

[P8-19]

Phase Variation of 60-kW Driver Klystron at KEKB 8GeV Linac

T. Matsumoto, S. Michizono, K. Nakao, S. Fukuda and S. Anami

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

60-kW driver klystrons(sub-booster klystrons) have been developed in order to feed the drive power to eight high-power klystrons per sector for KEKB. Phase stability of the output power of the driver klystron plays an important role to the stability of the beam energy of the linac. The phase variation of the output power was measured by varying the cooling water temperature, an input power, a klystron cathode voltage and a klystron cathode power. We found the temperature regulation of the cooling water of the driver klystron was more important than that of the high-power klystron to obtain the phase stability. We found the perveance variation of klystron was correlated to the phase variation. Also we found the warming-up time of more than a hour was necessary for the stability of perveance.

60kW ドライバクライストロンの位相変動測定

はじめに

KEKB 計画[1]において電子-陽電子入射器では、50MW クライストロンに SLED を併用して電子ビームを 8GeV まで加速する。この際、ビームとrfのタイミングの関係から、上流に置かれた 1 本のドライバクライストロンで 8 本の大電力クライストロンを励振させる必要がある[2]。このために 60kW ドライバクライストロン(周波数 2856MHz、設計マイクロパービアンスは 2.0 ± 0.05 、先頭rf電力 60kW 以上、rfパルス幅 $4 \mu s$ 、繰り返し $2 \times 50pps$)を KEK で設計・開発した[3]。60kW という出力は、ドライブライン及びクライストロン入力回路(1ΦA)での減衰を考慮したものである。

マイクロ波源(特にその位相)の安定は、電子-陽電子入射器の安定な動作にとって重要なものである。実際多くの電子-陽電子入射器では、ビームのエネルギー幅を小さくし、エネルギー変動を最小限にするためにクライストロンの位相変動は $0.6 \sim 0.8$ 度以下を目指している。ドライバクライストロンの場合、その位相変動が大電力クライストロンへと伝播していくため細心の注意が必要になる。

いままでにダブルバランスドミキサ(DBM)を用いた位相検出器を使ってドライバクライストロンの調整を行ってきた[4]。位相検出器を用いた調整は、寄生発振や出力飽和点近くでの位相の不安定を取り除くのに非常に有効であった。また、大電力クライストロンについても位相検出器を用いて冷却水温度や印加電圧と位相の相関について測定を行ってきた[5]。

今回は位相検出器を用いて、幾つかのパラメータを変化させ、その時のドライバクライストロンの位相変動を測定した。

位相測定

位相測定を行ったテストベンチを図1に示す。信号発生器

(SG)からの 2856MHz の連続波は 2 分割されて、一方は位相検出器の参照波となる。他方はrf変調器に送られ、入力パルス信号(幅: $4 \mu s$)になる。なお、このrf変調器は入力パルス信号の途中(立ち上がり後 $2.8 \mu s$)で位相反転をした SLED 用の信号を出力する。

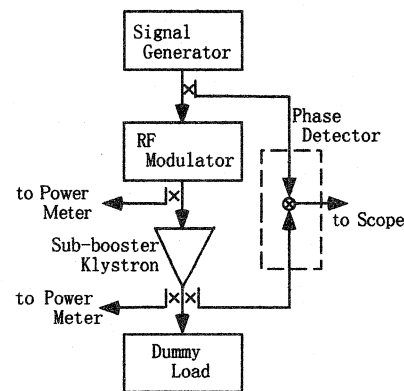


図1: サブブースタクライストロンテストベンチ

クライストロンからの出力は、39D 同軸管の無反射終端の直前に取り付けられた方向性結合器からの出力をさらに方向性結合器で分割し、一方を出力電力の観測用とし、他方を位相検出器への信号とする。

位相測定には、DBM の 0 点出力付近の変動を用いる。DBM には、参照波からの信号をトロンボーン型同軸移相器にて位相を可変としたものと、出力からの信号を入力する。これら 2 つの波形の位相差に相当する信号が DBM から出力され、これをオシロスコープ(TEK TDS540A)で観測する。さらにオシロスコープの波形データは GP-IB 経由で HP-VEE により PC に取込まれ、データ取得を行った。これを用いて、ヒータ通電

後の位相の時間変動や、印加電圧、冷却水温度、rf入力の変化に伴う位相の変動の測定をした。

測定結果

1) クライストロンの位相の安定

クライストロンのヒータに通電後のマイクロパービアンズと位相の時間変化を図2に示す。

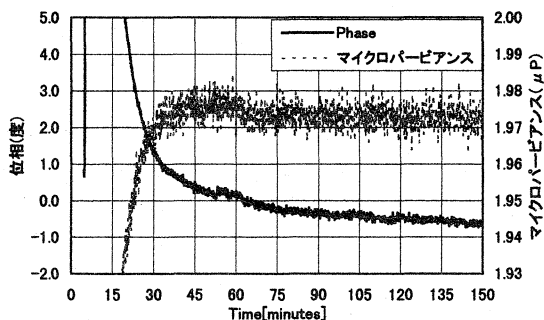


図2: ヒータオンからの位相とマイクロパービアンズの時間変化

クライストロンへの高電圧の印加は、ヒータ通電の5分後に行った。測定条件は、印加電圧が24.6kV、rf入力が120mW、rf出力は50kWであった。なお、位相の進む方向を正の方向と定義する。以後の図についても、この表記に従っている。

図2でマイクロパービアンズは、データ取得時のパルス電流とパルス電圧により算出した。マイクロパービアンズはヒータ通電後、約1時間で安定になってきている。この間、大きく位相が変化しているのがわかる。マイクロパービアンズと位相の関係については、後程グラフに示す。マイクロパービアンズが安定になった(ヒータ通電の約1時間)後も1時間半でさらに約0.5度の位相が変動しているが、この変動の原因については、今のところ不明である。

大電力クライストロンの場合、ヒータ通電後約2時間に渡り位相の変動がみられた[5]。ドライバクライストロンの場合にも同様であり、0.5度以下の位相安定度を保証するには、通電後十分な時間(2時間以上)が必要なことがわかる。

2) クライストロンの冷却水温度と位相

クライストロンの冷却水温度の時間変化と冷却水温度と位相の相関図を図3に示す。印加電圧、rf入力及び集束電磁石電流値等のパラメータは上記と同じ値である。

図3より冷却水の温度変化に対して、位相変化の応答が速い(数分のオーダー)ことがわかる。また冷却水の温度変化に対する位相の変化は約2度/℃であった。以前に調べた大電力クライストロンの場合、変化率は約0.8度/℃[5]であり、ドライバクライストロンは大電力クライストロンと比べて、水温に敏感である。

クライストロンギャラリで水温は $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 程度に設定されている。しかし、メンテナンス等での停止後に立ち上げた場合、

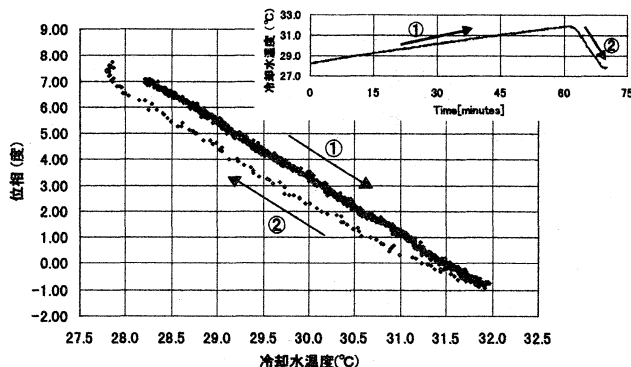


図3: 冷却水温度と位相の時間変化

最大で2℃、約1時間にわたり水温が変動する。ラインアップの安定な動作のためには、水温が安定してからビーム運転を行ったほうが良いことが分かる。また、0.5度以内に位相を安定させるためには、冷却水の水温変動を0.25℃以内に管理しなければならない。

3) クライストロンの入力RFと位相

図4にクライストロンへのrf入力とrf出力及び位相変化の関係を示す。

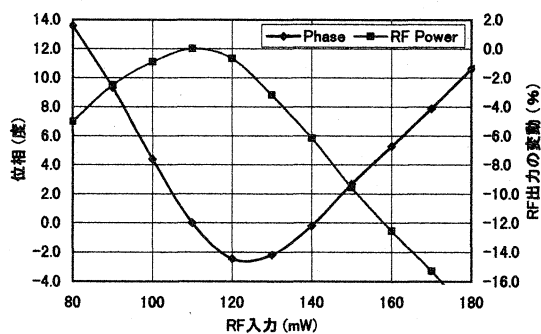


図4: rf入力とrf出力と位相の変化

(rf入力110mWのところをrf出力、位相の基準とする)

測定時の印加電圧は24.6kVであった。rf出力の飽和点付近に位相変化の極小となる場所があり、rf入力をそこからずらした場合には、位相が進んでいくことがわかる。また印加電圧を変えた場合にも、rf出力の飽和点近くに位相変化の極小点があるのが見られた。飽和点付近での1%のrf入力変動に対して、約0.3度の位相変動であった。

大電力クライストロンの場合、飽和点でも位相が滑らかに変動していた[5]が、飽和点付近での位相変化について、さらに考察する必要がある。

4) クライストロンの印加電圧と位相

クライストロンの印加電圧と位相の関係を図5に示す。rf入力は、80mWから200mWまで30mWごとに変化させてある。

印加電圧の変化によりクライストロン内の電子ビームの速度が変化し、出力空洞への到達時間が変化することが、位相変

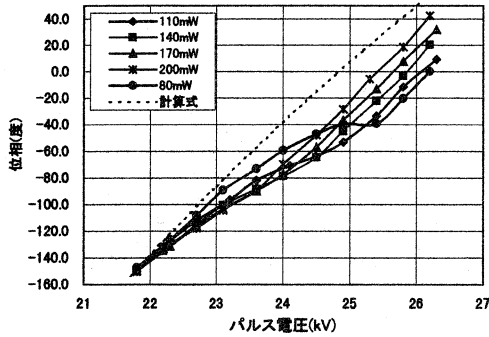


図5: クライストロンの印加電圧と位相の変化 (点線は計算値)

動の原因として考えられる。破線は、ドリフト管長 200mm、周波数 2856MHz としたときの計算値(約 10 度/ $(\Delta V/V(\%))$)である。大電力クライストロンの場合は、約 4.2 度/ $(\Delta V/V(\%))$ である[5]。測定結果は、位相変化の傾きが rf 入力によって様々なふるまいをしており、電圧の変化に対してかならずしも一定ではなく、電圧変化以外に位相変化に寄与するものがあることを示している。また図 4 から飽和点付近で位相変化が極小になっているが、図 5 より印加電圧を上げると飽和点になる rf 入力が増少していくことが分かる。このことはクライストロンの調整で経験的に知られていたことである。

使用条件を考慮すると、モジュレータ電源による印加電圧パルス内のサグは約 0.05% であるので位相変化は約 0.5 度である。また高圧印加トリガーの時間ジッターが周期の半分の場合、電圧変動は 0.1%、つまり位相変化は約 1 度である。

5) クライストロンのヒーター電力と位相

図 2 より、マイクロパービアンスの変化と位相の変化の間に相関がありそうなのがわかる。次にヒーター電力を変えることにより、マイクロパービアンスを変えて位相変動との関係を測定した。その結果を図 6 に示す。

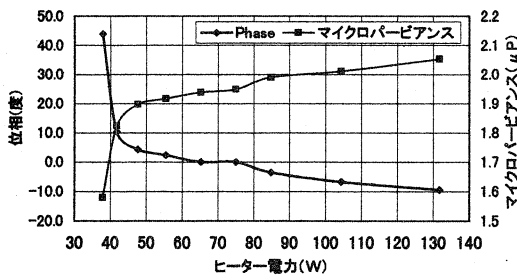


図6: ヒーター電力と位相及びマイクロパービアンスの変化

パービアンスと位相変動の相関をとったものを図 7 に示す。いままでにクライストロンへの印加電圧の変動による位相変動ということについては考慮されてきたが、パービアンス(パルス電流)の変化による位相変化については、言及されてこなかった。飽和点付近では 1% のパービアンス変動で、約 3.5 度の位相変化であった。

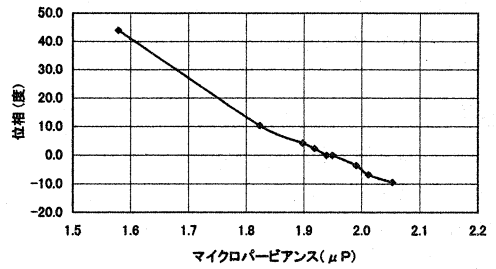


図7: マイクロパービアンスと位相の相関図

まとめ

マイクロ波源(特にその位相)の安定にとって、ドライバークライストロンは、その位相変動が大電力クライストロンへと伝播していくため、細心の注意が必要である。今回の測定によりヒータ通電後クライストロンの位相が安定するまでには、大電力クライストロンの場合と同程度の時間(約 2 時間以上)が必要であった。またクライストロンの冷却水の温度変動や印加電圧の変動に対する位相変化は、大電力クライストロンでの場合と比べて約 2 倍の敏感さを持っていた。ドライバークライストロンの安定な動作のためには、大電力クライストロンでの場合よりもさらに厳しいパラメータの管理が必要である。

rf 入力の変化に対して、位相変化は飽和点付近で極値を持っていた。このことは飽和点に設定すれば、rf 入力の変動に対して位相は安定であることを示す。また印加電圧と位相の変化を見ることにより、電圧変動の他に位相変化を及ぼすものがあること、また印加電圧が上がれば飽和点になる rf 入力が増少する、という経験的に知られていたことを今回の測定により確認した。

パービアンスの変動、つまりクライストロンのパルス電流が、位相の変動と相関していることが確認できた。このことにより、定期的にクライストロンのパービアンスを測定し、減少していた場合、ヒーター電力を上げてパービアンスを上げていけば、電子一陽電子加速器の安定な運転に寄与することがわかる。

参考文献

- [1] KEK B-factory Design Report June, 1995.
- [2] “放射光入射器増強計画—KEKB に向けて”, KEK-Report 95-18, 1996.
- [3] S.Fukuda et al., “Performance of the RF-Source For KEKB Linac”, Proceeding of the XVIII Int. Linear Acc. Conf., pp.187-189, 1996.
- [4] T. Matsumoto et al., “Phase Measurements to Tune KEKB 60-kW Driver Klystrons”, Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Sept. 1997.
- [5] K. Nakao et al., “Phase Variation of High Power Klystron at KEKB Linac”, Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Sept. 1997.