

## 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

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

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

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

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

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

<sup>C)</sup> SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

#### Abstract

In the KEK electron-positron linac, there are around 60 high-power klystrons. The upgrade works for SuperKEKB started in 2011 and 24 klystrons are utilized for the beam operation for PF/PF-AR. Average operation time of the klystrons is 52,000 hours and some of them have reached an operation time of more than 100,000 hours. This paper presents the operation statistics of the klystrons and thyratrons as well as recent maintenance works for the klystron modulators.

#### 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では、高周波源として約 60 台の大電力クライストロンをギャラリーに設置している。2011 年度以降は SuperKEKB へのアップグレード作業が開始され、ギャラリー全 8 セクターの内、下流部 3 セクター分の計 24 台のクライストロンを PF 及び PF-AR の 2 つのリングへの入射のため使用している。上流部 5 セクター分の計 34 台のクライストロンは SuperKEKB へのアップグレード<sup>[1]</sup>のため、不定期に運転してビームを使用したスタディが

行なわれている。

本稿ではクライストロン、サイラトロンの運転統計及び大電力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. 大電力高周波源

##### 2.1 パルス電源

大電力高周波源は主にクライストロン用パルス電源とクライストロンアセンブリで構成されている。

Figure 1 にパルス電源の回路図を示す。

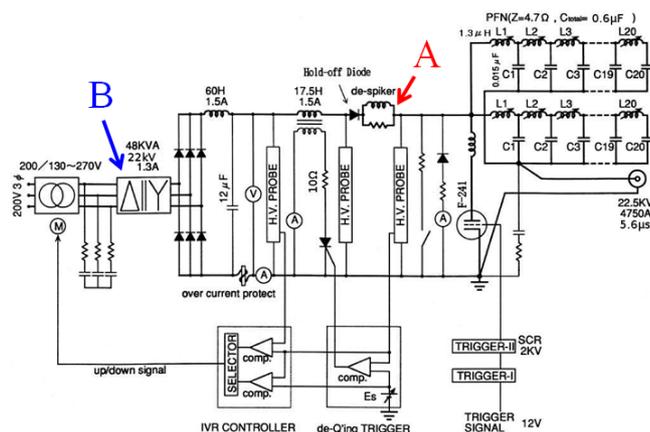


Figure 1: Circuit diagram of the klystron modulator.

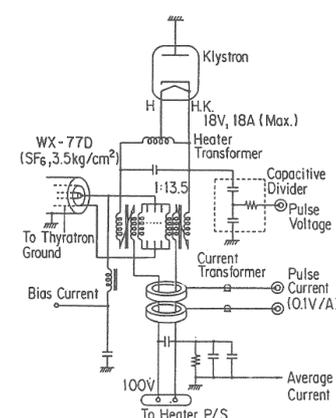


Figure 2: Circuit diagram of the klystron assembly.

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

パルス電源は商用 AC200V、3 相から受電して入力電圧を調整する誘導電圧調整器 (IVR) を介し、昇圧及び全波整流後に平滑回路を通り、主コンデンサに DC 充電される。パルス成形回路 (PFN) の充電は充電トランスとの共振によって主コンデンサの約 2 倍の電圧が PFN へ充電される。電圧の安定化は充電電圧を高圧プローブで測定し、充電トランスの 2 次側に接続されている De-Qing 回路により適切な値に設定される。PFN は特性インピーダンスが  $4.7\Omega$  でパルス幅  $5.6\mu s$  を得るために 20 段 2 並列の LC で構成されており、PFN で充電された電気エネルギーはサイラトロンスイッチ (45kV、4.5kA) で放電することでクライストロンアセンブリに送られる。

## 2.2 クライストロンアセンブリ

クライストロンアセンブリはクライストロン、ヒータートランス、パルストランス、パルストランス用タンク、集束電磁石で構成され、パルストランスは絶縁油中で使用される<sup>[2]</sup>。仕様は周波数 2856MHz、平均パルス出力電力 40MW、RF パルス幅  $4\mu s$ 、繰り返し 50pps である<sup>[3]</sup>。

Figure 2 にクライストロンアセンブリの回路図を示す。パルストランスは電圧と電流モニター及びヒータートランス等で構成されており、パルス電源で出力された電圧を 13.5 倍に昇圧し、クライストロンにピーク電圧で約 300kV、ピーク電流で約 350A のパルスがクライストロンに印加される。

## 3. 運転統計

### 3.1 クライストロン

Figure 3 に現在のクライストロン使用状況及び 2000 年度以降交換したものの使用時間分布を示す。

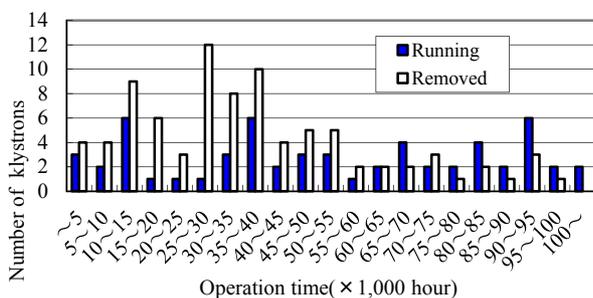


Figure 3: Klystron age profile.

現在使用中のクライストロンで最も多いものは、KEKB 運転開始の 1998 年前後から使用継続している 9 万時間以上の 10 台となっている。この中には 10 万時間を超えているものが 2 台ある。

故障クライストロンの平均運転時間は約 3.8 万時間であるが、現在使用中クライストロンの平均運転時間は約 5.2 万時間であり、クライストロンの寿命は延びている。

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。

Table 1 : Exchange Reason Statistics 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
Total	88	15	4	5	6(14)	23	3	13	19

2014 年度は 1 台の交換を行なった。交換理由は、クライストロンアセンブリのタンク内放電によるインターロック作動回数の増加であった。アセンブリ撤去後、解体して調査を行なったところ、絶縁油タンク内にあるクライストロン印加電圧測定用の容量分圧器<sup>[4]</sup>内部とパルストランス底面に茶色のシミを確認した。タンク底部のオイルからは水検出剤により水が検出されたため、シミは水に由来するものと判断される。その上部にはタンクフランジ絶縁油冷却用水配管の継ぎ手があることから、この水配管の継ぎ手から漏れた水が容量分圧器内部に入り込んだ事により放電が発生したと考えられる。Figure 4 に調査時確認した水漏れ跡(B)と放電痕(A)、Figure 5 に水漏れした箇所的位置関係を示す。

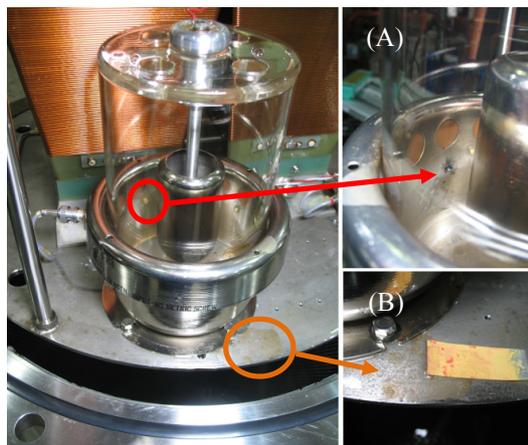


Figure 4: Capacitive divider.

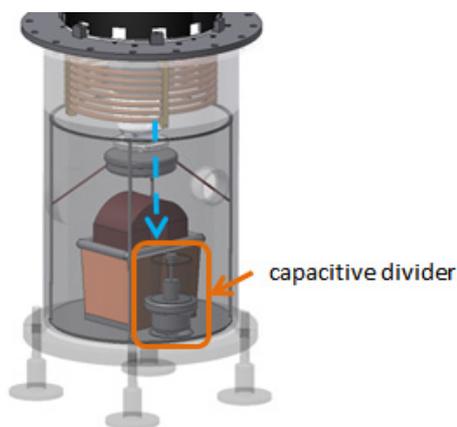


Figure 5: Klystron assembly tank.

タンクフランジ単体での通水試験と加圧試験を行なった結果、水配管継ぎ手のパイプ根元部分にて水漏れが見られた。水漏れの見られたタンクフランジは水配管を手直し後、テストベンチにて通水と加圧試験を行ない、再利用する予定である。

### 3.2 サイラトロン

Figure 6 に現在のサイラトロンの使用状況及び1998年度以降故障したものの使用時間分布を示す。

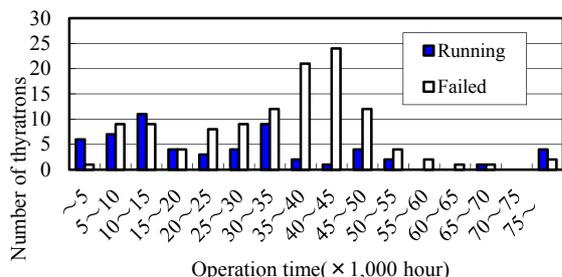


Figure 6: Thyatron age profile.

現在使用しているサイラトロンの平均運転時間は約 2.7 万時間である。また、故障サイラトロンの平均運転時間は約 3.7 万時間である。運転時間が 3.5 万時間を超えたあたりから故障台数が増加し、故障台数が最も多いのは 4 万～4.5 万時間運転したものとなっている。3.5 万時間を超えたサイラトロンは平均寿命に近いので、注意して監視を続ける必要がある。運転時間が 4.5 万時間以上継続して使用しているものは 8 台あり、この内 10 万時間を超えているものが 2 台ある。

2014 年度の故障によるサイラトロンの交換台数は 5 台であった。内訳は、リザーバガス減少<sup>6)</sup>によりキープアライブ電流が流れなくなったものが 1 台、運転中にサイラトロンヒーター電流低下によるインターロックの作動が多発したものが 1 台、サイラトロンヒーターケーブル断線が 1 台、サイラトロンシャーシ故障が 2 台であった。

## 4. 運転保守

### 4.1 概要

KEK 電子陽電子入射器では大電力高周波源の電源として高圧パルス電源を使用<sup>6)</sup>している。安全かつ安定した加速器運転のため、過去の不具合事例を参考に定期点検やメンテナンスを行なっている。

不具合事例の中には長期使用に起因するものも出てきており、運転中の各種電圧電流メーター値の確認や、温度測定などを定期的に行なうことで、不具合の事前予測の精度が上がるよう努めている。

次項に 2014 年度に発生した高圧パルス電源関連の不具合事例と調査した内容を述べる。

### 4.2 パルス電源内デイスパイカーコイル発熱

加速器運転中にクライストロンギャラリーにて異臭がしているとの報告があったため、発生源の調査をしたところ、高圧パルス電源の充電筐体内のデイスパイカーコイルに発熱の痕跡が見られた。デイスパイカーは Figure 1 の A で示され、サイラトロンの導通時に発生するスパイクノイズから充電ホールドオフダイオードと充電トランスを保護するための回路である。Figure 7 に不具合時のデイスパイカーコイルの写真を示す。(a)側は不具合発生直後に撮影、(b)側は部品交換後に撮影したものである。



Figure 7: De-spiker.

不具合原因として、発熱したコイルは 1995 年製造のものであり、経年劣化により耐圧が低下したことで温度上昇したものと考えられる。また、デイスパイカー抵抗は 2kΩ から 6kΩ に増加していたためコイル、抵抗共に交換した。

上記不具合が発生したため、全セクターのデイスパイカーの温度をサーモグラフィで測定したが、温度が高い場所は無かった。保守面から不具合が発生したものと同型のコイルは事前交換を行なった。

### 4.3 整流トランスのケーブル末端発熱

加速器運転中に IVR の機械的上限にあたるリミットスイッチが押されたことで、インターロックが作動した。

現場にて 3 相 200V の電圧、電流メーター値を調査したところ、U 相 30A、V 相 120A、W 相 160A で U 相に流れる電流が極端に少なく、3 相のバランスが悪いことが判明した。

更に電源筐体内を調査したところ、整流トランス (Figure 1 の B 部分) の U 相端子根元のケーブルが

半断線状態であった。

Figure 8 に不具合時の整流トランス 3 相 200V 端子の写真を示す。(a)側は 3 相 200V 各相接続の様子、(b)側は U 相部分のみを拡大したものである。

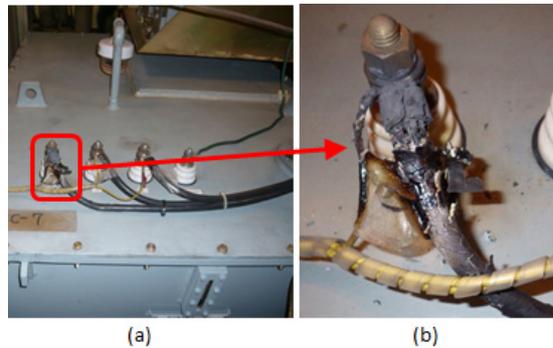


Figure 8: Primary input terminals of the rectifier transformer.

原因特定のため、整流トランスの U,V,W 相間のインダクタンス及び抵抗測定を行なった。その結果を Table 2 に示す。

Table 2: Measured Electrical Data of the Rectifier Transformer

Terminal	Inductance(H)	Resistance(k $\Omega$ )
U-V	0.053	1.7
U-W	0.048	1.7
V-W	0.095	0

この結果から、トランスの U 相が故障しているとわかった。

上記不具合が発生したため、全セクター1次側の3相 200V 電圧と電流メーター値を調査した。メーター故障が何箇所も見られたが、実際に電流バランスが悪い場所は無かった。

## 5. まとめ

長期間の連続運転による不具合事例も散見されており、特に長寿命となっているユニットについては今後も不具合の兆候が無いかに注意深く観察を続ける必要がある。定期点検や運転時のデータ収集で蓄積した情報から、事前交換を行なうことで、加速器運転停止を伴う重大な故障の防止に役立てたい。

## 参考文献

- [1] Xiangyu Zhou, "Present Status of the KEK Electron/Positron Injector Linac", Proceedings of this Meeting.
- [2] 松本利広 他、"KEKB 8GeV LINAC 大電力高周波源の現状", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug. 2001.
- [3] 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.
- [4] T.Toufuku, et al, "Maintenance Activity of High-Power RF System In KEK Electron-Positron

Linac(II)", Proceedings of the 37th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2012, pp.1221-1223.

- [5] 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 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003, pp.321-323.
- [6] M.Baba, et al, "Operation and Maintenance Activity of RF System in KEK Electron-Positron Linac", Proceedings of the 38th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2013, pp.608-610.