

The Parallel Operation of UHF Klystrons for JHP

M.Kawamura, S. Anami, Z.Igarashi, M.Ono, K.Kudo, T.Kubo, C.Kubota,
E.Takasaki, T.Takenaka, and M.Kihara
KEK, National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305

ABSTRACT

A test linac of the Japanese Hadron Project (JHP) has been constructed at KEK. To supply high power and high duty rf-pulse-powers for accelerating cavities of the linac, a UHF amplifier unit has been developed. In this unit, two klystrons are operated in parallel. The first parallel operation was done in July, 1994. An outline of components in the unit and present status of the parallel operation are described in this report.

UHFクライストロンの並列運転

1. はじめに

大型ハドロン計画 (JHP、仮称) の大強度高エネルギー陽子リニアックの研究開発のため、高エネルギー物理学研究所アセナリホール内に陽子線形加速器実験装置が建設されている。加速空洞は RFQ リニアック、ドリフトチューブ リニアック (DTL) 各 1 台である。我々はこの 2 台の加速空洞に大電力高デューティの高周波パルスパワーを供給するために、また実機のプロトタイプとして、UHF 増幅ユニットの開発を行ってきた⁽¹⁾。そして 94 年 7 月最初の試験運転を行い、所期の性能を達成することができた⁽²⁾。本ユニットは 1 台のクライストロンカソード直流電源で 2 台の UHF クライストロンを並列に運転する。以来このユニットを用いて、これまでに上記 2 台の加速空洞の大電力試験⁽³⁾⁽⁴⁾、H⁻イオンの 3 MeV までの加速試験⁽⁵⁾を行い、それぞれ成功裡に終わっている。

本報告書では UHF 増幅ユニットの構成要素の概略、UHF クライストロン並列運転の運転状況について述べる。

2. UHF 増幅ユニット構成要素の概要

(a) UHF クライストロン⁽¹⁾

高周波源は UHF 帯のクライストロンを用いている。加速空洞から要求される電力はピーク電力 1.5 MW、パルス幅 650 μs、繰返し 50 Hz であり、クライストロンは最大定格が 2 MW のものが必要となる。このクラスのクライストロンではモジュレーションアノード (M・アノード) 電極を内蔵した 3 極管タイプのものが多いが市販されている。またこのタイプはカソード電源が直流となり、パルス変調器が必要な 2 極管タイプに比べて電源製造コストの面で有利になる。我々は M・アノード型クライストロン、Thomson 社 TH-2134 を採用し、予備品 1 台を含めて 3 台購入し使用している。UHF クライストロンの性能を表 1 に示す。

(b) クライストロン電源⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

前述の M・アノード型クライストロンに高圧パルス電力を供給するには、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加する電源が必要となる。電源に要求される性能を表 2 に示す。我々は 89 年から設計・製作を開

表 1. UHF クライストロンの性能⁽¹⁾

構造	5 空洞内蔵、カソード下方、集束コイル内蔵型
窓、導波管	ビルボックス、大気使用、WR-1800
周波数	432 MHz
ピーク電力	2 MW
平均出力	65 kW
パルス幅	650 μs
繰返し	50 pps
デューティ	3.25 %
カソード電圧	95 kV
カソード電流	40 A
M・アノード電圧	80 kV
効率	55 %
利得	46 dB

始し、93 年 4 月にクライストロン 1 台のみでの大電力試験、94 年 7 月にクライストロン 2 台並列での大電力試験を終了させた。図 1 にクライストロン電源の回路図を示す。

クライストロン 1 台のみでの大電力試験については文献⁽⁷⁾に詳述している。ここでは 2 号機を設計するにあたって 1 号機から変更した箇所について述べる。1 号機ではパルス出力電圧を連続的に可変とするためにスイチング素子 (電子管、Thomson 社 TH-5188) のプレート抵抗 (30 kΩ) と接地との間にクランプ電源 (直流 0 ~ 60 kV、50 mA) を設けた。しかし購入したクライストロンのカソード印加電圧に要求される値が、クライストロン電源設計時に予想していた値よりもかなり低くなっていた (予想値 110 kV に対し 93 kV)。その結果、カソード電圧に対するアノード電圧の比が予想より高くなり (予想 77.2% に対し 83.9%)、フルデューティでの運転ではクランプ電源の電圧、電流の関係が整合しないものとなってしまった。2 号機ではこのことをふまえ、また実際の運転から連続可変の必要性もそれほど高くないこともわかったので、出力比を抵抗分割比の切換によって可変する方式とした。設定値はカソード電圧 93 kV (クライストロン TH-2134 の定格値) に対して M・アノード電圧が 73 kV、78

表2. クライストロン電源の性能⁽¹⁾⁽⁶⁾

(クライストロン電源の定格)	
ピーク電力	5.5 × 2 MW
出力パルス幅	650 μs
繰返し	50 pps
(カソード電源部の定格)	
直流出力電圧	最大 110 kV(負荷時)
ピーク電流	最大 46 × 2 A (含、M・アノード電流 1 A)
平均直流電流	最大 1.5 × 2 A
パルス負荷時のサグ	5 %
クローバ回路部の仕様	出力電圧 110 kV で動作中にクライストロンが短絡したとき、6 μs 以内に動作を開始し、クライストロンへの注入エネルギーは 10 J 以下
(M・アノード電源部の定格)	
尖頭出力電圧	85 kV
尖頭出力電流	1 A(グミ電流)
パルス幅	650 μs
繰返し	50 pps

kV、83 kV となるようにした (因みに TH-2134 の定格値は 77 ~ 78 kV)。また、1号機ではアノード電流を 10 mA 以下と予想し、検出抵抗を 100 Ω として出力信号が 1 V 以下となるようにした。しかし実際に観測される電流値は 100 mA 以上であり、その結果アークの発生する現象が見られた。2号機ではこの抵抗値を 10分の1の 10 Ω とした。

1、2号機の接続はクローバ盤内で同軸ケーブルを並列に配線することで達成している。一機を単独で運転する必要が生じたときは、クローバ盤内の他機へつながるコネクタをはずすことで対応する。

(c) 立体回路⁽¹⁾

クライストロン出力導波管から加速空洞までの大電力 RF 電力

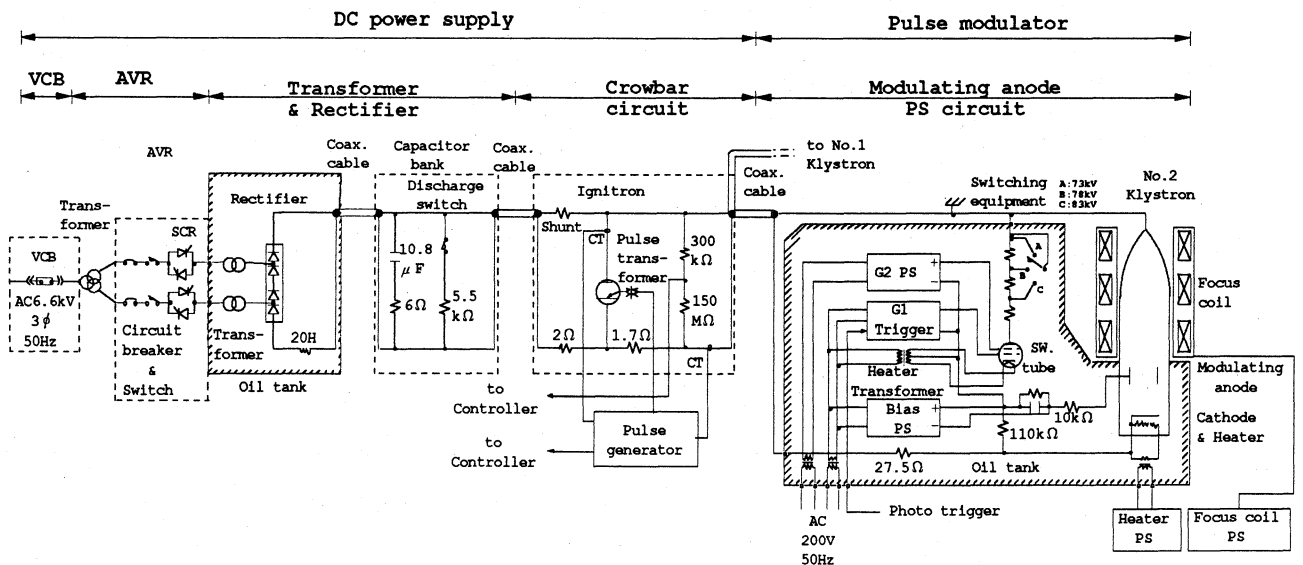


図1. クライストロン電源回路図

の伝送は、方形導波管を用いている。そして実際の配管では直線導波管、曲がり導波管の他、サーキュレータ、グミロード、フレキシブル導波管を用いている。サーキュレータはクライストロンを保護し、かつ系を安定に動かすために用い、グミロードは空洞からの反射波を吸収する。フレキシブル導波管は、導波管系が傾くなどしてクライストロン出力窓に力が加わるのを緩衝したり、導波管系の微妙な長さや傾きに対応したりするために用いている。

導波管は WR1800 フルサイズとし、素管はアルミ材の押し出し工法によるものとした。サーキュレータは Yジャンクション型、グミロードは薄膜抵抗体による同軸型を用いている。表3にサーキュレータの性能を示す。

表3. サーキュレータの性能⁽¹⁾

ピーク電力	2 MW
平均電力	65 kW
アイソレーション	25 dB
挿入損	0.5 dB

サーキュレータの現場での電力試験は、グミロード終端で入力 1 MW、デューティ 1.8 % (600 μs × 30 pps)、負荷短絡で入力 500 kW、デューティ 0.6 % (600 μs × 10 pps) まで行い、いずれも良好な結果が得られた。

(d) 高周波制御⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁹⁾

高周波制御システムとしては、大きく分けて以下のように 3 系統の回路が必要となる。

- 1) 励振増幅器系。パルス成形回路、移相器、振幅変調器、固体増幅器等からなる。
- 2) 出力制御系。空洞内の RF や反射波のレベル、位相を検出し、移相器、振幅変調器にフィードバックをかける。コンパネーション(補償)回路、空洞のチューナ回路を含む。
- 3) インタロック系。空洞の温度や真空度、反射波のレベル、クライストロン出力窓等のアーク放電などを検出してインタロックをかける。特に反射波レベル、アーク放電には速いインタロックが必要

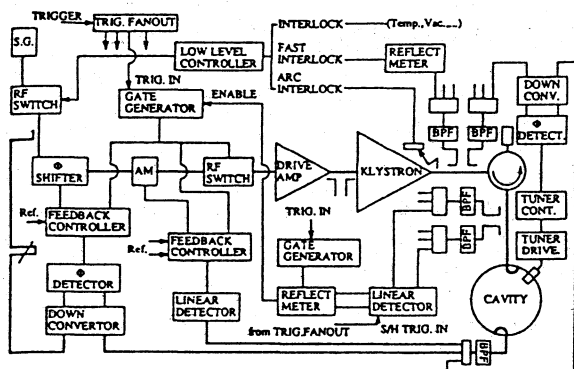


図2. 高周波制御システムのブロック図⁽²⁾

要となる。

高周波制御システム全体のブロック図を図2に示す。

3. 運転状況

購入した3台のUHFクライストロンについては、93年4月、94年5月、94年7月にそれぞれ大電力試験を終了し、現在も支障なく使用している。

クライストロン電源については、クライストロン1台のみのとき約550時間、並列運転で約300時間の運転を行っている。この中にはRFQのエージング170時間⁽³⁾、DTLのエージング3.3時間⁽⁴⁾、RFQによるH⁺の加速確認試験12時間が含まれている。

並列運転を行うようになって、長時間の運転をすると直流電圧のレベルが不安定となる現象が見られた。種々の調査を行った結果、直流電源の電圧検出抵抗の不具合であることがわかった。

立体回路系について、ダミーロードはピーク電力が1.6 MWを超えたあたりで放電を起こし、破損した。対策として抵抗体部をSF₆の置換とし、現在に至っている⁽⁴⁾。

導波管の材質がアルミであるため、クライストロン出力窓から外向きに導波管を突き抜けて放射線(γ線)が発生しているのが確認された。現在出力窓まわりや導波管の外表面を鉛で覆う作業を行っている。

高周波制御については、ALC (Automatic Level Controller)、PLL (Phase Lock Loop) を作動させないとき、カート電圧が80 kV、パルス幅600 μs、RFQへの出力480 kWのとき、出力RF電力のdroopが30 kW、パルス中のRFの移相が-80°であることが確認された。これはパルス出力時にクライストロンカート電源の平滑コンデンサが放電するためである。ALC、PLLを作動させると、RFのフラットトップの変動は1%以下、パルス中のRFの移相は±1°以下となった⁽²⁾。

図3の一番上の波形が、上記の測定を行ったときのRFの波形、図4の一番上の波形がその時の位相の波形である。図3の二番目の波形は、一番下のような矩形のワルニス信号を入れたときのALCの応答、図4の二番目以降の波形は、正弦波状のワルニス信号を入れたときのPLLの応答で、正弦波の周波数をパラメータとしている。

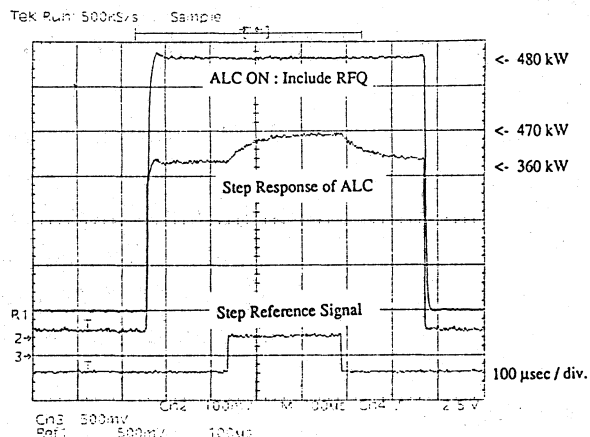


図3. ALCの矩形波応答⁽²⁾

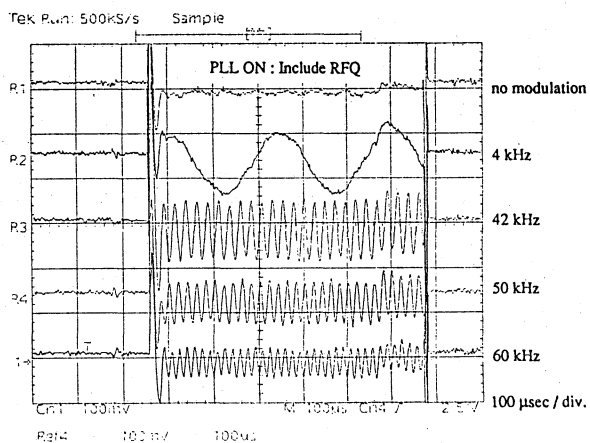


図4. PLLの周波数応答⁽²⁾

4. おわりに

UHF増幅ユニットの構成要素の概略、UHFクライストロン並列運転の運転状況について述べた。近々RFQ、DTL両空洞の加速試験を行う予定であり、クライストロン電源の長時間の連続運転でのデータを蓄積し、またビーム加速時の高周波制御システムの動作確認を行う予定である。

参考文献

- (1)穴見他、研究会報告—大型トロン計画の開発研究及び関連する物理、JHP-25(1994)、pp.56-66
- (2)M.Ono et al., Proc. of the 1994 International Linac Conference(1994), pp.472-474
- (3)A.Ueno et al., ibid., pp.169-171
- (4)F.Naito et al., ibid., pp.137-139
- (5)A.Ueno et al., ibid., pp.166-168
- (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.202-205
- (8)M.Ono et al., Proc. of IEEE Particle Accelerator Conference(1993), pp.1163-1165