

## DEVELOPMENT OF FEMTOSECOND PHOTOCATHODE RF GUN LINAC IN OSAKA UNIVERSITY

Jinfeng Yang<sup>1</sup>, Takafumi Kondoh, Akira Yoshida, Takahiro Kozawa, Youichi Yoshida, Seiichi Tagawa  
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University  
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

### Abstract

An S-band femtosecond electron linear accelerator was developed in Osaka University for the study of radiation-induced ultrafast physical and chemical reactions. A 32 MeV single electron pulse with pulse width of 98 fs in rms was generated successfully in the linac with a magnet bunch compression system. By using the femtosecond electron bunch, an equivalent velocity spectroscopy with a synchronized femtosecond laser, as a new method with high time-resolution, was developed for study of the ultrafast reactions or phenomena on femtosecond time scale. Moreover, a new concept of double-decker electron linac was proposed for the study of femtosecond/attosecond pulse radiolysis without the analyzing laser light. The femtosecond double-decker electron beams were successfully generated with the photocathode rf gun linac.

### 阪大産研フェムト秒フォトカソードRF電子銃ライナックの現状

#### 1. はじめに

パルスラジオリシス法は、量子ビーム誘起現象を直接的に測定する手法であり、これまでに量子ビーム誘起現象の超高速現象の解明に大きく貢献してきた。その時間分解能は、短パルス電子線と短パルスのレーザー分析光を組み合わせた方式によりサブピコ秒にとどまっている[1-2]。

阪大産研では、時間分解能の向上と利用実験の拡大を目指して、2002年よりレーザーフォトカソードRF電子銃と新しいSバンドライナックを導入し、レーザーフォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒超短パルス電子線の発生を開始した。2004年に最短98フェムト秒電子パルスの発生に成功し、そのフェムト秒電子パルスを用いて、同期されたレーザー光パルスを利用した等価速度分光法によるフェムト秒パルスラジオリシスの開発を行っている。また、時間分解能をさらにアト秒に向上するために、レーザー分析光パルスを使わない、1台のライナックでツインライナックを実現するダブルデッカー加速器を開発し、世界初めて1台の加速器で上下2つのフェムト秒パルス電子線の発生に成功した。

#### 2. フォトカソードRF電子銃ライナック

阪大産研のフェムト秒ライナックは、SバンドのレーザーフォトカソードRF電子銃、長さ2mの加速管と磁気パルス圧縮器から構成されている。レーザーフォトカソードRF電子銃は、住友重機械製の1.6セルBNL-GunIVタイプである[3-4]。電子発生用の光カソードの材質は無酸素銅を用いられている。

光カソードの光源としては、全固体Nd:YLFピコ秒レーザーを用いた。本レーザーは、Nd:YLF発振器（波長：1053nm）、再生増幅器と波長変換器に

より構成される。発振器は、電子線発生と加速用の2856MHzのRFを1/36に分周した79.3MHzのRFに同期してモードロック発振を行っている。オシレータ出力パルスの時間ジッターは0.3ps (rms) 以内に抑えられた。オシレータからの高い繰り返し（79.3MHz）のレーザー光は、ポッケルセルによって、1つの光パルスが選択され、再生増幅器の共振器に導入される。ポッケルセルの繰り返しは10Hzであった。再生増幅器で3mJまで増幅された光は、非線形結晶を2つ配置したSHGによってUV（262nm）を波長変換され、カソードに照射される。出力UVパルスエネルギーは最大0.3mJで、エネルギー安定度を0.5%に達成し、パルスの幅は、5ps (FWHM) であった。カソード表面のレーザー光のビーム径は2mm（直径）であった。

RF電子銃から発生した電子ビームのエネルギー（4MeV）が低いと、ビーム輸送中空間電荷効果によるエミッタンスの増大を生じる。これに対しては、電子銃出口にソレノイド磁石を取り付けられ、ソレノイド磁場強度を最適化し、空間電荷効果によるエミッタンスの増大を補正する。

電子ビーム加速用のライナックは、長さ2mのSバンド進行波型ライナックを採用し、カソード表面から1.2mの位置に設置されている。ライナックとRF電子銃には、同一クライストロンから2分配されたRFがそれぞれ供給される。ライナックとRF電子銃に供給されるRFピークパワーはそれぞれ25MWと10MWであり、RFパルス幅は4μsで、運転繰り返しは10Hzである。ライナックのRF位相調整は、ハイパワーRF伝送ラインに取り付けたフェーズシフターによって行う。ライナックでは、電子ビームを加速するとともに、RF位相調整により電子パルスがエネルギー変調される。

<sup>1</sup> E-mail: yang@sanken.osaka-u.ac.jp

電子パルス圧縮は、2台の45° 偏向磁石と4台の四極電磁石から構成された磁気パルス圧縮システムを用いて行われている (図1に示す)。すなわち、ライナックでエネルギー変調された電子パルスが磁気パルス圧縮システムを通過させることによってエネルギー違い電子の軌道長の差を利用してパルスを圧縮する。

### 3. フェムト秒超短パルス電子線の発生

磁気パルス圧縮法によって圧縮されたパルスの幅は、入力ビームのエミッタンスとエネルギー分散に依存し、空間電荷効果や磁場による非線形効果から決められる。本研究では、RF電子銃に照射するレーザーのビーム径を最適化し、ソレノイド磁場によるエミッタンス増大の補正を行い、3-4 mm-mradの低エミッタンス電子ビームが得られた。このビームをライナックに加速する際、RF位相の最適化により電子パルスの非線形エネルギー変調を利用して磁気パルス圧縮器の四極電磁石の磁場分布の最適化によりパルス圧縮の非線形効果を補正し、最短98フェムト秒電子パルスの発生に成功した。

電子パルス長の測定は、フェムト秒ストリークカメラを用いて、電子パルスが空気中に通過する際発するチェレンコフ光の測定により行った。図2に、測定した98フェムト秒電子パルスの時間プロファイルを示す。そのときの電荷量は0.17nCであり、規格化エミッタンスは3.8mm-mrad、エネルギー分散は0.2% (rms)であった。また、エネルギー変調によるパルス幅の変化や空間電荷効果によるパルス幅の増大の研究を実験的に行った。

### 3. 等価速度分光法によるフェムト秒パルスラジオリシスの開発

フェムト秒時間分解能を達成するためには、フェムト秒電子パルスとフェムト秒分析光パルスが必要であるほかに、サンプル中での光と電子が通過する速度の違いによる時間分解能の劣化の防止が必要である。たとえば、1mmの水サンプルを利用すると、水の屈折率はおよそ2程度であるからサンプル

中での光の速度は電子線の速度の半分程度になり、両者の速度差に起因する時間分解能の劣化は、3psとなる。逆に100フェムト秒の時間分解能を得るためには、30ミクロン程度の厚さのサンプルセルを使用する必要がある。一方、測定したい時間分解光吸収の強度は、電子ビームによって生成された活性種の濃度とサンプルセル中での分析光の光路長に比例する。活性種の濃度は、電子ビームの電荷密度に依存するが、30ミクロンの光路長では、いかにレーザーフォトカソード電子銃ライナックの電荷密度が大きいとはいえ、吸収測定は不可能である。

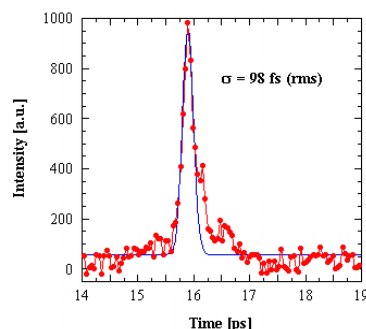


図2: フェムト秒電子パルスの時間波形

この問題を解決するために、本システムでは、図3に示すような等価速度分光法と呼ばれる方式を開発した。これは、電子線パルスと光パルスを屈折率に応じて角度をつけてサンプルに入射する方法である。その際に、磁気パルス圧縮器で電子線パルスの波面を光パルスと同じになるように調整を行う。そうすることにより、サンプル中での光路長による時間分解能劣化を原理的にはゼロにまですることが可能である。また、光路長も電子ビームの径に応じて大きくとることが可能であり、吸収強度も格段に大きくなる。

等価速度分光法によるフェムト秒パルスラジオリシスシステムを図3(a)に示す。励起源としてフォトカソードRF電子銃ライナックから発生したフェムト秒電子パルスを利用し、分析光としてチタンサファイアレーザーから発生したフェムト秒光パルスを用いている。本レーザーは、RF電子銃用レーザーと同

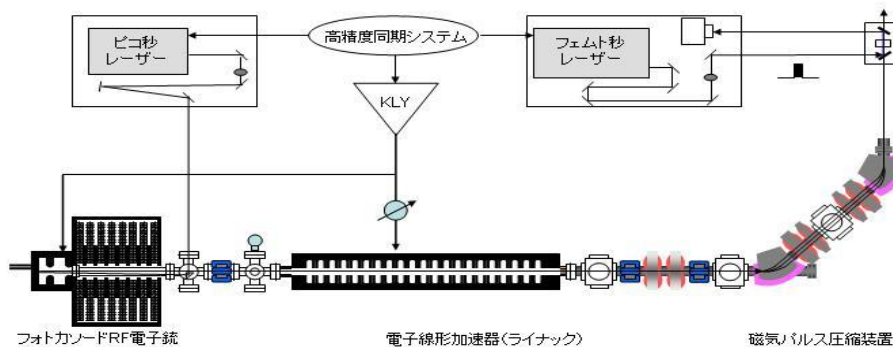


図1: フェムト秒電子パルス発生とフェムト秒パルスラジオリシス装置

様に電子線加速用の2856MHzのRFを1/36に分周した79.3MHzRFと高精度で同期されている。光パルス強度の変動による測定のS/Nの劣化を防止するために、AOMパルスセレクターを用いて、繰り返し79.3MHzのフェムト秒レーザーパルスから数パルスを切り出し、ダブルパルス測定法を採用した。光のパルス幅は、レーザー出口では80fsであり、AOMパルスセレクターを通過後は160fsであった。

図3(b)に、等価速度分光法パルスラジオリシスから得られた水和電子の時間挙動を示す。実験では、厚さ2mmの石英セル内で常温照射し、分析光にはフェムト秒レーザーの基本波(800nm)を用いた。図に示すように、等価速度分光法を用いて電子パルス波面を曲げた時( $\phi=65^\circ$ )の水和電子吸収時間スペクトルの測定時間分解能(4.0ps)は、電子パルス波面を曲げない時( $\phi=90^\circ$ )の時間分解能(5.5ps)より1.5psを向上したことがわかった。また、等価速度分光法を用いたパルスラジオリシスでは、時間分解能への効果だけではなく、吸収強度が明らかに大きく取れることも実験的に確認した。

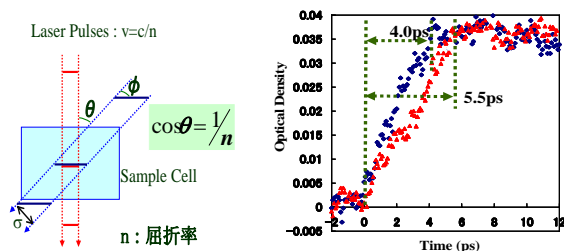


図3: (a) 等価速度分光法、(b) 等価速度分光法による水和電子の時間挙動

#### 4. ダブルデッカー電子加速器の開発と新規パルスラジオリシス

ダブルデッカー型電子加速器は、1台のライナックで上下2つ電子パルスの発生と加速を実現する加速器である。すなわち、現在開発しているレーザーフォトカソードRF電子銃ライナックを利用し、ダブル入射光学系を用いてカソードに照射するレーザー光パルスを2つに分ける。その2つレーザー光パルスを光学遅延回路により時間差つけ、約1mmずれたカソード面に照射することによりダブル電子パルスが生成され、その後、ライナックで加速され、磁気パルス圧縮装置を用いて圧縮される。圧縮された一番目の電子パルスを光に変換し、分析光パルスとして利用する。励起パルスとしては、次の電子パルスを利用する。ダブル電子パルスは同じのレーザーパルスから生成されるため、時間ジッターは電子加速のRF位相変動だけで決められる。したがって、RF位相を安定化することにより、分析パルスと励起パルスの時間ジッターが最小限に抑えられる。また、分析光パルスの生成には電子線のコヒーレント放射を利用しているため、大強度の分析光パルスが得られる。

2004年には、ダブル入射光学系、ダブル電子パルス発生と圧縮システム、電子ビーム測定系を構築し、初めてレーザーフォトカソードRF電子銃を用いたダブルデッカー電子パルスの発生に成功した。図4に、RFガン出口、ライナック出口、パルス圧縮装置出口でのダブルデッカー電子ビームのプロファイルとダブル電子パルスのタイミングを示す。本実験では、ダブル電子パルスの時間差を1.4ns(加速器の周波数2856MHzの4周期分)設定した。RFガンで発生したダブルデッカー電子ビームが加速管を通過した後も上下のポジションを維持したまま加速されたことが分かる。最後に、そのダブル電子パルスを、磁気パルス圧縮器を用いて圧縮し、パルス長が380fsと得られた。

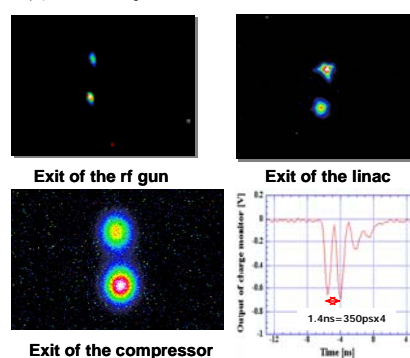


図4: フェムト秒電子パルスの時間波形

#### 4. まとめと今後の予定

阪大産研では、時間分解能の向上と利用実験の拡大を目指して、レーザーフォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒超短パルス電子線の発生を開始し、2004年に最短98フェムト秒電子パルスの発生に成功した。そのフェムト秒電子パルスを用いて、同期されたレーザー光パルスを利用した等価速度分光法によるフェムト秒パルスラジオリシスの開発を行った。また、パルスラジオリシスの時間分解能をさらにアト秒に向上するために、レーザー分析光パルスを使わない、1台のライナックでツインライナックを実現するダブルデッカー加速器を開発し、世界初めて1台の加速器で上下2つのフェムト秒パルス電子線の発生に成功した。

これから、電子パルスの波面を制御して等価速度分光法によるフェムト秒パルスラジオリシスの評価を行い、量子ビーム誘起初期過程の本質を明らかにし、次世代極限ナノ加工の精度を決めるナノ空間における反応機構の解明を行っている。

#### 参考文献

- [1] Y. Yoshida, et al., Radit. Phys. Chem., **60** (2001), 313-318.
- [2] K. Kozawa, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **440** (2000), 251-254.
- [3] J. Yang, et al., Nucl. Instrum. Meth. A **491** (2002), 15-22.
- [4] J. Yang, et al., J. Appl. Phys., **92** (2002), 1608-1612.