

東大原施フェムト秒トリプレットライナックの現状 2001

渡部貴宏¹、吉井康司、上田 徹、中島一久、勝村庸介、上坂 充

東京大学大学院工学系研究科附属原子力工研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

概要

当施設では、平成 10 年度に導入したフェムト秒高速量子現象研究設備を用いて極短量子パルスの発生・計測・応用実験および設備の改良を進めている。電子ライナックは当初の予定通り 0.3TW レーザーシステムと高精度に同期され、ピコ秒パルスラジオリシス実験に供している。また、SPring-8 他との共同研究の下 Mg カソード RF ガンを作製中である。レーザーシステムでは 12TW レーザーを用いた極短電子、イオン、X 線発生実験を進行中であり、併行してレーザーパルス高品質化のための横モード整形器の導入を行っている。更に、文部省小型加速器開発プロジェクトにおいて小型硬 X 線放射光源、プラズマカソード、レーザーイオン源最適化の研究プロジェクトに参画している。

1. はじめに

フェムト秒高速量子現象研究設備の導入により、現在当施設は主に以下の装置からなる。

- ・ 35MeV ライナック
- ・ 18MeV ライナック
- ・ 0.3TW 100fs レーザー
- ・ 12 TW 50fs レーザー
- ・ 各種測定装置

35MeV ライナックは熱電子銃、Arc 型磁気パルス圧縮器等で構成されている。18MeV ライナックはレーザーフォトカソード RF ガン、Chicane 型磁気パルス圧縮器等からなる。2 種のレーザーは CPA 法を用いた Ti:Sapphire レーザーである。これらの装置を用いて、時間分解 X 線回折、プラズマカソードによる極短電子パルス発生、パルスラジオリシスなどの応用実験の他、それらの基礎となる実験（実験システムの評価等）が行われている。本稿では上記 3 つの応用実験の研究成果、および今後の研究計画とその進行状況について述べる。

2. 平成 12 年度全国共同利用

平成 12 年度は新規テーマ 1 件を含む以下の計 8 件が行われた。

- 12L-1 水溶液の放射線効果の研究
(東大原施・勝村庸介)
- 12L-2 放射線の高分子材料への応用
(東大工・山下 俊)

- 12L-3 ポンプ&プローブ法を用いる超高速反応の研究 (東大原施・勝村庸介)
- 12L-4 パルス電子線用電荷モニターの開発 (東大工・中沢正治)
- 12L-5 レーザー・電子ビーム相互作用による超短パルス X 線発生実験 (KEK・中島一久)
- 12L-6 コヒーレントな放射を用いたバンチ計測法の研究 (東北大科研・柴田行男)
- 12L-7 フェムト秒 X 線回折 (東大原施・上坂充)
- 12L-8 フラクチュエーション(揺らぎ)法によるフェムト秒パルス計測 (渡部貴宏)

括弧内はテーマ代表者。また、12L-8 が新規テーマである。

3. Mg カソード RF ガン

Spring-8 の RF ガンテストベンチ計画に参画する形で KEK/住重/早大/BNL/UCLA の協力を得て Mg カソードを製作した(図 1)。Mg カソードは当施設で今まで用いられてきた Cu カソードに比べ 1 オーダー量子効率が高いことが知られ、高電荷量(数 nC/バンチ)電子パルスの発生しうは高強度 X 線パルスの発生が期待されている。一方、量子効率低下の劣化、エミッタンス増大、大電流に対する下流ライナックの最適化などが今後の課題となる。立ち上げ試験は 10 月頃から開始し、そのまま放射線化学応用実験に用いる。

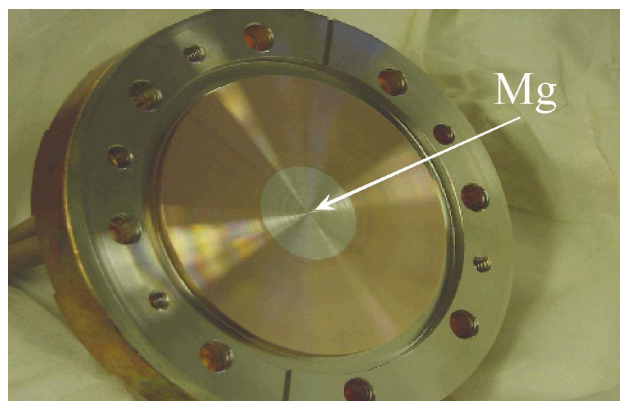


図 1 : Mg カソード

¹ E-mail: wata@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

4. 電子ビーム波形測定

過去数年間にわたり行われてきたコヒーレント放射による電子ビーム計測^[1]に引き続き、インコヒーレント放射の統計ノイズ（フラクチュエーション）から電子ビーム波形を導き出す手法（フラクチュエーション法）を用いたビーム計測を行っている。第1段階として実験セットアップの設計をシミュレーションを用いて行った。第2段階として設計をもとに時間領域のフラクチュエーションの計測を行った。実験結果を図2に示す。同時に計測されたストリークカメラによるパルス幅は1.0psであったが、フラクチュエーション法から導き出された結果はそれぞれ4.5psであった。この相違は、フラクチュエーション法からパルス幅を導出する際に電子ビームの横方向エミッタンスを無限小と仮定しているためである。また、現在第3段階として周波数領域での計測を行っている^[2-3]。

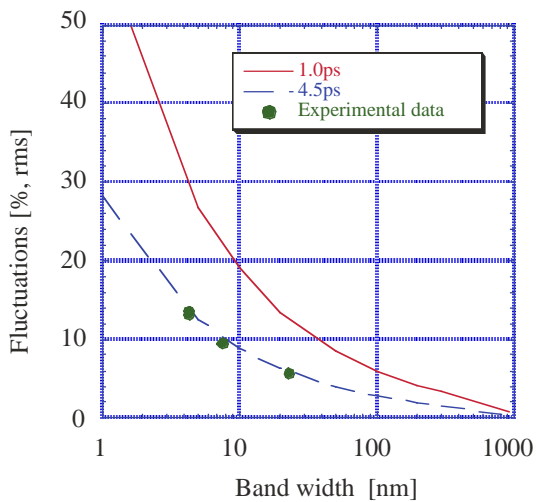


図2：フラクチュエーション法によるパルス計測

5. レーザープラズマライナック（電子ビーム）

12TW50fs レーザーをガスジェット（He, N₂ etc.）に集光し、そこに励起されるプラズマ波を用いて相対論的（～数十 MeV）超短電子バンチを発生させるのが当実験の目的である。特に我々の特徴は、単一の超高強度レーザーパルスを用いて電子バンチを生成する手法を用いている点である。この手法では、プラズマ波の碎破によってプラズマ電子の一部を非線形プラズマ中に捕獲して加速する。PIC コードを用いたシミュレーションの結果、12TW レーザーと最大 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の台形（フラットトップ 500 μm ）な密度分布を持つプラズマとの相互作用により、10fs（FWHM）600pC/バンチのパルス幅を持つ電子バンチを得た^[4]。また、ヘリウム実際に行った実験では、イメージングプレートを用いて電子ビームの像を取得した。結果を図3に示す。右図(b)は左図(a)よ

りもガス圧およびレーザーパワーが強い場合である。更に、アルミ фольド通過後にファラデーカップを置いて電荷量測定を行った結果、前方 0.07rad の立体角において数 MeV 以上のエネルギーを持つ電子 14pC/バンチを取得した^[5]。

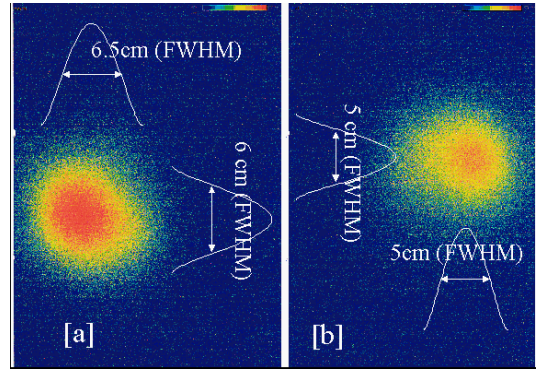


図3：IPで取得した電子ビーム像

6. レーザープラズマイオン加速

12TW50fs レーザーを銅固体ターゲットに集光することにより、高エネルギー銅イオン生成の実験を行った。これらイオンは、高強度レーザーの動重力により軽い電子が先に押しつけられることによって生成されるイオンの非中性分布によるクーロン爆発および熱電子電場により発生する。実験では、発生したイオンをトムソンパラボライオンスペクトロメーターによって価数および価数ごとの分別し、それぞれのエネルギー測定を行った（図4）。その結果、価数+12～+17、エネルギー50～220 keVのCuイオンを観測した。また、個数は 1.1×10^5 個/sr/shotであった。

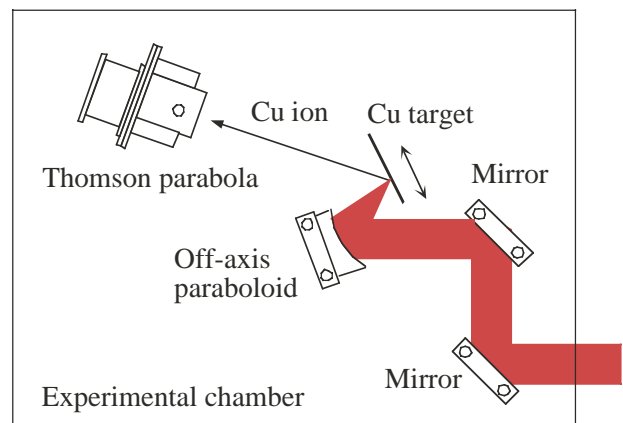


図4：トムソンパラボラによるイオン計測

7. ピコ秒時間分解X線回折

12TW50fs レーザーをビームスプリッターで 10%、90%に分け、10%をポンプパルスとし、90%を銅版ターゲットにフォーカス・照射して約 10 ピコ秒のパルス幅を持つレーザープラズマX線 (LPX) を発生させプローブパルスとして用いてポンプ&プローブX線回折を実施した。試料は GaAs 単結晶 (111) を用いた。図5はポンプレーザー照射直後から 250ps まで 50ps 刻みで取得したX線回折像である。この結果およびシミュレーションによる解析により、GaAs 表面における熱膨張・コヒーレント音響フォノンの原子動画像化に成功した^[6]。

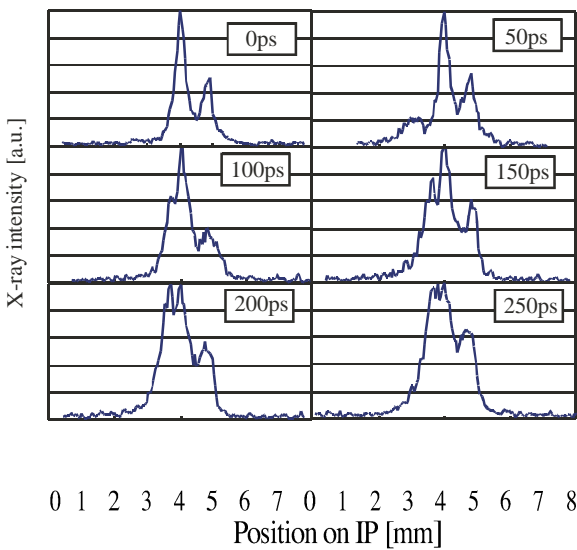


図5：時間分解X線回折像 (GaAs)

8. 医療用小型加速器開発プロジェクト

平成13年度より5年計画で小型加速器開発事業 (文科省プロジェクト) がスタートし、放医研、東大原施、高エネ研、原研関西研、京大、産総研、阪大レーザー研、広大が仮想研究所 (Virtual Lab) として参画する。具体的には重イオンシンクロトロンによるガン治療システムや逆コンプトン散乱X線源による動的血管造影システムの開発を目指し、東大原施は後者システムの主担当として参画する^[7-8]。

9. 今後の展開

電子ライナックについては、反射型 Mg カソード (0.1%)、透過型 Cs2Te (数%)、ダイヤモンド (50%) など高 QE カソード RF ガン開発を Spring-8/KEK/早大と共同で行い、放射線化学応用する。レーザープラズマ加速については世界初の 10fs 電子シングルバンチ計測を目指す。イオン加速については、原研関西研/京大/広大と共同で炭素イオン数 MeV 高フラックス高指向性ビーム生成を目指す。時間分解X線回折については近々 Si, Ge について同様の実験を実施する。Spring-8 と共同でタンパク質の動的構造解析、KEK・PF/東大応物と共同で時間分解X線ホログラフィ/イメージングを実施する予定である。小型加速器開発についてはXバンド RF ガン・ライナック型硬X線源、逆コンプトン散乱X線源をX線自由電子レーザーとともに第4世代放射光源と位置づけ、相補的に併行して開発・利用していくべきと考える。国際共同利用も International Committee for Future Accelerators (ICFA) /Advanced and Novel Accelerator PANEL で講義中である。先進ビーム化学技術へ今後も益々貢献していく所存である。

謝辞

Spring-8 (JASRI)、KEK、早大、BNL、UCLA、京大、広大および参画企業の方々の研究協力に深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. Watanabe et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 437 (1999) 1; Nucl. Instrum. Meth. A, in press.
- [2] T. Watanabe et al., Proc. of PAC2001, in press.
- [3] K. Nakamura et al., in these proceedings.
- [4] N. Hafz et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 45 (2000) 148.
- [5] N. Hafz et al., Proc. of PAC2001, in press; in these proceedings.
- [6] K. Kinoshita et al., Proc. of PAC2001, in press.
- [7] M. Uesaka et al., in these proceedings.
- [8] A. Fukasawa et al., in these proceedings

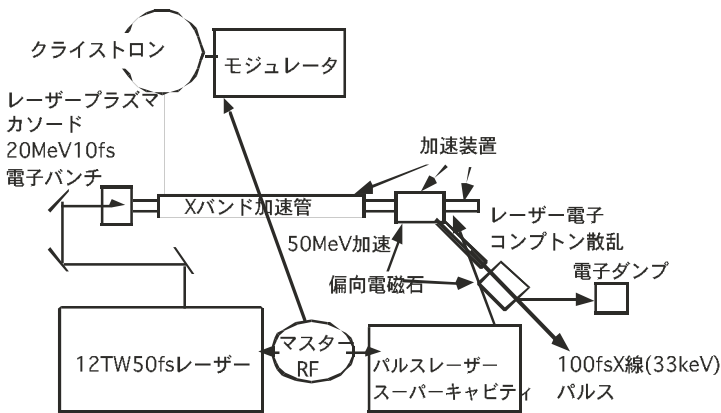


図6：逆コンプトン散乱X線源による動的血管造影