

## 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>, 武藤俊哉, 誉田義英, 福井宥平, 堀利彦, 楊金峰, 水田好雄, 細貝知直

Kazuya Furukawa<sup>#</sup>, Toshiya Muto, Yoshihide Honda, Yuhei Fukui, Toshihiko Hori, Jinfeng Yang, Yoshio Mizuta,  
Tomonao Hosokai  
SANKEN, Osaka University

#### Abstract

The present status of L-band, RF-gun and C-band linacs and MeV electron microscope at the Research Laboratory for Quantum Beam Science in SANKEN, at Osaka University was reported. With the installation of a 1.4-cell RF gun, the RF electron gun linac generates low-emittance, picosecond, ultra-short pulse electron beams with an energy of 35 MeV, and conducts applied research in quantum beam drug discovery. The L-band linac has been shut down, and the linac building where it was installed is currently undergoing renovation. The C-band linac, which is scheduled to be installed after the renovation, will be transferred from SPring-8 to our facility within this fiscal year, with assembly and adjustment planned for the following year.

#### 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(L バンド)、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。

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。昨年度は短パルス化と暗電流の低減のために、今まで利用してきた 1.6 セルの RF 電子銃を取り外して新たに製作した 1.4 セルの RF 電子銃をインストールして、エネルギーが 35 MeV の低エミッタンスピコ秒超短パルス電子ビームを発生し、それを用いた「量子ビーム創薬」というがん治療薬の開発に関する応用研究を展開した。

建屋の改修工事のため、L バンドは長期の運転停止期間に入り、工事開始までにコンポーネントの撤去と汚染検査を完了させた。改修工事では単なる老朽化対応に留まらず、ライナックの品質や操作性の向上、さらに共創スペースの確保といった機能拡張も組み込んでいる。

改修工事後に導入が予定されている C バンドライナック(C バンド)[1]は、JST 未来社会創造事業(大規模型)「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」[2, 3]で開発したレーザー駆動型 C バンドフォトカソード RF 電子銃ライナックである。今年度は SPring-8 から当施設に移設し、来年度以後に組立調整を行い、フェムト秒超短パルス電子ビームの発生とそれを利用した創薬・がん治療等の新しい応用研究の開拓を進める予定である。

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

ライナック棟の改修工事のため、2024 年度は L バンドの利用募集は停止し、RF 電子銃ライナックも新規受付は停止して所内の一部利用に限定した共同利用を行っ

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

た。2024 年度の利用はコバルト 60 $\gamma$ 線照射装置が中心となり、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 7 件、学内から 6 件、学外の研究者を含むものが 6 件、物質・デバイス領域共同研究拠点から 6 件、企業利用が 3 件の合計 28 件であった。

RF 電子銃ライナックの月別の運転時間を Fig. 1 に示す。通算運転時間は 225 時間で、MeV 電子顕微鏡、小型短パルスの運転はなかった。

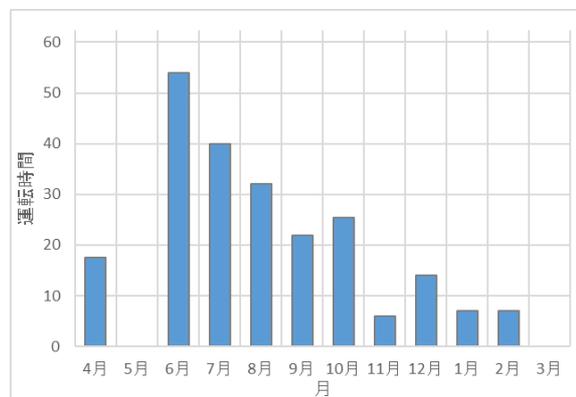


Figure 1: Operation time of the RF-gun linac of 2024.

#### 3. RF 電子銃ライナックの現状

##### 3.1 40 MeV RF 電子銃ライナック

RF 電子銃ライナック装置に新たに 1.4 セルの RF 電子銃をインストールした (Fig. 2)。今まで使用した 1.6 セルの RF 電子銃では、高エネルギーの電子線パルスが得られる特徴がある。一方、低エミッタンスの高品質電子ビームを発生させるためには利用可能な加速位相が低く (20~30°)、実際に利用されている実効的な加速電場強度は空洞内のピーク電場の 1/2 である。そのため、加速空洞表面の電場強度が高く、フィールドエミッションによるバックグラウンドとなる暗電流が多いなどの短所がある。低電荷量の超短パルス電子ビームを発生する際、暗電

流は真のパルスの電荷量と同じまたはより多い値となり、低電荷量の超短パルス電子ビームの利用研究に支障が生じる。

本研究では、この短所を克服するために、新たに製作した 1.4 セルの RF 電子銃を製作し、ビーム発生試験を行った。ビーム試験では、加速位相が  $73^\circ$  の時、電子ビームエネルギーが最大であり、エネルギー分散が最小であることを確認した。これにより、低い加速位相にしか利用できない 1.6 セル RF 電子銃と比べて、実効的な加速電場強度を大幅に向上でき、より短パルスな電子ビームの発生に成功した。更に、ハーフセルとフルセルの間に楕円形状の iris を採用し、サイズ等を最適化することにより、カソード表面の電場強度が 1.6 セル RF 電子銃と比べて 20% 以上に低減できた。その結果、1.4 セルの RF 電子銃による電子ビームの発生実験では、ビーム電荷量は 1.6 セル RF 電子銃と比べて 2 倍以上を得ることができ、フィールドエミッションによる発生した暗電流を 1/10 までに低減することができた。また、ビームシミュレーションの研究では、1.4 セルの RF 電子銃から発生した電子線パルスの時間幅が 30% に短縮することが分かった。

また、1.4 セルの RF 電子銃から発生した超短パルス電子ビームを S バンド電子ライナックにより 35 MeV までに加速し、量子ビーム創薬への利用研究を試みた。今後、低線量・超短パルス電子ビームの照射法を確立することにより、新しい量子ビーム創薬と、新たながん治療法の創出が期待される。



Figure 2: 1.4-cell S-band laser photocathode RF-gun linac at SANKEN, Osaka University.

### 3.2 MeV 電子顕微鏡と小型単パルス電子線発生装置

我々はこれまでに、常伝導 RF 電子銃を用いて相対論的フェムト秒電子線パルスを発生させ、それを用いた超高速電子顕微鏡を世界に先駆けて製作し、RF 電子銃を用いた超高速電子顕微鏡の実現可能性を実証した。一方、これらの研究で使用した常伝導 RF 電子銃には次の 2 つの制限があることが分かり、解決策も見いだしている。これは、大電力の RF パルス (~MW) を用いるため、① 加速空洞内の発熱により、電子線パルスの繰返しさが 1 kHz 以下、ビーム電流量が 1 nA に制限されていること、② RF 振幅と位相の変動によるパルスごとの電子エネルギーの安定性が  $10^{-4}$  程度に制限されていることである。

これらの制限により、空間分解能の向上が難しい。解決策として、低電力かつ 1.3 GHz の高繰返し運転可能な「Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導 RF 電子銃」を設計し、これらの制限を突破できることを確認した。今までの超伝導加速器では、一般的には 2 K 運転の Nb 製超伝導空洞が用いられているが、液体ヘリウムの冷凍を必要とするという弱点がある。本研究では、昨今の研究の進展が目覚ましい、Nb の 2 倍程度の転移温度を有する Nb<sub>3</sub>Sn 製超伝導空洞を設計し、4.2 K の冷却にて 2 K の Nb 空洞と同様な高性能を実現させる。また、4.2 K の小型冷凍機による冷却運転が可能であるため、全体システムの小型化・低コスト化の実現につながる。

昨年度は、超伝導加速空洞の形状、寸法の最適化等を行い、Q 値が  $10^{10}$  の高性能 1.3 GHz の 0.5 セル超伝導加速空洞を設計した。また、この超伝導加速空洞におけるビーム発生のシミュレーションを行い、エネルギーが 1.3 MeV、パルス幅が 50 fs 以下、エネルギー分散が  $10^{-6}$ 、平均ビーム電流が 10  $\mu$ A の高品質かつ大電流のフェムト秒短パルス電子ビームを発生できることを確認した。得られたエネルギー分散とビーム電流は、現在の超高压電子顕微鏡の性能に達する。本研究の内容が 2024 年 (令和 6 年) 8 月に開催された The 32<sup>nd</sup> Linear Accelerator Conference (LINAC24) の招待講演に招かれた。

## 4. 改修工事の状況

### 4.1 工事の準備と放射線管理

ライナック棟改修工事の準備のため、2023 年 12 月末で L バンドは運転休止期間に入り、半年程度かけて配線の取り外しやコンポーネントの一時撤去を行った。放射線の認められる L バンドの設置エリアと解体した S バンドライナックを収納する放射物保管庫は木板で養生してその中を放射線管理区域として維持することにした。棟内の汚染検査により問題がないことを確認し、RI 規制法施行規則第 22 条を準用して「放射線管理区域とみなさない」状態で工事に着手した[4]。

2024 年 8 月から 12 月末までの期間は、主に既存設備の撤去作業が実施された。照射室では放射化が発生する恐れがあることから、工事開始前の汚染測定に加えて、工事期間中の撤去物の持ち出し前の測定対応を行った。また建築・機械・電気それぞれの工事監督者複数名を放射線業務従事者として管理し、その他の作業員は一時立ち入り者として教育訓練の受講とポケット線量計による放射線管理を行っている。

### 4.2 建築工事

2025 年 1 月から内装および設備の設置工事が開始された。建築関係では一般的な内装工事に加えて、実験環境の改善・機能向上のための改修が行われている。

ライナック棟はほぼ全館が放射線の管理区域であったが、実験の利便性向上と幅広いユーザー獲得を目的として、地上 2 階を管理区域から解除して共創スペースとすることにした。さらに 2 階までの専用エレベータや自動扉の設置、スロープの設置等の建屋の利便性向上につながる工事を実施している。

懸念されていた漏水問題に関して、二重構造の地下

壁の底面に傾斜と防水加工を施し、排水口からピットへ導水してポンプで排出する構造とすることで、室側への流入を防止することにした。さらに防水パンの設置や止水工事等の防水対策を施している。

発生装置室及び制御室を含む地下フロアでは、フリーアクセスフロアや冷却装置用の地下ピットの一部をコンクリートで埋設・安定化して実験性の向上を図っている。さらに C バンド本体の設置予定部をセルフレベルング工法により平滑化する計画である。また L バンドと C バンドそれぞれの制御室とクライストロン室をシールドルームとして整備予定である。

### 4.3 機械及び電気工事

機械設備関係ではライナックの性能に影響する建屋付帯設備の更新が進められている。

ライナックの一次冷却水として使われる冷却塔は L バンドおよび C バンド用の 2 基へと集約した。予算上の制約から密閉型の導入は見送られたが、各ライナックに必要な水量の確保、メンテナンス性を考慮したフィルター設置、インバータによる温度制御などの機能の強化を図っている。

空調設備は全館用のエアハンドリングユニットに加え、各室に装置の除熱用のエアコンを用意することにした。温度精度の要求される部屋では高性能な恒温恒湿パッケージエアコンの導入を検討したものの、維持管理費用の観点から通常のパッケージエアコンを採用する方針とし、湿度管理はエアハンドリングユニットによる運用で対応することにした。L バンド、C バンドそれぞれの発熱量と冷却塔・エアコンの冷却能力を Table 1 に記載する。L バンドはこれまでの運転実績から、C バンドは機器の定格電力から、発熱量を空冷と水冷に分類して機械的に算出したが、それぞれの発熱量を厳密に区分することは難しい。そのため、これまでの運用実績に基づく温度変化、部屋の広さ、入室人数等も考慮し、余裕を持った容量設定とした。他にはレーザー用のクリーンルーム、RI モニタリングシステムなどの整備・更新を予定している。

電気設備関係では、屋外に設置していた受電トランスを含む開放型受電設備をキュービクル化して、C バンドのモジュレータ用に 440 V ラインを新設した。他に分電盤位置やコンセント数の適正化、通信設備の更新、実験用のケーブルラックの設置などを予定している。

Table 1: Thermal Loads and Cooling Capacities by Classification

	L バンド	C バンド
総発熱量(kW)	112.4	255.1
内水冷除熱量(kW)	97.5	234.9
内 KLY 室空冷除熱量(kW)	10	5
内発生装置室空冷除熱量(kW)	4.9	15.2
冷却塔冷却能力(kW)	386	308.8
KLY 室冷房能力(kW)	28	22.4
発生装置室冷房能力(kW)	33.6	24.5

## 5. C バンドライナックの設置に関して

量子ビーム科学研究施設では、新たに C バンド電子加速器を建設し、フェムト秒超短パルス電子ビームの発生とそれを利用した創薬・がん治療等の新しい応用研究の開拓を進めている。

Figure 3 に C バンドの構成図を示す。本加速器は、レーザー駆動型 C バンドフォトカソード RF 電子銃、バンチャーと、株式会社トヤマ、KEK と日大の共同研究で開発した運転温度が 20 K の低温加速管[5]から構成され、ライナック棟地下 2 階の C バンド発生装置室(旧第 1 照射室)に設置される予定である。クライストロンは地下 1 階に設置され、クライストロンの出力 RF は長さが 10 数メートルの導波管を経由して加速器本体まで伝搬される。RF 電子銃から発生した短パルス電子ビームはバンチャーを用いてエネルギー的に変調され、低温加速管で加速されると同時にベロシティバンチングによるパルス圧縮される。これにより、最大エネルギーが 50 MeV、パルス幅が 100 fs 以下の高品質短パルス電子ビームを発生する。また、本加速器では、初の試みとして 20 K の低温下で運転可能な純銅製加速管を用いた。この加速管の Q 値は常温下と比べて 5 倍も高くなり、低電力 RF 源の駆動でも高いエネルギー利得を実現可能である。

今年度は、C バンドの配置とビームラインの設計を行い、クライストロンから加速器まで RF を伝搬する導波管の製作を行った。来年度には、C バンドやクライストロン等の設置やビームラインの建設を行い、ビーム発生の実験準備を進めていく予定である。詳細については、本大会の「阪大産研 C バンド超短パルス電子ビーム加速器の建設」(FRP005)の発表を参照していただきたい。

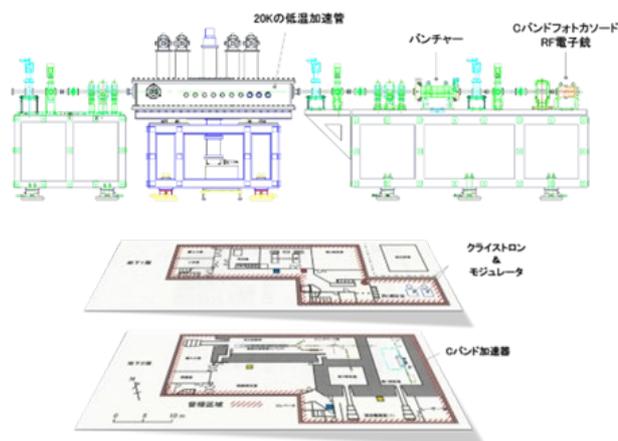


Figure 3: Layout of C-band ultrashort-pulsed electron accelerator at SANKEN, Osaka University.

## 6. まとめ

量子ビーム科学研究施設では、RF 電子銃ライナック用 1.4セル RF 電子銃の開発、MeV 電子顕微鏡用 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導 RF 電子銃の設計、ライナック棟の改修工事、C バンドライナックの建設準備等を行っている。今年度後期に予定されているライナック棟の改修工事の竣工をもって、L バンドの復旧、C バンドの建設に着手する予定である。

## 謝辞

C バンド加速器の建設の一部は、JST 未来社会創造事業(大規模型)「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」Grant No. JPMJMI17A1 のご支援を戴き実施している。篤く御礼申し上げます。

## 参考文献

[1] 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.

[2] <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/>

[3] <https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/lpa/>

[4] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2024, Yamagata Japan, pp.1116-1118.

[5] A. Iino *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8 - 10, 2016, Chiba Japan, pp.863-866.