

産研Lバンド電子ライナックにおける低・高線量電子線照射場の確立

奥田修一¹、山本 保、末峰昌二、磯山悟朗
大阪大学産業科学研究所附属放射線実験所
〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

概要

阪大産研 38 MeV Lバンド電子ライナックでは、高強度の単バンチビームを発生することができる。この加速器により、学内共同利用として多くの研究テーマで実験が行われている。最近、電子銃システムの改善により、単バンチビームの電荷量 91 nC/bunch を達成した。また単一ショットでイメージングプレート of 像を得る実験では、電荷量 0.05 nC のビームを厚さ 2 mm のアルミニウム散乱板に入射させ、広げて用いた。高密度励起や高強度放射の研究から、イメージングプレート of 特性評価、ピコ秒フラッシュラジオグラフィまで、低・高線量の照射場を確立した。また、広い分野における利用研究のためにビームの特性評価を行った。

1. はじめに

産研 38 MeV Lバンド電子ライナックからの高強度の単バンチビームを利用して、パルスラジオリシス、Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE) 型自由電子レーザー (FEL)、コヒーレント放射の発生とその光源への利用などの研究が行われている。

加速器の開発に関するこれまでの研究で、主としてサブハーモニックプリバンチャー (SHPB) などの要素の開発を行い、1984 年にバンチ当りの電荷量として最大 67 nC が得られた^[1]。その後、ビームの高輝度化、パルス特性の向上などを目的として新しい大電流電子銃^[2]を開発し、1997 年に最大電荷量が 73 nC に増加した。比較的質の良いビームとしては、他のライナックと比較して最も高強度である。さらに電子銃出口の磁場レンズの配置を最適化してビーム加速試験を行っている。

本研究では、高強度ビームの特性を詳しく調べて利用特性を評価すると共に、低線量での電子ビームの発生と線量評価を行い、広い線量域での照射場を確立した。

2. 産研Lバンド電子ライナックの要素

産研Lバンドライナックは、マイクロ波の基本周波数が 1300 MHz で、周波数が 1/12 および 1/6 のサブハーモニックプリバンチャー (SHPB) をそれぞれ 2 台および 1 台使用して、電子銃からパルス幅 5 ns で入射したビームを圧縮する。新たに開発した電子銃は、陽極電圧約 100 kV の三極管熱電子銃である。使用している YU-156 陰極・グリッドアセンブリ

(EIMAC) の陰極径は 20 mm φ である。電子銃テストベンチにおける実験では、パルス幅 5 ns、陽極電圧 100 kV において、ビームのピーク電流 30.1 A が得られている。

3. 単バンチビームの特性

種々の実験で普通利用されているエネルギー 27 MeV でビーム特性を測定した。電子銃からの入射ビームのピーク電流と加速後の単バンチビームの電荷量の関係を図 1 に示す。ビーム電荷量の測定では、ビーム取出し窓の外側に、厚さが電子ビームの外挿飛程より十分に厚いアルミニウムブロックを置き、これにビームを入射して、集められた電荷を測定した。X線による影響は無視できる。この図からわかるように電荷量は入射ビームのピーク電流と共に増加し、最大電荷量 91 nC/bunch が得られた。この加速器システムでさらに電荷量を増加させるために、電子銃からの入射ビームのパルス特性の改善を行っている。これにより入射ビームのパルス当りの電荷量を数十パーセント増加させることができる見通しが得られている。

単バンチビームのエネルギー分布を、偏向電磁石とファラデーカップを用いて測定した。その広がり of 半値幅をビーム電荷量に対してプロットしたのが図 2 である。エネルギー広がりは、電荷量が約 40-50

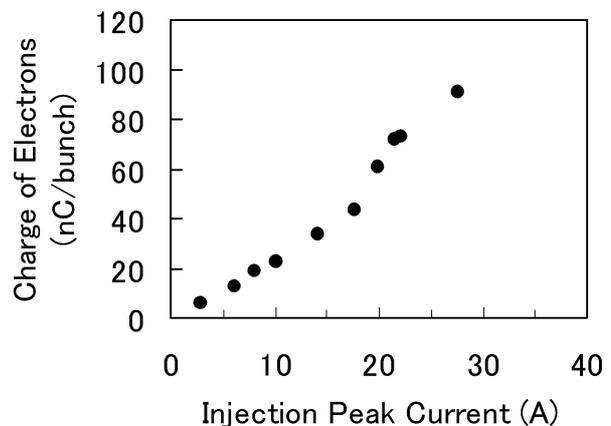


図 1 : 電子銃からの入射ビームのピーク電流と加速後の単バンチビームの電荷量の関係の測定結果

¹ E-mail: s-okuda@sanken.osaka-u.ac.jp

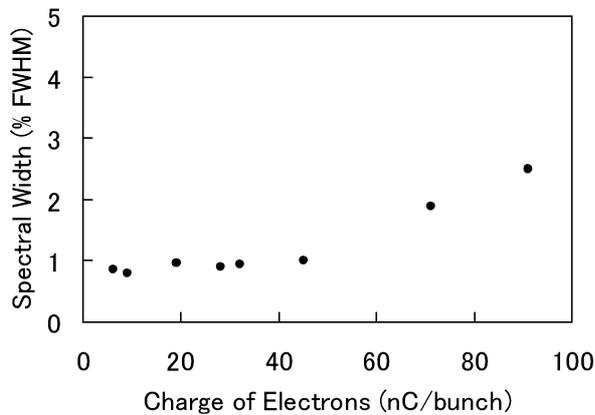


図 2 : 単バンチビームのエネルギー広がり半値幅と電荷量の関係の測定結果

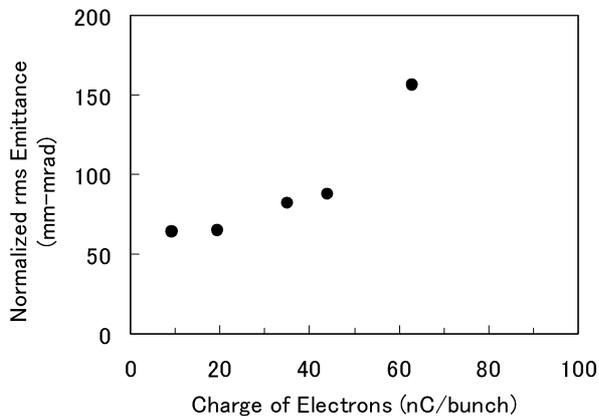


図 3 : 単バンチビームの規格化 rms エミッタンスと電荷量の関係の測定結果

nC/bunch まではほぼ一定で、その後電荷量と共に増加する。

エミッタンスは、Q 電磁石と厚さ 1 mm の蛍光板（デマルケスト）を用いたビームプロファイルモニタを利用して測定した。その結果を図 3 に示す。水平、垂直方向の rms エミッタンスを平均している。両者は比較的良く一致した。この図からわかるようにエミッタンスは電荷量と共に増加し、この増加は高い電荷量で顕著である。アメリカのアルゴンヌ国立研究所では、レーザー陰極のマイクロ波電子銃を利用した Lバンドのライナック（AWA）により、バンチ当たり最大 100 nC の電荷量を得ている^[3]。エミッタンスを比較すると、産研ライナックは AWA の約 20% 以下である。

バンチ波形は、空気中でビームから発生したチェレンコフ光をストリークカメラで観測して求め、その微細構造をコヒーレント遷移放射のスペクトルの干渉系を用いた測定結果により評価した。バンチの半値幅は 20-30 ps である。4 極の電磁石で構成されるシケイン型バンチコンプレッサー^[4]が設置されているが、有効に動作することが確認されている^[5]。

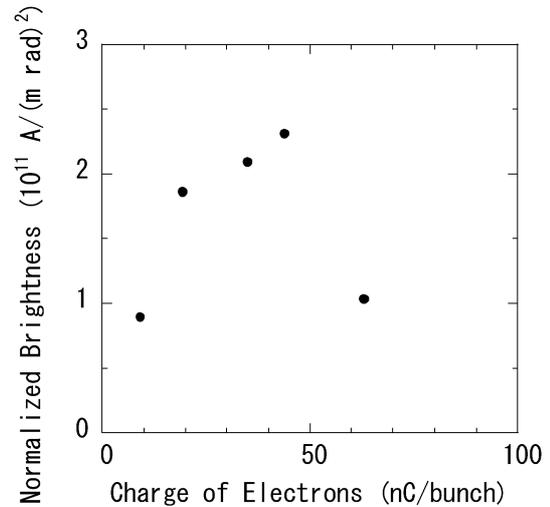


図 4 : 単バンチビームの規格化された輝度の電荷量依存性

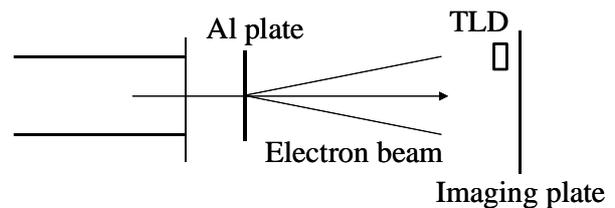


図 5 : 低線量照射と線量モニタの配置

4. 低 - 高線量照射場の特性

単位面積当りの照射線量を考える際に重要な因子は、ビームの強度と質である。ビームの輝度がこの指標になる。単バンチビームの時間幅を 25 ps FWHM とした場合に、ビームの電荷量およびエミッタンスの測定結果から規格化された輝度を求めた。この電荷量依存性を図 4 に示す。電荷量の増加と共にエミッタンスも増加することから、輝度は 40-50 nC/bunch 付近にピークを生じる。照射領域の一边を 2 mm とすると単位面積当りの照射線量は最大でバンチ当たり約 $10 \text{ nC}/\text{mm}^2$ になる。

低線量の照射では、ビーム強度および照射線量を精度良くモニタすることが重要である。この場合の照射配置を図 5 に示す。電子銃からの入射ビーム強度を減らし、加速されたビームをビーム電流モニタによって電荷量 0.05 nC/bunch まで評価した。単バンチビームを照射する時以外は上流のプロファイルモニタでビーム軌道をさえぎり、電子銃のグリッドエミッションによって入射された電子の照射の影響を最小にした。このような注意を払わないと、通常のグリッドの状態でも、無視できない程度に影響が認められる。ビームを真空窓から空気中に取り出し、厚さ 2 mm のアルミニウム散乱板を通過させて約 $50 \text{ mm}\phi$ に径を広げることにより、1 ショット当たり $30 \text{ fC}/\text{mm}^2$ の線量が得られた。ビームの横方向分布はワイヤースキャンによる分布測定法およびイメージング

プレートで評価し、ガウス型分布が得られた。これらの方法は測定に時間を要するので、1点における線量を比較的短時間で評価するために、個人被ばく線量測定用の熱蛍光線量計 (TLD) を用いた。この場合の線量の指示は、ショット当たり約 1 mSv であった。照射線量の下限はこれら線量計の感度で決まり、さらに2桁程度減らすことが可能である。この結果、単バンチビームの線量として 91-0.05 nC/bunch、また単位面積当りの照射線量で 8 桁にわたる範囲での照射場が確立された。

5. 利用研究とビーム条件の評価

FEL 研究などに使用されている、レーザー陰極型マイクロ波電子銃を利用したライナックでは、非常に高輝度のビームが加速できる。産研ライナックの単バンチ電子ビームではそれらに比べると、バンチ当りの電荷量は 1 桁以上高いが、ビーム輝度の最大値は 2 桁程度低い。現在産研で研究が行われている遠赤外の SASE 型 FEL では、ピーク電流と共にこの輝度の考慮が重要である。通常のパルスラジオリンスのように、空気中での照射において照射領域を数 mmφ以上とした場合には、電荷量だけの比較が重要で特に高輝度である必要はない。このような条件における高密度励起状態の生成や、放射強度がビーム径に大きくは依存しない、サブミリ、ミリ波のコヒーレント放射の実験には、産研ライナックの高強度ビームは良好な特性を示す。

低線量のビームは、イメージングプレートのような高感度の線量計の特性評価や単一ショットでのイメージング実験、特にピコ秒フラッシュラジオグラフィの基礎研究などに利用されている。本研究の

結果、幅広い分野の実験に適応できる照射場が確立された。

ここでは単バンチビームについて述べたが、以前に報告したように、種々のパルスモードでマルチバンチビームを発生させることが可能である。これらの特性も利用実験に活かされている。

6. まとめ

産研 Lバンド電子ライナックは、入射系の改善により単バンチビームの電荷量が最大 91 nC/bunch まで増加した。また諸特性の測定結果から、実験条件が向上し、新しいビーム利用のために優れた特性を持つことが明らかになった。電子銃のグリッドパルサーの改善により、電荷量 100 nC/bunch を超える電子ビームの加速が可能であると考えられる。

単バンチビームの電荷量の増加により、従来のパルスラジオリンス、SASE 型 FEL、コヒーレント放射などの実験条件の向上が期待される。

本研究での低線量照射場の確立により、ライナックの利用研究分野が大きく拡大した。

参考文献

- [1] S. Takeda, K. Tsumori, N. Kimura, T. Yamamoto, T. Hori, T. Sawai, J. Ohkuma, S. Takamuku, T. Okada, K. Hayashi and M. Kawanishi, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32 (1985) 3219.
- [2] S. Okuda, T. Yamamoto, S. Suemine and S. Tagawa, Nucl. Instrum. Meth. A417 (1998) 210.
- [3] M. E. Conde, W. Gai, R. Konecny, X. Li, J. Power, P. Schoessow and N. Barov. Phys. Rev. ST-AB 1 (1998) 04132-1.
- [4] S. Okuda, M. Nakamura and K. Yokoyama, Nucl. Instrum. Meth. A445 (2000) 351.
- [5] M. Nakamura, M. Takanaka, S. Okuda, T. Kozawa, R. Kato, T. Takahashi and S. Nam, Nucl. Instrum. Meth. A (in press).