

[12P-24]

DEVELOPMENTS AND HIGH-POWER TESTS OF THE 324MHz PULSE KLYSTRONS

M.Kawamura , S.Fukuda , Z.Fang , S.Yamaguchi , C.Kubota , S.Anami , S.Miyake^{*)} , K.Hayashi^{*)} ,
M.Sakamoto^{*)} and K.Tetsuka^{*)}

KEK, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, JAPAN

^{*)}Toshiba Corporation, Display Devices and Components Company, 1385, Shimoishigami, Ohtawara-shi,
Tochigi-ken, 324-8550, JAPAN

Abstract

In the low energy section (less than 200 MeV) of the linac for the High-Intensity Proton Accelerator Project, the pulse klystrons, whose frequencies are 324MHz, will be used as rf sources. After having developed the prototypes of rf-windows and a beam-test-tube, proto-type klystrons were developed. The high-power tests of these klystrons have been performed. At the same time some components (like a modulator, waveguides and so on) have also been developed and tested. In this paper the present status of the klystrons and the components, including the test results, are described.

3 2 4 M H z パルスクライストロンの開発と大電力試験

1 . はじめに

大強度陽子加速器計画[1]用リニアックのうち、200 MeVまでの低エネルギー部用高周波源には周波数324 MHz のモデレーティング・アノード (M・アノード)型パルスクライストロンが採用される[2][3]。この計画のために、高周波窓[4][5]、ビームテスト管[6]の開発を経て、クライストロンの実機の開発が行われ、大電力試験が進行中である。同時にKEKではM・アノードパルス変調器[6][7]や導波管など各要素の開発を行い、テストスタンドで使用している。本報告では、クライストロンや各要素の概要を述べ、大電力試験の結果を含めたクライストロン開発の現状を報告する。

2 . 3 2 4 M H z パルスクライストロンの概要

クライストロンの仕様を表1 [4]に、外形写真を図1に示す。大強度陽子加速器計画では20台使用する[1]。設計時には、ビーム・シミュレーション・コードとしてEGUNおよびARSENALを使用し、高周波窓の設計にはHFSSを使用した。実機製作には高周波窓お

表1 . クライストロンの仕様[4]

項目	単位	定格	動作時 (飽和状態)
周波数	MHz	324	
ピーク出力電力	MW	3.0	2.5
ビームパルス幅	μs	700	
RFパルス幅	μs	650	
同(フラットトップ)	μs	620	
繰返し	pps	50	
RFデューティ	%	3.25	
カソード電流	A	50	45
カソード電圧	kV	110	102
M・アノード電圧	kV	93	86
パービアンス		1.37 × 10 ⁻⁶	
効率	%	55	
利得	dB	50	
空洞数		5	
入/出力結栓		N型/ WR-2300	
RF窓		同軸セラミック窓	
据付方向		水平方向	
ビーム集束		電磁石	



図1 .3 2 4 MHz パルスクライストロン

よび電子銃のプロトタイプを試作、試験結果を反映させているが、高周波窓の同軸モードから矩形導波管モードへの変換部にはプロトタイプの door knob 方式[4][5]ではなく T-bar[8]方式が採用され、T-bar部の冷却には水冷・空冷いずれも使用出来るようになっている。

クライストロンとしては周波数 3 2 4 MHz、自由空間での波長約 9 2 6 mm というこれまでに無い低周波、長波長のものであり、全長(約 5 m)および重量(約 3 t)は真空炉、クレーンなどの既存設備の性能限界に達している。その上でドリフト径やコレクタの寸法、集束コイルの構成などを最適化して最大定格出力(ピーク電力 3 MW、平均電力 9 7 .5 kW)まで安定で、制御可能な RF 電力を供給することは大きな挑戦となっている。

3 . 各種構成要素の概要

3 - 1 . M・アノードパルス変調器[6][7]

M・アノードパルス変調器の仕様を表 2 に示す。1 クライストロン当たり 1 台必要であるため、大強度陽子加速器計画では 2 0 台使用する。現在クライストロン試験用にはプロトタイプとして製造した変調器が使用され、約 1 年 2 ヶ月運転が行われている。現在 KEK では 6 0 MeV までの陽子リニアックを建設中であるが、そのために当変調器は新たに 6 台製造・納品されており、秋以降の試験・運転を控えている状況である。また、当変調器はスイッチング素子として四極管(Thomson, TH5188)を使用しているが、KEK では半導体の方が長寿命であることに着目し、パルス電子(株)とともにスイッチング素子の半導体化に取り組み、試作機を開発した[9]。今までの試運転では支障無い状態である。

当変調器には運転状況を把握するため各種の電圧・

表 2 . M・アノードパルス変調器の仕様[2][3]

項目	定格
Kly .アノード電圧	~ 8 5 k V (カソード電圧 1 0 0 k V 時) ~ 9 3 k V (カソード電圧 1 1 0 k V 時)
抵抗デバイダ回路電流	1 A
Kly .アノード電流	1 0 0 mA 以下
立上り時間	5 0 μ s 以下(1 0 - 9 0 %)
立下り時間	1 5 0 μ s 以下(9 0 - 1 0 %)
スイッチング素子 Kly .	TH 5 1 8 8 (Thomson)
逆バイアス電圧	- 2 , 2 . 5 , 3 k V (対カソード電圧)
Kly .ヒータ入力電力	~ AC 3 0 0 W
Kly .カソードシリーズ抵抗	1 4

電流モニタが備えてあるが、最近クライストロンのエージングにおいて、M・アノード電流のモニタが有効となることわかってきた。このモニタは M・アノード電流を検出し光変換して出力されるものである。M・アノード電流 / 出力信号 = 1 0 0 mA / 2 V に変換され、オシロスコープにより 1 mA 以下まで観測できる。クライストロンのエージング中にパルス OFF 時のこの波形を観測すると、クライストロンを含むシステムのエージングが不十分な時には不定期に 5 mA 程度の電流が流れており、エージングによってそれが減少するのが確かめられた。

3 - 2 高電圧同軸ケーブルとケーブルソケット

M・アノードパルス変調器からクライストロンへは、同軸ケーブルに RG-220/U を、ケーブルソケットには Isolation Products, Inc. 製の D-117-BA を用い、「ヒータ」「ヒータ・カソード」「M・アノード」の合計 3 電極に電力を供給している。D-117-BA はケーブル挿入部を絶縁油で浸し真空脱泡する構造になっているが、絶縁油にオイルタンクなどで使用される電気絶縁油を用いるとケーブルのポリエチレンが膨張して再度の挿入 / 抜出が困難になり、シリコン油(I 社推奨)の使用が必須となった。

また、最近「M・アノード」電極をつなぐケーブルでコロナ放電が起こり、耐圧不良になることが確認された。ケーブルの作成については現在経験を積んでいるところであるが、ケーブルの寿命等について実験によるデータの蓄積が必要である。

3-3 高周波伝送系等

クライストロン試験のための高周波伝送系には、WR-2300の各種部品が用いられている。今年2月までの試験で用いられたものには方向性結合器[8]、3スタブ移相器[3]、T分岐[8]、同軸導波管変換器、ダミーロードなどがある。ここでは3スタブ移相器について略述する。スタブ挿入長最大250mmまで可変であり、周波数 $324\text{MHz} \pm 1\text{MHz}$ 、VSWR1.1以下、挿入損失0.05以下、耐ピーク電力1.5MWで、移相量は $\pm 30^\circ$ である。この3スタブ移相器はクライストロン試験において出力空洞の負荷調整に用いられた。

現在の伝送系には、DTLホットモデルのテストも考慮し、上記部品の他にサーキュレータ[3]や2分配器[3]も用いられているが詳細は省略する。

最後に、クライストロンドライブアンプには日本高周波(株)製のものを用いている。これはメインアンプにミニサーキット社製のLZY-1を2台用いて、出力合成でCWで50Wの出力が得られるものである。

4 クライストロンの開発状況と大電力試験の現状

試作1号機ではカソード電圧の低い範囲(66~75kV)と高い範囲(95~110kV)で最大10kW、周波数 $324 \pm 1.5\text{MHz}$ の発振が見られた。これらはコレクタに永久磁石を取り付け、横磁場を与えることで完全に抑制することが出来た。上記のようにして発振を抑えた状態でRF増幅を行うと、「フラット・トップ(FT)部に0.2~0.62MHzの高周波(寄生)振動が乗る」、「FT部がステップ(斜め)状になり、324MHzを中心に非対象のスペクトラムを持つ」など出力の不安定性が見られた。これらは入/出力空洞にスタブ移相器を接続して負荷調整すること等で抑制出来ることが確かめられた。なお、RF出力は2.5MW(パルス幅300 μs)、2.3MW(パルス幅600 μs)まで測定された。

上記のテストから、不安定の原因はコレクタからの戻り電子によるものと結論された[10]。この戻り電子はコレクタの形状(ドリフト管径とコレクタ内径との比、コレクタ長、等)に強く依存する事から、大きいコレクタ形状のクライストロン(1A号機)のテストも行った。

1A号機ではカソード電圧99kV以降で発振が見られたが、1号機と比較して、戻り電子を要因とす

る発振現象を改善出来ることが確かめられた。RF増幅については入出力特性曲線の未飽和部が滑らかに上昇しない、という現象が見られたが、この原因の1つとして、カソード電流の不定期な変動が影響していることがわかった。

1号機、1A号機の結果を踏まえて2号機が製造され、現在大電力試験中である。

5 まとめ

324MHzパルスクライストロンおよび各種構成要素の概要と、クライストロンの開発状況をまとめ、これまでの成果と問題点を述べてきた。今年度行われる予定のRFQ空洞を用いたビーム加速試験に向けて種々の試験、検討を行う予定である。

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-Tech 2000-003, JHF-99-4, 1999.
- [2] "JHF 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] S.Fukuda et al., Proc. of the First Asian Part. Acc. Conf. (1998), pp. 112-114.
- [5] M.Kawamura et al., Proc. of the 23th Linear Accelerator Meeting in Japan (1998), pp. 246-248.
- [6] M.Kawamura et al., Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999), pp. 200-202.
- [7] M.Ono et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology (1999), pp. 275-277.
- [8] Z.Fang et al., Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999), pp. 215-217.
- [9] T.Nakamura et al., Proc. of this Meeting.
- [10] Z.Fang et al., Proc. of this Meeting.