

## 阪大産研量子ビーム科学研究施設の現状報告

### STATUS REPORT OF RESEARCH LABORATORY FOR QUANTUM BEAM SCIENCE, ISIR, OSAKA UNIVERSITY

古川和弥, 菅田義英, 藤乗幸子, 磯山悟朗, 岡田宥平, 久保久美子, 徳地明, 楊金峰, 近藤孝文, 菅晃一,  
神戸正雄, 吉田陽一

Kazuya Furukawa, Yoshihide Honda, Sachiko Tojo, Goro Isoyama, Yuhei Okada, Kumiko Kubo, Akira Tokuchi,  
Jinfeng Yang, Takafumi Kondoh, Koichi Kan, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida  
ISIR, Osaka University

#### Abstract

We report the present status of L-band and RF-gun linacs at the Research Laboratory for Quantum Beam Science in ISIR, Osaka University. The L-band linac is used for pulse radiolysis study in the time range from nano-second down to sub-picosecond and for generation of terahertz light based on free electron laser (FEL). We have developed a Si-thyratron based solid state switch replaced with the thyratron. Several improvements such as upgrade of cooling system and developing new operating system with Windows 10 have been made for the L-band linac. The RF-Gun linac is used mainly for generation of ultrashort-pulse electron beam and for study of femtosecond/attosecond pulse radiolysis. We have also constructed a femtosecond time-resolved MeV electron microscope using RF gun to study the ultrafast phenomena and structural dynamics in materials. A new RF gun test bench was also developed to generate an ultralow-emittance electron beam for new applications, i.e. ultrafast electron diffraction.

#### 1. はじめに

阪大産研量子ビーム科学研究施設は L バンド 40 MeV 電子ライナック、フォトカソード RF 電子銃ライナック、S バンド 150 MeV 電子ライナック、コバルト 60  $\gamma$  線照射装置を持つ放射線共同利用施設である。

L バンドでは近年マイクロ波源の安定化のためにモジュレータのスイッチング用半導体スイッチの開発や、サブハーモニックバンチャー用半導体増幅器の導入等を行うことで大幅に安定度が向上した[1]。L バンドの利用では、ナノ秒パルスラジオリシスを用いた時間分解ラマン分光装置の導入により、有機・無機物質の酸化還元状態の振動構造の直接測定が可能となり、FEL に関しては電子銃用 27 MHz グリッドパルサーの開発後入射電流が大幅に増加するとともに[2]、テラヘルツ波の強度が大幅に増強され、利用件数も着実に増加している。

RF 電子銃ライナックはフェムト秒パルスラジオリシスによる放射線化学初期過程の解明に用いられており、10 fs を切る超短パルス電子ビームの発生に成功した。また RF 電子銃を用いた MeV 電子顕微鏡、電子線回折と新規電子銃開発の役割を担った小型短パルス電子線発生装置を開発している。

本年会では当施設の保守管理・開発の状況に関して報告する。

#### 2. 量子ビーム科学研究施設の利用状況

量子ビーム科学研究施設での共同利用採択テーマ数は産研から 15 件、学内から 14 件、学外の研究者を含むものが 10 件、拠点から 10 件、企業から 1 件の合計 50 件であった。平成 28 年度の L バンドライナックの

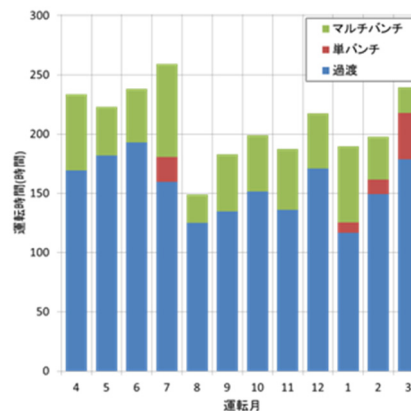


Figure 1: Operation Time of the L-band Linac of 2016.

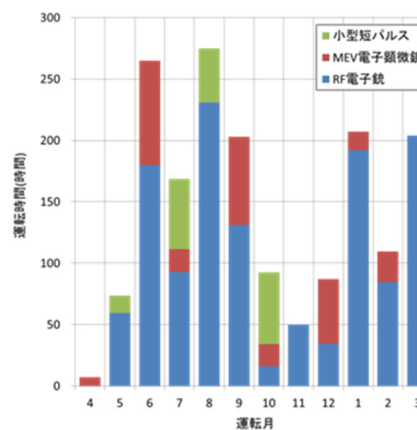


Figure 2: Operation Time of the RF-Gun Linac and MeV electron microscope and small short pulse electron linac of 2016.

# furukawa@sanken.osaka-u.ac.jp

運転状況を月別、モード別に Figure1 に示す。L バンドの保守日を含めた運転日数は 203 日、テーマ数 31、通算運転時間は約 2,516 時間であった。また RF 電子銃ライナック、MeV 電子顕微鏡、小型短パルス電子線発生装置の通算運転時間はそれぞれ、1275 時間、293 時間、173 時間であった。月別の運転時間を Figure2 に示す。

### 3. L バンドライナックの現状

#### 3.1 高周波源

2014 年にクライストロン(Thales TV2022E)が故障したため、新たに注文していた同機種のクライストロンが 2017 年 3 月に納入された。動作確認のために 5 月より新たに納入されたクライストロンを用いて運転している。クライストロン電圧・電流波形からパービアンスを求めると、 $1.44 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$  と、交換前のクライストロンのパービアンス  $1.55 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$  に比べて小さく、同様の条件ではパワーが出にくいため、入力側の RF アンプの出力を上げて運転を行っている。

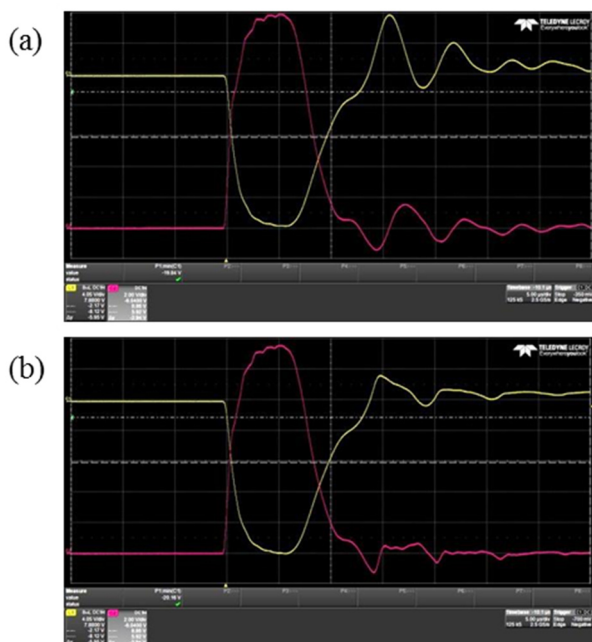


Figure 3: Voltage and Current Waveforms of the Klystron before Installing Diode (a), and after Installing Diode (b).

サイラトロンから置き換えた半導体スイッチは 2015 年度中頃から 1 年間以上故障なく運転に使用することができた。半導体スイッチ運転中はクライストロンへの逆電圧が大きいことから、12 月に逆電圧防止用に PFN と半導体スイッチ間に直列にダイオードを付けることで対策を行った。Figure 3 に示すように、ダイオード設置により逆電圧が 47%まで低減されることが確認できた。しかし、ダイオードを取り付けた次のマシンタイムで半導体スイッチの制御基板の故障が発生した。故障の原因はノイズによる制御基板の光送受信 IC 焼損であると考えられるため、現在はダイオードを外して運転を行っており、ノイズ対策を施した後再度設置予定である。

#### 3.2 冷却装置

精密系冷却装置では 7 月に冷凍機 1 の過電流によるインナーサーマルで運転停止が起こるようになり、徐々に停止頻度が上昇した。調査を行うと温度上昇を検知するモータープロテクタの誤動作が原因と判明し、部品交換を行い改善した。また納入時に比べ冷媒圧力が高くなっているため、熱交換器の洗浄も行ったが確認できるほどの効果はなかった。さらに 12 月には精密系冷却装置の冷凍機 2 の制水弁から冷媒漏れが発見されたことから、修理を行った。

1 次側冷却装置では 8 月に 1 次側冷却装置フィルターの交換を 2 年ぶりに行った。フィルター表面はヘドロ状の汚れに覆われており、54 本の全フィルターの交換を行うと共にタンク内の掃除を行った。フィルター汚れの軽減、冷却能力の向上を目的として 3 月に 1 次側冷却水のバルブ交換、Y ストレーナー増設、クーリングタワー充填剤交換、流量計設置、ステンレス製のポンプへの交換及びポンプのインバータ制御化等の大幅な整備を行った。また L バンドは冷却水の安定までに 1 時間程度かかることから、マシンタイム有効利用のため、自動で指定時刻に運転できるように 3 台の冷却装置の配線を変更し外部接点の追加を行った。PLC や漏水検出器の設置完了後、自動運転システムの稼働を予定している。

#### 3.3 制御システム

現在の L バンドライナックの制御プログラムは平成 14 年度の大規模改造の時に製作されたものであり、Windows2000(一部 XP に更新)を用いて動作しているが、維持管理費用や対応ハードの枯渇、セキュリティ上の問題等から、独自に更新を行うことにした。できるだけ OS に左右されず、非同期同時処理可能な言語であり、汎用性が高く安価にシステム構築できること、現在の PLC やネットワーク通信システムのリソースをそのまま使えることを考慮して構成を行うことにした。

制御 PC と PLC 間の通信規格としてこれまでは同時データ共有に有効な FL-Net を用いていたが、バージョン更新に PLC モジュールやドライバソフトの更新が必要であることから、Ethernet を用いて PLC との通信を行うことにした。Ethernet 通信用言語としては Windows10 でも Linux でも利用可能な JAVA を用いる。さらに JAVA で PLC から取得したデータの格納用データベースとしては無料利用可能な My SQL を用い、そのデータを用いてライナック制御やインターロック画面の表示を行うためのユーザーインターフェース用プログラム作成に C#を用いることにした。また現在の制御システムでは一部の機器は PLC を介さず制御 PC から直接 GPIB 制御を行っているが、今回のプログラムでは Ethernet/GPIB 変換モジュールを用いることで、全ての機器を Ethernet 通信で制御を行うようにしている。

現在各機器との通信、状態表示や運転表示部分の製作が完了し動作の検証を行っており、今後実際のビーム調整を行いながら、操作性の向上を行う予定である。

#### 4. RF 電子銃ライナックの現状

阪大産研量子ビーム科学研究施設では、レーザーフォトカソード高周波 (RF) 電子銃を活用し、RF 電子銃から直接的にフェムト秒電子ビームの発生または RF 電子銃と線形加速器・磁気パルス圧縮装置から構成された RF 電子銃ライナックを用いてフェムト秒・アト秒短パルス電子ビームの発生を行い、パルスラジオリシス法と時間分解電子顕微鏡法を通じて、フェムト秒・アト秒時間領域での量子ビーム誘起物理・化学反応現象や構造変化ダイナミクスの研究を推進している。また、高品質・短パルス電子ビームの発生や利用の拡大を目指して、2014 年 1 月に現在の RF 電子銃ライナックと時間分解電子顕微鏡をシャットダウンし、独立した実験室に移設すると共にアップグレードを行った。Figure 4 に、移設後の加速器のレイアウトと写真を示す。以下に、RF 電子銃ライナックの移設、アップグレードについて報告する。



Figure 4: Layout and photo of S-band RF gun based accelerator facilities at ISIR, Osaka University.

本 S バンドフォトカソード RF 電子銃ライナックは、フェムト秒短パルス電子ビームの発生と量子ビーム誘起超高速反応現象の解明のために、2003 年に建設された加速器であり、S バンドフォトカソード RF 電子銃、加速管と磁気パルス圧縮装置から構成されている[3,4]。RF 電子銃に無酸素銅のフォトカソードを用いている。電子ビームの発生には、全固体 Nd:YLF ピコ秒レーザーの 4 倍波を使用した。RF 電子銃から発生したピコ秒電子線パルスは、下流に取付けられた加速管により最大エネルギー 35 MeV まで加速され、加速位相の調整によりパルス圧縮の最適なエネルギー・位相空間分布を作り出す。輸送中の空間電荷効果によるエミッタンス増大は、RF 電子銃の出口に取付けられたソレノイド電磁石により補正される。磁気パルス圧縮装置は、45° の偏向電磁石 2 台と四極電磁石 4 台から構成される。フェムト秒電子線パルスを得るためには、磁場の非線形効果の影響、パルス圧縮中エミッタンスによるパルス幅の増大が低減する必要がある。そこで、我々は、まず加速管における非線形エネルギー変調を活用し、磁気パルス圧縮の 2 次効果の影響を最小限に抑えた。次に、四極電磁石の磁場強度を精密に制御し、磁気パルス圧縮の対称面 (mid-plane) に電子が垂直に入射するようなエンベロープマッチング条件を探し出し、パルス圧縮中エミッタンスによるパルス幅の増大を低減した。その結果、2006 年に最短 98 フェムト

秒の電子線パルスの発生に成功した[4]。そのときのパルス電荷量は 0.2 nC であった。発生したフェムト秒電子線パルスを用いて、2009 年に世界最高記録の 240 フェムト秒時間分解能を持つパルスラジオリシスの開発に成功した[3,4]。これにより、フェムト秒時間領域での放射線化学初期過程・反応プロセスの研究が初めて可能となった。その後、更に短い電子線パルスの発生を目指して、以下の 2 つの改良を行った。

- i. まず、六極電磁石を製作し、2 次効果が補正できる磁気パルス圧縮器を開発した。
- ii. 次に、RF 電子銃を直接的にフェムト秒レーザーの 3 倍波を駆動させ、縦方向エミッタンスが低いフェムト秒短パルス電子ビームを発生し、加速管によりエネルギー変調の後、磁気パルス圧縮器でフェムト秒電子線パルスの生成を試みた。これにより、3 次高次効果によるパルス幅の増大が低減でき、より短パルス電子ビームの発生が可能となった。

これにより、RF 電子銃を用いた低エミッタンス電子ビームの発生に成功し、改良した磁気パルス圧縮器を用いて最短 8.9 フェムト秒の短パルス電子ビームの発生に成功した。パルス幅の測定には、新たに開発した THz 光干渉法を用いた[5]。

物質相の生成過程と構造ダイナミクスを実時間と実空間のスケールで実験的に観察し理解することは、新物質相の創製・機能の発現には必要不可欠である。我々は、長年に開発しつづけた先端加速器技術であるレーザーフォトカソード高周波 (RF) 電子銃とこれを用いて低エミッタンスのフェムト秒電子線パルス発生装置の経験を活用し、世界に先駆けて相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた超高速電子顕微鏡装置 (MeV 電子顕微鏡) の開発を行ってきた[6]。装置の構成や説明、RF 電子銃を用いたフェムト秒電子線パルスの発生については、本学会の「フォトカソード RF 電子銃を用いた超高速電子顕微鏡の開発」の報告を参考して頂きたい。現在、エネルギーが 3.1 MeV のフェムト秒電子線パルスを用いてナノ粒子や微結晶の透過電子顕微鏡像の観測に成功した。また、電子線回折の測定では、単一のフェムト秒電子線パルスによる観察を実現し、フェムト秒・ピコ秒時間領域での結晶構造相転移の測定に成功した。

上記で述べたように、パルスラジオリシスの時間分解能をアト秒に、時間分解電子顕微鏡の空間分解能をナノメートルに向上させるには、更になる低エミッタンス・短パルス電子ビームが不可欠である。このような電子ビームを得るために、パルス当たりの電荷量 (1 pC/pulse 以下) を低減しなければならない。一方、測定には、高精度かつ短時間の観測が望まれ、短時間で沢山の電子数が要求される。これらの問題を解決するために、電子線パルスの繰返しを上げなければならない。すなわち、高繰返しの電子源が必要となる。そこで、我々は、高エネルギー加速研究機構との共同研究で、高繰返しの常伝導 RF 電子銃を開発し、新たに RF 電子銃テストベンチ (小型短パルス電子線発生装置) を建設した。RF 電子銃テストベンチには、RF 電子銃の後ろにソレノイド電磁石、コンデンサレンズ、試料挿入機構、さまざまのビームモニターが設けられ、ビームダイナミクスの研究が可能である。現在、

レーザービーム径の制御や絞りによるコリメートより、0.1 mm-mrad の極低エミッタンスかつフェムト秒短パルスの電子ビーム発生に成功し、時間分解電子線回折やその他のポンププローブなどの応用実験に展開している。

## 5. まとめ

L バンドライナックでは、新たに納入されたクライストロンを用いて運転をしており、サイクロンから置き換えた半導体スイッチはノイズ対策等を進めている。また1次側冷却水はフィルター負荷軽減、冷却能力の向上を目的として大幅な整備を行った。さらに現在の Windows2000 を用いたシステム更新のため、C#、JAVA、MySQL を用いた Windows10 で動作するシステムの開発を進めている。

RF 電子銃は 2014 年 1 月にシャットダウンし、移設、アップグレードを行った。改良した磁気パルス圧縮器を用いて最短 8.9 フェムト秒の短パルス電子ビームの発生に成功した。また RF 電子銃を用いた MeV 電子顕微鏡の開発を行い、電子顕微鏡画像の観測、結晶構造相転移の測定に成功した。更なる低エミッタンス・短パルス電子ビームの達成に向けて高繰返しの常電導 RF 電子銃の開発を行った。

## 参考文献

- [1] A. Tokuchi, F. Kamitsukasa, K. Furukawa, K. Kawase, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, H. Osumi, S. Funakoshi, R. Tsutsumi, S. Suemine, Y. Honda, G. Isoyama, Nucl. Instrum. Methods **A769** (2015) 77.
- [2] Shoji Suemine, Keigo Kawase, Naoya Sugimoto, Shigeru Kashiwagi, Kazuya Furukawa, Ryukou Kato, Akinori Irizawa, Masaki Fujimoto, Hiroki Ohsumi, Masaki Yaguchi, Sousuke Funakoshi, Ryouta Tsutsumi, Kumiko Kubo, Akira Tokuchi, Goro Isoyama, Nucl. Instrum. Methods **A773** (2015) 100-101.
- [3] J. Yang, T. Kondoh, K. Kan, Y. Yoshida: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **629**, (2011) 6-10.
- [4] J. Yang, T. Kondoh, K. Kan, T. Kozawa, Y. Yoshida, S. Tagawa: Nucl. Instrum. Methods A **556** (2006) 52.
- [5] I. Nozawa, K. Kan, J. Yang, A. Ogata, T. Kondoh, M. Gohdo, K. Norizawa, H. Kobayashi, H. Shibata, S. Gonda, and Y. Yoshida, Phys. Rev. ST Accel. Beams **17**, 072803(2014).
- [6] J. Yang, Y. Yoshida, H. Shidata, Electronics and Communication in Jpn, 98, No. 11, 50-57(2015).