早稲田大学コンパクト加速器システムの現状

柏木 茂^{1,A}、石川裕記^{A)}、上山大輔^{A)}、川合啓^{A)}、工藤経生^{A)}、栗林剛彦^{A)}、黒田隆之助^{A)}、小林雅貴^{A)}、 長澤章雄^{A)}、濱義昌^{A)}、前田健一^{A)}、森雅和^{A)}、鷲尾方一^{A)}、早野仁司^{B)}、浦川順治^{B)}

^{A)} 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

^{B)} 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、 フォトカソードRF電子銃を電子源としたコンパクト 加速器システムによる高品質電子ビーム発生および その電子ビームを用いた応用実験が行われている。 2002 年 2 月に文部科学省の放射線施設検査合格を受 け、これまでにピコ秒電子ビーム生成とそのエミッ タンス測定などを行い、ソレノイド電磁石を用いて のエミッタンス補正効果や空間電荷効果によるエミ ッタンス増大などを確認することができた。また、 逆コンプトン散乱によるパルス軟 X 線発生実験、パ ルスラジオリシス実験などの応用実験の準備も現在 進めている。本研究会では、ビーム発生実験の結果 や応用実験の現状について報告する。

1.はじめに

早稲田大学理工学総合研究センターにおける小型 加速器研究プロジェクト「高品質ビームの発生とそ の物性・反応研究への応用」は1999年よりスタート した。本研究の目的は、フォトカソード RF 電子銃に より高品質な電子ビームを生成し、その電子ビーム を用いて、物性反応研究などの様々な応用実験を展 開していくことである。

2000 年 9 月に理工総研の新研究棟が完成し、その 後、主要コンポーネントである RF 電子銃・クライス トロンなどの高周波源・レーザーなどが搬入、イン ストールされた。RF 電子銃空洞に関しては、高エネ ルギー加速器研究機構(KEK)の加速器研究施設と工 作センターの協力により、その空洞製作と最初の RF プロセッシングを KEK 内で行うことができた。主要 コンポーネント設置後、早稲田大学においてもクラ イストロン電源の高圧動作試験やレーザーの安定度 測定などを行った。2001 年 11 月に本加速器システム の仮使用許可がおり、試験ビーム加速実験などを行 った後、2002 年 2 月に文部科学省の放射線施設検査 に合格した。

早稲田大学におけるコンパクト加速器システムの 構成は、電子ビーム源であるフォトカソード RF ガン、 エミッタンス補正用のソレノイド電磁石、ビーム診 断システム、エネルギー測定用偏向電磁石となって おり、加速器の全長は約2mと大変コンパクトである (図1参照)。 我々は、フォトカードに米国ブルックヘブン国立研 究所で開発された低仕事関数の金属マグネシウムカ ソードを用いることで、より高輝度の電子ビーム生 成を目指している^[1]。これまでに行ってきた光電子 ビーム診断の結果や X 線発生実験およびパルスラジ オリシス実験の現状について述べる。



2. 高品質電子ビーム発生システム

2.1 エミッタンス測定

早稲田大学では、電子ビームの高品質化のために は高精度にビーム診断をすることが非常に重要だと 考えている。早稲田大学の加速器は、加速システム がRF ガンのみであるため電子ビームのエネルギーは 5MeV 以下とあまり高くなく、エミッタンスなどのビ ーム診断を行う上で空間電荷効果への配慮が必要で ある。今回、空間電荷効果の影響による測定誤差の 小さいスリット法を用いることにより横方向エミッ タンス(位相空間分布)の測定を行った。そして、 ソレノイド電磁石の磁場強度を変える事によるエミ ッタンスの変化、電荷量とエミッタンスの関係など について、ビーム実験結果とシミュレーション (PARMELA)による計算結果との比較を行った^[2]。 図 2 はレーザー強度を変え電子ビームの電荷量を 変化させた時のエミッタンスの変化をプロットした ものである。このグラフから電荷量の増加にともな

い、空間電荷効果によりエミッタンスが増加してい

¹ E-mail: shigeruk@mn.waseda.ac.jp

ること分かる。また一方で、電荷量に関係しない(ゼ ロ電荷の場合のエミッタンス)初期エミッタンスが 本測定では約10mm mrad 程度あることが判断できる。 このことから、カソードに照射するレーザーのスポ ットサイズなど、初期のエミッタンスを決めるパラ メータの最適化も低エミッタンスビーム生成に関し ては非常に重要となってくると思われる。

早稲田大学において、現段階ではカソード照射用 レーザーのプロファイルなどの調整が不十分ではあ るが、ソレノイド電磁石などの調整を行い 0.8nC で 約 9mm mrad という規格化エミッタンスの電子ビー ムを発生することができた。



2.2 暗電流

一方、RF ガン空洞内で発生する暗電流についての考察も行っている。我々は、空洞製作の段階で暗電流削減のために超精密旋盤を用いたダイヤモンド切削を行った。その結果、従来の同型のRF ガン空洞に比べ暗電流を約1/3まで減らす事に成功した。さらに、RF ガン空洞内での暗電流の振る舞いについてシミュレーションコード(MAGIC)を用いて調査を行っている。



図3 MAGICにより計算された暗電流の振る舞い (時間経過順:左上>左下>右上>右下)

現段階では、電界放出により空洞内壁より発生した 電子が空洞内の電磁場によりどのような挙動を示す ところまでしかできておらず、2次電子放出などの効 果は含まれていない。ここまでのシミュレーション からわかった事は、カソード表面から発生した電子 のみが空洞下流まで到達し得ることである(図3参 照)。ディスクのアイリス部分から発生した電子は、 空洞内の加速電場にうまく乗れず直接空洞下流まで は到達しない。よって暗電流は S バンドの周期で細かくパルス化されている。今後、2 次電子放出を考慮 するなど暗電流に関する詳細な調査を行っていく。

3.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電子ビームを用いた、逆コンプ トン散乱によるパルス軟 X 線生成実験と高速物理化 学反応研究のためのパルスラジオリシス実験を行っ ている。これまでに行ってきた、各実験の現状につ いて報告する。

3.1 軟 X 線発生実験

現在国内外で医療、工業、基礎科学などの幅広い 分野への応用を目的とし、SASE-FEL、レーザープラ ズマ X 線源など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卓上パルス X 線源を目指した 軟 X 線発生システムの構築を行っている^[3-5]。



図4 X線発生実験セットアップ

本システムで逆コンプトン散乱に用いる電子ビームのエネルギーは最大 5MeV、レーザー波長は Nd:YLF レーザー基本波 1047nm、パルス長はいずれも約 10ps (FWHM)である。これら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」領域の 250~500eV 程度の軟 X 線を生成 することが本システムでは可能である。また、我々 は電子ビームとレーザーパルスの衝突角度を調整す ることにより、散乱 X 線のエネルギーを変化させる ことを行う。現在は、衝突角度を 20 度に固定し実験 を行っている。

ビーム実験では X 線検出器に高速応答性をもつマ イクロチャンネルプレート(MCP;浜ホト F4655-10)と 電子管(EM 管;浜ホト R596)を用意した。検出器は、 衝突点より電子ビーム進行方向 0.6m 下流に設置され、 その前に設置されている偏向電磁石により電子ビー ムと X 線の分離を行っている(図4参照)。検出器 の受光面積と衝突点から検出器までの距離で決まる X 線検出有効角度は約11mrad である。これまでの実 験の調整段階では、ビームの作り出すノイズなどに 対し耐久性のある EM 管を用いて X 線検出を行った。

我々は、効率よく電子ビームとレーザー光を衝突 させるため、電子ビームとレーザーパルスをできる 限り小さなサイズ(100µm 程度)まで集束させること を行う。しかしながら現段階で電子ビームをソレノ イド電磁石と 4 極電磁石を用いて十分に絞り込むこ とができていない。この原因が空間電荷効果による ものかビームの持つエネルギー幅からくるものであ るかを、現在シミュレーションコードなどを用いて 調べている。また、空間電荷効果を緩和させるため に扁平に電子ビームを絞り込むことにより、できる 限り衝突ルミノシティーを下げないことを検討中で ある(表1)。タイミング調整は、駆動距離20cm(時 間にして約 1.3ns の光学遅延)のリニアステージを 用いて行っている。電子ビームのタイミング信号は 45 度偏向方向下流の Ti 窓より電子ビームを大気に 取り出し水のセルを通過したときのチェレンコフ光 をフォトディテクターで観測する。レーザーパルス も同一のフォトディテクターによって観測し、両者 のタイミングをリニアステージにより微調整する。

現在、X線シグナルはまだ観測されていないが、衝 突用レーザーのパルスエネルギーをフラッシュラン プ励起のアンプを構築することにより増強し、生成 X 線光子数の増加を目指す。また、電子ビームの集束 や衝突の空間・時間調整の高度化を行っていく。

σh∖σv	100	200	300
100	1.8×10^4	$1.6 \ge 10^4$	1.3×10^4
200	9.8×10^3	8.7×10^3	7.5×10^3
300	6.7×10^3	5.9×10^3	5.2×10^3

表 1: 電子ビームサイズと散乱 X 線の全光子数(電子ビー ム; 2nC、レーザーパルスエネルギー; 2mJ、レーザースポ ットサイズ; 60 μm.)



図 5 フォトディテクターで観測されたレーザーパルスシ グナルと電子ビームシグナル(チェレンコフ光)

3.2 パルスラジオリシス実験

図 6 に示すようなシステムを組み、CW レーザー光 を用いた吸収パルスラジオリシス実験を行った。今 回、RF-gun より生成されたピコ秒電子ビーム(FWHM: 10ps)を水のサンプルに照射することにより、サン プル内に反応中間体である水和電子を生成させ、そ の水和電子による He-Ne レーザー光(CW)の吸収を 観測した。実験に用いた He-Ne レーザー光の出力は 15mW、このレーザー光を 1cm 角のセルに通した後の 光検出にはフォトダイオード(浜ホト S1722-02)を使 用した。図7 にデジタルオシロスコープにより測定 された He-Ne レーザー光の水による吸収の時間変化 を示す。これより、光の吸収量の増減によってサン プル内に反応中間体が生成し、それが減衰していく

過程がわかる。水和電子の吸収スペクトルは 720nm 付近に最大値をもち可視光領域全体にわたることが 知られており^[5]、He-Ne レーザー波長である約 630nm もその波長領域に含まれているため図7のような水 和電子による吸収が観測される。今後は、この吸収 が水和電子による吸収であることを確認するため、 電子捕捉剤を水に混ぜ、減衰が早くなることを確認 する予定である。さらに、ストロボスコピック法に よるピコ秒時間分解能のパルスラジオリシスシステ ムの構築を行っていく。



図6 CW レーザー光を用いた吸収パルスラジオリシス実 験セットアップ



図7 He-Ne レーザー光の水による吸収の時間変化

6.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。KEK 加速器研究施設の陳先生には 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 しては住友重機械工業(株)、フェムト秒テクノロ ジー研究機構の方々に、技術的な指導およびサポー 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] T. Srinivasan-Rao et al., J. Appl. Phys. 77 (3) 77 (3), p. 1275-1279 (1995).
- [2] H. Kawai et al., in these proceedings (8P-29)
- [3] H. Nagasawa et al., in these proceedings (7P-35)
- [4] W. Leemans et al., Proceeding of the 1995 Particle Accelerator Conference, 1995, p.174 [5] S. Kashiwagi et al., Nuclear Instrument and Methods
- A 455, p. 36-40 (2000)
- [6] J. W. Boag and Edwin J. Hart, NATURE No.4862, p. 45, January 5, 1963