

コンパクト高品質量子ビーム源の開発と利用

早稲田大学理工学術院総合研究所 鷲尾方一

After the approval of the project as the “High-Tech Research Center Project” conducted by MEXT at Waseda University, the laser driven photo-cathode RF-Gun (RF-Gun) has been developed very extensively. The system was developed to obtain the stable and high quality (i.e. very low emittance) electron beam in conjunction with the system stabilization such as RF power source and laser system for the electron emission. The high quality electron beams have been applied for the development of novel beam diagnostic system. At the same time, the beams (electron and laser) are applied for the inverse Compton scattering experiment for the generation of soft-X-ray with quasi-monochromatic energy and short time structure, and for the pump probe experiment (the pico-second pulse radiolysis) as the very compact system.

Key words: RF-Gun, High Quality Beam, Inverse Compton Scattering, Pulse Radiolysis, Beam Application

1. はじめに

レーザーフォトカソード RF 電子銃 (RF-gun) をベースとした、高品質電子ビーム装置の究極の性能を目指し、世界最小クラスの 5MeV の加速エネルギーを持つレーザーフォトカソード RF 電子銃の開発、更に当該装置からの電子ビーム発生的高度制御方法と発生電子の計測、更には高輝度レーザービームとの衝突を通じた実験室サ

イズでありながら、高輝度、準単色の軟 X 線発生、超短パルス電子を用いたポンププローブ法による超高速物理解化学反応追跡ツールとしてのパルスラジオリシスシステム開発を実施してきた。また、高品質ビームと高輝度レーザーの衝突によって得られる軟 X 線の生成と応用についても検討を加えてきた。これらの研究開発はそれぞれに相当な進捗がみられ、今後更にこの分野のさきがけとなる多くの研究成果が得られている。

2. RF ガン開発の歴史的経緯

RF-Gun は、1984 年に Maday と Westenskow によって提案された¹⁾。高周波を RF 空洞に印加することによりカソード表面に 100 MV/m もの高い電場をかけることができるため、カソードから放出された電子を速やかに相対論的領域まで加速することができる。このため、従来の熱電子銃では達成し得なかった高エネルギー、低エミッタンス(ビームの広がり)とサイズに関連した量で、小さければ小さいほど品質が良い)で超短パルス電子ビームを発生することができるシステムとして、世界各国で研究開発が行われ、高エネルギー加速装置の入射器として、また医療、産業、科学技術研究等の様々な分野における電子ビーム利用において極めて重要な役割を果たし始めている^{2,3)}。このような新しい加速器を国内で最初に実用化したわれわれのグループにおける開発の経緯をここで簡単に紹介しておきたい。

筆者は 1989 年まで東京大学の原子力工学研究施設において巨大なライナックシステムを用いてパルスラジオリシスによる放射線化学反応の初期過程の研究を行っていたが、当時の同僚、吉田陽一博士(現大阪大学産業科学研究所・教授)とテーブルトップのパルスラジオリシスシステムがなんとかできないものかといった話をしていた。わけあって筆者は 1989 年に住友重機械工業へ移籍し、加速器応用の研究を担当するようになった。ここで何年かにわたって、加速器による医療用具滅菌シ

Development of compact quantum beam generation system and the application

Masakazu Washio (*Research Institute for Science and Engineering, Waseda University*)

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院総合研究所

TEL: 03-5286-3893, FAX: 03-3205-0723

E-mail: washiom@waseda.jp

システムや新しい産業用加速器 (250keV WIPL) の開発に従事していた。このように加速器の先端応用について種々検討していた経緯から NEDO の先導研究 (のちにフェムト秒テクノロジー) に参画し、コンパクトな高エネルギー加速器の必要性について議論を続けていた。このような折、KEK 小方教授よりフォトカソード型の RF 電子銃の開発の相談を受け、NEDO プロジェクトとの絡みで RF-Gun 開発を真剣に検討するようになった。1995 年当時すでに米国では多くの研究所において RF-Gun の原型ともいえる装置が稼働を始めていた。また一方で高品質電子ビームとレーザーとの間での逆コンプトン散乱による X 線発生⁴⁾がきわめて高いエネルギーの X 線発生に有効であるとの結論に達し、小型の RF-Gun を我々の手で日本に導入しようと考え始めた。この時点で、日本国内においてもすでに RF-Gun の基本的なシステム開発がおこなわれたとの情報を得て、現場にも足を運んだ。その結果日本国内でのみ開発を行うことは極めてリスクが大きいとの結論に達していた。このために当時 RF-Gun の開発において先駆的な研究を行っていた BNL (Brookhaven National Laboratory) に協力を求めることとして、KEK 中西教授らとニューヨークへわたり、RF-Gun の共同開発を行うこととなった。その後この共同開発は非常にうまく機能し、1 号機を KEK (のちに東大で試験実施) に納入、2 号機を NEDO のフェムト秒テクノロジーのプロジェクトにおける逆コンプトン散乱実験のための電子源として利用を始めることができた。この時点で吉田博士との約束であったテーブルトップの小型加速器を実現できたことになる。

3. RF-Gun システム開発とビーム計測⁵⁻¹³⁾

以上のような経緯を経て、早稲田大学において、大学の一研究室においても実現可能な汎用的装置として RF-Gun をとらえ、放射線化学研究を実施する中核装置とすることとした。すなわちテーブルトップサイズの電子ビーム源が科学技術の進展に極めて重要であると言う立場に立ち、文部科学省の支援を受け、ハイテクリサーチセンタープロジェクトの一環で RF 電子銃の開発と応用を進めることとした。具体的には、テーブルトップサイズで相対論的領域まで加速できる高品質電子ビームの生成を行いその多方面への利用 (逆コンプトン散乱による軟 X 線生成とピコ秒パルスラジオリシシステム開発) を目的として研究を進めた。

まず電子ビーム源である小型加速器としては、BNL タイプの 1.6 セル S-band RF-gun をベースに、システム構築をおこなった。ここでは 1 号機以降に行ってきた装置開発の概要も含めて紹介したい。

図 1 に RF ガンのイメージ図を示す。この装置の特徴として次のような点を挙げる事ができる。

- ①高輝度の UV レーザーによる光電効果によって電子ビームを生成するので、電子発生のための絶縁トランスや高電圧デッキに対する制御信号等が不要になるため、システムが非常にコンパクトになる。
- ②発生する電子の時間構造は照射レーザーのパルス形状を反映するので、特別のバンチング(集群)システムを必要としない。この点でもシステムのコンパクト性が更に向上する。
- ③発生した電子は極めて短距離で相対論的な速度に達するので、ビームの質 (エミッタンス) を非常によい状態のまま取り出せる。

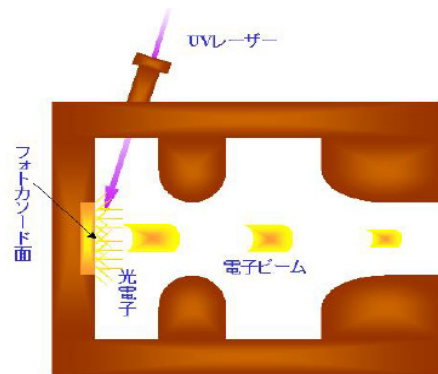


図1 フォトカソード RF ガンのイメージ

このように、従来の加速器では実現できなかった数々のメリットを挙げる事ができるが、逆に従来の加速器技術をそのまま転用する事では RF ガンの優れた性能を実現できないため、このシステム開発に乗り出すために、周辺技術の進歩が不可欠であった。RF ガンを安定に運転するための要素技術としては、RF パワーシステムの安定化、電子発生用レーザーの安定化、それぞれの時間揺らぎの制御、そして作製した空洞の表面状態と平滑性等を挙げる事ができる。つまりこれらの技術革新が実現できる事によりこの加速器の優れた性能を実現することができることとなる。

そこで我々は、RF パワーシステムの安定化については FEL 用加速器として非常に高い性能を持つパルスフォ

ーミングネットワーク回路を提唱していた日新電機のグループと電源の安定化技術について検討を加え、その結果、出力電圧の安定性は全幅で 0.38% (20,000 パルスあたり) および平坦度 0.25% 達成した。この値は、比較的安価な RF システムとしては飛びぬけた値であった。

またレーザーの安定化についても、Nd:YLF レーザーで非常に安定性の高いシステム構築が可能となるバックグラウンドが本システムの実現に大きな追い風となった。レーザーの安定化については 2 つの側面があり、それぞれに安定性を議論しなければならない。一つは出力の安定化であり、もう一つは取り出し時間の揺らぎの最小化である。これについては、住友重機械工業のグループの力に負うところが大きかったが、出力については 1/2λ プレートに出力フィードバックをかけることで実現できた。また時間安定性については現在では当たり前用いられている技術であるが、過飽和吸収ミラーとピエゾ素子を組み合わせたシードレーザシステムを構築した。これらの開発の結果、出力安定度 0.65% (rms) と時間安定度 0.16ps を達成する事ができた。細かい話になるが、時間の安定性と出力の安定性はともに電子ビームのエネルギーや電荷量、タイミング等、種々の実験に供用する重要なパラメータを常に安定に保つために非常に重要な制御項目である。

さて空洞の表面状態と平滑性についての議論であるが、これについてはまだ最終的な結論は出ていないと思われるが、我々が検討し実現してきた事について簡単に触れる。空洞には前述したように 100MV/m もの大きな電界がかかる。そのために容易に放電やフィールドエミッションの発生が起ってしまう。それを防ぐ方法として、いくつかのチャレンジを行った。一つは使用する銅の材料の純度を高くする(無酸素銅クラス 1) ことと、加工前にその材料の高温高圧下で HIP 処理(結晶粒界をできる限りつぶす)を行った。加工は最終的には単結晶のダイヤモンドバイトの機械仕上げとした。面精度は 1μm をはるかに下回るいわゆるナノ加工に突入していた。ただ、切削にはどうしても潤滑油が必要であったため、その使用については目をつぶり、切削後に空洞をヘキサソ中で超音波洗浄することとした。これらの処理により、100MV/m の高い電界を安定に供給する事ができるようになり、RF ガンの持つポテンシャルを充分引き出す事に成功した。

これらの開発を通じ製作した RF ガンのカソードに Nd:YLF レーザーからのピコ秒 UV 光を照射し、実際に

生成加速された電子バンチの詳細について精密な計測を行った。まず、RF ガンから得られる電子ビームは非常にエミッタンス(進行方向と直交する面方向への運動量・ビームの広がりーとビームサイズが構成する位相空間における面積; ビームの質を表現する物理量) が小さいことが期待されていたが、実際にその値についての検討を行った。我々が開発した RF ガンは最大エネルギーが高々 6MeV 程度であり、その速度が相対論的領域に入っているものの、電荷同士の相互作用時間は相対論的ファクターの逆数 ($1/\gamma$) に比例するので、まだまだその影響が大きく出てしまう。そのためエミッタンス計測の方法としてよく知られている Q スキャン法(四重極マグネットによる集束でビームサイズを計測しそれからエミッタンスを逆算する方法)をとると、集束時にスペースチャージの影響を強く受けるため、この方式をとることができない。そこで我々は電子ビームが完全に止まる厚さの金属を用いてスリットを 2 組(1 組目で空間を切り、2 組目で広がり切りその電荷量を計測し、これをビームがある領域全体で繰り返し計測し、それをもとの空間に焼きなおす)構成し、それによりエミッタンスの精密計測を行った。また同時にレーザーの入射方法(垂直入射と斜め入射) およびビームの電荷量によってエミッタンスがどのように変化するか、についても調べた。その結果を図 2 に示す。

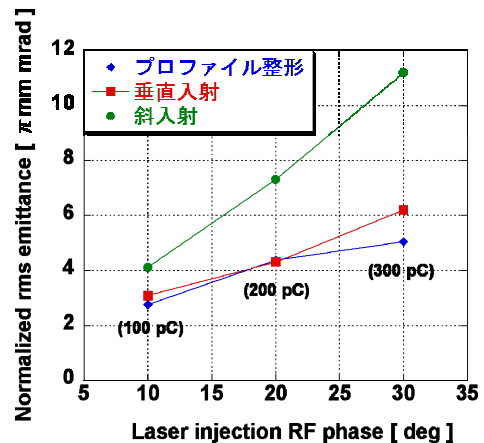


図2 エミッタンスの計測結果(プロファイル整形は斜め入射でカソード表面において完全円形のレーザープロファイルとなるよう調整したもの)

従来の加速器におけるエミッタンスは一般的に $100 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 程度であることが知られているが、ここでは 1 桁以上良好な値が得られており、この装置の高い性能を示すことができた。

4. 逆コンプトン散乱システムの高度化¹⁴⁾

逆コンプトン散乱は高エネルギーの電子によってレーザーなどの低エネルギーの光子を弾性散乱することによって高エネルギーの光子を生成する技術^{4, 15, 16)}であり、コンパクトな装置によって高品質な X 線を生成する技術として注目されている。我々の装置(実験時 4.5MeV 電子ビームと 1047nm レーザー光)によって生成される X 線のエネルギーは約 400eV で、水の窓と呼ばれるエネルギー領域(図 3)の X 線である。水の窓とは、水による X 線の吸収が少ないだけでなく、生体を構成する元素である炭素・窒素・酸素の吸収端が含まれる領域で、生体観測用の軟 X 線顕微鏡としての利用が期待される。

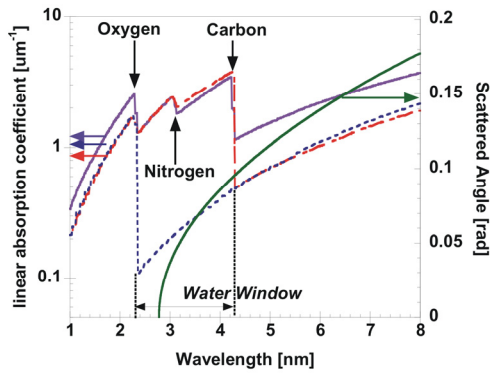


図 3 生成 X 線エネルギーと水の窓領域

4.1 軟 X 線生成システム

図 4 に早稲田大学加速器を用いた軟 X 線生成装置の概念図を示す。

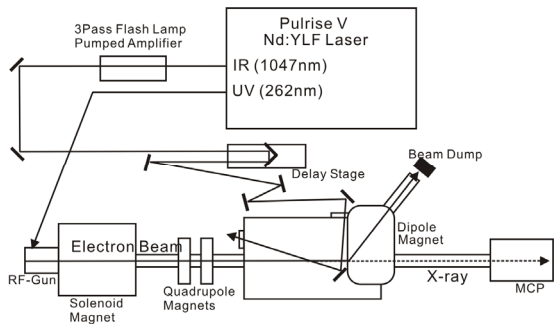


図 4. 逆コンプトン散乱による逆コンプトン散乱 X 線生成システム

この実験においては、電子・レーザーの専用の衝突用真空容器を新規に作製し、バックグラウンド (BG; 制動放射等のノイズ) の徹底した削減を行うとともに衝突角度が変更できるようにしてある。また、レーザー増幅装置も新たに開発し強度の高いレーザー光を生成するために 3Pass の増幅システムを構築し、最大 40mJ/Pulse までの増幅に成功している。電子ビームとしては、前述のように高品質化を行ったことによってより密度の大きい電子ビームを衝突点で生成することができている。X 線検出器としては、マイクロチャンネルプレート(MCP)を用いている。

4.2 軟 X 線生成

前述のようなシステムにおいて X 線生成試験を行った。図 5 に MCP によって検出された X 線と BG の信号を示す。

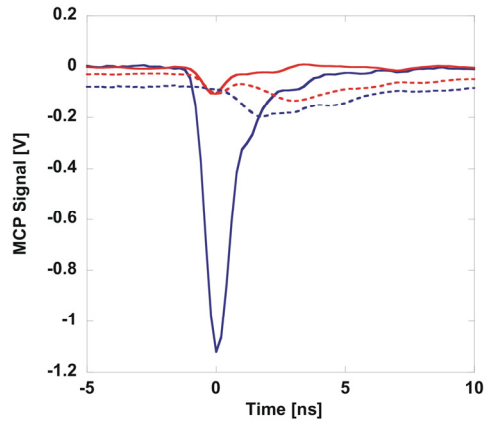


図 5 検出された X 線信号

赤線が改良前、青線が改良後の信号を示しており、実線は X 線信号、点線はそのときの BG 信号を示している。改良前は 1 程度だった S/N がほとんどビームに起因する BG がなくなり、暗電流をペデスタルとして無視すれば 100 を超える S/N が得られている。これはビームが衝突点後に発散する前に偏光電磁石で曲げる構成にした点と、レーザー増幅によって X 線自身の生成量も増えたことに起因する。このようにして得られた X 線信号の衝突タイミングによるプロットを図 6 に示す。

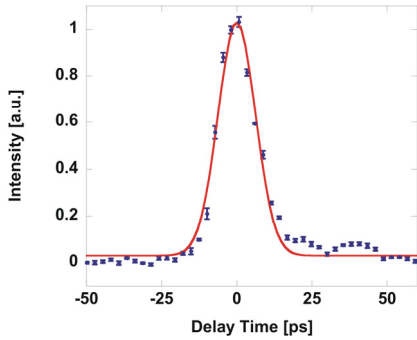


図6 生成 X 線のコリレーションプロット

これからわかるように X 線が生成されている時間幅が約 15ps になっており、電子バンチ長とレーザーパルス幅のコリレーションにほぼ一致する。

4.3 電子ビーム-レーザーパルスの衝突状態の測定

上記のように高い S/N の X 線シグナルが得られるようになったため、様々な測定が可能になった。まず、レーザーの衝突点における位置を変化させて X 線強度の変化を測定することにより、電子ビームの衝突点でのサイズを知ることができる。図 7 に垂直方向(上)変化と水平方向(下)変化の測定結果を示す。

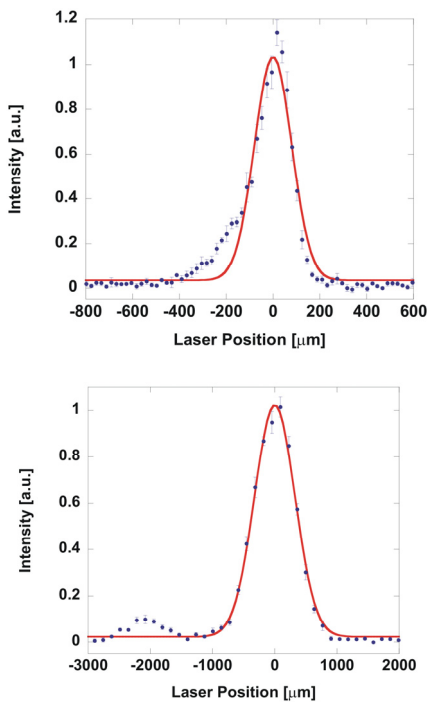


図7 逆コンプトン散乱による電子ビームサイズ測定

垂直方向の相関幅は 80 μm 、水平方向は 325 μm で、レーザーのサイズである 42 μm をデコンボリューションすると、電子ビームサイズが 56 μm (垂直) \times 251 μm (水平)であることが算出できる。垂直方向を重点的に集束しているのは、水平面で約 20 度の角度で衝突しているために、このような扁平ビームの方がより多くの X 線を生成できるためである。これらの計測結果は従来ビーム計測に用いていた蛍光板を用いた計測に比べはるかに精度のよい実験が可能であることも示されている。

次に衝突角度を変化させることによる生成 X 線数の変化を測定した結果を図 8 に示す。

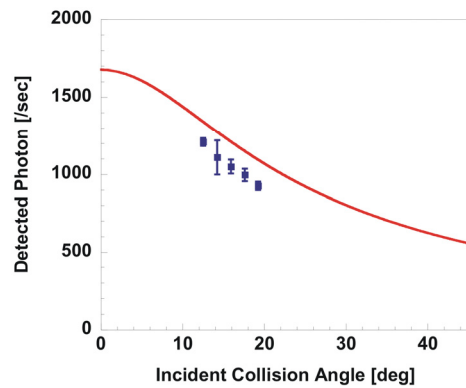


図8 衝突角度による生成 X 線数の変化

図中のプロットが測定結果、実線が計算結果である。計算結果よりも少し小さい値であるが、変化の傾向はよく一致していることがわかる。これは衝突角度によって電子ビームとレーザー光の衝突のルミノシティが変化することに起因する。

5. パルスラジオリシスシステム開発^{17,18)}

我々はストロボスコピック法によるピコ秒の分解能を持つパルスラジオリシスシステムを構築してきた。¹⁷⁾しかしながら、未だ様々な中間活性種を計測するためには S/N など不十分な点があり、様々な改良を行うことによって実用レベルへの改良を試みた。なお、現在では RF-Gun のアップグレードを行っており、ここでは Cu カソード (量子収率約 10^{-4}) のケースと改良後の Cs-Te カソード (量子効率約 10^{-2}) による結果を併せて示す。

我々の構築したピコ秒パルスラジオリシスシステムを以下の図 9 に、励起光(電子ビーム)と分析光のサンプル

への照射の様子を図 10 に示す。我々のシステムは高エネルギーの加速器（数 10MeV オーダー）と異なり、サンプルに対する透過能力が十分ではないので、分析光と電子ビームを同軸にアライメントすることが難しいため、古いナノ秒のシステムと同様に電子ビームに対し分析光を直角方向から導入している。そのため、システムの時間分解能は電子とレーザーのパルス幅とともに電子ビームのサイズにも大きく影響される。我々は電子ビームを空気中に取り出す寸前で絞り込み、サンプルセルにおいてできるだけ収束するようにビームオプティクスを設計している。

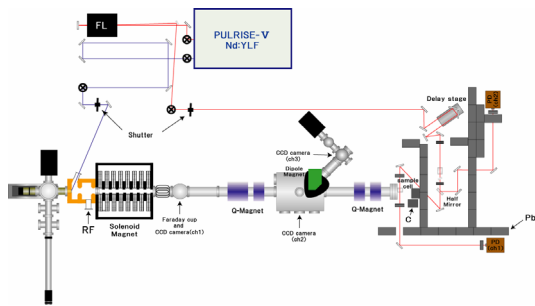


図 9 ピコ秒パルスラジオリシスシステム (Cs-Te カソードシステムによる)

RF-Gun のカソードには Cs-Te を用いており、電子線の線量は格段に向上(約 4nC)している。分析光としては、水セルに高エネルギーの IR 光を集束することによって生成した白色光を用いている。改善点として、白色光を安定に生成するためにその条件出しを行い、IR パルスエネルギーをさらに安定化した。分析光は励起用電子ビームに対して垂直に入射しており、サンプルへ照射する際には色収差を最小限にするために非球面のレンズを用いている。¹⁸⁾



図 10 電子ビーム・分析光のサンプルへの照射
第 88 号 (2009)

5.1 水和電子の時間挙動測定によるシステム評価

水和電子はその生成が非常に速く、フェムト秒オーダーで生成され、かつ吸収が大きいという特徴がある。このような特徴からシステムの評価をするのに最適であり、今回の実験にもシステム評価対象として用いた。

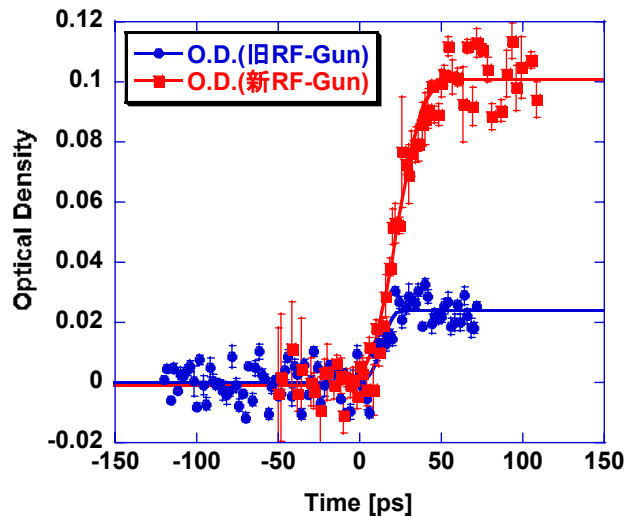


図 11 RF-Gun によるピコ秒パルスラジオリシスシステムの評価 (測定波長 720nm, 水和電子の吸収)

図 11 は銅カソードの旧 RF-Gun と Cs-Te カソードの新 RF-Gun の比較である。ビーム電荷量が格段に向上したことによって約 5 倍の信号強度を得ることができるようになっている。また、図中には現れないが、この 1 つのプロットを取得するのに 12 時間ほどかかっていた測定時間が白色光の生成を安定させることができるようになったため約 4 時間まで短縮することができている。現在、更にこの白色光生成を安定化させ、S/N の大幅な向上を目指した改良を進めており、近いうちに実用上問題の無いレベルのデータ取得システムが構築できると考えている。

まとめ

本稿では、筆者が過去 15 年以上にわたって開発及び応用研究に従事してきたフォトカソード RF ガン(RF-Gun)の概要について述べてきた。幸いなことに筆者が開発に参入した時点では、このような先端加速器の開発を支える周辺技術が熟成してきており、当初の困難予想を覆す非常に順調な経緯を辿った。加速器技術の粋と計測技術、レーザー技術そして放射線化学への応用といった多種

多様な要請を何とかこなす事ができた。本稿では加速器技術や計測技術の詳細に触れるスペースが無かったが、それらの詳細については参考文献を参考にさせていただきたい。加速器の物質科学の応用についても、本稿で触れる事ができなかったが、それらについてはまた別の機会に紹介できればと考えている。

謝辞 本稿で紹介した研究を遂行するにあたり、非常に数多くの皆さんの献身的な協力をいただくことができた事は筆者にとって大変な喜びでした。研究を開始したのは既に15年ほど前であり、住友重機械工業の専門家の多大なお力添えを頂きました。特に遠藤彰博士、豊田英二郎博士(当時事業部長)、広瀬正起氏、堀正匡博士、萬雅史博士、常見明良博士、酒井文雄氏の協力が無ければ開発の端緒にもたどり着けなかったと考えています。皆様に心からお礼申し上げます。また本システムの原型を開発していた米国ブルックヘブン国立研究所の X. J. Wang 博士及び Ilan Ben. Zvi 博士にはその的確な指導に心からお礼を申し上げたいと思います。

更に、開発に必要な諸技術については KEK 浦川順治教授、早野仁司准教授、照沼信浩助教を含め非常に多くの先生方にご支援をいただきました。

実際の開発と応用研究は早稲田大学・鷲尾研究室のメンバーおよび濱義昌教授の献身的な協力の下に行なわれました。特にこれらの研究は、黒田隆之助博士(現在産業技術総合研究所研究員)、柏木茂博士(現在大阪大学産業科学研究所助教)、坂上和之博士(現在早稲田大学理工学学術員総合研究所次席研究員)を始めてとして、非常に多くの大学院生諸君の昼夜を分かたぬ努力により支えられてきました。軟X線発生システムの開発については、理化学研究所の丑田公規博士の惜しめない協力のもとに原理実証を行うことができました。また物質科学系の研究については大島明博博士(現在大阪大学産業科学研究所)のご支援をいただきました。更にパルスラジオリス等のシステム開発においては、大阪大学田川教授のグループ及び東京大学勝村教授グループのご支援をいただき、システム開発を行なう事ができました。ここに関係各位に心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) G. A. Westenskow and J. M. J. Madey, Laser and Particle Beams, 2 Part2, 223 (1984)
- 2) X. J. Wang et al., Phys. Rev. E54-4, 3121 (1996)

- 3) X. Qui et al., Phys. Rev. Lett., 76, No.20, 3723 (1996)
- 4) K. J. Kim, et al., Nucl. Inst. & Meth. Phys. Res., A, 341, 351(1994)
- 5) G. R. Fleming, Chem. Appl. of Ultrafast Spectroscopy, Oxford University Press, New York, (1986)
- 6) 鷲尾方一, 日本物理学会誌 55, No.3, 196 (2000)
- 7) S. Kashiwagi et al., International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 14 157, (2001/2002)
- 8) R. Kuroda et al., J. Appl. Phys. 43, No.11^a 7747 (2004)
- 9) S. Kashiwagi et al., J. Appl. Phys. 98, No.12 123302-(2005)
- 10) K. Sakaue et al., Journal of Physics: Conference Series 31 229 (2006)
- 11) M. Washio, Rev. Laser Engineering, 34, No.2, 148 (2006)
- 12) S. Kashiwagi et al., Int. Journal of Modern Phy B, 21, No.3/4 481 (2007)
- 13) K. Sakaue et al., Rad. Phys. Chem., 77 (2008) 1136
- 14) 黒田隆之助他, 放射線化学, 77, 41 (2004)
- 15) M. Yorozu et al., Jpn. J. Appl. Phys., 40 4228 (2001)
- 16) J. Yang et al., Proc. EPAC Conference 2002, 784 (2002)
- 17) M. Kawaguchi et al., Nucl. Instr. Meth., B236 (2004) 425
- 18) H. Nagai et al., Nucl. Instr. Meth., B236 (2007) 82

<著者の略歴>

鷲尾方一：1972年麻布高校卒業，1976年東京大学工学部原子力工学科卒業，1981年3月東京大学大学院工学系研究科原子力工学専攻修了 工学博士。東京大学工学部附属原子力工学研究施設ライナック運転管理部助手，住友重機械工業主任研究員を経て，1998年4月より現職。専門：加速器科学，放射線科学，高分子化学。趣味：ゴルフ，料理，囲碁，将棋，ウォーキング