

KEK 電子陽電子入射器における高周波源の運転統計及び維持管理(Ⅱ)

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

東福知之^{#,A)}, 今井康雄^{A)}, 馬場昌夫^{A)}, 熊野宏樹^{A)}, 諸富哲夫^{A)},
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)}, 中尾克巳^{B)},
夏井拓也^{B)}, 福田茂樹^{B),C)}, 本間博幸^{B)}, 松本利広^{B),C)}, 松本修二^{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)}, 明本光生^{B),C)}
Tomoyuki Toufuku^{#,A)}, Yasuo Imai^{A)}, Masao Baba^{A)}, Hiroki Kumano^{A)}, Tetsuo Morotomi^{A)},
Dai Arakawa^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Tetsuo Shidara^{B),C)}, Tateru Takenaka^{B)}, Feng Qiu^{B),C)},
Hiromitsu Nakajima^{B)}, Katsumi Nakao^{B)}, Takuya Natsui^{B),C)}, Shigeki Fukuda^{B),C)}, Hiroyuki Honma^{B)},
Toshihiro Matsumoto^{B),C)}, Shuji Matsumoto^{B),C)}, Hideki Matsushita^{B)}, Takako Miura^{B),C)}, Shinichiro Michizono^{B),C)},
Yoshiharu Yano^{B),C)}, Mitsuo Akemoto^{B),C)}
A) Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.
B) High Energy Accelerator Research Organization
C) SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

Abstract

During the summer shutdown in 2017, two additional S-band accelerating units are joined into KEK electron-positron linac (one new S-band unit and another one converted from two C-band units). Currently, 59 high-power S-band klystrons (one for each unit) power our linac. The linac used to have another electron gun (called 3T gun) in its middle. This enables us to perform the construction work of upgrade upstream for super KEKB as well as to operate downstream the beam injection for Photon Factory. Once 23 klystrons were upstream while 34 were downstream, but 3T gun was removed in the shutdown and our linac is now operated as a whole. Average operational time of the klystrons and thyratrons in use are 64,000 hours and 31,000 hours, respectively. Four klystrons and five thyratrons were replaced in 2017. This paper reports the summary of the operation statistics of the klystrons and thyratrons as well as the major failures observed in our klystrons and modulators.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では、高周波源として 59 台の大電力クライストロンを使用している。2017 年度はユニット復元及び新規ユニット追加により新たに 2 ユニットが運転を開始した。

これまで高周波源は上流部(23 台)、下流部(34 台)に分かれていたが、これも 2017 年夏の長期メンテナンスで統合され上流下流部の区別はなくなった。

本稿ではクライストロンアセンブリ、サイラトロンに関する運転統計及び大電力高周波源に関する不具合事例について報告する。

2. 運転統計

2.1 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主にクライストロン、パルスランス、集束電磁石、タンクで構成されており、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 である[1]。

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 64,000 時間であり、撤去したクライストロンの平均運転時間は約 38,000 時間である。撤去したクライストロンはクライストロンの不具合以外に集束電磁石やパルスランスの不具合でも撤去を行なっている。撤去後の調査においてクライストロンに不具合が見られなかった場合、そのクライストロンは再度運転で使用している。その為、撤去したクライストロンの平均運転時間と比べ、現在使用しているクライストロンの平均運転時間は長くなっている。

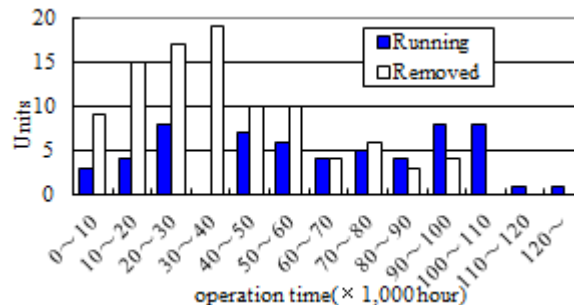


Figure 1: Klystron age profile.

[#] toufuku@post.kek.jp

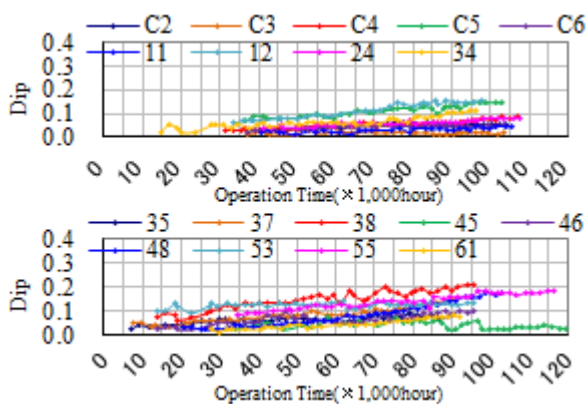


Figure 2: Dip test measurement history.

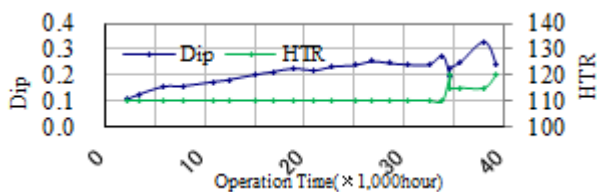


Figure 3: Dip test measurement history of emission decrease klystron.

Table 1: Exchange Reason of Klystron Assembly

Year	The number of the klystron 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 Formers 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
Total	97	15	4	5	6(14)	27	3	13	24

Figure 2 に 90,000 時間以上運転を行なっている 18 台の Dip テスト[2]測定結果を示す。運転時間が長くなるにつれて徐々に Dip が深くなっているが、急激な変化は見られていない。Figure 3 にエミッション減少により撤去したクライストロンの Dip テスト測定結果を示す。33,000 時間を超えてから Dip の変化量が大きくなってきている。はじめはクライストロンの HTR 電圧を上げて様子を見ていたが、最終的にエミッション減少と判断し交換を行なった。18 台のユニットにはこのような兆候がまだ見られていない。しばらくは使用可能であると判断できる。

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。2017 年度は 4 台の交換を行なった。全て集束電磁石のトラブルによる交換であった。下記に詳細を示す。

(1) クライストロン集束電磁石コネクタからの水漏れによる交換。(2 台)

1 台目はクライストロンギャラリーを通行していた際、集束電磁石のコネクタ下周辺に水溜りができていた為に気が付いた。コネクタ周辺を確認すると Figure 4 に示すようにコネクタから水が漏れた跡が見られた。集束電磁石の水漏れと判断し、交換を行なった。集束電磁石のインターロックが作動するなどの前兆は見られなかった。

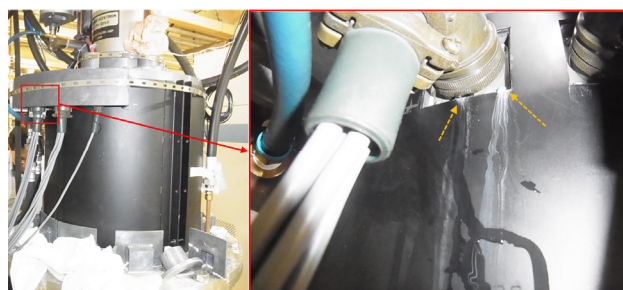


Figure 4: Water leak from klystron magnet connector.

2 台目は前兆として集束電磁石のコイル電圧もしくは電流が閾値を超える事で発生するインターロックの頻度が徐々に増えはじめた。電源の不具合、コネクタの接触不良、ケーブル不良、リモートコントローラ系の不具合を疑い交換等を行なってみたが症状が改善しなかった。電源電圧値が頻繁に変動するようになり負荷側を調査したところ、Figure 5 に示すように 1 台目と同様コネクタからの水漏れの跡を発見。集束電磁石の絶縁抵抗測定を行なったところ、通常 2000MΩ の抵抗値が数十 kΩ まで低下していた。集束電磁石の水漏れと判断し、交換を行なった。

上記 2 例共に撤去後、集束電磁石の調査を行なった。Figure 6 に 2 台目に撤去した集束電磁石の天板を外した様子を示す。モールド外の冷却水パイプ部で水漏れが起こり、溜まった水が流れてコネクタ部分まで到達し、電圧変動などが発生していた。1 台目も 2 台目と同様にモールド外の冷却水パイプ部で水漏れを起こしていた。

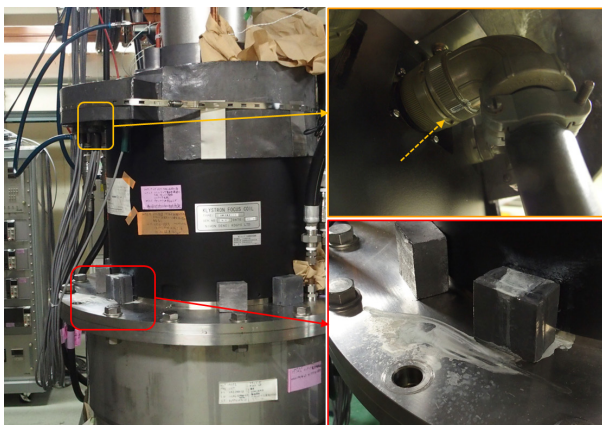


Figure 5: Water leak from klystron magnet connector.



Figure 6: Klystron magnet water leak point.

(2) クライストロン集束電磁石絶縁抵抗低下による交換(2台)。

夏期メンテナンスで行なうクライストロン集束電磁石絶縁抵抗測定で発見した。通常は予備のクライストロンアセンブリと交換を行なうが、この時はメンテナンス期間も長く、予備アセンブリの本数も少なかった為、絶縁抵抗が低下していた集束電磁石のみを入れ替え後、再設置を行なった。

2.2 サイラトロン

KEK 電子陽電子入射器ではクライストロン用パルス電源[3]のスイッチ(45kV、4.5kA)としてサイラトロンが使用[4]されており、現在 CX2410K(e2V 社製)、CX2411(e2V 社製)、L4888B(Litton 社製)の3種類を使用している。

Figure 7 に現在使用しているサイラトロンの使用状況及び1998年度以降故障により交換したものの使用時間分布を示す。

現在使用中のサイラトロン59台の平均運転時間は約31,000時間であり、使用不能になったサイラトロン133台の平均運転時間は約39,000時間である。

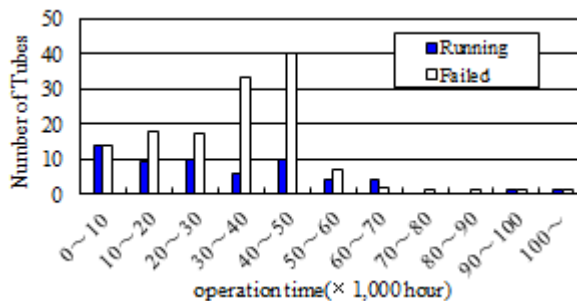


Figure 7: Thyatron age profile.

2017年度は故障により5台の交換を行なった。下記に詳細を示す。

- (1) ユニット KL_B2、型式 L4888B、運転時間 13,000h
夏期メンテナンス後の立ち上げ前点検でキープアライブ電流が 30mA までしか流れなかった(正常時は 250mA 程度流れる)為、交換を行なった。
- (2) ユニット KL_23、型式 CX2410K、運転時間 55,000h
クライストロンの立ち上げ時、サイラトロン付近より放電音が聞こえたとの事で調査を行なった。調査時に放電音は治まっていた為、放電箇所の特定はできなかった。後日、再調査を行なったところ、サイラトロンの補助グリッドで放電[4]している事が判明し、交換を行なった。
- (3) ユニット KL_42、型式 L4888B、運転時間 49,000h
サイラトロンヒーター電流もしくはリザーバー電流が閾値以下まで下がった時に作動するインターロックが発生。3回目のダウン後、インターロックが復帰しなかった。現場で確認を行なったところヒーター電流、リザーバー電流、キープアライブ電流が 0A となっていた。電源不良も考えられた為、サイラトロン直前のリザーバー電圧、ヒーター電圧をテスターで測定してみたが異常無し。クランプメーターを用いてリザーバー電流、ヒーター電流を測定してみたが、メーター値と同様にほぼ 0A を指していた。サイラトロン不良と判断し、交換を行なった。
- (4) ユニット KL_26、型式 L4888B、運転時間 16,000h
サイラトロンヒーター電流もしくはリザーバー電流が閾値以下まで下がった時に作動するインターロックの発生頻度が増加。監視カメラを設置しインターロック作動時の各メーター値を確認したところ、ヒーター電流及びリザーバー電圧が低下、リザーバー電流が上昇した履歴が見られた(ヒーター電圧メーターはリザーバー電圧メーターと共用の為、未確認)。サイラトロン不良と判断し、交換を行なった。

- (5) ユニット KL_B4、型式 L4888B、運転時間 42,000h
サイラトロンの立ち下げデータ取得時、Figure 8 に示すように、クライストロンビーム電圧波形のジッターが1分間での測定で許容としている 30ns を超えている事が判明した。この時は、リザーバー電圧+0.2V

の調整で 30ns 以下まで治まった為、継続して運転に使用した。安定に運転で使用する為には、さらにリザーバー電圧を上げる必要があったが、電圧調整を行なうスライダックの上限によりこれ以上リザーバー電圧を上げる事ができなかった。運転停止期間に交換を行なった。

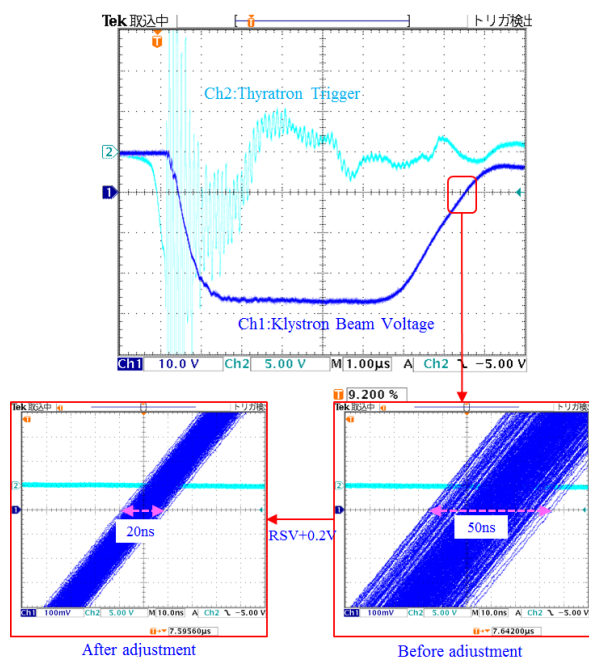


Figure 8: Klystron beam voltage jitter.

3. 大電力高周波源に関する不具合事例

3.1 集束電磁石電源コントロールケーブルの接触不良

運転中、KL_26 ユニットにてクライストロン出力が 3% 低下した。調査を行なったが、クライストロンビーム電圧、ビーム電流、入力 RF は変化せずにクライストロン出力のみ変化している状態だった。さらに調査を行なったところ、集束電磁石#2 コイルの設定値が運転値 27.0A(19.0V) に対して、25.3A(17.7V)まで低下している事が分かった。電源のコントロールケーブルを揺らしてみたところ、正しい設定値に戻り、クライストロンの出力が回復。#2 コイル電流低下が原因と判明した。インターロックの閾値はコイル電流±3A、コイル電圧±5V に設定しており、今回はこの閾値内の変化量だった(コイル電流-1.7A、コイル電圧-1.3V)為、インターロックは作動しなかった。コントロールケーブルの接触不良により設定値が変化した事が分かった為、ケーブルと端子の接触部を強く押し込み接触が良くなるようにした。この処置後、#2 コイルの設定値が変化する事がなくなり、クライストロン出力が安定となった。

近年、集束電磁石電源のコントロールケーブルが接触不良を起こし、コイル電流、電圧が変動するトラブルが増加傾向にある。コントロールケーブルの端子の接続はコンタクトスリットにケーブルを圧入する方式により接続しているものが大半である。ケーブルと端子の接続をほとんど付けにしたコントロールケーブルを準備し、トラブル時

に使用できるようにしている。

3.2 集束電磁石電源メーカー修理不可品の増加

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[5]されており、合計で約 530 台使用している。20 年以上同じ電源を使用している為、電源故障時にメーカーへ修理依頼をしても修理不可で返却されるものが増えてきた。その為、予備電源の在庫も徐々に減少している。同じ型式の電源を購入しようにもほぼ販売終了となっており、追加購入する事ができない。

現在は予備電源が無くなる前に代替電源の選定を行ない、評価試験を進めている状況である。

4. おわりに

2017 年度のクライストロンアセンブリ交換の要因は全て集束電磁石のトラブルによるものであった。4 台もの集束電磁石を交換する事を想定していなかったが、過去の蓄積してきたデータから予備品を十分に確保していた事で対応可能であった。長時間運転を行なっている事で予期せぬトラブルが発生する事もある為、今後も蓄積してき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] M. Baba *et al.*, “OPERATION STATISTICS AND MAINTENANCE ACTIVITY OF RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 978-981.
- [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] M. Baba *et al.*, “OPERATION AND MAINTENANCE ACTIVITY OF HIGH-POWER RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 1121-1124.
- [4] 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.
- [5] T. Toufuku *et al.*, “MAINTENANCE ACTIVITY OF HIGH-POWER RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC(II)”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Toyonaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 1221-1223.