

Klystron Power Supply Systems for J-PARC Linac -- Present Status at KEK 60MeV Linac (2) --

M.Kawamura^{1,A)}, S.Anami^{A)}, Y.Fukui^{A)}, K.Mikawa^{A)}, E.Kadokura^{A)}, C.Kubota^{A)}, M.Ono^{A)}, E.Chishiro^{B)},
H.Suzuki^{B)}, T.Nakamura^{C)}, Y.Yumino^{D)}, H.Kubo^{D)}

^{A)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

^{B)} JAERI, 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

^{C)} Pulse Electronic Engineering Co.,Ltd, 274 Futatsuzukamichishita, Noda-shi, Chiba-ken, 278-0016

^{D)} Hitachi,Ltd., Information & Control Systems Div., Power Electronics Design Dept.,

1-1, Saiwaicho 3 chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 317-8511

Abstract

Present status and recent progress about klystron power supply systems for J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) Linac are presented in this paper. Troubles and their solutions of the systems in KEK 60MeV linac are described. This article also reports the recent progresses of the trigger system, the PLC control and the data recording.

J-PARCリニアック用クライストロン電源システム - KEK60MeV施設における現状(2) -

1. はじめに

J-PARCリニアック用クライストロン電源システム^{[1]-[7]}については、昨年のリニアック技術研究会にて、その概要と昨年までの状況を発表している^[1]。

本稿では当電源システムについて、KEK60MeV施設における現在の運転状況と、最近明らかになった不具合やそれについて行なった対策を報告する。また、トリガ系、PLCによる制御、データ記録について進展した事を報告する。

2. KEK60MeV施設内クライストロン電源システム

2.1 概要

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex, 大強度陽子加速器計画)に於いて、400MeV陽子リニアック用のパルスクライストロンにはモデレーティング・アノード型(以下、“M・アノード型”と略称)を使用している^{[6][8][9]}。そのクライストロンに大電力を供給するクライストロン電源システム^{[1]-[7]}が開発され、190.8MeV(建設当初の出力エネルギーは181MeV)リニアックに必要な大電力機器は全て昨年度までにJAERI、KEKに納品されている。

KEK60MeV施設は大強度陽子加速器の最上流部として建設された。クライストロン電源システムはこの施設での運転に合わせ、'99年度末までにカソード高圧直流電源1、2号機(HV1、2号機)およびM・アノード変調器6台(全て四極管タイプ)が完

成した。'00年度初めの施設建物の完成直後より機器搬入を開始し、以後設置、試験、運転を順次行ってきた。これまでHV1、2号機のクローバ試験、HV1号機の3並列負荷試験(80kV回路1負荷、110kV回路2負荷)、HV2号機の1負荷試験を終了し、M・アノード変調器は5台の大電力試験を終了した。

現在HV1号機と3台のM・アノード変調器はRFQ、DTL1の2加速空洞を用いた負水素イオンのビーム加速試験(出力エネルギー19.7MeV)、およびSDTL加速空洞の大電力試験に使用されている。M・アノード変調器3台のうち1台は四極管を半導体素子に入れ替えて試験運転を行っている。HV2号機と1台のM・アノード変調器はテストスタンドとして運転を行い、これまでクライストロンの試験やサーキュレータ、同軸管(架橋ポリエチレン使用)等の大電力試験に使用されている。運転時間(HVon時間)は'04年6月25日の時点でHV1号機2513.4時間、HV2号機872.5時間である。

2.2 '04年6月の運転状況

ビーム加速試験は毎週木曜日に実施されており、'04年6月の4回の運転では短時間のビーム停止時間も含めて約10~15時間の連続運転を行った。この運転中クライストロン電源はHV1号機と2台(各々RFQ用、DTL1用でいずれも四極管タイプ)のM・アノード変調器を使用した。表1にビーム加速試験時のHV1号機等の各設定値、測定値(4回の運転の平均値)を示す。また、ビーム試験の前日は空洞のエー

¹ E-mail: masato.kawamura@kek.jp

表1：ビーム加速試験時の設定値、測定値
(2004年6月)

項目	設定値 / 測定値
<i>(設定値)</i>	
設定電圧	107 kV
繰返し	25 pps
<i>(HV1)</i>	
直流電圧	105.8 kV
直流電流換算値	0.9 A
<i>(DTL1)</i>	
Kly.カソード電圧	100.0 kV
Kly.ビーム電流	41.7 A
Mアノード電圧	77.4 kV
パルス幅設定値	750 μ s
<i>(RFQ)</i>	
Kly.カソード電圧	72.8 kV
Kly.ビーム電流	30.2 A
Mアノード電圧	62.6 kV
パルス幅設定値	650 μ s

ジングを実施しており、その他にRF制御系の試験を行うなど、週2～3回の運転を行った。

3．最近明らかになった不具合とその対策

クライストロン電源システムの不具合とその対策については過去のProceeding^{[1][5]}でも述べているが、本稿では最近1年間のうちに明らかになった「M・アノードパルス変調器内の耐電圧不良」とその改修、JAERI施設^[10]で発生した「ケーブル加熱の不具合」を受けてKEK施設で行った対応について報告する。

3.1 M・アノードパルス変調器内の耐電圧不良と改修

‘03年10月から‘04年2月にかけて、M・アノード変調器3台が相次いで耐電圧不良となりシステムの高圧がDownする不具合が生じた。

M・アノード変調器の高電圧機器は全て絶縁油タンク内に収納されている。相次ぐ不具合を受け、‘04年2月初めに不具合のあったタンク1台を開けて確認したところ、高電圧の配線部分に幾つか放電痕が見られたので改修を行った。以後、‘04年6月までに不具合のあった残りの2台についても順次タンクを開けて確認し改修を行った。

放電痕のある箇所はM・アノード変調器3台それぞれで若干異なっていたが、高圧Downの主な原因はいずれも「ピアソン製CT3025を貫通する配線」の放電痕、または「クライストロンヒータ配線、および同ヒータカソード配線の固定箇所」の放電痕と見られている。これらの配線はこれまで、直径20mmの金属棒(銅パイプ)と、その外周に被せられた厚さ約1.5mmのポリエチレン管で構成されてい



図1．ポリエチレン管表面の放電痕

る。放電痕はポリエチレン管の表面で見られた。一旦放電痕が生じると、表面に微小な突起が生じ、その後同じ電圧値で放電が生じて高圧Downになるものと考えられる。

この箇所についての考察と、今回行った対策を以下に述べる。当該箇所はCT3025の穴と金属棒の同軸構造になっているので、電場の計算は同軸状の外導体 - 内導体間に電位差がある時の理論式を用いる。条件として金属棒の電位を100kV、CTを0Vとし、ポリエチレンの比誘電率(=2.25～2.3)と絶縁油の比誘電率(=2.2)とが近い値なので同一とする。CT穴の内径3.5inch(=88.9mm)、金属棒外径20mm、ポリエチレン厚さ1.5mmより、金属棒外面の電場が6.70kV/mm、ポリエチレン外面が6.24kV/mmとなる。比較のため当電源システムで使用する高圧ケーブルRG-220/u(内導体外径6.6mm、外導体内径23.1mm)で導体間に100kVの電位差がある場合の電場を計算すると、内導体外面が24.19kV/mm、外導体内面が6.91kV/mmとなる。正常に動作している高圧ケーブルよりも低い電場で、CT貫通配線に放電が生じたのは、直流高電圧で使用するにより絶縁油内の不純物が集まって耐電圧低下したためと考えられる。

ピアソンCTのカタログに、「絶縁油中において直流高電圧で電流を測定する際には、導体とCTの間に固体の絶縁物を置くのが望ましい」と記載されている。これを参考にして、金属棒とポリエチレン管の代わりに、同軸ケーブルの20D-2V(内導体外径6mm、ポリエチレン外径20.5mm)および10D-2V(同、2.9mm、9.9mm)の、外被と外導体を除いたものを検討した。計算により、内導体外面の電場は強くなるが、ポリエチレン外面(絶縁油に接する所)の電場は20D-2Vが3.62kV/mm、10D-2Vが5.90kV/mmとなり、20D-2Vの場合電場がかなり低くなる(6.24kV/mmの58%)ことがわかった。以上の検討結果により、20D-2VをCT貫通配線に使用することにした。

この箇所については、ポリエチレン管の表面と、配線固定用部品(絶縁体)との両方に放電痕が確認さ

れた。固定用部品は金属棒配線を固定してタンク筐体フレーム(接地電位)との絶縁を確保するために付けられている(図1参照)が、固定用部品の上面に不純物がたまってポリエチレン管との間で放電を起したと考えられる。改修作業では放電痕の付いたポリエチレン管を取り外し、また固定用部品は、これが無くても金属棒が固定されることが確認されたので、取り外した。

上記、その他、改修作業では端子部に着目し、コロナリングの追加、端子板形状の変更、リード線を減らす、などを行った。

改修後の耐压確認試験について述べる。パルス電子(株)で耐压試験を行う場合試験電源の出力電流を観測する他に、暗室に設置して放電箇所を目視確認している。KEKでは暗室に設置することが困難であるため、超音波を利用した検出器(Biddle Co.製 Ultrasonic Corona & Leak Detector)により放電箇所を確認した。耐压試験と部分改修を繰り返し、最終的に気中で55kVまで、リーク電流の急激な増大が無く、放電も無いことを確認した。

以上の改修と耐压試験を行ったM・アノード変調器は、これまでのところkly.カソード電圧107kVの長時間運転で問題なく使用されている。

耐電圧不良を起こす前にM・アノード変調器の不具合を判断する方法を現在検討中である。これまで(株)カイジョー製、油中コロナ検出器CD-1の出力信号の利用を検討しているが、改修の前後で信号の定量的な変化が確認出来ず、不具合の判断法は確立していない。その他、絶縁油中のガス成分分析を定期的に行う試行を始めた。

3.2 ケーブル加熱の不具合と、KEK施設での対応

‘04年3月、JAERI施設のクライストロン電源で電圧調整盤(AVR)と変圧整流器(HVTR)の間を配線するケーブルが加熱する不具合が発生した。これは、「AVRサイリスタのゲートドライブ回路のトランジスタが破損、不動作」、「サイリスタの1つのゲートパルスが欠相し、AVR出力回路の当該部が(本来の交流でなく)一方向のみ通電」、「変圧整流器の当該相が偏磁(飽和)し、その結果過電流が通電」、「ケーブルが加熱」という現象が生じたためである。

この不具合を受け、KEK施設でも‘04年6月に対応が行われた。原因となったトランジスタの動作確認には交流電流各相の波形観測が必要であり、電源運転中常時観測するのは現実的でない。今回はケーブルを保護するためのMCCB新設と、電流値異常検出部の変更を行った。MCCBは三菱製NF400-CP、二相式、定格電流350Aタイプ(遮断電流10kA/690V時)をAVR - HVTR間に6台新設し、配線ケーブルを150mmsq.から250mmsq.に変更した。電流値の異常検出はこれまでNIMモジュールにより直流演算値(HVTRの交流入力から直流出力を演算したものの)の過電流のみを検出していたが、今回は更に交流過電流、偏磁電流(3相の電流値の和を検出、正常時0A、

異常時偏磁電流分が発生)の検出部を追加した。

4 . トリガ系、PLC制御、データ記録

ビーム加速試験を行う際には、クライストロン電源と他の機器を一括して制御をする必要がある。

タイミング信号は、加速空洞単位で制御室から光ケーブルを配線し、当該の加速空洞に関する機器のタイミングを制御している。クライストロン電源のトリガ系は上記タイミング信号をNIMモジュール(Trigger Fanout)で受信し、パルス幅やDelayについては制御室で設定している。

また、クライストロン電源の制御にはPLCを使用している。PLCにはコントロール1、2の2つの部分がある^[5]が、上位にあたる2の方はEthernetケーブルによって制御室とつながっている。最近このコントロール2が整備され、クライストロン電源の上位機器による制御が可能になった。またInTouch(Wonderware Corp.)の入ったパソコンをEthernetケーブルに接続し、多種のトレンドグラフ表示、故障時のデータ検索等が可能になった。

5 . まとめ

昨年に引き続きKEK60MeV施設のクライストロン電源システムの現状を報告した。当施設での運転を継続し、将来に備えデータを蓄積する予定である。

参考文献

- [1]川村 他、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (2003), pp.369-371.
<http://lam28.tokai.jaeri.go.jp/proceedings/TP-23.pdf>
- [2]“JHF Accelerator Design Study report”, JHF Project Office, KEK Report 97-16, JHF97-10, 1998, pp.4.6.10~21.
- [3]川村 他、Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999), pp.200-202.
- [4]M. Ono et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology (1999), pp.275-277
- [5]川村 他、Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001), pp.204-206.
<http://conference.kek.jp/lam26/LAM26PDF/1P-27web.PDF>.
- [6]“Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, Accelerator Group, JAERI/KEK Joint Project Team, KEK Report 2002-13, JAERI-Tech2003-004, J-PARC03-01, 2003, Chap.3.1.3.1.
<http://hadron.kek.jp/member/onishi/tdr2003/index2.html>
- [7]同、Chap.3.1.3.4.
- [8]同、Chap.3.1.3.2.; Chap.3.1.3.3.
- [9]手塚 他、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (2003), pp.372-374.
<http://lam28.tokai.jaeri.go.jp/proceedings/TP-24.pdf>
- [10]堀利彦 他、本研究会；
山崎 他、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (2003), pp.369-371.
<http://lam28.tokai.jaeri.go.jp/proceedings/TP-21.pdf>；
山崎 他、Proc. of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002), pp.296-298.
<http://lam27.iae.kyoto-u.ac.jp/PDF/8P-10.pdf>