

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(Ⅱ)

OPERATION AND MAINTENANCE ACTIVITY OF HIGH-POWER 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)},
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)}, 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

Fifty eight high-power klystrons are used at the KEK electron-positron linac. An upgrade work to SuperKEKB has been started since 2011. Twenty four klystrons have been operated continuously for the injection to two rings (PF, PF-AR). The other 34 klystrons have been operated for the SuperKEKB upgrade work and beam commissioning. The SuperKEKB injection (Phase 1) started in February 2016. At the same time, all klystrons are used for the injection. Average operational time of the klystrons and thyratrons in use are 57,000 hours and 28,000 hours, respectively. Three klystrons and four thyratrons were replaced in 2015.

This paper summarizes the operation statistics of the klystrons and thyratrons as well as failure case of 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 58 台の大電力クライストロンを使用している。

2011 年より SuperKEKB へのアップグレード作業が開始され、58 台の高周波源は 2 つのリングへの入射に必要な 24 台(入射器下流部)のみ連続運転が行われ、残り 34 台(入射器上流部)はアップグレード作業やビームスタディの為に不定期な運転が行われてきた。

2014 年頃からビームスタディの増加に伴い、入射器上流部の運転時間も増加し、2016 年 2 月の SuperKEKB 入射(Phase 1)[1]がはじまると同時に全 58 台の連続運転が開始された。

本稿ではクライストロン、サイラトロンに関する運転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。

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、パルストランス、集束電磁石、タンクで構成されている[2]。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 57,000 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。突出して台数の多い運転時間帯は見られないが、使用台数の約 1/3 にあたる 18 台が 80,000 時間を超している為、注意して監視を行なう必要がある。

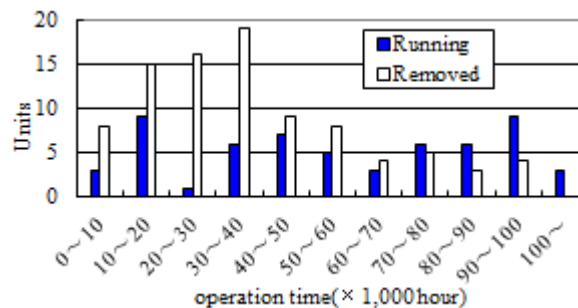


Figure 1: Klystron age profile.

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。

2015 年度は 3 台の交換を行なった。下記に詳細を示す。

[#]toufuku@post.kek.jp

Table 1: Exchange Reason Statistics of Klystron Assembly

| Year | The number of the Klystron assembly exchange | Exchange reason | | | | | | | Others |
|-------|--|----------------------|----------------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------|
| | | 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 | |
| 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 |
| Total | 91 | 15 | 4 | 5 | 6(14) | 23 | 3 | 13 | 22 |

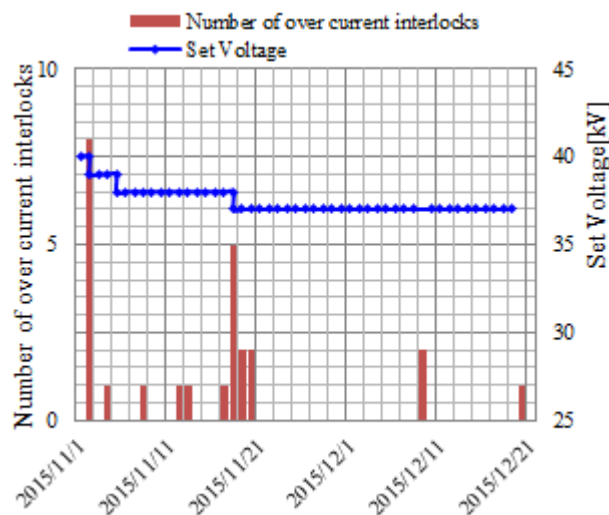


Figure 2: Number of over current interlocks and set voltage transition.

(1) クライストロン管内放電による過電流インターロック作動回数の増加による交換。

運転中にクライストロンの過電流インターロックが多発し、設定電圧を下げないと運転できない状況となった。Figure 2 に過電流インターロックの作動回数と設定電圧の推移を示す。通常はほとんど作動しないインターロックだが、2015/11/2 に計 8 回作動した為、設定電圧を 40kV から 39kV に下げて運転に使用する事となった。過電流の原因がタンク内での放電によるものかクライストロン管内での放電によるものかを判別する為、インターロック作動時のクライストロン内部真空値をビデオカメラで数日間監視を行なった。結果、クライストロン内部真空の悪化が見られた為、クライストロン管内での放電と判断した。監視している間も度々インターロックが作動した為、設定電圧を 39kV から 38kV まで下げた。

しばらくは 1 日 1 回程度のダウンで収まっていたが、2 週間経った頃に再度ダウンが多発した為、設定電圧を 38kV から 37kV まで下げて運転を行なった。設定電圧を 37kV に下げてからダウン頻度は大幅に減少した。

このユニットは陽電子発生源から 2 番目のユニットであり重要箇所であった為、メンテナンス期間中に交換を行なう事となった。通常は予備品との交換を行なうが、今回は設定電圧の低いユニットと入れ替えを行なった。

(2) クライストロン管内放電増加ユニットとの入れ替え。

(1)項で撤去したクライストロンとの入れ替えを行なった。通常、設定電圧は 42kV としているが、このユニットは加速管での放電により設定電圧が制限され 34kV で運転を行っていた。(1)項で撤去したクライストロンは設定電圧 34kV では管内放電が起こらず安定して運転できると判断した。2016/1/4 の入れ替えから 2016/7/1 の運転終了まで管内放電のインターロックは一度も作動せず安定に運転が行なうことができた。

(3) C-band ユニットから S-band ユニットへの変更。

SuperKEKB アップグレードの一環として行なわれた。

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されており、CX2410K(e2V 社製)、CX2411(e2V 社製)、L4888B(Litton 社製)の 3 種類を使用している。

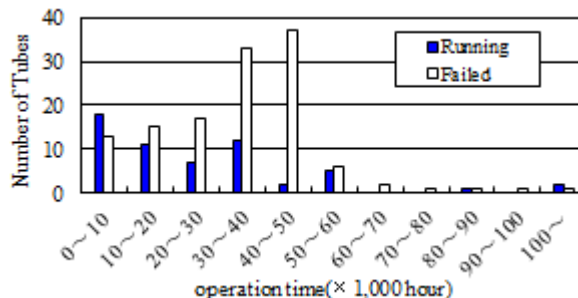


Figure 3: Thyatron age profile.

Figure 3 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 58 台の平均運転時間は約 28,000 時間であり、使用不能になったサイラトロン 127 台の平均運転時間は約 37,000 時間である。2015 年度は故障により 3 台の交換を行なった。下記に詳細を示す。

- (1) ユニット KL_55、型式 CX2411、運転時間 15,000h
コントロールグリッド[4]碍子部放電による交換

キープアライブ電流低下のインターロックが作動した為、現場で確認を行なったところサイラトロンシャーシで放電が起こっていた。Figure 4 に放電が起こっていた箇所を示す。この部分はコントロールグリッド碍子と呼ばれており、サイラトロンのドライバであるトリガー II [5]からのトリガーパルスを送るサイラトロンの GRID2 に入力する中継部分である。このコントロールグリッド碍子で放電が起こる症状は過去に 2 件発生しており、テストベンチの再現試験でサイラトロンが原因により同じ症状が発生すると分かっていた為、今回もすぐにサイラトロンの不具合と判断し、交換を行なった。運転への復帰時間を短縮する為に放電したコントロールグリッド部の碍子はその場で交換は行なわず、サイラトロンシャーシごと交換を行なった。

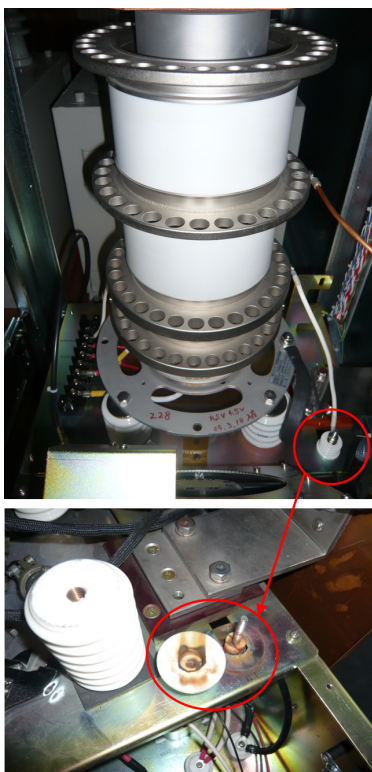


Figure 4: Control Grid insulator damage by discharge.

- (2) ユニット KL_43、型式 L4888B、運転時間 110,000h
リザーバー電流低下による交換

リザーバー電流低下のインターロックが多発し、現場でリザーバー電流の確認を行なったところインターロック

19.5A に対して 19.6A まで低下していた。インターロックを 18.0A まで下げて運転に使用していたが、運転時間が 110,000 時間を超えており、近々使用不能になると判断し交換を行なった。

- (3) ユニット KL_B7、型式 CX2411、運転時間 7,800h
補助グリッド(G1)[3]部ケーブル断線による交換

キープアライブ電流低下のインターロックが作動した為、現場で確認を行なったところサイラトロンシャーシ内の補助グリッド(G1)部の接続ケーブルが放電により断線していた。サイラトロンとサイラトロンシャーシの交換を行なった。

3. 高周波源に関する不具合事例

3.1 高圧ラインと整流トランスタンク間での放電

長期シャットダウンからの立ち上げ時、原因不明で 1 台のクライストロン用パルス電源のステータスが読めなくなった為、現場で確認したところ制御機器故障により低圧ラインに通電がされていない。調査を行なったところ、高圧ラインと整流トランスタンク(GND)との間で放電を起こした痕が見られた。Figure 5 に現場確認直後の高圧ラインと整流トランスタンク(GND)間の距離と放電痕を示す。通常、この高圧ラインには約 20kV が印加されている。その為、整流トランスタンク(GND)との距離が約 2cm まで近づいていた事で放電を起こしていた。

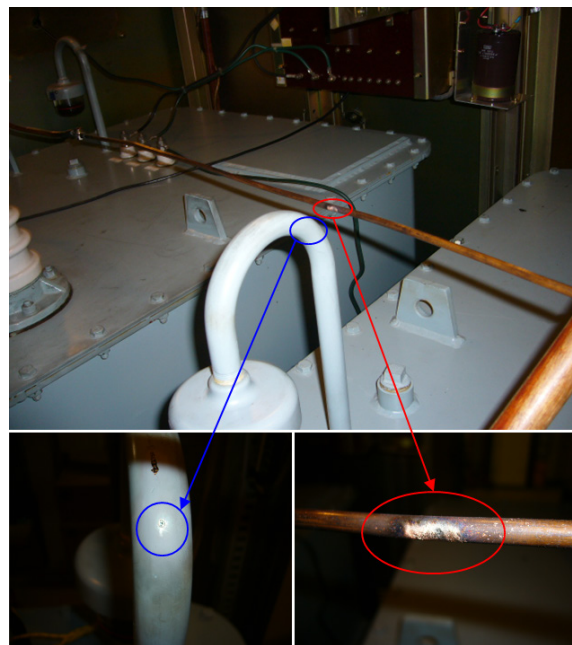


Figure 5: Damage by discharge.

毎年長期シャットダウン時にパルス電源内の清掃及び点検作業を行なっているが、作業の際に高圧ラインと整流トランスタンク間の距離が近くなったものと思われる。

今後、同様の不具合が発生しないように立ち上げ前の点検項目に高圧ライン配線確認の追加を行なった。

3.2 Door SW インターロックの作動頻度増加

Figure 6 に 2000 年度以降 Door SW インターロックが作動したユニット数を示す(扉開放せずに Door SW が作動したユニットのみを計上)。平均して年に 1 ユニット程度だったものが、昨年度(2015 年)は 5 ユニットと急に増加した。これら 5 ユニットのうち 4 ユニットは Door SW に使用しているリミットスイッチに接続していたケーブル端子のネジが緩んでいた事により誤作動を起こしていた。緩んでいたネジを増し締めした事で症状が治まった。残り 1 件はケーブル端子の緩みの確認を行なったが異常は見られなかった。それ以降は症状が再発しなかった。今後も同様のトラブルが増加していくものと予想される。

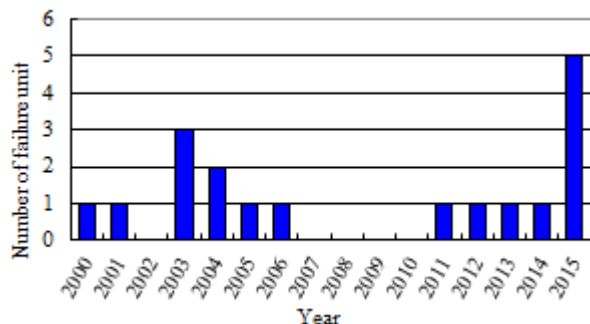


Figure 6: Door SW interlock profile.

3.3 サイラトロンファン故障頻度増加

Figure 7 に 2000 年度以降サイラトロンファン故障により交換を行なったユニット数を示す。2001 年度に 3 ユニット、2002 年度に 2 ユニットの故障が発生している。故障頻度が増加してきた為、使用時間の長いユニットに関しては 2002 年度と 2003 年度の長期メンテナンスなどで計画的に交換を行なった。その年以降の故障頻度は年に 0~1 件に下がっていたが、昨年度(2015 年度)は急に 4 件まで増加した。これら 4 件のうち 3 件は 2 週間毎のメンテナンスで点検を行なった時に異常を発見した。風量は問題なかったが擦れるような音がしていた為、完全に停止する前に交換を行なった。残り 1 件は運転中に停止した為、交換を行なった。今後も故障頻度が増加していくと予想される為、2 週間毎のメンテナンス時に注意して点検を行なっていく必要がある。

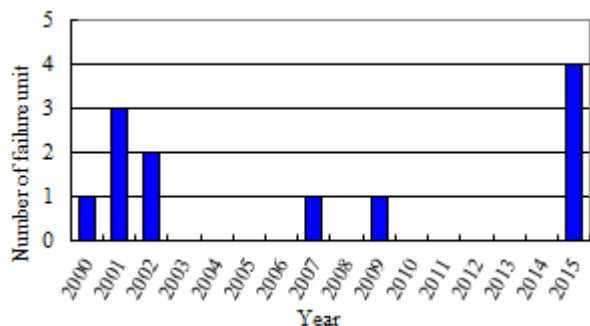


Figure 7: Thyatron FAN interlock profile.

4. まとめ

SuperKEKB 入射が開始された為、これから徐々に高周波源の運転時間も増加するものと予想される。運転時間の増加に伴い、クライストロンやサイラトロンの故障頻度も増加していくものと思われる。安定した運転を継続して行なう為に、不具合の兆候を捉えて迅速に対処する事が重要である。

参考文献

- [1] K.Yokoyama, "Present Status of the KEK Electron/Positron Injector Linac", Proceedings of this Meeting.
- [2] Y.Imai *et al.*, "Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac", Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2004, 4P42; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj1_lam29/WebPublish/4P42.pdf
- [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, 2015, THP060; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP060.pdf
- [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, 2002, 8P-17; http://www.pasj.jp/web_publish/lam27/PDF/8P-17.pdf
- [5] 中島啓光 他, "サイラトロンドライブの故障対策", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2001, 1P-28; http://www.pasj.jp/web_publish/lam26/PDF/1P-28web.PDF