

## 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(2021 年度)

### OPERATION AND MAINTENANCE ACTIVITY OF RF SYSTEM IN KEK ELECTRON- POSITRON LINAC(FY2021)

東福知之<sup>#, A)</sup>, 今井康雄<sup>A)</sup>, 馬場昌夫<sup>A)</sup>, 久積啓一<sup>A)</sup>,  
明本光生<sup>B)</sup>, 荒川大<sup>B)</sup>, 荒木田是夫<sup>B)</sup>, 片桐広明<sup>B)</sup>, 川村真人<sup>B)</sup>, 設楽哲夫<sup>B)</sup>, 竹中たてる<sup>B)</sup>, 中島啓光<sup>B)</sup>,  
夏井拓也<sup>B), C)</sup>, 本間博幸<sup>B)</sup>, 松本利広<sup>B), C)</sup>, 松下英樹<sup>B)</sup>, 三浦孝子<sup>B), C)</sup>, 矢野喜治<sup>B)</sup>, 松本修二<sup>B), C)</sup>  
Tomoyuki Toufuku<sup>#, A)</sup>, Yasuo Imai<sup>A)</sup>, Masao Baba<sup>A)</sup>, Keiichi Hisazumi<sup>A)</sup>,  
Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>, Dai Arakawa<sup>B)</sup>, Yoshio Arakida<sup>B)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>B)</sup>, Masato Kawamura<sup>B)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>B)</sup>,  
Tateru Takenaka<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Takuya Natsui<sup>B), C)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>B), C)</sup>,  
Hideki Matsushita<sup>B)</sup>, Takako Miura<sup>B), C)</sup>, Yoshiharu Yano<sup>B)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>B), C)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>C)</sup> 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 6,400 hours during FY2021. This accelerator utilizes a total of 60 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 74,000 hours, 38,000 hours and 102,000 hours, respectively. We have replaced 4 klystrons and 6 thyratrons in FY2021. This paper, we report the operational statistics of the klystrons, thyratrons, and rf windows in FY2021, 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 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。現在この加速器は、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が使用され、また高電圧スイッチとしてサイラトロンが使用されている。2021 年度中は約 6,400 時間の運転が行われた。

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は主に PV-3050 及び E3754 / E3730A のクライストロンを使用している。これらの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  $\mu$ s、繰り返し 50 pps であり[1]、集束電磁石、タンク、パルストランスで構成されて使用している。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。

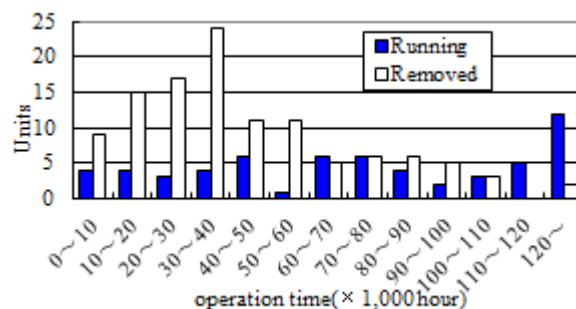


Figure 1: Klystron age profile as of March 2022.

現在使用しているクライストロンの平均運転時間は約 74,000 時間であり、年に平均して約 2,500 時間増加している。クライストロン以外が原因で撤去したものについては健全な集束電磁石やパルストランスを使用して組み立て、試験を行ない再使用している。運転時間は積算している為、平均運転時間は長くなる傾向にある。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 43,000 時間だが、直近 5 年間(2017 年度~2021 年度)に限定すれば約 68,000 時間であり、現在使用しているクライストロンの平均運転時間に近づく。総数 60 台のうち 20 台が 10 万時間以上使用している。このうち 1 度も撤去していないものは 13 台であり、残り 7 台は撤去したものを再組立て、試験後に再設置したものである。

<sup>#</sup> toufuku@post.kek.jp

2.2 2021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。

Table1: Exchange Reason of Klystron Assembly

Fiscal 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 Formers	Malfunction of the insulating coil	Malfunction of the pulse transformer
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
Total	114	17	4	7	6(14)	30	3	15	32

2021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。

- クライストロン冷却水配管からの水漏れ。  
KL\_C2(型式 E3754) 運転時間 122,897 h

水漏れ発生時の様子及び水漏れ箇所を Fig. 2 に示す。クライストロン周辺が水浸しになっていた為に気付いた。数分前に近くを通行した際には気付かなかった事から運よく水漏れ発生直後に発見したようであった。クライストロンの冷却水パイプ部分から霧状に水漏れが発生していた。水漏れが発生していた冷却水パイプの様子を Fig. 3 に示す。パイプの内側は全体的にざらついており、ピンホールを確認できた。この冷却水パイプで水漏れを起こした事例はなかった。今後発生する可能性も考えて予備の冷却水パイプを購入した。



Figure 2: Water leak point.



Figure 3: Cooling Water pipe pinhole.

- タンクフランジ冷却水継手からの水漏れ。  
KL\_C8(型式 PV-3050) 運転時間 101,989 h

低濃度 PCB 廃棄物の処分期間が 2027 年 3 月 31 日で終了となる為、それまでに装置で使用しているものについて調査を行なう必要がある。クライストロンアセンブリではパルストランスで絶縁油封じ切りのコンデンサを使用している。このコンデンサについては 1990 年以前に製造されたものは汚染の可能性がある為、処分する方針としている。運転で使用中的のものについては現場に設置した状態では調査を行なう事ができない為、一時的に撤去を行なう必要がある。撤去、解体調査、再組立て、試験、設置の作業工程が必要であり、1 台あたり約 6 日間程度要

する為、長期シャットダウン時に集中的に作業を進めている。2021 年度には計 8 台の調査を行なったが、そのうち 1 台の解体を進めていたところ、Fig. 4 に示すようにクライストロン電子銃の電子銃母子にススが薄く付着している事に気付いた。さらに解体を進めるとパルスランの底面にもススの付着物が見られ、タンクの底面には Fig. 5 に示すように水の沈殿が見られた。

このクライストロンアセンブリは元々クライストロンの過電流インターロックの発生頻度が多く、運転電圧の低い KL\_C8 ユニットへ移設した経緯があった。この時は過電流発生の原因がクライストロンかパルスランか分かっていなかったが、今回の解体結果からタンク内への水漏れが原因によりタンク内で放電を起こしていた事が濃厚となった。

今回は原因調査及び復旧に時間がかかると判断し、シャットダウン中の復帰はあきらめて予備のクライストロンアセンブリに交換を行なった。後日、水漏れ箇所の調査を行なったところ、Fig. 6 に示すようにタンクフランジに取り付けられている冷却水パイプでフランジと継手の間の O リングシール部分で水漏れを起こしていた事が判明した。

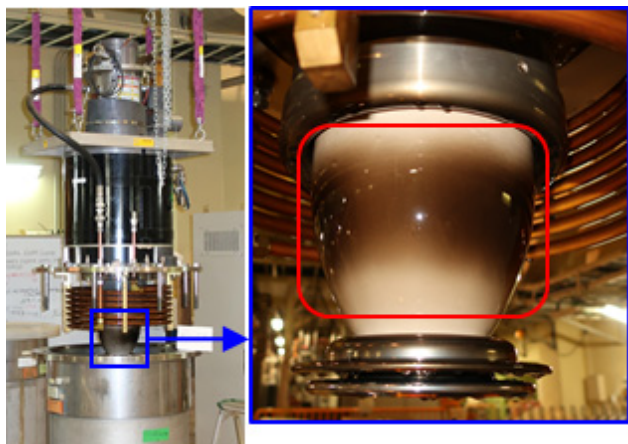


Figure 4: State of carbon soot adhesion.

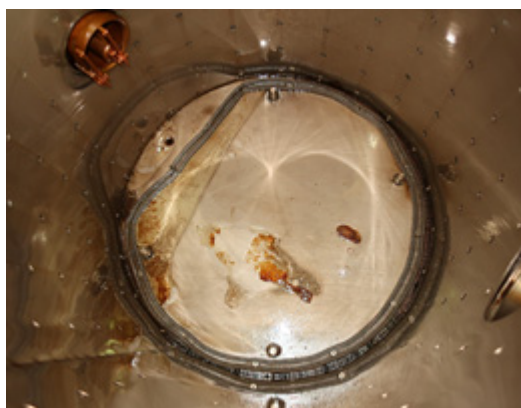


Figure 5: The traces of water on tank bottom.

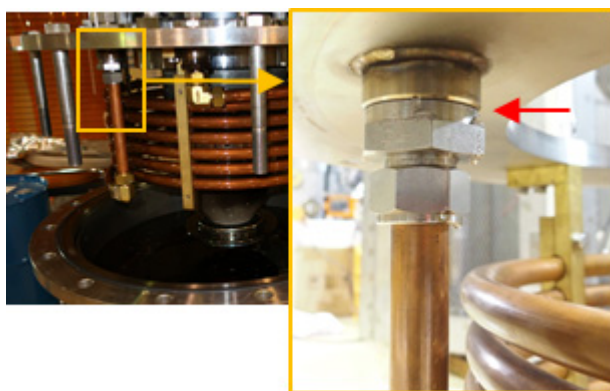


Figure 6: Water Leak point.

- クライストロンヒーター断線。  
KL\_A1\_B(型式 E3754) 運転時間 97,871 h

長期シャットダウン中に作業の為、クライストロンのヒーターに通電した際にヒーター断線が判明した。KL\_A1\_B は RF 電子銃の高周波源であり、このユニットが運転できないと SKEKB HER への入射ができない為、運転中に起こらなかった事は幸いであった。

- クライストロンコレクタ溶接部からの水漏れ。  
KL\_A3(型式 PV-3050) 運転時間 87,328 h

集束電磁石の内側に冷却水が溜まった場合、それを排出する為の水抜き孔が設けられている。その孔から冷却水が排出されていた為気付いた。対応の協議中にクライストロンの出力が運転値から約 81%低下する事態となり、すぐに運転を停止した。出力低下した原因ははっきりと分かっていないが、クライストロンの RF 入力部に冷却水が侵入した事が原因ではないかと言われている。この水漏れを発見した前日には隔週メンテナンスが行なわれており、この時の定期点検で水漏れは確認されていなかった。その翌日の 00:00 頃に震度 4 の地震が発生し、その約 17 時間後に水漏れを発見している為、この地震が影響しているのではないかとされている。

撤去後、解体し調査したところ、Fig. 7 に示すようにコレクタ根元の溶接(ロウ接)部分より水漏れを起こしている事が判明した。この箇所での水漏れ事例は 2 例目であり、今後も増えてくると予測している。



Figure 7: Water Leak point.

### 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[2]を使用しており、全ユニット L4888B(Stellant Systems 社、旧 L3 Electron Devices 社製)を使用している。Figure 8 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 38,000 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 35,000 時間である。現在総数 154 台を故障により撤去しているが、約半数の 75 台が 3 万時間～5 万時間で撤去している。

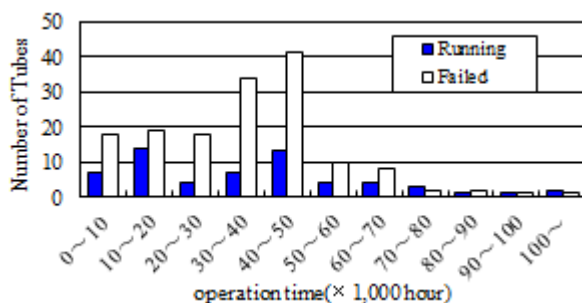


Figure 8: Thyatron age profile as of March 2022.

#### 3.2 2021 年度のサイラトロン交換理由

2021 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。

- リザーバー電圧調整上限による交換 (3 台)  
 KL\_B5 (型式 L4888B) 運転時間 52,000 h  
 KL\_C2 (型式 L4888B) 運転時間 66,000 h  
 KL\_45 (型式 L4888B) 運転時間 62,000 h

KL\_C2, 45 ユニットについては、長期メンテナンスによるシャットダウン直前に実施する波形データ取得時に、高圧波形のジッターが増加している事に気付き、リザーバー電圧の調整を試みたが、調整用の変圧器が上限に達しており調整が不可能であった。幸いこの時点では運転に影響が見られなかった為、運転が終了した後の長期メンテナンス期間中に交換を行なった。

KL\_B5 については冬期停止期間後の立ち上げ時に高圧波形のジッターが増加している事に気付いた。このユニットについてもリザーバー電圧調整用の変圧器が上限に達しており、調整が不可能であった。この時はまだ許容範囲であると判断し、しばらく監視を続け、約 2 カ月後の隔週メンテナンス時に交換を行なった。

- リザーバー電圧調整幅が無い事による交換  
 KL\_C6 (型式 L4888B) 運転時間 69,000 h

運転中に高圧波形のジッターが増加している事に気付き、リザーバー調整を行なった。高圧波形のジッター

は改善したが、連続放電などの異常充電時に作動するインターロックの頻度が増加。リザーバー電圧の調整幅がないと判断し、長期メンテナンス期間中に交換を行なった。

- ヒーター/リザーバー共通ケーブル断線による交換  
 KL\_C3 (型式 L4888B) 運転時間 48,000 h

ヒーター電流もしくはリザーバー電流が低下した際に作動するインターロックが作動し、現場確認したところヒーター電流、リザーバー電流共に大幅に低下していた。サイラトロン周辺を目視で確認すると、Fig. 9 に示すようにヒーター/リザーバー共通ケーブルの断線が確認された。使用不能と判断し交換を行なった。

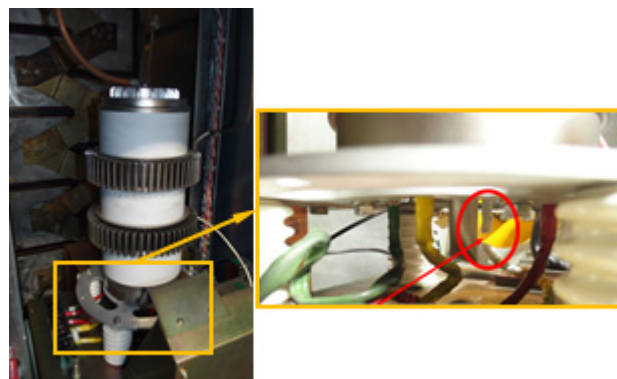


Figure 9: The heater and reservoir common cable disconnection.

### 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。導波管部に高周波窓があることで、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[3]。

Figure 10 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。約半数以上の 27 台が 12 万時間以上使用している。使用時間が最長のものは 14 万時間であり、25 年前の 1997 年から使用している。

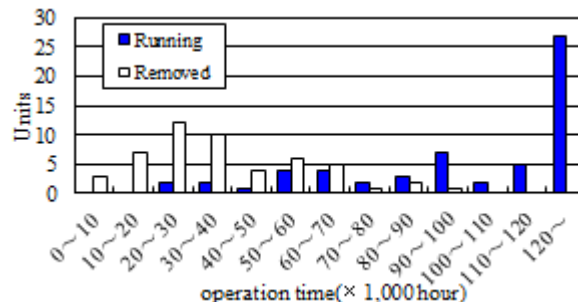


Figure 10: RF Window age profile as of March 2022.

不具合が起こった場合、入射が不可能となる重要ユニットについては長期メンテナンス期間中、一時的に窓

素による大気開放を行ない、クライストロン出力部及び導波管部の高周波窓にリークの不具合があるか確認を行っている[3]。重要ユニット以外についてはこの作業を行っていない為、クライストロン交換などの作業の際にリークが確認され、急遽交換を行なう可能性がある。クライストロン出力部の高周波窓に関しては時々、リークの不具合が確認される事があるが、導波管部の高周波窓に関しては 2003 年 9 月に起こった放電による交換作業の際にリークを確認して以来、リークは確認されていない。

## 5. 大電力高周波源の不具合事例及び運転維持管理

### 5.1 集束電磁石電源故障トラブル

KEK 電子陽電子入射器ではクライストロン 1 体に対し集束電磁石電源が 9 台使用されており、合計で約 540 台使用している。Figure 11 に 2002 年度以降の集束電磁石電源故障分布を示す。2005 年度から故障頻度が増加しているが、そのほとんどがファンの停止によるものだった。その為、2008 年度の長期メンテナンス時に全ての電源に対してファンの交換を行なった[4]。2011 年度に故障台数が大幅に増加しているが、これは東日本大震災による被害[5]や、絶縁不良の調査を行なった影響と思われる故障が大半である。

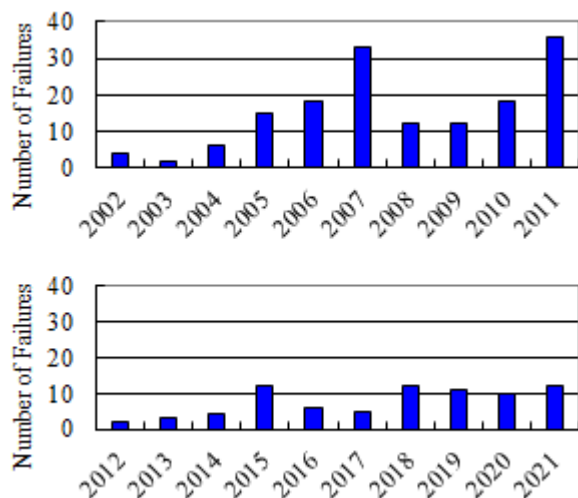


Figure 11: Focus Coil Power supply failure distribution.

主に使用している電源は 20 年以上使用している為、現在は生産中止となっておりメーカーのサポートが切れている状態である。故障電源の修理については修理可能な業者に随時依頼しているが、修理が不可能なものが今後増えてくるものと予想される。その為、2018 年度から代替電源での試験を開始。徐々にその使用数を増やし、サポート切れ電源の予備品を増やしている状況である。

### 5.2 集束電磁石電源コントロールケーブルの接触不良 集束電磁石電源のコントロールケーブルの接触不良

により、コイル電流、電圧が変動するトラブルが増加傾向にあった。トラブルの度にコンタクトスリットにケーブルを圧入しているコントロールケーブルからケーブルと端子をはんだ付けによる接続を行なったコントロールケーブルに交換を行っていた[6]が、2021 年度の長期シャットダウン中に対象となるコントロールケーブル全てにおいてはんだ付け処理を行なった。

## 6. おわりに

2021 年度は水漏れによるクライストロンアセンブリの交換が 3 件あった。長期運転による経年劣化が原因で起こったものと思われる。今後も経年劣化が原因で起こるトラブルが発生するものと予想される為、データの蓄積やメンテナンス時の定期点検などにより不具合の兆候を捉え、可能な限り迅速に対処を行ない、加速器の安定運転への貢献を果たしてゆく。

## 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, Funabashi, Japan, Aug. 4-6, 2004, pp. 317-319.
- [2] 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, Kyoto, Japan, Aug. 7-9, 2002, pp. 317-319.
- [3] 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, Tosu, Japan, Jul. 20-22, 2005, pp. 278-280.
- [4] H. Kumano *et al.*, “Maintenance Activity of RF Sources and RF windows in KEK Electron-Positron Linac”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Japan, Aug. 5-7, 2009, pp. 1090-1092.
- [5] Y. Imai *et al.*, “Recovery Efforts of RF Sources at KEK Electron-Positron Linac due to East Japan Large Earthquake”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011, pp. 1339-1343.
- [6] T. Toufuku *et al.*, “Operation Statistics and Maintenance Activity of RF System in KEK Electron-Positron Linac (II)”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 978-981.