

大強度陽子加速器(J-PARC)用324MHzクライストロンの開発

手塚 勝彦^{1,A)}、三宅 節雄^{A)}、坂本 光徳^{A)}、
千代 悦司^{B)}、福田 茂樹^{C)}、川村 真人^{C)}、穴見 昌三^{C)}

A) 株式会社 東芝 電子管・デバイス事業部
〒324-8550 栃木県大田原市下石上1385

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白根2-4

C) 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

概要

東芝は日本原子力研究所および高エネルギー加速器研究機構と共同で、大強度陽子加速器(J-PARC)^[1]線形加速器の高周波源として使用される324MHzロングパルスクライストロンの開発を行なっている。このクライストロンは最大出力電力3MW以上、変換効率55%以上(出力電力2.5MW)の性能と入出力特性で非常に高い安定性が必要である。現設計管の評価試験において、最大出力電力3.03MW、変換効率55.9%(出力電力2.53MW)で安定動作を達成した。現在同一設計にて2004年9月迄の累計で20式を生産中である。既に11式の製作を完了し、全てのクライストロンにおいて主要性能および入出力特性等の安定性は目標性能を満足している。

1. はじめに

324MHzロングパルスクライストロン(東芝名称: E3740A)はJ-PARC線形加速器の前段部である200MeVまでの低エネルギー部用の高周波源として合計20ソケットが使用される予定である。このクライストロンは最大出力電力3MW以上、変換効率55%以上(出力電力2.5MW)の性能と入出力特性で非常に高い安定性が必要である。動作周波数は324MHzと世界最低周波数のクライストロンであり、クライストロンとしてほぼ下限である。このため、集束コイル等を含めたクライストロン装置が超大型装置となることは不可避であり、クライストロンギャラリー建屋の最小化の観点から、東芝初の水平設置構造を採用した。更に、小型軽量化を徹底的に図ることにより、作業性向上、環境調和、コスト最小化を行った。今回、上記の目標性能および開発課題を全て満足するクライストロンの開発に成功したので、その設計および試験結果について報告する。

2. 開発設計

表1および表2に本クライストロンの主要目標性能値と一般定格をそれぞれ示す。

表1: 324MHzクライストロン主要目標性能値

動作周波数	MHz	324
ビーム電圧	kV	110以下
ビーム電流	A	60以下
出力電力(絶対最大定格)	MW	3以上
変換効率(2.5MW出力時)	%	55以上
飽和利得	dB	50以上
パルス幅(ビーム)	s	700
パルス幅(RF)	s	620
繰返周波数	pps	50

表2: 一般定格

RF出力導波管	WR2300
RF入力接栓	N型同軸接栓
設置方式	水平横置
ビーム集束	電磁石

2-1 電気設計^[2]

(1) 電子銃部

高電圧パルスは、RFシステム全体の最適化(コスト最小化等)の観点から、3極管構造のモデューティングアノード(MA)スイッチング方式を採用した。電極形状は、E-GUN^[3]による電子軌道のシミュレーションと、HSSSMおよびPOISSONによる電極表面での電界強度の計算により決定した。MAスイッチング方式のため、各電極間の耐電圧評価はビームパルスON、OFFの各状態で行い、CWクライストロンと同等以下の電界強度になるように電極形状を最適化した。またANSYSを用いて、動作時のホットディメンションから製作時のコールドディメンションを求め、製造設計に反映した。最も重要な要素技術部品であるカソードは、動作温度が低く、バリウムの蒸発量が少ない東芝製のMタイプカソード^[4]を採用し、耐電圧劣化防止と長寿命化を図った。電子銃部はクライストロンの製作に先立ち、ビームテスト管による要素技術評価を行い、問題ないことを確認した^[5]。

¹ E-mail: katsuhiko.tetsuka@toshiba.co.jp

(2)高周波相互作用部(空洞部)

動作周波数が低くなると高周波相互作用部は、一般的に管軸方向に長くなる。そこで、本クライストロンでは空洞数を5空洞とし、中間空洞に第2高調波空洞を採用して全長の短縮と、同時に変換効率の向上を図った。尚、各空洞の配置や磁場形状、離調周波数等のパラメータはFCI^[6]、HFSS、SUPERFISHを使用して最適化した。

(3)出力回路

出力空洞からの高周波出力は、同軸構造で行い、出力窓は、508MHz/1.2MW CWクライストロン(東芝名称：E3732)で耐電力性能に実績のある円盤型のアルミセラミックを用いた同軸高周波窓を採用した。更に、整合構造を従来のチョークタイプからテーパタイプへ変更することによりセラミック表面での低電界化を実現している。またセラミック表面にはTiN膜をコーティングしてマルチパクタを防止した。出力窓もクライストロンの製作に先立ち、要素技術評価を行い、動作周波数の324MHzとは異なるが透過周波数432MHzにおいて透過電力2MWでの耐電力性の健全性をあらかじめ確認した^{[7][8]}。最終的に、出力電力は同軸からWR2300導波管へ変換して取出している。変換部には、ドアノブ構造に比べ構造が比較的簡単で製作が容易なTバー構造を採用した。シミュレーションはHFSSを使用し、VSWR等の周波数特性が最適値になる様に設計した。

2-2 機械設計

本クライストロン装置の外観写真を図1に示す。全長は約5m、重量は約3.2tである。既述の通り、本クライストロン装置は、東芝初の水平設置方式を採用している。水平設置構造の採用に対しては、クライストロン装置の大型化、重量化、組立や運搬の作業性悪化、引いては環境側面の悪化やコスト上昇等が懸念され、いかに小型軽量化を図れるかが大きな

課題であった。クライストロンは徹底した小型軽量化により、従来同等管比約65%減、集束コイル・オイルタンク・架台等のアクセサリ合計は同約60%減を実現した。またクライストロン装置としてアクセサリを一体化することにより、クライストロンギャラリーへの設置作業の簡易化を可能とした。オイルタンク部はブリーザによる絶縁油の熱膨張収縮対応構造から密閉化を図った。これにより、絶縁油の劣化防止と安全性の向上を可能とした。

2-3 開発途上時に発生した課題と対策

初期試作管では、コレクタからの反射電子による発振不安定が発生した。これはドリフト管の直径に対し、コレクタ入力熱負荷に耐えられる最小サイズのコレクタを搭載したため、コレクタからの反射電子が桁違いに増大しことに起因している。反射電子量を解析し^{[9][10]}、適正量以下になるようにコレクタを大型化した。更に、磁界分布、空洞部のパラメータの最適化を図ることにより、発振を抑制して安定動作を可能とした。

3 . 試験結果

以上の設計や対策を反映して製作した本クライストロン装置の動作試験結果を以下に示す。全て定格デューティで試験を実施している。図2は、ビーム電圧と変換効率、出力電力および、利得の関係である。図3は、ビーム電圧110kVおよび104kVにおける入出力特性を示す。110kVでは最大出力3.03MWを達成し、またビーム電圧104kVで出力電力2.53MW、変換効率55.9%を達成した。図4は、出力電力等のパルス波形である。入出力特性は滑らかで、出力パルス波形も良好な波形であること等から、不安定現象はなく、動作は極めて安定であることが分かる。尚、表3は動作性能をまとめたものである。

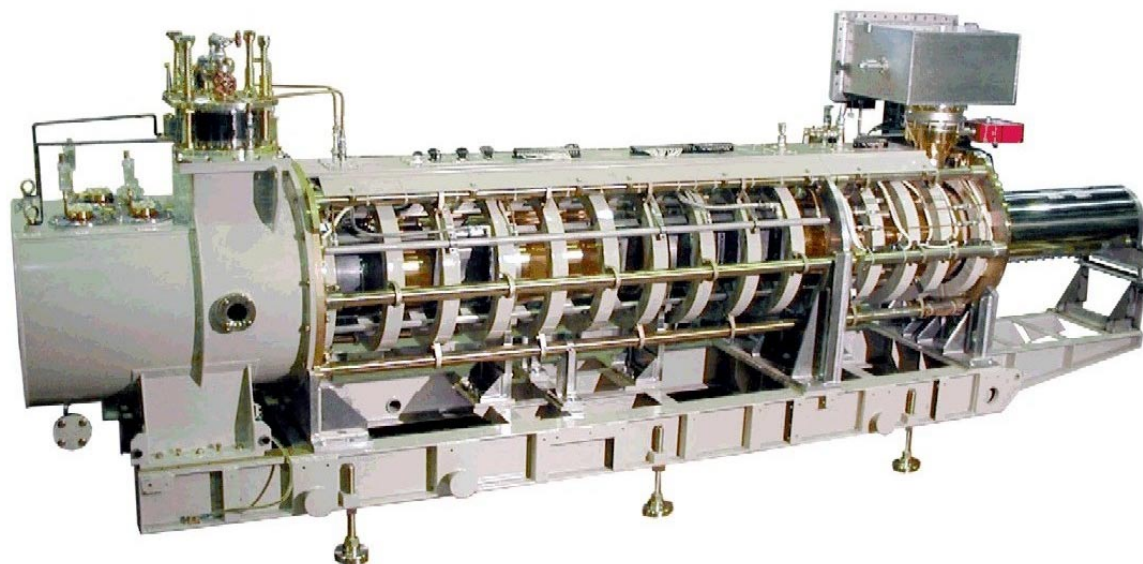


図1：324MHzクライストロン外観写真

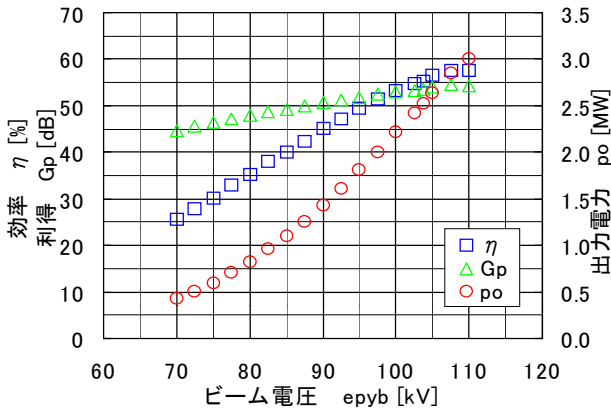


図2：ビーム電圧に対する飽和特性

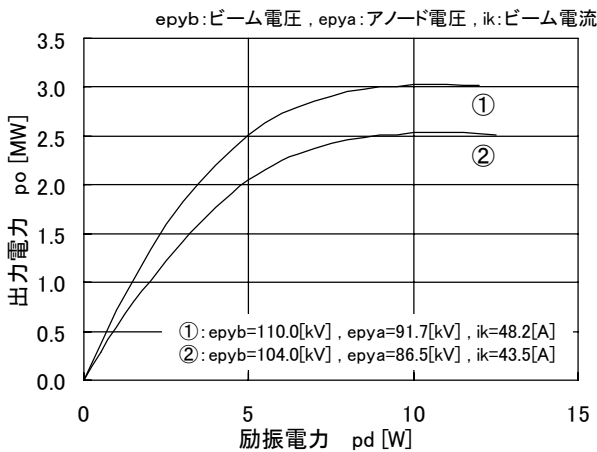


図3：入出力特性

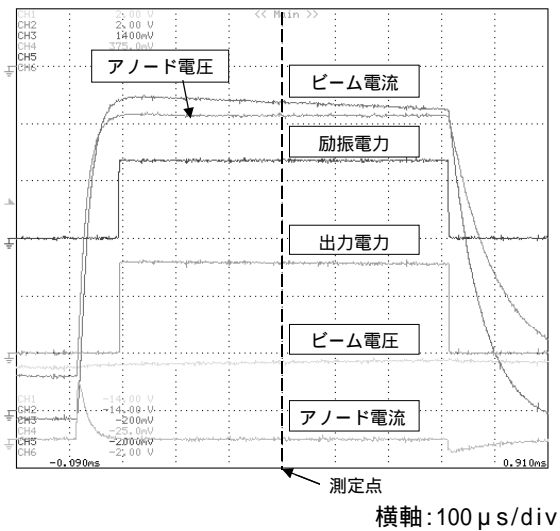


図4：各種波形(2.53MW出力時)

表3：E3740A動作例

		動作例1	動作例2
動作周波数	MHz	324	324
ビーム電圧	kV	110	104
ビーム電流	A	48.2	43.5
出力電力	MW	3.03	2.53
変換効率	%	57.3	55.9
飽和利得	dB	56.3	53.9
パルス幅(ビーム)	s	700	700
パルス幅(RF)	s	620	620
繰返周波数	pps	50	50

4. まとめ

324MHzパルスクライストロンは、評価試験において定格最大デューティで最大出力3.03MWを達成した。また出力電力2.53MW時に変換効率55.9%と目標性能を満足する結果を得た。現在同一設計にて2004年9月迄の累計で20式を生産中である。既に11式の製作を完了し、全てのクライストロンにおいて主要性能および入出力特性等の安定性は目標性能を満足している。

今後、出力窓およびTバー部の冷却方式を現在の空冷方式からメンテナンスフリーのヒートパイプ方式に変更して更なる改良を図る。また今回の開発実績をもとに、J-PARC線形加速器用972MHzクライストロンの開発を進める。

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] A. Yano et al., "Development of the Klystrons for the High Intensity Proton Accelerator Facility", Proc. of EPAC 2002, Paris, France, pp.2323-2325
- [3] W. B. Herrmannsfeldt, SLAC-PUB-0331, 1988
- [4] S. Kimura et al., "Long-Life High-Reliability Ir-Coated Dispenser Cathode", IEDM, 1987
- [5] M. Kawamura et al, Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999), pp.200-202
- [6] T. Shintake, KEK Report 90-3, May 1990
- [7] S. Fukuda et al. Proc. of the First Asian Part. Acc. Conf.(1998), pp.112-114
- [8] M. Kawamura et al., Proc. of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan (1998), pp.246-248
- [9] Z. Fang and S. Fukuda, "Instability Caused by Backstreaming Electrons in Klystron", Proc. of APAC2001, Beijing, China
- [10] Z. Fang et al., "Investigation of Spurious Oscillation in Klystron Due to Back-going Electron from Collector", Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan 2000, pp.216-218