

KEK 電子陽電子入射器における大電力高周波源の運転及び維持管理

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

馬場昌夫^{#, A)}, 東福知之^{A)}, 今井康雄^{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)}, 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)C)}, 松本修二^{B)C)}
Masao Baba^{#, A)}, Tomoyuki Toufuku^{A)}, Yasuo Imai^{A)},
Mitsuo Akemoto^{B)C)}, Dai Arakawa^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Tetsuo Shidara^{B)C)}, 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)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 5,500 hours during FY2020. The Linac consists of an injection section and 60 RF units. 60 high power S-band klystrons and 60 thyratrons are used as RF sources and high voltage switches, respectively. Average operational time of the klystrons and thyratrons in use are 72,000 hours and 37,000 hours, respectively. One klystron and seven thyratrons were replaced in FY2020. Average operating time of the rf windows in the waveguide system is about 95,000 hours. There was no replacement after the 2013 maintenance to 2020. This paper, we report the operational statistics of the klystrons, thyratrons, and rf windows. 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、最大で 7GeV 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、入射部とそれに続く 60 台の RF ユニットから構成され、高周波源として総数 60 台の大電力 Sバンドクライストロン、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。

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、仕様は周波数 2856 MHz、平均パルス出力電力 40 MW、RF パルス幅 4 μ s、繰り返し 50 pps である[1]。2020 年度は約 5,500 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。故障のため撤去したクライストロンの平均運転時間は約 41,000 時間だが、現在使用しているクライストロンの平均運転時間は約 72,000 時間であり、寿命は延びている。

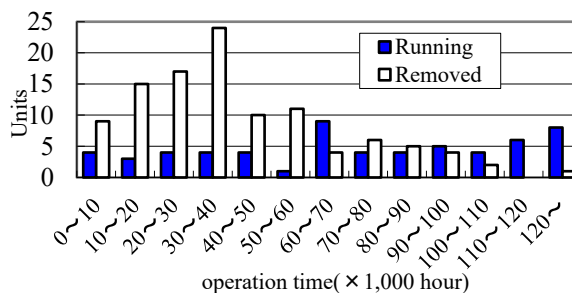


Figure 1: Klystron age profile as of March 2021.

運転時間 10 万時間を超えているクライストロンが 18 台で全体の 3 割を占めている。その内 8 台は 12 万時間以上使用しており、最も設置年が古いものは 1997 年に設置した 3 台である。

2.2 2020 年度のクライストロンアセンブリ交換

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。2020 年度はエミッション減少により 1 台の交換を行なった。次項に詳細を示す。

2.2.1 エミッション減少の兆候が見られるため交換

•KL_B6 (型式:PV-3050) 運転時間 37,000h

このユニットは長期メンテナンス前に定期的実施して

babam@post.kek.jp

いるDipテスト[2]にて、Dipの悪化が続いていたため交換となった。Figure2にこのユニットのDip変化量の履歴を示す。

2010年にユニットを設置した時のDip変化量は0.21であり、運転時間10,000時間以降のDipの変化量が徐々に大きくなっている。2020年の測定では0.31であった。この結果、エミッション減少が進行していると判断して事前交換となった。

撤去したアセンブリはダイオードモード(クライストロン負荷でマイクロ波を出力しない)のテストスタンドで再使用中である。

Table 1: Exchange Reason of Klystron Assembly

Year	The number of the klystron assembly exchange	Exchange reason							
		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
Total	108	17	4	6	6(14)	30	3	15	27

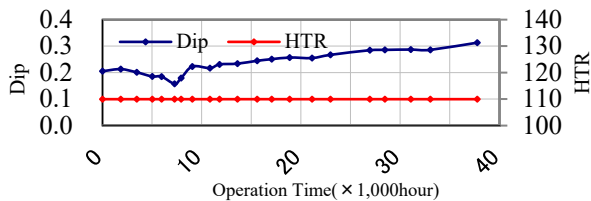


Figure 2: Dip test measurement history of KL_B6.

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(L3 Electron Devices社製)を使用している。Figure 3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。

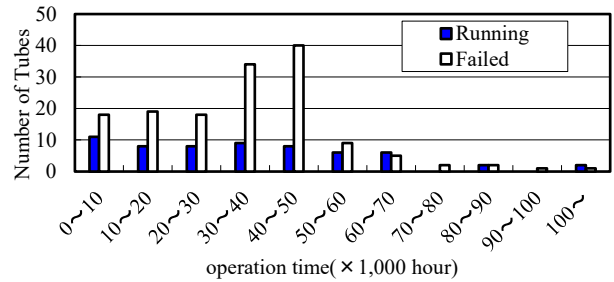


Figure 3: Thyatron age profile.

現在使用しているサイラトロンの平均運転時間は約37,000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。

2020年度は14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7台について、次項で詳細を示す。

3.2 2020年度の故障によるサイラトロン交換

(1) サイラトロン下部の端子根元でケーブル断線(2台)

•KL_57(S/N:100563) 運転時間 60,593h

運転中にサイラトロンヒーター電流またはリザーバー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))のためHV OFF発生。サイラトロンヒーターとリザーバー電流が共に0A(電圧は7.0V)であった。ヒーター・リザーバー共通ケーブルがサイラトロン下部の端子根元で断線していたため交換となった。

•KL_B1(S/N:100308) 運転時間 81,442h

キープアライブ電流低下のインターロック(IKeep(H,L))が作動。キープアライブ電流が25 mAまで低下(運転値は250 mA)、ヒーター電流もほぼ0 Aであった。サイラトロン下部を確認したところ、ヒーターケーブルが断線していた。

(2) ヒーターケーブル端子温度上昇による交換

•KL_35(S/N:100519) 運転時間 54,475h

Thy LV I(L)インターロックが作動。現場確認時にインターロックは復帰していたが、ヒーター電流指示値に若干振らつきが見られた。サーモカメラによる調査の結果、ヒーターケーブル端子が高温となっていた。この状態で使用継続するとケーブル断線となるため、事前交換となった。

(3) リザーバー電圧調整幅がない事による交換(3台)

- ・KL_52(S/N:100510) 運転時間 62,317h
- ・KL_44_A(S/N:100516) 運転時間 65,989h

この2台は運転停止前の立ち下げデータとしてクライストロンの高圧波形のジッターを確認した際、約1分間の測定で許容としている30 nsを超えていた。ジッターを抑えるためにリザーバー電圧を上げようとしたが、リザーバー電圧値が電圧調整を行なうスライダックの上限だった為、運転停止期間中に交換を行なった。

- ・KL_A1_A(S/N:300145) 運転時間 2,370h

このユニットの高圧波形のジッターが70ns以上と大きくなってしまったため、ビームが変動するトラブルがあった。リザーバー電圧を+0.2 V調整してジッターが7nsに収まり、ビーム変動も収まっていた。その後、再びジッターが40 ns程度まで大きくなったため、更に+0.2 V調整したが、サイクロンからのノイズによる影響でCONTROL-1モジュール[5]が誤動作し、運転端末モニター上でのクライストロン出力が0表示(実際は出力している)となるトラブルが発生した。この症状を抑えるためにはリザーバー電圧を下げる必要がある。この結果、使用可能なリザーバー電圧の領域が0.1 Vまで狭くなったため、サイクロンを交換した。このユニットは前年度も同様の不具合[6]でサイクロンを交換している。

このサイクロンはテストスタンドにてリザーバー電圧の使用可能領域を再測定する予定である。

(4) キープアライブ電流0 Aのため交換

- ・KL_13(S/N:100877) 運転時間 15,236h

キープアライブ電流が0 Aのため調査。サイクロンシャーシ内のコントロールグリッド(G1)端子とフランジ間の電圧は設定電圧で異常なし。キープアライブ電源とサイク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]に起因するサイクロン寿命と判断して交換した。

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。導波管高周波窓があることで、加速管内を大気開放することなく、クライストロンアセンブリが交換できる[7]。

4.2 運転統計

Figure 4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。

現在使用中の導波管高周波窓は120,000時間使用しているものが23台で最も多く、平均運転時間は約95,000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2020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。

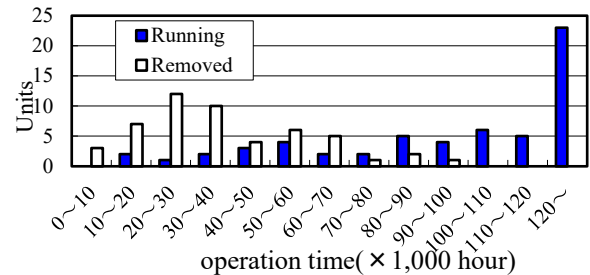


Figure 4: RF window age profile as of March 2021.

VSWR インターロック多発やトラブルが減少し、長寿命化が進んでいる要因として以下が挙げられる。

- ・VSWR インターロックダウン監視(反射が大きい場合 Es(設定電圧)を下げて高周波出力を下げる対処)
- ・立ち下げ前の窓温度測定及び放射線測定(温度上昇、X線発生による窓破壊の兆候が無い)

5. 大電力高周波源に関する不具合事例

5.1 概要

KEK 電子陽電子入射器では高周波源を60台使用しており、安定かつ安全に運転を行う事が重要である。次項に2020年度に発生した不具合事例について詳細を述べる。

5.2 KL_42 クライストロン出力モニター値低下

運転中に監視しているクライストロンステータスパネルにて、クライストロン出力モニターが正常時に対し-10.8%表示となった。この出力モニターとは、クライストロンの出力導波管に設置された方向性結合器から検出した進行波電力(KLY Pf)と負荷側からの反射波電力(KLY Pb)の内、KLY Pf側を指す。KLY Pf、KLY Pbは共に電圧定在波比(VSWR)を算出するVSWRメーターへ入力している。調査したところ、以下の事がわかった。

- (1) KLY Pfの減少が見られた際にEs(設定電圧)、EPFN(充電電圧)のモニター値に変化なし。
- (2) KLY Pf減少が見られた際にVSWRメーターのPf表示値も減少している。VSWRメーター内部で分岐したRF信号モニターでも同様の減少が見られた。
- (3) 出力導波管下流側の方向性結合器から検出した出力レベルに減少した履歴は無かった。

以上の内容から、導波管 KLY Pf モニター用方向性結合器~VSWRメーター内のRF信号分岐点の間に異常があると推測した。VSWRメーター側、導波管方向性結合器側共にケーブルを揺らしたところ KLY Pf 値が-14%~+2%の範囲で変動した。特に導波管側のケーブルを揺らした際の変化量が大きかった。

隔週で実施している短期メンテナンス時に KLY Pf、KLY Pb モニターラインで以下の調査と対処を行なった。

- ・VSWR メーター側、導波管側のコネクタ部の緩みを確認。KLY Pf, KLY Pb 共に Low Pass Filter の一部の箇所に見られた為、増し締め実施。
- ・VSWR メーター側、導波管側の同軸ケーブル、減衰器、Low Pass Filter、エル型コネクタを外して内部導体を目視確認。異常無し。

Figure 5 にクライストロンの出力導波管に設置された方向性結合器周りの接続状況を示す。



Figure 5: Directional coupler.

クライストロン立ち上げ後、KLY Pf, KLY Pb モニターラインで VSWR メーター側、導波管側のケーブルを揺らしても、VSWR メーターの表示値が変化しないことを確認した。作業後はクライストロンステータスパネルで +2.6% の表示となった。

後日、同様の不具合が発生しないよう、全ユニットのクライストロン出力モニターラインのコネクタ点検を実施。数箇所のユニットでコネクタの緩みがあったため増し締めを行ない、Low Pass Filter で部分破損が見られたため交換した。今後も監視を続ける。

6. まとめ

クライストロンやサイラトロンでは長期使用のものがあり、年々長寿命化が進んでいる。導波管高周波窓も平均運転時間が 95,000 時間と長く、12 万時間を超えているものが全体の 4 割近くある。今後、長期使用による突発的な不具合が発生する事が予想されるため、各種点検等により蓄積したデータを基に不具合の兆候を捉え、安定した加速器運転を継続できるように努める。

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] K. Nakao *et al.*, “Results of High-Power klystron Dip Test in the KEK Linac”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Japan, Aug. 4-6, 2004, pp. 272-274.
- [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] Y. Yano *et al.*, “NEW CONTROL SYSTEM FOR KLYSTRON MODULATOR”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011, pp. 586-588.
- [6] T. Toufuku *et al.*, “Maintenance Activity Of RF System and RF Windows in KEK Electron-Positron Linac (II)”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2020, WEPP41;
- [7] 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.