

KEK 電子陽電子入射器における大電力高周波源の運転状況(2024 年度)

OPERATION STATUS OF RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC(FY2024)

馬場昌夫^{#,A)}, 東福知之^{A)}, 今井康雄^{A)}, 久積啓一^{A)},
明本光生^{B)}, 荒川大^{B)}, 宇賀神貴洋^{B)}, 片桐広明^{B)}, 川村真人^{B)}, 設楽哲夫^{B)}, 竹中たてる^{B)}, 中島啓光^{B)},
夏井拓也^{B,C)}, 松下英樹^{B)}, 松本修二^{B,C)}, 松本利広^{B,C)}, 三浦孝子^{B,C)}, 矢野喜治^{B)}, 王盛昌^{B,C)}
Masao Baba^{#,A)}, Tomoyuki Toufuku^{A)}, Yasuo Imai^{A)}, Keiichi Hisazumi^{A)}, Mitsuo Akemoto^{B)},
Dai Arakawa^{B)}, Takahiro Ugajin^{B)}, Hiroaki Katagiri^{B)}, Masato Kawamura^{B)}, Tetsuo Shidara^{B)}, Tateru Takenaka^{B)},
Hiromitsu Nakajima^{B)}, Takuya Natsui^{B,C)}, Hideki Matsushita^{B)}, Shuji Matsumoto^{B,C)}, Toshihiro Matsumoto^{B,C)},
Takako Miura^{B,C)}, Yoshiharu Yano^{B)}, Sheng Chang Wang^{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 approximately 5,800 hours in FY2024. A total of 61 high-power S-band klystrons as RF sources and thyratrons as high-voltage switches are used in this accelerator. The average operating hours of the klystrons, thyratrons, and RF windows in use are 87,000 hours, 42,000 hours, and 116,000 hours, respectively. 2 klystrons and 16 thyratrons were replaced in FY2024. In this paper, we report the operational statistics of the klystrons, thyratrons, and rf windows in FY2024, also we state the maintenance of those devices and their failures.

1. はじめに

KEK 電子・陽電子入射器は、最大 7 GeV の電子および最大 4 GeV の陽電子を生成・加速可能な線形加速器である。本加速器は、2024 年度において約 5,800 時間の運転が行われた。現在は高周波源として 61 台の高出力 S バンドクライストロン、高電圧スイッチとしてサイラトロンが使用されている。本稿では、2024 年度におけるクライストロン、サイラトロン、導波管高周波窓に関する運転統計、保守、故障事例について報告する。

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、パルスランスで構成され、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 μ s、繰り返し 50 pps である[1]。KEK 電子・陽電子入射器では、以下のクライストロンが使用されている。

- PV-3050 (29 台)
- PV-3030A4 (5 台)
- PV-3030A3 (2 台)
- E3754 (8 台)
- E3730A (17 台)

2024 年度中は、これらのクライストロンにより合計約 5,800 時間の運転が行われた。Figure 1 に現在稼働中のクライストロンアセンブリ(61 台)の使用時間分布と 2000 年度以降に不具合によって交換されたクライストロンアセンブリ(124 台)の使用時間を示す。

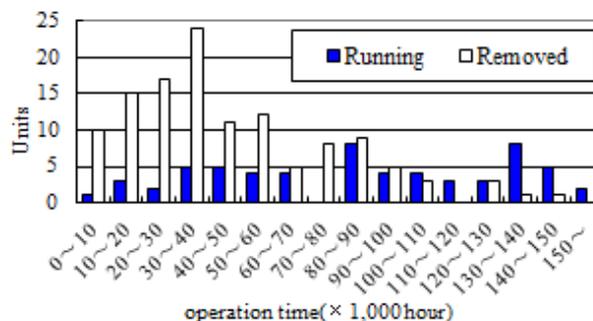


Figure 1: Klystron assembly use as of March 2025.

リ(124 台)の使用時間を示す。

稼働中のクライストロンアセンブリの平均運転時間は約 87,000 時間であり、昨年度から約 5,000 時間増加している。過去 10 年間では累積で約 30,000 時間の増加が見られる。現在稼働している 61 台のうち、運転時間が 80,000 時間以上に達しているものが 37 台(約 61%)を占めている。特に 130,000 時間以上の運転実績を持つものが 8 台存在しており、最長のものは 1998 年の設置以降、1 度も交換されずに約 158,000 時間運転している。一方で、2000 年度以降に交換された 124 台のアセンブリのうち、30,000~40,000 時間で交換されたものが 24 台(約 39%)で最も多く、交換台数が多い順で見ると運転時間 10,000~40,000 時間の範囲が 56 台で、全体の約 92%を占めている。不具合により交換したクライストロンアセンブリの平均運転時間は約 47,000 時間である。

Figure 2 ではクライストロン本体に焦点を当てた使用時

babam@post.kek.jp

間分布と 2000 年度以降に故障のため交換したクライストロンの使用時間を示す。

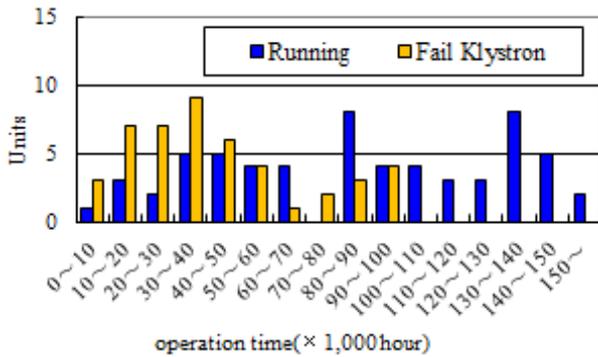


Figure 2: Klystron use as of March 2025.

クライストロン本体の統計においても、稼働中の装置の約 60%が 80,000 時間以上の使用実績を持ち、長寿命を示している。また、故障により交換されたクライストロン(46 台)の交換台数の分布では 10,000~40,000 時間の範囲が高く、運転初期の故障リスクが比較的に高いことが示されているが、100,000 時間以上ではクライストロン故障による撤去を行っていない。

2.2 2024 年度のクライストロンアセンブリのトラブル事例

2024 年度はクライストロン冷却水パイプから水漏れによる交換が 1 台、クライストロン集束電磁石内壁からの水漏れによる交換が 1 台、計 2 台の交換を行なった。下記に詳細を示す。

- 1) クライストロンの冷却水パイプからの漏水による交換 (1 台目)。
 - KL_C3(形式 E3730A) 運転時間 141,954 h



Figure 3: Klystron (C3) water leakage point.

水漏れ発生時の様子及び水漏れ箇所を Fig. 3 に示す。クライストロン冷却水パイプより水漏れしており、床面に水溜まりが出来ている事で気付いた。KL_C3 は 2023 年 2 月 13 日に同箇所から水漏れしたため、設置した状態で金属用補修材を塗布し、水漏れ箇所を修復[2]していたユニットである。今回再発したため、交換となった。

撤去されたクライストロンは新品冷却水パイプに交換して通水試験を行っており、問題無ければ再使用する予定である。

- 2) クライストロン集束電磁石内壁からの水漏れによる交換(2 台目)。
 - KL_B2(形式 PV-3050) 運転時間 77,674 h

2024 年 5 月 22 日に KL_B2 クライストロン出力が通常時から 25%程度低下するトラブル発生。翌 23 日の調査時にクライストロン出力導波管部を冷却している配管からの水漏れを確認した。水漏れ確認時の様子及び水漏れ箇所を Fig. 4 に示す。

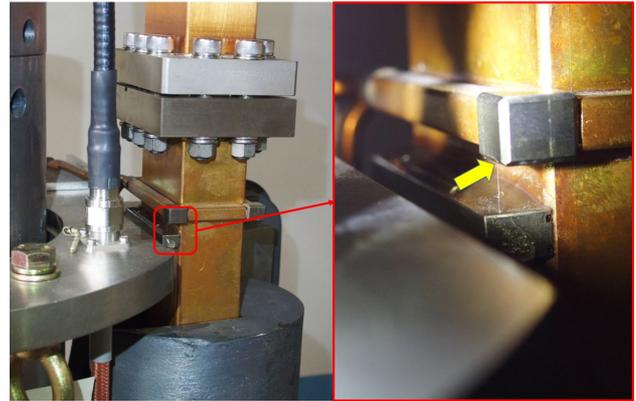


Figure 4: Klystron (B2) water leakage point.

水漏れ箇所に金属用補修材を用いて処置を実施。その後の通水試験において漏水が無くなったことを確認したため、運転を再開して状況を観察していた。しかし、6 月 14 日にクライストロン集束電磁石の水抜き孔から漏水 [3]が発生した。この時点でクライストロンの出力は約 2.2%程度低下していたが、ビーム運転には影響が無かったため、水抜き孔を紙ワイパーで塞いだまま運転を継続した。

6 月 16 日時点では漏水量の増加は見られなかったが、KL_B2 のクライストロン出力が徐々に低下し、ビーム運転に支障をきたした。このため、スタンバイのクライストロン(KL_B7)と入れ替えを行い、KL_B2 は運転停止して以下の調査を行なった。

- 集束電磁石の水抜き孔を塞いでいた紙ワイパーを除去したところ、約 5 L の水が排出された。
- 集束電磁石の絶縁抵抗測定を実施。
 - #1: 2 MΩ
 - #2: ∞
 - #3: ∞
 - #4: 23 MΩ
 - #5: 100 kΩ 以下(テスター測定: 617 Ω)
 - #6: ∞

コイル#1、#4、#5 の絶縁抵抗が低下している。中でもコイル#5 が最も悪化している。集束電磁石は上部からコイル#1~#5 の順番で配置されており、コイル冷却用の水配管を内蔵している。このため、集束電磁石内部、または外部で漏水した場合に下部にあるコイルが影響を受けやすくなっている。一方、コイル#6 は集束電磁石の底

部に取り付ける別部品である。

- ファイバースコープを用いた集束電磁石内部調査を行なった結果、集束電磁石内壁からの水漏れを確認した。

Figure 5 にファイバースコープで撮影した集束電磁石内側の様子を示す。



Figure 5: Water leak from klystron magnet.

集束電磁石の水抜き孔の下端まで水が溜まっている事を確認した後、集束電磁石のみ 12 L/min 通水して、内壁から漏水する様子を撮影した。

- 集束電磁石内側のクライストロン高周波ケーブル N 型コネクタ周りに導波管冷却水漏れによる影響が見られるか確認したが、水漏れによる汚損は確認できず。
- クライストロン冷却水のみ通水して漏水するか確認したが、水漏れを確認出来ず。

上記調査後、このクライストロンアセンブリは長期メンテナンス中に交換が行なわれた。撤去品の解体後にクライストロンは水漏れが無かったため、集束電磁石を交換して再使用している。

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を使用しており、58 台の L4888B(Stellant Systems 社製)と 3 台の CX1836A(Teledyne e2v 社製)を使用している。Figure 6 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。

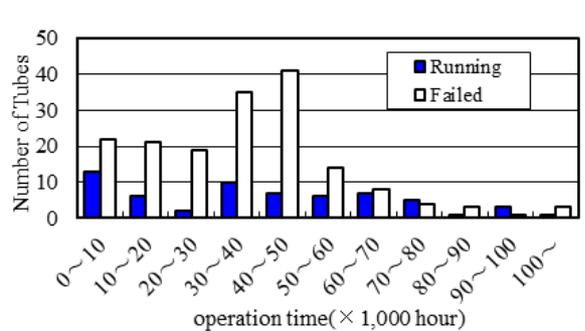


Figure 6: Thyatron age profile as of March 2025.

現在使用しているサイラトロンの平均運転時間は約 42,000 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 41,000 時間である。

2024 年度は 16 台のサイラトロン交換を行った。内訳は故障による交換が 8 台、事前交換が 8 台である。次項で詳細を示す。

3.2 2024 年度の不具合によるサイラトロン交換

- リザーバー電圧調整幅が無い事による交換 (1 台目)
 - KL_38 (L4888B, S/N:100456) 運転時間 102,030 h
サイラトロンレンジング[4]にて高圧波形のジッタが 100 ns 以上あったが、リザーバー電圧調整用スライダックの機械上限に達しており、リザーバー電圧の調整幅が無いため交換を行なった。
- リザーバー電圧調整幅が無い事による交換 (2 台目)
 - KL_B6 (L4888B, S/N:100870) 運転時間 55,958 h
高圧波形のジッタが 40 ns あったため、基準の 30 ns 以下になるようにリザーバー電圧を調整するが改善しなかった。リザーバー電圧調整用スライダックが機械上限に達しており、リザーバー電圧の調整幅が無いため交換を行なった。
- サイラトロンの自爆頻度が多いため交換
 - KL_24 (L4888B, S/N:100518) 運転時間 56,739 h
サイラトロン自爆によるインターロック作動が多発。リザーバー電圧を -0.5 V 調整 (直近に行なったレンジング時の下限値) したが改善しなかったため、サイラトロン寿命と判断して交換した。
- リザーバー及びヒーター電流が 10% 程度低下したため交換
 - KL_A1_B (L4888B, S/N:300269) 運転時間 8,132 h
ヒーターおよびリザーバー電流が度々 10% 程低下。電流低下時のヒーターとリザーバー電圧は共に 0.1 V 程上昇していたため、サイラトロンの不具合と判断して交換した。
- リザーバー電流が 15% 程度低下したまま回復しないため交換
 - KL_41 (L4888B, S/N:100120) 運転時間 164,948 h
サイラトロンのリザーバー電流が 15% 程低下したまま回復せず。電流低下時のリザーバー電圧が 0.2 V 程上昇していたため、サイラトロン不具合と判断して交換した。
- サイラトロン点弧タイミングジッタ大のため交換
 - KL_A1_B (L4888B, S/N:300269) 運転時間 8,132 h
サイラトロン設置後に行なった高圧波形のジッタ確認において、幅 15 ns 程度のジッタが約 20 ns の間隔で飛ぶ症状があった。リザーバー電圧を上限値まで上げて一旦は症状が緩和されていたが、次第にジッタが飛ぶようになり、最終的には幅 50 ns 以上のジッタが頻繁に見られるようになったため交換となった。
- サイラトロンが点弧せず交換
 - KL_C4 (L4888B, S/N:300148) 運転時間 24,063 h
運転中に充電電流低下によるインターロックが作動し

RF OFF となった。現場確認するとトリガーON されているが、サイラトロンが点弧していない状況であった。サイラトロンのヒーターとリザーバー電圧、電流メーター値を確認すると以下であった。

- ヒーター電圧 6.2 V、電流 60 A (閾値 53 A)
- リザーバー電圧 5.8 V、電流 23 A (閾値 21 A)

()内は電流低下時に作動するインターロック閾値であり異常無し。また、キープアライブ電圧、電流は 100 V、240 mA で、インターロック閾値設定の範囲内のため正常。次にサイラトロントリガーラインの不具合を疑ったが、トリガー出力レベルが 5 V 以上で波形形状も異常が見られなかった。この結果、サイラトロンの不具合と判断して交換となった。

8) キープアライブ電流低下のため交換

■ KL_56(L4888B、S/N:100806) 運転時間 56,191 h
運転中にキープアライブ電流が閾値の範囲外となりインターロック(I Keep(H,L))が作動。現場にて、キープアライブ電源のメーター指示値を確認すると以下であった。

- 電圧 140 V
- 電流 35 mA (通常 250 mA)

現状のインターロック下限閾値が 150 mA、上限閾値が 320 mA となっているため、電流が大幅に低下したことが原因でインターロックが作動した。故障箇所の特のため、テスターを用いてサイラトロンシャーシ端子台のキープアライブ電圧値を測定した結果、設定電圧に近い 130 V であった。これにより、キープアライブ電源出力からサイラトロンシャーシまでは健全であると判定。リザーバースガス減少[5] に起因する寿命と判断し交換となった。

3.3 2024 年度の事前交換

2024 年度においては、計 8 台の事前交換を実施した。内 5 台は、L4888B の予備品確保を目的として交換されたものであり、高圧印可時間が比較的短いものを選定した。一方、残る 3 台は、2022 年度に導入後、テストスタンドにて試験を継続してきた CX1836A の運転実績を蓄積することを目的として交換されたものである。

Figure 7 にサイラトロン CX1836A と L4888B を示す。CX1836A は L4888B とフランジサイズが異なるため、既



Figure 7: Thyatron CX1836A and L4888B.

存のサイラトロンシャーシとの固定には新規製作した変換フランジを用いて対応している。

4. 導波管高周波窓

4.1 概要

導波管高周波窓は真空を保持し、高周波を通過させる為にクライストロン出力部と導波管部に使用している。導波管高周波窓はクライストロンアセンブリ交換の際に加速管を真空に保つため設置している[6]。

4.2 運転統計と保守

Figure 8 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。

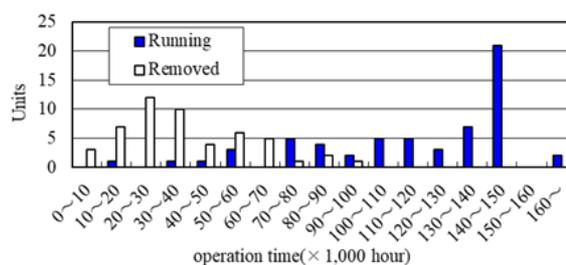


Figure 8: RF window age profile as of March 2025.

2025 年 3 月末時点における稼働中の導波管高周波窓の平均運転時間は約 116,000 時間に達しており、最も長寿命の窓では 162,000 時間に到達している。また、140,000 時間以上使用されているユニットは 23 台にのぼり、高周波窓の長寿命化が着実に進展していることが示されている。

2013 年の長期メンテナンス以降、2024 年度までの期間においては、ユニットの新設や復元作業、定期的な保守活動に伴い導波管部が大気に曝露される事があった。しかしながら、これに起因する真空漏れや高周波窓の交換は確認されておらず、高周波出力制御や VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) インターロックによる監視が長寿命化に寄与していると考えられる。

さらに、長期メンテナンス前に実施している窓温度の推移監視や放射線量測定によって、異常兆候を早期に検出することが可能となり、導波管高周波窓の信頼性および保守性が向上している。

5. まとめ

2024 年度は約 5,800 時間の運転を通じて、クライストロンや導波管高周波窓の長寿命化が継続した。クライストロンアセンブリは冷却系の水漏れによる 2 台の交換があったが、迅速な対応により運転への影響を最小限に抑えた。サイラトロンは故障や、予備品の安定的な運用のための事前交換、新しく導入したサイラトロンを運転に投入する等の理由で例年より多い 16 台の交換を行った。導波管高周波窓は大気曝露後もリークなく稼働を継続している。今後も蓄積した運転データと監視結果をもとに、故障の予兆に対する迅速な対応を図りながら、加速器の安定運転に努める。

参考文献

- [1] Y. Imai *et al.*, “Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac”, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Japan, Aug. 4-6, 2004, pp. 317-319.
- [2] T. Toufuku *et al.*, “Operation Status of RF System in KEK Electron-Positron Linac (FY2023)”, Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2024, Yamagata, THP070.
- [3] M. Baba *et al.*, “Maintenance Activity of RF System and RF Windows in KEK Electron-Positron Linac”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, FRPH010.
- [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] 明本光生 他, “KEK 8GeV リニアックでのサイクロtron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
- [6] H. Kumano *et al.*, “Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac (II)”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 2006, pp. 850-852.