

東大・クワッドライナックの現状報告

飯島北斗^{A)}、上坂充^{A)}、上田徹^{A)}、細貝知直^{A)}、渡辺貴宏^{A)}、助川敏男^{A)}、吉井康司^{A)}、
A. Zhidkov^{B)}、土橋克広^{B)}、木下健一^{B)}、今井貴之^{A)}、深澤篤^{A)}、中村啓^{A)}、大久保猛^{A)}、
坂本文人^{A)}、えび名風太郎^{A)}、A. Mostafa^{A)}、N. Quyet^{A)}、
室屋裕佐^{A)}、工藤久明^{A)}、勝村庸介^{A)}

^{A)} 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

^{B)} 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

現在当施設では S バンドツインライナックに、12TW-50fs レーザーによるレーザープラズマライナック、医療用 X バンドライナックを加え、4 台のライナックを所有している。レーザープラズマライナックと医療用 X バンドライナックは、施設内のブランケット研究棟に移設、設置した。ツインライナックに関しては、超臨界圧水の放射線化学実験、Mg photocathode RF gun を用いた Velocity Bunching の実験、高空間分解能モニターの開発が成果を出している。レーザープラズマライナックでは、最高 40MeV、 $0.1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、 0.1nC 、10Hz の電子ビーム発生を記録した。X バンドライナックについては、電源系・クライストロンの設置が完了し、現在高パワー試験を行っている。

1 はじめに

当研究施設サイト内核融合ブランケット研究棟にレーザープラズマビーム源室、医療用小型ライナック室を整備し、それぞれレーザープラズマライナックと X バンドライナック（放医研プロジェクト、KEK、産業界と共同開発中）を設置した。これにより、従来の S バンドツインライナックと上記 2 つのシステムの同時運転が可能になり、稼働率が格段に上がった。ツインライナックはこれまで通り放射線化学実験、ビーム物理実験等の共同利用運転を行っている。また、レーザープラズマライナックは移設後の調整が完了しつつある。X バンドライナックは RF 源の動作試験が開始された。ここでは共同利用状況、各システムでの研究のハイライトをまとめる。

2 共同利用状況

平成 15 年度は新規課題 3 つを含む合計 9 つの共同利用課題が採択された。内、ビーム物理系 3 件、利用系 6 件である。表 1 に課題一覧を示す。採択番号の「L-」が電子線加速器、「F-」がテラワットレーザー装置の利用実験である。

採番	テーマ名	代表者
L-01	水溶液の放射線効果の研究	勝村庸介 (東京大学)
L-02	ポンプ&プローブ法を用いる超高速反応の研究	勝村庸介 (東京大学)
L-03	天然高分子材料等の放射線化学反応機構と表面加工	工藤久明 (東京大学)
L-04	アルミナ蛍光板の発光特性の測定	中沢正治 (東京大学)
L-05	放射線の高分子材料への応用	山下俊 (東京理科大)
L-06	高速応答シンチレーターの開発と性能評価	浅井圭介 (東京大学)
L-07	Mg フォトカソード電子銃による極短パルスの研究	上坂充 (東京大学)
L-08	医療用小型加速器要素技術試験	浦川順治 (高エネ研)
F-11	レーザープラズママルチビームの研究	細貝知直 (東京大学)

表 1：平成 15 年度共同利用課題一覧

3 S バンドツインライナック

3.1 35L ライナックでの放射線化学実験

S バンドツインライナックの一方である 35L は、主に利用系のテーマのために運転している。ここでは超臨界水放射線化学実験 (L-01) の最近の成果を報告する。

よく知られているように、温度 374°C、圧力 221atm 以上における水の超臨界状態は次世代原子炉の冷却水や環境化学における有害物質分解の溶媒等、幅広い応用が注目されている。35L ではナノ秒パルスラジオリシスにより超臨界水の放射線化学反応の研究を行っている。これまで 400°C、400atm までの超臨界水より生成する水和電子のスペクトルシフト、初期収量の温度・圧力依存性について測定してきた。図 1 は、 $10\mu\text{M}$ Methyl Viologen 水溶液を用いた結果である。水和電子の Methyl Viologen との反応速度が、温度に依存して急激に増加することが分かった。今後は、水溶液系に加えアルコールについても同様の測定を予定している。

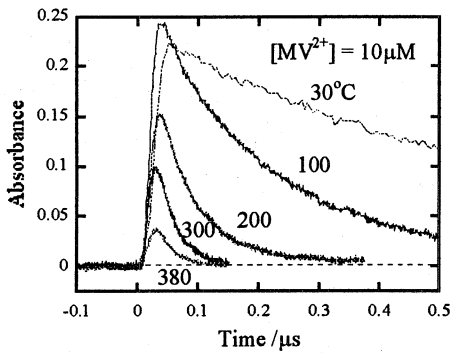


図1 高温・超臨界水中の水和電子とメチルビオローゲンとの反応

3.2 18Lでの放射線化学・ビーム物理実験

入射器として Mg photocathode RF gun (JASRI/SPRING-8 所有) を採用している S バンドツインライナックの 18L では、主にサブピコ秒時間領域の放射線化学実験 (L-02) を行っている[1]。

図2は、純水およびエタノールの放射線分解で生じる先駆体および溶媒和電子の高速な時間挙動を、可視および近赤外領域において測定した結果を示している。測定はポンプ&プローブ方式で行い、試料に 2~3ps (FWHM)、1nC/bunch、D=~1mm (rms) の電子パルス (ポンプ) を照射し、これと 2ps (rms) 以下に高精度同期されたフェムト秒白色光 (プローブ) で過渡吸収測定を行った。まず近赤外領域で吸収が立ち上がり、時間を経るにつれ減衰する。それとともに短波長領域の吸収が増加している。これは電子が先駆体から溶媒和に至る過程を直接測定しているといえる。

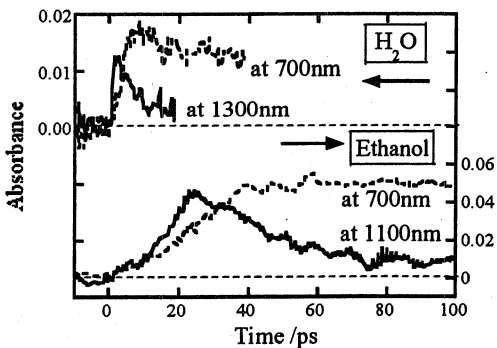


図2 Mg photocathode RF gun で測定した、水およびエタノール電子の溶媒和過程

上記放射線化学実験のための電子バンチ圧縮はシケイン型磁気圧縮器で行ったが、一方で新方式の電子バンチ圧縮、"Velocity Bunching"の実証実験 (L-07) も行っている[2]。前回までは 18L の体系の都合上、加速管での圧縮の後約 5m の drift space を通した状態を計測していた。これは drift space において Ballistic Compression を行っていることに等しいが、drift space にはソレノイド磁場がないため invariant envelope は満たしていなかった。今回加速管の後ろ約 2m の位置に Cherenkov radiator を設置することでより

純粋な Velocity Bunching を計測した。図3は加速管への入射位相に対するバンチ幅 (FWHM) を表している。現在入射位相 0° 付近で 1.3ps (FWHM) の圧縮に成功しており[3]、圧縮の効率は我々のシケイン型圧縮器とほぼ同等である。加速管内での圧縮中電子バンチのエミッタンス測定・評価を今後の課題として残してはいるものの、圧縮機構の実証をしたといえる。

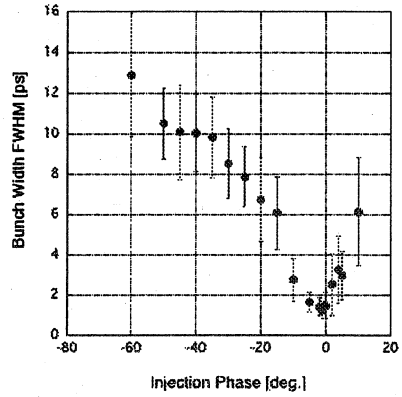


図3 加速管入射位相に対するバンチ幅 (FWHM)

また、後述する X バンドライナックで使用される高空間分解能ビームモニターの開発 (L-08) も、この 18L を用いて行われている。モニターの候補としては Wire Scanner、Optical Transition Radiation (OTR)、蛍光体 (デマルケスト) の3つを考慮し、それぞれの性能評価を行っている[4]。図4は 18L で行ったアルミ蒸着ミラーからの OTR を測定したものの1つである。ビームのエネルギーとエミッタンスを評価するために、OTR のリング形状を計測したが形状の「にじみ」が大きい。これは計測系の問題であることが分かっており、現在これを改善中である。

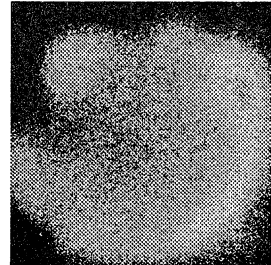


図4 CCD カメラによる OTR 発光角度分布の測定

4 レーザープラズマカソード

コンパクトなフェムト秒オーダー極短パルス電子源の実現を目指したレーザー・プラズマ電子加速の研究では、超短パルス高強度レーザー・プラズマ相互作用によって 100fs 以下のパルス幅を持つ相対論的 (数十 MeV) 電子シングルバンチ生成を目標としている (F-11)。

これまでに、12TW-50fs レーザーを用いた実験結果と二次元粒子法による数値計算結果から高エネルギー電子の発生機構におけるレーザープレパルス効果を明らかにした。指向性のよい高エネルギー電子ビーム発生はレーザープレパルスの作るプレプラズマの条件に大きく依存する。最大エネルギー 40MeV、横方向幾何学的エミッタンス $0.1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ の電子ビームを確認した。シミュレーション

の結果より、この電子ビームは電荷量 100pC/bunch、バンチ長 40fs と推測される[5,6]。

また、我々は 40fs の電子バンチの計測手法としてフラクチュエーション法の適用を考慮している。現在、空間方向の影響を考慮した理論的解析を行い、コヒーレントモード数を評価した[7,8]。

5 レーザープラズマイオン源

12TW-50fs レーザーを用いた研究としては、同様にレーザープラズマイオン源の開発も行っている。安定にイオンを発生させるために、ターゲットの最適化が必要であったが薄膜ターゲットでは前述したプリパルスによって薄膜が破壊される懸念があった。そこでプレパルスの評価を詳細に行った。メインパルスの 4ns 前、5分の1程度のプリパルスが存在する条件でイオンの発生量、エネルギーの増加を確認した。

6 医療用 X バンドライナック硬 X 線源

次世代小型硬 X 線源としての X バンドライナックの開発は、現在完成した RF 源の動作試験を行っている[9]。大出力電源を小型化することと RF 出力の揺らぎを $\pm 0.1\%$ 以内に抑えることを目標として設計されてきた RF 源は出力 500kV、135MW (at peak) でありながらその大きさを 3115W \times 2255H \times 1350D と小型に収めることができた。また、工場での動作試験では出力パルスの安定度がほぼ設計通りの $\pm 0.12\%$ であることを確認している。

また、入射器である熱カソード RF ガンについて、ビームローディングを考慮に入れ、PARMELA によるビームの解析を行った。カソードからの電流を 0.72A とするとガンを透過するバンチの電荷量は 30pC である。6MW のパワーをガンに投入するとき、導波管とガンのカップリングは 1.2 が最適であり、ビームの最大エネルギーは 3.4MeV となる。これはビームローディングを考慮しない場合より、0.4MeV 程度低くなっている。 α 電磁石を考慮して最大エネルギーの 10% 以内の粒子に限ると 17pC となる。このときのエミッタンスは $1.4\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ であった[10]。これらシミュレーションの結果は我々の考える X 線発生において十分な数値である。今年冬季には熱カソード RF ガンを当施設に設置し、高電界試験を開始、来春にはビーム加速試験を行う予定である。

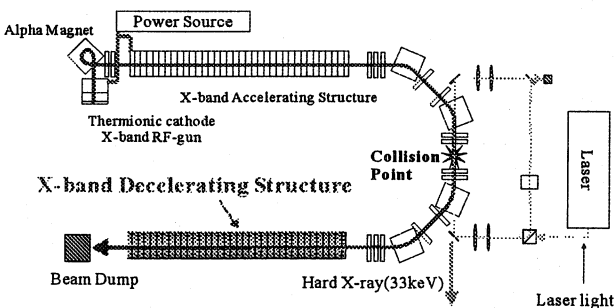


図5 減速管を導入した X バンド体系図

既に X 線生成実験用のビームラインの設計を終え、加速器実験の準備を行っているが、レーザー衝突までの現設計に減速管を導入して放射線バックグラウンドを低減させる等、システムの性能向上を目指した研究も同時に進めて

いる。図5は減速管を含めた X バンドシステムの概念図である。

7 今後の展開

S バンドツインライナックは Mg photocathode RF gun のより安定稼動を実現し、主に放射線化学実験および新モニターの開発など利用実験を供する。X バンドライナックについては、硬 X 線源を平成 17 年度中に完成させる。レーザープラズマライナックはそれより長期戦略で臨んでいく。小型ライナックの医療応用に関して、東大病院放射線科とチームを組み、東大医工連携プロジェクトに参画した。今後、加速器科学者・医学者・放射線物理/化学者との共同歩調をとり、小型ライナックの医療応用の拡大(装置開発、臨床の科学、社会的認知、市場)に貢献したい[11]。

謝辞

これまでのフェムト秒ビーム科学の世界の実績を、当グループが中心となり、世界の先駆研究者を集めて、“Femtosecond Beam Science” (Imperial College Press/World Scientific) を編著しました。来年刊行予定であります。この場をかりまして、編著に協力していただいた多くの方々に深く感謝の意を表します。たま、本クワッドライナック建設に当たり熊谷教孝氏(JASRI)、浦川順治氏、肥後寿泰氏、明本光生氏、早野仁司氏(KEK)、山田聡氏(放医研)、大道博行氏(原研)、野田章氏、岩下芳久氏(京大化研)に多くのご協力をいただいたことを感謝します。

参考文献

- [1] Y. Muroya, M. Uesaka, K. Katsumura, *et al.*, “Ultra-fast pulse radiolysis system combined with a laser photocathode RF gun and a femtosecond laser”, Nucl. Instrum. & Meth. A, **489**(2002)554
- [2] L. Serafini and M. Ferrario, “Velocity Bunching in Photo-injector”, Proc. of ICFA Workshop on the Physics of and Science with the X-ray FEL, Arcidosso, Italy, Sept. 2000
- [3] N. Quyet, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集
- [4] 坂本文人, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集
- [5] T. Hosokai, *et al.*, “Effect of a laser prepulse on a narrow-cone ejection of MeV electrons from a gas jet irradiated by an ultrashort laser pulse”, Phys. Rev. E, **67**, 036407(2003)
- [6] 細貝知直, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集
- [7] 木下健一, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集
- [8] 中村啓, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集
- [9] 土橋克広, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集
- [10] 深澤篤, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集
- [11] 上坂充, 他 第 14 回加速器科学研究会要旨集