

STUDY ON BUNCH COMPRESSION METHOD FOR X-BAND THERMIONIC CATHODE RF GUN

Fumito SAKAMOTO ^{#,A)}, Katsuhiro DOBASHI^{B)} and Mitsuru UESAKA^{B)}

^{A)} Akita National College of Technology

1-1 Iijima-Bunkyo, Akita, Akita, 011-8511

^{B)} Nuclear Professional School, The University of Tokyo

2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

Abstract

To realize the compact, high-intensity and high-stable quasi-monochromatic X-ray source, we are developing a Compton scattering X-ray source based on X-band (11.424 GHz) multi-bunch electron linac. The X-band linac has a thermionic cathode RF-gun for electron injector and an alpha magnet for the purposes of bunch compression and energy filter. However, we have observed huge beam losses and high-radiation level after accelerating structure. This serious problem occurred due to the large beam divergence and miss controls at the injection section. In this paper, we report the results of numerical simulation of beam dynamics at the injection section using GPT (General Particle Tracer) code.

X-band 熱陰極高周波電子銃における電子ビーム圧縮手法に関する検討

1. はじめに

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻において、レーザーパルスと電子ライナックからの電子ビームによる逆コンプトン散乱 X 線発生装置の開発を進めている[1].

この X 線発生装置は、逆コンプトン散乱により発生する X 線の角度依存性をもつためエネルギー広がり極めて小さい準単色性 X 線を取り出せることから、血管造影といった医療診断技術の発展に貢献できると考えられている。

東大システムは電子ライナックのダウンサイジングを実現させるため、加速周波数に X-band(11.424 GHz)を採用している。また、生成 X 線の単位時間当たりの強度を確保するために、マルチバンチ電子ビームとロングパルスレーザーによる多重散乱スキームを採用している。そのため、電子ビーム源には X-band 熱陰極 RF ガンを採用している。図 1 に電子ライナック全体のイメージ図を示す。熱陰極 RF ガンで発生した 2.5~3 MeV 電子ビームは、バンチ圧縮と低エネルギー電子を除去するためにアルファマグネットを通過した後に加速管に入射され、約 30 MeV まで加速される。その後アクロマティックアークを通過してレーザーとの衝突点まで輸送される。また、将来的にはバックグラウンド放射線を低減させるため、減速用空洞によってビームエネルギーを下げてからダンプする計画である。

これまでの開発により、熱陰極 RF ガンからの電子ビーム発生[2]と加速管によるビーム加速[3]が達成されているが、電子ビームの不安定性とバックグラウンド放射線強度高いことにより、レーザーパルスとの衝突によるコンプトン散乱 X 線の安定な観測には至っていない。電子ビーム不安定性の要因としては、RF ガン空洞における放電が大きな原因となっていたが、RF ガン空洞の改良[4]により安定した

ビーム発生が達成されている。しかしながら、クライストロンモジュレータにおける出力電圧の揺らぎが大きく課題となっている。

バックグラウンド X 線は主として加速管後の高エ

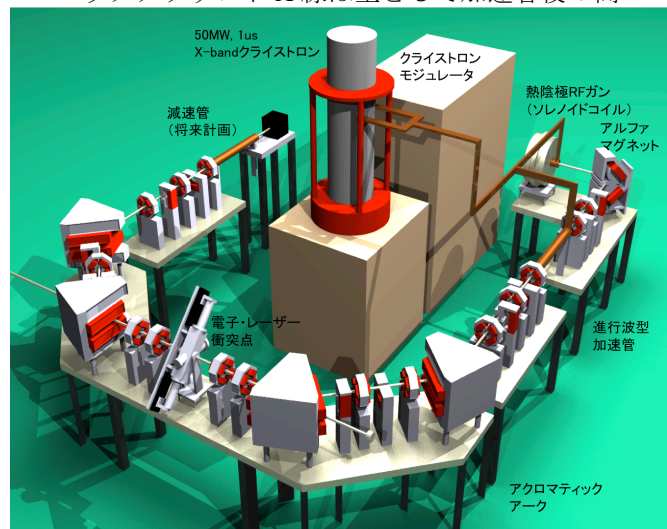


図 1 : X-band マルチバンチ電子ライナック

ネルギー部分でのビーム損失が原因となるが、これまでの調査により RF ガン後からアルファマグネット出口までのビーム輸送とバンチ圧縮およびアルファマグネット内に設置したコリメータによる低エネルギー電子の除去の最適化がされておらず、加速管以降でのビーム損失が大きいことが判明している。特にアルファマグネットでの漏れ磁場や磁場勾配の不均一性からくるビーム軸のずれの影響は大きく、ビーム加速に大きく影響する。

本研究では、アルファマグネットにおけるビーム挙動の解析と、他のビーム圧縮手法として効果的な手法の検討を行ったので、その結果について報告する。

[#] saka@akita-nct.jp

2. アルファマグネットによるバンチ圧縮

熱陰極 RF ガンで生成・加速される電子ビームは、エネルギー広がりが大きく、バンチ長も長いので、加速管の前段に圧縮と低エネルギー電子の除去を行う必要がある。

アルファマグネットはアโครマティックな軌道であるため、磁場内部にコリメータを設置することで低エネルギー電子の除去が可能である。しかし、アโครマティックであることは電子ビームの入射状態が極めて発散の小さい低エミッタンスビームであることが前提となり、アルファマグネット入射時のビーム調整が重要となる。X-band 熱陰極 RF ガンからの電子ビームのアルファマグネットにおけるビーム挙動と電磁石等の最適化を実施するため、GPT(General Particle Tracer)によってビームダイナミクスをシミュレートした。

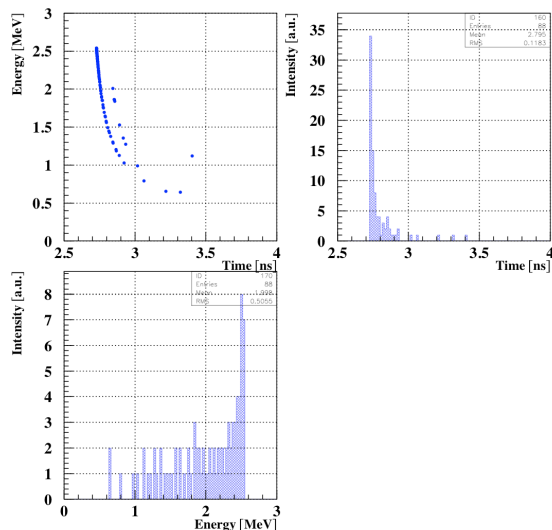


図 2 : X-band 熱陰極 RF ガン出口でのビームプロファイル

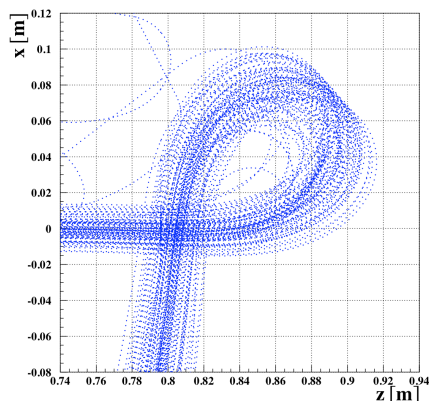


図 3 : アルファマグネット内における電子ビームの軌道

最適化の方針としては、アルファマグネット入り口において電子ビーム径が最小となるように RF ガンのフォーカス用ソレノイドコイルの電流値を設定し、アルファマグネットでの軌道を解析した結果、出口でのバンチ長が最小となるアルファマグネットの励磁電流値を調査した。

図 3 にソレノイドコイル電流値を 95 A とした際のアルファマグネット内におけるビーム軌道の様子を示す。入射電子が発散角を持っているため、アルファマグネット内では複雑な軌道となっている。なお、このシミュレーションにおいてはアルファマグネット内でのコリメータは考慮しておらず、全電子の軌道解析を行っている。

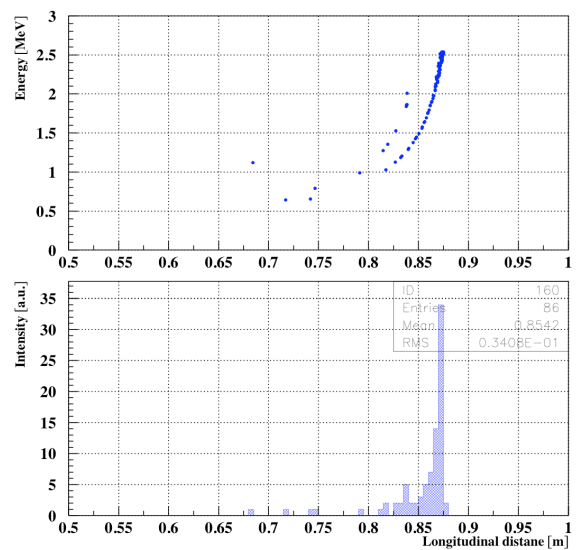


図 4 : アルファマグネット入射時におけるビームの z 方向位相空間(a)とバンチの時間構造(b)

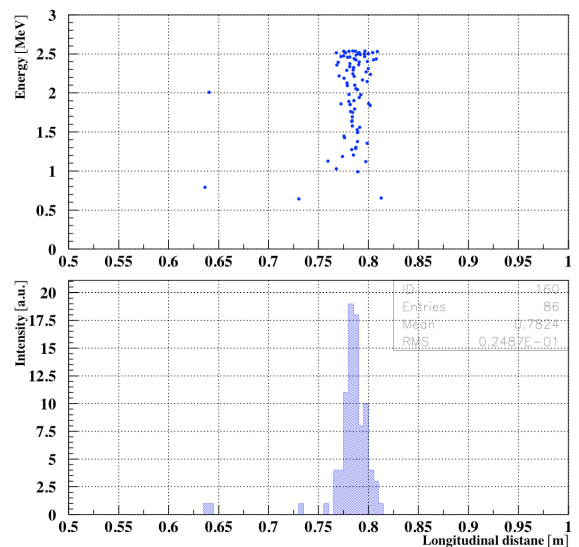


図 5 : アルファマグネット内におけるビームの z 方向位相空間(a)とバンチの時間構造(b)

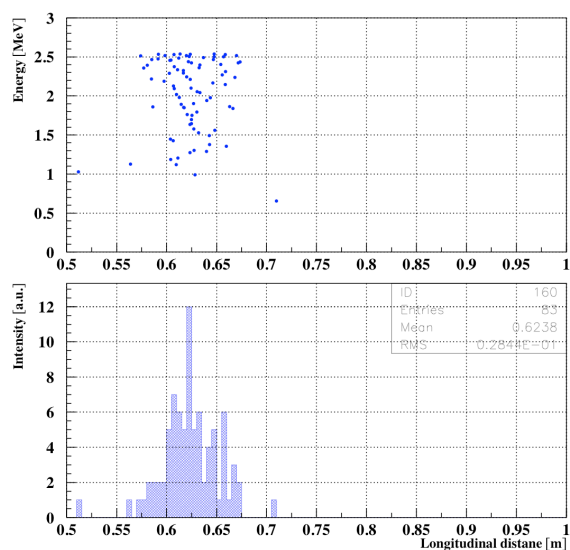


図 6 : アルファマグネット出口におけるビームの z 方向位相空間(a)とバンチの時間構造(b)

図 4, 図 5 および図 6 にアルファマグネット入口, 軌道頂点, 出口における z 方向位相空間分布とバンチの時間構造を示す。また, 図 7 にアルファマグネット通過時の各時間ステップにおけるバンチ長(rms)の変化の様子を示す。アルファマグネットを通過する際, バンチ前方の高エネルギー電子と後方の低エネルギー電子が軌道長の違いにより接近し, 40 ps まで圧縮される。しかし, 横方向へのビームの発散が大きいため前方電子の分布にばらつきが生じていることから, 時間分布が伸びている。さらには後方電子は軌道頂点を通過後に前方の高エネルギー電子を追い越し, 過圧縮の状態となっているのがわかる。

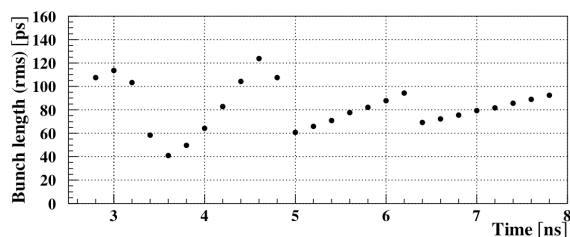


図 7 : アルファマグネット通過時におけるバンチ長の変化 (バンチ長は rms としている)

以上の解析結果より, アルファマグネットによるバンチ圧縮と低エネルギー電子の除去については,

1. 入射電子ビームの収束の最適化
2. アルファマグネットの磁場分布の最適化

が必要であると言える。ビーム収束にはソレノイドコイルを用いているが, 形状の大きさを考えると RF ガン出口にダブレットとステアリングコイルの組合せが最適であると考えられる。また, アルファ

マグネットへのコリメータ設置も構造が複雑となるため, ダブルベンドを用いたアクロマティックアークによるシンプルなオプティクスが望まれる。

3. アクロマティックアークによるバンチ圧縮の検討

加速管での加速効率とビーム輸送時のビーム損失によるバックグラウンド X 線を低減させるためには, 加速管入射段階での電子ビームの圧縮とエネルギー分散の低減が必須である。よりビーム調整を確実にを行うため, 図 8 に示すダブルベンドとダブレットを用いたアクロマティックアークの採用を検討している。現在, GPT による RF ガンからの電子ビームパラメータを用いて, アクロマティックアーク部の最低化を加速管でのビーム加速効率を含めて TRACE3D コードにより実施している。

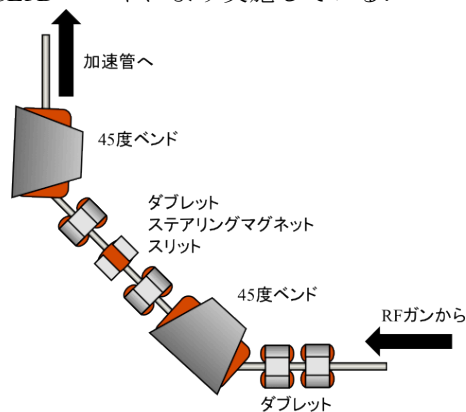


図 8 : ダブルベンドアクロマティックアークによるバンチ圧縮

4. まとめと今後の展開

東大逆コンプトン散乱用 X-band 電子ライナックの熱陰極 RF ガンでのバンチ圧縮手法において, 既存のアルファマグネットではバンチの過圧縮が起こることが解析によって明らかになった。今後はアクロマティックアークによる圧縮の最適化を実施し, より安定で高輝度なコンプトン散乱 X 線発生を試みる。

参考文献

- [1] K. Dobashi, et al., “Status of 11.424 GHz X-band Linac in UTNS”, Proc. of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [2] F. Sakamoto, et al., “Compton scattering monochromatic X-ray source based on X-band multi-bunch linac at the University of Tokyo”, Nucl. Inst. and Meth. A, 608 (2009) S36-S40
- [3] H. Masuda, et al., “Beam Measurement of X-band 11.424 GHz Linac for Compton Scattering X-ray Generation”, Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [4] Y. Taniguchi, et al., “Upgrade of X-band thermionic cathode RF gun for Compton scattering X-ray source” Nucl. Inst. and Meth. A, 608 (2009) S113-S115