

# フォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒電子パルスの発生とパルスラジオリシス

楊金峰<sup>1</sup>、友定寛、竹谷考司、山本保、古澤孝弘、菅田義英、吉田陽一、田川精一  
大阪大学産業科学研究所  
〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1

## 概要

阪大産研では、量子ビーム誘起した超高速現象の解明のため、新しいS-バンドライナックとレーザーフォトカソードRF電子銃を導入し、RF電子銃を用いた低エミッタンスのフェムト秒電子パルスの発生を行っている。発生したフェムト秒電子パルスとフェムト秒レーザー光パルスを用いて新しいパルスラジオリシスシステムを開発し、さらにパルスラジオリシスの性能向上のため新しい制御システムを構築し、電子パルスとレーザーとの同期システムの改良も行った。本研究会でRF電子銃を用いたフェムト秒電子パルスの発生とパルスラジオリシスの研究開発現状と今後の課題について報告する。

## 1. はじめに

電子線励起時間分解吸収分光法（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。

阪大産研では、1999年より本格的なサブピコ秒パルスラジオリシスシステムの整備および利用実験を開始した[1-2]。そのサブピコ秒パルスラジオリシスシステムでは、励起源として阪大産研Lバンドライナックからの電子線を磁気パルス圧縮法によって圧縮したフェムト秒電子線パルスを用い、分析光源としてLバンドライナック用のRFと同期したフェムト秒チタンサファイアレーザーパルスを用いている。電子線パルスとレーザーパルス間の時間ジッターによる時間分解能の劣化に対しては、フェムト秒ストリークカメラを用いて電子線パルスと分析レーザーパルスの時間差を正確に測定し、両パルス間の時間ジッターの影響をストリークカメラの時間分解能（185fs）までに低減することが可能になった。現在、阪大産研においてはパルスラジオリシスの時間分解能を最短850フェムト秒に達成し、従来測定が不可能で

あった放射線初期過程に関する重要な知見が得られている。

2002年からは、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電子銃を用いた低エミッタンスフェムト秒電子線の開発を開始した。レーザーフォトカソードRF電子銃から発生した低エミッタンス電子線パルスをRF電子銃下流に設置されたライナックのRF位相を調整することによってエネルギー変調させ、最後に磁気パルス圧縮法を用いてフェムト秒までパルス圧縮する。従来のL-バンドライナックを比べ、本システムでは電子線パルス長が数十フェムト秒までに圧縮でき、低エミッタンスのため高輝度になる。従って、高S/N光吸収分光の実現が期待できる。また、レーザーフォトカソードRF電子銃を利用しているため、電子線パルスと分析光パルスが高精度で時間同期でき、時間ジッターによるパルスラジオリシス時間分解能の劣化を減らすことも期待できる。

パルスラジオリシスの性能向上のために、電子線パルスの発生、加速および圧縮を高精度で制御する必要がある。本システムでは、高速PLCを用いた制御システムを導入した。また、冷却水システムとクライストロンシステムを安定化するための改善も行った。

## 2. レーザーフォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒ライナックとパルスラジオリシス

### 2.1 レーザーフォトカソードRF電子銃

本レーザーフォトカソードRF電子銃は、住友重機械製のBNL - GunIVタイプである[3-4]。加速空洞はS-バンドの1.6セルと採用され、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、全固体ピコ秒レーザーを用いた。本レーザーは、モードロックNd:YLF発振器、再生増幅器と波長変換器により構成される。発振器の周波数は、電子線発生と加速用の2856MHzRFを1/36に分周した79.3MHzRFと位相ロックされている。再生増幅器から出力エネルギー3 mJまで増幅された光パルスは、非線形結

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

晶によって4倍波(262nm)を発生し、カソードに照射される。

本RF電子銃では、レーザー入射角度68°の入射ポートが取り付けられているが、レーザー光をそのままに入射するとカソード面でのレーザー光形状が楕円になり、発生した電子ビームの形状も楕円になり、エミッタンス増大の原因になる[2]。そのエミッタンス増大を避けるために、本システムではRF電子銃下流の真空チェンバーに光反射用のプリズムを設置し、図1に示すようなカソード面に対して垂直のレーザー照射方法を採用した。RF電子銃から発生した電子ビームのエネルギー(4MeV)が低いため、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。

## 2.2 電子線加速用ライナック

電子ビーム加速用のライナックは、三菱重工製の長さ2mのS-バンド進行波型ライナックを採用している。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4 $\mu$ s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。

電子ビームを安定化させるためには、クライストロン出力の安定化と、RF電子銃とライナックの温度安定化が必要である。そのため、クライストロンのパルス電源には、PFNを10段に採用し、充電電源を安定化させることにより出力パルス電圧の安定度を0.2%以内に抑えた。RF電子銃とライ

ナックの温度安定化については、高精度冷却装置を導入した。加速空洞の温度制御を0.1以内に抑えた。

## 2.3 電子パルス圧縮

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。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ている。阪大産研では、磁気パルス圧縮法を用いてL-バンドライナックから発生した電子パルス圧縮実験を行った。L-バンドライナックから発生したエネルギー19.1MeV、規格化エミッタンス100mm-mrad、パルス幅6.6psの電子パルスを850fsに圧縮することに成功した。本システムでは、レーザーフォトカソードRF電子銃を利用しているため、L-バンドライナックに比べてビームのエミッタンスが1/100まで改善でき、シミュレーションにより本システムでは電子パルスの圧縮は数十フェムト秒まで可能である。

## 2.4 フェムト秒パルスラジオリシス

阪大産研レーザーフォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒パルスラジオリシスシステムを図1に示す。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、チタンサファイアレーザー発振器、パルスセレクトと再生増幅器から構成されている。発振器の周波数は、RF電子銃用レーザーと同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。

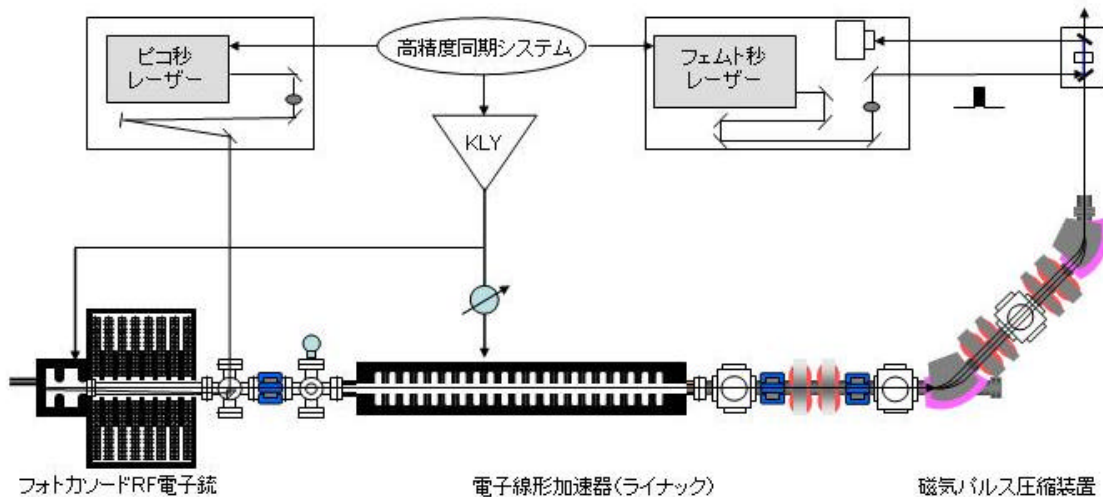


図1 レーザーフォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒ライナックとパルスラジオリシス

また、パルス切り出しのポッケルセルにも79.3MHzRFと同期したトリガーを供給している。レーザーパルスと電子線パルスの時間同期システムを図2に示す。再生増幅器の下流側にOP0を取り付け、出力パルス波長が可変となっている。したがって、違った波長での過渡吸収の測定が可能となる。

また、電子線パルスとレーザーパルスの間の時間ジッターによる時間分解能の劣化に対しては、従来開発したフェムト秒ストリークカメラを用いた時間ジッター補正法を取り込んだ。

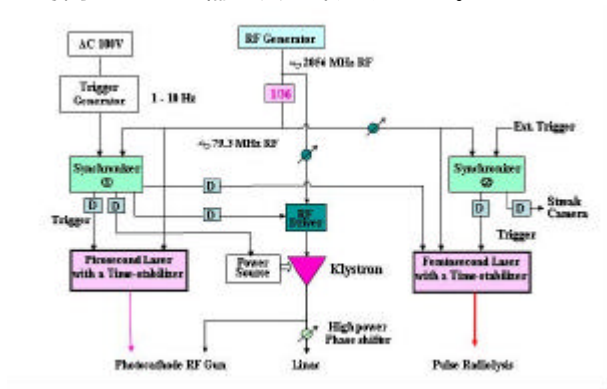


図2 レーザーパルスと電子線パルスの時間同期

### 3. 電子パルス発生と圧縮のシミュレーション

図3に、PARMELA計算コードを用いたフォトカソードRF電子銃とライナックにおける電子ビーム発生と加速のシミュレーション結果を示す。計算条件として、カソード表面に入射レーザー光のスポットサイズは直径1mmであり、パルスあたりの電荷量が0.1nCであった。RF電子銃のレーザー入射位相は30°に設定され、ソレノイド磁場強度は1.6kG（横エミッタンスが最小になる）に最適化された。ライナックはカソードから1.37mの下流側に設置され、電子ビームの加速エネルギーは20MeVであった。ライナックのRF位相は、ビーム

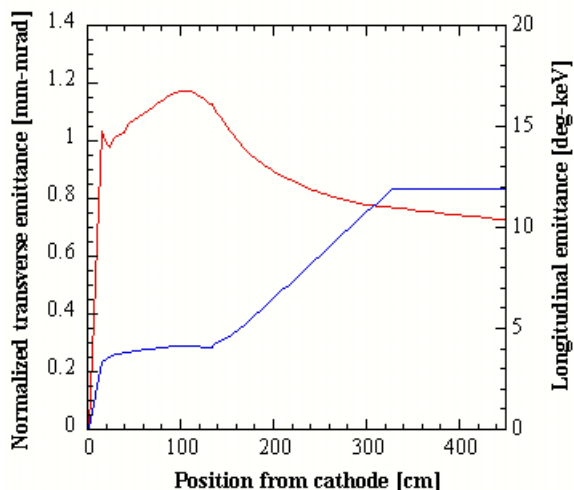


図3 ビーム横と縦エミッタンス

下流に取り付けられた磁気パルス圧縮装置で圧縮したパルス幅が最短になるように70°に設定された。ライナックでの加速エネルギーが最大になるRF位相は90°であった。シミュレーションにより、パルス圧縮の入口での横方向の規格化エミッタンスは0.7mm-mradであり、縦エミッタンスは12deg-keVであった。

磁気パルス圧縮に関しては、空間電荷効果を考

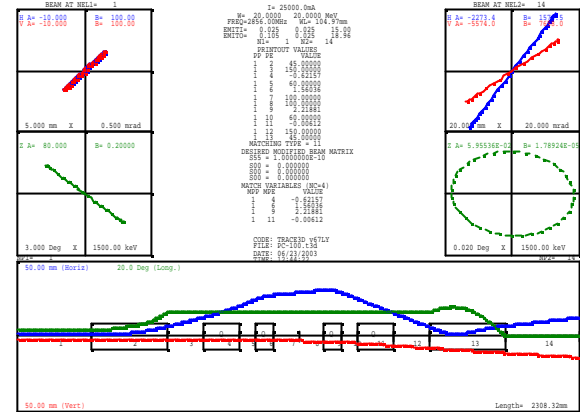


図4 Trace-3Dの計算結果

量したTrace-3D計算コードを用いてシミュレーションを行い、パラメーターを最適した。ビームの入力条件として、PARMELAで計算した出力を用いた。図4にTrace-3Dの計算結果を示す。4個のQマグネットの配置とそれぞれの磁場強度を調整することによって電荷量が0.1nC、パルス幅が20fs（rms）に圧縮可能であることが分かった。

### 4. まとめと今後の予定

レーザーフォトカソードRF電子銃を用いたフェムト秒ライナックとフェムト秒パルスラジオリシスシステムを構築した。電子パルスの発生と圧縮については空間電荷効果を考量したシミュレーションを行い、ビームのエミッタンスとパルス幅を見積った。

今後、RF電子銃とライナックを用いて電子パルスの発生と加速実験を行うと共に、電子パルスを圧縮し、フェムト秒レーザー光パルスと組み合わせるフェムト秒パルスラジオリシスを行う予定である。また、本システムでは電子ビームが90°に偏向されるため、Coherent synchrotron radiation効果によるエミッタンスの増大とビームエネルギー広がりの増加を考量する必要である[5]。今後は、その効果を考量したパルス圧縮法を検討する。

### 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.
- [5] B. E. Carlsten, Phys. Rev. E **54**(1996), 838-845.