

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

馬場昌夫、東福知之、今井康雄（三菱電機システムサービス）、
明本 光生、荒川 大、片桐 広明、川村 真人、設楽 哲夫、竹中 たてる、
中島 啓光、夏井 拓也、福田 茂樹、本間 博幸、松本 利広、松下 英樹、三浦 孝子、
道園 真一郎、矢野 喜治、松本 修二（KEK）

要旨

KEK電子陽電子入射器は、最大で7GeVの電子および4GeVの陽電子を生成・加速する能力を持つ線形加速器である。

現在この加速器は、入射部とそれに続く60台のRFユニットから構成され、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、また高電圧スイッチとして60台のサイラトロンが使用されている。

本稿ではクライストロン，サイラトロン，導波管高周波窓に関する統計及び大電力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

クライストロンアセンブリの構成

クライストロン

パルストランス

タンク

集束電磁石

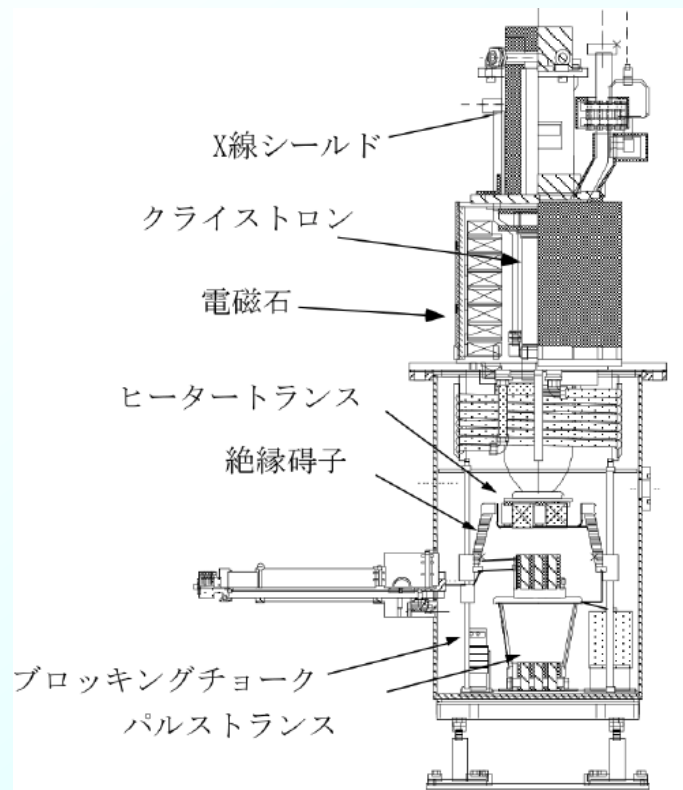
クライストロン仕様

周波数：2856MHz

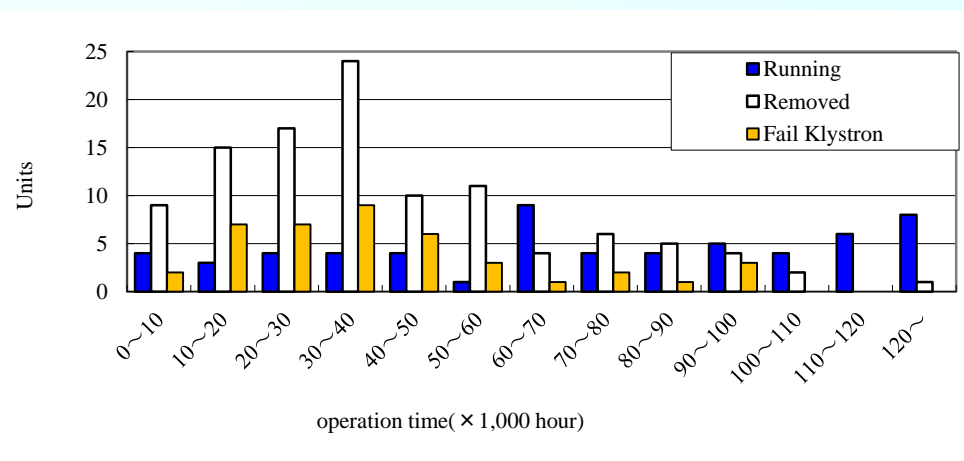
平均パルス出力電力：40MW

RFパルス幅：4 μ s

繰返し：50pps



【使用状況】



故障のため撤去したクライストロンの平均運転時間は約41,000時間だが、現在使用しているクライストロンの平均運転時間は約72,000時間であり、寿命は延びている。

運転時間10万時間を超えているクライストロンが18台で全体の3割を占めている。その内8台は12万時間以上使用しており、最も設置年が古いものは1997年に設置した3台である。

【年度毎のクライストロンアセンブリの交換理由と交換台数】

年度	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	計	
アセンブリ交換数	9	9	10	8	6	6	5	7	1	13	1	4	5	3	1	3	2	4	6	4	1	108	
交換理由	エミッション減少	2	1	0	2	3	2	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	17
	KLY 発振等	0	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	KLY ヒーター断線	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	6
	PT 不具合 (タンク内放電も含む)	4	3	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	15
	MAG 不具合	0	2	0	3	1	2	2	1	1	9	0	1	0	1	0	0	0	4	2	1	0	30
	絶縁油劣化	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	KLY 窓リーク (撤去後確認)	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	その他	(4)	(2)	(2)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(14)
その他	2	0	1	0	1	0	0	4	0	4	1	1	3	1	1	3	2	0	2	1	0	27	

2020年度はエミッション減少により1台の交換を行なった。

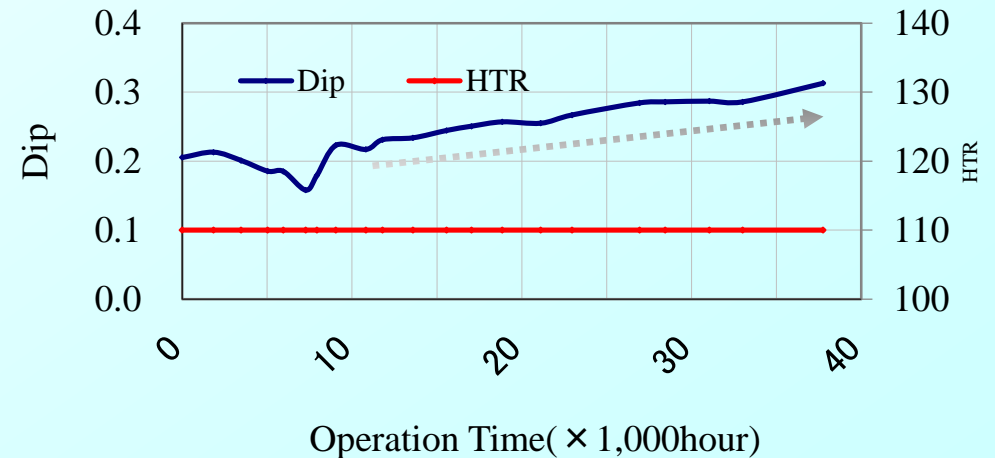
【2020年度のクライストロンアセンブリ交換】

・エミッション減少の兆候が見られる事による交換

KL_B6 (型式:PV-3050) 運転時間37,000h

長期メンテナンス前に定期的の実施している。Dipテストにて、Dipの悪化が続いていたため交換となった。

2010年にユニットを設置した時のDip変化量は0.21であり、運転時間10,000時間以降のDipの変化量が徐々に大きくなっている。2020年の測定では0.31であった。この結果、エミッション減少が進行していると判断して事前交換となった。



3. サイラトロン

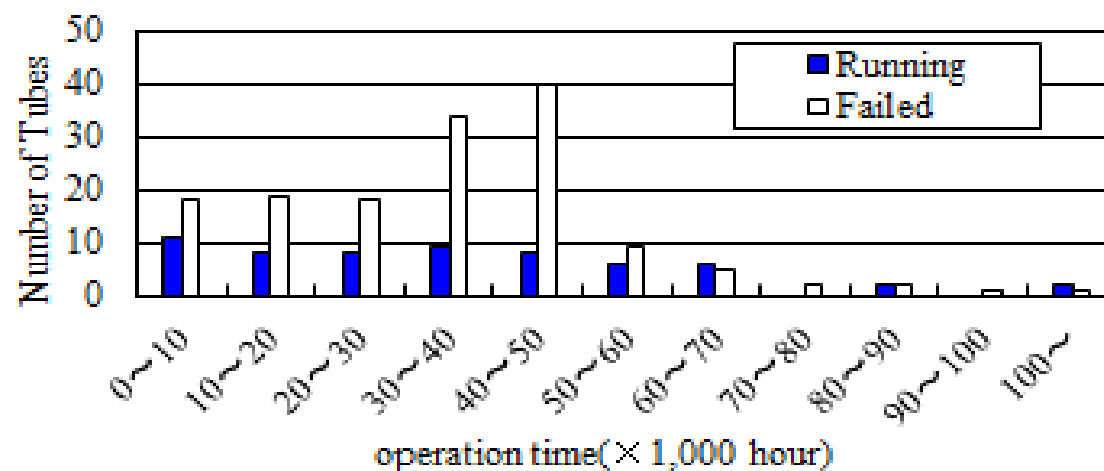
KEK電子陽電子入射器では、パルス電源のスイッチとして45kV、4.5kAをスイッチングするサイラトロンを使用しており、全ユニットL4888B(Litton社製)を使用している。

【使用状況】

現在使用しているサイラトロンの平均運転時間は約 37,000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38,000時間である。



L4888B(Litton社製)



【2020年度のサイラトロン交換】

2020年度は**14台のサイラトロンを交換**しているが、これは早期事前交換の7台を含めた数である。

(1) サイラトロン下部の端子根元でケーブル断線 (2台)

・ KL 57 (S/N:100563) 運転時間60,593h

サイラトロンヒーターとリザーバー電流が共に0A (電圧は7.0V) のためインターロックによりHV-OFF。 **ヒーター・リザーバー共通ケーブルがサイラトロン下部の端子根元で断線。**

・ KL B1 (S/N:100308) 運転時間81,442h

キープライブ電流が25mAまで低下 (運転値は250mA)、ヒーター電流もほぼ0Aであった。サイラトロン下部を確認したところ、 **ヒーターケーブルが断線**していた。

【2020年度のサイラトロン交換（続き）】

(2) ヒーターケーブル端子温度上昇による交換（1台）

・ [KL 35 \(S/N:100519\) 運転時間54,475h](#)

サイラトロンヒーター電流またはリザーバー電流低下によるインターロックが作動。ヒーター電流指示値に若干振らつきがあった。サーモカメラによる調査の結果、**ヒーターケーブル端子が高温**となっていた。この状態で使用継続すると**ケーブル断線**となるため、事前交換となった。

(3) リザーバー電圧調整幅がない事による交換（3台）

・ [KL 52 \(S/N:100510\) 運転時間62,317h](#)

・ [KL 44 A \(S/N:100516\) 運転時間 65,989h](#)

この2台は運転停止前の立ち下げデータとして**クライストロンの高圧波形のジッターを確認した際、約1分間の測定で許容としている30nsを超えていた**。ジッターを抑えるためにリザーバー電圧を上げようとしたが、**リザーバー電圧値が電圧調整を行なうスライダックの上限**だった為、運転停止期間中に交換を行なった。

・ [KL A1 A \(S/N:300145\) 運転時間2,370h](#)

このユニットの**高圧波形のジッターが70ns以上と大きくなっていたため、ビームが変動**するトラブルがあった。リザーバー電圧を+0.2V調整してジッターが7nsに収まり、ビーム変動も収まっていた。その後、再びジッターが40ns程度まで大きくなったため、更に+0.2V調整したが、サイラトロンからのノイズによる影響で運転端末モニター上でのクライストロン出力が0表示（実際は出力している）となるトラブルが発生した。この症状を抑えるためにはリザーバー電圧を下げる必要がある。この結果、**使用可能なリザーバー電圧の領域が0.1Vまで狭くなった**ため、サイラトロンを交換した。このユニットは前年度も同様の不具合でサイラトロンを交換している。このサイラトロンはテストスタンドにてリザーバー電圧の使用可能領域を再測定する予定である。

(4) キープアライブ電流0Aのため交換（1台）

・ [KL 13 \(S/N:100877\) 運転時間15,236h](#)

キープアライブ電流が0Aのため調査。サイラトロンシャーシ内のコントロールグリッド（G1）端子とフランジ間の電圧は設定電圧で異常なし。キープアライブ電源とサイラトロンシャーシ間のケーブルを交換したが、キープアライブ電流が流れなかった。**リザーバガス減少に起因するサイラトロン寿命**と判断して交換した。

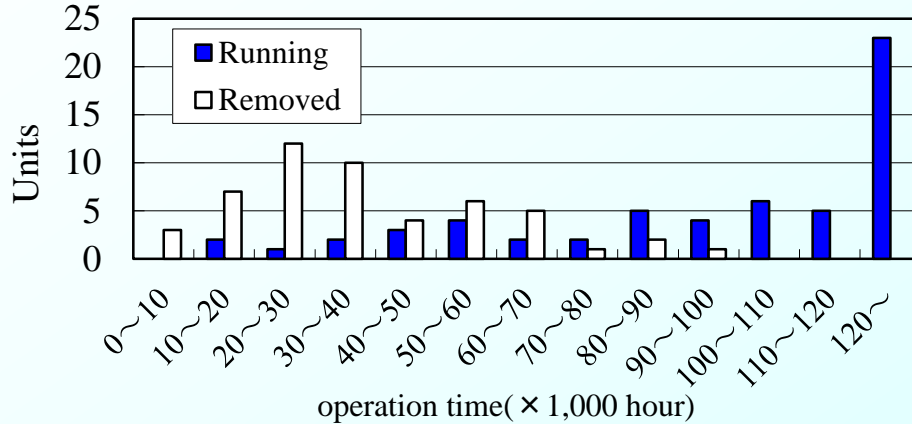
4.導波管高周波窓



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。

導波管高周波窓があることで、加速管内を大気開放することなく、クライストロンアセンブリが交換できる。

【使用状況】



現在使用中の導波管高周波窓は120,000時間使用しているものが23台で最も多く、平均運転時間は約95,000時間である。撤去済み導波管高周波窓の平均運転時間は約59,000時間である。

2013年長期メンテナンス後から2020年までの期間で真空漏れ等のトラブルによる高周波窓の交換は無かった。

5.大電力高周波源に関する不具合事例

KL_42クライストロン出力モニター値低下

クライストロン出力モニターが正常時に対し-10.8%表示となった。

この出力モニターとは、クライストロンの出力導波管に設置された方向性結合器から検出した進行波電力 (KLY Pf) と負荷側からの反射波電力 (KLY Pb) の内、KLY Pf側を指す。KLY Pf、KLY Pb は共に電圧定在波比 (VSWR) を算出するVSWRメーターへ入力している。

VSWRメーター側、導波管方向性結合器側共にケーブルを揺らしたところKLY Pf 値が -14%~+2% の範囲で変動した。特に導波管側のケーブルを揺らした際の変化量が大きかった。



KLY Pf、KLY Pbモニターラインで以下の調査と対処を行なった。

- ・VSWRメーター側、導波管側のコネクタ部の緩みを確認。
KLY Pf、KLY Pb共にLow Pass Filterの一部の箇所に緩みが見られた為、増し締め実施。

- ・VSWRメーター側、導波管側の同軸ケーブル、減衰器、Low Pass Filter、エル型コネクタを外して内部導体を目視確認。異常無し。



全ユニットのクライストロン出力モニターラインのコネクタ点検を実施。数箇所のユニットでコネクタの緩みがあったため増し締めを行ない、Low Pass Filterで部分破損が見られたため交換した。RFパーツにかかるケーブルストレスが緩和するよう、ケーブル取り回しを手直した場所もあった。

6. まとめ

クライストロンやサイラトロンでは長期使用のものがあり、年々長寿命化が進んでいる。導波管高周波窓も平均運転時間が95,000時間と長く、12万時間を超えているものが全体の4割近くある。今後、長期使用による突発的な不具合が発生する事が予想されるため、各種点検等により蓄積し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。