

# JAERI-KEK 統合計画リニアック用 クライストロン電源システムの開発

川村真人<sup>1,A)</sup>、小野正明<sup>A)</sup>、門倉英一<sup>A)</sup>、久保田親<sup>A)</sup>、穴見昌三<sup>A)</sup>、市川雄一<sup>B)</sup>、久保 宏<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 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

<sup>B)</sup> (株) 日立製作所電力・電機グループ電機システム事業部日立生産本部パワーエレクトロニクス部

〒317-8511 茨城県日立市幸町 3 丁目 1-1

## 概要

JAERI-KEK 統合計画 (大強度陽子加速器計画)<sup>[1]</sup> 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る<sup>[2][3]</sup>。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の開発、建設を行っている。現在 KEK 内ではリニアックの最上流 60MeV の部分を建設しており、クライストロン電源システムもそれに合わせた開発、建設を行った<sup>[4]</sup>。

本報告ではクライストロン電源システムの概要と建設状況、大電力試験の結果等を述べる。システムの概要では、先に大型ハドロン計画 1GeV 陽子リニアック用として KEK で開発した UHF クライストロン電源<sup>[5]~[7]</sup>と比較する。

## 1. はじめに

JAERI-KEK 統合計画 (以下、「統合計画」と略称) リニアック第 1 期の現在の設計では、400MeV まで常伝導加速空洞で負水素 (H<sup>-</sup>) イオンを加速する。詳しく述べると、(1)1 台の RFQ 空洞で 3MeV まで、(2)3 台の DTL 空洞で 50MeV まで、(3)32 台の SDTL 空洞で約 190MeV まで、(4)46 台の ACS 空洞で 400MeV まで、それぞれ加速する。空洞の励振周波数は、RFQ、DTL、SDTL 各空洞が 324MHz、ACS 空洞が 972MHz である。

リニアック用高周波源としては、長パルス幅 (650  $\mu$ s) で、周波数が 2 種類 (324MHz と 972MHz) のものが必要となるが、本計画ではモジュレーション・アノード (以下、「M・アノード」と略称) 型クライストロンが採用され、いずれも新規に開発を行っている。324MHz クライストロンは 20 台必要となるが、所期の性能を満たすものが完成しており<sup>[8]</sup>、量産用モデルもまもなく出来上がる状況である。972MHz クライストロンは今秋 1 号機の大電力試験を行う予定である。

クライストロン電源は、クライストロンのカソード電極に直流電圧を、M・アノード電極にパルス電圧をそれぞれ印可して、クライストロンにパルス電力を供給する。KEK では「大型ハドロン計画 (以下、JHP と略称) 1GeV 陽子リニアック」用として 89 年

以降開発を行い<sup>[5]</sup>、そのプロトタイプは 94 年に完成した<sup>[7]</sup>。統合計画用クライストロン電源システムは、324MHz クライストロン用が KEK で稼動し、972MHz クライストロン用も JAERI 東海研で今年 6 月中旬に試験が行われるが、いずれも JHP 用プロトタイプを基本とし、それを発展させたものとなっている。

本報告は統合計画用クライストロン電源システムについて、特に 324MHz クライストロン用に関するものである。

## 2. 電源システムの概要

20 台のクライストロンに電力を供給する電源システムは、大きく分けて 5 台のカソード高圧直流電源部と、20 台の断路器、M・アノードパルス変調器、クライストロン低圧電源盤および制御盤 (5 台のカソード高圧直流電源制御盤と 20 台のクライストロン高圧・低圧電源制御盤) で構成される。

### 2.1 カソード高圧直流電源部

5 台のカソード高圧直流電源部は各々 4 台のクライストロンに電力を供給する。負荷時の定格電圧は 110kV であるが、RFQ 空洞に要求される RF 電力が他の空洞より小さいため、最上流部のクライストロンに供給する回路の定格電圧は 80kV となっている。以下最上流部の直流電源 1 台を 1 号機、他の電源を上流から 2、3、4、5 号機と称する。

直流電源は降圧変圧器、電圧調整制御盤 (AVR 盤)、変圧整流器、コンデンサバンク、クローバ盤、断路器盤で構成され、断路器盤はクライストロンギャラリに、その他は高圧電源室に収められる。

変圧整流器は、その絶縁油タンク内に変圧器 ( $\Delta$ -Y)、整流器 (ダイオード)、直流リアクトル等を収納し、出力電圧は AVR 盤で制御 (サイリスタ点弧位相角制御) される。1 号機用変圧整流器は定格電圧 80kV (1kly.)、110kV (3kly.) の 2 種類 (計 4kly.) の出力となるため、タンク内機器は 1 台ずつ増え、タンクの外形は 2~5 号機用 (2200×2650×1910) と比べ約 1.25 倍増加している (2600×2800×1910)。出力は 110kV 側のみ制御され、80kV 側は 110kV 側に追従して出力され、割合は厳密には両者の負荷に依存する。

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

コンデンサバンクの容量は、「クライストロン動作時のカソード電圧のサグを±5%以内に抑える」ように設計された。各コンデンサバンクは1号機 80kV 回路 6.4 μF、同 110kV 回路 19.2 μF、2～5号機 25.5 μFである。後者2種のコンデンサバンクは断面積を小さくするため2段積み構造となっている（各々 60kV 用コンデンサ 6.45 μF の 2s×6p、2s×8p で、バンクのサイズはいずれも 2220×2920×3010）。

クローバ盤はクライストロンが短絡した時にそれを保護するため、コンデンサバンクに蓄積されているエネルギーを極めて速やかにバイパスさせる働きを持つ。その仕様は「定格電圧出力時に直流電源を 0.3φ×200mm の銅線で短絡した時、6 μs 以内でクローバ動作し本銅線が溶断しないこと、且つクライストロンで放電発生時流入エネルギーは 20J 以下となること」である。素子はイグナイトロン NL-35391 (Richardson Electronics Ltd.) を5直列使用する。安定稼動を目的として、イグナイトロンは絶縁油タンク内に収納することを試みた。

クローバ盤の配置場所について、JHP 用プロトタイプはクライストロンの傍に配置した<sup>[5]</sup>。これは、クライストロン短絡時に高圧ケーブルに蓄えられたエネルギーが流入することを考慮し、クローバ盤～クライストロン間のケーブルを短くした為である。KEKB 用電源回路でクローバテストを行い、詳細な解析の結果この配置とする必要がなく、長いケーブルでも消費エネルギーが十分小さいことがわかった。参考として電源システムのコンデンサバンク (25.5 μF、3Ω)、JHP 用プロトタイプでのクライストロンカソードシリーズ抵抗 (27.5Ω) を用い、放電時のギャップ電圧を 100V に想定して計算を行ったところ、クライストロン短絡部で消費されるエネルギーはわずか 3.35J と見積もられる<sup>[2]</sup>。これらの結果を踏まえ、電源システムではクローバ回路を高圧電源室に配置し、負荷まで長い (100m 以上) 高圧ケーブルを配線することにし、実際の短絡試験でもこの結果が確認された。

パルス動作時のカソード電圧のサグが、クライストロン RF 出力の位相変動に影響を与えることが確かめられている<sup>[2]</sup>。このサグを軽減するため、将来バウンサ回路<sup>[2]</sup>を入れることを検討している。電源システムは、変圧整流器-コンデンサバンク-クローバ盤の配置を考慮し、低圧側をグラウンドから浮かせる (～20kV) ことが可能な配線にした。

断路器盤は負荷 (M・アノードパルス変調器、クライストロン) の保守時に安全を確保する目的で、個々の負荷を独立に切り離しが出来るように設けた。直流電源 1 台あたり断路器盤 4 台がクライストロンギャラリーに設置される。

表 1 に 2～5 号機の仕様を示す。

## 2.2 M・アノード電源部 (M・アノードパルス変調器)

M・アノードパルス変調器の仕様を表 2 に示す。この機器は電源システムの機器の中でも先駆けて開発され、本研究会でもすでに報告されている<sup>[9]</sup>。スイ

ッチング素子はこれまで四極管 TH5188(Thomson CSF)を使用しているが、FET 等半導体を用いた高圧スイッチの試作品については既に報告されており<sup>[10]</sup>、現在の製作分から半導体素子を採用している。

表 1 : カソード高圧直流電源部 (2～5 号機) の仕様<sup>[4]</sup>

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

表 2 : M・アノードパルス変調器の仕様<sup>[2][3]</sup>

項目	定格
kly.アノード電圧	93kV (カソード 110kV 時)
スイッチ素子電流	1A
kly.アノード電流	100mA 以下
立上り時間	50μs 以下(10-90%)
立下り時間	150μs 以下(90-10%)
スイッチング素子	四極管または半導体素子
kly.逆バイアス電圧	-2,-2.5,-3kV(可変、対カソード)
kly.ヒータ入力電力	AC300W
kly.カソード シリーズ抵抗	14Ω

## 2.3 制御部

電源システムの制御は直接配線部分と、PLC を用いたインテリジェントな制御を行う部分とに大別される。直接配線部分は速い応答速度が要求される信号や安全上確実な制御が必要となる信号に対応する (クローバ動作指令信号、等)。

インテリジェントな制御はさらにコントロール 1、コントロール 2 の二つの部分に分かれる。

コントロール 1 は高圧、低圧電源のオン/オフ/リセットの動作、各種接点信号 (インタロック、各機器のステータス) の把握を受け持つ。コントロール 2 はコントロール 1 の上位に位置し、コントロール 1 への動作指示やステータス把握、アナログ信号の処理、等を含み、電源システム全体の状況を把握し表示する。また更に上位へネットワークで接続される。

実際の制御盤は、高圧電源室ではカソード高圧直流電源 1 台をその制御盤 (HVCTL 盤) 1 台が制御し、クライストロンギャラリーでは断路器、M・アノードパルス変調器、クライストロン、クライストロン低圧電源盤 (KLLPS 盤) 各 1 台をクライストロン高圧・低圧電源制御盤 (KLCTL 盤) 1 台が制御する。全ての HVCTL 盤、KLCTL 盤がコントロール 1、コントロール 2 を備え、HVCTL 1 台とそれに対応する KLCTL 4 台とは光ケーブルで通信しており、主回路

のオン/オフや、機器のステータス等の把握は何れの制御盤からも可能となっている。また、タッチパネルを備え、多くの操作や表示がなされており、操作ボタンやメータは必要最小限にとどめている。

### 3. 建設状況

KEK 内にリニアックの最上流 60MeV の部分が建設されるのに合わせ、これまでカソード高圧直流電源の 1,2 号機と HVCTL 盤 1,2 号機、およびクライストロンギャラリー内の各機器 (断路器、M・アノードパルス変調器、KLLPS 盤、KLCTL 盤) 6 台ずつがこれまで製造・建設された。ここでは M・アノードパルス変調器のスイッチング素子には四極管 TH5188 を使用している。現在カソード高圧直流電源、HVCTL 盤の 3~5 号機とクライストロンギャラリー内機器 12 台ずつを製造中であり、今年度末に JAERI 東海研内へ納品予定である。ここでは M・アノードパルス変調器のスイッチング素子には半導体素子を使用する。来年度末には、リニアックで運転する 324MHz クライストロン用電源システム全てが揃う予定である。

### 4. 大電力試験の結果と今後の課題

KEK 内で行われた大電力試験の結果を以下にまとめる。

直流電源 1 号機が 1 負荷の場合は、その負荷を 110kV 回路に接続しなければならない。これは AVR にフィードバックされる電圧が 110kV 回路で検出されており、80kV 回路に負荷を接続して 110kV の 3 回路を無負荷とすると、110kV 回路の出力電圧が制御出来ず定格値を超える可能性があるためである。また初期の設計では、80kV 回路にはクローバ回路を設けずに直列抵抗を増やし、負荷短絡時はその抵抗で消費エネルギーの低減を計った。試験の結果、通常の高圧 off では時間がかかり、その間に 80kV 回路が短絡した場合、110kV 回路のコンデンサが電圧を保持するため、変圧整流器内のダイオードに過電圧が印可されることがわかった。従って、80kV 回路短絡時もクローバ動作させるように改良した。

負荷短絡クローバ試験では 1 号機、2 号機とも 5 $\mu$ s 未滿でクローバ動作が確認され、 $\phi 0.3 \times 200$ mm の銅線が溶断せず、所期の性能を満たしていることが確かめられた。

パルス出力の波形として、110kV 運転時の写真を図 1 に示す。直流電源 2 号機に負荷 1 台を接続した状況である。

今後の課題としては、4 並列負荷での運転・制御等、また半導体スイッチング素子での運転などが考えられ、その長期耐久性 (信頼性) の試験も行っていく予定である。

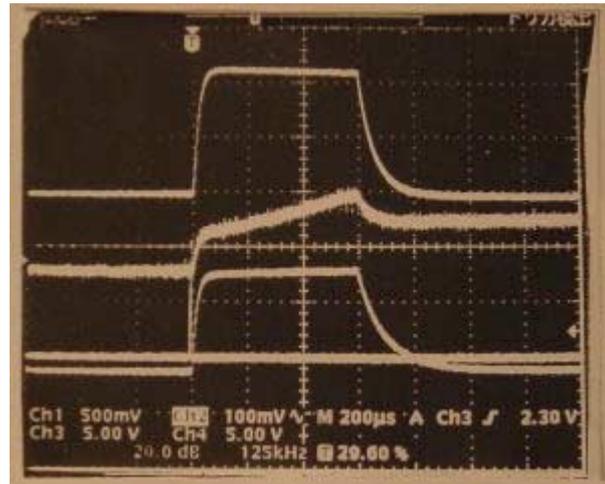


図 1 : 出力波形

上からビーム電流 (20A/div.)、カソード電圧 (1kV/div. AC カップリング)、M・アノード電圧 (50kV/div.)、パルスオントリガ  
横軸 200  $\mu$  s/div.

### 5. まとめ

324MHz クライストロン用電源システムについて、その概略と現状等を述べた。972MHz クライストロン用電源も含め、今後リニアックの建設に向けて開発、試験、運転等が精力的に行われる予定である。

### 参考文献

- [1] JAERI・KEK 共同推進チーム、「大強度陽子加速器計画」、KEK Report 99-5, JAERI-Tech2000-003, JHF-99-4, 1999.
- [2] “JHF Accelerator Design Study Report”, JHF Project Office, KEK Report 97-16, JHF-97-10, 1998.
- [3] “The Second International Advisory Committee Meeting for JHF Accelerator”, December 7-9, 1998, KEK, Tsukuba, Japan.
- [4] M. Ono et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology (1999), pp.275-277.
- [5] 大型ハドロン計画推進作業部会編、「大型ハドロン計画陽子リニアックワーキンググループ報告 II」第 6 章 7 節, JHP-14, KEK-INTERNAL-90-16, 1990.
- [6] M. Kawamura et al., Proc. of the 15th Linear Accelerator Meeting in Japan (1990), pp.147-149.
- [7] M. Kawamura et al., Proc. of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan (1993), pp.202-204.
- [8] M. Kawamura et al., Proc. of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan (1995), pp.266-268.
- [9] S.Fukuda et al., Submitted to the XX International Linac Conf.(2000).  
URL:<http://www.slac.stanford.edu/econf/C000821/THE02.pdf>
- [10] M. Kawamura et al., Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999), pp.200-202.
- [11] T. Nakamura et al., Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000), pp.219-221.  
URL:<http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/lim00/PDF/12P-31.pdf>