広いプローブ光の強度変動であり、この点を改善することが必須事項であった。そこで我々は Photonic Crystal Fiber (PCF) を用いたスーパーコンティニウム光をプローブとして用いることを検討した。PCF はエアホールを空けることでクラッド部を形成し、コア部として高非線形性を有する材質を採用することが可能なファイバである。ファイバ自身が高非線形性を有するため、そのファイバを通すだけで非線形効果によってスペクトルの広いスーパーコンティニウム光が生成される。この手法によって生成したスーパーコンティニウム光のスペクトルを以下に示す。入射光と

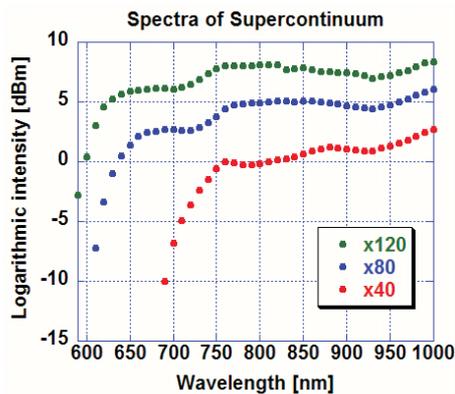


図 6: 生成したスーパーコンティニウム光のスペクトル

しては、357MHz の繰り返しのモードロックパルスレーザー、媒質 Nd:VAN、パルス幅 7ps (FWHM) を使い、外部で増幅してからファイバに入射しており、その増幅率に応じてプロットしている。1064nm の波長のレーザー光が 600nm 以上でブロードなスペクトルを持つ白色光に変換されているのがわかる。10m のファイバを通してため、分散の影響から多少パルス幅が広がっていると予想されるものの、10ps 程度のパルス幅の白色スーパーコンティニウム光を生成することに成功した。強度の揺れとしては、これまでのものに比べて 2 倍程度改善することに成功したが、入射パルス強度が小さければ小さいだけ強度の揺れが増大していくことが以下の図 7 からわかる。今後、ファイバ長や入射レーザーパルス強度の最適化によってさらに改善できると期待している。

このスーパーコンティニウム光の成功を受けてまずはナノ秒分解能での測定を行った。これまでのナノ秒分解能システムのプローブ光である Xe ランプに代えて SC 光を用い、水和電子の生成を測定した結果を以下の図 8・9 に示す。図 8 は波長 920nm における水和電子の吸収の時間挙動を示している。図を見て分かるようにプローブ光の強度揺れの小さい 920nm ではきれいな時間挙動波形が得られていることが分かる。これらの時間

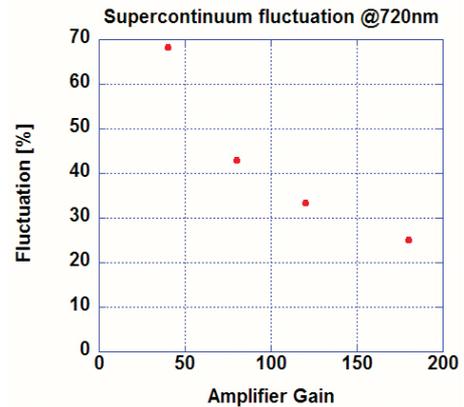


図 7: 外部増幅器ゲイン毎の SC 光の強度揺れ

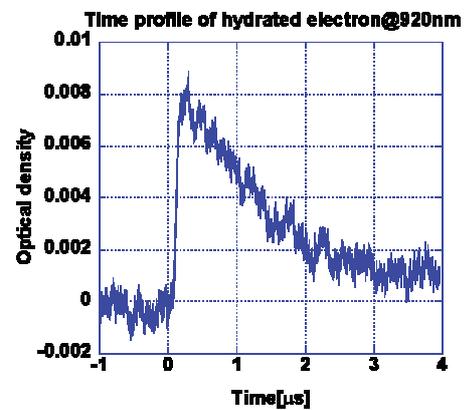


図 8: SC 光プローブによる水和電子の時間挙動測定 (920nm)

挙動グラフから算出した光吸収量をスペクトルごとにプロットしたものが図 9 である。短波長側になるにしたがってエラーバーが大きく、詳細な測定が出来ていないことがわかる。これは SC 光の強度揺れに起因する。今後の SC 光生成の最適化が課題となる。

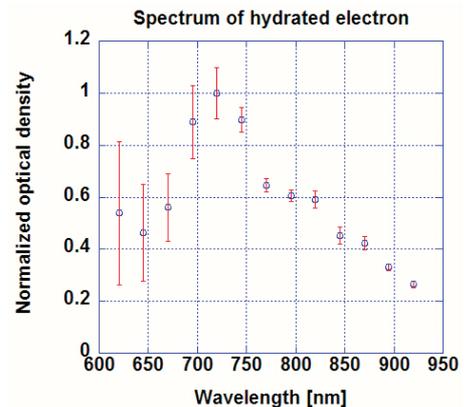


図 9: SC 光プローブによる水和電子の吸収スペクトル

3.3 ガン治療のための微小平行平板ビーム生成

現在医療の分野においてガン治療のために放射線治療が用いられている。ガン細胞に放射線を照射することによって腫瘍組織を破壊することを目的としており、この放射線を生成する治療装置として電子線形加速器などが用いられている。この放射線治療の際に微小平板状のビーム、数十 μm 幅の放射線ビームを用いることで正常細胞への影響を小さくし、ガン細胞を選択的に破壊できることが報告されている。^[7] 一回の線量 625Gy でも皮膚にはほとんど放射線障害が残らず担癌動物に延命効果が見られるという報告もある。^[8]

このような微小平板ビームは指向性の良い放射光のような装置を用いてのみ効率的に生成することができるため、これまでの研究は主に放射光施設において行われてきた。しかしながら実際に現場でこのような治療を考えた場合には、これまで用いられているような小型な装置で微小平板ビームを生成する必要がある。そこで我々はマルチバンチビームの生成によって大強度な電子ビームを得られたため、このような微小平板ビーム生成試験を始めている。これによってまずは低線量でも微小平板ビームを生成し、放射光で生成したものと同様の特徴・指向性があるかを確認することを目的としている。

まずは電子ビームによって治療用放射線である制動放射光を生成し、線量を測定することから着手した。ターゲットとしては、シミュレーションによって厚さを最適化したタンタル板 (厚さ 2mm) を用いた。電子ビームの電流量に対する線量の測定結果を図 10 に、ターゲットから 120mm 下流での制動放射線のプロファイルを図 11 に示す。線量の測定には電離箱を用い、カソードへの

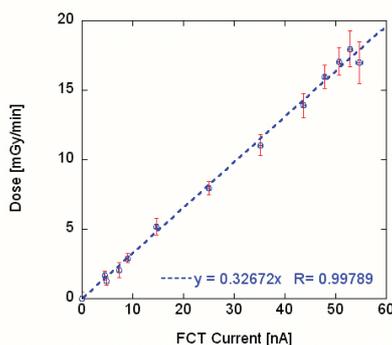


図 10: 電子ビーム電流量に対する制動放射光線量測定結果

入射レーザー強度を変えることによってビーム電流量を調整した。実際にビーム電流に比例した線量が生成されていることがわかる。また、図 11 より制動放射光の発散角が算出できる。予想していた通りではあるが、発散角は 365mrad と大きく、微小平板で切り出した場合には効率が非常に低いことが予想される。

現在、微小平板切り出し用のスリットシステムは製作中であり、まずは太い幅から平板ビームを生成し、その評価を行っていく予定である。

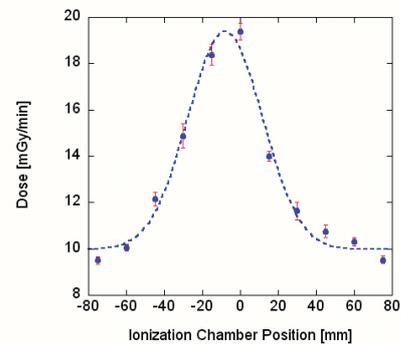


図 11: 120mm 下流での制動放射光のプロファイル

4. まとめと今後の課題

我々は早稲田大学喜久井町キャンパスに設置しているレーザーフォトカソード RF 電子銃を用いて様々な応用研究を行っている。RF 電子銃空洞・フォトカソード材料を改善したことによって応用研究に対しても様々な展開が可能となっており、新たな試みや新たな応用実験も始めているところである。レーザーコンプトン散乱としては、ナノバンチ生成を利用したコヒーレント X 線生成の検討を始めており、Slit & Kick 法という新たな手法を提案した。パルスラジオリシス研究としては、プローブ光として新しい材料である PCF を用いたシステム構築を開始しており、すでに一定の成果を挙げるとともに今後の展開が期待できる。新たに始めた応用研究として、ガン治療を目指した微小平板ビーム生成に関しても言及した。正常細胞と癌細胞を選択する手法として放射線の形状のみを用いる非常にユニークな手法であり、電子銃のみで生成した電子ビームによってこのような微小平板ビームが生成できれば非常に大きなインパクトを与える研究になりうる。今後、これらの応用研究を推進するとともに、いまだ十分でないマルチバンチビーム生成システムの改善やビームの性能評価など行っていく予定である。

参考文献

- [1] K. Sakaue et al., Proc. of Part. Accel. Soc. Meeting 2009, 592 (2009).
- [2] Y. Kato et al., Proc. of LINAC Conference 2008, 624 (2008).
- [3] Y. Yokoyama et al., Proc. of this conference, WEPS092.
- [4] K. Sakaue et al., Rad. Phys. Chem., 77, 1136 (2008).
- [5] A. Fujita et al., Proc. of PAC '09, TU6PFP027 (2009).
- [6] H. Nagai et al., Nucl. Instrum. Meth. B, 265, 82 (2007).
- [7] Slatkin, et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA 92, 8783 (1995).
- [8] Laissue JA, et al., Int. J. Cancer 78, 654 (1998).