

## 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, SANKEN, OSAKA UNIVERSITY

古川和弥<sup>#A)</sup>, 菅田義英<sup>A)</sup>, 磯山悟朗<sup>A)</sup>, 福井宥平<sup>A)</sup>, 徳地明<sup>A)</sup>, 吉田陽一<sup>A)</sup>, 楊金峰<sup>A)</sup>, 菅晃一<sup>B)</sup>, 神戸正雄<sup>A)</sup>,  
細貝知直<sup>A)</sup>

Kazuya Furukawa<sup>#A)</sup>, Yoshihide Honda<sup>A)</sup>, Goro Isoyama<sup>A)</sup>, Yuhei Fukui<sup>A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Yoichi Yoshida<sup>A)</sup>,  
Jinfeng Yang<sup>A)</sup>, Koichi Kan<sup>B)</sup>, Masao Gohdo<sup>A)</sup>, Tomonao Hosokai<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> SANKEN, Osaka University, <sup>B)</sup> QST

#### 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 SANKEN, 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 performed maintenance work such as replacement of the electron gun, and modification of the self-feeding circuit of the solid-state switch. The RF-gun linac is mainly used for generation of ultrashort-pulsed electron bunches and for study of sub femto second pulse radiolysis. Last year, ultrashort pulse electron beam generation by laser modulation and terahertz measurement by electro-optic crystal were conducted. The development of a femtosecond time-resolved electron microscope using a MeV electron microscope was promoted. Furthermore, we are considering renovation of the linac-building for deterioration measures and the installation of new accelerator.

#### 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、半導体スイッチの自己給電回路の故障対策、電磁石電源のリプレース等を中心に保守作業を行った。

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。昨年度はサブフェム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中心に行った。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。

今年度では当施設の保守管理・開発の状況と将来計画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

2022 年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 12 件、学外の研究者を含むものが 10 件、物質・デバイス領域共同研究拠点から 12 件の合計 47 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保守を含めて 246 日、テーマ数 26 件、通算運転時間は 2803 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

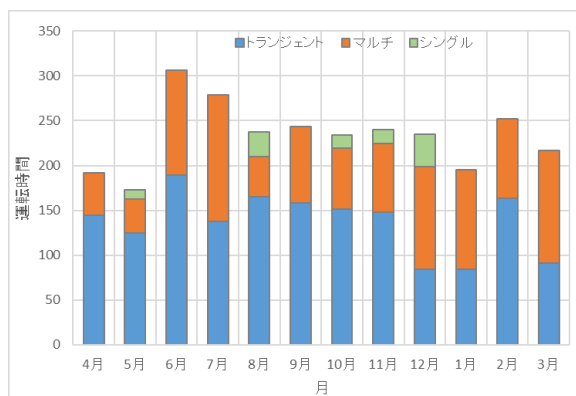


Figure 1: Operation time of the L-band linac of 2022.

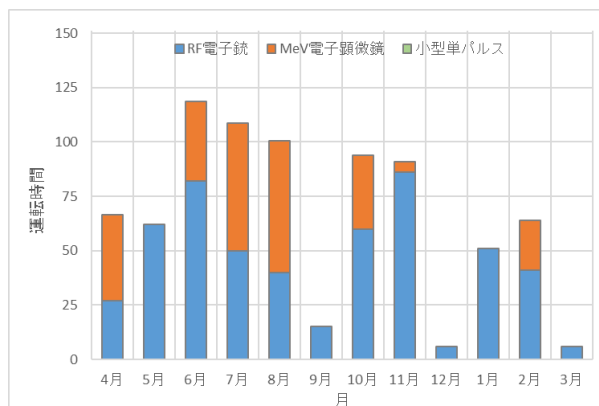


Figure 2: Operation time of the RF-gun linac and MeV electron microscope and small short pulse electron linac of 2022.

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

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 526 時間、257 時間、0 時間であった。

### 3. L バンドライナックの現状

#### 3.1 電子銃

2020 年 8 月に利用を開始した電子銃カソードから暗電流が発生し始めたので、2022 年 8 月の保守期間に交換作業を行った。交換後の通電試験でエミッションが確認できなかったため、保管していた中古のカソードを取り付けて運転を継続した。不具合に関してメーカーに確認したところ、活性化のためのヒーター電圧印加プロセスに問題があることが分かった。そこで同一ロットの別カソードを利用停止中の S バンドライナックの電子銃で正規プロセスによる立ち上げ試験を行い、カソードに異常がないことを確認した。その後 2 月の保守期間を利用して L バンドライナックのカソードを新品に交換した。

#### 3.2 半導体スイッチ

半導体スイッチは 2021 年度に自己給電基板[1]を組み込み、約 950 時間の運転に使用した後に故障した。2022 年度は故障対策のために、異常検知回路の追加とノイズ対策を行った。

異常検知回路を追加した自己給電基板の回路の概略を Fig. 3 に示す。自己給電基板は 10 段 10 直列で接続され、各段に印加される最大 3 kV の電圧からゲート基板で使用する 24 V の制御電圧を生成する。自己給電基板が 1 段故障すると電解コンデンサ C2 に残った残留電荷のばらつきによりゲート出力がまばらになり、各段の電圧分担が崩れて故障につながると推測した。そこで電解コンデンサ C2 の電圧を監視する回路を追加し、一定以下の電圧になるとトリガーを停止するようにした。

また本機は通常の 10 直列 25 kV モードに加えて、20 直列 50 kV モードで運転できるように左右の基板の片方を 1 段ずつ交互に樹脂スペーサーを使ってヒートシンクと絶縁していたが、電位のバランスが悪いので、10 直列に特化して左右対称にヒートシンクに接地を行うようにした。また大電流が流れるグラウンド側の線が PFN の根本まで長く伸びていたが、インダクタンス低減のため幅の広

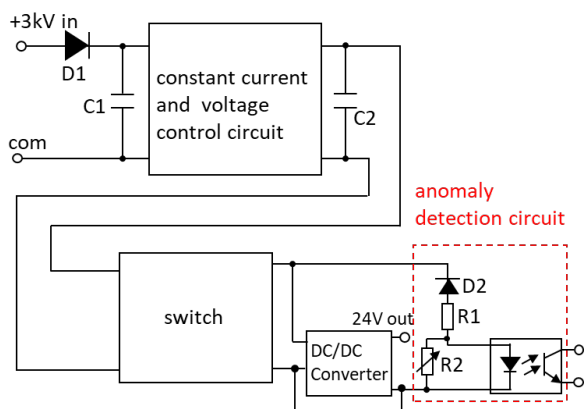


Figure 3: outline of self-powered board circuit with added anomaly detection circuit.

い銅板を使って最下段から直接筐体に接続するようにした。

これらの作業後の今年度 5 月に改善した半導体スイッチをモジュレータに組み込み、8 月上旬までにおよそ 570 時間の運転に使用している。

#### 3.3 サイラトロン

9 月の半導体スイッチの試験後にサイラトロンに戻すと、モジュレータが出力不良になった。サイラトロンのグリッド端子のコネクタと付帯電源内のグリッド電流制限抵抗が焼損していることが確認された。焼損部品の交換後に試運転をすると、15 分程度の運転で G2 のバイアス電圧が 0 V に低下することが分かった。グリッド不良により点弧時に G2 にスパイク電圧がかかり、コネクタ部分が耐圧不良を起こして焼損したと推測される。中古で保管していたサイラトロンの 1 台も正常点弧しないことが判明し、現行機種としては残り 1 台となった。予算的にもサイラトロンの購入が難しいため、可能な限り半導体スイッチでの運転を継続したい。

#### 3.4 電磁石電源

L バンドライナックの電磁石電源は 2002 年に大部分を更新して使用を続けているが、経年劣化や放射線ダメージによる故障が続いており、修理不可と診断されるケースも増加傾向のため、不調機から更新を進めている。

ヘルムホルツ電源は電子銃～サブハーモニックバンチャーまでの範囲を個別に励磁する小容量電源が 7 台とプリバンチャー～加速管までの範囲を複数台励磁する大容量電源 5 台で構成されている。2021 年度は大容量電源 2 台が故障し、いずれも修理不可と診断され、予備機で運転を継続していた。2022 年度は大容量電源 5 台全機の出力量を満たす 350 V/22.5 A の容量でイーサネット通信に対応した菊水電子工業の電源を購入し、設置した。小容量電源は L バンドライナックの FL-net 制御系に組み込まれて制御しているが、新しい電源を組み込むことは難しいので、別個の制御プログラムを制作している。

#### 3.5 その他の保守作業

冷却装置系では 1 月後半から 2 次側冷却水系のポンプのサーマルトリップによる停止が頻発した。納入後 20 年が経過していることから、ポンプの軸負荷が増加して過電流になっていると推測された。ポンプの回転数を減らして停止頻度を減らすことが出来たが、解決するには至らなかった。インバータポンプは長納期であったため、非インバータ式のポンプを発注し、今年度 4 月に交換作業を行い、現在は正常に動作している。

その他の作業として、バンチャー減衰機の修理、冷却水配管の清掃・整備、圧空ラインのリーク対応、FEL 光学系ミラーの再蒸着、周波数カウンターと計測用オシロスコープの更新等を行った。

### 4. RF 電子銃ライナックの現状

#### 4.1 40 MeV RF 電子銃ライナック

RF 電子銃ライナックではレーザー変調実験による超短パルス電子線発生とテラヘルツ計測の研究を主に行っている。

レーザー変調はアンジュレータ周期磁場中にレーザーと電子ビームを入射して電子ビームのエネルギー分散を増大させる手法である。今年度は電子ビーム及びフェムト秒レーザーの軸位置調整や時刻調整を行い、レーザー変調により電子ビームのエネルギー幅の比率が 1.17 となることが観測できた。

電気光学結晶による電子ビーム計測実験では、電子ビームがテラヘルツ電場をまとう様子を経時的に明らかにし、ローレンツ収縮の直接的な観測につながった[2]。今後は高感度化による計測系の改良を目指す。

## 4.2 MeV 電子顕微鏡

MeV 電子顕微鏡ではエネルギーが 3 MeV のフェムト秒電子線パルスにより観察した金ナノ粒子の TEM 像のシャープネス(解像度)を定量的に評価し、パルス電子顕微鏡における色収差と球面収差の低減方法を確立した。RF 電子銃から発生した電子線パルスのエネルギー分散は電子を加速する RF 効果と電子線パルスを輸送する際の空間電荷効果により決まる。そこで色収差の低減については電子を加速する RF 位相とパルス当たりの電荷量を最適化し、極低エネルギー分散の電子線パルスを発生させ、電子顕微鏡の空間分解能の向上を試みた。球面収差の低減では、TEM 像の解像度と試料に対する入射角度(ビームの開き角)の依存性を明らかにし、コンデンサーレンズ 2 台とコンデンサ絞りをを用いてビームをコリメーションし、ビームの開き角を低減した。

これらにより、従来の直径 200 nm の金ナノ粒子の TEM 像の観察が限界であったが、直径 40 nm の金ナノ粒子までの観察が可能となった。今後、電子線パルスを高繰返し化し、電子ビームの電流値を向上させ、RF 電子銃を用いたフェムト秒パルス電子顕微鏡を実現させたい。

## 4.3 保守及び故障の状況

加速器本体およびクライストロン周りの大きな故障は無かった。同期系ではマスター発振器(2856 MHz)の出力を受ける、1/36 分周器が経年劣化により故障したので、更新を検討している。

電子ビーム発生用の Nd:YLF ピコ秒レーザーは、前年度の発振器部の半導体可飽和吸収ミラーおよび再生増幅器の増幅用 Nd:YLF・励起用レーザーダイオードの保守により、2022 年 4 月時点は紫外光パルスとして 1.7 mW (262 nm, 10 Hz) と納入時 (3.3 mW) の約 50 %までの出力に回復していた。しかし、2023 年 12 月時点で、紫外光パルス出力は < 0.3 mW と低下した。今後、電子ビームの電荷量の増強のためには、調整や保守が必要な状態にある。

フェムト秒レーザーについて、前年度に発振器内の Ti:Sapphire 結晶を励起するための CW レーザー (Spectra-Physics, 532 nm, 5 W) を更新し、調整も完了し、再生増幅器も含めて、順調に稼働している。

冷却水装置について、冷却塔、二次系の冷却水循環装置、SMC 社製等のチラーは順調に稼働している。

## 5. 今後の展開

40 MeV の L バンドライナックと 150 MeV の S バンドライナックが設置されているライナック棟は建設から 45 年

が経過し老朽化が進んでいる。2020 年には加速器を設置する地下 2F の床下に大規模な湧水流入が発生した。流入箇所の補修を行ったが、複数箇所からの漏水があり、抜本的な解決には至っていない。その他の建屋設備の大部分も建設当時のままで、現在の装置や実験に適さない物も多い。そこで建屋の設備更新を目的とした改修申請を行っている。改修では全館が RI 管理区域であるライナック棟の一部を一般区域に切り分け、多様な分野の共同研究や人材育成の場として利用できるよう計画されている。

また稼働頻度の低い S バンドライナックを廃止し、新たに C バンドライナック[3]を設置することを検討している。本機はレーザープラズマ航跡場への入射実験を前提に高輝度光科学研究センターで設計・製作されたものであるが、当所ではレーザー航跡場加速の実証実験の他にパルスラジオリスシスの電子線照射にも用いる方向で検討している。

## 6. まとめ

L バンドライナックと RF 電子銃ライナックはどちらも設置から 20 年以上が経過し、付属機器に故障が相次いでいるが、保守交換を行いながら大きなマシンダウンも無く運転を継続している。ライナック棟は建屋改修の申請結果待ちではあるが、RI 管理区域の一部解除や C バンドライナックの設置を前提に将来計画を進めている。

## 参考文献

- [1] K. Nakayama *et al.*, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September. 9-12, 2021, pp.822-825.
- [2] M. Ota *et al.*, Nature Physics 18, Ultrafast visualization of an electric field under the Lorentz transformation, 2022, 1436-1440.
- [3] Y. Otake *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31- August 3, 2019, Kyoto, Japan, pp.1176-1180.