

KEK 電子陽電子入射器における大電力高周波源の運転保守(2022 年度)

MAINTENANCE ACTIVITY OF RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC(FY2022)

馬場昌夫^{#,A)}, 東福知之^{A)}, 今井康雄^{A)}, 久積啓一^{A)},
明本光生^{B)}, 荒川大^{B)}, 荒木田是夫^{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)}, 本間博幸^{B)}, 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)},
Masao Baba^{#,A)}, Tomoyuki Toufuku^{A)}, Yasuo Imai^{A)}, Keiichi Hisazumi^{A)},
Mitsuo Akemoto^{B)}, Dai Arakawa^{B)}, Yoshio Arakida^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Tetsuo Shidara^{B)},
Tateru Takenaka^{B)}, Hiromitsu Nakajima^{B)}, Takuya Natsui^{B),C)}, Hiroyuki Honma^{B)}, 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 5,700 hours during FY2022. The linac consists of injection section followed by 61 RF units. In each unit, a high power S-band klystron and a thyatron are used as RF source and high voltage switch, respectively. The average operational time of all klystrons and thyratrons in use are 77,000 hours and 40,000 hours, respectively. Five klystrons and five thyratrons were replaced in FY2022. The average operating time of all the rf windows in use in the waveguide system is about 106,000 hours. There was no replacement after the 2013 maintenance to 2022. This paper, we report the operational statistics of the klystrons, thyratrons, and rf windows. Also we state the maintenance of those devices and their failures.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器は、最大で 7 GeV の電子および 4 GeV の陽電子を生成・加速する能力を持つ線形加速器である。現在この加速器は、高周波源として大電力 S バンドクライストロンが使用され、高電圧スイッチとしてサイラトロンが使用されている。2022 年度は長期保守期間中に行われた 4-4 加速ユニットの改造に伴い、高周波源が 1 台追加され、総数は 61 台となった。

本稿ではクライストロンアセンブリ、サイラトロン、導波管高周波窓に関する統計及び大電力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

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 50pps であり[1]、KEK 電子陽電子入射器では主に PV-3050、E3754 / E3730A のクライストロンを使用している。2022 年度中は約 5,700 時間の運転が行われた。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。現在使用しているクライストロンの平均運転時間は約 77,000 時間であり、故障により交換したクライストロ

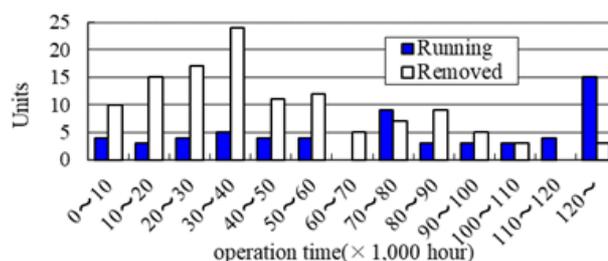


Figure 1: Klystron age profile as of March 2023.

ンの平均運転時間は約 45,000 時間である。運転時間が 100,000 時間を超えているクライストロンが 22 台あり、総数 61 台の約 36%を占めている。この内 8 台は 130,000 時間以上使用しており、最長のもは 1998 年の設置以降、1度も交換されずに約 147,000 時間運転している。

2.2 2022 年度のクライストロンアセンブリ交換理由

Table 1 に 2000 年度以降交換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。2022 年度はクライストロン集束電磁石の水抜き孔からの漏水による交換が 2 台、クライストロン集束電磁石の絶縁抵抗低下 [2]による交換が 1 台、クライストロンヒーターが異常値となる不具合により交換した 1 台、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[2]したため交換した 1 台、計 5 台の交換を行なった。

babam@post.kek.jp

Table 1: Cause of Klystron Assembly Removal

Fiscal Year	The number of the klystron assembly removed	Principal cause								
		Decrease in emission	Klystron oscillation	Klystron heater disconnection	Vacuum leak of the wave guide (After klystron assembly removal)	Malfunction of the pulse forming 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	5	0	0	0	0(0)	2	0	0	3	
Total	119	17	4	7	6(1)	32	3	15	35	

2.3 クライストンアセンブリのトラブル事例

以下、2022 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の水抜き孔からの漏水による交換(1 台目)。
 - KL_B3(型式 PV-3050) 運転時間 52,553 h

Figure 2 に水漏れ発見時の様子を示す。運転中の定時点検時に集束電磁石の水抜き孔より冷却水が排出されていたため、クライストロンアセンブリ交換となった。この水抜き孔は冷却水が集束電磁石内側に溜まった際に排出するためのものである[3]。

撤去後に水漏れ箇所特定のため、解体調査を行なった結果、Fig. 3 に示すようにクライストロンのコレクタ根元のロウ接部で水漏れを確認した。調査時にクライストロン単体での通水(約 30 L/min)を 5 時間程度行なったが、漏れ量は少なかった。この箇所の水漏れ事例は前年度(2021 年)に続き 3 例目である。



Figure 2: Water leakage from Klystron magnet.



Figure 3: Water leakage from Klystron.

- 2) クライストロン集束電磁石の水抜き孔からの漏水による交換(2 台目)。
 - KL_18(型式 PV-3050) 運転時間 80,149 h

運転中の定時点検時に集束電磁石の水抜き孔より数秒に 1 滴の頻度で冷却水が排出していたため、クライストロンアセンブリ交換となった。

撤去後に解体調査したところ、集束電磁石の冷却水通水時に集束電磁石内壁より水が漏れ出てくる事が確認されたため、水漏れは集束電磁石が原因であると特定した。クライストロンは水漏れが無かったため、集束電磁石のみ交換して再使用する。

3) 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_41 (型式 E3730A) 運転時間 129,421 h

運転停止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で#1 コイルの絶縁抵抗が $1\text{M}\Omega$ 以下、#2 コイルは $40\text{M}\Omega$ に低下していた(通常は 1000V 印加し $2000\text{M}\Omega$ 以上)。運転停止期間だったため、クライストロンアセンブリを撤去し集束電磁石のみの交換を行なった。試験スタンドで入出力特性を測定し異常がない事を確認後、再使用している。

4) クライストロンヒーターが異常値となる不具合のため交換。

- KL_A3 (型式 E3730A) 運転時間 5,142 h

運転中にクライストロンヒーター電流のメーター値が閾値範囲外を示すインターロックが作動し、現場クライストロンヒーター電源のメーター値が $65\text{V}/8\text{A}$ で異常値となっていた(通常は 110V 、 3.5A 程度)。原因切り分けのため、以下の手順で調査を行なった。

- ① クライストロンヒーター電源交換。症状変わらず。
- ② パルス電源管体とクライストロン間のケーブルを外し、模擬負荷を繋げて電源側の健全性を確認して異常無し。
- ③ パルス電源管体とクライストロン間のケーブルを交換。症状変わらず。

上記調査により、クライストロンアセンブリ側に異常があると判定し交換となった。

撤去したクライストロンアセンブリは解体され、クライストロンヒーター周りの調査を行っている。ヒーターの抵抗値は 0.3Ω で、抵抗値からは異常を判断できなかったため、低圧試験ベンチにクライストロンを置き、ヒーターを段階的に通電した際のヒーター電圧/電流を確認した。以下、ヒーター電流 19A (運転値相当) 設定時の過去データとの比較を記す。

【撤去クライストロン 2022/02/16 測定(通電約 60 分)】

ヒーター電流 19.0A 、ヒーター電圧 1.6V

【過去データ 2021/11/9 測定(通電約 90 分)】

ヒーター電流 19.0A 、ヒーター電圧 19.9V

60 分以上通電しても変化しないことから、このクライストロンに異常があるとしてメーカーへ調査を依頼した。

5) 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

- KL_15 (型式 E3754) 運転時間 87,354 h

運転中にクライストロンの過電流インターロック (Ipulse OC) が作動し、HV OFF となるトラブルがあった。本来 Ipulse OC はトリガー配下のインターロックであるため、HV OFF とならないが、同時にパルス電源のシャント回路

の過電流保護インターロック (Ishunt(H)) が作動した事で HV OFF していた。

調査のため、オシロスコープでクライストロンパルス電流波形のモニターと web カメラでの DC メーターパネルの監視録画を開始した。後日、トラブルが再発した際に確認した状況を Fig. 4 に示す。

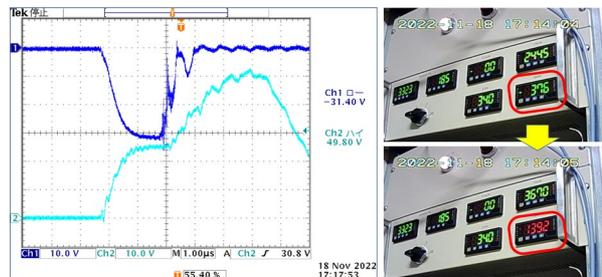


Figure 4: The waveforms and dc meter when the interlock being on.

図左側クライストロンパルス電流波形(水色)に過電流の履歴がある。同時に図右側 DC メーターパネル赤枠内の Ishunt メーター指示値が通常時の 37.6mA から 139.2mA に変化し、インターロック閾値の 100mA を超えた履歴もあった。KL_15 は陽電子加速ユニットで、当時はビームスタディ限定の使用であったため、Es (設定電圧) を 34kV (運転値) から 32kV に徐々に下げて運転を継続。運転停止期間に入ってからクライストロンアセンブリを交換した。

撤去したクライストロンアセンブリはクライストロンのみ抜き取りし、4) 項で撤去した健全な集束電磁石、タンク、パルストランスとの組み合わせでアセンブリを組み上げた。このアセンブリを試験運転して同様の不具合が発生するか確認する予定である。

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 45 kV 、 4.5 kA をスイッチングするサイラトロンを使用しており、全ユニット L4888B(Stellant Systems 社製)を使用している[4]。Figure 5 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。

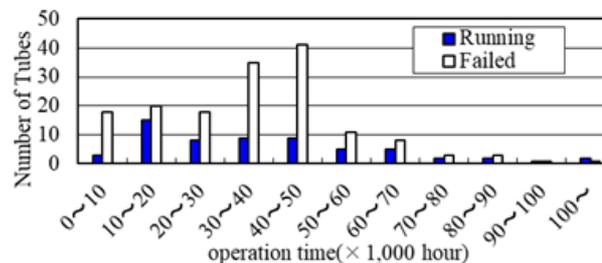


Figure 5: Thyatron age profile as of March 2023.

現在使用しているサイクロトンの平均運転時間は約 40,000 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も約 40,000 時間である。

2022 年度は 5 台のサイクロトン交換を行った。次項で詳細を示す。

3.2 2022 年度のサイクロトン交換

1) リザーバー電圧調整上限による交換

■ KL_47 (S/N:100505) 運転時間 71,374 h

長期メンテナンス前に実施する波形データ取得時に高圧波形のジッタが 80ns あったため、基準の 30ns 以下になるようにリザーバー電圧を+0.2V 調整。調整後の高圧波形のジッタ幅が 40ns まで改善したが、電圧調整用スライダックの機械上限に達しており、リザーバー電圧の調整代が無い場合交換を行なった。

2) サイクロトン点弧せず

■ KL_21 (S/N:100450) 運転時間 89,631 h

波形データ取得時に高圧波形のジッタが 55ns あったため、リザーバー電圧を+0.4V 調整。調整後のジッタ幅が 26ns に収まったため様子を見ていたが、数日後にサイクロトンが点弧しなくなったため交換となった。

3) LV-ON 時にヒーター電流が 100A を超えて過電流遮断器が OFF となるため交換

■ KL_B5 (S/N:101244) 運転時間 15,539h

長期メンテナンス中の立ち上げ前点検のため、LV-ON していた際にヒーター電流が 100A (1V) を超えて過電流遮断器 OFF となった。サイクロトンのヒーターケーブルを端子台から切り離して通電したところ、ヒーター電圧が通常の 6.3V 印可された。サイクロトン不具合と判断して交換した。

4) キープアライブ電圧/電流が 140V/35mA で異常値となるため交換

■ KL_55 (S/N:100578) 運転時間 57,946 h

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 140V/35mA であった。リザーバガス減少[4] に起因するサイクロトン寿命と判断して交換した。

5) リザーバー電圧調整幅が無い事による交換

■ KL_C8 (S/N:101072) 運転時間 32,311 h

サイクロトンレンジング[5] にて高圧波形のジッタが 50ns 以上あったため、リザーバー電圧を+0.1V 調整したが、サイクロトンの自爆が発生するようになった。レンジング後は元値に戻してしばらく運転に使用していたが、時々サイクロトンの自爆が発生し、VSWR インターロックが頻繁に作動するようになった。その後の調査の結果、サイクロトン自爆の影響で EPFN (充電電圧) が不安定になっている事が判明した。継続使用が困難であるため、隔週の短期メンテナンス日に交換を行なった。

KL_C8 は元々サイクロトン点弧タイミングのトリガー出力波形に傾きがあり、他のユニットと比較して高圧波形のジッタが大きく見えていたため、試験スタンドに設置して再試験を行なう予定である。

4. 導波管高周波窓

4.1 概要

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[6]。

4.2 運転統計と保守

Figure 6 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。

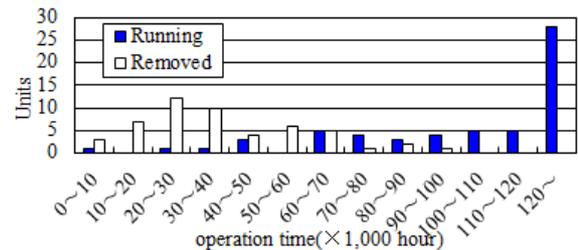


Figure 6: RF window age profile as of March 2023.

現在使用中の導波管高周波窓は 120,000 時間以上使用しているものが最も多く、平均運転時間は約 106,000 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 2022 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行なっていない。

運転中は VSWR インターロック作動状況を監視し、反射が大きい場合は運転員が Es を下げる(高周波出力を下げる)対処を適宜行なっている。また、長期メンテナンス前に窓温度測定と放射線測定による温度上昇や X 線量増加による窓破壊の兆候が無いか確認を行なっているが異常は見られていない。引き続き監視を継続していく。

5. まとめ

2022 年度の運転統計ではクライストロン、サイクロトン、導波管高周波窓のどれも長寿命化の傾向が見られた。また、水漏れなど長期使用による経年劣化が原因で交換されるものは多くないが、年間 1、2 台程度発生している。今後も定期点検や運転時のデータ収集で蓄積した情報から、不具合の兆候が無いか注意深く観察を継続し、安定した加速器運転を継続できるよう努める。

参考文献

- [1] 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, 2018, THP064.
- [2] M. Baba *et al.*, "Maintenance Activity of RF System and RF Windows in KEK Electron-Positron Linac", Proceedings of

- the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, FRPH010.
- [3] T. Toufuku *et al.*, "Operation and Maintenance Activity of RF System in KEK Electron-Positron Linac(FY2021) ", Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University) , THP043.
- [4] 明本光生, 他, "KEK 8GeV リニアックでのサイクロン使用状況", Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2002, 8P-17;
http://www.pasj.jp/web_publish/lam27/PDF/8P-17.pdf
- [5] H.Iijima *et al.*, "HYDROGEN THYRATRON RANGING (TUNING METHOD OF RESERVOIR VOLTAGE) OF KLYSTRON MODULATORS", Proceedings of the 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokyo, Japan, Sept. 3-5, 1991, pp. 139-141.
- [6] 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.