

# 阪大産研量子ビーム科学研究施設の現状報告

○古川和弥, 誉田義英, 磯山悟朗, 福井宥平, 徳地明, 吉田陽一,  
楊金峰, 菅晃一, 神戸正雄, 細貝知直  
大阪大学 産業科学研究所  
furukawa@sanken.osaka-u.ac.jp

## Abstract

The present status of L-band, RF-gun and S-band linacs and MeV electron microscope at the Research Laboratory for Quantum Beam Science in ISIR, at Osaka University was reported. The L-band linac is used for time-resolved measurements of ionizing radiation induced reactions by pulse radiolysis technique in the time range from nano-second down to sub-picosecond, and for generation of terahertz light based on free electron laser (FEL). The last year, we replaced the cathode of the electron gun, installed a kicker electromagnet, repaired the solid-state switch to mount a self-feeding circuit, and replaced the stage of the FEL resonator. The RF-Gun linac is mainly used for generation of ultrashort-pulsed electron bunches and for study of femto-second/atto-second pulse radiolysis. Last year, ultrashort pulsed electron beam generation and THz measurement research using femtosecond laser were conducted. In addition, the development of a femtosecond time-resolved electron microscope using a MeV electron microscope was promoted. Beam conditioning and beamline design of S-band linac was conducted to generate low-speed positron beam.

## 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 バンドライナックはナノ秒とサブピコ秒領域のパルスラジオリシスを用いた放射線化学の研究や、FEL による大強度テラヘルツ波の発生と利用に用いられる。昨年度は電子銃カソードの交換、キッカー電磁石の設置、半導体スイッチに自己給電式回路を搭載するための改修作業、FEL 共振器用ステージの交換等を行った。

RF 電子銃ライナックは主に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る。昨年度はピコ秒レーザーのトラブルに対処しながら、フェムト秒レーザーを用いたフェムト秒・アト秒超短パルス電子ビーム発生と THz 計測に関する研究を行った。また RF 電子銃を装備した MeV 電子顕微鏡を用いてフェムト秒時間分解電子顕微鏡の開発に関する実験を行った。

S バンド 150 MeV 電子ライナックは主に低速陽電子生成に用いられる。昨年度は発生した陽電子ビームを陽電子実験室に設置したリモデレータに導くために、軌道計算を含めたビーム調整と機器整備を行った。

本年会では当施設の保守管理・開発の状況に関して報告をする。

## 2. 量子ビーム科学研究施設の利用状況

2020 度の量子ビーム科学研究施設の共同利用採択テーマ数は産研から 13 件、学内から 7 件、学外の研究者を含むものが 11 件、物質・デバイス領域共同研究拠点からが 12 件の合計 43 件であった。

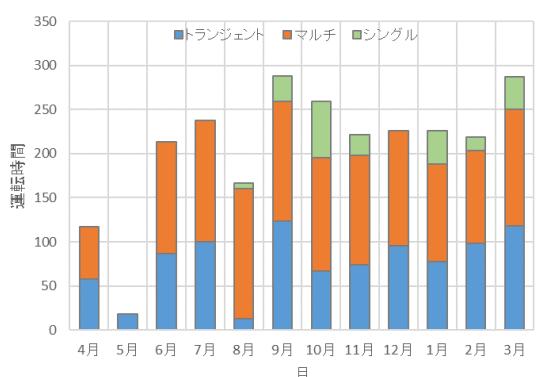


Figure 1: Operation time of the L-band linac of 2020.

また L バンドライナックの運転状況を月別、モード別に Fig. 1 に示す。L バンドの運転日数は 203 日、テーマ数 21 件、通算運転時間は 2,481 時間であった。また RF 電子銃ライナック、MeV 電子顕微鏡、小型単パルス電子線発生装置の月別の運転時間は Fig. 2 に示す通りで、通算運転時間はそれぞれ 305 時間、146 時間、0 時間であった。150 MeV の S バンドライナックの総運転時間は 95 時間であった。

### 3. L バンドライナックの現状

#### 3.1 振り分けシステム

2019 年度までに従来の直流励磁用の偏向電磁石に交番磁場を印加し、5 Hz での振り分け運転に利用できることを確認していたが、温度上昇、定格オーバー、経年劣化など多くの問題があった。そこで、渦電流損を減少させて高繰り返しで対応するため、ヨーク材質にケイ素鋼板を用いたキッカーモータを製作し、2020 年度 4 月に設置した。設置当初は直流電磁石用の設定でキッカーモータを運用していたため、5 Hz 運転が限度であった。[1]

そこで高繰り返しに対応するため、マイコンのプログラムの書き換えを行った。書き換え後の 5 Hz 運転時の電流と磁場の波形を Fig. 3(a) に、30 Hz 運転時の波形を Fig. 3(b) に示す。印加電圧はキッカーモータの 1 次側に接続する電源の容量によって決まり、今回の試験では最大値の 80 V で固定している。5 Hz では立ち上がり時間 17 ms で、設定電流の 47 A まで達することが確認できた。しかし、印加電圧不足のため 30 Hz では 47 A に達することができない。そのため Fig. 3(b) では設定電流を 40 A に抑えている。計算上は、キッカーモータの 1 次側電源を 100 V 以上の出力に対応するものと交換すれば、47 A の出力で振り分け運転が可能となる。

現在振り分け運転に関する承認申請を原子力規制庁に提出しており、2021 年度中に振り分け運転の利用開始を目指している。

#### 3.2 半導体スイッチ

サイラトロンに替わる大電流スイッチとして SI サイリスタを用いた半導体スイッチの開発を進めているが、近年は制御基板の故障が相次いでいる。高圧に浮いた半導体スイッチの各段の制御基板にグランドレベルから絶縁トランジスタを通じて電源が供給されるが、高周波で動作し基板との電位差の大きい絶縁トランジスタからのノイズが故障の原因の一つとして考えられる。[2]

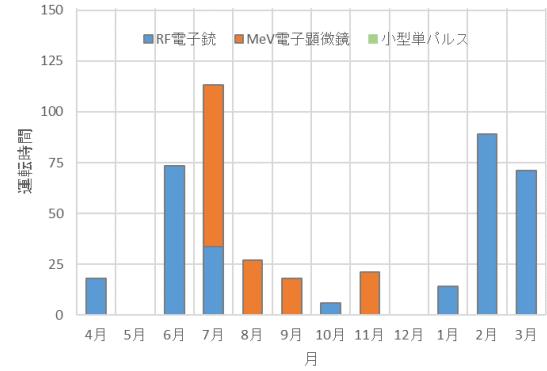


Figure 2: Operation time of the RF-gun linac and MeV electron microscope and small short pulse electron linac of 2020.

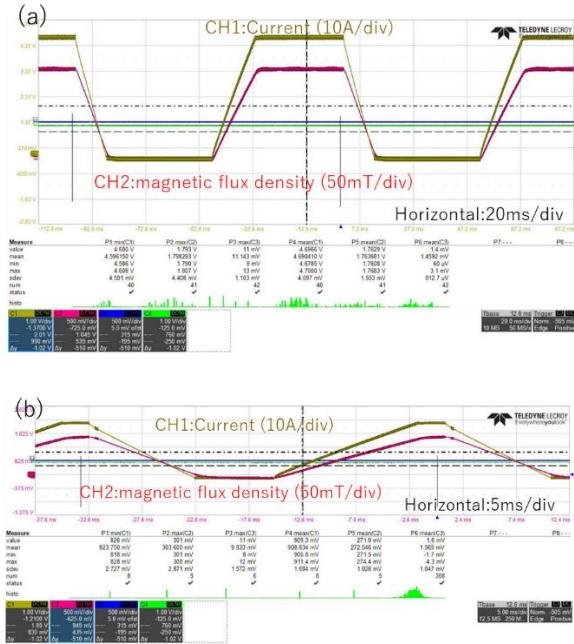


Figure 3: Time profile of magnetic field and current. (a) 5 Hz Operation, (b) 30 Hz Operation.

そこで、度重なる故障で搭載部品に損傷の受けた制御基板を全数作り直し、半導体スイッチの各段に印加される 1 ~ 3 kV の充電電圧から制御基板に必要な制御電圧を作り出す自己給電式回路[3]を搭載し、ノイズの発生源を断つことを試みた。改修した半導体スイッチの外観を Fig. 4 に、制御基板の構成の変更を Fig. 5 に示す。3 月に実機に組み込んで運転試験を行った。設置当初は繰り返し 10 pps、最大電圧の 23 kV まで上げるとスイッチングが不規則になる現象が発生した。確認を行うと、ねじの緩みにより放電している箇所が発見されたので増し締めを行い、特定の段で起こるノイズによる温度異常の誤検知をバイパスすることで、問題なく運転できることを確認した。6 月初旬から 7 月末までの 371 時間のマシンタイム(未通電時間を含む)に無故障で使用している。

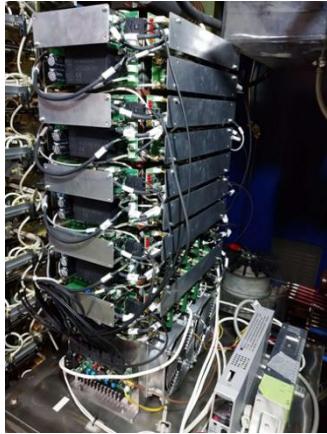


Figure 4: Solid state switch equipped with a self-feeding circuit.

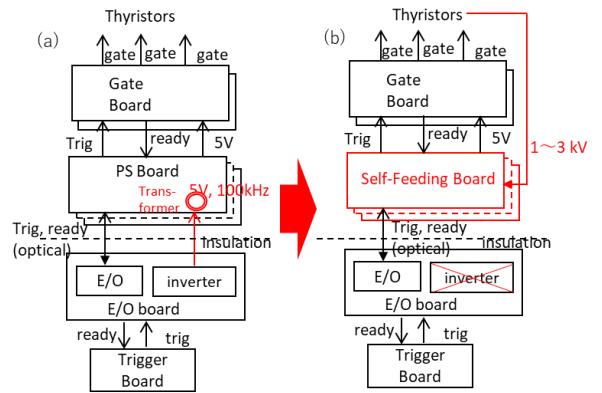


Figure 5: Configuration of control circuit. (a)before, (b)after.

### 3.3 FEL

FEL 光共振器のデチューニング調整用のステージが 2 月に故障した。症状は放射線によるエンコーダの損傷による暴走で、当初は電源の再起動で改善していたが数時間の運転で暴走頻度が高まり運転に利用することができなくなったので交換することにした。光共振器は  $\mu\text{m}$  単位で精密にアライメントされているため、産研試作工場の協力を得て、位置出し及び予備機との交換作業を行った。長期間行うことのできなかった全軸方向と角度調整も含めた共振器の全体アライメントを行うことで、従来以上の強度で FEL を復旧することができた。しかし交換後 3 回目の FEL マシンタイムで、新しいステージにも同様の症状が発生した。旧機種は 10 年以上の利用に耐えたが新機種は極端に故障が早く、放射線に対する感度が上昇していたと考えられる。ステージの型番を読み込むための IC も損傷していたためパラメータの自動設定ができなくなっていたが、手動コマンドで必要な設定を行ったうえで、フィードバックを無効化することで故障したステージを暴走せず動かすことに成功し、実験を継続している。

### 3.4 その他の保守作業

その他の保守作業として、発生装置室パッケージエアコンの更新、制御 PC の更新、タイミングシステムの更新、圧空漏れ対応、クーリングタワー故障対応、モジュレータタッチパネル交換、サイラトロン変動調査、偏向電磁石電源修理等を行った。

## 4. RF 電子銃ライナックの現状

### 4.1 40MeV RF 電子銃ライナック

2020 年度は RF 電子銃を駆動する Nd:YLF ピコ秒レーザーの故障のため、40 MeV の RF 電子銃ライナックはフェムト秒レーザーを用いた超短パルス電子ビームの発生と計測を中心に研究開発を進めた。フェムト秒・アト秒パルス電子ビームの発生のため、電荷量の制御による空間電荷効果の低減、加速管におけるエネルギー変調の高精度化を行った。また、発生したフェムト秒短パルス電子ビームを用いて、レーザー変調電子ビーム圧縮実験、電気光学結晶

による電子ビームのテラヘルツ電場計測を行っている。

#### 4.2 MeV 電子顕微鏡

RF 電子銃を利用した MeV 電子顕微鏡は、フェムト秒レーザーを用いた超短パルスで極低エミッタスの電子ビームと、大阪大学超高压電子顕微鏡センターから移設した超高压電子顕微鏡を用いて、フェムト秒時間分解電子顕微鏡の実証実験を行った。従来の電子線パルス発生では、Ti:Sapphire レーザーの直後に 3 倍波 (UV : 266nm) を変換し、レーザー室から電子顕微鏡まで長距離を経由してフォトカソードに UV 光パルスを輸送していたが、空気の流れや振動等によりレーザービームが揺らぎ、電子ビームの安定性低下の大きな原因となっていた。2020 年度は、Ti:Sapphire レーザーの UV 変換をフォトカソードの近傍に変更し、発生した UV 光パルスをカソードに集光させることで、電子ビームのエミッタスの低減と安定性の向上に繋げた。

#### 4.3 ピコ秒レーザーの故障状況

2019 年度に電子ビーム発生用の Nd:YLF ピコ秒レーザーに故障が発生し、復旧を続けている。問題は 2 点で、レーザー発振器部に使用している半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) のひび割れ、及び結晶の損傷等が原因と思われる再生増幅器の出力低下である。前者は BATOP 社の SAM (Saturable Absorber Mirror) の選定とフラクシ社のピエゾ治具により、発振器ではモードロックと同時に外部 RF (79.3 MHz) に同期できる状態に回復した。しかし、後者について、ショートキャビティによる自励発振の試験を行っているが、赤外光から紫外光に変換できる程の光増幅には至っていない。このレーザーは、2003 年に極短パルス発生装置導入時に購入したものであり、光学素子の損傷が起こっている。このレーザーは廃盤となっており、純正部品の供給がない状況である。今後、代替機種の更新もしくは修理が急がれる。

### 5. S バンド 150 MeV ライナックの現状

本加速器の主要テーマである陽電子ビーム実験に関して、2019 年度までに直進ポートに設置したモデレータを用いて陽電子生成を行い、輸送用の電磁石系の整備と MCP による陽電子像の確認を行っていた。[2]

2020 年度は陽電子実験室に設置しているリモデレータまで陽電子ビームを導き、再放出により低速化した陽電子ビームの蓄積、パルス化を行う予定であったが、COVID19 の影響で約 1.5 か月の実験中断を余儀なくされた。また異音の発生した冷却水ポンプの交換のため、約 1 か月実験ができなかった。実験が可能であった期間では、リモデレータに至る部分が磁場勾配や磁場形状が急激に変化することに伴う陽電子ビームのドリフトや変形が起こり、うまく輸送できなかつたため、改めてこの部分の軌道計算を行い、電磁場の調整を行った結果、リモデレータ上まで陽電子ビームをガイドすることができるようになった。また、パルス化部におけるショッパーとバンチャーのインピーダンスマッチング試験や、陽電子蓄積部の電気系の動作テストも行った。今後は実際に再放出陽電子の蓄積からパルス化を行う予定である。

### 6. まとめ

L バンドライナックは振り分けシステムの導入や半導体スイッチの改造、FEL の故障対応等に対応をしながら、COVID-19 による休止期間を除いては例年並みのマシンタイムを確保して運転をすることができた。

RF 電子銃ライナックと MeV 電子顕微鏡はピコ秒レーザーの故障のため、フェムト秒レーザーを用いて運転を行った。RF 電子銃ライナックは超短パルス電子ビームの高精度化と、それを用いたテラヘルツ光の計測を中心に行っている。MeV 電子顕微鏡は移設した超高压電子顕微鏡と超短パルス電子ビームを用いて、フェムト秒時間分解電子顕微鏡の実証実験を行った。

S バンドライナックは軌道計算と電磁場の調整により、陽電子ビームを陽電子実験室のリモデレータまで導いた。さらに再放出陽電子の蓄積からパルス化に向けて作業を進めている。

## 参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September. 2-4, 2020, pp. 177-180.
- [2] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September. 2-4, 2020, pp. 901-904.
- [3] K. Nakayama *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September. 2-4, 2020, pp. 385-387.

本稿は第 18 回日本加速器学会年会のプロシードィングス(THP052)をレイアウトのみ変更し転載したものです。