

HIGH-VOLTAGE STABILITY REQUIREMENT OF A DC ELECTRON GUN FOR AN ERL LIGHT-SOURCE

Ryoji Nagai^{1(A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Hokuto Iijima^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Masaru Sawamura^{A)}, Nobuhiro Kikuzawa^{A)}, Eisuke Minehara^{B)}

^{A)}Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)}Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

A DC electron gun is employed for an electron source of an energy-recovery linac (ERL). The electron beam parameters are fluctuated due to the instability of a high-voltage power supply of the gun. The fluctuations of the electron beam parameters are estimated for the ERL light-source. In the result of the estimation, the bunch length of the electron beam is mainly fluctuated by the instability of the high-voltage power supply. For the bunch length fluctuation of 1% or less, the required high-voltage stability is less than 1×10^{-4} . The main part of the instability of the high-voltage is the ripple of the Cockcroft-Walton circuit. The compensation of the ripple utilizing an LC filter is proposed, and the required stability is easily achieved in the preliminary design of the power supply.

ERL放射光源用DC電子銃に必要とされる高電圧安定度

1. はじめに

原子力機構ERLグループでは次世代放射光源用加速器としてエネルギー回収型リニアック(ERL)の基礎研究を行っている^[1]。ERLの大きな特徴はリニアックの特徴を生かし、フェムト秒バンチ長、回折限界以下の低エミッタンスの電子ビームを生成出来る点にある。この電子ビームにより発生される放射光はフェムト秒、高コヒーレンスであり、これまでの放射光では実験が困難であった生物、化学分野のフェムト秒分解能での実験が期待されている。

ERLでは蓄積リングと異なり、電子ビームの性能は電子銃を含む入射器の性能に大きく左右される。電子ビームの時間ジッタや輝度に電子銃の高電圧電源の安定度が影響を及ぼすと考えられる。特に時間ジッタについてはフェムト秒分解能の実験の観点からも数10fs以下にする必要がある。ここでは直流高電圧電源としてCockcroft-Walton型の電源を前提として考えている。必要とされる電子ビームの特性を得るために許容される直流高電圧電源の変動の評価を行い、必要な安定度を明確にしておく必要がある。

そこで、電子銃から打ち出される電子ビームのエネルギー変動により放射光を出す部分の電子ビームの時間ジッタ、バンチ長、エミッタンス、エネルギーがどのような影響を受けるかの評価を、設計例の入射器^[2]を基にしてPARMELA^[3]により行った。

電源の不安定性にはドリフトとリップルがあるが、ドリフトについてはフィードバック回路により補償されるが、リップルについては何らかの回路がない限りCockcroft-Walton電源本体の回路パラメータで

決定される。大電流のCockcroft-Walton電源でリップルを十分に小さくするには非常に大きな静電容量が必要となり実現が困難になる。そこで、LCフィルタによるリップの除去を提案し、現在組立てを行っている光陰極の試験用電子銃の電源(250kV、50mA)で試験を行った。また、ERL放射光源の電子銃で使用される500kV、100mAのCockcroft-Walton電源についての簡単な回路パラメータの設計を行い必要な安定度が得られることを確認した。

2. 評価モデル

評価モデルとしては2005年の本学会での発表した設計例^[2]を採用した。このモデルは図1に示すように500kVのDC電子銃で光陰極により電子を生成しバンチャ、入射boosterで圧縮、加速された電子ビームを3-dipole合流器で回収ビームラインと合流するというものである。ただし、基となるパラメータについては7.7pCの電荷量で約70MeVまで加速した位置(9-cell×5台通過後)での輝度が最大となるようにシミュレーションによる最適化^[5]を行った。このときのPARMELAでの計算結果のバンチ長(rmsとFWHM)とエネルギーを図2に示す。電子ビームはbuncherで速度変調を受け入射器で緩やかに圧縮され、合流器で磁気圧縮され、さらに主加速器1台目でvelocity bunchingにより圧縮されている様子が分かる。

このパラメータを基にして電子銃からの出射のタイミングを変えた時の電子ビームの特性を計算し評価を行った。

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

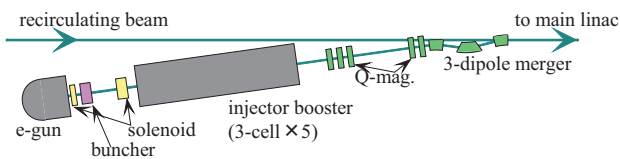


図 1 : 評価モデルとした入射器

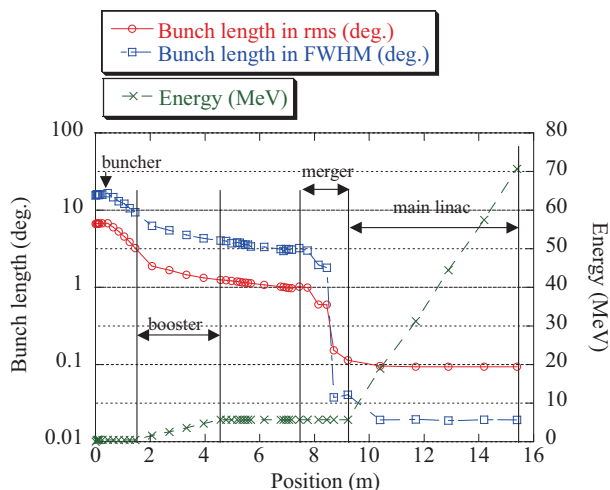


図 2 : 評価モデルについてのPARMELAの計算結果

3. 評価の結果

図 3 から図 5 に電子銃電源電圧の変動によるバンチ長およびエミッタンスの変化、バンチ到着時刻の変化、バンチエネルギーの変化の様子をそれぞれ示す。電源電圧が千分の一低下した時にはFWHMのバンチ長は50%も伸びるのに対して、到着時刻およびエネルギーの変化はそれぞれせいぜい40fs、15keV程度であることから電源電圧の変動はバンチ長に最も影響を及ぼすことが分かる。これは定性的には以下のように理解できる。電子バンチはバンチャなどで決まるエネルギー・時間空間の収束点へ収束されていく。入射の際のエネルギーおよび時間が電源電圧の変動によりわずかに変動したとしても、バンチ全体としては収束点へ収束されるためにバンチの到着時刻やエネルギーには大きな影響はない。一方バンチの形状については入射の際にエネルギー・時間がずれることで、レンズに対する物点がずれた場合と同じような状況であり、像、即ち位相空間でのバンチ形状が歪む(バンチ長が伸びる)結果となる。図 3 においてFWHMバンチ長の方がRMSバンチ長よりも強く影響を受け、その影響の受け方が異なることはこの傍証である。

図 3 からFWHMバンチ長の変動を1%以下にするために必要な電源の安定度は 1×10^{-4} であることが分かる。この時、RMSバンチ長とエミッタンスの変動も1%程度である。図 4 に示してある到着時刻はバンチのピーク位置とFWHMバンチ長内での平均である。電源電圧変動が 1×10^{-4} の時の到着時刻変動は5fs程度であり、全く問題ないことが分かる。図 5 に示してあるのはバンチ全体の平均エネルギーとFWHMバンチ長内の平均エネルギーである。FWHMバンチ

長内の平均エネルギーの変化はバンチ全体の平均エネルギーの変化に比べて小さくなっている。電源電圧の変動によりバンチの裾の部分広がるためである。

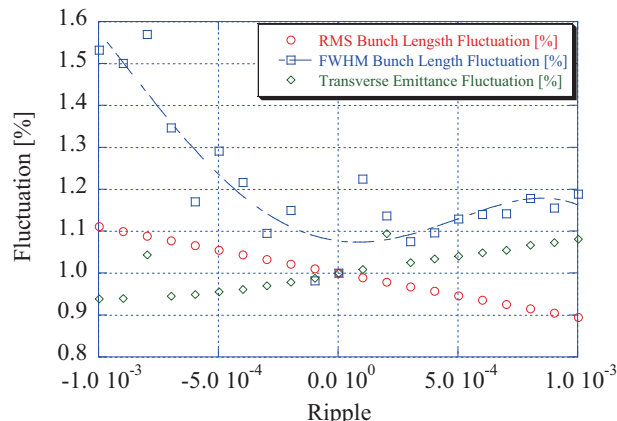


図 3 : バンチ長およびエミッタンスへの影響

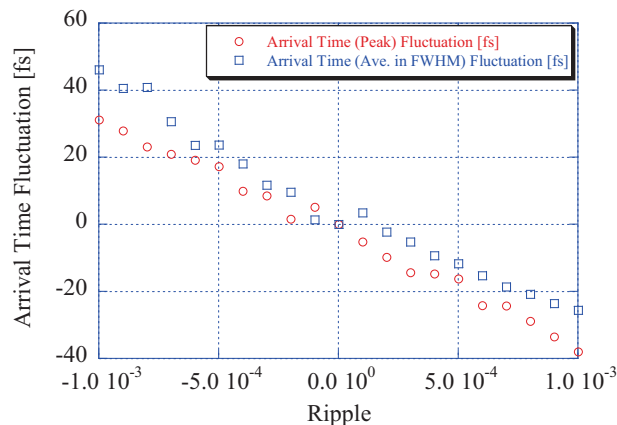


図 4 : バンチ到着時刻への影響

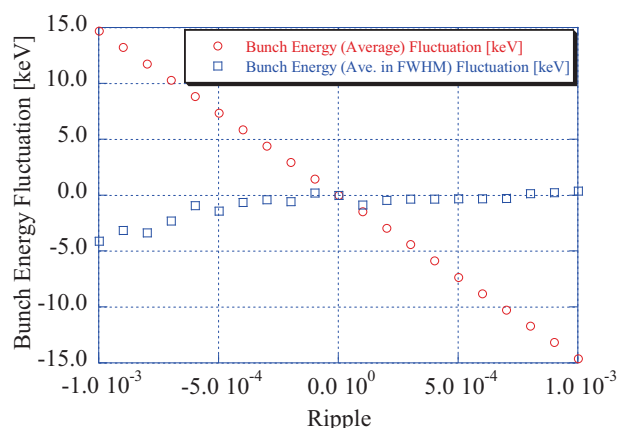


図 5 : バンチエネルギーへの影響

4. LCフィルタによるリップルの除去

光陰極直流電子銃の直流高電圧電源として対称型 Cockcroft-Walton 電源を採用している。この電源のリップルによる電圧の変動 δV は

$$\delta V = \frac{I}{2fC} \cdot n \quad [V]$$

で表される。ただし、 I は出力電流、 f は駆動周波数、 C はステージ当りの静電容量、 n はステージの段数である。従って、リップルを小さくするには①駆動周波数を上げる、②静電容量を大きくする、③ステージ段数を少なくするの3つが考えられる。しかし、①については駆動回路の素子(IGBT等)の制約から精々50kHzである。FETを多重にした駆動回路を用いれば100kHz程度まで上げられる可能性があるが大電力化がかなり難しいと思われる。②についてはCockcroft-Walton電源の面積に比例するので、電源本体、絶縁容器とも大きくなるので、精々100nFが限界であろう。③についてはコンデンサの耐電圧で決まるが、耐電圧を高くすると単位面積あたりの静電容量が小さくなってしまいうので、50kV程度が限界であると思われる。これらの値から500kV、100mAのCockcroft-Walton電源のリップルを計算すると $\delta V = 100\text{mA} / (2 \cdot 100\text{kHz} \cdot 100\text{nF}) \cdot 10 = 50\text{V}$ となる。即ち、実現可能性のかなり低いパラメータで評価しても、ようやく 1×10^{-4} の安定度である。従って、妥当な回路パラメータの基で 1×10^{-4} の安定度を確実に実現するには電源の出力部に何らかのフィルタ回路が必要である。そこで、LCフィルタによるリップルの低減を採用することとした。

LCフィルタによる変動の減衰比は

$$R = 1 / (4\pi^2 f^2 LC)$$

で表される。ただし、 f はリップルの周波数、 L はフィルタコイルのインダクタンス、 C はフィルタコンデンサの静電容量である。フィルタ自身での電力損失はなく、Cockcroft-Walton電源の駆動周波数を高くするとLCフィルタの減衰比は周波数の二乗で大きくなるので効率的にリップルを減衰できる。コイルは放電などで高い電圧が発生した場合に損傷する可能性があるのでサージアブゾーバで保護することとする。

比較のためにRCフィルタについて考えてみる。

RCフィルタの減衰比は

$$R = 1 / (2\pi f RC)$$

で表される。ただし、 R と C はそれぞれフィルタ抵抗とフィルタコンデンサの抵抗と静電容量である。この式から分かるようにRCフィルタでは周波数の一乗でしか減衰されず、抵抗で電力が消費されるので、抵抗値をあまり大きくできず、効果的にリップルを減衰することはできない。

現在、組立てを行っている光陰極試験用電子銃の250kV、50mAのCockcroft-Walton電源でのLCフィルタの効果について試験した。この電源の駆動周波数、

ステージあたりの静電容量、ステージ段数はそれぞれ、20kHz、8.4nF、6であるので、電源本体のリップルは $\delta V = 50\text{mA} / (2 \cdot 20\text{kHz} \cdot 8.4\text{nF}) \cdot 6 = 893\text{V}$ となる。LCフィルタのインダクタンスと静電容量はそれぞれ1.2H、1.4nFなので、リップルの減衰比は 4×10^{-2} であるのでリップルは約36Vになる。このCockcroft-Walton電源は絶縁ガス中で動作するように設計されているため、大気中で250kVまで印加することは出来ないで、出力電圧を100kVまで下げ、高周波トランスの駆動電圧を定格電圧との比で低くした状態でリップルの試験を行った。50mA負荷時のリップルの計測値は48Vp-pであり、ほぼ設計値どおりであった。

ERL放射光源のための実証器および実機における電子銃電源の仕様は500kV、100mAで考えている^[4,5]。そこで、この電源の回路パラメータについて検討する。駆動周波数はIGBTで駆動可能な40kHz、ステージあたりの静電容量は250kV試験機の2倍の16.8nF、1段あたりのコンデンサの耐電圧を40kV程度としてステージの段数は12、フィルタのインダクタンスと静電容量は1.2Hと1.4nFとしてリップルを計算する。電源本体のリップルは $\delta V = 100\text{mA} / (2 \cdot 40\text{kHz} \cdot 16.4\text{nF}) \cdot 12 = 915\text{V}$ 、フィルタの減衰比は 9.4×10^{-3} となるので、リップルは8.6V、安定度は 1.7×10^{-5} となる。このように、LCフィルタを採用することで、無理のない回路設計、コンパクトな電源で十分な安定度が得られることが分かる。

5. まとめ

PARMELAによってエネルギー回収型リニアックにおける電子銃電源電圧変動の影響の評価を行った。その結果、電源電圧変動が 1×10^{-4} 以下であればFWHMバンチ長の変動が1%以下であり、それ以外のパラメータの変動も十分に小さいことが分かった。

Cockcroft-Walton電源本体ではこの値まで電圧変動を小さくすることは難しいが、LCフィルタによりリップルを減衰させることで、無理のない回路設計、コンパクトな電源で必要な安定度が得られることが分かった。

参考文献

- [1] 永井良治、他、"原子力機構におけるERL開発の現状(2007)"、本論文集。
- [2] 羽島良一、他、Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2004) 447-449。
- [3] Parmela ver. 3.40; L. M. Young, LA-UR-96-1835。
- [4] 飯島北斗、他、"原子力機構における250kV-50mAフォトカソードDC電子銃開発の現状"、本論文集。
- [5] 河田洋、他、"ERL計画の現状"、本論文集。