

クライストロンドライブ系の位相安定化

横山 和枝^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、佐藤 和男^{B)}、早川 恭史^{B)}、松原 洋一^{B)}、
 中澤 裕之^{A)}、境 武志^{A)}、菅野 浩一^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、猪川 弘康^{A)}、中村 吉宏^{A)}、
 橋本 英子^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 啄哉^{A)}

^{A)} 日本大学大学院理工学研究科

^{B)} 日本大学原子力研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 物理実験 B 棟

概要

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) ^[1]では、自由電子レーザー (FEL) 光の安定化を目指して、電子線形加速器の性能改善を行っている。安定した FEL 発振のためには、安定な加速電子ビームの供給が確保されなければならない。当施設の加速器は、電子加速に使用している RF のパルス幅が 20 μ s と長いため、パルス内での位相変動の影響が、電子ビームのエネルギー変動として顕在化する。また、入射器の位相の変動は、電子ビームバンチの位相変動の要因であり、FEL の同期条件を崩すことになる。さらに、加速器運転時の RF 位相は、RF アンプの周辺温度に依存したパルス間の変動があることがわかった。そこで、加速 RF の位相を安定化するためのフィードフォワード式補償回路を作製した。この方法による位相変動および電子ビーム変動の改善結果について報告する。

1. はじめに

電子線形加速器は、DC 電子銃から引き出した電子を 2856MHz の RF で最大 125MeV まで加速する。加速 RF はクライストロン 2 台で、それぞれ電子ビーム入射部ユニットと電子ビーム加速ユニットに供給している。1 台の発振器で発生させた RF を 2 系統に分けて、独立した RF アンプでクライストロンをドライブしている。発振器の RF を基準にしてアンプの出力位相を検出し^[2]、長時間の測定を行なった。この結果を図 1 に示す。位相の測定には、ダブル・バランスド・ミキサー (DBM) を用いた。アンプの置かれている部屋は、空調機で室温を $\pm 1^\circ\text{C}$ にコントロールされている。この図 1-(a)、(b)から、アンプの周辺温度に依存して、パルス間の位相変動がおきていることがわかる。室温 1°C の変化に対して、1 号機 RF 系の位相変動は、アンプ出力では 2.5° 、クライストロン出力では 3.0° である。2 号機 RF 系では各々 3.0° 、及び 3.5° である。また、加速 RF は RF アンプの前段で 20 μ s のパルスにしているが、パルス内でも位相変動が生じている。この位相変動は、1 号機 RF 系のアンプ出力では 0.6° 、クライストロン出力では 0.9° である (図 3)。2 号機 RF 系では、各々 8.0° 、及

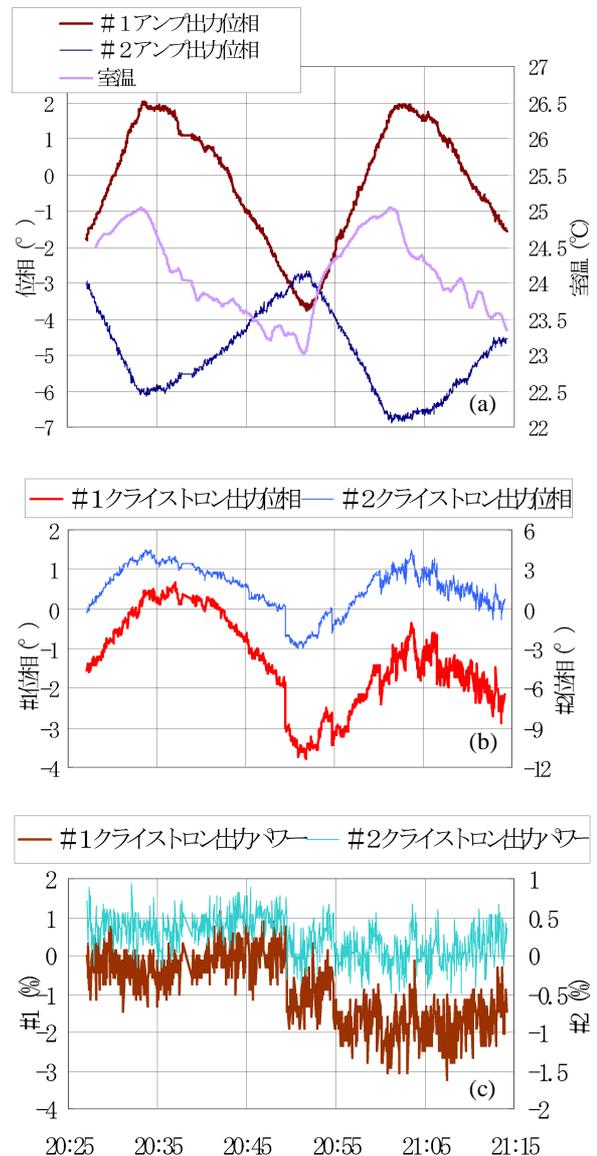


図 1 : 室温と位相補償前の RF の変動
 (a) アンプ出力位相、(b) クライストロン出力位相
 (c) クライストロン出力パワー
 ※(a)、(b)、(c)ともに横軸は共通時刻。

¹ E-mail: yokoyama@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

び 10.6° である (図4)。また、図1-(c)で示したように、クライストロン出力パワーも変動している。室温 1°C の変化に対して、1号機クライストロンでは2%、2号機では1%のパワー変動があるように見える。

2. 位相補償回路

位相補償システムの概略を図2に示す。ミキサーからの検出信号は、位相補償ユニットに入力される。この位相検出電圧 (ϕ_m) がゼロになるように、位相補償ユニットでは、位相コントロール信号 (PHASE CONT) を高速 ϕ/A に出力する。ゼロからずれた位相量から、次のパルスに対する補償信号を作るフィードフォワード式の制御である。このとき、パルス内での位相変動は、ファンクションジェネレータで作成した補正関数をこの制御信号に重ねることによって補正する。制御信号の例を図3に示す。高速 ϕ/A はパルス電圧で制御する仕様であるため、この図のように、パルス電圧として出力した波形に、ファンクションジェネレータの信号を乗せるように回路を構成した。

パルス内での位相変動は、アンプよりもクライストロンの方が大きい。1号機 RF 系では、アンプのパルス内での位相変動は 0.6° で、クライストロンでは 1° ある。そのため、クライストロンの出力を位相補償するようにした。2号機 RF 系は、現状では RF 系ドライブの構成がクライストロンの入力側で全体の位相を調整するようになっているので、クライストロンで位相補償を行うと2号機の位相が調整できなくなってしまう。このため、アンプの出力を位相補償するようにした。

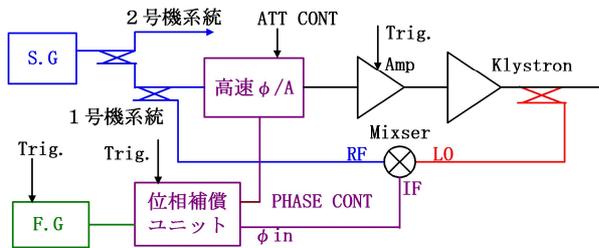


図2：位相補償システムのブロック図

3. 結果

3.1 パルス内での位相変動と電子ビーム

1号機 RF 系の位相補償は、クライストロン出力位相で行った。パルス内での位相変動は、パルスの立ち上がりを除けば、 0.9° から 0.5° 以下に改善された (図3)。2号機 RF 系は、アンプ出力位相で補償した。パルス内での位相変動は、 8.0° から 0.7° 以下に改善された (図4)。このときのクライストロン出力位相は、パルス内で 10.6° から 1.5° 程度に改善されている。位相補償したときの電子ビーム電流波形を図5に示す。電子銃エミッションは、 300mA で加速器出口では 150mA である。このときの電子ビームエネルギーは 85MeV である。また、加速器下流でア

ナライザーシステム (エネルギー幅 1%) を経由し、FEL システムを通過した電子ビームをファラデーカップで検出した。この電子ビームは 100mA である。パルス幅 $20\mu\text{s}$ で加速ビームの3分の2の電子ビーム電流を確保できた。

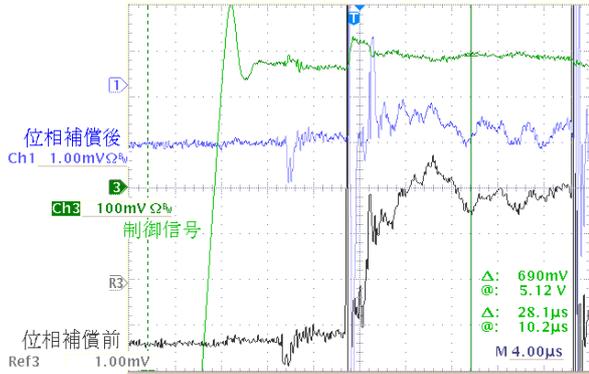


図3：1号機 RF 系

位相補償前後のクライストロン出力位相波形 ($0.46^\circ/\text{div}$) と位相補償ユニット (PHASE CONT) から出力されている制御信号波形。

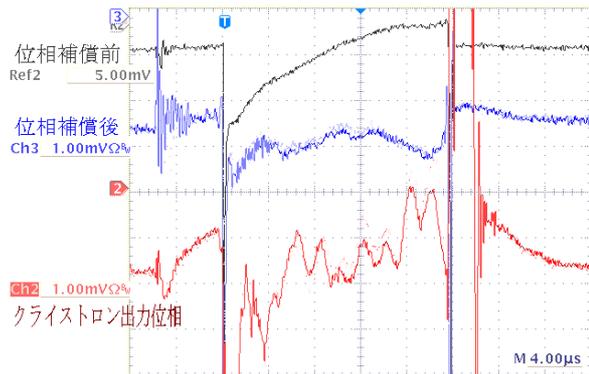


図4：2号機 RF 系

位相補償前後のアンプの出力位相波形 ($0.8^\circ/\text{div}$) とアンプの出力位相で補償したときのクライストロン出力位相波形 ($0.53^\circ/\text{div}$)。

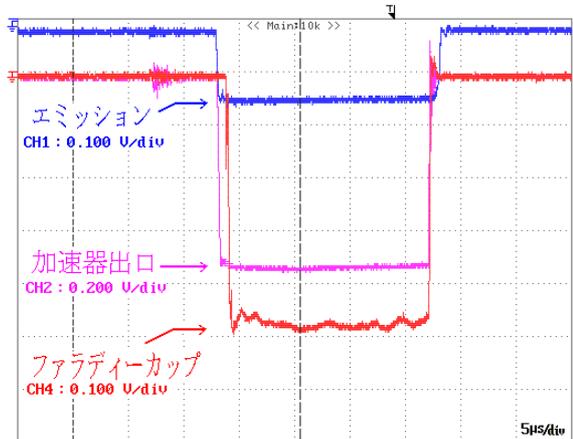


図5：位相補償後のビーム波形

[縦軸] CH1: $200\text{mA}/\text{div}$ 、CH2: $40\text{mA}/\text{div}$ 、CH3: $20\text{mA}/\text{div}$ 、[横軸] $4\mu\text{s}/\text{div}$

3.2 パルス間での位相変動と電子ビーム

位相補償したときのパルス間でのクライストロン出力位相変動と電子ビームの変動を図6-(a)、(b)に示す。パルス間での位相変動は、1号機RF系では 3.0° から 1° に、2号機RF系では 3.5° から 1.5° に改善された。位相補償する前の電子ビームは、パルス幅 $20\mu\text{s}$ で加速ビームの $\frac{3}{2}$ の電子ビームを維持し続けるのは困難であった。しかし、位相補償することで、容易に持続可能となった。

4. 考察

加速ビームの安定化には位相を安定にすることが必要である。アンプの周辺温度を一定にすれば、温度変化に追従する位相変動は取り除くことができるが、恒温槽を用いずにフィードフォワード式の位相補償回路でも補償することは可能である。位相補償回路で問題となるのはノイズである。ノイズの発生源は、主にクライストロンのパルスモジュレータである。現在は、十分なノイズ対策をしていないため、回路がノイズを拾って誤動作する可能性がある。ノイズの影響を減らすような回路素子の組み方やケーブルの引き回しを考慮すれば、精度の良い制御ができるであろう。

今回の測定で電子ビームの不安定な原因が加速RF位相以外にもあることがわかった。測定中の電源変動を図6-(c)に示す。電源変動^[3]は21時以降に顕著に現れる。これに連動して、クライストロンの位相及びパワーの変動も大きくなっていることが図1、図6からわかる。特に、パワーの変動は、周辺温度の影響よりも、電源変動による影響が大きいと思われる。また、図6-(a)に示すように、電子銃エミッションも不安定である。加速電子ビームの大きな跳びは、電子銃エミッションが急激に変化することに起因している。これは、電子銃で放電が起こっていることが観測され、電子銃の構造^[4]に問題があることがわかった。また、電子銃エミッションは徐々に変化している。300mAのエミッションが1%変化すると、加速器出口での加速ビームのエネルギーは0.3%程度変化することが計算から予想される。

5. 今後の課題

安定なFEL発振のための加速ビームにするには、さらにパルス内でのバンチ長が重要である。電子ビームバンチは、入射部のバンチャーで形成されるので、バンチャーでの位相調整は重要な課題である。また、位相補償回路のノイズ対策、電子銃エミッションの安定化、電源変動に伴う位相変動の対処等を行わなければならない。

参考文献

[1] 佐藤 勇、他、“日本大学電子線利用研究施設の高度化と自由電子レーザーについて” Proc. of this Meeting.
 [2] K.Yokoyama, et al., “RF Phase Drift Compensation with a Function Generator”. Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting, in Japan, Himeji, July 12-14, 2000.

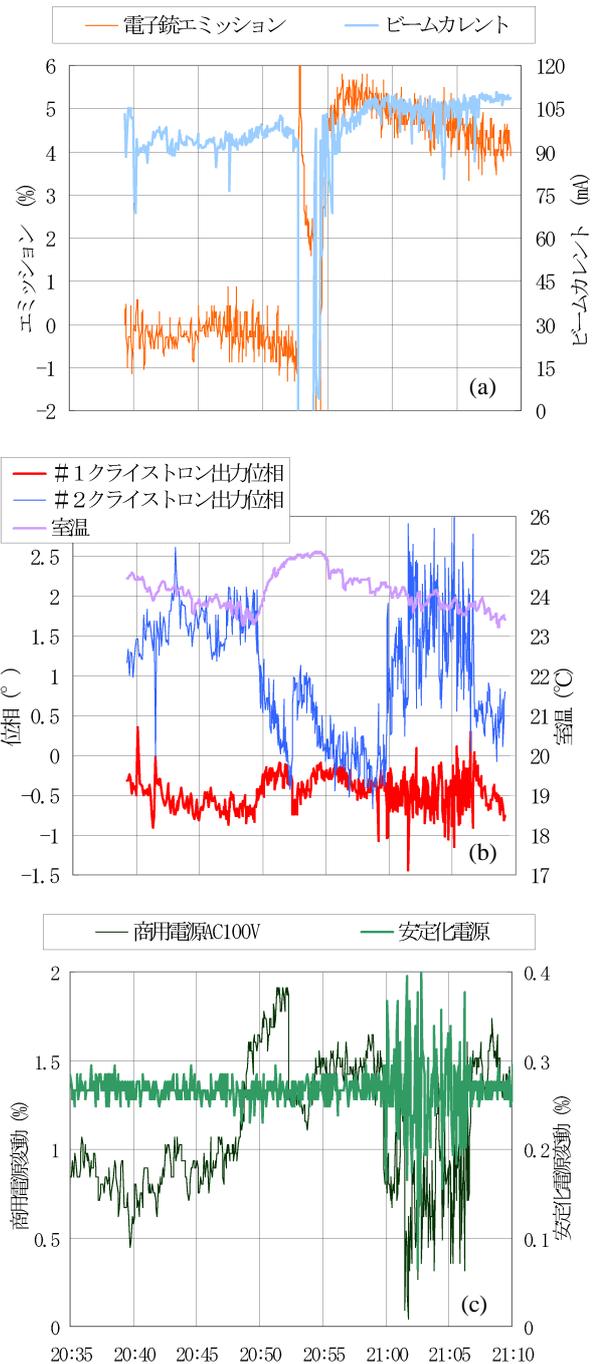


図6：位相補償の効果

- (a) 電子銃エミッションとFELシステムを通過した電子ビーム電流。
 - (b) 室温とクライストロン出力位相。
 - (c) 商用電源とRF系に用いているAVR変動。
- ※(a)、(b)、(c)ともに横軸は共通時刻。

[3] 早川 建、他、“商用電源変動とビーム不安定性” Proc. of this Meeting.
 [4] 菅野 浩一、他、“電子銃の低エミッタンス化による入射部の高度化” Proc. of this Meeting.