

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 8GeV 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 万時間（2001 年 6 月現在）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 45kV、4.5kA 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 3.5GeV 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 50MW、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 万時間（1998 年 9 月から 2001 年 6 月 5 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]。

2. 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^[3]。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。

3. サイラトロンの使用状況

3.1 サイラトロン運転時間

現在（2001 年 6 月 5 日）、CX2410K を 22 本、F241 を 17 本、L4888B を 20 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 2 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 34,000 時間まで幅広く、24,000 時間を頂点とした時間分布をもっている。但し、B 用に本格運転開始してまだ 2 万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。サイラトロンの種類による固まりの分布になっているのは、KEK では単年度ごとに入札によるサイラトロン購入を行っているため、その年度で交換するサイラトロンの種類が限定されるためである。

表 1：クライストロン電源の主な仕様

最大ピーク電力	108MW
最大平均電力	30kW
パルストランス昇圧比	1:13.5
1 次側出力パルス電圧	22.5kV
1 次側出力パルス電流	4800A
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	45kV
サイラトロンアノード電流	4.8kA
サイラトロン平均アノード電流	1.3A
パルス繰り返し	50Hz

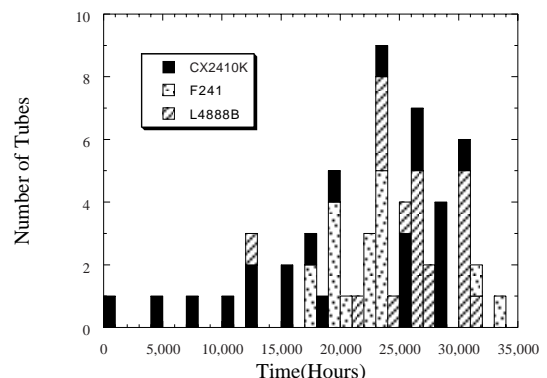


図 1：サイラトロン運転時間分布
(2001 年 6 月 5 日現在)

¹ E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

3.2 サイラトロンの故障

1998年9月から2001年6月5日までに14本のサイラトロンが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9割を占める。これは所定の充電電圧で、正常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が行われるがこの調整で自爆や大きなジッター（数10ns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。これも大きな放電音と光りを発生する。

表2：故障の内訳

故障項目	CX2410K	F241	L4888B
耐圧不良	3	3	6
アノード部放電	0	0	1
補助グリッド(G1)の放電	1	0	0
計	4	3	7
平均寿命(時間)	10,115	15,596	11,457

図2に故障サイラトロンの寿命分布を示す。約1万時間に中心がある分布をしているが、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。まだ統計数が十分でないこと、また収集されたデータの中にはまだKEKB運転条件でない以前の運転条件で運転されたものも含まれており、同じ運転条件での比較ができないことから、まだサイラトロンの種類による寿命の有意差は言えない。

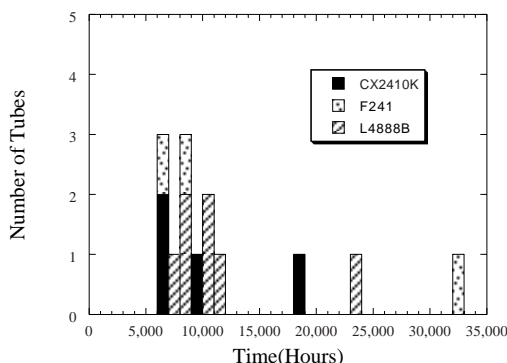


図2：故障サイラトロンの寿命分布

4. サイラトロンの分解調査

サイラトロンの故障原因を調査するため故障したCX2410K 4本全部を Marconi 社へ送り分解調査を行った。調査内容は、先ずサイラトロンの試験を行い

動作状態を再確認した後分解してカソード、グリッド、セラミック、アノード、電極等の状態を検査した。



図3：故障サイラトロンのアノードギャップ部



図4：故障サイラトロンのアノード部

図3、4に耐圧不良で故障した1つのサイラトロン（寿命時間：18,432時間）のアノードギャップ部とサイラトロンのアノード部の写真を示す。図3で、セラミック壁に電極材が多量に付着（黒く見える部分）していることが分かる。この状態では、高い電圧を保持して良好な動作を得ることは困難で、耐圧不良の原因となる。他の故障サイラトロンについても同様であった。図4で、アノード表面はかなり損傷しておりまたハッキリした溝が見られる。これは高速で高エネルギーの電子が衝突したためで、サイラトロンを低いガス圧で長時間動作させたことを示している。ガス圧低下の原因としてはヒータ及びリザーバ電圧の低下が考えられる。他の故障サイラト

ロンについても同様の状態が見られた。また耐圧不良サイラトロンすべてに、ヒータ及びリザーバ接続端子がひどく酸化していた。G1 放電による故障サイラトロン(寿命時間:9775 時間)はカソード部で多量のカソード材がヒートシールドの内側に付着し、正常な放電が出来なくなっていた。この原因として低いヒータ電圧で動作させたことが考えられる。他のグリッド、セラミック、アノード、電極等の状態は非常に良好であった。

4本の分解調査の結果から、サイラトロン使用上の問題点として以下のことが上げられる。(1)低いヒータ電圧での使用。(2)低いガス圧での使用。(3)ヒータ及びリザーバのリード線接続端子の酸化。(1)、(2)、(3)とも共通することであるが、端子接続の不良が考えられる。端子接続時には注意を払っているものの中には緩んでいるものがこれまでも見られたので今後特に注意を要する。また、これと合わせてヒータ及びリザーバのメータインターロックのリミット値を狭めることで監視を強化することも必要である。(2)は、正常なガス圧を維持することは重要であり、適時のリザーバ電圧調整(レンジング)が要求される。(3)は端子部及びカソード部が非常に高温になったことを示すもので、冷却方法の問題も考えられる。冷却方法については、現在サイラトロンは横からファンで空冷する方法をとっている。この方法では冷却する部分が片寄り、部分的な冷却不足を生む。特にカソード部の冷却は不十分である。この改善としては、冷却方法をカソードの下から強制空冷する煙突型空冷方式に変更することを考えている。この方法は接続端子が酸化するのを防止できるだけでなく均一にサイラトロンを冷却することができる。この方式の設計、試作はすでに終了しており、今年の秋の運転から実機試験する予定である。

5. サイラトロンのレンジング

レンジングは、サイラトロンを正常にまた安定に動作させるために必要な調整である。KEK ではリザーバ電圧を上げ下げして、連続導通状態(上限値)と 10 ns 以上のジッターが発生する状態(下限値)を探し、その平均値を最適設定値とする方法が採用されている^[4]。調整は 0.2 V 刻みで、また管内の放電状態を安定化させるために 10 分間の間を置きながら行われる。図5にリザーバ電圧とジッターとの関係の測定例を示す。図に示すようにリザーバ電圧の調整はサイラトロンのジッター及び電圧保持能力に大きく影響を与えるので、レンジングは極めて重要な調整である。調整後ジッターは通常、10 ns 以下に押さえられる。この調整は、リニアック全サイラトロンに対して最低年1回実施している。図6に過去3回おこなわれた F241 サイラトロン4本のレンジングによるリザーバ電圧設定値の経時変化の例を示す。レンジングによってリザーバ電圧の設定値が時間とともに緩やかに増加していることがわかる。

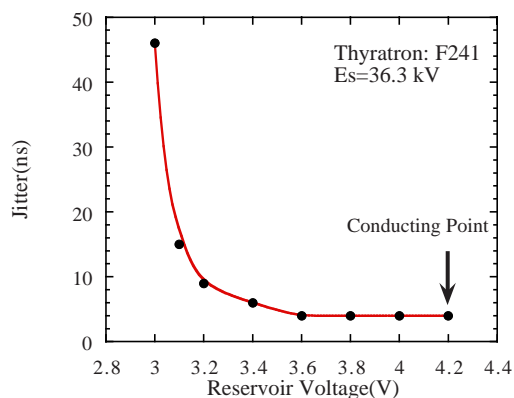


図5: サイラトロンのリザーバ電圧とジッターとの関係

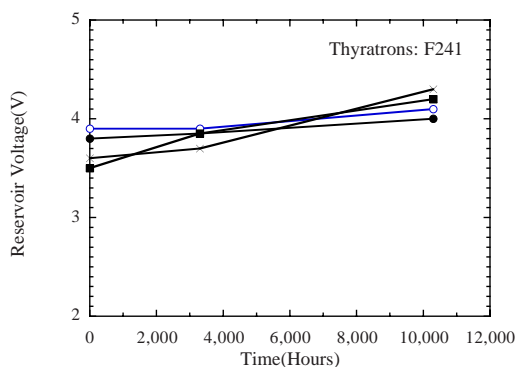


図6: レンジングによるリザーバ電圧設定値の経時変化

6. まとめ

KEK 8GeV リニアックのクライストロン電源は 59 本のサイラトロンを使用して順調に運転されている。今後もサイラトロンの運転、特性データは蓄積され、サイラトロンの性能評価及び長寿命化対策に活用される。

謝辞

サイラトロンの分解調査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] 小林 仁, “KEKB 電子陽電子入射器の現状”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug.1-3, 2001
- [2] M. Akemoto, et al., “Thyratron Performance in the KEK 8 GeV Linac”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2000)213-215.
- [3] H. Honma, et al., “Upgrade of the PF 2.5 GeV Linac Klystron Modulator for the KEKB”, KEK Preprint 94-146, 1994
- [4] H. Iijima, et al., “Hydrogen Thyratron Ranging(Tuning Method of Reservoir Voltage) of Klystron Modulator”, Proceedings of the 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1991)139-141.