

KEK 電子陽電子入射器における高周波源および導波管高周波窓の運転保守 MAINTENANCE ACTIVITY OF RF SYSTEM AND RF WINDOWS IN KEK ELECTRON- POSITRON LINAC

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

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

KEK electron positron linac is a linear accelerator that has the ability to generate and accelerate electrons of up to 7 GeV and positrons of 4 GeV. It was operated for about 5,300 hours in FY2018. The linac consists of an injection unit followed by 59 rf units. A total of 60 high-power S-band klystrons are used as high-frequency sources, and 60 thyratrons are used as high-voltage switches. Average operational time of the klystrons and thyratrons in use are 64,000 hours and 31,000 hours, respectively. Six klystrons and four thyratrons were replaced in FY2018. Average operating time of the rf windows in the waveguide system is about 84,000 hours. There was no replacement after the 2013 maintenance to 2018. This paper, we report the failure cases and operation maintenance of statistics and high frequency sources on klystrons, thyratrons, and rf windows.

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 S バンドクライストロンが、また高電圧スイッチとして 60 台のサイラトロンが使用されている。2018 年度は約 5,300 時間の運転が行われた。

本稿ではクライストロン、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保守について報告する。

2. クライストロンアセンブリ

2.1 運転統計

クライストロンアセンブリは主にクライストロン、集束電磁石、タンク、パルストランスで構成され、仕様は周波数 2856MHz、平均パルス出力電力 40MW、RF パルス幅 4 μ s、繰り返し 50pps である[1]。

Figure 1 に 2019 年 3 月現在使用しているクライストロンの使用状況及び 2000 年度以降交換したものの使用時間分布を示す。現在使用しているクライストロンの平均運転時間は約 65,000 時間であり、不具合により撤去したクライストロンアセンブリの平均運転時間は約 39,000 時間である。目立って台数の多い運転時間帯は無いが、10 万時間を超えているクライストロンが 14 台で全体の

割以上を占めている。撤去したクライストロンアセンブリは解体して不具合原因を調査し、クライストロン自体が健全である場合に再使用するため、使用中のクライストロン平均運転時間は長くなる傾向にある。

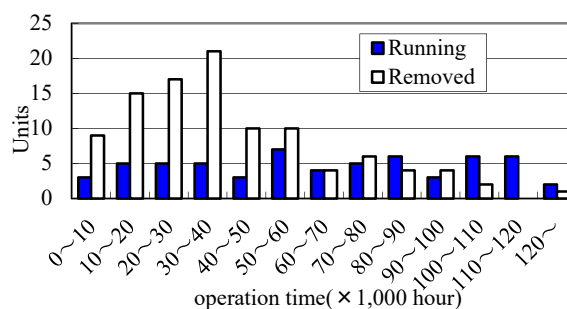


Figure 1: Klystron age profile as of March 2019.

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。2018 年度はクライストロン集束電磁石の絶縁抵抗低下[1]による交換が 1 台、クライストロン集束電磁石の水抜き穴からの漏水による交換が 2 台、パルストランスの不具合が 2 台、運転中にクライストロンの過電流インターロック多発[2]による交換が 1 台、計 6 台の交換を行なった。

[#] babam@post.kek.jp

Table 1: Exchange Reason of Klystron Assembly

Year	The number of the Klystron assembly ex change	Exchange reason							
		Decrease in emiss ion	Klystron oscillation	Klystron heater disconnection	Vacuum leak of the wave guide(After Klystron assembly removal)	Malfunction of the pulse Focus/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
Total	103	15	4	5	6(14)	29	3	15	26

2.2 クライストロンアセンブリのトラブル事例

以下、2018 年度に撤去したクライストロンアセンブリについて不具合内容詳細を示す。

(1) クライストロン集束電磁石絶縁抵抗低下による交換

- 2018/04/20 KL 45 運転時間 122,234(h)

運転中に集束電磁石のコイル電圧もしくは電流が閾値を超える事で作動するインターロックが NG となった。調査中にコイル側で絶縁抵抗計を用いて測定を行なったところ、#4 コイルが 0Ω 、その他コイルが ∞ であり、#4 コイルの絶縁抵抗が低下していることが判明した。撤去したアセンブリはテストホールで解体し、クライストロンは通水テストで異常が見られなかったため、別の集束電磁石と組み合わせて使用している。

(2) クライストロン集束電磁石の水抜き穴からの漏水による交換(2 台)

- 1 台目 2018/11/06 KL 13 運転時間 30,743(h)

運転中にクライストロン集束電磁石の水抜き穴より漏水が見られたため、集束電磁石の絶縁抵抗を測定したところ、#1~#4 コイル、#6 コイルは ∞ だったが、#5 コイルが $500k\Omega$ まで低下していたためアセンブリ交換となった。

撤去したアセンブリを解体してクライストロン単体の通水テストを行なった結果、導波管の冷却水パイプの繋ぎ目から多量の水が漏れ出てきた。Figure 2 に通水テスト時の漏水の様子を示す。

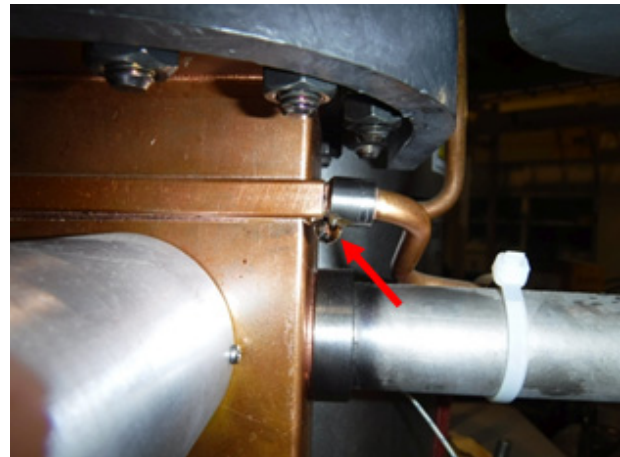


Figure 2: Water leakage at the pipe joint.

- 2 台目 2019/03/11 KL C6 運転時間 109,181(h)
運転中にクライストロンアセンブリ下に 2~3L 程度の水溜りがあり、クライストロン集束電磁石の水抜き穴から毎秒 1 滴の水が漏れ出ていたためアセンブリ交換となった。Figure 3 に水漏れ発見時の状況を示す。

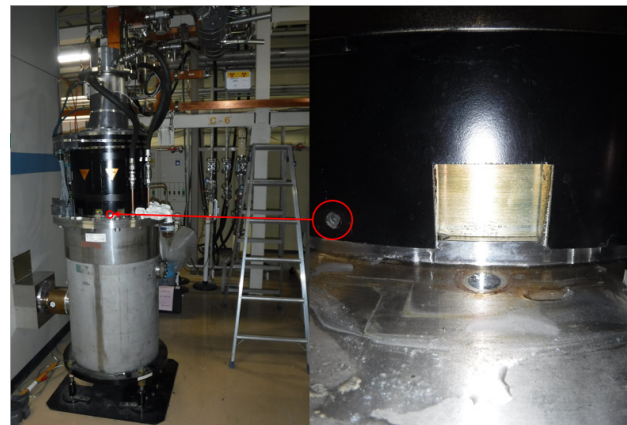


Figure 3: Water leakage from klystron magnet.

撤去したアセンブリは解体し、クライストロンと集束電磁石それぞれで通水テストと水圧試験機での加圧による確認、調査を行なう。

(3) パルストランスの不具合による交換(2 台)

- 1 台目 2018/06/14 KL C1 運転時間 30,463(h)

短期メンテナンスの点検作業時にクライストロンアセンブリタンク内の目視点検を行なった際、クライストロンヒータートランスを支えている碍子 4 本中 1 本が破損している事を確認した。Figure 4 にタンクの覗き窓から見た碍子の破損の様子を示す。

直近 1 カ月のインターロック作動履歴を確認したが、クライストロンの過電流インターロック、タンク内放電に関連するインターロックの履歴が無く、ヒータートランス脱落により放電を発生させる状態では無かったため、長期メンテナンスまで運転を継続した。

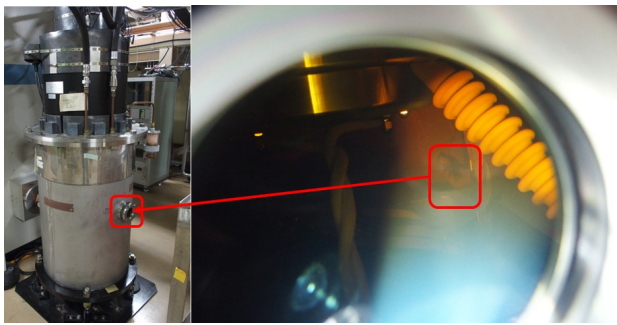


Figure 4: Broken insulator in the tank.

Figure 5 はクライストロンアセンブリを撤去解体後に撮影したパルストランスと破損箇所を拡大したものである。

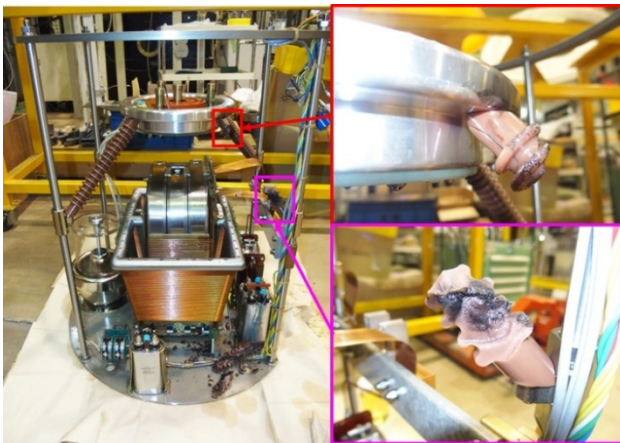


Figure 5: Pulse transformer and the broken insulator.

ヒータートランスに近い部分の碍子根元部分に亀裂と放電痕が見られるが、放電及び破損に至った原因は不明である。このパルストランスはメーカーにて碍子交換、点検により再生している。

- 2 台目 2018/07/11 KL_57 運転時間 82,401(h)

長期メンテナンス前に定期的実施している波形データ測定時にクライストロン電圧の波高値が前回測定時(2017/12/25)とのデータ比較で 35%程度変化していた。一方でクライストロン電流の波高値は殆ど変化していなかった。

【2018/07/11 測定】

- 2 次側電圧: 43.0V (322.5kV)
- 2 次側電流: 27.4V (274A)
- パービアンズ: 1.49[μ P]

【2017/12/25 測定】

- 2 次側電圧: 31.8V (238.5kV)
- 2 次側電流: 27.2V (272A)
- パービアンズ: 2.34[μ P]

Figure 6 にクライストロン電圧(CH1:青)、クライストロン電流(CH2:水色)波形データ比較を示す。

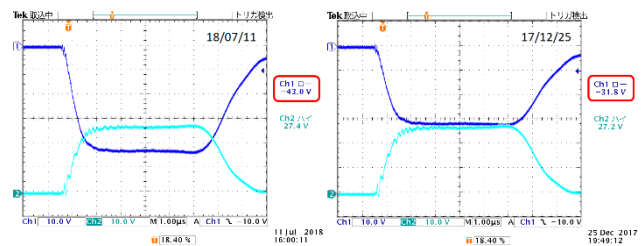


Figure 6: Klystron voltage and current waveforms.

クライストロン電圧波高値以外のモニター値に大きな変化がないことから、電圧モニター周りの不具合と推測し、長期メンテナンスまでの期間の運転を継続した。

Figure 7 にクライストロンアセンブリ撤去後、タンク内調査時に確認したクライストロン印加電圧測定用の容量分圧器(CD: Capacitive Divider)の不具合状況を示す。



Figure 7: Capacitive divider.

CD 本体のコロナリング裏側に接続されている分割比調整用コンデンサの接続が複数箇所外れた不具合が判明した。

(4) クライストロンの過電流インターロックが多発したため交換

- 2018/04/13 KL_C4 運転時間 109,187(h)

運転中にクライストロンの過電流インターロックが多発したため、オシロスコープでクライストロンのパルス電流波形の監視を行なった。Figure 8 に過電流インターロック作動によりダウンした際の波形を示す。

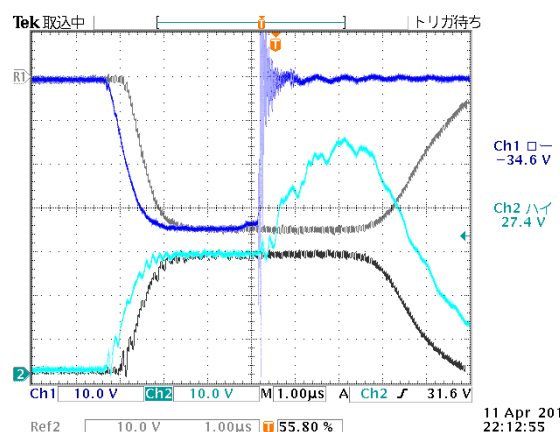


Figure 8: The waveforms when the interlock being on.

ダウン時のクライストロン電流波形に放電(電流が大きく増加)の履歴が見られた。Es(設定電圧)を 42kV(運転値)から 36kV まで徐々に下げて運転を継続していたが、状況は改善しなかった。

現場で Es を変更して過電流インターロック作動時のパルス音とクライストロン内部真空の変化が見られるか調査を行ったが、ダウン時にクライストロンタンク内部からの放電音は確認出来たが、放電による発光やクライストロンイオンポンプ真空に変化は見られなかった。

撤去後のクライストロンは内部真空の悪化が見られないため、別のパルストランスと組み合わせて試験を行なう予定である。

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 45kV、4.5kA をスイッチングするサイラトロンを使用しており、現在 CX2410K(e2V 社製)、CX2411(e2V 社製)、L4888B(Litton 社製)の 3 種類を使用[3]している。Figure 9 に現在のサイラトロンの運転状況及び 1998 年度以降故障のため交換したものの運転時間分布を示す。2019 年 3 月現在運転しているサイラトロンの平均運転時間は約 34,000 時間である。また、故障により交換したものの平均運転時間は約 38,000 時間である。

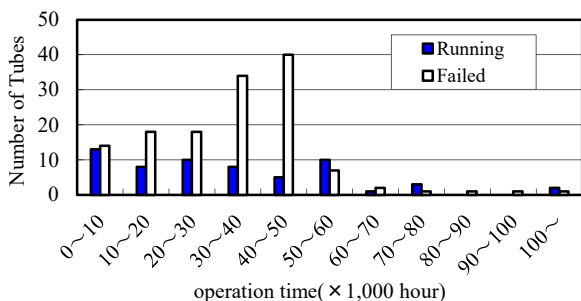


Figure 9: Thyatron age profile as of March 2019.

2018 年度は 11 台のサイラトロンを交換しているが、これは早期事前交換[4]の 7 台を含めた数である。事前交換以外の理由で交換した 4 台について、次項で詳細を記す。

3.2 サイラトロンのトラブル事例

以下、2018 年度に撤去したサイラトロンについて不具合内容詳細を記す。

(1) 型式:L4888B、S/N:100573(運転時間 29,396h)

運転中にサイラトロンヒーター電流またはリザーバ電流が閾値以下の時に作動するインターロック(Thy LV I(L))のダウンが発生したため、現場に監視カメラを設置してインターロック作動時の各メーター指示値を録画して調査した。インターロック作動時にヒーター電流、リザーバ電流が共に低下、リザーバ電圧が上昇している履歴を確認。サイラトロン故障と判断して交換を行なった。

(2) 型式:L4888B、S/N:100572(運転時間 30,092h)

運転中にキープアライブ電流低下のインターロック(I Keep(H,L))が作動。キープアライブ電源のメーター指示値が 167V、0A であった。キープアライブ電源とサイラトロンシャーシ間のケーブルを交換したが、キープアライブ電流が流れなかった。リザーバガス減少[3]に起因するサイラトロン寿命と判断して交換した。

(3) 型式:L4888B、S/N:101068(運転時間 8,125h)

運転中に充電電流が閾値を超えて過電流となった時に作動するインターロック(Idc(H))の発生頻度が増加。現場確認時にサイラトロンの自爆が時々発生していた。対処としてリザーバ電圧を 3.5V から 3.2V に調整したが改善せず。リザーバ電圧調整後のジッタが 30ns 程度と大きく、リザーバ電圧を更に下げる調整が出来なくなったため、サイラトロンを交換した。

(4) 型式:L4888B、S/N:100568(運転時間 44,904h)

運転中のサイラトロンが連続放電したため、リザーバ電圧を 5.2V から前回サイラトロンレンジング[3]の下限值である 4.9V まで下げたが、ジッタが大きくなった(40~50ns 程度)ため、サイラトロン寿命と判断して交換した。

4. 導波管高周波窓

高周波窓は真空を保持し高周波を通過させる為に用い、クライストロン出力部と導波管部に使用している。導波管高周波窓はクライストロンアセンブリ交換の際に加速管を真空に保つため設置している。[5]

Figure10 に現在の導波管高周波窓の使用状況および、1998 年度以降撤去したものの使用時間を示す。

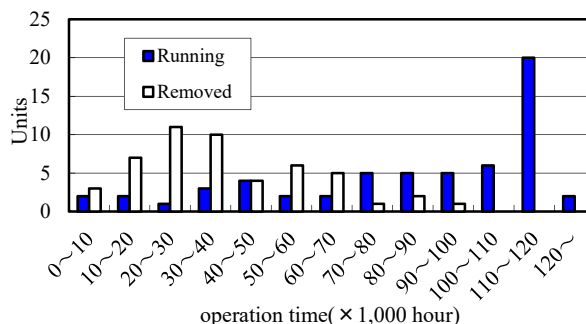


Figure 10: RF window age profile as of March 2019.

現在使用中の導波管高周波窓は 110,000~120,000 時間使用しているものが最も多く、平均運転時間は約 84,000 時間である。撤去済み導波管高周波窓の平均運転時間は約 59,000 時間である。

2013 年長期メンテナンス後から 2018 年までの期間で真空漏れ等のトラブルによる高周波窓の交換は無かった。

年々長寿命化が進み、トラブルが減少している要因として、運転中に VSWR を監視し、反射が生じた場合に運転値を下げて高周波出力を下げる対処や、過去の経験から窓破壊の原因となることが分かっている窓温度上

昇と放射線発生増加の傾向を定期的に測定[6]していることが挙げられる。

5. まとめ

2018 年度に交換したクライストロンアセンブリ 6 台の内、3 台は 10 万時間を超えて運転したものである。導波管高周波窓についても長寿命化が進み、全体の 1/3 が 11 万時間以上継続して使用している。今後、長期使用による経年劣化が原因で発生する不具合が増えてくることが予想されるため、各種点検等によるデータの蓄積を継続して不具合の兆候を捉えるよう努める。

参考文献

- [1] Y. Imai *et al.*, “Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2004, pp. 317-319.
- [2] T. Toufuku *et al.*, “Operation and Maintenance Activity Of High-Power RF System in KEK Electron-Positron Linac (II)”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, THP064.
- [3] 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 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2002, 8P-17;
http://www.pasj.jp/web_publish/lam27/PDF/8P-17.pdf
- [4] M. Akemoto *et al.*, “Present Status of Thyratrons in The KEKB LINAC”, Proceedings of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2005, pp. E4-E6.
- [5] 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.
- [6] 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.