

東大原施クワッドライナック現状報告2003

上坂 充^{1,A)}、飯島北斗^{A)}、上田徹^{A)}、細貝知直^{A)}、渡部貴宏^{A)}、助川敏男^{A)}、吉井康司^{A)}、
 A.Zhidkov^{B)}、土橋克弘^{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)}、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

Sバンドツインライナックに、12TW 50 fs 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、ライナックは4台になった。上記の新装置は、サイト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カソードRFガンを用いたVelocity Bunchingの実験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 mm.mrad、0.1nC、10Hzを記録した。Xバンドライナックについては、電源系が完成し、クライストロン設置、高パワー試験、RFガン、加速管、レーザー系、コンプトン散乱X線発生の実験を順次行っていく。

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）を設置することとした。これにより、ツインライナックと上記2システムの同時運転が可能になり、稼働率が格段に上がる。またここ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)を編著した。来年刊行予定である。共同利用状況、各システムでの研究ハイライトをまとめる。

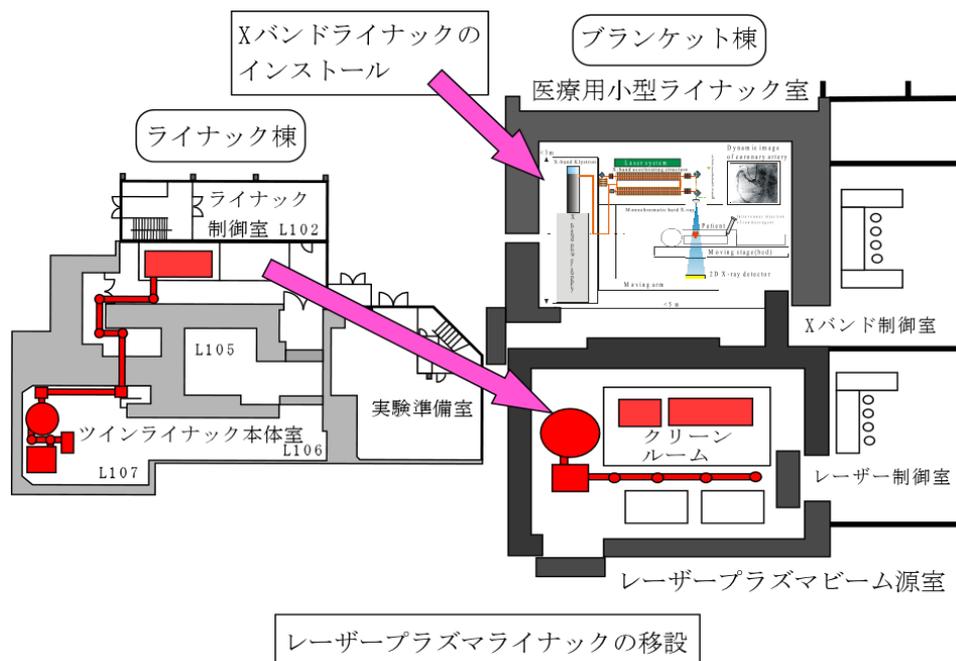


図1：クワッドライナックシステム構築

¹ E-mail: Uesaka@utnl.jp

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。テラワットレーザー装置を用いる実験(F-11)は、レーザー装置移設に伴い、移設・システム調整があるためオフパイル利用で運転する。

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. MgカソードRFガン[1]

昨年度に引き続き、入射器としてMg photocathode RF gun (JASRI / Spring8所有) を採用している18Lでは、主にサブピコ時間領域の放射線化学実験を行っている。電子ビームとフェムト秒レーザーの同期は、ライナック施設空調改善(温度揺らぎ±0.5)にともない、長周期ドリフト成分の低減に

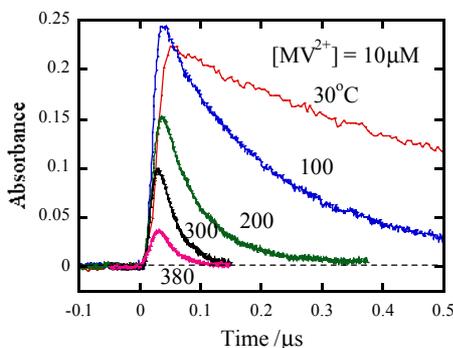


図2. 高温・超臨界水中の水和電子とメチルピオローゲンとの反応

成功している。現在は1時間で1.4ps(rms)の精度である。また、これまで電子バンチの圧縮にはシケイン型バンチ圧縮器を用いてきたが、現在別の方式によるバンチ圧縮を検討している。これはミラノ大学の Prof. L. Serafini が提唱するもので[2]、加速管内で圧縮を行う。このため磁気圧縮器を必要としないのが利点である。シミュレーションでは、我々の18Lにおいて0.8psの圧縮が可能であるという結果をえている。これは従来のシケイン型圧縮器と同程度の性能である。検証実験では現在2ps以下の圧縮に成功している。

4. 放射線化学

【高温・超臨界水パルスラジオリシス】 水は374、221atm以上において超臨界状態となる。これは、次世代原子炉の冷却水や環境科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。本研究では、超臨界水の放射線化学反応を解明するため、35MeVライナックを用いたナノ秒パルスラジオリシスを行っている。これまで400、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・圧力依存性等について測定を行ってきた。図2に、10μM Methyl Viologen水溶液を用いた結果を示す。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わかる。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行っていきたいと考えている

【超高時間分解能パルスラジオリシス】 放射線物理化学の初期過程解明のための、Mgレーザーフォトカソードとフェムト秒白色光を組み合わせた高時間分解能パルスラジオリシス装置[3]の開発がほぼ完了し、応用を開始した。ポンプ&プローブ方式で測定を行い、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う。図3に、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す。まず近赤外領

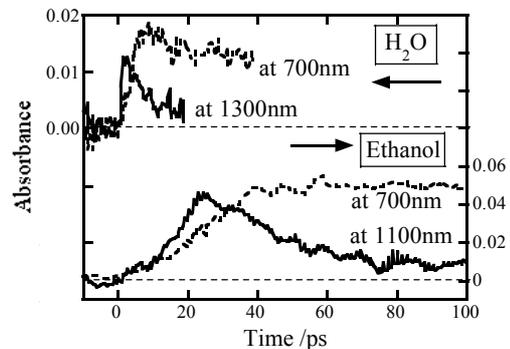


図3. MgフォトカソードRFガンで測定した、水およびエタノール電子の溶媒和過程

域で吸収が立ち上がり、時間を経るにつれ減衰する。それと共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言える。今後、更なる詳細な測定を行ってゆく予定である。

5. レーザープラズマライナック[4]

我々は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を行なっている。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)電子シングルパンチを生成する。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。指向性の良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。最大加速エネルギー40MeV、横方向幾何学的エミッタンス0.1 mm mrad、の電子ビームを確認した。シミュレーション結果より電荷量 100pC/Pulse、パンチ長40fsと推定される。[5] また、我々は40fs電子パ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えている。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。また、予備実験としてレーザー光の偏向、スペクトル特性を測定した[6]。

6. Xバンドライナック

我々は、経静脈動的冠状動脈造影(Dynamic IVCAG)、生命科学応用などさまざまな用途が考えられる高品質の硬X線源をより小型化する、Xバンドライナックを用いたレーザー電子ビーム衝突による小型硬X線源を開発中であり、X線強度 10^9 photons/s(但し後述のレーザーサーキュレーションを採用した場合)を目指す。

X線の強度を安定にするには、まず、RF源の出力を安定にする必要がある。また医療応用を考える場合、電源は小型である必要がある。電源で発生するビームエネルギーふらつきは、レーザー電子ビーム衝突ルミノシティに影響を与えるが、これはビーム光学系に依存する。また、エネルギー拡がりや衝突点でのビームサイズ増大はルミノシティの減少を招くため、実現できるビームエネルギー広がり範囲内でビームサイズへの影響を許容できるようなビーム光学系である必要がある。Xバンド加速器ビームラインのビームラティス設計とXバンドRF源性能評価試験の進行状況について報告する[7]。

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とするとガンを通過するパンチの電荷量は30pCである。6MWのパワーをガンに投入するとき、カップリングの β 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程低くなっている。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。このエミッタンスは $1.4\mu\text{mm.mrad}$ となった[8]。

このシステムの第一段階の目標である、 10^9 光子/秒の実現のために、高分解能横方向ビームモニターの開発を進めている。そのための予備研究としてWire scanner、OTR、スクリーンモニター3種の同時計測システムの構築を行う。エミッタンス測定による分解能、機能性を含めた総合評価を行い、最適モニターを決定する[9]。

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 [10]。

7. 今後の展開

SバンドツインライナックはMgカソードRFガンにより安定稼働を実現し、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き、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(装置発・臨床の科学、社会的認知、市場)に貢献したい。

参考文献

- [1] 飯島北斗、他 第28回リニアック研究会要旨集(2003)WP-18
- [2] L. Serafini, 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] Y. Muroya, M. Uesaka, Y. Katsumura et al., "Ultrafast pulse radiolysis system combined with a laser photocathode RF gun and a femtosecond laser", Nucl. Instr. and Meth. A, **489** (2002) 554-562
- [4] 細貝知直、他 第28回リニアック研究会要旨集(2003)FB-5
- [5] T. Hosokai, et al, Phys. Rev. E. 67, 036407(2003)
- [6] 中村啓、他 第28回リニアック研究会要旨集(2003)TP-35
- [7] 土橋克広、他 第28回リニアック研究会要旨集(2003)WD-1
- [8] 深澤篤、他 第28回リニアック研究会要旨集(2003)WP-8
- [9] 坂本文人、他 第28回リニアック研究会要旨集(2003)TP-39
- [10] 今井貴之、他 第28回リニアック研究会要旨集(2003)WP-5