

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[#], 菅田義英, 磯山悟朗, 岡田宥平, 徳地明, 楊金峰, 近藤孝文, 菅晃一, 神戸正雄, 吉田陽一
Kazuya Furukawa, Yoshihide Honda, Goro Isoyama, Yuhei Okada, Akira Tokuchi, Jinfeng Yang, Takafumi Kondoh,
Koichi Kan, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida
ISIR, Osaka University

Abstract

We report the present status of L-band and RF-gun linacs at the Research Laboratory for Quantum Beam Science in ISIR, Osaka University. The L-band linac is used for pulse radiolysis study in the time range from nano-second down to sub-picosecond and for generation of terahertz light based on free electron laser (FEL). The characteristics of input-output ratio for a new klystron and the output power of a new RF amplifier supplied to the klystron were investigated. A programmable water cooling system was newly equipped and a power supply for a beam sharing system was designated and produced. The RF-Gun linac is mainly used mainly for generation of ultrashort-pulsed electron beam and for study of femtosecond/attosecond pulse radiolysis. We have also been developing a femtosecond time-resolved MeV electron microscope using RF gun to a study the ultrafast phenomena and structural dynamics in materials. A new RF gun test bench was also developed to generate an ultralow-emittance electron beam for new applications, i.e. ultrafast electron diffraction.

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 γ 線照射装置を持つ放射線共同利用施設である。

L バンドは近年モジュレータのスイッチング用半導体スイッチの開発とサブハーモニックバンチャー用半導体増幅器の導入による RF 源の安定化や、27MHz グリッドパルス器の開発によるテラヘルツ波の強度増強を進めてきた[1, 2]。昨年度はクライストロンと前段増幅器の交換や特性測定、冷却水安定までの時間を有効活用するための冷却水タイマー運転システムの構築や、冷凍機をバイパスした冷却水システムの設計を行った。さらに将来的なビーム振り分けシステムの導入に向け、パルス電源の設計・製作を行った。

RF 電子銃ライナックは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ており、10 fs を切る超短パルス電子ビームの発生に成功した。また RF 電子銃を用いた MeV 電子顕微鏡、電子線回折と新規電子銃開発の役割を担った小型短パルス電子線発生装置を開発している。

本年会では当施設の保守管理・開発の状況に関して報告する。

2. 量子ビーム科学研究施設の利用状況

平成 29 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 14 件、学内から 12 件、学外の研究者を含むものが 9 件、拠点からが 10 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 バンドの保守日を除

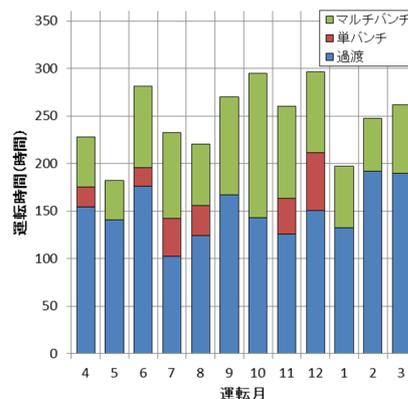


Figure 1: Operation Time of the L-band Linac of 2017.

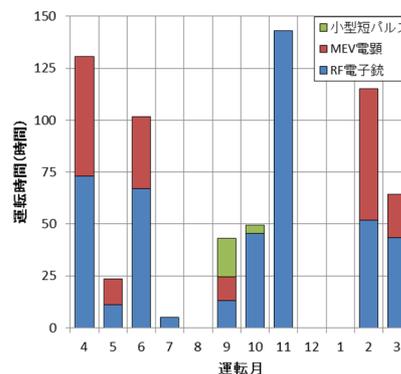


Figure 2: Operation Time of the RF-Gun Linac and MeV electron microscope and small short pulse electron linac of 2017.

[#] furukawa@sanken.osaka-u.ac.jp

いた運転日数は 227 日、テーマ数 29、通算運転時間は約 2,981 時間であった。また RF 電子銃ライナック、MeV 電子顕微鏡、小型短パルス電子線発生装置の通算運転時間はそれぞれ、453 時間、200 時間、22.5 時間であった。3 台の加速器の月別の運転時間を Fig. 2 に示す。

3. L バンドライナックの現状

3.1 高周波源

昨年度末に納入されたクライストロン (Thales TV 2022E) を 2017 年 4 月後半から 12 月末まで動作試験を兼ねてライナックの運転に使用した。パービアンスは従来のものが $1.55 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ に対して、新しいものでは $1.44 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ と 1 割程度低く、同じ充電電圧に対して RF の出力が従来のものより低いため、入力 RF のレベルを上げて運転に用いた。またクライストロン駆動用の 1.3 GHz RF アンプの予備機がなかったので、R&K 社製の 200 W アンプ (CA1300BW20-5353R) を購入し、従来のアンプに替えて 12 月より運転に使用している。

新しいクライストロンと 200 W アンプの特性を把握するため、入出力特性の測定を行うことにした。200 W アンプは、オシレータからの入力信号レベルを可変減衰器で 1 dBm ずつ変えて、出力 RF のピークピーク電圧 $V_{\text{pk-pk}}$ をオシロスコープ (Teledyne Lecroy Waverunner 640zi) で測定した。また出力電力はオシロスコープの入力インピーダンス 50 Ω と $V_{\text{pk-pk}}$ から算出した。入出力特性を Fig. 3 に示す。さらに 200 W アンプの出力 RF をクライストロンに入力し、クライストロンの出力導波管に接続された結合度 60 dB の方向性結合器を介してクライストロンの出力 RF の $V_{\text{pk-pk}}$ をオシロスコープで測定し、出力電力を前述の方法で算出した。このときのモジュレータの充電電圧は 20.8 kV で、クライストロン電圧は 240.9 kV、クライストロン電流は 183.7 A である。入出力特性を Fig. 4 に示す。クライストロンは入力電力が大きくなるほど出力が飽和してゲインが変化するが、入力電力 46 dBm のときにクライストロンの仕様書のゲイン 53.8 dB とほぼ一致することが確認できた。

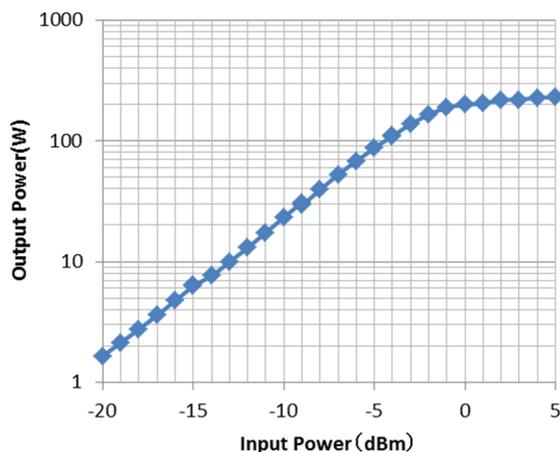


Figure 3: Input-output characteristics of the 200 W amplifier.

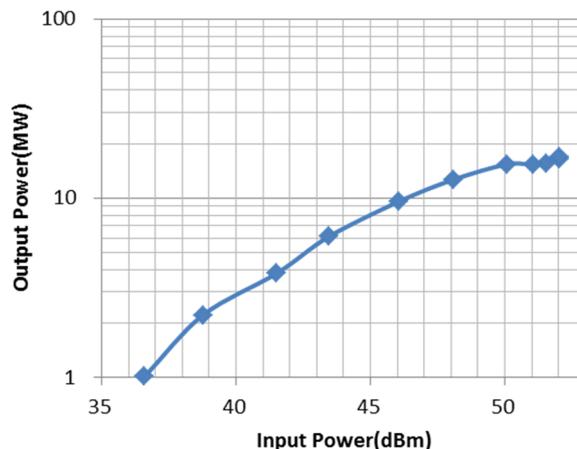


Figure 4: Input-output characteristics of the klystron.

3.2 冷却装置

L バンドでは冷却水の温度が安定するまでに 1~2 時間程度かかることから、朝の立上げ時間を短縮してマシンタイムを有効利用するためタイマーによる自動運転システムを構築した。従来は個別に 3 台の冷却装置の運転スイッチを手動で操作していた。そこで 1 つの操作盤で操作できるように配線を行うと共に、遠隔操作用のリレースイッチを設けた。このリレー接点を PLC に取り込みイーサネット経由で制御室の PC から冷却装置の遠隔操作とタイマー運転を行う LabVIEW プログラムを作成した。また運転者不在時の水漏れに対応するため、冷却水使用室に漏水センサーを導入し、その警報信号を PLC に取り込み、漏水検出時に自動で冷却水装置の運転が停止するよう LabVIEW プログラムに取り込んだ。詳細は本年会の THP096「冷却水装置タイマー運転システムの構築」にて報告を行う。

純水により機器を冷却する 2 次側冷却水システムのバルブやフロースイッチなどに動作不良が多数見つかった。設置以来、追加や変更などがある 2 次冷却水配管を見直し、排水経路や、空気抜き、流量計、バルブの追加など 2 次側冷却装置の整備を行った。

精密系冷却装置は 2 台の冷凍器と 2 段階の温度安定装置により年間を通して $0.03 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度安定性を実現している。しかし 2 次側冷却水の温度が 1 次側冷却水の温度より十分高いことから、1 次側冷却水温度が $32 \text{ }^\circ\text{C}$ を超える夏季の一時期を除き、冷凍機を経由せず、2 次側から 1 次側の熱交換を直接行うことが可能であることが分かった。そこで 1 次側と 2 次側冷却水の熱交換を行なう熱交換器を追加し、バルブ切り替えで冷凍機のバイパスを可能とするシステムを構築することにした。さらに初段の 2 次冷却水温度を安定化するため、熱交換器の 1 次側に三方比例弁を並列に設置して自動制御し、必要に応じて 2 台の冷凍機を独立に運転できるようにする。昨年度は基本設計と部品の準備を行い、近日中に実機への組み込みを予定している。

3.3 電子ビーム振り分け用電源の製作

Lバンドライナックは2週間に1度程度の保守日を除いたほとんどの平日に加え、土曜日や夜間も実験に利用しているが、ユーザー数に対して十分な実験日数を確保できていない。さらなるマシンタイム拡張を目指して、10 Hzの電子ビームを交互に2つの照射室に振り分けることで、同時に運転を可能にするビーム振り分けシステムの導入を目指している。

昨年度は電磁石に先行して振り分け用のキッカー電源の制作を行った。電源はSiCデバイスによる50 kHzインバータ回路、CTによる電流とガウスメータによる磁場フィードバック回路、LAN制御を採用することにした。予備電磁石での試験結果から、負荷インダクタンス100 mH以下、負荷直列抵抗1 Ω以下、負荷並列抵抗30 Ω以下の電磁石を10 Hzで駆動できる性能とした。今後、偏向電磁石での動作試験と、新たな電磁石の設計を進める予定である。

4. RF電子銃ライナックの現状

阪大産研量子ビーム科学研究施設のライナック棟に設置されていたRF電子銃ライナックとMeV電子顕微鏡は2014年にコバルト棟の極短パルス加速器実験室への移設を開始し、2015年に移設を完了するとともに新たに小型短パルス電子線発生装置を設置した。

平成29年度は主に下記の研究課題を中心に展開した。

- ①フェムト秒、アト秒パルスラジオリシスの研究
- ②超短パルス電子ビーム発生とTHz計測
- ③時間分解電子顕微鏡に関する研究
- ④フォトカソードRF電子銃における低エミッタンス電子ビーム発生に関する研究

課題①ではドデカンの放射線照射により生成されるドデカン励起カチオンラジカルの探索やアルカンの放射線分解初期過程などの研究を展開している。

課題②ではRF電子銃を用いた低エミッタンス電子ビームの発生を展開しており、世界的にも研究例の少ない1~数フェムト秒の超短パルス電子ビームの発生に成功した。更にこの超短電子線パルスを利用したTHz波の発生を推進している。

課題③では新たにMeV電子顕微鏡のアップグレードを行った。アップグレード後の写真をFig. 5に示す。RF電子銃は実証機に使用されたものを用いており、実証実験ではエネルギーが3.1 MeV、規格化エミッタンスが0.14 mm-mrad、パルス当たりの電荷量は1 pCのフェムト秒電子線パルスの発生に成功している。また電子レンズ系は大阪大学超高压電子顕微鏡センターに設置された2 MV超高压電子顕微鏡用のものを譲り受け、設置した。コンデンサレンズ2台、対物レンズ、中間レンズと投影レンズ2台から構成されている。またレンズ、試料室、観察室には新規の真空排気システムを設計し、製作した。RF電子銃を含む真空排気系には、3台の分子ターボポンプと5台のイオンポンプを利用しており、試料室の真空度は 5×10^{-5} Paに達している。TEMイメージの記録については、今までフェムト秒超短パルス電子を用いて測定に成功したTIをドーピングしたCsIシンチレータと

EMCCDカメラの組合せを用いて行う予定である。



Figure 5: Ultrafast electron microscopy using relativistic-energy femtosecond electron pulses.

課題④は小型短パルス電子線発生装置を用いた極低エミッタンスの超短パルス電子ビーム発生に関する研究である。昨年度は、RF電子銃の位相安定化、ショットキー効果によるビーム品質の影響やRFによるエミッタンス増大などのビームダイナミクスを明らかにし、シングルパルスによる電子回折測定技術を確認した。

RF電子銃ライナックは設置から15年あまり経過し、モジュレータ、レーザー、冷却水循環装置等に老朽化を伴い、昨年度は様々な故障が発生し、利用日数は約70日と前年度のおよそ半分であった。

5. まとめ

Lバンドライナックはクライストロンと前段増幅器の交換と特性試験を行い、運転に問題なく利用できることを確認した。冷却水装置では、タイマー運転システムを構築することで運転開始時間を1時間程度早めることが可能になり、2次冷却水配管の整備、冷凍機をバイパスする新たな冷却システムの設計を行った。さらに将来的なビーム振り分けシステム導入に向け、振り分けキッカー電源の製作を行った。

RF電子銃ライナックでは超短パルス電子ビーム発生の研究と、それを用いたフェムト秒、アト秒パルスラジオリシスや、THz波の発生研究を推進している。またMeV電子顕微鏡は新たな電子レンズの組み込みや真空排気システムの更新等のアップグレードを完了し、今後フェムト秒とナノメータの時空間分解能を実現させ、超高速構造相転移や反応素過程に関する応用研究を展開する予定である。

参考文献

- [1] A. Tokuchi, F. Kamitsukasa, K. Furukawa, K. Kawase, R. Kato, A. Irizawa, M. Fujimoto, H. Osumi, S. Funakoshi, R. Tsutsumi, S. Suemine, Y. Honda, G. Isoyama, “Development of a high-power solid-state switch using static induction thyristors for a klystron modulator”, *Nucl. Instrum. Methods A769* (2015) pp.72-78.
- [2] Shoji Suemine, Keigo Kawase, Naoya Sugimoto, Shigeru Kashiwagi, Kazuya Furukawa, Ryukou Kato, Akinori Irizawa, Masaki Fujimoto, Hiroki Ohsumi, Masaki Yaguchi, Sousuke Funakoshi, Ryouta Tsutsumi, Kumiko Kubo, Akira Tokuchi, Goro Isoyama, “Grid pulser for an electron gun with a thermionic cathode for the high-power operation of a terahertz free-electron laser”, *Nucl. Instrum. Methods A773* (2015) pp.97-103.