

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(Ⅱ)

MAINTENANCE ACTIVITY OF RF SYSTEM AND RF WINDOWS IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC(Ⅱ)

東福知之^{#, A)}, 今井康雄^{A)}, 馬場昌夫^{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)},
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)}
Tomoyuki Toufuku^{#, A)}, Yasuo Imai^{A)}, Masao Baba^{A)}, Tetsuo Motomi^{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)}, 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

The FY2019 operational statistics on the klystrons, the thyratrons and the rf windows at KEK e-/e+ linac are given. Several major failures on these devices are reported. The KEK linac consists of 60 rf units, each of which includes a single 50MW S-band klystron, thyratron and rf window. The linac have operated for about 5,500 hours in FY2019 and 4 klystrons and 5 thyratrons have been replaced while none of rf windows has. The average operational time of the klystrons, thyratrons and rf windows in use are 67,000 hours, 37,000 hours and 90,000 hours, respectively. On April 3, 2019, a fire accident happened at a test station in the linac building. The carbon soot by the fire spread over and some of the klystron modulators were spoiled. After the minimum recovery work being done, the linac was back to operate 19 days later.

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及びサイラトロンを使用しており、4つのエネルギーの異なるリングへの入射を行なっている。本稿では 2019 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について報告する。

2019 年度は 4 月に入ってから加速管組み立て室に設置していた試験スタンドにおいて火災が発生[1]し、その時に発生した煤による被害が電子陽電子入射器の機器にも及んだ。クライストロンパルス電源などに煤が混入し、その煤の除去作業が行われ、19 日後に電子陽電子入射器の運転が再開された。

2. クライストロン

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 2856MHz、平均パルス出力電力 40MW、RF パルス幅 4 μ s、繰り返し 50pps であり、主に PV-3050、E3754 を使用している(長期に運転しているものは PV-3030A3, PV-3030A4, E3730A が使用されている)。2019 年度は約 5,500 時間の運転が行なわれた。Figure 1 に現在使用しているクライストロンの使用状況及び

2000 年度以降撤去したクライストロン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 67,000 時間であり、故障により撤去したクライストロンの平均運転時間は約 41,000 時間である。運転時間が 12 万時間を超えるものが 3 台あり、これらのクライストロンは 20 年以上使用している。カソードの劣化度合いを素早く簡易的に判定する手法の Dip テスト(運転状態で 1 分程度カソードヒータの電源を切り、エミッションの減少量を測定。劣化が進行した場合はこの減少量が大きくなる傾向にある)[2]の結果を見るとまだエミッション減少の兆候は見られていない。しかし長期に運転を行なっているとエミッション減少が起こる前にヒーター断線や冷却水配管からの水漏れ等が原因で撤去する事例が今までに見られている。

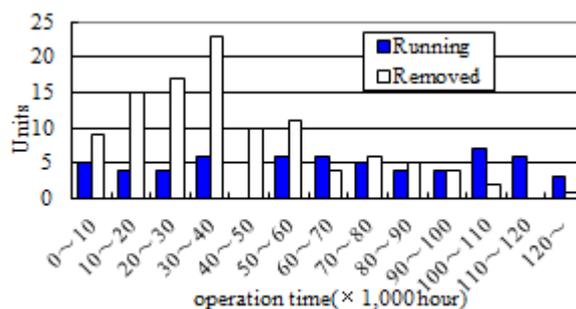


Figure 1: Klystron age profile.

toufuku@post.kek.jp

2.2 2019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。

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)	Coil	Malfunction of the pulse Focus	Malfunction of the insulating coil 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
Total	107	16	4	6	6(14)	30	3	15	27

2019 年度は 4 台のクライストロンアセンブリの交換を行った。下記に詳細を記す。

(1) RF 出力パルス欠け頻度が多い事による交換

・KL_B4(型式: PV-3050) 運転時間 36,000h

SuperKEKB への入射では、RF 出力パルス欠けが要因で起こるビームエネルギー変動によりビームアポートする恐れがあることから、RF モニタシステムを使用して RF 出力パルス欠けの検出を行なっている[3]。2019/5/6 の各ユニットのパルス欠けカウント数を Fig. 2 に示す。KL_B4 は 476 回/1 日であり、その他のユニットと比較してもかなり多い事が分かる。欠け頻度は、クライストロンの印加電圧をさげると下がるので設定電圧(モジュレータ PFN 充電電圧)を 2kV 下げってみたがカウント数は大きく下がらなかった。運転停止期間中に交換を行なった。

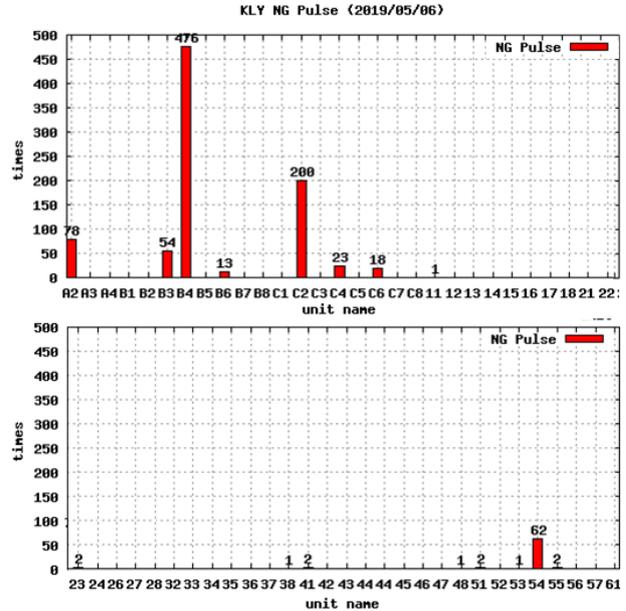


Figure 2: Number of pulse-shortenings for 2019/5/6.

(2) エミッション減少の兆候が見られる事による交換

・KL_21(型式:PV-3030A4) 運転時間 80,000h

このユニットは長期メンテナンス前の Dip テストで Dip の深くなる変化量がこれまでより大きい結果が得られた。

Figure 3 にこのユニットの Dip の変化の履歴を示す。

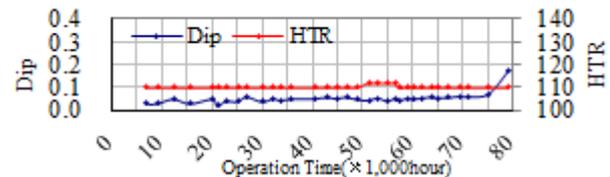


Figure 3: Dip test measurement history of KL_21.

データの変化量を見るとこれまでの Dip の変化量は 0 ~0.03 がほとんどだったが、この時の測定では 0.10 程度深くなっており、グラフを見ると急激に変化している事が分かる。測定装置を疑い、異なる測定装置で再測定を行なったが同じ結果が得られた。別の日にヒーター電圧を変更しての肩特性を測定した。測定結果を Fig. 4 に示す。

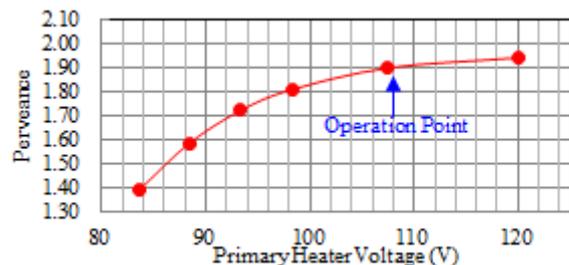


Figure 4: Primary heater voltage vs perveance of KL_21.

運転で使用している 1 次側のヒーター電圧設定値は 110V であり、パービアンスが急激に変化するポイントか

らまだ少し離れている為、問題ないように見える。しかし Dip が急激に変化している事から最終的にエミッション減少の兆候が見られると判断して交換を行なった。このクライストロンは試験スタンドで今後どのように Dip が変化するか確認を行なう予定である。

(3) クライストロン集束電磁石絶縁抵抗低下による交換
 ・KL_43(型式:E3754) 運転時間 52,000h

毎年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#3 コイルの絶縁抵抗が 3MΩ まで低下していた(通常は 1000V 印加し 2000MΩ 程度)。運転停止期間だった為、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、元の場所に設置を行なった。

(4) クライストロンヒーター断線による交換
 ・KL_17(型式: PV-3050) 運転時間 37,000h

2020/1/9 にクライストロンヒーター電流低下によるインターロックが作動してダウンした。現場で確認するがヒーター電流に異常は見られなかった為、立ち上げを行ない復旧した。このダウンが前兆だったようで 17 日後の 2020/1/26 に再度ヒーター電流低下のインターロックが作動してダウンした。調査中、完全にヒーター電流が流れなくなり、ヒーター断線と判断して交換を行なった。途中経路での断線も考えられた為、クライストロン単体をテストベンチに設置して確認を行なった。ヒーターへの通電を開始した直後はヒーター電流が流れたが、しばらくすると流れなくなりクライストロンヒーター断線と断定できた。

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、大半は L4888B を使用しているが、一部で CX2410K、CX2411 を使用している。2019 年度は約 5,500 時間の運転が行なわれた。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。

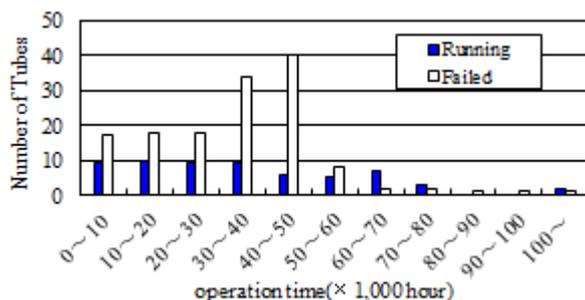


Figure 5: Thyatron age profile.

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 34,000 時間である。5 万時間までに大半のサイラトロンが故障により撤去されているが、10 万時

間を超えているものも 2 台ある。

3.2 2019 年度のサイラトロン交換理由

2019 年度は 5 台のサイラトロンの交換を行なった。下記に詳細を記す。

(1) ヒーターケーブル端子温度上昇による交換(2 台)

- ・KL_B8(型式: L4888B) 運転時間 72,000h
- ・KL_61(型式: L4888B) 運転時間 6,700h

2 台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発生した為、調査し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った。この状態で運転を継続しているといずれケーブルが断線する事が分かっていた為、運転停止期間中に交換を行なった。

(2) リザーバー電圧調整不可による交換

- ・KL_B3(型式: L4888B) 運転時間 57,000h

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 30ns を超えている事が分かった。リザーバー電圧を上げてジッターを抑えたが、調整後の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に近い値だった為、運転停止期間中に交換を行なった。

(3) サイラトロン動作不安定により交換

- ・KL_B8(型式: L4888B) 運転時間 180h

サイラトロン交換後は約 100h 程度運転を行なった後、レンジング(リザーバー電圧の上限値、下限値を測定し、中間値を最適値として設定する)[4]を行なう。正常に動作しているサイラトロンのリザーバー電圧に対してのクライストロン高圧波形のジッターの変化の様子を Fig. 6 に示し、このサイラトロンで測定した時の変化の様子を Fig. 7 に示す。

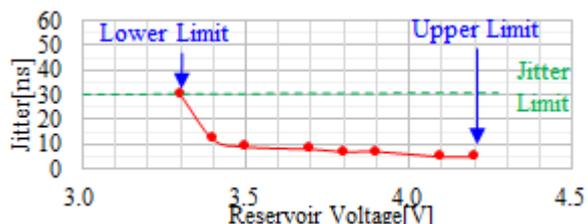


Figure 6: Reservoir Voltage vs HV jitter of normal.

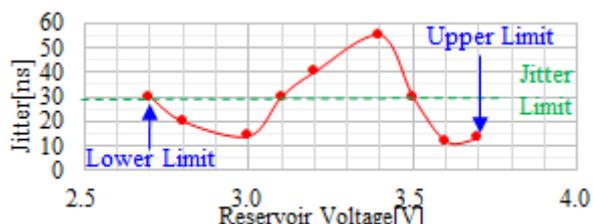


Figure 7: Reservoir Voltage vs HV jitter of KL_21.

通常は Fig. 6 のグラフのようにリザーバー電圧下限値より下に設定した時にジッター 30ns 以上となり、下限値から上限値までの間はジッター 30ns 以下となるものが普通

である。しかしこのサイクロトロンではリザーバー電圧 3.2V ~3.4V でジッター30ns 以上となっている。動作不安定と判断し、交換を行なった。このサイクロトロンはまだ運転時間が短い為、テストベンチで再度動作確認を行う予定である。

(4) リザーバー電圧調整幅がない事による交換

・KL_A1_A(型式: L4888B) 運転時間 6,300h

KL_A1_A は電子陽電子入射器の最上流に設置されており熱電子銃電源及び電子銃直後の高周波源としても使用している。このユニットの高圧波形のジッターが大きくなった事でビームが変動するトラブルが発生。リザーバー電圧を上げる事でジッターは収まり、ビーム変動も収まった。このユニットではこの症状とは別に EPICS IOC が起動している CONTROL-1[5]がサイクロトロンからのノイズによる誤動作でクライストロンの出力が 0 まで低下したように見える(実際には出力している)トラブルも抱えており、この症状はリザーバー電圧を下げる事で抑えていた。この時点で使用可能なりザーバー電圧の領域が 0.1V まで狭くなった為、交換を行なった。

4. 導波管高周波窓

4.1 運転統計

2019 年度は約 5,500 時間の運転が行なわれた。Figure 8 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。

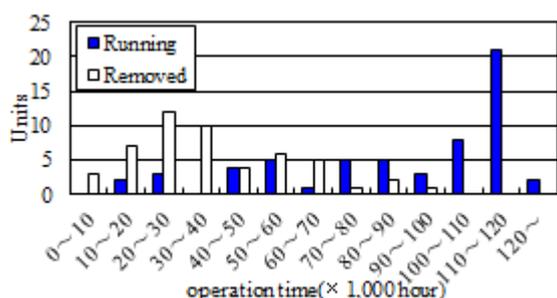


Figure 8: RF Window age profile.

約半数の 31 台が 10 万時間以上使用している。そのうち 20 年以上使用しているものが約 20 台あり、古いものでは 1996 年から使用しているものもある。導波管高周波窓の交換は 2013 年度を最後に行なっていない。VSWR 多発や窓リークなどのトラブルが発生していない為である。長期シャットダウン前に窓温度測定及び放射線測定 [6]を行なっているがこの測定でも異常は見られていない。

5. 大電力高周波源に関する不具合事例

2019 年度はサイクロトロンからのノイズによるものと思われる機器の不具合頻度が多かった。以下に不具合事例を記す。

(1) CONTROL-1 動作異常

CONTROL-1 動作異常によりクライストロン出力が 0 に低下して見える症状が頻発。実際にはクライストロンから出力していた為、ビームへの影響は見られなかった。最

終的にサイクロトロンのリザーバー電圧を下げると症状が治まった為、この状態で様子を見る事となった。

(2) インバーター電源インターロック不具合

サイクロトロンのレンジングでリザーバー電圧を上げた際、サイクロトロンが自爆し異常充電となったがインターロックが作動しなかった。インバーター電源を OFF/ON する事で症状は解消したが、サイクロトロンリザーバー電圧を上げると症状が再発した。現在、メーカーにてノイズ強化対策を行なっている最中である。

(3) インバーター電源設定電圧変更不可

年末の運転停止後の立ち上げ時、クライストロンからの出力が運転停止前と比較して高い状態だった為、設定電圧を下げようとしたところ設定電圧が変更できない状態となっていた。調査の結果、インバーター電源の動作異常と分かり最終的にインバーター電源の交換を行なった。メーカーにて対策を行なっている最中である。

6. おわりに

クライストロンや導波管高周波窓は長期に運転している台数も多く、長期に運転している事で起こるトラブルがいつ発生してもおかしくない状況である。また、経年劣化による高周波源の機器の故障も増加傾向にある。SuperKEKB への入射では、少しのビームエネルギー変動によりビームアポートが発生する恐れがあることから、より安定に運転を行なう必要がある為、今後もデータの蓄積やインターロックの作動状況から不具合の兆候を迅速に捉え、対処を行なうように努める。

参考文献

- [1] K.Furukawa *et al.*, "FIRE AND SAFETY AT KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-Aug. 3, 2019, pp. 1091-1095.
- [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] H.Katagiri *et al.*, "RF SOURCE DIAGNOSIS USING RF MONITOR SYSTEM IN Super KEKB INJECTOR LINAC", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1127-1130.
- [4] 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.
- [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] Y.Imai *et al.*, "Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac", Proceedings of the 1th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, Aug. 4-6, 2004, pp. 317-319.