

# 大電力クライストロンのヒータ特性測定の為のディップ試験

中尾 克巳<sup>1,A)</sup>、松本 利広<sup>A)</sup>、道園 真一郎<sup>A)</sup>、福田 茂樹<sup>A)</sup>、竹中たてる<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

## 概要

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の電子、陽電子ライナックではSバンド大電力のクライストロンが59台稼働している。これらのクライストロンを安定に動作させる為には出力電力レベル、入力電力レベル、印加電圧、位相変動等多くの量を監視する必要がある。クライストロンに通電するヒータ電力も監視すべき重要な量である。通常はカソードの動作領域が空間電荷制限領域であるように保っている。しかしヒータは使用時間とともにその活性度が下がっていき、放っておくと設定ヒータ電圧ではエミッションが減る。極端な場合はエミッション減少でクライストロンの寿命が尽き交換する必要に迫られる<sup>[1]</sup>。本論文ではクライストロンのヒータ電力(電圧)の維持管理にディップ試験と呼ばれる方法を採用して効率的かつ迅速にエミッションの活性度を測る試みを試験したので報告する。

## 1. はじめに

KEKBにおける電子、陽電子ライナックでは59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電力46MW、運転平均パルス出力電力41MW、RFパルス幅4 $\mu$ s、繰り返し50pps、マイクロパービアンズ2.1)が稼働している。年間7,000時間の運転を行い、クライストロンの平均寿命は30,000時間以上である。クライストロンの窓のリーク、セラミック碍子の破損、管内放電などの故障を除けばクライストロンは最終的にはカソードの劣化によるエミッション減少(エミ減)により使用不能となる。その場合クライストロンを交換しなければならないが、エミ減の程度によってはクライストロンのヒータ電圧を変える事で対処し得る。

カソードのヒータ電力の設定にはヒータ電力(又はヒータ電圧、ヒータ温度)に対するエミッション電流の変化を測定し、一定値から減少し始める変化のポイント又は肩の位置を調べる。この特性はエミッションの肩特性またはMiram Plotと呼ばれる<sup>[2]</sup>。ヒータの電力の設定値はこの肩の部分を超えたエミッション一定の部分に置くが、ぎりぎりではすぐにカソードの劣化でエミッションが減少するし、高すぎると高温度になり過ぎて寿命に悪影響を及ぼす。その兼ね合いで適切な所に設定する。

このMiram Plotを測定するには場合通常5~6点、ヒータ電圧を変えて測定し肩のポイントを調べるが

大電力クライストロンのように大口径のカソードでは熱容量が大きく、エミッションが安定になる為には1点30分以上必要である。つまり1本のクライストロンのMiram Plotを取るのに3~4時間必要とする。この間クライストロンの特性が変化するのでビーム加速には供することが出来ない。以上のことからKEKの電子、陽電子加速器では基本的に年2回(夏休みのシャットダウン前と年末のシャットダウン前)に限って運転時のヒータ電圧でのエミッション電流の測定を行っている<sup>[3]</sup>。過去の経験ではこの2回の測定の間で急激にエミ減が進み運転時間中に突如クライストロンを交換しなければならない事態を迎えたこともある。KEKでは、従って何らかの形で迅速に且つ頻繁にビーム加速にあまり影響を与えずにカソードの活性度を測ることが必要とされている。

## 2. カソードのディップ試験の原理

カソードの活性度を測定する方法としてマイクロ波管方面で一般的なディップ試験と呼ばれる方法がある。基本的には、カソードの劣化の判定のために1点ずつ電圧を変えてクライストロンのヒータ特性(肩特性)を測定していたが、より速いクライストロンのヒータ特性測定にはディップ試験が有効である<sup>[4]</sup>。これは高圧を掛けたままヒータを短時間オフしてエミッション電流の変化を測定するものである。測定原理は簡単にMiram Plotとの関係を図1に示す。これから解るように動作点が正常であればディップの深さは浅く、動作点がぎりぎり又は既に肩の位置であればディップは深くなる。この方法は簡単であるが、今までなかなか試験することが出来なかった。特に大電力クライストロンに高電圧を掛けながら行う事は一般には行われない。その理由として高圧を掛けたままヒータをオフするとカソード温度低下とともに空間電荷制御領域から温度制限領域に変わるが、クライストロンの負荷インピーダンスも大きく変化し、モジュレーターから見ると正常動作から外れることになる。エミッションの減少とともにライントタイプのモジュレーターではクライストロンに印加している高圧がどんどん高くなり、放置すると過大電圧がクライストロンに掛かり放電や破損につながる。モジュレーターの負荷ミスマッチでパル的な逆電圧がクライストロンに掛かって故障の原因になる事も考えられる。これらの理由で一般的に採用されていないものと思われる。この辺の事情は文献[5]にも触れられている。

<sup>1</sup> E-mail: katsumi.nakao@kek.jp

今回はKEKの50MWクライストロンに使用されている直径85mmのBIカソードはどの程度の熱容量があり、ヒータのオフ時間がどの程度であれば前記の危険なトラブルを避けることができるか試験を行った。

ここでもう一つ図1の原理図とKEKの状況が異なる点を指摘しておきたい。通常のカソードは図1にあるように空間電荷制御領域ではエミッション電流は空間電荷で決まり完全に一定である。然るに、KEKで使用しているクライストロンはいわゆるスカンデートカソードと呼ばれるWベースにScを体積的に混合したものである。不思議なことにこのカソードでは空間電荷制限領域でもエミッションは一定にならない。これはディップ試験の結果を図1よりは多少複雑にする。しかし動作点の正常化否かはディップの深さで判定できる点では変わらないので問題は無いと思われる。

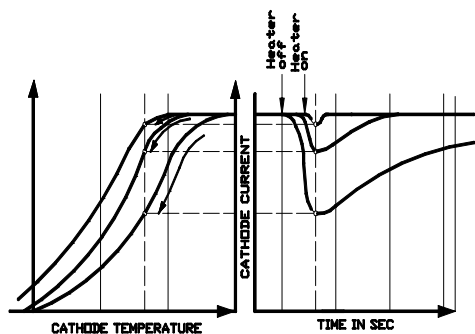


図1 MIRAM Plotとディップテスト

### 3. ディップ試験とその結果

我々はKEK電子、陽電子ライナックのクライストロンテストホールにおいてクライストロンへの印加電圧一定のもとでヒータ電圧を100～120Vの間で5V毎に短時間オフしてエミッション電流の変化を測定するディップ試験を試みた。前節で述べた危険性を回避する為に、印加高電圧の設定は少し低めにした。つまり動作電圧300～320kVに対して、ディップ試験は約270kVに設定した。これにより負荷の不整合による電圧上昇は約50kV程度許容できる。一方320kV印加時とMiram Plot時の肩の位置はほぼ同じとみなされる。

試験結果からクライストロンのヒータ特性をより迅速に測定することが出来、実用的に有効であることが実証できた。試験の結果直径85mmの大口径カソードでもヒータオフ後のエミッション変化は非常に早いことが判明した。初めヒータオフ時間を設定したがこれでは長すぎて設定値によっては危険領域に至る可能性があった。その後ヒータオフ時間を120秒、90秒、60秒と変えてディップ試験を試みた。

通常はクライストロンの保護の為、ヒータ電圧オフになれば高電圧印加はされないようなインター

ロックのシークエンスになっている。そのため試験ではこのインターロックを一時的に解除して試験を行った。又最初はヒータオフ後のエミッションや電圧の変化を手動で読んでいたが、余りにも変化が早いのでLab Viewを用いてデジタルオシロスコープに表示されるエミッション電流と印加高電圧を自動的に読み込むようにした。今回は約0.2秒ごとにデータをpcに取り込んだ。今回この試験結果について報告する。

図2に今回試験に使用したクライストロンの電流電圧特性を、図3にそれをパービアンスに変換したものを示す。前述したようにスカンデートカソードでは空間電荷制限領域でもエミッションは一定にならない事がわかる。クライストロンは通常ヒータ電圧110Vで使用しているが、この値ではパービアンスの急な低下も見られず。適正なヒータ電圧である。

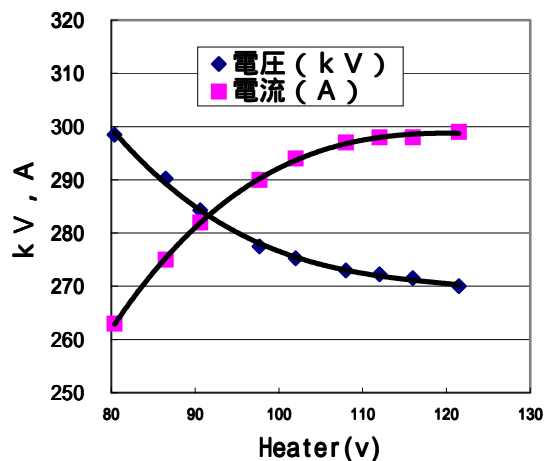


図2 クライストロンの電流電圧

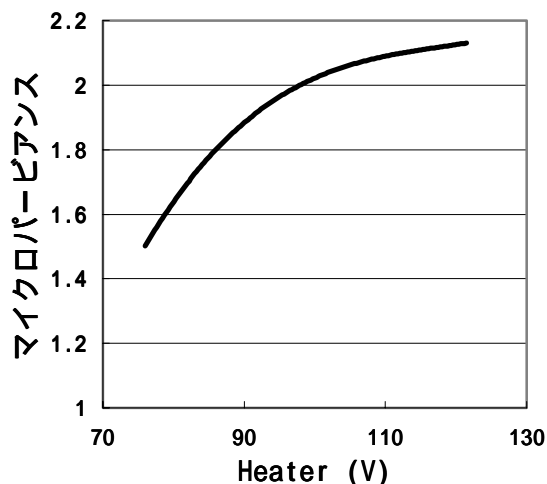


図3クライストロンのヒータ特性

図4、5、6にディップ試験の結果を示す。ヒータオフの時間は順に120、90、60秒である。

印加電圧は前述したように270kVとした。グラフは上からヒータ電圧が120, 115, 110, 105, 100Vとなっている。

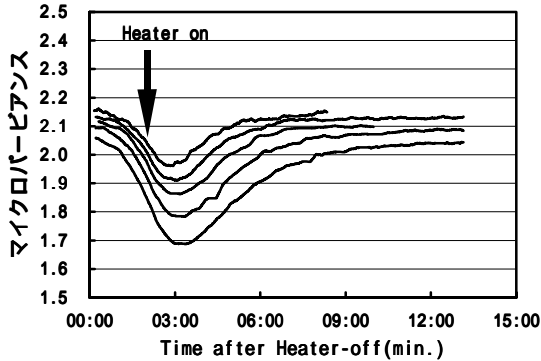


図4ディップ試験ヒータ120秒オフ

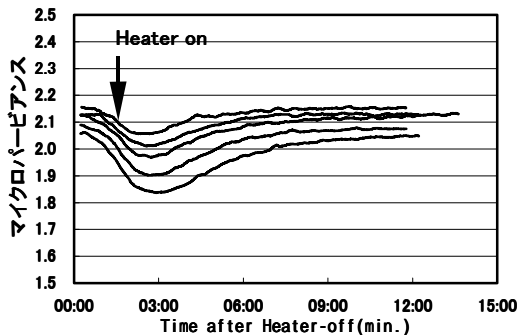


図5ディップ試験ヒータ90秒オフ

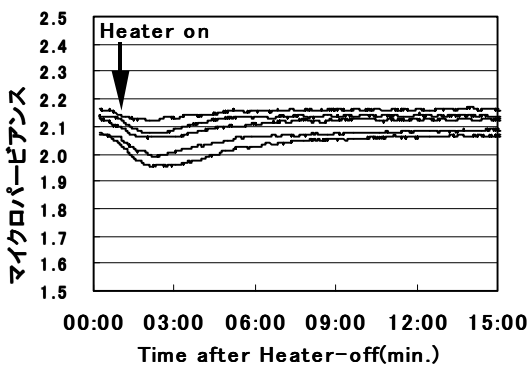


図6ディップ試験ヒータ60秒オフ

ヒータ電圧が低くなるにつれ、またヒータオフの間が長い程ディップが深くなっている。これは理論的に正しくおおむね良好なデータが得られた。図4、5、6ともにヒータが120、115、110Vの3つのラインはディップの深さが正常と判断すべきものである。105、100Vに対応するディップの深さは、動作値が低いものである。この両者のディップの深さの違いを更に多くのクライストロンについてデータを集積する事でデータベース化し迅速なエミッション評価テストに役立てる事が可能と思われる。ヒータオフ時間は約90秒程度で十分と

思われる。エミッションは約10~20分でほぼ元の値に戻る事もわかった。120秒のヒータオフで一番ディップの深い所でも印加電圧の上昇は300kV程度でありモジュレーターのインターロックによるトリップは観測されなかった。

#### 4.まとめ

高圧を印加しながら大電力クライストロンのヒータ特性をディップ試験で測定できる事がわかった。1点のディップ試験にかかる時間は約20分程度である。カソードの活性度を測る為にあと1、2点ディップ試験を行ってもかかる時間は1時間以内で済み従来のヒータ特性の測定より大幅に時間を短縮できる。また夏、冬のシャットダウン前ばかりではなくもっと頻繁に測定が可能となりクライストロンの寿命の判定が迅速にでき、ライナックの安定な運転に役立つものと思われる。これを実際に応用する為には現在のインターロックのシーケンスを変更する必要がある、PLC等で制御しデータ取得もできる様検討する必要がある。

#### 参考文献

- [1] K.Nakao et al., "Performance of the emission degraded klystron in the temperature limited region", 第24回ライナック技術研究会論文集, pp209-211, 1999.
- [2] A.S.Gilmour Jr., Chapter 5 of "PRINCIPLES OF TRAVELING WAVE TUBE", Arthch House INC. 1994.
- [3] 諸富、他, "KEKBリニアックにおけるクライストロンアセンブリ及び高周波窓の維持管理", 第28回ライナック技術研究会, 2003.
- [4] M.G.Bodmer, "Dip Testing, A New Method for Measuring Cathode Activity", IRE Trans. On Electron Device (Experimental Note and Techniques Section), vol. ED-5, pp43-44, 1958.
- [5] XY.Zhao, "A study of the Emission Performance of High Power Klystron—SLAC XK—5", SLAC TN—81—5, 1981

