

## 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>#</sup>, 菅田義英, 福井宥平, 徳地明, 楊金峰, 神戸正雄, 水田好雄, 細貝知直

Kazuya Furukawa<sup>#</sup>, Yoshihide Honda, Yuhei Fukui, Akira Tokuchi, Jinfeng Yang, Masao Gohdo, Yoshio Mizuta,  
Tomonao Hosokai  
SANKEN, 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 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). From the end of 2023, L-band was temporarily shut down for renovation work. The RF-gun linac is mainly used for generation of ultrashort-pulsed electron bunches and for study of sub femto second pulse radiolysis. A new RF electron gun has been installed and quantum beam drug discovery experiments have been conducted. Furthermore, development and demonstration experiments of an MeV electron microscope and a small single-pulse electron beam generator was promoted.

#### 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、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供される。近年はサイクロトロンに替わる半導体スイッチの開発[1]やビームタイム増加を目指したビーム振り分けシステムの開発[2]を進めてきた。2023 年 12 月末からは老朽化した建屋の改修工事のため、長期の運転停止期間に入った。

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。昨年度から今年度にかけて量子ビーム創薬に関する研究を展開するとともに、新型 RF 電子銃による運転を開始した。また RF 電子銃を装備した MeV 電子顕微鏡と小型単パルス電子線発生装置の開発・実証実験を進めている。

本年会では当施設の保守管理・開発と建屋改修工事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

2023 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 10 件、学内から 10 件、学外の研究者を含むものが 5 件、物質・デバイス領域共同研究拠点から 12 件の合計 37 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 149 日、テーマ数 20 件、通算運転時間は 1681 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 306 時間、

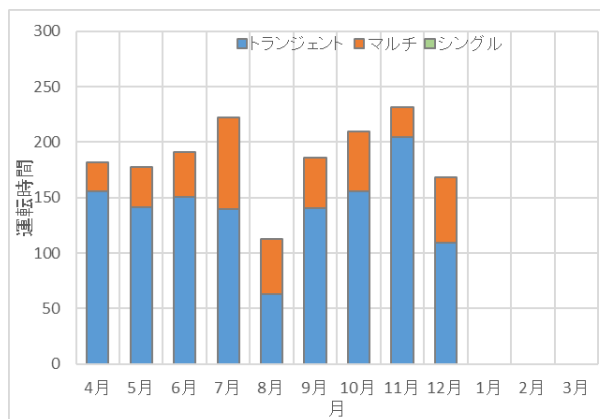


Figure 1: Operation time of the L-band linac of 2023.

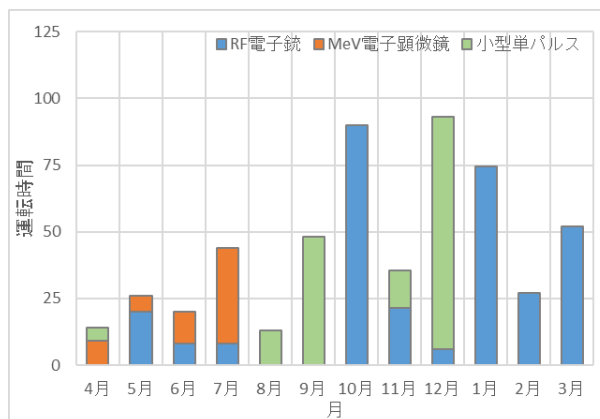


Figure 2: Operation time of the RF-gun linac and MeV electron microscope and small short pulse electron linac of 2023.

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

63 時間、167 時間であった。

### 3. L バンドライナックの現状

#### 3.1 半導体スイッチ

サイラトロンとの代替を目的として開発を続けている半導体スイッチでは、ノイズ対策と緊急停止用の改造作業を行った。スイッチング時のノイズによる異常誤検知の対策として、半導体スイッチのリターン電流経路に使用していたシリコン電線を設置面積の大きい銅板に変更した。また 1 枚の基板故障から連鎖して複数の基板が故障することを防止するため、各基板の電圧異常を監視する回路を追加して制御用の PLC に信号を取り込んだ。改造完了後の 5 月にクライストロンモジュレータに組み込み、一部の基板に不具合が確認されたものの、12 月末までの全ての L バンドの利用実験で半導体スイッチによる運転を行った。

#### 3.2 その他の保守状況

その他の保守作業として、計測用オシロスコープの修理や、フラッシュランプ付属機器の修理、電子銃遠隔制御用ステッピングモータの故障対応等を行った。また改修工事に伴う長期休止期間に入ってから、1990 年頃までに製造されたイオンポンプ電源の内部オイルコンデンサを全て取り出して PCB 分析を行った。結果として微量も含めた PCB は検出されなかったが、この機会に旧型のイオンポンプ電源から最近の機種への切り替えを進めている。またモジュレータの PFN コンデンサについても微量 PCB 混入の可能性が否定できないことが判明しているため、新型コンデンサを発注して、改修工事後に入れ替え作業を予定している。

#### 3.3 改修工事に伴う休止措置

L バンドは改修工事の準備のため 12 月末で全ての運転を休止した。改修工事にあたり、ライナック棟全域から可能な限り機器を撤去する必要があるが、L バンドを完全に撤去すると復旧作業の長期化が予想される。また L バンドは軽微に放射化している部分があるため、放射化物の管理の問題も発生する。そこで、L バンド本体と立体回路系は Fig. 3 のように十分な強度を持つ木板で覆い、内部を放射線管理区域として残すことにした。またケーブルや冷却水配管に関してもできる限り L バンド本体



Figure 3: L-band linac covered with wooden boards.

に接続したまま、コンパネの内部に収めて、復旧の手間を省くことにした。また大型のモジュレータの筐体と冷却水循環装置は建屋の搬入口から出すのが難しいため、養生した状態で残置して工事を行うことにした。その他の機器は殆どすべて撤去して、工事作業に入れるよう準備を行った。

### 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

今年度、「RF 電子銃ライナック装置」では、主に「量子ビーム創薬」のために極短パルス電子ビーム照射によるがん治療薬の開発に関する新たな応用研究を展開してきた。

最先端の電子ビームによる創薬では、患者の負担を低減するために、低線量の電子線パルスによる高効率の創製やがん治療の実現が求められている。低線量の電子線パルスが照射する際、S/N 比の向上が必要不可欠である。RF 電子銃ライナックでは、高電界による低エミッタンス、短パルス電子ビームを発生しているが、一方、高電界によるフィールドエミッション(暗電流)が生じる。特に、1.6 セルの RF 電子銃では、電子ビーム加速に利用される実効的な電場より 2 倍以上の RF 電場が存在している(1.6セルの RF 電子銃の最適加速位相は  $q=30$  度であり、カソードでの電子加速に寄与する電場は  $E=E_0 \sin q$ 、最大電場  $E_0$  の 1/2 である)。この電場による暗電流を発生し、低電荷量の電子線パルスが照射する際、S/N 比が低下してしまう。また、本 RF 電子銃ライナック装置では、長年に使用された銅カソードが劣化しており、これにより発生した暗電流が増えて、低線量の電子線パルスの照射に支障が生じる。これらの暗電流を低減するために、今年度に 1.6 セル RF 電子銃の代わりに以前我々が独自で開発した 1.4 セルの新型 RF 電子銃を取付け、極短パルス電子ビームの発生を試みた。Figure 4 に、開発した 1.4 セルの新型 RF 電子銃の写真を示す。1.4 セルの RF 電子銃では、最適な加速位相は  $q=74$  度であり、最大電場  $E_0$  とほぼ同じの値の電場が電子加速に利用できるため、低い電場でも同じ品質の電子線パルスを発生できる特徴がある。実測では、暗電流を今まで使用した

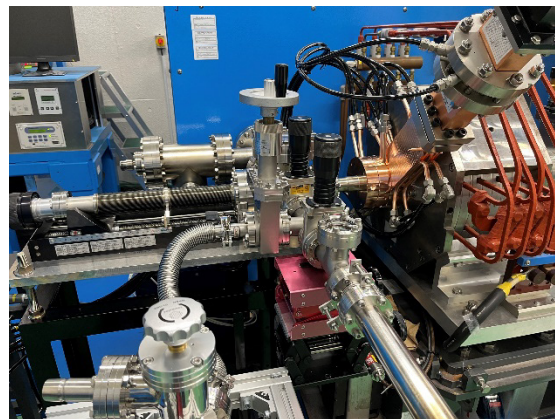


Figure 4: 1.4-cell RF gun and load-lock system of new cathode.

1.6 セル RF 電子銃の 1/5 まで低減できた。低線量の電子線パルスが照射する際にも十分高い S/N 比を得ることができた。

今まで、本 RF 電子銃ライナック装置を利用してシングルバンチの電子線パルスを発生し、ビーム利用を行ってきた。今後の短パルス電子ビーム利用を拡大するために、1.4 セル RF 電子銃に高い量子効率のカソードを取付け、マルチバンチ電子ビームの発生と利用を進めている。そのために、早稲田大学鷲尾研究室が開発したカソードを交換・利用可能なロードロックシステムを移設し、1.4 セル RF 電子銃の後方に取り付けた (Fig. 4)。今後、実績ある CsTe カソードを蒸着し、それをを用いてマルチバンチ電子ビームの発生を行う予定である。

#### 4.2 MeV 電子顕微鏡と小型単パルス電子線発生装置

「MeV 電子顕微鏡」では、電子ビームの低エミッタンス化、AI による TEM 像のノイズ除去等に関する研究を行った。また、「小型短パルス電子線発生装置」では、新しい THz 発生方法の探索と原理実証に関する研究を行った。

#### 4.3 保守及び故障の状況

RF 電子銃、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。

同期系において、昨年度にレーザーを同期するための 79.3 MHz の RF を発生する 1/36 分周器が経年劣化により故障したが、今年度に新たに 1/36 分周器を更新し、電子ビーム発生用の Nd:YLF ピコ秒レーザーと計測用 Ti:Sapphire フェムト秒レーザー共に順調に稼働している。

### 5. ライナック棟の改修工事に関して

L バンドが設置されているライナック棟は建設から 45 年が経過している。ライナック棟は湧水流入による被害が度々発生し、また建屋設備の老朽化が進んでいることから、建屋改修に関する概算要求を行い、今年度から工事が実現することになった。

放射線管理区域内での工事は作業員の放射線管理が煩雑となるため、放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則第 22 条の 3 を準用し、ライナック棟のほぼ

全域を管理区域ではないものとみなして工事を行うことにした。ただし放射化した部分のある L バンド本体は前述の通り木板で覆い、その中を放射線管理区域として残すことにした。また廃止することになった 150 MeV の S バンドライナックは分解して放射化物保管設備に本体及び付属機器を保管し、木板で覆って放射線管理区域として残して工事を行うことにした。

現在は大学施設部及び工事業者と工事内容・行程に関する協議を進めており、近日中に工事が開始される予定となっている。

改修工事後は建屋の 2 階の放射線管理区域を一般区域に変更し、産学連携スペースとして開放することを予定している。また改修後に JASRI から移設を予定している C バンドライナック[3]のために、モジュレータ用の幹線ライン、RF 電子銃用のクリーンルーム、モジュレータ室及び測定室のシールドルーム化などに関する設計を行い、今回の改修工事に盛り込む予定である。さらに本体の設置、立体回路系の取り回し、規制庁への申請に必要な遮蔽計算等を改修後の稼働に向けて準備を進めている。

### 6. まとめ

L バンドライナックはライナック棟の建設からおおよそ 45 年間にわたり運転を行ってきた。長期停止からの復旧が大きな課題となるが、工事後は利便性の向上した建屋で実験提供できるよう努めたい。RF 電子銃ライナックでは暗電流の低減や電荷量増加のための CsTe カソードの導入準備を行い、L バンドからの利用者も引き継いで実験を行っている。さらに改修後に設置予定の C バンドライナックの導入検討を続けている。

### 参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August. 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp.1125-1128.
- [2] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September. 2-4, 2020, Online, pp.177-180.
- [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.