

KEK 電子陽電子入射器における高周波源の運転保守

OPERATION AND MAINTENANCE ACTIVITY OF RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC

馬場昌夫^{#,A)}, 今井康雄^{A)}, 東福知之^{A)}, 熊野宏樹^{A)}, 諸富哲夫^{A)},
 荒川大^{B)}, 明本光生^{B)}, 片桐広明^{B)}, 設楽哲夫^{B)}, 竹中たてる^{B)}, Qiu Feng^{B)}, 中島啓光^{B)}, 中尾克巳^{B)}, 福
 田茂樹^{B)}, 本間博幸^{B)}, 松本利広^{B)}, 松本修二^{B)}, 松下英樹^{B)}, 三浦孝子^{B)}, 矢野喜治^{B)}, 道園真一郎^{B)}

Masao Baba^{#,A)}, Yasuo Imai^{A)}, Tomoyuki Toufuku^{A)}, Hiroki Kumano^{A)}, Tetsuo Morotomi^{A)},
 Dai Arakawa^{B)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Tetsuo Shidara^{B)}, Tateru Takenaka^{B)}, Feng Qiu^{B)},
 Hiromitsu Nakajima^{B)}, Katsumi Nakao^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}, Hiroyuki Honma^{B)}, Toshihiro Matsumoto^{B)},
 Shuji Matsumoto^{B)}, Hideki Matsushita^{B)}, Takako Miura^{B)}, Yoshiharu Yano^{B)}, Shinichiro Michizono^{B)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

Abstract

Sixty high-power klystrons are used at the KEK electron-positron linac. The upgrade work to SuperKEKB has been started. And beam operation for PF and PF-AR has been carried out since 2011 using 24 units of the klystrons. Average operational time of the klystrons in use is 47,000 hours, and some of the klystrons are used for 100,000 hours. In a failure example, the fault resulting from long-term continuous use exists. This paper also summarizes the maintenance work of the rf modulator parts.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では、高周波源として 60 台の大電力クライストロンをクライストロンギャラリーに設置している。年間約 7,000 時間の連続運転を行ってきた^[1]。2011 年度以降は SuperKEKB へのアップグレード作業が開始^[2]され、これと並行して PF と PF-AR の 2 つのリングへの入射に必要な 24 台の大電力クライストロンを使ったビーム運転を行っている。

本稿ではクライストロン、サイラトロンなどに関する統計や電源機器の保守についてまとめる。

2. クライストロンアセンブリ

Figure 1 に現在のクライストロン使用状況及び 2000 年度以降故障で交換したものの使用時間分布を示す。現在使用中のクライストロンは、5,000～10,000 時間運転しているものが 7 台で最も多い。この 7 台は 2009 年度に集束電磁石不具合等の理由で交換^[3]したものである。これらの場所は 2010 年度まで年間約 7,000 時間運転していたが、2011 年度以降は SuperKEKB アップグレードのためのビーム調整時のみ使用しているため、年間約 500 時間以下の運転にとどまっている。これに対して、1998 年の KEKB ビーム増強時前後に設置された 85,000 時間以上運転しているものが 10 台ある。この中には 10 万時間に達しているものもある。

故障クライストロンの平均運転時間は約 36,000 時間であるが、現在使用中クライストロンの平均運転

時間は約 47,000 時間であり、年々クライストロンの寿命が延びてきている。

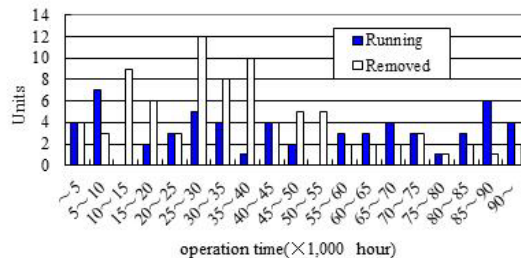


Figure 1: Klystron operation hour-of-use distribution.

Table 1 に 2000 年度以降撤去したクライストロンアセンブリの撤去原因と年度毎の交換台数を示す。

Table 1 : The exchange number of klystron assembly.

Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total	
The number of the klystron assembly exchange	9	9	10	8	6	6	5	7	1	13	1	4	5	84	
Exchange reason	Decrease in emission	2	1	0	2	3	2	3	1	0	0	0	1	15	
	Klystron oscillation	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	
	Klystron heater disconnection	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	4	
	Vacuum leak of the wave guide (After klystron assembly removal)	1 (4)	2 (2)	1 (2)	1 (1)	0 (2)	0 (1)	0 (1)	0 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	0 (0)	6 (14)
	Malfunction of Focus Coil	0	2	0	3	1	2	2	1	1	9	0	1	0	22
	Deterioration of the insulating oil	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	Malfunction of the pulse transformer	4	3	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	13
	Others	2	0	1	0	1	0	0	4	0	4	1	1	3	17

babam@post.kek.jp

2012 年度は 5 台の交換を行った。交換理由の内訳は、エミッション減少^[4]、クライストロンヒーター断線^[5]、クライストロン出力口導波管冷却水配管からの水漏れ、クライストロン内部真空の急激な悪化、クライストロンもしくはパルストランスの放電によるインターロック作動回数の増加であった。

このうち、クライストロン出力口導波管冷却水配管からの水漏れは運転中の現場確認時に確認されたものである。水漏れ発見時はクライストロン集束電磁石の下部にある水抜き孔付近に水溜まりが出来ていた。この水抜き孔からは 1 秒間に 1 滴程度の水漏れが続いていた。この時点では水漏れ箇所は特定出来ていなかったが、運転での使用は不可能と判断し即時交換を行った。Figure 2 に運転中の水漏れを発見した際の様子を示す。

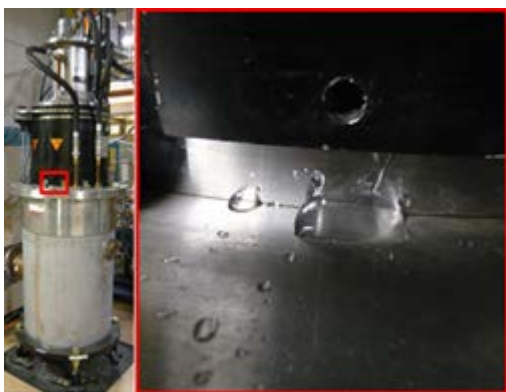


Figure 2: The water leaks from drain hole at focus coil of klystron.

撤去後、アセンブリを解体してクライストロン単体での通水試験を行ったところ、クライストロン出力口導波管冷却水配管からの水漏れを確認した。Figure 3 に冷却水配管の水漏れ発生箇所を示す。

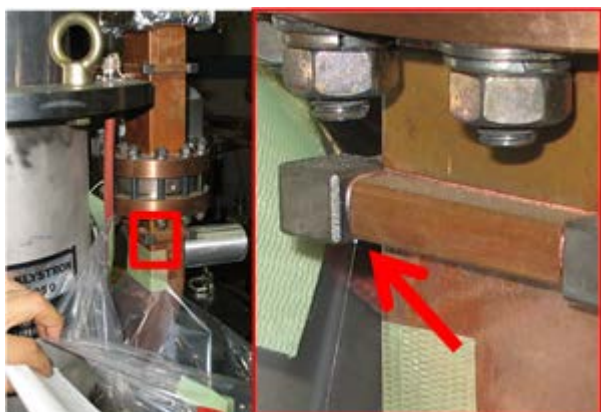


Figure 3: The point of water leaks from wave guide .

このクライストロンの運転時間は 96,000 時間であり、使用していたクライストロンの中では最も長時間の部類に属するものであった。今までに無い事例であるが、原因は長期運転による経年劣化と推測される。長期運転しているクライストロンが多く

なった現在では今後も多く発生する可能性があり、定期的な観察が必要である。

また、クライストロン内部真空の急激な悪化により交換したものは、運転中にクライストロン内部排気用イオンポンプ電源の電流値が閾値の $10\mu\text{A}$ を超えたことによりインターロックが作動した。通常運転時、イオンポンプ電源電流値は $1\mu\text{A}$ 以下で推移しているが、このクライストロンはインターロック作動後、ヒーターのみ通電している状況下でも真空度が悪化し続け、約 1 時間のうちに $50\mu\text{A}$ 以上までに達した。使用不能と判断しアセンブリ交換に至った。

撤去したアセンブリを解体して調査したところ、クライストロン碍子の一部に放電が原因と思われる損傷が確認された。Figure 4 にクライストロン碍子損傷箇所の様子を示す。クライストロン内部真空悪化はこの放電痕からのリークが原因であった。



Figure 4: The insulator damage at a klystron and observed penetration hole at the ceramic insulator.

3. サイラトロン

Figure 5 に現在のサイラトロン使用状況及び 1998 年度以降故障したものの使用時間分布を示す。

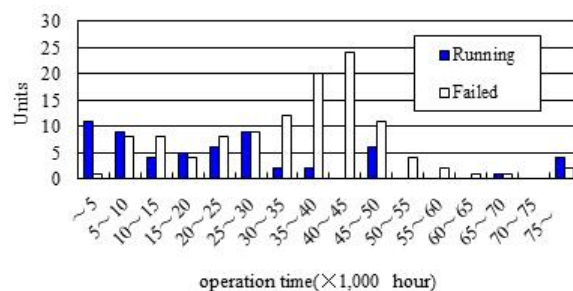


Figure 5: Thyatron operation hour-of-use distribution.

現在使用しているサイラトロンの平均運転時間は約 25,000 時間である。また、故障サイラトロンの平均運転時間は約 37,000 時間である。故障台数が最も多いのは 40,000~45,000 時間運転したものであり、40,000 時間を超えたサイラトロンは寿命が近いと考えられる。入射器では 45,000 時間以上継続して使用しているものも 10 台あり、中でも 10 万時間を超えているものが 2 台あるため、定期的に動作状況を確認

認し監視を続ける。

2012年度の故障によるサイラトロン交換台数は4台であった。内訳は、リザーバガス減少^[6]によりキープライブ電流が流れなくなったものが2台、運転中にサイラトロンヒーター電流低下によるインターロックの作動が多発したものが2台であった。これはサイラトロンヒーター通電時、ヒーター用ケーブルを確認したところ、端子固定用のナットが過熱により赤く発光していた。Figure 6にこの様子を示す。(a)側はフラッシュを使用、(b)側はフラッシュ未使用で撮影した画像である。この部分での接触抵抗が増大したことが原因でヒーター電流が流れにくい状況になったと推測される。

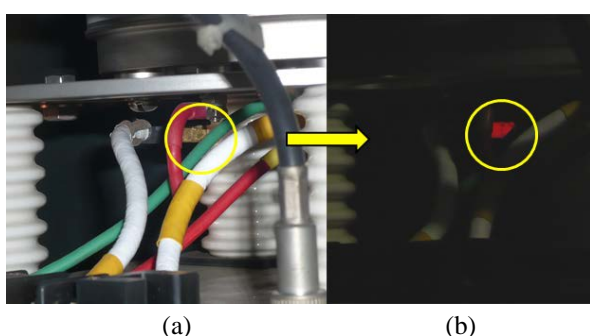


Figure 6: Overheating of thyatron heater terminal.

4. パルス電源組み込み回路

KEK 電子陽電子入射器では大電力高周波源の電源として高圧パルス電源を使用している。このパルス電源は主に制御回路部、直流電源部、充電回路部、放電回路部で構成され、約20種類の組み込み回路を使用している。現在は SuperKEKB のアップグレードのため、パルス電源の改造・小型化^[7]が順次進められているが、組み込みユニットの大半は従来のものをそのまま使用している。

加速器の安定した運転を行うため、組み込み回路の交換予備品を各ユニット単位で常備出来るよう保守作業を行っている。また、交換部品に関しても不足の無いように随時在庫確認と補充を行っている。

Figure 7に2011年度以降の故障原因の割合を示す。

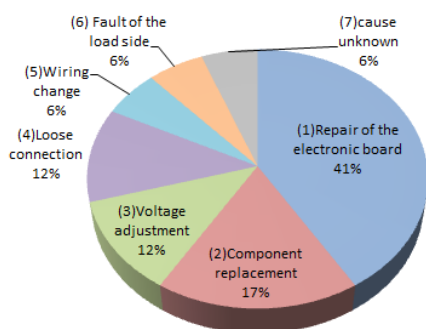


Figure 7: Cause of the module failures.

基板内部品故障(Fig.7の(1))は故障原因の約4割程度を占めている。これについては主にオシロスコープを用いて各実装部品の入出力信号を確認し、故障

箇所を特定している。次に続く故障理由は、(2)基板内修理以外の部品の劣化や寿命による部品交換、(3)制御回路部内にあるコントロール電源ユニットの基準電圧レベルの調整、(4)基板やコネクタ等の接触不良による誤動作、(5)ノイズ対策や熱対策のためのユニット内配線の取り直し変更や手直しがある。他には後日調査により(6)負荷側の原因と判明したものや、(7)症状再現に至らず点検のみ実施したものととなっている。

故障により撤去した組み込み回路はテスト用電源と模擬負荷抵抗を使用してユニット単体での動作確認を行い、不具合原因を調査している。不具合対処後はテストスタンドのパルス電源に組み込み、ランニング試験を行い合格したものを予備品としている。

組み込み回路ユニットの中には製造から20年以上経過しているものが多数あるため、今後は長期連続使用に起因する回路部品故障の増加が予想される。修理内容をトラブル報告書として記録し、ユニット名と製造番号単位で修理履歴を検索出来るよう台帳管理をすることで情報の検索性を上げ、修理が効率よく行えるよう工夫を行っている。

5. まとめ

定期点検によるデータ取得を行い、不具合の事前予測や事前交換を行うことで、加速器停止を伴う突発的なトラブルは減少傾向にある。一方で長期連続使用に起因する新たな不具合が年々増えてきており、今後もこの傾向は続くものと予想される。今後もデータの蓄積を継続し、増加傾向にある不具合に迅速に対応できるよう努める。

参考文献

- [1] F.Miyahara, "Present Status of the KEK Electron/ Positron Injector Linac", Proceedings of this Meeting.
- [2] T.Higo, "Linac Upgrade for SuperKEKB", Proceedings of the 37th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2012, WEUH03.
- [3] M.Baba, et al, "MAINTENANCE ACTIVITY OF HIGH-POWER RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC", Proceedings of the 35th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2010, THPS046.
- [4] H.Kumano, et al, "Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac (II)", Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2006, pp.850-852.
- [5] Y.Imai, et al, "Maintenance Activity of Klystrons and Thyratrons in KEK Electron-Positron Linac", Proceedings of the 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2007, TP18.
- [6] 明本光生, 他, "KEK 8GeV リニアックでのサイラトロン使用状況", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003, pp.321-323.
- [7] M.Akemoto, et al, "PRESENT STATUS OF KLYSTRON MODULATORS FOR THE KEK ELECTRON-POSITRON INJECTOR LINAC", Proceedings of the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2008, pp.892 - 894.