

PRESENT STATUS OF KLYSTRON POWER SUPPLY SYSTEMS FOR J-PARC LINAC

Masato Kawamura^{1,A)}, Shozo Anami^{A)}, Yuji Fukui^{A)}, Katsuhiko Mikawa^{A)}, Eiichi Kadokura^{A)}, Seiya Yamaguchi^{A)},
Etsuji Chishiro^{B)}, Masayoshi Yamazaki^{B)}, Toshihiko Hori^{B)}, Hiroyuki Suzuki^{B)},
Yuichi Yumino^{C)}, Shin-ichi Ogawa^{C)}, Hiroshi Kubo^{C)}

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

^{B)} JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

^{C)} Hitachi, Ltd., Information & Control System Div., 3-1-1 Saiwai-Cho, Hitachi, Ibaraki, 317-8511

Abstract

The Linac for J-PARC has been operated since last October. This paper reports the present status of the klystron power supply systems for the Linac. The numerical operating data, the voltage- and current-waveforms, and the failures of the systems are reported.

J-PARC リニアック用クライストロン電源システムの現状

1. はじめに

J-PARC(大強度陽子加速器施設)の加速器のうち、181MeV陽子リニアックは昨年10月に運転を開始し、今年6月末までビームコミッショニングを行なった。1月下旬には181MeV加速を達成している。

リニアック用クライストロン電源システム^{[1][2]}は、全ての大電力試験が終了した後、リニアック運転開始とともにクライストロン20本の同時運転を開始した。本報告では当電源システムについて、過去1年間の運転状況、運転時の電圧・電流値や波形、電源油タンクの温度上昇、不具合の状況や今後の課題などを述べる。

2. クライストロン電源システムの 運転状況

2.1 過去1年間の経過

当クライストロン電源システムは6台のカソード高圧直流電源(以下、"HVPS"と略記)、21台の断路器盤とM・アノードパルス変調器(MANOD)、およびそれらを制御する制御盤で構成されている(システムの仕様や構成の詳細は過去の本研究会論文を参照されたい^{[1][2]})。

1年前にはHVPS1、2(リニアック最上流2台)の無負荷電圧試験、負荷短絡試験(クローバ動作試験)が行なわれていなかった^[1]が、これらは昨年9月中旬から10月上旬にかけて実施された。クローバ装置の主回路はイグナイトロン(Richardson Electronics, NL-35391)5本の直列回路で構成されるが、HVPS2のクローバ動作試験では、5本のうち1本が点弧しない不具合が生じ、予備品と交換した。

昨年10月中旬、クライストロン20本の同時運転を開始した。構成はHVPS1がクライストロン4(1+3)負荷(定格80kV 1回路と定格110kV 3回路)、HVPS2~4が各々4負荷(110kV 4回路)、HVPS5が3負荷(110kV 3回路)、HVPS6が1負荷(80kV回路)の運転である。それまではHVPS1が3(1+2)負荷(80kV 1回路と110kV 2回路)、HVPS2、4、5が各々1負荷の運転を行なったが、クライストロン20本の同時運転は、電源システム開発後初めての事だった。

運転開始当初は、MANODの、絶縁油タンク中のアノード逆バイアス電源回路の不調^{[1][3]}や素子破損によるパルス動作不良、光コネクタ部の光軸ずれによる動作不良の他、メインコイル電源の動作不良(電源の不調や、使用値が電源容量ぎりぎりだった事などが原因)、それ以外に、各箇所の配線の不備やコネクタの接触不良などが生じた。

10月下旬までは平日昼間のみの運転、10月末からは終日の連続運転となり、この間に上記不具合を順次改修し(電源、素子、コネクタなどの交換、使用値の変更など)、MANOD油中回路の改修作業は、11月中旬の数時間のshut down中に行なった。

リニアック・ビームコミッショニングのための、電源システムの終日運転は、今年6月末までに8回行なわれた。内訳は、昨年10月末から12月はじめまでの5週間(11月中旬の数時間のshut downを含む)、12月から6月まで毎月2~3週間である。この期間の高電圧ON時間は、2800時間を越えている。

電源システムの外部機器からの制御や、外部機器との信号のやりとりとして、(1)PPSの非常停止操作による一斉停止、(2)タイミングシステムからのトリガ信号によるパルス運転、(3)EPICSベースの上位機器からのON/OFF操作、カソード電圧設定操作、上位機器への電圧・電流モニタ値の送信、などが

¹ E-mail: masato.kawamura@j-parc.jp

ある。(1)については10月中旬に試験を行ない、一斉停止が確認されたが、現在の仕様では非常停止を行なうと、「高電圧OFF」のみならず「低電圧OFF」及び「イオンポンプ電源OFF」となる。電源システム側のシーケンスを見直す必要がある。(2)についてはリニアック運転開始当初から運用しているが、タイミングテーブルの設定ミスにより、設定切替時に高電圧OFFとなる現象が頻発した^[3]。(3)については随時確認試験が行なわれ、不具合などが解消されている。今後本格的な運用が行なわれる予定である。

2.2 運転時の測定結果

表1に、今年6月に行なわれた181MeV加速運転の際、各HVPSで測定された電圧・電流値を示す。出力パルス幅700 μ s、繰返し25ppsである。DC電圧・電流値から、総電力は1.58MWと計算される。

HVPS4(DC電圧105.8kV、4負荷運転)を例に挙げる。高圧受電盤のPT、CTより電源品質アナライザ(日置電機製3196)を用いてAC6.6kV系の電圧・電流を測定した。三相電圧は各相が6.515~6.558kV、三相電流が40.9~42.6A、有効電力が370kWと測定された。表1の数値データなどから、高圧受電盤~変圧整流器間の効率がほぼ100%、変圧整流器(DC出力)~クローバ盤(パルス出力の平均値)間が91%である。図1に運転時の波形を示す。

DC電源の安定度について、以前の測定により、AC6.6kV系入力が6.6kVを中心に+2.7%/-2.0%の変動があるのに対し、DC出力が $\pm 1\%$ 以内の変動となっていることが確認された。

運転時の電源油タンクの温度と温度上昇は、降圧変圧器(空冷式)の温度が34~43 $^{\circ}$ Cで停止時より8~17 $^{\circ}$ Cの上昇、変圧整流器(水冷式)の温度が32~50 $^{\circ}$ Cで停止時(冷却水導入時)より7~25 $^{\circ}$ Cの上昇と測定された。

MANOD、クライストロンの運転時波形の一例として、MANOD14(HVPS4につながる、スタンド名は“S10スタンド”、運転するクライストロンでSDTL19,20の2加速空洞にRF電力を供給)の波形を図2に示す。波形測定により、Klyビーム電流の立ち上がり時間(電流値10%-90%間の時間差)が31 μ sであり、

約80 μ sでピーク値となる。立ち下り時間(90%-10%間)は99 μ sである。カソード電圧のサグは、測定時間をKlyビーム電流ピーク時点~パルスOFF時点の620 μ sと定義すると、約3.5%と算出された。

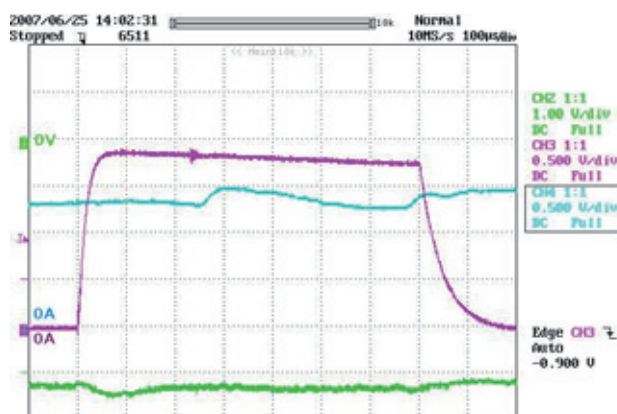


図1. HVPS4運転時の波形。緑：全カソード電圧(20kV/div.)、赤：全カソード電流(50A/div.)、青：全リターン電流(1A/div.)。横軸100 μ s/div.

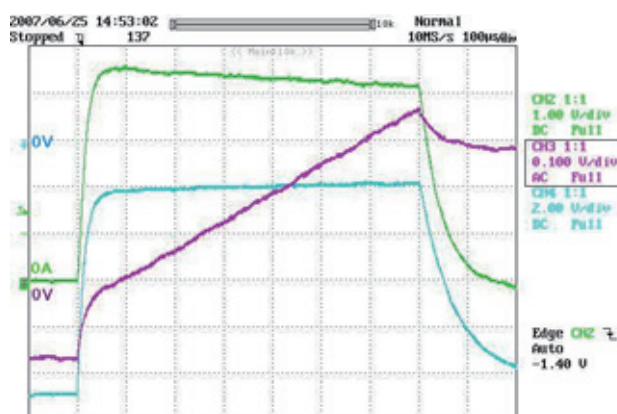


図2. MANOD14運転時の波形。緑：Klyビーム電流(10A/div.)、赤：カソード電圧(AC coupling、1kV/div.)、青：アノード電圧(20kV/div.)。横軸100 μ s/div.

表1. ビーム加速運転時のHVPS部測定データ (出力パルス幅700 μ s \times 繰返し25pps)

	HVPS1	HVPS2	HVPS3	HVPS4	HVPS5	HVPS6	測定箇所
DC電圧 [kV]	-106.2	-90.3	-104.1	-105.8	-105.2	-69.2	AVR、 変圧整流器
DC電流 [A]	3.0	2.5	3.3	3.7	2.6	0.4	
全カソード電圧 [kV] (80kV回路)	-106.0	-89.8	-103.2	-104.8	-105.2	-69.2	クローバ部
全カソード電流ピーク値 [A] (80kV回路)	127.3	105.5	182.9	194.3	140.5	23.4	(同)
クライストロン数 (内、80kV回路)	4 (1)	4	4	4	3	1	

四極管および半導体スイッチのON電流は0.60～1.08Aと測定された。運転時のMANODタンク(水冷式)の油温度と温度上昇は、油温が32.0～37.7℃で、停止時(冷却水導入時)より5.0～8.7℃の上昇と測定された。

3. クローバ不要動作の発生とその対策

運転中に、クローバ動作による高電圧停止が頻発した。昨年(2006)の研究会Proceedingでは、HVPS5のクローバ動作を報告した^[1]が、昨年10月以降の運転では、HVPS3とHVPS5でクローバ動作が頻発した。クローバ動作が発生すると、大電流の影響で隣接するHVPS2、HVPS6が高電圧停止する場合もあった。

MANODのモニターで電圧・電流波形を観測したところ、クローバ動作時にアノード回路ー接地間での放電が確認された。また、クローバ動作しない場合でも放電が発生し、その後アノード電圧が回復して運転を続ける現象が確認された。

クローバ装置側では、HVPS3クローバ装置の制御回路基板にプローブを取り付けて波形を観測した。クローバ動作時の過渡電流検出のため、装置には負荷短絡電流用とクローバ電流(イグナイトロンに流れる電流)用の2つの光CT(ニチコン製)がある。波形観測の結果、クローバ電流用光CTの検出信号にノイズが観測された。

この結果を受け、以下のような対策を試みた。先ずMANOD側では、波形観測の結果放電の頻度が高いと見られる4台の油タンクを開けてみた。アノード電流モニター用CT(スタンジェニス製3.5-0.1)周辺の絶縁距離が厳しく、放電痕などが確認された。早急の対策として、当該CTの取り外し、放電痕の除去などを行なった。

クローバ装置側では、回路基板IC端子ー接地間のコンデンサ挿入やケーブルへのフェライト装着で高周波ノイズ除去を試みた。ノイズシミュレータを用いて、その応答も観測した。

これらの対策を施したが、クローバ不要動作は改善していないように見られた。ノイズシミュレータを用いたシミュレーションでは、不要動作が頻発するHVPS3と、不要動作の無いHVPS4の間で、有意差が認められなかった。

6月上旬、試しにクローバ電流用光CTを分解したところ、抵抗の一つが焼損していた。この抵抗は、コイル(クローバ電流が急に流れた時、磁場を誘導する。コイルはその磁場を検出するものと見られる)の巻線両端に接続されており、光信号を出力するフォトカソードの回路と並列に配線されている。抵抗が焼損していると電流が流れず、フォトカソード側の電流が増加し誤動作の原因になると見られる。調査の結果HVPS3、HVPS5の当該抵抗が焼損しており、HVPS4は焼損していなかった。6月の運転のため急遽手持ちの1Ωホーロー抵抗と交換した。この運転ではクローバ不要動作が発生しなかった。

クローバ不要動作は、今のところ以下の様な現象と見られる。

- (1)MANOD内のアノードー接地間で放電が発生。
- (2)過渡的にアノード電圧が0Vとなり、カソードから電子が引き出されてklyビーム電流が流れ、主回路に電流が流れる。
- (3)クローバ電流用光CTが電流を検出する。この光CTは高電圧側ではなく接地側にあるため、イグナイトロンが短絡しなくても電流を検出する。特にdi/dtが大きい信号はコイル巻線端子に高い電圧を誘導する。

(1)～(3)はHVPS3、4、5で発生頻度に差は無いとみられる

- (4)HVPS3、5では光CT内の抵抗が破損しており、フォトカソードに流れる電流が増加して発光し、クローバ不要動作に至る。以前、負荷短絡試験などでインパルスが発生した際に、抵抗が破損したものと思われる。

今後の対策として、光CTの当該抵抗をインパルス特性に強いものと早急に交換する必要がある。また、MANOD内の放電対策(電極部品等の追加や変更など^[2])を行なう必要がある。

4. その他の不具合等

メインコイル電源(IDX製、IPM-500204-A2)で、出力が不安定になるものや騒音を出すものがある。8月上旬に全数分の改修を行なう予定である。

ヒータ電源(高砂製、AA660F)の1台で、ブレーカが時々トリップした。パワーアンプ部のFET1個の故障が原因だった。

5. まとめ

昨年10月末からの運転状況を中心に、クライストロン電源システムの現状を報告した。今年9月からのリニアックー3GeVリング・ビームコミッションング運転では、上位機器による運転が重要になってくる。また、上に報告した不具合も順次改修する必要がある。

来年度から181-400MeV間のリニアック増強計画も開始されるので、運転経験を次の開発に反映させていく予定である。

参考文献

- [1]川村 他、Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan(2006) pp.400-402.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj3_lam31/Proceedings/W/WP44.pdf
- [2]川村 他、Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan(2005), pp.293-295.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2_lam30/Proceedings/20P024.pdf
- [3]山崎正義 他、本研究会、TP31