

KEK 8GeV リニアックでのサイラトロン使用状況

明本光生¹、本間博幸、中島啓光、設楽哲夫、穴見昌三
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

KEK 8 GeV リニアックは 1998 年秋より B 物理実験のための電子・陽電子ビームの供給を開始してから、運転時間は約 2 万 7 千時間(2002 年 5 月 30 日現在)になる。このリニアックでは 59 台のクライストロン電源が使用され、そのスイッチとして 45 kV、4.5 kA をスイッチングするサイラトロンが使われている。この間に於けるサイラトロンの寿命及び故障等の使用状況について報告する。

1. はじめに

KEK 8 GeV リニアックは 1998 年秋より B 物理実験のために、8 GeV の電子ビームと 3.5 GeV 陽電子ビームを KEKB リングへ入射を開始して以来今日まで順調に運転されている^[1]。リニアックは RF 源として最大 50 MW、パルス幅 4 μ s のマイクロ波を出力する S バンドクライストロンを使用し、59 台のクライストロン電源が設置されている。クライストロン電源の運転時間(高圧印加時間)は約 2 万 7 千時間(1998 年 9 月から 2002 年 5 月 30 日まで)になる。

本稿では、この間に於けるクライストロン電源に使用されているサイラトロンの使用状況(交換及び故障等)を報告する。

2. サイラトロンの使用状況

2.1 電源とサイラトロン

KEKB クライストロン電源の主な仕様を表 1 に示す^[2]。サイラトロンは 3 種類、CX2410K (Marconi 社製、前 EEV 社)、F241 (Triton 社製)、L4888B (Litton 社製)を使用している。どのサイラトロンも 2 ギャップで、水素ガス封入されたセラミクス管で、ほぼ同じサイズで、取り付けフランジが共通になっている。

2.2 サイラトロン運転時間

現在(2002 年 5 月 30 日)、CX2410K を 31 本、F241 を 15 本、L4888B を 13 本合計 59 本がクライストロン電源に組み込まれ運転に使用されている。図 1 にそれぞれのサイラトロンの運転時間(高圧印加時間)分布を示す。図に示されるように、最小 1,000 時間から最大 40,000 時間まで幅広く、約 3,400 時間と 30,000 時間で二つのピークを持つ時間分布をもっている。第一のピークは KEKB のための増設によるものであ

り、第二のピークは事前交換(詳細は 4 章で述べる。)によるものである。但し、B 用に本格運転開始してまだ総計 2 万 7 千時間程度であるため、これ以上の運転時間をもつサイラトロンについては、以前の運転条件で運転されている。

表 1: クライストロン電源の主な仕様

最大ピーク電力	108 MW
最大平均電力	30 kW
パルストランス昇圧比	1:13.5
1次側出力パルス電圧	22.5 kV
1次側出力パルス電流	4800 A
PFN 総容量	0.6 μ F
パルス立ち上がり時間(10-90%)	0.8 μ s
パルス平坦度(ピークからピーク)	0.3%
パルス半値幅	5.6 μ s
サイラトロンアノード電圧	45 kV
サイラトロンアノード電流	4.8 kA
サイラトロン平均アノード電流	1.3 A
パルス繰り返し	50 Hz

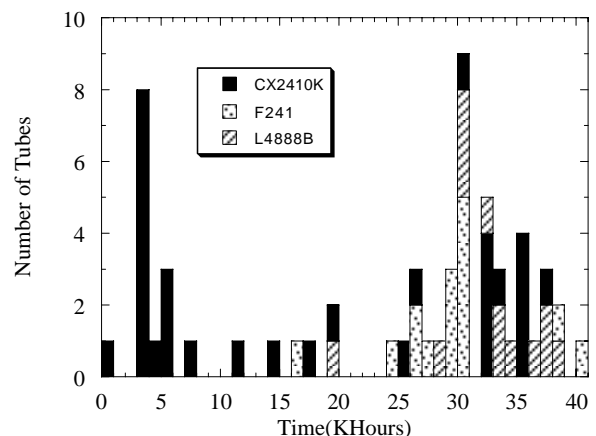


図 1: サイラトロン運転時間分布 (2002 年 5 月 30 日現在)

¹ E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

2.3 サイラトロンの故障

1998年9月から2002年5月30日までに19本のサイラトロンの故障によって交換された。但し、この数には、サイラトロンの寿命に直接関係しない故障による交換の数は除外した。表2に故障の内訳を示す。主な故障は、耐圧不良で全体の約8割を占める。これは所定の充電電圧で、使用することが出来ない場合の故障を言う。この場合、交換前に必ずリザーバ電圧調整を行なうがこの調整で自爆や大きなジッター（数10ms以上）を押さえることができない。アノード部放電は、サイラトロンのアノードに取り付けられている放熱用フィン部でアーク放電するもので、最初は小さい放電であったが時間が経つに従って大きな放電音と光りを発するようになった。補助グリッド(G1)の放電は、G1の接続端子でアーク放電を発生する故障である。詳細は次節で述べる。また放電ノイズの発生については、次章で詳しく述べる。

表2: 故障の内訳

故障項目	CX2410K	F241	L4888B
耐圧不良	4	3	8
アノード部放電	0	0	1
補助グリッド(G1)の放電	2	0	0
放電ノイズの発生	0	0	1
計	6	3	10
平均寿命(時間)	13,135	15,596	17,009

図2に故障サイラトロンの寿命分布を示す。3種類のサイラトロンとも、ばらつきの大きい寿命分布になっている。また全体、種類別共に短寿命と長寿命のグループに別れているように見える。これは個々の品質のばらつきが大きいことが伺える。短寿命のグループの寿命は種類に関わらず約1万時間付近を中心としている。

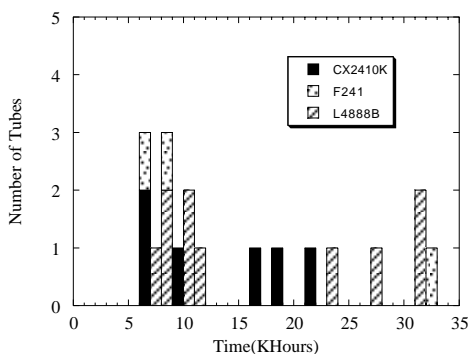


図2: 故障サイラトロンの寿命分布

2.4 G1の放電

通常、G1電極はカソードとの間でグロー放電を行う。(図3参照)しかし、故障サイラトロンでは使用している間に、カソードから蒸発した電極材が隣接するヒートシールドの表面に付着し、G1電極とヒ

ートシールド間で異常放電するものと考えられる。このような状態でトリガーが入力されると、主放電がヒートシールドとアノード間で不十分な電子放出で始まり、すぐに、本来のカソードとアノード間での主放電に移行するが、その時G1電極に高電圧のスパイクが発生するためその接続端子を取り囲んでいるフランジ(グランドライン)との間でアーク放電を起こす。このような異常放電が起きるとサイラトロンは、十分な制御回復時間が得ることができなくなり、トリップが起き易い状態になる。サイラトロンの分解調査^[3]で、多量のカソード電極材がヒートシールドの内側に付着していることが確認されておりこのことを裏付ける。

3. サイラトロンの放電ノイズ

3.1 放電ノイズ

サイラトロンは、三極放電管でグリッドに正の約2kVのパルスを加えて内部のプラズマを放電させることにより、負荷に大きな電流を突然流す。この放電に伴い、高周波振動(プラズマ振動)が発生する。このプラズマ振動が配線を通じてあるいは直接放出されてノイズとして、近傍にある回路及び機器の動作に影響を与える。特にその影響が大きい場合、実用面におけるそのサイラトロンの寿命となる。この章では、この理由で交換したサイラトロンL4888B(運転時間: 31,000時間)の調査結果を述べる。

3.2 放電ノイズの測定

図3にサイラトロンとその駆動回路の概略を示す。サイラトロン内部の放電ノイズ(プラズマ振動)を直接測定するためにコントロールグリッド(G2)に発生する電圧信号をオシロで測定した。G2は高電圧なので、抵抗分圧器で1/1000にし、さらに1/5のアテネータを使用して測定した。図4にアノード電圧42kV、リザーバ電圧4.5Vで測定された電圧波形を示す。

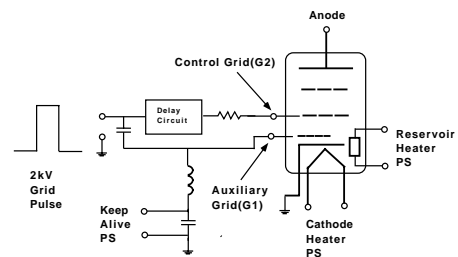


図3: サイラトロン駆動回路

3.3 放電ノイズの周波数解析

測定されたプラズマ振動の周波数成分を調べることはサイラトロンの動作状態を知る上で重要である。図5に図4の波形の周波数成分を示す。たくさんの

プラズマ振動が見られるが 100 MHz 以上に周波数成分がないことが分かる。

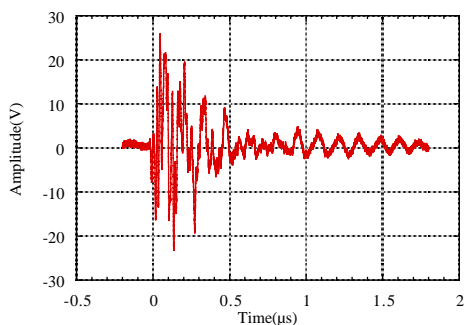


図 4 : G2 で測定された電圧波形 (リザーバ電圧 4.5 V)

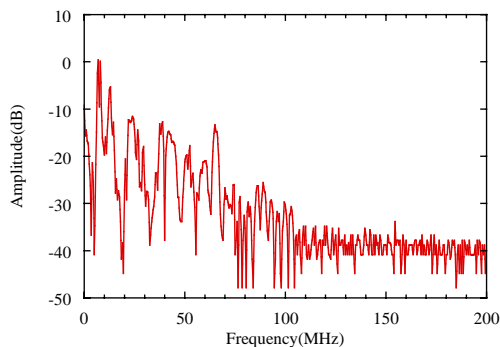


図 5 : G2 で測定された電圧波形の周波数成分 (リザーバ電圧 4.5 V)

サイラトロン内のプラズマ振動は管内のガス圧に強く影響する。図 6 にリザーバ電圧 4.8 V での周波数成分を示す。104、138 MHz の中心周波数成分をもつ振動が現れ、それと同時に、電源近傍に設置されている電子測定装置にひどいノイズ障害を受けた。

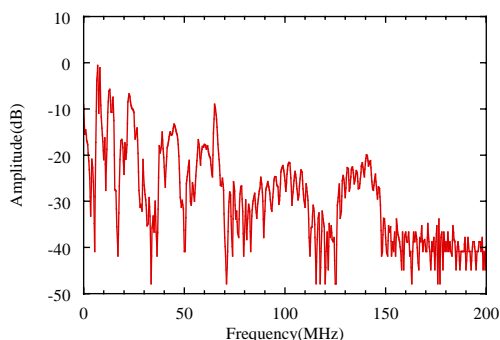


図 6 : G2 で測定された電圧波形の周波数成分 (リザーバ電圧 4.8 V)

次に、測定された特定のプラズマ周波数とリザーバ電圧との関係性を調べた。図 7 に中心周波数 45、104、138 MHz のリザーバ電圧依存性を示す。45 MHz は 4.6 V 付近でピークを持ち、104、138 MHz はその付

近以上で発生することが分かった。サイラトロンのレンジングを行ったところその値は 4.65 V で 45 MHz のピークとほぼ一致していることが分かった。このことから 45 MHz のプラズマ周波数とレンジングとは何らかの関係があるのではないかと期待される。104、138 MHz は正常に動作しているサイラトロンでは観測されないため、サイラトロンの異常を示すものと考えられる。この状態を避けるにはリザーバ電圧を下げることで対処できる。これらの関係をもっと理解するには、さらに調査、解析が必要である。

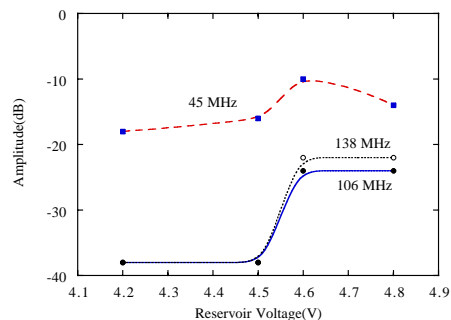


図 7 : 特定のプラズマ周波数とリザーバ電圧との関係

4 . サイラトロンの事前交換

KEK 8 GeV リニアックは営業用であるため寸刻も休むことなく運転を続けることが求められる。そのためには、サイラトロンの故障に伴う運転停止は極力避けなければならない。従って、運転と直結するサイラトロンに対しては、高い信頼度を保証する必要がある。そこで、電子入射部と陽電子入射部の初段のクライストロン電源に使用されているサイラトロン計 8 本を定期的に事前に交換することにした。交換の周期はこれまでに蓄積された故障サイラトロンの統計から約 1 万時間(約 1 年間おき)程度とし、交換したサイラトロンはスタンバイ可能な電源で再使用される。

謝辞

サイラトロンの分解調査及び分析の協力を頂きました Marconi 社の Ron Sheldrake 氏に感謝します。

参考文献

- [1] 小川雄二郎, “KEKB 電子陽電子入射器の現状”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug.7-9, 2002.
- [2] H. Honma, et al., “Upgrade of the PF 2.5 GeV Linac Klystron Modulator for the KEKB”, KEK Preprint 94-146, 1994.
- [3] M. Akemoto, et al., “Thyratron Performance in the KEK 8 GeV Linac”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001)213-215.