

阪大産研 C バンド超短パルス電子ビーム加速器の建設

CONSTRUCTION OF C-BAND ULTRASHORT-PULSED ELECTRON ACCELERATOR AT THE UNIVERSITY OF OSAKA

楊金峰^{#,A)}, 韓新宇^{A)}, 堀利彦^{A)}, 武藤俊哉^{A)}, 古川和弥^{A)}, 福井宥平^{A)}, 菅田義英^{A)}, 細貝知直^{A)}, 増田剛正^{B)},
大竹雄次^{B)}

Jinfeng Yang^{#,A)}, Xinyu Han^{A)}, Toshihiko Hori^{A)}, Toshiya Muto^{A)}, Kazuya Furukawa^{A)}, Yuhei Fukui^{A)},
Yoshihide Honda^{A)}, Tomonao Hosokai^{A)}, Takemasa Masuda^{B)}, Yuji Otake^{B)}

^{A)} SANKEN, Osaka University

^{B)} JASRI

Abstract

Ultra-high dose rate (UHDR) radiation therapy using ultra-short pulse electron beams is attracting worldwide attention for its ability to minimize damage to normal tissue while maintaining the effectiveness of tumor control. A compact C-band electron linear accelerator (C-band linac) is being constructed to generate a femtosecond single-bunched electron beam at SANKEN, the University of Osaka. The C-band linac is consisted with a laser photocathode RF gun, a buncher, and a low-loss cryo-accelerating linac. The beam simulation shows that the C-band linac is possible to generate a 190-fs pulsed electron beam with the energy of 30.5 MeV and the bunch charge of 200 pC. The instantaneous dose rate in this pulse is higher than 10^{10} Gy/s, which is excessive for the studies of beam drug discovery and UHDR radiation therapy.

1. はじめに

超短パルス電子ビームを利用した超高線量率 (Ultra-high dose rate, UHDR) 放射線治療は、腫瘍制御の有効性を維持しつつ正常組織の損傷を最小限に抑えることができるとして、世界から注目されている。過去の UHDR を用いた放射線治療研究[1]では、全線量をパルスごとに分けて投与し、パルス当たりの高線量により正常組織の選択的保護を実現する「FLASH 効果」が報告されている。利用された電子ビームの instantaneous dose rate (瞬間的な線量率) は 10^6 Gy/s 以上であった。

阪大産研量子ビーム科学研究施設では、超短パルス電子ビームを用いたビーム創薬・放射線治療等の新しい応用研究の開拓を目指して、老朽化となった 150 MeV の S バンド電子ライナックを廃棄し、建物の改修を行って、新たに C バンド電子加速器の建設を進めている。本加速器は、JST 未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」で開発した C バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃、バンチャー加速管と、トヤマ(株)-KEK-日大の共同研究で製作した低温加速管[2-4]から構成されている。RF 電子銃をピコ秒全固体レーザーにより駆動し、低エミッタンスのピコ秒短パルス電子ビームを発生する。その後は、バンチャー加速管を用いてエネルギー的に変調され、ドリフトバンチングされた後、低温加速管で加速される。これにより、エネルギー 30 MeV の高輝度フェムト秒短パルス電子ビームを発生する。また、本 C バンド加速器では、初の試みとして、伝導冷却により 20 K の低温下で運転可能な純銅製加速管を用いてビーム加速試験を行い、加速器の小型化への貢献を目指す。

本論文では、この C バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃ライナックの設計と建設現状を説明し、ビームシミュレーションの結果および短パルス電子ビームを用いたビーム創薬や放射線治療等の新しい応用研究の計画を概観する。

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

ユレーションの結果および短パルス電子ビームを用いたビーム創薬や放射線治療等の新しい応用研究の計画を概観する。

2. C バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃ライナック

図 1 に、C バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃ライナックの構成と配置図を示す。本ライナックは、C バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃、バンチャー加速管と低温加速管から構成されている。以下、各装置の特徴、性能を説明する。

2.1 C バンドレーザーフォトカソード RF 電子銃

高輝度超短パルス電子ビームを発生するために、電子源の低エミッタンス化が必要である。そのために、ハーフセルの長さを 0.6λ にし、2.6 セル定在波型の C バンドフォトカソード RF 電子銃を設計・製作した[5]。

高周波源から供給する大電力高周波は、低反射・低挿入損失のモード変換器を用いて矩形導波管 TE10 モードから円形導波管 TM01 モードへと変換し、ビーム加速軸上の円形導波管に導き、その上流に位置する 2.6 セル加速構造には円形ビーム iris を通して軸上で結合することで入力する。Iris の直径は 17.5 mm である。高周波の損失を最小化し、放電の抑制を図るため、大電力高周波に曝される内面は鏡面加工した。空洞の性能として、運転温度が 28°C の時、Q 値とシャント抵抗はそれぞれの $Q_0=12,863$ と $R_{sh}=92.8 \text{ M}\Omega/\text{m}$ であった。設計上では、カソード表面に、入力ピーク電力 1.5 MW で最大 60 MV/m の軸上電場が得られる。

カソード材料として、表面を鏡面研磨した銅を採用した。照射するレーザーは、電子銃下流の真空ダクト内に設置したミラーを用いて導光する。ビーム創薬や放射線治療等の応用研究では、パルスあたり 100 pC 以上の電

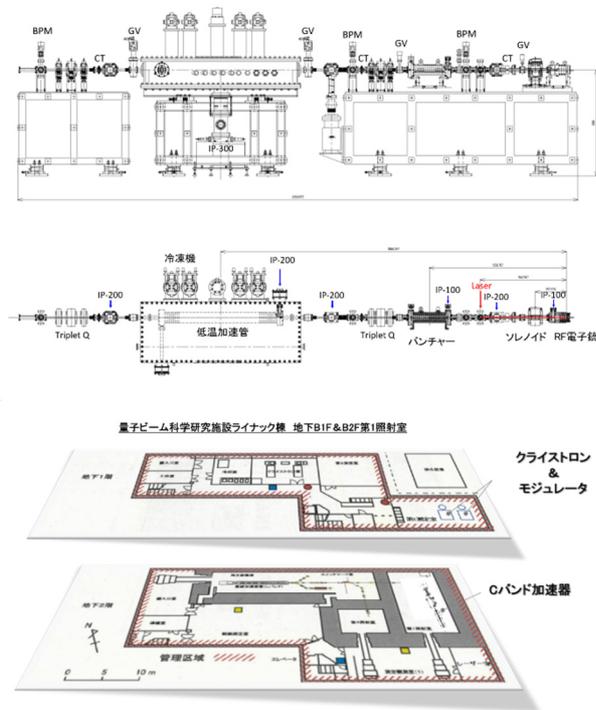


Figure 1: Layout of laser photocathode C-band RF gun linac at SANKEN, The University of Osaka.

荷量が必要である。そのため、銅のカソードに既存の Nd:YLF ピコ秒レーザー (10 ps in FWHM, 262 nm) が照射し、カソード近傍の空間電荷効果を低減してパルスあたりの電荷量が 200 pC のピコ秒電子線パルスを発生し、その後、バンチャー加速管とドリフトスペースによってバンチ圧縮する。

図 2 に、RF 電子銃におけるビーム発生シミュレーション結果を示す。カソードでのレーザースポット径は 1 mm、ピーク電場強度は 100 MV/m、電荷量は 200 pC/pulse であった。パルス幅 10 ps(FWHM)のレーザーが駆動した場合、電子銃の位相が 5° の時、ビームエネルギー (E) が高く、エネルギー分散 (E/ΔE)、エミッタンスとパルス幅が最小となることが分かった。この時、E=4.1 MeV、E/ΔE=0.7%、 $\epsilon_x(\epsilon_y)=16$ mm-mrad、 $\sigma_{t1}=1.6$ ps (rms) であった。

RF 電子銃の直後に、長さ 10 cm の小型ソレノイド磁石が取り付けられ、エミッタンス補正を行っている。ビームシミュレーションでは、ソレノイドの磁場強度を 1.5 kG に固定した。

2.2 バンチャー加速管

バンチャー加速管は、24 セルの $2\pi/3$ モードの進行波型空洞から構成され、主に電子線パルスのエネルギー変調に利用される。全長は 415.88 mm、空洞の iris 径は 12.107 mm であった。RF 電子銃のカソード面からバンチャー中心の距離は 1.53 m であった。空洞の性能として、運転温度が 30°C の時、Q 値、シャント抵抗、減衰率と群速度はそれぞれの $Q_0=9,100$ 、 $R_{sh}=58.5$ MΩ/m、 $\alpha=0.20$ と $v_g/c=1.36\%$ であった。また、フィリング時間は 0.10 μs であった。

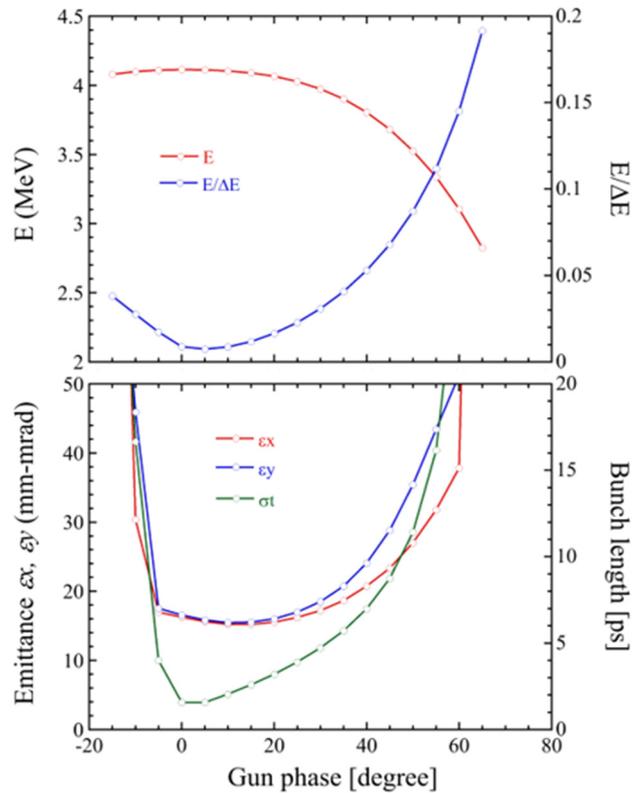


Figure 2: Beam simulation results of 2.6-cell laser photocathode C-band RF gun.

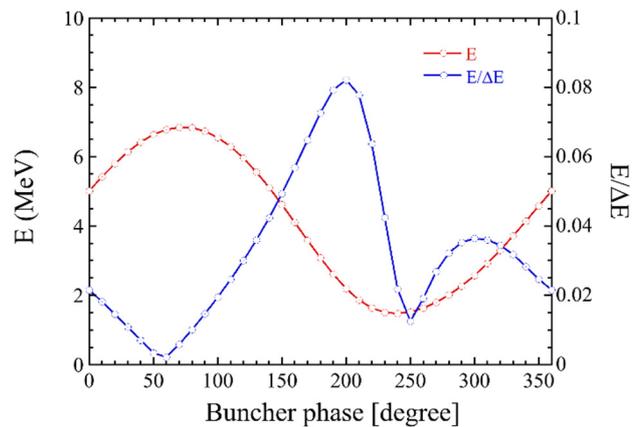


Figure 3: Beam simulation results of buncher accelerating tube.

図 3 に、バンチャー加速管におけるビームのシミュレーション結果を示す。計算では、RF 電子銃の位相を 5° に固定した。バンチャー加速管の入力ピーク RF 電力は 18 MW であった。加速位相が 85° の時、ビームエネルギー (E=6.8 MeV) がほぼ最大値であり、エネルギー分散 (E/ΔE=0.2%) が最小となっているが、パルス圧縮のための最適なエネルギー変調が得られる加速位相は 10° であることが分かった。この時、電子ビームのエネルギーがほぼ加速されず、E=4.6 MeV と E/ΔE=2.5% であった。

2.3 低温加速管

本加速器では、初の試みとして、トヤマ(株)-KEK-日

大の共同研究で製作した低温 20 K にて運転可能な加速管 [2] を活用している。この加速管は超高純度銅 (6N8 Cu, RRR2000) で作られて、伝導冷却により 20 K の低温加速運転を実現することを目指す。これにより、電気抵抗が大幅に減少し、高 Q 値と高シャントインピーダンスを得る。加速管本体はクライオスタット内に設置され、4 台または 5 台の GM 冷凍機による冷却される。RF 電子銃のカソード面から加速管中心の距離は 3.87 m であった。本加速管のパラメーターを表 1 に示す。トヤマ(株)-KEK-日大の共同研究の大電力の RF 試験では、20 K で $E_{acc}=30.9$ MV/m の加速電場を達した。詳細については、参考文献 2 を参照していただきたい。

Q 値は通常室温で運転するライナックに比べて 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。本研究の成果は、今後の加速器の小型化への貢献につながる。

Table 1: Specifications of Cryo-linac*

Type	Value
Accelerating mode	Traveling wave
Phase advance per cell	$2\pi/3$
Structure length (m)	1.33
Cell numbers	76
Iris diameter (mm)	13.3~16.0
Group velocity (%)	2.7
Q_0 at 20 K	53,280
Shunt impedance at 20 K (M Ω /m)	354
Attenuation parameter at 20 K	0.054

* A. Iino *et al.*, NIMA 866, 40-47(2017).

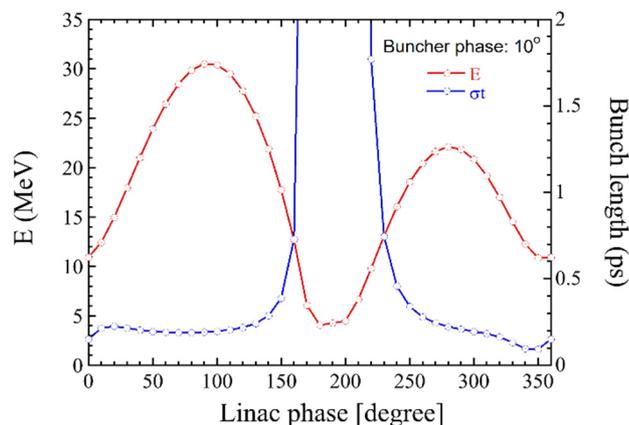


Figure 4: Beam simulation results of low-loss cryo-linac.

図 4 に、低温加速管におけるビーム加速のシミュレーション結果を示す。計算では、加速位相が 90° の時、ビームエネルギー ($E=30.5$ MeV) が最大値であり、エネルギー分散、エミッタンスとパルス幅が小さくなることが分かった。この時、 $E/\Delta E=0.4\%$ 、 $\epsilon_x(\epsilon_y)=19(22)$ mm-mrad、 $\sigma_t=190$ fs(rms)であった。

2.4 クライストロンとモジュレータ

クライストロンについては、RF 電子銃とバンチャーに 1 台、低温加速管に 1 台を利用する。クライストロンは、2 台共(株)キャノン製の出力 50 MW の E37202 型 C バンドクライストロンであり、図 1 に示すように阪大産研量子ビーム科学研究施設のライナック棟地下 1 階に設置される。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地下 2 階の加速器本体まで伝搬される。

1 台のクライストロン出力(最大 50 MW)は、低温加速管に入力し、もう 1 台(20 MW)は、10 dB 導波管方向性結合器を通して 2 MW と 18 MW を分けられる。2 MW は RF 電子銃に、18 MW はバンチャー加速管に供給される。RF 電子銃側には導波管型減衰器と位相器が取り付けられている。

低電力高周波システムでは、JST 未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」で開発した基準 RF 信号を生成する低位相ノイズの RF マスターオシレータ(MOSC)と、MOSC からの基準 RF 信号のパルス化と電力レベル・位相の制御を行う高精度の LLRF 制御ユニットを利用する。クライストロン駆動用アンプとして、株式会社アールアンドケー製の出力 800 W の水冷式高安定半導体増幅器を用いる。また、これらの機器を起動するための基準トリガーパルス信号を生成するために、商用電源の 50 Hz/60 Hz と MOSC からの 79.3 MHz クロックと二重同期した、機器を起動するためのトリガーパルス信号を正確なタイミングで生成するマスタートリガーユニット(MTU)を製作した。

低電力高周波システムの動作試験[6]では、振幅ジッターを 0.03%(rms)、位相ジッターを 0.04 度(rms)に抑えることができた。この位相ジッターは 19 fs の時間ジッターに相当する。目標であるパルス幅 100~200 fs の電子ビームの発生には支障がないと考えている。

2.4 ビームモニター

RF 電子銃の下流側に積分型ビーム電流トランスフォーマーとビームプロファイルモニター(BPM)を取付け、バンチャー加速管と低温加速管の下流側に 4 端子差動検出型ビーム電流トランスフォーマー(CT)と BPM を設置した。ビームの広がりを抑えるために、バンチャー加速管の出口に Triplet Q 電磁石を設置した。低温加速管の下流側にも Triplet Q 電磁石 1 台を設置し、ビーム利用実験のためのビーム収束や制御を行う。

3. フェムト秒電子線パルス圧縮のシミュレーション結果

本 C バンド加速器におけるフェムト秒短パルス電子ビーム発生シミュレーションでは、上記に述べたように、まず、ビームの低エミッタンス化のために RF 電子銃の銅カソードにパルス幅 10 ps(FWHM)、スポット径 1 mm のレーザーパラメーターを用いてパルス当たりの電荷量 200 pC のピコ秒電子線パルスを発生した。RF 電子銃のピーク加速電場は 100 MV/m、RF 電子銃の位相を 5° に固定した。次に、バンチャー加速管の位相を 10° に設定し、パルスのエネルギー変調を行う。バンチャー加速管の入力 RF 電力は 18 MW であった。ドリフトバンチング圧縮後、低温加速管によるビーム加速を行う。輸送中の

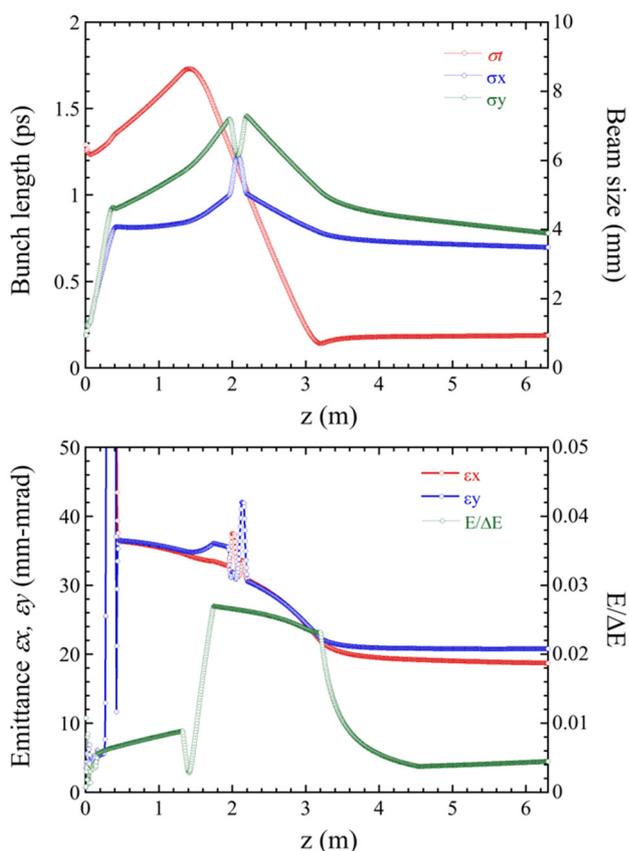


Figure 5: Simulation results of femtosecond electron pulse generation in the C-band linac.

ビーム広がりを抑えるためには、バンチャー加速管の出口に Triplet Q 電磁石を用いた。

図 5 にフェムト秒電子線パルス圧縮のシミュレーション結果を示す。ビームラインの最終点では、エネルギーが 30.5 MeV、電荷量が 200 pC/pulse、パルス幅が 190 fs の短パルス電子ビームを発生できることを確認した。この時、低温加速管の位相は 90° であり、ビームエミッタンスは $\epsilon_{x(y)} = 19(22)$ mm-mrad、エネルギー分散は $E/\Delta E = 0.4\%$ であった。

このビームドーズ量は 0.2~0.3 Gy/pulse、instantaneous dose rate (瞬間的な線量率)は 10^{10} Gy/s に相当し、超短パルス電子ビームを利用した創薬や超高線量率放射線治療の応用研究への利用が期待できることが分った。

4. まとめ

阪大産研量子ビーム科学研究施設では、超短パルス電子ビームを用いたビーム創薬・放射線治療等の新しい応用研究の開拓を目指して、老朽化となった 150 MeV の S バンド電子ライナックを廃棄し、建物の改修を行って、新たに C バンド電子加速器の建設を進めている。本加速器では、JST 未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」で開発したレーザーフォトカソード C バンド RF 電子銃、バンチャー管と、(株)ト

ヤマ-KEK-日大の共同研究で製作した低温加速管を用いた。シミュレーション研究では、RF 電子銃をピコ秒全固体レーザーの駆動により低エミッタンスのピコ秒短パルス電子ビームを発生し、その後、バンチャー加速管、ドリフトスペース、低温加速管を用いて、エネルギーが 30.5 MeV、電荷量が 200 pC/pulse、パルス幅が 190 fs の短パルス電子ビームを発生できることを確認した。このビームドーズ量は 0.2~0.3 Gy/pulse、instantaneous dose rate (瞬間的な線量率)は 10^{10} Gy/s に相当し、超短パルス電子ビームを利用した創薬や超高線量率放射線治療の応用研究に利用できることが分った。

謝辞

本加速器の低温加速管とそれを駆動するクライストロンおよびモジュレータ、Q 電磁石、BPM は(株)トヤマから譲渡したものであり、RF 電子銃とバンチャーを駆動するクライストロンは JASRI から譲渡したものである。この場を借りて、(株)トヤマと JASRI に心より感謝申し上げます。

RF 電子銃とバンチャーの設計・製作にあたっては、JASRI の熊谷教孝氏と益田伸一氏、日大の田中俊成氏と境武志氏、東大の坂上和之氏、早稲田大学の小柴裕也氏と大塚誠也氏に多大なご協力頂きました。クライストロン設置と他の加速器コンポーネント移設にあたっては、稲垣隆宏氏をはじめたくさんの JASRI の方にご協力頂きました。ここに謹んで感謝の意を表します。

また、本 C バンド加速器の導入は、それらの経費の一部を 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 よりご支援を戴き実施している。

参考文献

- [1] R. D. Bello *et al.*, “Enabling ultra-high dose rate electron beams at a clinical linear accelerator for isocentric treatments”, *Radiotherapy and Oncology* 187, 2023, 109822.
- [2] A. Iino *et al.*, “Development of low-loss cryo-accelerating structure with high-purity copper”, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 866, 2017, 40-47.
- [3] U. Uetake *et al.*, “準定電界進行波型 C バンド加速管の製作”, *Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, August 5-7, Tsuruga, Japan, 2015, pp. 591-595.
- [4] A. Iino *et al.*, “20K における C バンド加速管の大電力試験”, *Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, August 8-10, Chiba, Japan, 2016, pp. 863-866.
- [5] Y. Otake *et al.*, “レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線型加速器の基本設計”, *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, July 31 - August 3, Kyoto, Japan, 2019, pp. 1176-1180.
- [6] T. Masuda *et al.*, “レーザープラズマ航跡場入射用極短パルス線型加速器の低電力高周波システム試験”, *Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, July 31 - August 3, Yamagata, Japan, 2024, pp. 442-446.