

[P7-23]

Evaluation of Operating Characteristics of IOT RF Source

E. Chishiro, J. Sawada*, H. Takado**, J. Kusano and M. Mizumoto

Japan Atomic Energy Research Institute

*Sumitomo Heavy Industries Ltd., **Mitsubishi Electric Corp.

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan

ABSTRACT

We have evaluated the characteristics of the RF source using an Inductive Output Tube (IOT). The RF source will be utilized for pulse-driving test of the superconducting cavity. The RF source has the specification of 35 kW-CW output at the 600MHz. A circulator has been designed to protect the IOT against the continuous reflected power of 35kW. In this report, we describe the RF source and its characteristics such as the input-output, the input-efficiency characteristics, the optimum operating conditions, the output power stability and dependence of circulator phase shift on temperature.

IOT 高周波源の動作特性評価

1. はじめに

KEK と原研では、JHF 計画と中性子科学研究計画との統合計画を進めている¹⁾。本計画では、高エネルギーリニアック部に超伝導加速器の採用を計画している。超伝導空洞は、厚さ数 mm のニオブ材から多連セルを形成するため薄肉構造（ベローズ形状）となっている²⁾。このため空洞は、空洞内電磁場の応力により変形し、空洞の共振周波数は壁面振動により変動する³⁾。また、壁損失が殆ど無いため、空洞に必要とされる高周波 (RF) 電力はビームローディングにより決定され、また、加速電場はビーム電流の変動に大きく影響される。更に、空洞バンド幅は狭く、フィリングタイムも長い。超伝導空洞用 RF 源は、これらの影響により要求される RF 電力が個々の空洞で異なり、そして、加速電場制御のため多くの出力余裕（ゲイン）を必要とする⁴⁾。このため、定常運転時には増幅管の定格出力（最大出力）より大幅に低い動作点で運転する RF 源もあり、低出力領域で効率よく運転できる RF 源が必要となる。また、空洞からの大電力反射波に耐え得る必要もある。

本レポートでは、これら特徴を斟酌した超伝導空洞駆動用 IOT-RF 源 (600MHz、35kW 連続出力) のシステムとその動作特性について報告する。

2. IOT の構造と動作原理

図 1 は、IOT の概略図を示す。IOT は、入力回路（陰極、コントロールグリッド）にグリッド管（三極管）の特徴を持ち、出力回路（出力空洞、コレクター）にビーム管（クライストロン）の特徴を持つ。出力回路にグリッド電極が含まれないため電極発熱による出力制限がなく、UHF 帯域でも高効率で動作できる。グリッドは、陰

極に対し負電位にバイアスされており、IOT はクラス AB の動作特性を持つ三極管の働きを示す。このため励振入力のない時、ビーム電流が低く抑えられ損失が少ない。励振入力が大きくなると、密度変調を受けた電子ビームがグリッドより引き出される。グリッド・陽極間のドリフト空間には収束磁場が印加されており、電子ビームはこの空間でバンチされ、陽極に設けられた穴を通じて出力空洞に入り込む。バンチされた電子は、クライストロンと同様に出力空洞に高周波電界を誘起し、RF 電力増幅を行う。IOT は、クライストロンのように多段の空洞がないため小型である。現在、UHF 帯域 (470~860MHz) で 40kW 級の CW 運転可能な IOT が、テレビ放送用増幅管として数社から量産されている。

3. IOT 高周波源

表 1 は、本 RF 源の基本仕様を記し、図 2 にその写真を示す。本 RF 源は、直流電源、ドライバーアンプ、IOT 増幅器、サーキュレータ、ローレベルコントローラから構成される。サーキュレータは、35 kW 連続全反射に耐え得るよう設計されている。IOT 増幅器は、IOT と入力出力空洞を構成するキャビティからなり、IOT は、

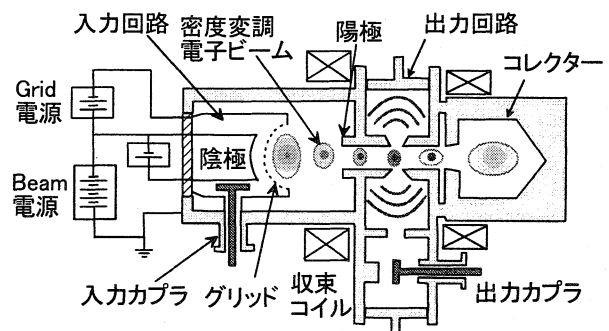


図 1 IOT の概略図

表 1 IOT - RF 源の基本仕様

周波数	600 MHz
最大出力	35kW 以上 (連続運転)
最大負荷 VSWR	無限大 (全反射)
パルス出力仕様	パルス幅 10 μ s ~5ms 繰り返し率 5~100Hz
出力安定度	+/- 0.5%以下
位相安定度	+/- 1 度以下

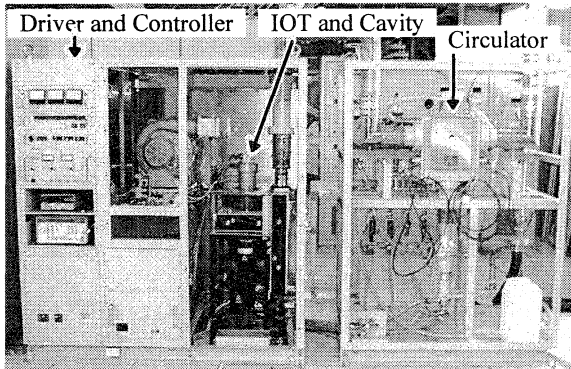


図 2 IOT - RF 源 (600MHz 35kW CW)

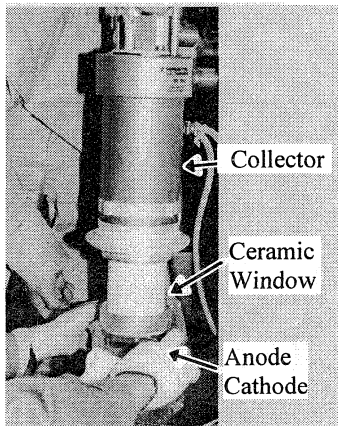


図 3 IOT (TH7860) 全景写真

THOMSON 社製 TH760 (最大出力 パルス 66 kW、CW44 kW) で、キャビティは、同社製 TH18760 (動作周波数範囲 470 - 820MHz) である。IOT の管長は 554mm で、重量は 21 kg である (図 3)。IOT のキャビティへの据付は、手作業により 1 人ないし 2 人で行うことができ、作業に要する時間は 30 分程度である。

4. IOT 動作特性

4-1 IOT 入出力特性

パルス運転 (パルス幅 1ms、繰り返し数 10Hz) で IOT 動作特性を測定した。図 4 は、入力電力に対する出力電力および効率特性を示す。ビーム電圧およびグリッド電圧 (陰極に対するグリッド電位) はそれぞれ、28kV、-

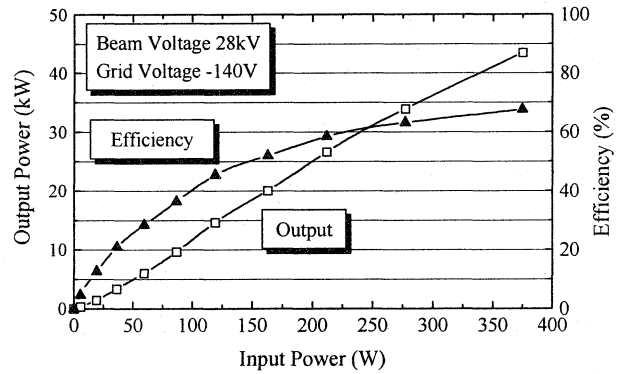


図 4 IOT 入出力・効率特性

140V である。効率は、直流電力 (ビーム電圧×ビーム電流) と出力電力から求めた。出力は入力に対して線形的に増加し、ゲインは 100~375W の入力範囲で 21.5 dB である。効率特性には飽和傾向があり、最大入力で 68% の効率が得られた。また、150W 付近の入力では、約 50% の動作効率を得た。このように、IOT の効率特性は、クライストロンと異なり入力が低下しても直線的に低下しない。

4-2 IOT-RF 源の最適動作電圧

ビーム電圧 (20~30 kV、2 kV step)、グリッド電圧 (-50~-170 V、10 V step) をパラメータとして最大入力 375 W の範囲で、出力に対して最も効率良く動作する電圧条件を調べた (図 5 (a),(b))。低出力領域で動作させる場合、ビーム電圧を下げ、ビーム電流を減少することで高効率 (15kW 出力時でビーム電圧 20 kV、動作効率 58%) が得られた。この時、ゲインは 19~20 dB まで減少した。グリッド電圧は、-110V~-140V の範囲で高効率となる設定値があるが、ビーム電圧ほど効率特性に及ぼす顕著な影響は見られなかった。

4-3 長時間運転での IOT 出力の安定性

ダミーロードを負荷とした連続運転において、IOT 出力にフィードバック制御を施し、サーキュレータを除くシステムの長時間運転時 (270 分間) の安定性を測定した。運転中の冷却水温 (入り) の変動は 20.3 +/- 0.1°C であった。図 6 は、IOT 出力 33.7kW での運転時間に対する出力電力、位相の変動を示す。IOT の出力・位相はそれぞれ +/- 0.33%、+/- 0.11 度の範囲で変動した。これらの値は基本仕様を満足し、安定に動作することを確認した。

4-4 外気温に対するサーキュレータ位相差の特性

上記特性は、サーキュレータを恒温槽に入れる代わりにサーキュレータ全体を断熱材で覆い、長時間 (6 時間) にわたり徐々に表面温度を上昇させることにより行った。

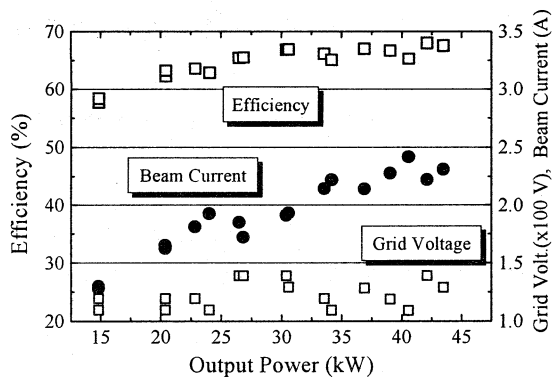


図 5 (a) IOT 出力に対する高効率で動作する電圧条件での効率、ビーム電流及びグリッド電圧

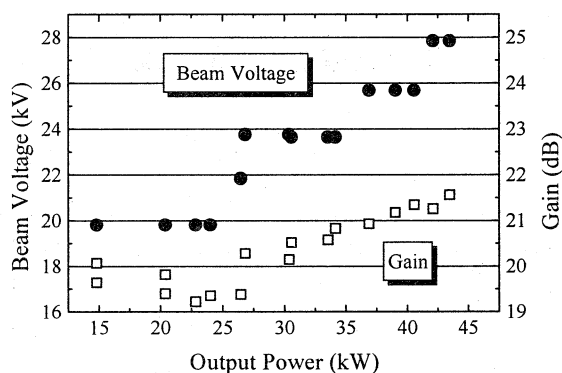


図 5 (b) IOT 出力に対する高効率で動作する電圧条件でのビーム電圧とゲイン

IOT 出力は、20kW 連続であり、サーキュレータ冷却水(入り)の温度変動は $20.3 \pm 0.1^\circ\text{C}$ である。図 7 は、表面温度に対する位相差変化を示す。温度の上昇とともに位相が変化し、その傾きは 0.42 度/ $^\circ\text{C}$ であった。位相を一定とするためには、サーキュレータ周辺気温も温調する必要がある。

最後に、サーキュレータ出力端を短絡状態とし全反射状態で 240 分の連続運転を行った。その結果、サーキュレータに異常が顕われず、健全に動作することを確認した。

5. まとめ

IOT の入出力特性は線形性が良く、ビーム電圧 28kV、グリッド電圧-140V で $100 \sim 375\text{W}$ の入力に対してゲインは 21.5dB であった。入力に対する効率特性は、クライストロンのように直線的に変化せず飽和傾向をもち、低出力領域まで高効率を維持する(上記条件で 20kW 出力で 50%)。また、低出力領域で高効率動作するための電圧条

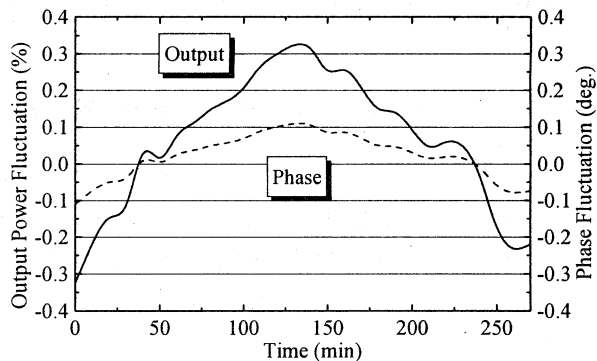


図 6 長時間運転における IOT 出力の電力と位相の安定性

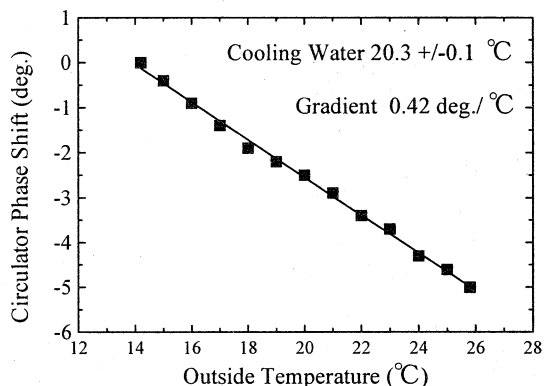


図 7 外気温度(表面温度)に対するサーキュレータ入出力端位相差の特性

件を求めた。ビーム電圧を下げることにより、効率低下が改善できるが、ゲインも低下した。長時間運転を行い、サーキュレータを除くシステム全体の安定性を測定し、出力電力で $\pm 0.33\%$ 、位相で ± 0.11 度の安定性を得た。また、サーキュレータの周辺温度(表面温度)が 1 度変化すると入出力間の位相が 0.42 度変化することが観測された。全反射連続運転を行い、サーキュレータの健全性を確認した。

参考文献

- [1] M. Mizumoto et al., these proceedings.
- [2] N. Ouchi et al., "Development of Superconducting Cavities for High Intensity Proton Accelerator at JAERI", Proc. of the ASC-98, Palm Desert, USA (1998) to be published.
- [3] K. Mukugi et al., "Structural Analysis and Simulation of Superconducting Cavities for High Intensity Proton Linac", Proc. of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, (1998) p301-303.
- [4] 千代ら "原研中性子科学研究計画における大強度陽子加速器用高周波源の概念設計", JAERI-Tech 99-020 (1999).