

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

諸富 哲夫^{1,A)}、今井 康雄^{A)}、東福 知之^{A)}、中尾 克巳^{B)}、竹中 たてる^{B)}、
道園 真一郎^{B)}、松本 利広^{B)}、福田 茂樹^{B)}

^{A)} 三菱電機システムサービス(株)
〒305-0045 茨城県つくば市梅園2-8-8

^{B)} 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

KEKBリニアック運転中にクライストロンの不具合や経年劣化などが発生すると加速器運転の停止となる場合もありうる為、その兆候を捉えることが安定な加速器運転には望ましい。クライストロンに使用されているカソードの経年劣化は、印加電圧、電流に変化として表れる。また、高周波窓に不具合が生じる場合は、事前に高周波窓枠の温度上昇が観察されることがある。クライストロンアセンブリや高周波窓の不具合や劣化等の状態を知るために、定期的にクライストロンの印加電圧、電流測定およびパービアンスの計算、高周波窓の放射線、温度測定等を実施している。今回はこれらのデータ収集、解析結果についてまとめて報告する。

1. はじめに

KEKBリニアックではクライストロンギャラリーにクライストロンアセンブリ(クライストロン、パルストランス、タンク、集束電磁石の組合せ)として、59台(2856MHz、最大50MW、4 μ s、50pps)が設置され、8GeV、3.5GeVの電子・陽電子ビームの入射に使用されている。平均的な高周波出力は40MW(印加電圧300kV、電流320A、パービアンス2.1 μ A/V^{3/2})である^[1,2]。現在1年間に約7千時間の長期連続運転を行っており、エミッション減少^[3,4]等の故障が発生する前に不具合の兆候を知る必要がある。

また、高周波窓は真空を保持し高周波を通過させるために用いられ、クライストロンの出力部と導波管部に使用されている。導波管部の窓(WG窓)は、クライストロン交換の際、ビームラインの真空を悪化させずに作業ができるようにする為設置されている。高周波窓の破壊(主にピンホール)は真空リークを生じ、クライストロンの交換に支障をきたす。安定な運転または迅速なクライストロン交換作業を進める為には、不具合を事前に把握する事が重要である。

以下にクライストロンアセンブリ及び高周波窓の運転維持のために行っている測定方法及び交換状況を述べる。

2. 測定方法

59台のクライストロンユニットについて、移動式のオシロスコープを用いて順次測定を行なっている。クライストロンアセンブリ下部にあるパルストランスの容量分割器(CD)の電圧から印加電圧を、電流変圧器(CT)から印加電流を計測している。図1に測定の模式図を示す。

クライストロン及び導波管の高周波窓温度は、窓のスリーブ部に取り付けた熱電対の熱起電力を測定している。過去に破壊された高周波窓で、放射線が強く発生したものがあった為、放射線の測定も行っている。RF波形についても印加電圧のトリガータイミング確認及び出力の変動を見るため測定している。図2にモニター波形を示す。

この他、集束電磁石の不具合や絶縁油劣化の早期発見のために、絶縁油の透明度や集束電磁石の電圧、電流の定期点検も行っている。

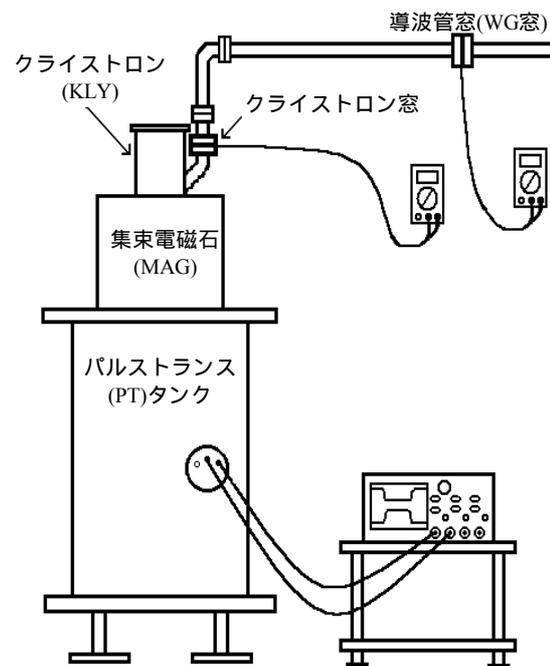


図1: CD、CT、窓温度測定方法

¹ E-mail: moro@mail-linac.kek.jp

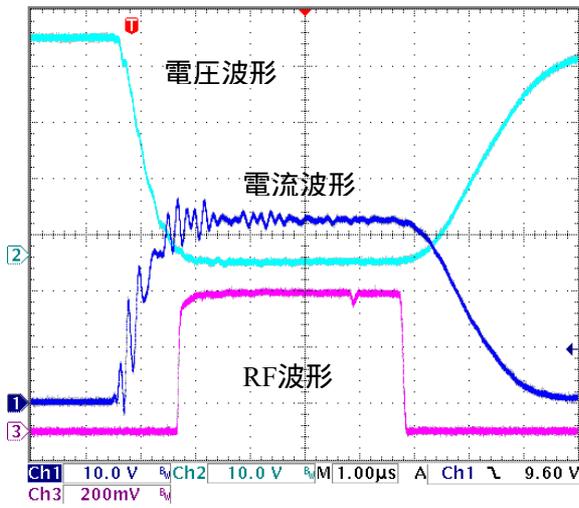


図2: オシロスコープモニター波形

3. クライストロンアセンブリ交換状況

KEKBリニアックでの過去3年間のクライストロンアセンブリ交換台数は28台で、年に約10台を交換している。その内訳を表1に示す。エミッション減少は、正常なクライストロンにおいて運転時間の経過に従って、カソードからの電流が減少していくために生じるものであり、クライストロンの寿命を知るひとつの指標となる。また、長時間運転後のエミッションの変化が原因となってクライストロン(KLY)が発振し始めることもある。パルストランス(PT)、集束電磁石(MAG)、絶縁油劣化の不具合でも、クライストロンアセンブリの交換が必要になる。「その他」は、異常は無いが運転状況の変化に伴い交換したものである。導波管系の作業のために大気暴露する際、クライストロン窓の真空リークが見つかる事があり、これはクライストロン破壊として扱われる。表1から分かる通り、特にパルストランス及びタンク内の不具合(放電など)やクライストロン窓のリーク(撤去後確認含む)がやや多く見られた。クライストロンアセンブリの不具合や劣化の予兆を知るため、年3回(3月、7月、12月)定期的に点検測定を実施している。

年度	アセンブリ交換	交換理由						
		エミッション減少	KLY発振等	PT不具合(タンク内放電含)	MAG不具合	絶縁油劣化	KLY窓リーク(撤去後確認含)	その他
2000	9	2	0	4	0	0	1(5)	2
2001	9	1	1	3	2	0	2(3)	0
2002	10	0	2	3	0	3	1(3)	1
計	28	3	3	10	2	3	4(11)	3

表1: 2000年度以降撤去したクライストロンアセンブリ台数と交換理由

図3に過去3年間の撤去したクライストロンアセンブリの運転時間分布を示す。クライストロンアセンブリの平均寿命は約2万2千時間であるが、このうちエミッション減少、発振、窓リークに起

因するクライストロン単体の平均寿命は約2万1千時間ではほぼ同じである。従って、アセンブリ単体(クライストロン、パルストランス、タンク、集束電磁石)とクライストロンの破壊はほぼ同じ頻度と考えられる。5千時間未満の初期交換は、水漏れ、タンク内放電、クライストロン内部真空悪化などで、テストベンチでの短時間(50~60時間)の運転確認^[5]では見出せなかったものである。

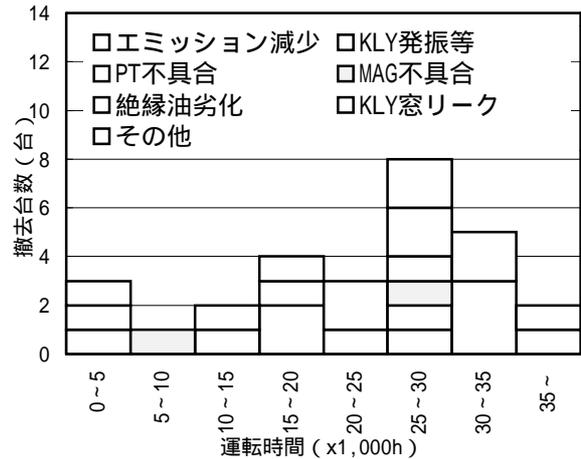


図3: 2000年度以降撤去したクライストロンアセンブリ運転時間分布

4. クライストロンのエミッション減少

図4は全クライストロンの印加電圧と印加電流からパービアンスを計算したものである。KEKBリニアックでは、2社、4種類のクライストロンを使用しており、CD特性にもバラツキがある。これを考慮するとクライストロンのパービアンスの測定値は、各ユニットでの経時変化のみが意味を持つ。実際、パービアンス値も1.9~2.3に分布している。

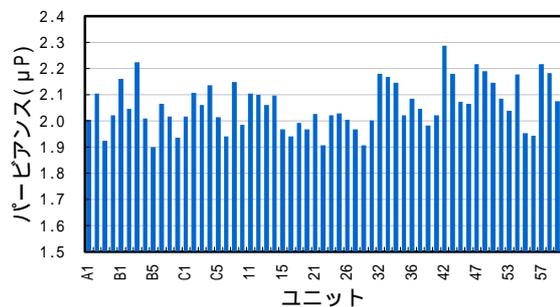


図4: リニアック全クライストロンパービアンス分布(A1等はユニット名)

図5に撤去したクライストロンの中から、エミッション減少が原因で交換に到ったものと、正常なクライストロンのパービアンスの運転時間を比較して示す。エミッション減少を起こしたクライストロンは、運転時間の経過と共にパービアンスは減少するが、正常なものはほぼ一定値である。

エミッション減少を示したクライストロンは、ある時間から急速にパービアンスが低下する(例えばNo.9506の場合2万時間付近から)。このため、そのエミッション減少の兆候が現れた場合は、早急に対処する必要のあることが分かる。運転時間による各アセンブリのパービアンス低下で、クライストロンの交換時期が判断できる。

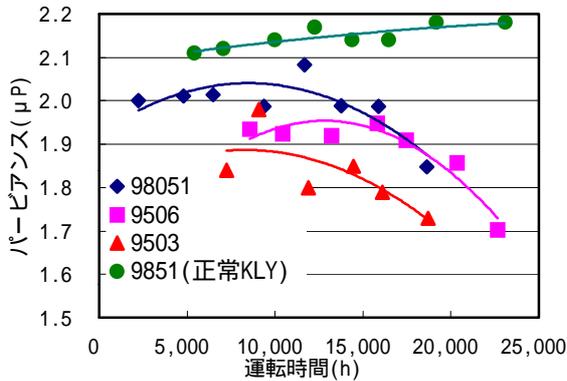


図5: エミッション電流の運転時間依存性

5. クライストロン窓、導波管窓 (WG窓) の破壊

窓の破損については前述の通り、窓の温度測定と放射線測定が参考になる。

図6に全ユニットのクライストロン窓、導波管窓 (WG窓) の温度データより各ユニットの温度分布を示す。クライストロンは2社から購入しており、各社で窓スリーブの構造が異なる。また、クライストロン出力も場所により違いがあるため温度を直接比較できない。しかし、現在の温度状況を把握するのには重要である。

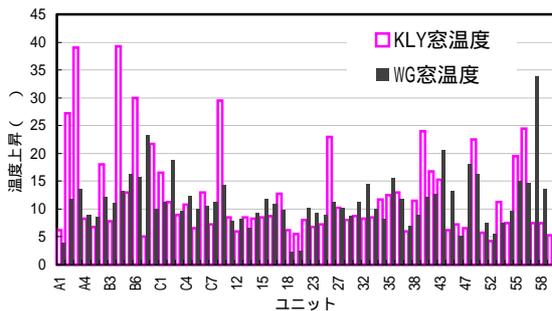


図6: リニアック全クライストロン、導波管窓温度分布

図7に窓温度の運転時間依存性を示す。窓温度が上昇傾向のものもあるが傾きが緩やかなものもある。また、温度が低くても窓の真空リークがあるものや温度が高くても正常に動作しているものがある。経験的に温度が上昇していくものは破壊につながる事が分かっている^[6]。しかし、これ以外にも破壊の原因があると考えられる。定期的に測定を継続して温度上昇が認められる場合には早めに交換する方針である。

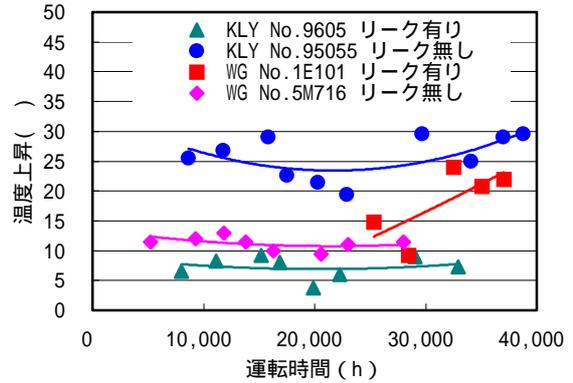


図7: クライストロン、導波管窓温度の運転時間依存性

6. まとめ

運転中の劣化によるトラブルは、定期的な測定監視によって早期に対処することが出来、突発的なトラブルは減少してきた。これまで高周波源の安定な運転のためにクライストロンの印加電圧、印加電流及び窓温度の定期的な測定を行ってきたが、クライストロン単体だけではなく、集束電磁石故障、絶縁油劣化や碍子の破損もアセンブリ単体の不具合として無視できない事が分かってきたため、これらについても定期的な観察を行うようになってきた。この他、放射線量の定期的な測定を行っており、これらにより、かなりのクライストロンアセンブリ、高周波窓の不具合の兆候が事前に把握できるようになってきた。今後も定期的な測定及び解析を続けクライストロンアセンブリの性能向上の為に活用していきたいと考えている。

参考文献

- [1] 松本利広、他、"KEKB 8GeV LINAC 大電力高周波源の現状", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug. 2001.
- [2] T.Matsumoto, et al., "Status of High-Power RF Sources in the KEKB 8GeV Linac", Proceedings of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Sept. 1998.
- [3] K.Nakao, et al., "Performance of the emission degraded klystron in the temperature limited region", Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 1999.
- [4] 中尾克巳、他、"大電力クライストロンのヒータ特性測定のためのデブ試験", 第28回リニアック技術研究会論文集、東海、茨城、2003.
- [5] K.Nakao, et al., "High-Power Klystron Test in the New Test Hall of the KEKB 8GeV Linac", Proceedings of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Sept. 1998.
- [6] S.Michizono, et al., "RF-windows used at the KEKB linac", Appl. Surf. Sci. 169-170 (2001) 742.