

## 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<sup>#</sup>, 菅田義英, 磯山悟朗, 岡田宥平, 徳地明, 吉田陽一, 楊金峰, 菅晃一, 神戸正雄, 細貝知直  
Kazuya Furukawa<sup>#</sup>, Yoshihide Honda, Goro Isoyama, Yuhei Okada, Akira Tokuchi, Yoichi Yoshida, Jinfeng Yang,  
Koichi Kan, Masao Gohdo, Tomonao Hosokai  
ISIR, Osaka University

#### 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, dark current measures of electron gun cathode were taken, and cooling and pressurized air piping, FEL equipment and solid-state switches were repaired and updated. Furthermore, a kicker magnet aiming for beam sharing of 10Hz or more was manufactured. 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, the picosecond laser used to excite the RF electron gun failed. Therefore, the RF electron gun linac and MeV electron microscope were used in the experiments with ultrashort pulsed electron beams using a femtosecond laser. The 45-degree beam port of the S-band linac were maintained, and the beam-focusing experiments by discharged plasma were conducted.

#### 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暗電流の対応と交換、冷却装置と圧空動作ラインの補修と改良、FEL 構成機器の更新、半導体スイッチの故障の調査と修理などの保守作業を行った。また複数ビームポートの同時利用のためのビーム振り分けシステムでは 10 Hz 以上の繰り返しに対応するためのキッカー電磁石の製作を行った。

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、超短パルス電子ビームの発生実験と改良、THz 光の発生等の研究を進めた。また RF 電子銃を装備した MeV 電子顕微鏡によるフェムト秒時間分解電子顕微鏡像の観察の実証実験を行った。

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。昨年度は新たな実験のためのポート整備を行うとともに、ノイズ対策を行った。

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

2019 度の量子ビーム科学研究施設の共同利用採択

<sup>#</sup> furukawa@sanken.osaka-u.ac.jp

テーマ数は産研から 13 件、学内から 8 件、学外の研究者を含むものが 13 件、物質・デバイス領域共同研究拠

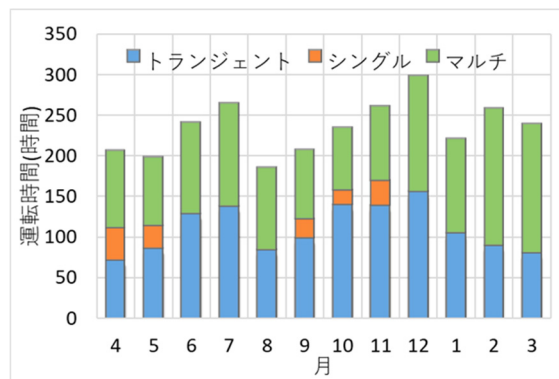


Figure 1: Operation time of the L-band linac of 2019.

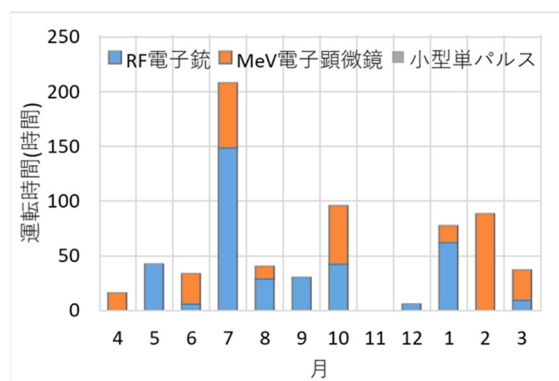


Figure 2: Operation time of the RF-gun linac and MeV electron microscope and small short pulse electron linac of 2019.

点からが 11 件の合計 45 件であった。

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 244 日、テーマ数 29、通算運転時間は 2,815 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 374 時間、299 時間、0 時間であった。後述するピコ秒レーザーの故障の影響もあり、3 台の合計運転時間は 2018 年度に比べ 41 %低下した。150 MeV の S バンドライナックは共同利用を試験的に開始し、総運転時間は 24 時間であった。

### 3. L バンドライナックの現状

#### 3.1 電子銃

前回の電子銃カソード(EIMAC YU-156)交換から 17 か月程度経過した 2020 年の 1 月に暗電流の発生が顕著になった。暗電流の電荷量はバイアス電圧と反比例し、照射室の線量と比例するという特徴が前回のカソードの暗電流発生時と同様であった[1]。またカソードの価格高騰の影響もあり可能な限り使用期間を延ばすことが必要であった。そこで照射室の線量をモニターしながらバイアス電圧を調整し実験に影響が出ない程度に暗電流を抑え、8 月までの計 24 か月間継続してカソードを使用した。長期保守期間を利用して他社製のカソードを試用してみたが、十分にエミッションが取れなかったため、再度新しい YU-156 を取り付けて運転を再開した。

#### 3.2 冷却水と圧空ライン

冷却水関係では精密系のダミーロードの配管と一般冷却系の白金温度計溶接部、熱交換器のフランジからの 3 か所の水漏れ、及び SHPB の流量計の故障が発生し、それぞれ補修・交換を行った。また高額で交換に手間のかかるクーリングタワーの交換頻度を減らすために、吸い込み口にステンレス製のカバーを製作・設置し、排水溝ネットを被せてシロカや藻などを捕集している。

L バンド全体のゲートパルスやビームモニター等を駆動する圧空ラインは 1 台のコンプレッサーでエア供給を行っている。経年劣化が進んでいることから 2019 年 3 月に 23 年ぶりに更新を行った。更新に伴い圧空系全体のリークチェックを行ったところ、2 台のレギュレータのリーフ穴からの異常なリークと 10 か所の接手からのリークが発見された。それぞれ補修を行うことで、コンプレッサーの動作頻度を 3 分の 2 程度に減らすことができた。

#### 3.3 半導体スイッチ

ノイズの影響で基板が故障した半導体スイッチは修理後の 2019 年の 4 月に再設置したが、設置後数日で再度基板が故障したのでサイatron に戻した。故障の原因調査のため、基板上の IC の出力の確認を行うことにした。

半導体スイッチは絶縁のためのベーク板を挟んで 10 段のヒートシンクを積層した構造を持ち、各段に 6 個の SI-サイリスタと電源基板、及びゲート基板を設置している[2]。各段に設置された電源基板とゲート基板の機能ブロック図を Fig. 3 に示す。共通電位の基板から送られる光入力に応じて各段の電源基板上の O/E 変換 IC は出力し、ドライバで増幅した後、ゲート基板上の FET を駆動

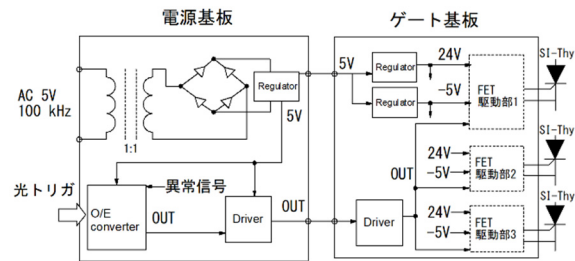


Figure 3: Function block diagram of solid-state switch circuit.

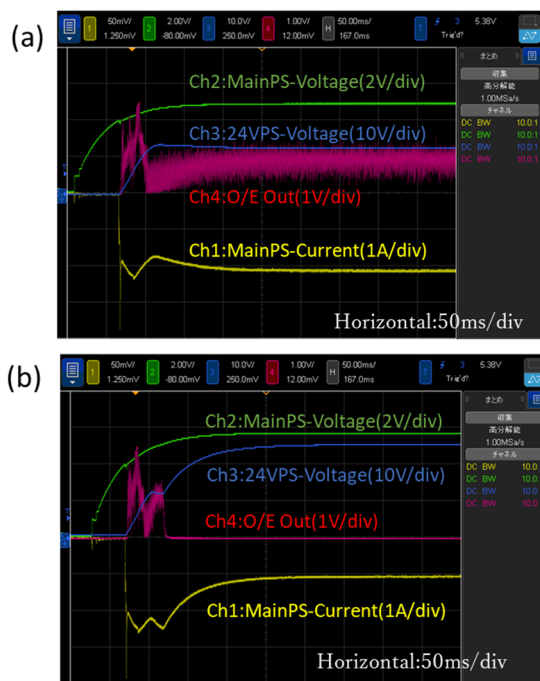


Figure 4: Output waveform of O/E conversion IC on the power supply board. (a) Failed board, (b) Semi-failed board.

しサイリスタのゲートに電圧を印加する設計になっている。故障後の基板に電源を入れて、電源の電圧・電流の立ち上がりと同時に O/E 変換 IC の出力をモニターした波形を Fig. 4(a) に示す。光入力がないにもかかわらず、電源の立ち上がりと同時に O/E 変換 IC が出力し続けており、これにより下流のドライバや DCDC コンバータ、FET 等が過電流で連鎖的に故障することが判明した。また故障していない基板でも同様に試験を行ったところ、Fig. 4(b) に示すように立ち上がり直後の 50~100 ms 程度出力が出るものがあることが分かった。このような基板は一時的には利用可能であるが、数日程度の利用でも故障する半故障状態で、このような基板を放置したことが頻繁な故障の原因と考えられる。

これらの問題に対処するため、故障・半故障の O/E 変換 IC を全て交換するとともに、ノイズ対策のため O/E 変換 IC の電源と入力、出力の 3 か所に高周波対応のフィルムコンデンサを追加し、IC 全体を銅箔で覆った。基板

の修理とノイズ対策後の 2020 年 1 月に再設置を行い、動作試験を行った。定格での運転を確認することができたが、差動プローブを用いて O/E 変換 IC の出力波形を確認した際に、基板が故障した。差動プローブを介して O/E 変換 IC に微小な電流が流れて故障したと考えられる。

半導体スイッチは度重なる故障に伴う過電流等で、故障した部品以外にもダメージが蓄積していることが考えられる。抜本的な解決のため、全基板の再製作やノイズに強い構造への改造を検討している。

### 3.4 FEL

2020 年 1 月にウイグラーのギャップ読み取り用のエンコーダの放射線ダメージによる故障が、2 月に光学系アライメント用の HeNe レーザーの故障が発生し、それぞれ代替品と交換した。HeNe レーザーの故障と同時期に THz 光の強度低下が顕著になったため、ミラー角度を遠隔制御するためのアクチュエータを取り付けて調整を行うと、従来の光強度を大きく超える程度に改善した。

動作が不安定になっていた FEL 制御用の PC を Windows10 搭載の PC に更新した。従来は 1 台の FEL 制御用 PC をユーザー使用時はローカルで、オペレータの調整時はリモート接続で切り替えながら使用していた。FEL 実験とビーム調整の効率化のため、USB と GPIB 接続機器をイーサネットで制御するデバイスサーバーを用いて、2 台の PC で同時利用できる環境を整備している。

### 3.5 ビーム振り分け

2018 年度までに、L バンド設置当初より使用していた 45 度偏向電磁石にパルス電流を流して、5 Hz までのビーム振り分けが可能であることを確認していた[1]。しかし、鉄損が大きく、立ち上がり時にキッカー電磁石電源 (300 V, 100 A) の上限近い電流を流して磁場を立ち上げる必要があることから、10 Hz 以上では利用不可だと判明した。またヨークの温度上昇や、電磁石の定格を超えた利用方法であること、納入から 40 年以上経過したことによる劣化の心配もあった。

そこで 2019 年度は 10 Hz 以上の繰り返しに対応するため、ケイ素鋼板を用いたキッカー電磁石の製作を株式会社トーキンに依頼した。キッカー電磁石の性能を Table 1 に示す。線材の断面積とターン数を調整し、キッカー電磁石電源のスペックの約 50 % となる印加電圧 150 V にすれば、立ち上がり時間 8.5 ms で必要電流の 50 A に到達するよう設計した。

2020 年度に入ってからキッカー電磁石の動作試験を

Table 1: Parameter of Kicker Magnet

Parameter	Value
number of coil turns	48 (turn/coil)
magnetic flux density	0.226 (T)
current	±60 (A)
Inductance@60 Hz	24.6 (mH)
resistance	72.8 (mΩ)

を行い、電流と磁場の立ち上がりが比例し、鉄損の影響が十分に小さいことが確認できた。キッカー電磁石電源のプログラム上の制限で 10 Hz 以上の繰り返しに利用できなかったため、現在調整を行っている。詳しくは FROT03「阪大産研 L バンドライナックにおけるビーム振り分けシステムの開発」にて報告を行う。

## 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

2019 年度は RF 電子銃を駆動する Nd:YLF ピコ秒レーザーが故障したため、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。電子ビームのパルス幅の更なる短時間化やエミッタンスの低減のため、電荷量の制御による空間電荷効果の抑制、加速管におけるエネルギー変調の高精度化を行った。発生したフェムト秒の超短パルス電子ビームを用いて、光伝導アンテナおよびマイケルソン干渉計を用いたコヒーレント遷移放射と溝幅の狭い回折格子からのテラヘルツ放射の計測を行った。これによりフェムト秒の電子線パルス幅の精密測定とスミス・パーセル放射に基づく高出力テラヘルツデバイスの開発につなげている。

### 4.2 MeV 電子顕微鏡

RF 電子銃を利用した MeV 電子顕微鏡では、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ンスの電子ビームと、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。直径 200 nm の金ナノ粒子の透過電子顕微鏡(TEM)像の観察に成功し、電子回折の測定モードでは極めて明瞭な回折パターンがシングルショットの測定で得ることができた。更に低倍率の電子顕微鏡測定モードでは、シングルショットの測定による TEM 像の観察に成功した。今後、現有装置の高度化・高精度化により、フェムト秒時間領域での超高速構造相転移や反応素過程に関する応用研究が期待できる。

### 4.3 ピコ秒レーザーの故障状況

ピコ秒レーザーはレーザー発振器部に使用している可飽和吸収ミラー(SESAM)のひび割れと、結晶のダメージに起因する再生増幅器の出力低下の 2 つの不具合が発生している。このレーザーは 2003 年の購入から 17 年間に経過しており、生産停止状態で部品の供給もない。代替機種の見直しと更新が急務である。

## 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は、2018 年度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進めている。また従来使用していなかった 45 度方向のポート整備を行い、ピークエネルギー 120 MeV、ピーク電流 100 mA、ビーム径約 10 mm にビーム調整を行い、放電生成プラズマで発生する磁場によるビーム集束特性評価実験に利用した。

保守状況としては、メインのクライストロン(PV3035)に送るマイクロ波生成用のクライストロン(TH2436)のヒー

ターが断線したため交換を行った。また運転中のノイズにより L バンドの利用実験にも影響が出ていたため、モジュレータ筐体の交換と、配線の引き直しを行った。SF6 ガス漏洩の問題は 2018 年度より改善しておらず、2 時間に 1 度程度のガス補充により運転を継続している。

## 6. まとめ

L バンドライナックは電子銃カソードの暗電流対策と交換や、冷却水・圧空配管、半導体スイッチの基板、FEL 構成機器等の修理・更新を行いながら、例年並みのメンテナンスタイムを確保して運転することができた。振り分けシステムに関しては、ケイ素鋼板を用いたキッカー電磁石を開発し、鉄損が十分に小さく、電流と磁場が比例して立ち上がることを確認した。

RF 電子銃を装備した 2 台の加速器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フェムト秒・アト秒領域の超短パルス電子ビームの改良を進め、それを用いた THz 光の発生の研究とデバイスの開発を行った。MeV 電子顕微鏡は移設した超高圧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クライストロンの故障やノイズ対策等を行いながら、従来の陽電子ビーム生成実験に加えて、放電生成プラズマによるビーム集束特性評価実験を行った。

## 参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, “Status report of Research Laboratory for Quantum Beam Science, ISIR, Osaka University”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July. 31- Aug. 3, 2019.
- [2] K. Furukawa *et al.*, “Development of the Solid-State Switch for a Klystron Modulator and its Performance”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015.