

ATF クライストロン電源の現状

森田成基^{1,A)}、明本光生^{B)}、浦川順治^{B)}、奥木敏行^{B)}、栗木雅夫^{B)}、早野仁司^{B)}、竹田誠之^{B)}

A) 有限会社イーキューブ

〒191-0012 東京都日野市日野 1077-158

B) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

リニアコライダー加速器の研究開発を目的に、高エネルギー加速器研究機構に於いて、試験加速器(ATF)が95年より現在までの6年間、1.3GeV加速運転されている。その、リニアック加速管への高周波電力供給源であるクライストロン電源の現状をまとめた。

1. はじめに

ATFでは、順次開発されたクライストロン用パルス変調電源を10台5機種使用している^[1]。その電源にパルス変調用スイッチとして使用されているサイラトロンと高周波増幅用のクライストロンを含む電源システム運転時間、故障内容を含め点検実施した高圧絶縁油の耐電圧試験などについて報告する。

2. 電源運転時間と状況

表1に各電源の95年より現在までの運転時間を示す。#0と#8電源は、KEK-PF入射器用のものをSLAC5045用に改造した装置である。素子装置開発に先行使用され、実際の使用時間は1万時間ほど表示数値よりも長い。他電源は表記の運転時間である。平成12年4月より13年3月まで1年間の稼働時間は約2080時間のダンピングリング入射ビーム加速運転を行った。運転間隔は1週間の月曜より金曜深夜まで運転し、1週104時間を3週繰り返す数週間の停止期間となる。年間では7月より9月の長期停止期間を除き、ほぼ同様な運転間隔となっている。停止中の素子開発実験や装置調整などにて単一運転する場合がある。LV運転時間は管球の余熱時間と待機時間等により多い時間となっている。

#0と#8は、個別の三相AC200V入力IVRを用いて高圧充電を行うタイプである。#1~#7は充電用高圧直流電源が共通で、最大でDC50kV,25Aを発生する。この集中電源は、リニアコライダーなど大型加速器での使用開発を目的に製作(TOSHIBA社製)されたもので、現在12年間稼働している。#10電源はリニアコライダーの前段加速器での使用を目的に製作(ニチコン社製)されたインバーター電源を使用したタイプである^[2]。

運転くり返し周波数は、初期には25ppsで運転していたが、クライストロン出力位相を安定させる為、本体冷却水を±0.1℃へ変更したので、98年9月より流量の制限により現在12.5ppsで運転している^[3]。出力について#1~#7電源で差が有るのは、開発時の回路インピーダンスの差と、#5~#7では主にコマンドチャージ方式での充電開始制御によりPFN充電後の電圧降下が少ない事によるものである。#10電源の出力が低いのは、マルチバンチビーム運転で、エネルギー補正に用いる為である。

表2に主な電源故障の原因を示す。項目中特に問題なのは、高圧同軸ケーブルのプラグとパルストランスオイルタンクのソケットが内部で放電し、コンタクトが溶着してしまうものでクライストロンのタンクを取り出さなければ取り外しや交換が出来ない。このケーブルは約6.6オームを2本並列で使用している。現在、対策を検討している。リジッド配線への変更も検討している。

他では#7の光通信モジュールが故障し、初期の89年に製造した物と同一仕様の物が入手不可能であり、現在手動での高圧制御を行っている。シーケンサシステムが集中電源の#1~#7まで共通なのでシステム全体の交換改造をしなければならない。サイラトロンドライブ回路は現在マルコーニ社(旧EEV)のパルサーにて安定に運転されている。他項目はすでにその都度、修理交換処置されている。軽度故障は除いた。

No	加速管	ビーム出力 (MW)	運転開始 年月日	運転 LV (H)	運転 HV (H)
#0	L0,B	163.9	1987年	34095.1	30729.1
#1	L1,L2	122.8	1989年	23223.3	19381.4
#2	L3,L4	122.8	1989年	23762.4	20370.4
#3	L5,L6	129.2	1993年	19182.5	17354.3
#4	L7,L8	144.7	1993年	18059.1	16831.5
#5	L9,L10	171.9	1995年	8643.5	7996.0
#6	L11,L12	166.5	1995年	8636.9	7896.0
#7	L13,L14	174.9	1995年	8640.6	7896.0
#8	L15,L16	155.7	1987年	25536.4	21205.6
#10	L ecs 2	95.8	1998年	4412.6	2600.1

(Lは3m長加速管、Bはバンチャー)

表1: 各電源の運転時間 (95~01年の合計)

¹E-mail: jbj7496@a2.mnx.ne.jp

No	故障箇所	内 容
#7	P F N	コンデンサーショートで OCP
#4	モニター	Shunt モニター故障修理
#2	トリガー	THY ドライバ SCR 破損
#7	収束電源	KLY 収束電源故障交換
#4	THY 配線	エレクトロド配線コト放電で焼損
-	直流電源	集中電源装置 IVR 制御故障
#3	高圧ケーブル	KLY 接続同軸ケーブルの焼損
#6	高圧ケーブル	KLY 接続同軸ケーブルの焼損
#7	通信制御	OPT モジュール故障
#8	IVR	駆動ウォームギャピン折れ破損

表 2：主な電源の故障箇所と内容

3. クライストロンの状況

表 1 に示す装置の # 0 ~ # 8 の 9 台は全て E3712(TOSHIBA 製)を使用し、# 1 0 のみ 5045(SLAC 製)である。交換した 2 本の原因は、97 年に 17800 時間の HV 運転にてエミッション減少での出力低下にて交換された # 0 号機と、2000 年 2 月にコレクターの冷却管の溶接部が漏水し、交換した HV 印可約 3 万時間以上使用した 2 件のみである。このクライストロンは最長使用されているが、漏水個所の修理を行い使用は可能である。他は、1999 年 1 月に # 2 号機にて発生した、HT トランスのレアショートでのトランス焼損である。他、運転停止等の原因となる故障は発生していない。平均使用時間は 1 万時間を越えている。連続運転で 3 年以上の運転時間に相当する。

4. サイラトロン使用時間と状況

表 3 に現在使用中であるサイラトロンの使用時間を示した。電源試験などで数台の電源に使用した物は積算時間とした。使用中の物で平均高圧印加使用時間は約 7416 時間を達成している。グリッド駆動は全てダブルパルス、第一グリッドは負バイアスとプリパルス印加にて運転している。この装置は使用当初、フィルターの耐電圧不足にて数台の故障が発生したが、現在は問題なく稼働している。以前に駆動回路に採用されていたキープアライブ方式に対して、現回路はサイラトロンの延命効果を評価中である。また、基幹電力が同一系統である PS のマシン運転時の入力 AC 変動がサイラトロンヒータ回路やキープアライブバイアス回路に影響し、駆動タイムジッターの増大原因となっていた。キープアライブ回路計測の結果 50mA の電流変動で 20 n sec の影響が判明し、現在は、99 年 6 月より全装置にノイズ遮断 AVR を使用し対策を行ない安定とした。

表 4 には主に寿命交換したサイラトロンを示した。通弧にジッターを生じ、RES ヒータを上げると僅かに改善するが、効果が足りずに HT を更に上げるとプリファイアを発生する。

今までに試験や運転使用したサイラトロンの個体寿命差があるので⁽⁴⁾最大陽極電圧定格に余裕のある

サイラトロンを選定し、1937A タイプの 75kV、3 ギャップを標準に使用している。

No	型名	HT 時間(H)	HV 時間(H)	使用開始
#0	CX1536A	15258.7	13525.6	95 年 4 月
#1	CX1536A	3831.5	3577.4	99 年 12 月
#2	CX1536A	7922.3	6921.6	95 年 11 月
#3	CX1937A	5735.2	5293.0	99 年 2 月
#4	CX1536A	3566.4	2687.7	96 年 3 月
#5	CX1937A	11698.3	10513.7	97 年 5 月
#6	CX1536A	12645.7	11349.4	97 年 3 月
#7	CX1536A	11540.4	10513.7	97 年 5 月
#8	CX1937A	8547.7	7176.2	95 年 11 月
#10	CX1937A	4412.6	2600.1	98 年 4 月

(1536 は 2 ギャップ 50kV, 1937 は 3 ギャップ 75kV 耐圧)

表 3：現在 ATF 運転使用中のサイラトロン使用時間

タイプ	HT 時間(H)	HV 時間(H)	備考
ITT-F157	25049	13548	ジッター大, プリファイア
ITT-F331	12061	9686	ジッター大, プリファイア
CX2199A	11593	10078	ジッター大

表 4：交換した主なサイラトロンと原因

5. 高圧絶縁オイルの耐電圧試験

リニアックに使用しているクライストロンは管電圧を 350kV~400kV 印可する。その電圧は電源より昇圧比 1:16 のパルストランスを介し印可される。クライストロン電子銃部分とパルストランスは高圧絶縁オイルを満たしたアルミ円筒型タンク内に設置されている(STANGENES 社製)。容量は約 500 リッター使用するが、経年使用での絶縁低下が起こる。原因はヒーターや回路の発熱と電子銃部分から漏洩する低エネルギー放射線が考えられる。数年使用されたタンクを分解し内部を確認したところ、黒い粉が、コロナリングなどの電界の集中する下面や、パルストランス 2 次巻線のヒータ入力ラインのタンク壁との隙間などに多く付着している事を確認している。CERN の入射器(LIL)では、停止期間中に全台数のクライストロンオイルタンクを点検清掃し、放射線と熱により劣化したケーブルや部品が保守されている。ATF では 5 年間以上タンクのオイル交換は行っていない。しかし、カーボンなどは耐電圧不良での放電原因となるので、オイルの濾過装置を使用している。今回、10 台全数のクライストロンオイルタンクの絶縁油と熱陰極型電子銃電源、キッカーマグネット電源について絶縁耐電圧試験を行い劣化比較を行った。また、3 ミクロンフィルターポンプで循環濾過を行い、耐電圧の復帰がどの程度有るか絶縁破壊電圧比較を行った。

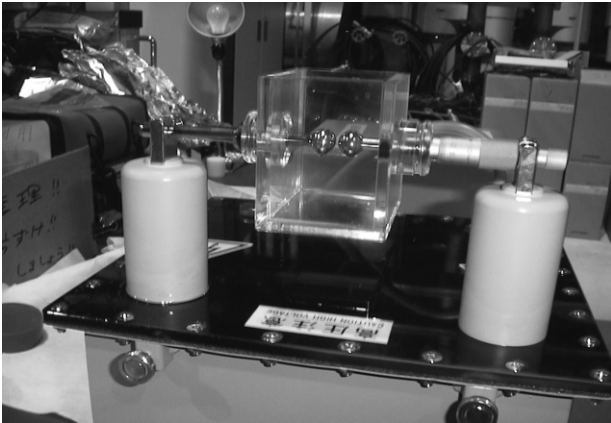


図1：絶縁油耐電圧試験器の電極部分外観写真

図1にオイル耐圧試験器を示した。試料オイルを入れる 200cc の絶縁容器に、左右より取り付けされた直径 12.5mm の電極が取り付けられている。この装置は、日本工業規格(JIS C 2101)による電気絶縁油試験方法に沿った絶縁破壊試験が出来るものである。印可電圧は電極両端に AC0V より毎秒 3kV(RMS)自動上昇し、放電により回路が遮断された後に、置針の電圧を読みとることで容易に試験が繰り返し出来る。図2にクライストロンパルストランスオイルタンクの高圧絶縁油と他電源装置の絶縁破壊電圧計測結果を示す。データ中でも平均値が一番低い#3装置のオイルを濾過装置にて3日間濾過して後に試験した。オイルタンクは上側面と下側面にホース接続カップラが取り付けられているので循環装置を容易に取付運転出来る構造にしている。結果はグラフ一番上のデータで、半年保管した未使用のオイルを上回る耐電圧へ回復が確認された。成分分析での比較を行い更に今後他装置でも試験実施予定である。更に、結果グラフより耐電圧の低下している試料では、各5回の計測で2回繰り返し行った結果(JIS 方法)の、破壊電圧値上下範囲の分布が狭い傾向が確認できた。塵埃やカーボンなどにて絶縁破壊限界が低い電圧で安定に起こるが考えられるが、この傾向についても成分分析による比較が必要であるので今後再調査を予定している。#8クライストロンでは#3程の回復は確認されなかった。

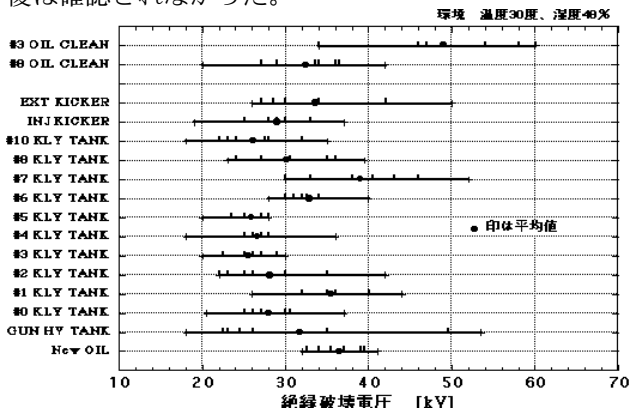


図2：各装置の高圧絶縁油の絶縁破壊電圧比較 (使用絶縁油1種4号 JIS規格番号C2320)

図3に、電極距離変化での絶縁破壊電圧の値を示した。3mm ギャップ以上では試験装置の出力電圧が出せない為に計測は出来なかった。使用した絶縁油は、6ヶ月間保管した未使用品を試料とした。今回の結果はオイルタンクのパルストランス1次側の配線組み立ての参考にする。

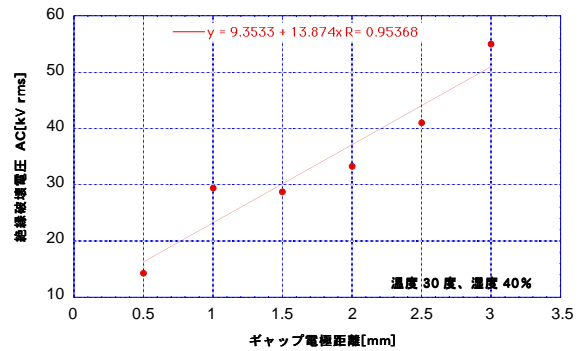


図3：絶縁破壊電圧に対する電極の距離

6. まとめ

クライストロン電源では大きな故障は無く運転されている。今後は、更に高い安定度と信頼性を得る為のデータ蓄積を行なっていく。高圧同軸ケーブルのソケット接続部の放電、焼損の対策を仕様の変更を含め検討を進めているので今後結論を出し改良を予定している。

サイラトロン使用の寿命データは、現在継続して記録を行っている。運転パルス周波数が 12.5pps と、当初予定であった 50pps より低く運転されている事もあり、年間実績での高電圧印可運転時間は約 2000 時間なので、平均で約 3.7 年間の使用実績を確認した。まだ使用中のサイラトロンが多く今後、更に長時間の使用となるであろう。

クライストロンの運転実績は最長で3万時間を越え、運転には問題なく使用されている。

絶縁オイルの放電耐電圧の評価は、今後、濾過器の配管途中に取付する測定電極でオイルを外部に抽出せずに常時計測可能な電極付きフロー容器を製作使用する予定である。

参考文献

- [1] 森田成基 他、“MODULATOR OPERATION IN ATF LINAC” 第21回リニアック技術研究会, P177.
- [2] 森田成基 他、“TEST OPERATION OF THE KLYSTRON MODULATOR USING INVERTER POWER SUPPLY” 第23回リニアック技術研究会, P255.
- [3] 坂本智弘、平成8年度東北大学修士学位論文
- [4] 明本光生 他、“THYRATRON PERFORMANCE TIONFORMANCE THE KEK 8GEV LINAC” 第25回リニアック技術研究,P213