

LEBRA クライストロンの位相変動測定

横山 和枝^{1,A)}、佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中 俊成^{A)}、早川 恭史^{A)}、
境 武志^{B)}、菅野 浩一^{B)}、石渡 謙一郎^{B)}、中尾 圭佐^{B)}

^{A)} 日本大学量子科学研究所

^{B)} 日本大学大学院理工学研究科

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 電子線利用研究施設

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) 光の利用実験のために、電子リニアックの性能改善を行っている。光利用を目的とした FEL に於いては、安定した発振が望ましい。リニアックに於いても、安定な加速電子ビームが要求される。そのためには、加速高周波を供給するクライストロン出力の安定化が特に重要である。クライストロンの位相や振幅の変動は、ビームのエネルギー変動の要因になるからである。クライストロンの位相や振幅の変動には、クライストロン入力に用いる RF アンプの変動以外の要因も考えられる。本件は、クライストロン周辺環境温度と位相との相関を調べた結果について報告する。

1. はじめに

LEBRA の RF 系に於いては、クライストロン RF 出力の位相変動は、主にドライブ系の 800W 出力 RF アンプの位相変動に因ることが報告された^[2,3]。そこで、800W 出力 RF アンプの出力位相を関数発生器及びフィードバック方式を使用して平坦且つ安定にしてクライストロン入力に用いることによって、クライストロンで生じる位相変動を調べた。実際には、RF アンプ出力位相が平坦且つ安定であっても、クライストロンの出力位相には変動が見られる。LEBRA では、位相がパルス内フラットトップにおいて $\pm 0.5^\circ$ 以内の部分で $20\mu\text{s}$ 以上取り出せる 400W RF アンプ (日本高周波株式会社製) を導入する予定であるので、クライストロン RF 出力位相変動に及ぼす RF アンプに依存しない他の要因を明らかにする必要があると思われる。

2. 位相測定

位相測定系の概略を図 1 に示す。位相測定には、ダブル・バランスド・ミキサー (DBM) を用いた。位相のリファレンスには、マスターである 2856MHz 発振器の RF 源を用いた。クライストロンモジュレーターから発生するノイズの影響を減らすために、位相を検出した直後に信号を増幅してから、制御室のオシロスコープに接続してデータを取得している。このアンプを使用したときには、位相と DBM での

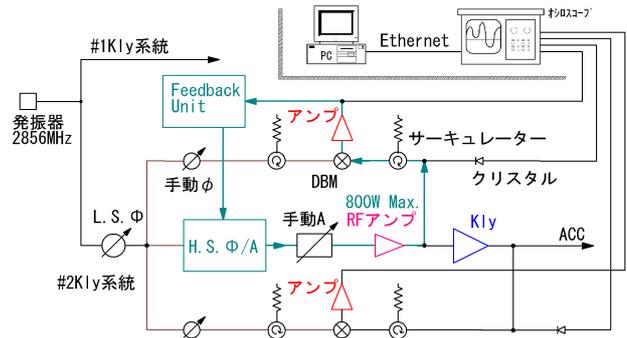


図 1 : RF アンプ及びクライストロン RF 出力の位相と振幅測定のセットアップ。

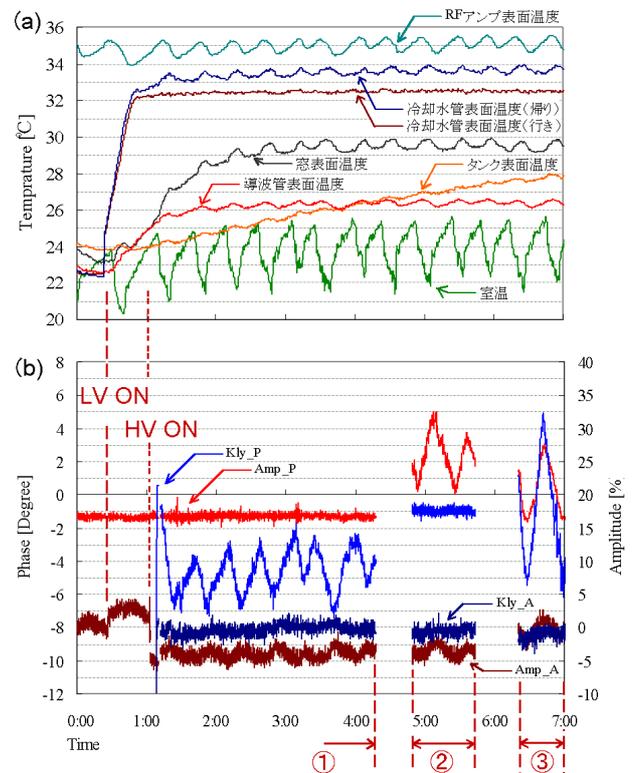


図 2 : 温度と位相及び振幅の日変化。

(a) 温度変化。(b) RF 系の位相と振幅。

RF アンプ出力位相をフィードバック補償した場合。クライストロン出力位相をフィードバック補償した場合。フィードバック補償しない場合。

¹ E-mail: k_yokoyama@lebra.nihon-u.ac.jp

検出電圧は、RF アンプ出力では $0.05^\circ/\text{mV}$ 、クライストロン出力では $0.04^\circ/\text{mV}$ に相当する。同時に、室温と RF アンプ、クライストロン窓、冷却水、導波管、クライストロンパルス伝送タンクの表面温度をモニターした。

3. 測定結果

3.1 周辺環境温度の日変化

図 2 に各々の(a)温度と(b)位相及び振幅の日変化を示す。この結果から、低電圧系統 (LV) を通電してからこれらの温度が一定の周期で変化ようになるまでには約 2 時間程度を要することがわかる。この周期は、約 30 分である。クライストロンモジュレータ室は、空調機 (定速式) で室温を $\pm 1^\circ\text{C}$ にしているが、クライストロン周辺で測定された室温は設定値よりも高めに観測されている。また、クライストロンパルス伝送タンクの表面温度は 7 時間以上経っても上昇し続けているが、これは熱容量が大きいためと思われる。

3.2 クライストロンの印加電圧と位相変動

RF アンプ出力位相にフィードバック補償をかけ、変動を $\pm 0.2^\circ$ におさえた状態で、RF 系の位相と振幅を測定した。この結果を図 2 (b) の 期間に示す。高電圧 (HV) のかけ始めでは、クライストロンの印加電圧は低く設定しており、 $15.0 (\times 12, \text{以下省略}) \text{ kV}$ である。その後、徐々に 19.5 kV まで上げていき、約 18 MW 出力にしてビーム加速に使用している。図 3 に RF アンプ出力を 600 W にして、クライストロン印加電圧を 16.0 kV から 20.5 kV まで変えたときのクライストロン出力位相の変化を示す。この測定は、周辺温度が十分に安定になってから行った。実線は、ドリフト管長約 405 mm 、周波数 2856 MHz とした場合の計算値である。印加電圧変化 0.5 kV に対して位相は約 13° 変化していることがわかる。パルス電圧の安定度は 0.3% であるので、印加電圧が 19.5 kV であれば 1.5° の位相変動が予想される^[4]。これは、温度に依存しない変動である。

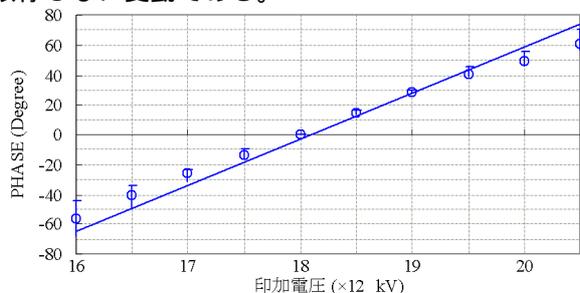


図 3 : クライストロン印加電圧と位相の変化。実線は計算値。

3.3 RF アンプ出力と位相変動

周辺温度が一定の周期で変動するようになってからのクライストロンの位相変動は、RF アンプの出力

変動の傾向に近い。この変動は、室温に依存して RF アンプ周辺温度が変化することに起因すると思われる。図 4 に RF アンプ出力とクライストロン出力位相の変化を示す。測定時の印加電圧は 19.5 kV である。このグラフから、RF アンプ出力 100 W の変動に対して、位相は 3.5° 変化することがわかる。図 2 (b) の期間では RF アンプ出力は 3% 程度の変動をしているので、位相変動は 0.6° に見積もられる。これは室温 1°C あたり 0.2° の位相変動に相当する。

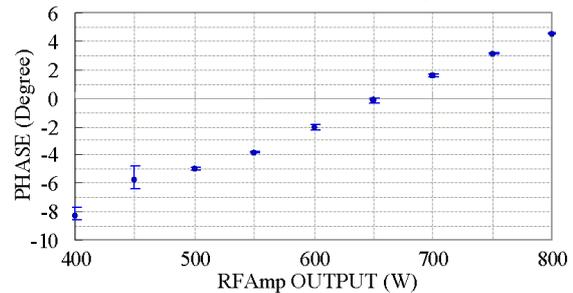


図 4 : RF アンプ出力とクライストロン位相の変化。

3.4 クライストロンの位相変動

図 2 中の 期間はフィードバック補償をしない場合である。フィードバック補償をしない場合、室温変化に対して、RF 系の位相変動は、RF アンプ出力では $1.3^\circ/$ 、クライストロン出力では $2.9^\circ/$ である。さらに、測定時の RF アンプ出力変動 0.5% を考慮すると、位相変動は $2.5^\circ/$ となるから、クライストロン単独では $1.2^\circ/$ の位相変動を生じていると思われる。一方、RF アンプ出力位相にフィードバック補償をして、温度に依存する RF アンプの位相変化を取り除くと、クライストロンの位相変動は、 $1.1^\circ/$ となる (期間)。同様に RF アンプ出力変動 0.3% を考慮すると、クライストロンで生じている位相変動は $0.9^\circ/$ となる。したがって、クライストロンで生じている位相変動の値として、 と の両期間において矛盾しない。

3.5 クライストロン窓の温度と位相変動

図 5 にパルス幅を変えてクライストロン窓の温度を変えたときのクライストロン出力位相の変化を示す。これは、RF アンプ出力位相にフィードバック補償をして、それぞれ、温度変化の 1 周期分を測定して算出した。この図から、クライストロン窓の温度変化は位相変化には影響していないと思われる。

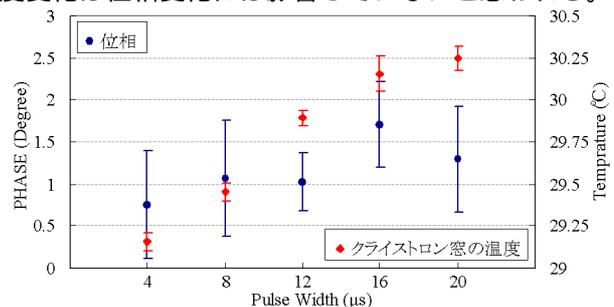


図 5 : パルス幅とクライストロン窓の温度及び位相の変化。

3.6 周辺環境温度と位相変動

その他のクライストロン位相変動の要因を表 1 にまとめる。これらの変動は小さいので、RF アンプの位相変動に依存しないクライストロンの位相変動を説明できる要因ではないと思われる。

表 1. 位相変動の諸要因

要因	変化率 (%)	温度変 化()	位相変 動(°)
冷却水温度変化 ^[5]	0.6	±0.1	0.12
ケーブル (10m)	10 ⁻²	3.5	0.035
ドリフト管長の収縮 ^[5]	10 ⁻⁴	-	-

3.7 パルス内の位相変動

RF が長パルスの場合、半導体増幅器での半導体ジャンクションの温度の上昇は無視できず、それによるパルス内の位相変動は大きい。パルス内での位相変動の測定では、RF アンプ出力よりもクライストロン出力の方が大きく観測されている^[2]。図 6 に、パルス内の位相変動波形を示す。RF アンプのパルス内位相変動は±0.6° (Ref2)で、クライストロンでは±1.5° (Ref4)ある。関数発生器で RF アンプ出力位相を補償して±0.4° (Ch1)にした場合、クライストロンの出力位相は±1.3° (Ch3)になる。RF アンプで除去された位相変動の±0.2°は、クライストロン出力でも同じように除去されている。この補償の結果から、RF アンプの位相変動が直接起因していないクライストロン位相変動が、±0.9°あることがわかる。

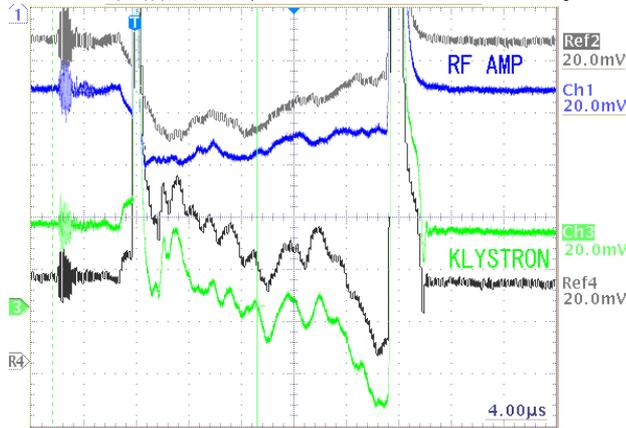


図 6 : パルス内の位相波形。Ch1、Ref1 : 0.05° /mV、Ch3、Ref4 : 0.04° /mV。

3.8 パルス内での長時間の位相変動

図 7 にクライストロンの印加電圧を 19.5kV にしてから、30 分ごとに記録したパルス内のクライストロン出力位相波形を示す。これは、クライストロン出力位相にフィードバック補償をして測定した。パルス内の位相波形は、ほぼ保存されているように見えるが、パルスの後ろの部分はやや変化しているように見える。関数発生器を用いてのパルス内の位相変動補償では、パルスの先頭の 2μs を除けば平坦部は±0.3°である。しかし、pulse-to-pulse では位相の形がパルス内でも変化していることが観測されている。

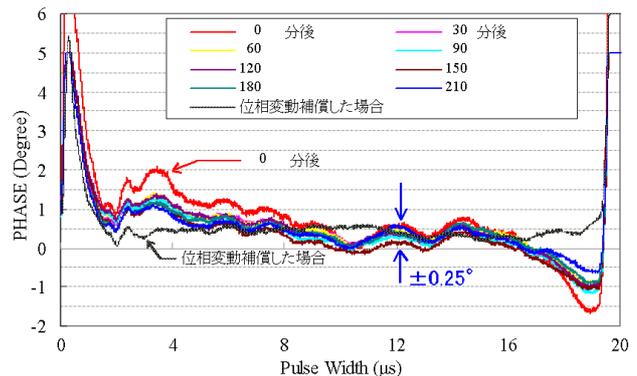


図 7 : 30 分ごとに測定したパルス内位相波形と位相変動補償した場合の位相波形。

4 . 考察

以上の結果から、クライストロンで生じる位相変動は 0.9°/ と見積もることができる。クライストロン出力のこの位相変動の要因は明らかでない。一方、パルス内でのクライストロンで生じる位相変動は±0.9°である。この変動の原因としては、PFN 調整があげられるが、PFN 調整によって位相をどの程度まで平坦にできるかは、今のところは明らかでない。

5 . まとめ

クライストロンで生じる位相変動が見積もられたが、今回、この原因の特定はできなかった。クライストロンの位相変動補償はビームの安定化には必要不可欠であり、今回の位相測定結果から、温度変化が主因と考えられる長時間のクライストロン出力位相変動は、フィードバック補償をすることで±0.2°に制御でき(図 2 期間)、パルス内の位相変動はフィードフォワード的に関数発生器で平坦部を±0.3°に補償可能であることが明らかになった。しかし、現状ではこの方法では除去できないパルス間の位相変動^[6]や電源変動^[4]による不安定性があり、加速ビームの安定性は充分でない。

参考文献

- [1] 佐藤 勇、他., "日本大学電子線利用研究施設の現状と研究計画" Proc. of this Meeting.
- [2] 横山 和枝、他., "RF Phase Drift Compensation with a Function Generator", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.108, 2000.
URL: http://www-linac.kek.jp/mirror/www.spring8.or.jp/JA/PANESÉ/conference/li-me00/proc_index.html
- [3] 横山 和枝、他., "クライストロンドライブ系の位相安定化", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.231, 2001.
URL: <http://conference.kek.jp/lam26/PosterPr.htm#L5>
- [4] 早川 建、他., "商用電源変動とビーム不安定性", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.285, 2001.
URL: <http://conference.kek.jp/lam26/PosterPr1.htm#P3>
- [5] K.Nakao. et al., "PHASE VARIATION OF HIGH POWER KLYSTRON AT KEKB LINAC", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, p.137, 1997.
URL: <http://conference.kek.jp/lam26/PosterPr1.htm#P3>
- [6] 境 武志、他., "FEL 用 S バンドロングパルスクライストロンの動作安定化テスト" Proc. of this Meeting.