

KEK 電子陽電子入射器における大電力高周波源の運転状況(2023 年度)

OPERATION STATUS OF RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC(FY2023)

東福知之^{#, A)}, 馬場昌夫^{A)}, 今井康雄^{A)}, 久積啓一^{A)},
明本光生^{B)}, 荒川大^{B)}, 片桐広明^{B)}, 川村真人^{B)}, 設楽哲夫^{B)}, 竹中たてる^{B)}, 中島啓光^{B)},
夏井拓也^{B, C)}, 松本利広^{B, C)}, 松下英樹^{B)}, 三浦孝子^{B, C)}, 矢野喜治^{B)}, 王盛昌^{B, C)}, 松本修二^{B, C)}
Tomoyuki Toufuku^{#, A)}, Masao Baba^{A)}, Yasuo Imai^{A)}, Keiichi Hisazumi^{A)},
Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Tetsuo Shidara^{B)}, Tateru Takenaka^{B)},
Hiromitsu Nakajima^{B)}, Takuya Natsui^{B, C)}, Toshihiro Matsumoto^{B, C)}, Hideki Matsushita^{B)}, Takako Miura^{B, C)},
Yoshiharu Yano^{B)}, Wang Sheng Chang^{B, C)}, Shuji Matsumoto^{B, C)}
^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.
^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
^{C)} SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

Abstract

The KEK electron-positron linac is a linear accelerator capable of producing and accelerating electrons up to 7 GeV and positrons up to 4 GeV, and was operated for about 5,400 hours during FY2023. This accelerator utilizes a total of 61 high-power S-band klystrons as rf sources and thyratrons as high-voltage switches. The average operational time of the klystrons, thyratrons and rf windows in use are 82,000 hours, 40,000 hours and 110,000 hours, respectively. We have replaced one klystron and four thyratrons in FY2023. This paper, we report the operational statistics of the klystrons, thyratrons, and rf windows in FY2023, also we state the maintenance of those devices and failures.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器は、高周波源として総数 61 台の大電力 S バンドクライストロンが使用されており、最大で 7 GeV の電子および 4 GeV の陽電子を加速する線形加速器である。2023 年度中は約 5,400 時間の運転が行われた。本稿では 2023 年度のクライストロン、サイラトロン、導波管高周波窓に関する統計及び高周波源に関する不具合事例と運転維持管理について報告する。

2. クライストロンアセンブリ

2.1 運転統計

KEK 電子陽電子入射器で使用しているクライストロンの仕様は周波数 2856 MHz、ピーク出力 40 MW、RF パルス幅 4 μ s、繰り返し 50 pps であり[1]、集束電磁石、タンク、パルスランスで構成されている。

クライストロンは PV-3050 / PV-3030A4 / PV-3030A3 及び E3754 / E3730A を使用しており、総数 61 台の内訳は PV-3050 / PV-3030A4 / PV-3030A3 が約 6 割であり、E3754 / E3730A が約 4 割である。

Figure 1 に現在使用しているクライストロンの運転時間分布及び 2000 年度以降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。現在使用しているクライストロンの平均運転時間は約 82,000 時間である。昨年度から比べて約 5,000 時間増加した。PV-3050 / PV-3030A4 / PV-3030A3 の平均運転時間が約 83,000 時間であり、

E3754 / E3730A の平均運転時間は約 80,000 時間であった。近年は E3754 / E3730A のクライストロンを設置する割合が多かった為、E3754 / E3730A の平均運転時間が短くなることを予想していたが、PV-3050 / PV-3030A4 / PV-3030A3 と同程度の運転時間となった。

撤去したクライストロンアセンブリにおいてクライストロンが健全だったものについては再試験を行ない使用されている為、平均運転時間は長くなる傾向にある。

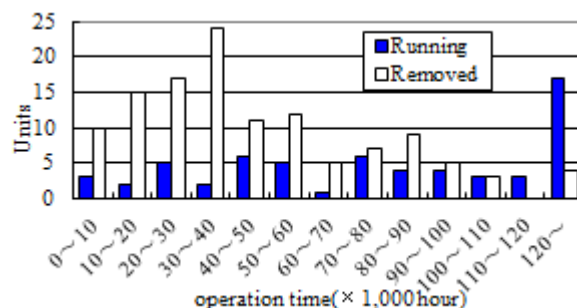


Figure 1: Klystron age profile as of March 2024.

2.2 2023 年度のクライストロンアセンブリ交換理由

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理由と年度毎の交換台数を示す。

2023 年度は 1 台のクライストロンアセンブリの交換を行なった。下記に詳細を記す。

[#] toufuku@post.kek.jp

Table 1: Exchange Reason of Klystron Assembly

Fiscal Year	The number of the klystron assembly exchange	Principal cause							
		Decrease in emission	Klystron oscillation	Klystron heater disconnection	Vacuum leak of the wave guide (After klystron assembly removal)	Malfunction of the pulse Formers Coil	Malfunction of the insulating oil	Malfunction of the pulse transformer	Others
2000	9	2	0	0	1(4)	0	0	4	2
2001	9	1	1	0	2(2)	2	0	3	0
2002	10	0	2	0	1(2)	0	3	3	1
2003	8	2	0	0	1(1)	3	0	2	0
2004	6	3	0	1	0(2)	1	0	0	1
2005	6	2	0	1	0(1)	2	0	1	0
2006	5	3	0	0	0(1)	2	0	0	0
2007	7	1	1	0	0(1)	1	0	0	4
2008	1	0	0	0	0(0)	1	0	0	0
2009	13	0	0	0	0(0)	9	0	0	4
2010	1	0	0	0	0(0)	0	0	0	1
2011	4	0	0	1	1(0)	1	0	0	1
2012	5	1	0	1	0(0)	0	0	0	3
2013	3	0	0	1	0(0)	1	0	0	1
2014	1	0	0	0	0(0)	0	0	0	1
2015	3	0	0	0	0(0)	0	0	0	3
2016	2	0	0	0	0(0)	0	0	0	2
2017	4	0	0	0	0(0)	4	0	0	0
2018	6	0	0	0	0(0)	2	0	2	2
2019	4	1	0	1	0(0)	1	0	0	1
2020	1	1	0	0	0(0)	0	0	0	0
2021	6	0	0	1	0(0)	0	0	0	5
2022	7	0	0	0	0(0)	2	0	0	5
2023	1	0	0	0	0(0)	1	0	0	0
Total	122	17	4	7	6(14)	33	3	15	37

- クライストロン集束電磁石の絶縁抵抗低下による交換。
 KL_C5 (型式 E3730A) 運転時間 134,868 h

毎年夏期保守期間中に行なっているクライストロン集束電磁石の絶縁抵抗測定において#3 コイルが 21 kΩ、#4 コイルが 3.3 MΩ まで低下していた(通常は 1000 V 印加し 2000 MΩ 以上)。長期保守期間中だったため、クライストロンアセンブリを撤去し、集束電磁石のみ交換を実施。試験スタンドで高圧印加試験を行ない、異常がない事を確認後、再設置を行なった。

2.3 クライストロンの不具合事例

- クライストロン過電流によるインターロック多発

2023 年度は KL_12 ユニット及び KL_61 ユニットにてクライストロンの過電流インターロック多発のトラブルが発生した。Figure 2 に KL_12 ユニットで発生した際のパルス電源の設定電圧及びクライストロン出力、クライストロンの 1 次側ヒーター電圧の履歴を示す。段階的にパルス

電源の設定電圧を下げていったが、6 kV 下げてもダウンが収まらなかった。通常、1~2 kV 程度下げるとダウンが収まり、下げた電圧で運転を継続し、その後必要があれば長期保守期間中にクライストロンアセンブリの交換を行なっている。この時は 6 kV 下げてもダウンが収まらなかった事からクライストロンの交換が必要と思われたが、クライストロンのヒーター電圧を変更して状況が変わるか確認する事となった。

クライストロンの 1 次側ヒーター電圧を 110 V から 115 V に上げた状態で高圧を印加。ダウンせずに立ち上がった。その後、パルス電源の設定電圧をダウンする前の値まで上げたが、過電流のインターロックは発生しなかった。この状態で 1 日運転後、1 次側ヒーター電圧を 110 V に戻したが、過電流のインターロックが発生する事はなかった。

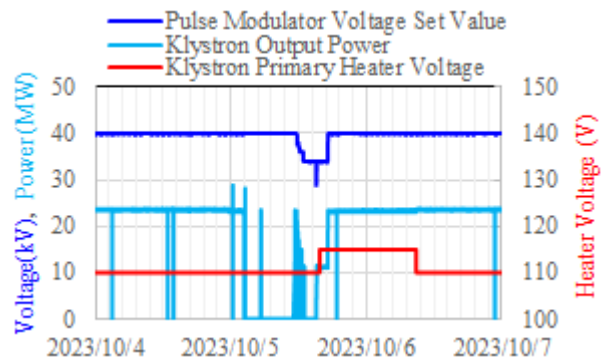


Figure 2: History of klystron heater voltage, pulse modulator voltage, and klystron output power.

KL_61 ユニットについてもクライストロンの 1 次側ヒーター電圧を上げて運転を行なったが、KL_12 ユニットのようにすぐには収まらず、しばらく過電流のインターロックは続いた。電源交換作業の為、クライストロンのヒーター通電を停止するタイミングがあった。この作業が終わった後に運転を再開したところ、過電流のインターロックが発生しなくなった。

KL_12 ユニット、KL_61 ユニット共にクライストロンヒーター電圧を変更した(通電停止も含めて)後に過電流のインターロックによるダウン頻度が収まっている。今後も過電流のインターロックが多発した場合は同様にクライストロンヒーター電圧を変更して症状が改善するか検証を行なっていくと思う。

- クライストロン冷却水配管からの水漏れ

2021/4/22 に KL_C1 ユニットにてクライストロン冷却水配管にて水漏れトラブルが発生し、クライストロンアセンブリの交換を行なった[2]。2023/2/13 に KL_C3 ユニットにて同様のトラブルが発生。Figure 3 にこの時の対処の様子を示す。クライストロンアセンブリの交換は行わず、設置した状態で冷却水配管の水漏れ箇所に金属用補修材を塗布し、水漏れ箇所を修復。運転への復帰が可能となった。上記 2 例共に同じ箇所でも水漏れを起こしていた為、2023 年度の夏期保守期間中にギャラリーで使用しているクライストロンについて予防措置として同じ箇所に金属用補修材の塗布を行なった。

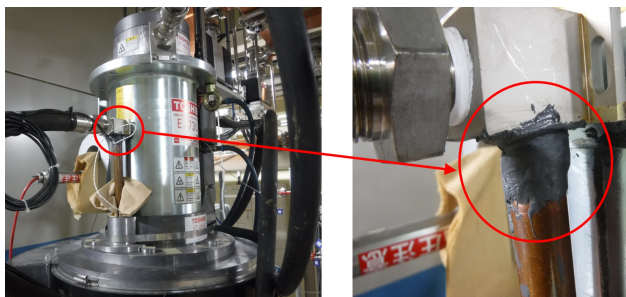


Figure 3: Water leak repair area.

3. サイラトロン

3.1 運転統計

KEK 電子陽電子入射器では、パルス電源のスイッチとして 45 kV、4.5 kA をスイッチングするサイラトロン[3]を使用しており、全ユニット L4888B(Stellant Systems 社製)を使用している。一昨年より CX1836A(E2V 社製)を購入して試験を開始しており、運転に投入できるように準備を進めている。

Figure 4 に現在使用しているサイラトロンの使用状況及び 1998 年度以降撤去したサイラトロンの使用時間分布を示す。現在使用しているサイラトロンの平均運転時間は約 42,000 時間であり、故障により撤去したサイラトロンの平均運転時間は約 40,000 時間である。グラフから分かるように運転時間 40,000~50,000 時間に撤去した台数が最も多く、次いで 30,000~40,000 時間に撤去した台数が多い。30,000 時間を超えた時点でいつ不具合が起きてもおかしくない状態であると言える。

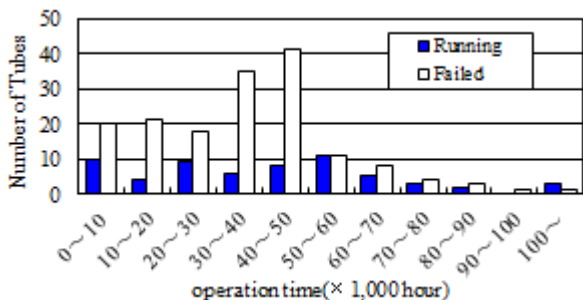


Figure 4: Thyatron age profile as of March 2024.

3.2 2023 年度のサイラトロン交換理由

2023 年度は 4 台のサイラトロンの交換を行なった。下記に詳細を記す。

- サイラトロン上部からの放電音及び放電光発生による交換。

KL_17 (型式 L4888B) 運転時間 63 h

加速器運転中の 4 時間毎の現場巡回時にサイラトロン上部付近から 1~2 分に 1 回程度の割合で放電音が聞こえる事に気付き、調査を行なったところ、放電時にサイラトロン上部から放電光が時々漏れてきている事が分かった。さらに調査を進めるとサイラトロン上部の放熱フィ

ンが動く事が分かり、増し締めを実施。この状態で様子を見ていたが、サイラトロン上部からの放電音が再発した為、交換に至った。

取り外したサイラトロンを上部から目視確認を行なったところ、Fig. 5 に示すように放電痕と思われる跡が見られた。放熱フィンを外そうと試みたが、外すことができなかった。メーカーへ問い合わせしたところ、通常は外れるとの回答であった。今後取り外しを試みる予定である。

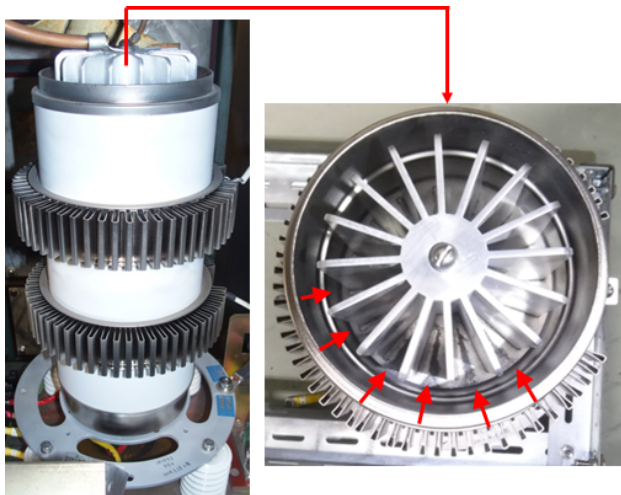


Figure 5: Discharge marks.

- ヒーターケーブル端子温度上昇による交換(2 台)
KL_15 (型式 L4888B) 運転時間 15,000 h
KL_C8 (型式 L4888B) 運転時間 6,500 h

KL_15, KL_C8 ユニット共にヒーター電流またはリザーバー電流が閾値以下で作動するインターロックが多発した為、調査を行なったところサイラトロン真下のヒーターケーブル端子が高温となっている事が分かり、交換を行なった。

- サイラトロンがファイヤしない事による交換
KL_C4 (型式 L4888B) 運転時間 79,000 h

長期保守期間後の立ち上げ時、サイラトロンがファイヤせず。リザーバー電圧を上げたが症状改善せず。交換を行なった。

4. 導波管高周波窓の運転統計

KEK 電子陽電子入射器ではクライストロン出力部と導波管部に高周波窓を使用しており、クライストロンアセンブリに不具合が起きた場合でも加速管内を大気開放することなく交換を行なう事が可能である[4]。

Figure 6 に現在使用している導波管高周波窓の使用状況及び 1998 年度以降撤去したものの使用時間分布を示す。現在使用している導波管高周波窓の平均運転時間は約 11 万時間であり、約半数の 29 台が 12 万時間以上使用している。

PCB 含有機器調査[5]の為、2020 年の長期保守期間

よりクライストロンアセンブリの撤去を行なう頻度が増えて
 いる。クライストロンアセンブリ撤去時にはクライストロン側
 導波管内の 대기開放を行なっている。2024/3/31 時点で
 運転に使用しているクライストロンアセンブリ 61 台中 53
 台で PCB 含有機器の調査が完了しているが、この台数
 において導波管高周波窓でのリークが発生していない
 事は適正な運転電圧の管理ができていないからと言える(ク
 ライストロン出力部の高周波窓のリークは確認されてい
 る)。

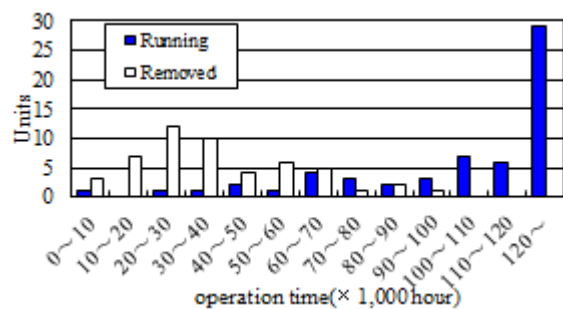


Figure 6: RF Window age profile as of March 2024.

5. まとめ

2023 年度のクライストロンアセンブリ交換台数は 1 件
 であり、多くはなかった。クライストロンの過電流インター

ロック多発にはクライストロンヒーター電圧を変える事が
 効果的であるかもしれない事が分かった。まだ事例数は
 少ない為、今後も同症状には同様の対応を行ない、効
 果的であるか検証していきたいと思う。

参考文献

- [1] T. Imai *et al.*, “Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug 4-6, Funabashi, Japan, 2004, pp. 317-319.
- [2] T. Toufuku *et al.*, “OPERATION AND MAINTENANCE ACTIVITY OF RF SYSTEM IN KEK ELECTRONPOSITRON LINAC(FY2021)”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, Online (Kyushu University), Japan, 2022, pp. 826-830.
- [3] 明本光生, 他, “KEK 8GeV リニアックでのサイクロトロン使用状況”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug 7-9, Kyoto, Japan, 2002, 8P-17.
- [4] T. Toufuku *et al.*, “Maintenance Activity of Klystrons and RF Windows at KEK e+/e- Linac”, Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Jul 20-22, Tosu, Japan, 2005, pp. 278-280.
- [5] M. Kawamura *et al.*, “EXCHANGE OF PCB CONTAINING EQUIPMENTS IN RF SOURCE OF KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-12, QST-Takasaki Online, Japan, 2021, pp. 887-889.