

# J-PARCリニアック用クライストロン電源システム - KEK60MeV施設に於ける現状 -

川村真人<sup>1,A)</sup>、穴見昌三<sup>A)</sup>、福井佑治<sup>A)</sup>、久保田親<sup>A)</sup>、小野正明<sup>A)</sup>、千代悦司<sup>B)</sup>、弓野雄一<sup>C)</sup>、久保 宏<sup>C)</sup>

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

B) 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

C) (株)日立製作所 インパータ推進本部パワーエレクトロニクス部変換装置設計グループ  
〒317-8511 茨城県日立市幸町三丁目1-1

## 概要

J-PARCリニアックでは、高周波源としてモジュレーション・アノード型パルスクライストロンが採用されている。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が開発され、200MeVリニアック<sup>2)</sup>に必要な大電力機器の大部分は既にJAERI、KEKに納品されている。

またKEK60MeV施設では現在最上流部の建設が継続されており、それに対応してクライストロン電源システムも試験・運転が行われている。当電源システムについては、既に過去の本研究会<sup>1)</sup>やデザインレポートなど<sup>2)3)5)6)</sup>で報告されているが、最近の運転で新たな改良等が行なわれた。

本報告では当電源システムの概要と、KEK60MeV施設に於ける現状について報告する。

## 1. クライストロン電源システム、およびKEK60MeV施設内システムの概要

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex、大強度陽子加速器計画)の全体設計に於いて、400MeV陽子リニアック用の高周波源には324MHzパルスクライストロン20台、972MHzパルスクライストロン26台、固体増幅器4台(324MHz3台、972MHz1台)を使用し<sup>3)</sup>、パルスクライストロンは全てモジュレーション・アノード型(以下、“M・

アノード型”と略称)を使用している<sup>4)7)</sup>。

クライストロンに電力を供給するクライストロン電源システムには以下の3仕様のタイプがある<sup>5)</sup>。

1台のカソード高圧直流電源と4台のM・アノードパルス変調器で構成され、4台のクライストロンを並列負荷として電力を供給し、カソード定格電圧が4台とも110kVのタイプ。10システム。エネルギー領域50～400MeVの加速空洞へのRF給電用。

と同じ構成、4クライストロン並列負荷。カソード定格電圧が、1台が80kV、他の3台が110kVのタイプ。1システム。エネルギー領域50MeV以下の加速空洞へのRF給電用。

1台のカソード高圧直流電源と2台のM・アノードパルス変調器で構成され、2台のクライストロンを並列負荷として電力を供給し、カソード定格電圧が2台とも80kVのタイプ。2システム。エネルギー190.8MeVのMEBT2内デバンチャー、およびL3BT内デバンチャーへのRF給電用。

これら3タイプのシステムに合わせ、カソード高圧直流電源は3タイプのもので製造される。表1、2にタイプ、の仕様を示す。一方M・アノード変調器は定格等が全て同一であるが、スイッチング素子に四極管(TH-5188, Thomson CSF)、半導体素子(FETのstack module)<sup>8)</sup>各々を使用する2タイプのものがある。開発当初は四極管タイプを製造したが、四極管の需要減少と半導体素子の性能向上を

表1：カソード高圧直流電源部(タイプ )  
の仕様<sup>6)</sup>

項目	最大定格	Comment
クライストロン数	4台	* パルス電流平均値
出力電圧	110kV	
出力電流	6.3A	
出力電力	693kW	
電圧サグ	5%	
コンデンサ容量	25.5 μF	

表2：カソード高圧直流電源部(タイプ )  
の仕様

項目	最大定格	Comment
クライストロン数	4台	(表1の*)
出力電圧	80(1)+110(3para.)kV	
出力電流	1.05+4.725A	
出力電力	603.75kW	
電圧サグ	5%	
コンデンサ容量	6.4+19.2 μF	

<sup>1)</sup> E-mail: masato.kawamura@kek.jp

<sup>2)</sup> 324MHzリニアックの出力エネルギーは厳密には190.8 MeV。建設当初は181MeVの運転を目指す。

考慮し、半導体素子タイプのモデルを試作し性能を確認した<sup>[8]</sup>後は現在まで半導体素子タイプのみを製造している。表3にM・アノード変調器の仕様を示す。

表3：M・アノードパルス変調器の仕様<sup>[1][3]</sup>

項目	定格
アノード電圧	カソード電圧の70～90%
スイッチ素子電流	1A
アノード電流	100mA以下
立上り時間	50 $\mu$ s以下(10-90%)
立下り時間	150 $\mu$ s以下(90-10%)
パルス幅	100～800 $\mu$ s
スイッチング素子	四極管または半導体素子
逆バイアス電圧	-2,-2.5,-3kV(可変、対カソード)
ヒータ入力	AC300W
カソード	14
シリーズ抵抗	

‘03年6月の時点における機器製造の状況を以下に述べる。カソード高圧直流電源は190.8MeVまでの加速空洞用5台(タイプ 4台、タイプ 1台)が完成しJAERI、KEKに納品されている。現在バンチャー用1台(タイプ )の一部が完成・納品され、一部が製造中である。M・アノード変調器は190.8MeVまでの加速空洞用20台、バンチャー用1台、テストスタンド用1台が完成・納品されている。これら22台のうち、初期開発の6台が四極管タイプ、16台が半導体タイプである。

JAERIでは972MHz RFテストスタンドにて当電源システムが使用され、972MHzクライストロン(1号機)を含めたRFコンポーネントの大電力試験、長パルス化試験調整等が精力的に行われている。詳細はJAERI山崎正義氏のProceedings<sup>[9]</sup>等を参照されたい。

KEK60MeV施設内の当電源システム<sup>[1]</sup>について概要を以下に述べる。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号機(HV1号機タイプ)、2号機(HV2号機、タイプ)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。‘03年6月の時点までに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加速空洞を用いたビーム加速試験、およびSDDL加速空洞の大電力試験に使用されている(RFQは必要電力が少ない(680kW)ため80kV回路のクライストロン負荷からRFを給電する)。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、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。

## 2. KEK60MeV施設における現状

KEK60MeV施設におけるクライストロン電源システムの高圧印加(HV ON)の積算時間は、‘03年6月17日現在でHV1号機が1621.8時間、HV2号機が1050.8時間である。これまで基本的な性能を満たしており、各種試験や運転には支障が無い状況である。一方、設計時には考慮していなかった不具合が幾つか見られる。以下に不具合についての考察と、これまで行った改良について述べる。

### 2.1 HV1号機クローバ動作時の不具合とダイオード挿入による改良

HV1号機はタイプ(表2)の電源であり、出力は80kV1回路、110kV3回路で構成される。図1に回路図を示す。一方、変圧整流器のDC出力側は、低圧側(現状では接地されている)が共通で、高圧側が変圧器(トランス)の2次側巻線比により定格値-80kVと-110kVの2系統に分かれる。トランスの下流に整流器が繋がっており、更に下流では、80kV回路には40H直流リアクトル、6.4  $\mu$ Fコンデンサが繋がっており、110kV回路には13.3H直流リアクトル、19.2  $\mu$ Fコンデンサが繋がっている。

負荷短絡時の対策として、110kV - 接地間にクローバ回路が設けられている。また試験結果に基づいて、80kV回路の負荷短絡時もクローバ動作させるよう改良が加えられた(この件の議論に関しては文献[1]を参照されたい)。

110kV回路短絡によるクローバ試験を行った際、80kV回路の6.4  $\mu$ Fコンデンサが瞬時に放電されず、短絡試験機に電流が流れてしまう現象が見られた。原因は以下のとおりである。6.4  $\mu$ Fコンデンサが110kV - 接地間のクローバ短絡によって放電する場合、図1の破線で示す通り電流が13.3Hリアクトル 整流器 40Hリアクトル 12 抵抗 6.4  $\mu$ Fコンデンサという経路を通ることになる。上記のリアクトルとコンデンサにより周期が116msの共振回路が形成されるので速やかに放電されない。現状では、定格で運転中に110kV回路でクライストロンが短絡した場合、6.4  $\mu$ Fコンデンサに80kVの電圧で蓄積された20.48kJの電気エネルギーが振動しながら回路の抵抗分で消費され、その過程で短絡したクライストロンに電流が流れ込みダメージを与えてしまう。

この不具合を改良するため、図1に示す通り80kV回路 - 110kV回路間にダイオードを挿入し、図の実線で示すようにクローバ動作時に電流がリアクトルを通らないようにした。具体的には6.4  $\mu$ Fコンデンサバンクの高圧部に、常用印加電圧30kV(最大定格60kV)、通流電流7000A(最大定格1000Aのものを7並列にstackした)のダイオードを取り付けた。ダイオード取り付け後クローバ試験を実施し、6.4  $\mu$ F

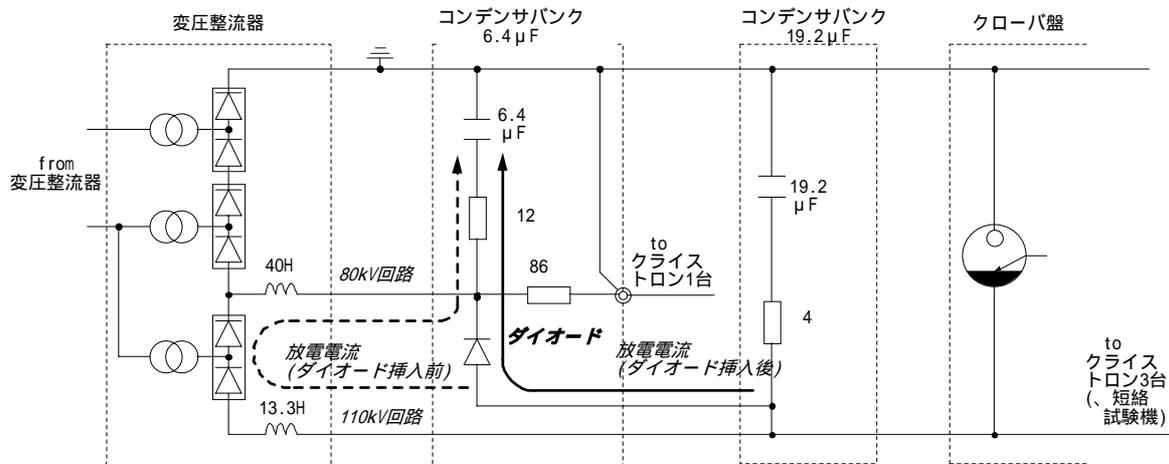


図1：HV1号機クローバ動作時の不具合とダイオード挿入による改良

コンデンサがクローバ動作時に速やかに放電するのが確認された。

なお、この不具合はタイプ の電源に特有で、タイプ 、 では考慮する必要のないものである。

## 2.2 クローバ動作時のコンデンサバンク低圧側電圧跳ね上がりとその抑制対策

クローバ試験を実施する際にコンデンサバンク低圧側電圧をプローブで観測したところ、クローバ動作時に電圧の跳ね上がりが観測された。シミュレーションによる解析や部品（インダクタ、コンデンサ等）の設計、現場での実現性、等を検討した結果、コンデンサバンク - クローバ盤間のケーブル配線を見直し、インダクタンスを低減させることを試み、HV1号機での試験を実施した。

試験の結果、上記の配線見直しにより電圧跳ね上がりのピーク値が若干減少した。また2.1項で述べたダイオードの挿入により、ダイオードと2つのコンデンサで作られるループ回路が出来たことで19.2 μFコンデンサ低圧端子から見た等価的なインピーダンスが低減し、その結果上記ピーク値が更に減少した。観測の結果電圧跳ね上がりのピーク値は上記2つの効果でほぼ半減した。カソード電圧を110kVに設定した時のピーク値は15kVと測定された。他の直流電源の対策は引き続き検討中である。

## 2.3 その他

クライストロン負荷で電源の運転を行っている時に直流電圧(カソード電圧)の僅かな減少(運転開始後約10時間で2kV未満)が観測された。これは変圧整流器に備えたモニタ用分圧抵抗の抵抗値が、絶縁油の温度上昇により変化したためと見られる。対策としてクローバ盤モニタ用分圧抵抗の電圧信号を、バックアップ用としてPLCに取り込み変動の補正を試みたが、パラメータ設定の不備などにより成功しなかった。今後の検討が必要となる。

クライストロン - M・アノード変調器間で使用している高電圧同軸ケーブルRG-220/Uが、特にM・アノード電圧端子で使用している物に、内導体 - 外導体(網線)間の絶縁体(ポリエチレン)に、放電による穴が開き絶縁不良となる不具合が生じた。網線 - ポリエチレン間に半導電層を追加したケーブルの試作を検討中である。また配線作業時は網線 - ポリエチレン間に空気層が出来ないように注意が必要である。

## 3 . まとめ

J-PARCリニアック用クライストロン電源システムの概要と、KEK60MeV施設における現状を報告した。来年秋以降のJ-PARC建設開始に向けて、更なる検討を進める予定である。

## 参考文献

- [1]川村 他、Proc. of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan (2001), pp.204-206.  
<http://conference.kek.jp/lam26/LAM26PDF/1P-27web.PDF>
- [2]“JHF Accelerator Design Study Report”, JHF Project Office, KEK Report 97-16, JHF97-10, 1998, pp.4.6-10~21.
- [3]“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/index.html>
- [4]同、Chap.3.1.3.2.; 3.1.3.3.
- [5]同、Chap.3.1.3.4.
- [6]M. Ono et al., Proc. of the 12<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology (1999), pp.275-277.
- [7]手塚勝彦 他、本研究会、TP-24.
- [8]T.Nakamura et al., Proc. of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan (2000), pp.219-221.  
<http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/PDF/12P-31.pdf>
- [9]山崎正義 他、本研究会、TP-21.;  
山崎 他、Proc. of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan (2002), pp.296-298.  
<http://lam27.iae.kyoto-u.ac.jp/PDF/8P-10.pdf>