



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。

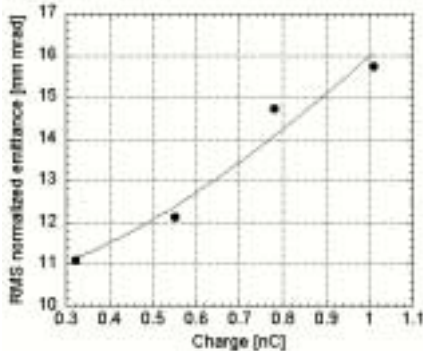


図2 スリット法によるエミッタンス測定結果 (電荷量と横方向エミッタンスの関係)

## 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。

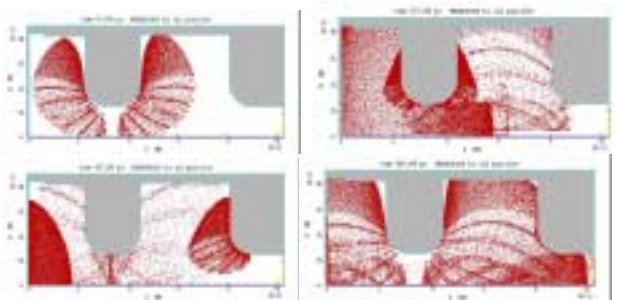


図3 MAGICにより計算された暗電流の振る舞い (時間経過順: 左上>左下>右上>右下)

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<sup>[3-5]</sup>。

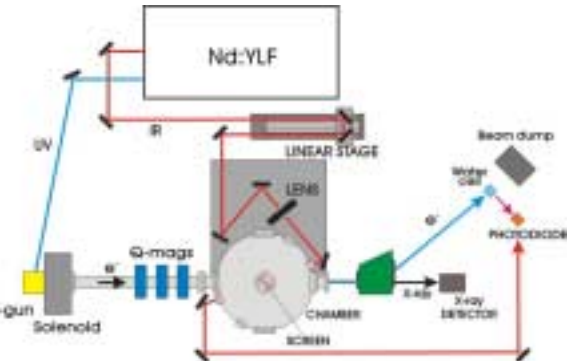


図4 X線発生実験セットアップ

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(100 $\mu\text{m}$ 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。

$\sigma_h \backslash \sigma_v$	100	200	300
100	$1.8 \times 10^4$	$1.6 \times 10^4$	$1.3 \times 10^4$
200	$9.8 \times 10^3$	$8.7 \times 10^3$	$7.5 \times 10^3$
300	$6.7 \times 10^3$	$5.9 \times 10^3$	$5.2 \times 10^3$

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  $\mu\text{m}$ .)

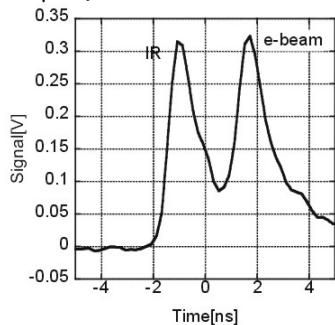


図5 フォトディテクターで観測されたレーザーパルスシグナルと電子ビームシグナル(チェレンコフ光)

### 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<sup>[5]</sup>、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、ストロボスコー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。

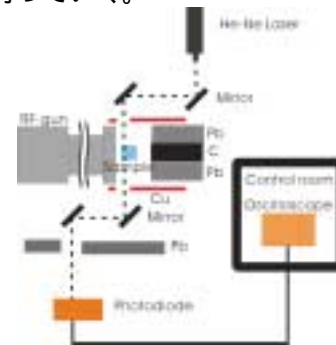


図6 CWレーザー光を用いた吸収パルスラジオリシス実験セットアップ

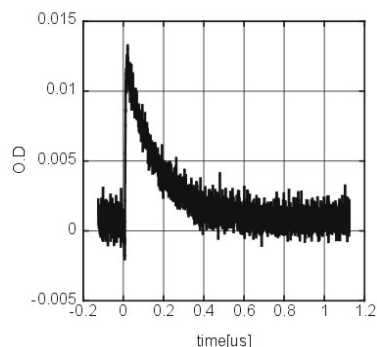


図7 He-Neレーザー光の水による吸収の時間変化

## 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