

[P7-27]

Performance of the emission degraded klystron in the temperature limited region

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

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan.

Abstract

In the KEKB linac, 58 high-power klystrons are operated to accelerate the beam to 8 GeV successfully. Recently it was found that about ten klystrons were exchanged to new klystrons by degrading emission current from klystron's gun after only average 6800 hours operation. In order to understand the performance of those klystrons, we retested those klystrons under the condition of various klystron heater powers. This report describes the performance of the emission degraded klystron in the temperature limited region.

エミッション不良管の温度制限領域動作における諸特性

1.はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) における KEKB ライナック (電子、陽電子ライナック) では、ビームエネルギー-8GeV のビーム加速のための高周波源として、58 台の大電力クライストロン (周波数 2856MHz, 運転最大パルス出力 46MW, 平均パルス出力 41MW, RF パルス幅 $4 \mu\text{S}$ 、繰り返し 50pps) が使用されている [1]。

最近稼働後比較的短い時間で電子銃のエミッション電流の低下 (エミ減) により RF 出力の低下を起こしたクライストロンが十本あり、新しいクライストロンと交換した。通常のクライストロン (設計マイクロバービアンスは 2.1 ± 0.05) では平均運転時間は 30,000 時間以上が期待されるが、今回交換したクライストロンの平均運転時間は 6,818 時間で、交換直前のマイクロバービアンスは平均 1.45 であった。これらはクライストロン電子銃のカソードのロット不良によると結論された。カソードはスペクトロマト社製 (カソード径 80 ϕ 、スカンデート型カソード) で同じ時期に製造されたものである事が判明しているが、製造工程上の調査や不良カソードの表面分析調査の結果からは、エミッション不良の原因は解明できなかった。この種のカソードは 1987 年より使用し続けており、また口径 85 ϕ のカソードを使用したクライストロンも正常に動作しているので [2]、このエミ減クライストロンのカソードのロット不良については我々も製造会社も、何故生じたのか理解に苦しんでいる。しかしながら、この 10 本のクライストロンはエミ減に気付くまで KEKB 用としてクライストロンギャラリイで使用を続けており、又一部は交換のスケジュールがつかず、

やむをえず使用を続けたものもあった。

我々はテストホールに於いて、このうちの一本のクライストロンについてヒータ投入電力を 300W (メーカーの推奨値で運転時の値) から 410W (現在のヒータ電源で供給出来る最大値) まで変え、マイクロバービアンス、入出力特性及び位相の変化について測定し、これらの測定結果をエミ減となる前に行った納入試験の結果と比較しエミ減のクライストロンの諸特性、特に加速器運転に於いて重要な位相特性に重点を置いてを調べた。今回はこのテスト結果について報告する。

2.エミ減のクライストロンのバービアンス

図 1 に代表的なエミ減のクライストロンとギャラリイで現在使用中のクライストロンの運転時間によるバービアンスの変化を示す。

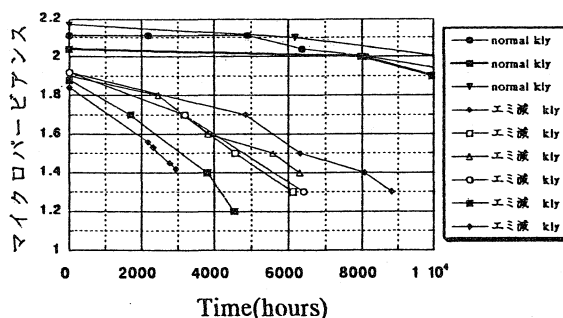


図1 運転時間によるバービアンスの変化

図 1 においてマイクロバービアンス 2.0 前後の 3 本の線が通常のクライストロンで、その他の線がエミ減のクラ

イストロンを表わしている。通常のクライストロンでは10,000時間後においても、ヒータ電力を初期設定値のまま使用し続けた場合にはパービアンスの低下は数%であるのに対し、エミ減のクライストロンでは、同じ条件でパービアンスの低下は26~38%となっている。

3. ヒータ投入電力とパービアンス

図2にエミ減前とエミ減後のクライストロンの1kV低圧試験でのヒータ特性を示す。これは、印加電圧一定(1kV)でヒータ電力を変えてクライストロンのエミッション電流を測定し、それによって低圧でのパービアンスを求めたものである。テストホールに於いては、納入されたクライストロンは全てこの試験と低印加電圧(0~3kV)でのエミッション試験を行い、カソードのチェックを行なっている。その後、高圧試験を行いクライストロンギャラリーに設置している [3]。

再度行った1kV低圧試験の結果、エミ減後ではエミ減前よりかなり高いヒータ電力で肩特性が現われているのがわかる。

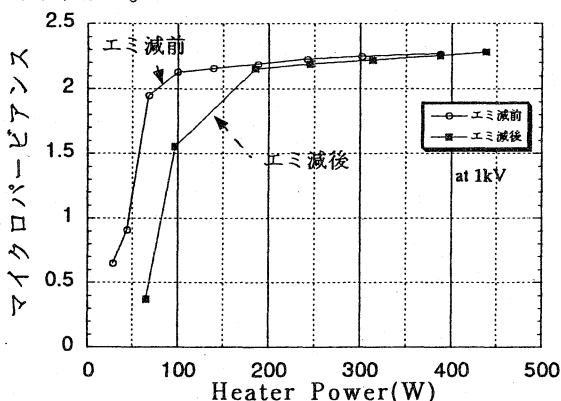


図2 低圧試験におけるヒータ電力とパービアンス

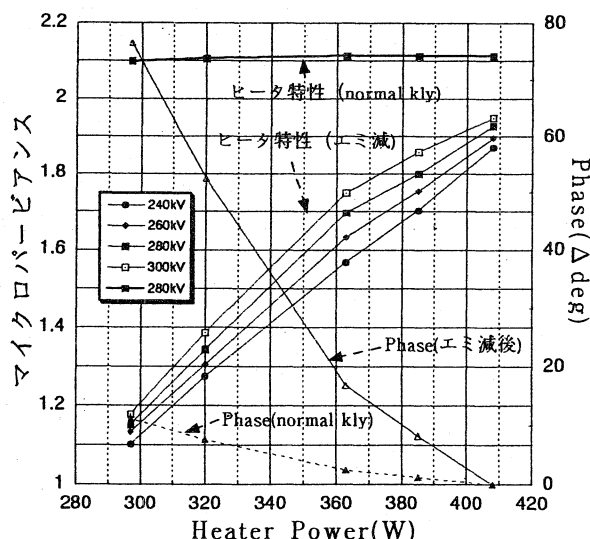


図3 ヒータ電力とパービアンス及び位相の変化

図3に通常のクライストロン及び再テストしたクライストロンのヒータ電力とパービアンスの変化を示す。また再テストしたクライストロンと通常のクライストロンの位相の変化も併せて示す。これはヒータ電力を変化させ、その各点で印加電圧を変えて電流値を測定し、パービアンスを求めたものである。またトロンボーン型移相器とダブルバランスミキサを組み合わせた位相測定装置で、電圧一定(280kV)での位相の変化も測定した。

エミ減後のクライストロンではヒータ電力を400W以上にしても高圧試験ではまだ温度制限領域に在り、低圧試験の時に観測できた肩特性は現れなかった。しかしながら電力が増すにつれ、傾きが緩くなっている。これは高圧に於いては、肩がヒータ電力約500W以上であると考えられる。

通常のクライストロンの位相の変化は小さくほぼ直線的であるが、エミ減後のクライストロンでは位相の変化は大きく、380W以下では変化量が増している。なおここでは正は位相の進みを表わしている。

4 パービアンスと位相の変化

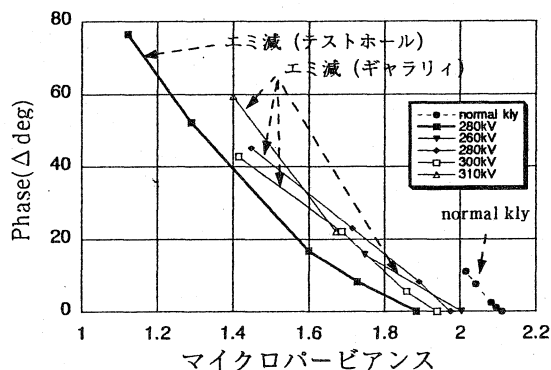


図4 パービアンスと位相の変化

3節で述べたパービアンスと位相の関係を更にはっきりさせる為に、図4にクライストロンのパービアンスと位相の変化の関係を示す。太線は再テストしたクライストロン、破線は通常のクライストロン、実線は他のエミ減のクライストロンでギャラリーから撤去する直前にテストホールと同じ条件で測定した結果から得られたものである。ここで通常のクライストロンカソードについて補足すると、我々の使用しているスカンデート型は、他のカソードと異なり空間電荷制限領域でも、完全にパービアンスが一定にならない事が知られている。従って、動作ヒータ電力近傍で電力を変化させると、わずかにパービアンスは変化する。

測定した通常のクライストロンも含め3本のクライストロンのパービアンスの位相に対するの変化の割合は同程度(1.5°~2°/%)であり、印加電圧をパラメータにして測定した場合、その位相変化の割合も一定であるこ

とがわかる。同様の傾向はドライバクライストロンの場合の測定でも得られている[4]。

5. 入出力特性

図5にクライストロンのエミ減前とエミ減後の入出力特性を示す。これはヒータ電力を変えて、クライストロンへの励振入力とRF出力を測定したものである。太線は納入試験の際の測定値であり、ヒータ電力300Wで一次側電圧 (E_s) は42kV、二次側で303kVであった。ヒータ電力410Wと340Wの時の印加電圧はともに E_s で42kVに設定したが、エミ減の為負荷インピーダンスとPFNの不整合により二次側の電圧はそれぞれ306kVと347kVに変化した。またエミ減後のヒータ電力300Wにおいては、二次側の高電圧を測定している容量分割器(CD)の最大耐圧が350kVであるので E_s を38.5kVに設定し、二次側の電圧を350kVに保った。

エミ減後の測定では、いずれのヒータ電力でも飽和点がずれている。しかしながらヒータ電力410Wでは二次側の電圧及びRF出力は、ほぼエミ減前と同じ値であった。このクライストロンはクライストロンギャラリイでは集束磁界一定で30MW近く出ているが、この時のテストでは更にエミッションが減少し、集束磁界を調整する必要があった。図5の結果はエミ減が進んでも適切な調整により出力電力はほぼ再現出来る事を示している。

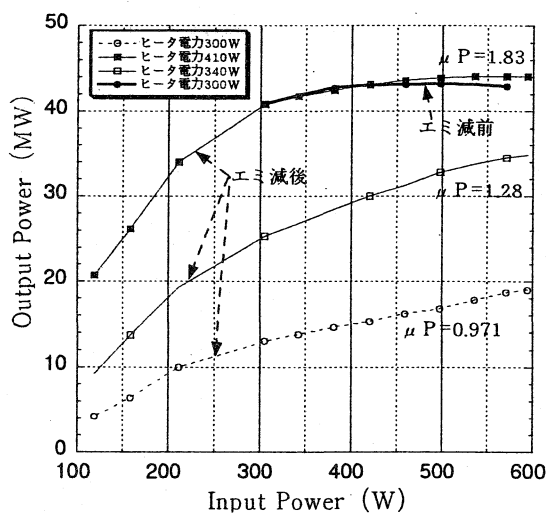


図5 入出力特性

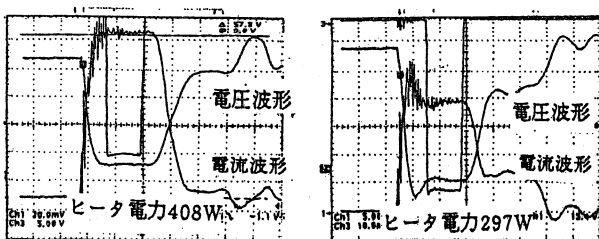


図6 電圧波形と電流及びRF出力波形

図6に入出力テストを行った際のクライストロンのヒータ電力が410Wと300Wでの印加電圧及び電流波形を示す。300WではPFNとのミスマッチを起こしているが電力を410Wまで上げるとマッチングは良くなっている。ここでもパルス波形はヒータ電力の増加によりほぼ正常な波形に復帰している事がわかる。

6. まとめ

今回述べたエミ減のクライストロンは、稼働直後からパービアンスが低下していき短時間のうちに1.4以下となったものである。原因は明らかにクライストロンのカソードの不良の為であるが、何故起きたかは不明である。ヒータ電力を上げる事によりパービアンスをかなり回復させる事ができるが、完全な空間電荷制限領域での動作をするヒータ電力まで印加はできなかった。

ヒータ電力に対する位相の変化は、エミ減後のクライストロンでは無視できない程大きい事がわかった。これはヒータ電力を一定にしたままクライストロンを運転した時、ライナックの運転に大きな影響を与える。

パービアンスに対する位相の変化は、エミ減前とエミ減後のクライストロンではその相対値は違うものの変化量は同じであった。またエミ減のクライストロンの印加電圧を変えても位相の変化量は同じであった。これは位相の変化量は印加電圧一定の場合、電流によって決められている事を示唆していて興味深い。

RF出力はある程度エミ減までは、ヒータ電力を上げ最適磁場を調整する事により、ほぼエミ減前の値まで回復するが、飽和点はずれ、利得、効率ともエミ減前よりも低い値である。

今後は、ギャラリイで稼働しているクライストロン全数について定期的にエミッションを観測し、エミッションが減少しているクライストロンがあったら、その初期の段階でヒータ電力を上げて、一定のパービアンスを保つようにする事が必要であろう。

References

- [1] “放射光入射器増強計画-KEKB に向けて”, KEKB-Report 98-18, 1996.
- [2] S. Fukuda, et. al., “Performance of a high-power klystron using a BI cathode in KEK electron linac”, IVESC98, Tsukuba, 1998.
- [3] K.Nakao, et.al., “High Powerklystron Test in the New Test Hall of the KEKB 8GeV Linac”, Proc. of the 23th. Linear Acc Meeting in Japan, p234-236, 1998.
- [4] T. Matsumoto, et.al., “Phase variation of 60-kW Driver klystron at KEKB 8GeV Linac”, this meeting, 1999.