

21-P7

RF system for the BTA

Y.TOUCHI,* M.MIZUMOTO, K.OHTOMO, Y.FUKUMOTO,
K.HOSHIKA, S.TATUMI, Y.KUMATA, H.MURATA, *N.ITO

Sumitomo Heavy Industries, LTD
niihama ehime 792 JAPAN

* Japan Atomic Energy Research Institute
tokai ibaraki 391-11 JAPAN

Abstract

A high power RF system for the linear accelerator of the Basic Technology Accelerator(BTA) was developed. This RF system is designed to generate 1.0MW peak power (pulse width is 1.2ms and repetition rate is 100Hz) at 201.25MHz. A tetrode of EIMAC 4CM2,500KG is used for the final amplifier. Both the input and the output circuits are 3/4 wave length coaxial cavity. The power of 1MW at 0.5% duty and 850kW at 12% duty was obtained in high power test combined with a dummy load. Combining the RF system with a RFQ linac, 2MeV proton beam of 50mA peak current was accelerated successfully.

原研 B T A 用 R F システム

1. はじめに

原研 OMEGA プロジェクトの第一ステップとして BTA (10 MeV, 100 mA) の R & D が実行中である。BTA はイオン源, RFQ ライナックと 2 台のアルバラライナックで構成される。図 1 に BTA の RF システムのブロック図を示す。大電流ビーム加速では、加速途中のビームロスが加速管の放射化や機器の熱的破損等の深刻な問題を引き起こす。十分な透過効率を得るためには加速電圧安定度 0.1%, 位相安定度 $\pm 1^\circ$ を維持する必要がある。以下に大電流ビーム加速に対応した RF システムについて報告すると共に、イオン源と RFQ を接続した 2 MeV, 50 mA のプロトン加速に成功したのでその結果も合わせて報告する。

2. 大電力増幅器

BTA の RF 系は、トランジスタアンプと 2 段の真空管アンプから構成される。ここでは、出力 1 MW の終段増幅器 (HPA) についてのみ報告する。

HPA は、201.25 MHz という高い周波数でピーク 1 MW, デューティ 12%, を出力する必要がある。この仕様を満し得る最も可能性の高い真空管として EIMAC の 4CM2500KG を選んだ。4CM2500KG は原研の核融合装置 JT-60 の終段増幅器を使用し 130 MHz ではあるが 1.7 MW を 5.4 秒間出力した実績が有る [1]。しかしながら BTA での使用条件では、周波数が増加した分、真空管に負担がかかってしまう。大電力真空管の場合スクリーングリッド電極が高周波電流により熱せられ、これに起因する管内真空度の悪化、ひいては真空封じ部の破損が発生することで使用限界値が規定されてしまう。この発熱は周波数の 2.5 乗に比例する。このような事態が発生しないよう、スクリーングリッド電極の電流分布を計算し、4CM2500KG の動作を EIMAC の技術者と共に決定した。表 1 に 4CM2500KG の動作について、設計値と実際のテストでの結果を示す。表の上が設計値、下がテスト結果である。

表 1 4CM2500KG の動作パラメータ

	E_p kV	I_p A	E_{g2} kV	I_{g2} A	E_{g1} V	I_{g1} A	P_{out} kW	GAIN dB
設計値	18	89	1.1	1.3	400	3.4	1000	13.7
実測値	18	92	1.2	3.6	350	3.4	997	12.6

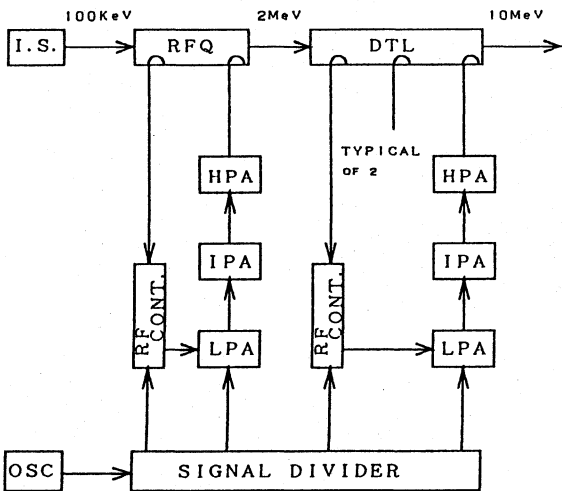


図 1 BTA RF システム

850 kW, 12% デューティでの運転下で4 CM2500 KG内の真空度は規定値 (3×10^{-5} Torr) より十分に良い 2×10^{-7} Torrであった。

外板を外した状態のHPA外観を図2に示す。HPAはグリッド接地型で、入力回路、出力回路共に $3/4$ 波の同軸管共振空洞で構成される。真空管は、メンテナンス性を考え回路の上部に設置することにした。この他にプレートからカソードへのフィードバックを抑えるためにG1-G2回路も設けている。以下に出力回路、G1-G2回路について記述する。

出力回路の電場分布を計算した結果、電場は内筒のコーナー部で最大になる事が分かった。そのため、コーナーの径をできる限り大きくとることにした。4 CM2500 KGをプレートスウィング電圧14 kVで動作させた場合その値は約0.6 MV/mになる。4 CM2500 KGはJT-60のンプを使用したテストで約1 GHzの寄生発振が報告されている。通常、発振止めにはフェライトが使用される。しかしながらBTAの場合、周波数が高く電力も大きいためフェライトの使用が困難である。BTA用HPAでは基本モード以外の共振が起こりやすいようにショート板と天板に細長いスリ割りを入れ発振が抑えられないかを試してみた。テストの結果は、フェライトやエレマ抵抗等の吸収体を使用しなくても発振は起こらず、また出力のスペクトラムでも2倍、3倍の高調波はほとんど確認されず4倍波、5倍波がそれぞれ-25 dB程度確認されたのみであった。

真空管を安定に動作させるためには、G1-G2回路が必要である。G1-G2回路はプレート電極からカソード電極へのフィードバック量を最小にするのに必要な回路である。G1-G2回路のショート板を移動させ、入出力回路間のアイソレーションを測定した結果、アイソレーションの値が、-40 dB~-20 dBに変化する事が確認できた。アイソレーションが最大の位置にショート板を設置し、パワーテストで安定な動作が確認できた。

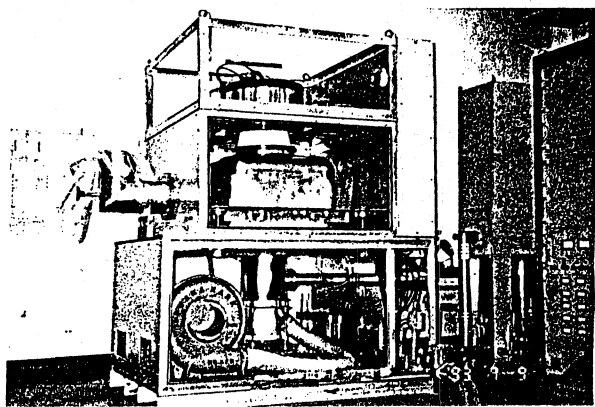


図2 HPA外観

3. RF制御回路

RFQでのビームローディングは、約200 kW (2 MeV, 100 mA) でありDTLの場合RF系1系統からみたビームローディングは、約400 kW (4 MeV, 100 mA) にも達する。十分な透過効率を得るため、RFコントロールシステムには、このような大きなビームローディングが有るにもかかわらず電圧安定度0.1%、位相安定度 $\pm 1^\circ$ が要求される。BTA用RFコントロールシステムには、通常のフィードバック制御回路の他に、フィードフォワード制御回路を準備した。図3に概略図を示す。

RFコントロールシステムは、位相制御、電圧制御、自動同調回路から構成される。

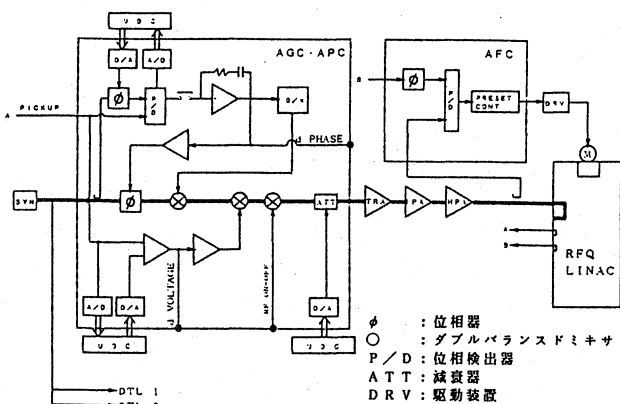


図3 RF制御回路

4. パワーテスト

ダミーロード負荷でのHPAパワーテストでピーク1 MW, デューティ0.5%, とピーク850 kW, デューティ12%の安定な出力が確認できた。設計値は1 MW, 12%であるが、運転開始後約20分で出力回路内の放電が起こるため、設計値を達成できていない。原因調査を行ったが、原因を決定できなかった。現状では問題ないがDTL用HPA (1 MW, 20%) の設計時には何らかの対策が必要である。

RFQへのパワー導入は加速電圧を発生させるのに十分な380 kW, デューティ12%が達成できた。しかしながら、当初RFカプラ部でのマルチパクタリングでセラミックを破損した。原因は真空封じのために使用したコパールと内導体の位置関係が200 MHzで最もマルチパクタリング放電を起こし易い状態 ($F \text{ MHz} \times L \text{ cm} = 140$) にあったからである[2]。図4にRFQライナックを、図5にRFカプラの構造を示す。現在は、コパールは使用せずオリングで真空封じを行っている。改良したRFカプラを使用することで安定なパワー導入が可能になった。

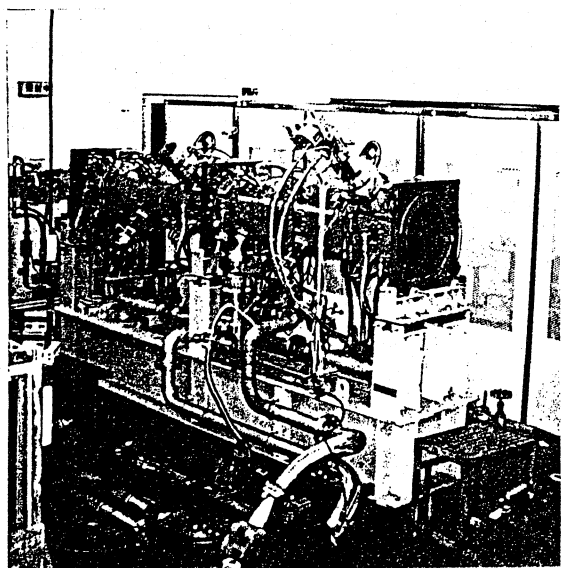


図4 RFQライナック

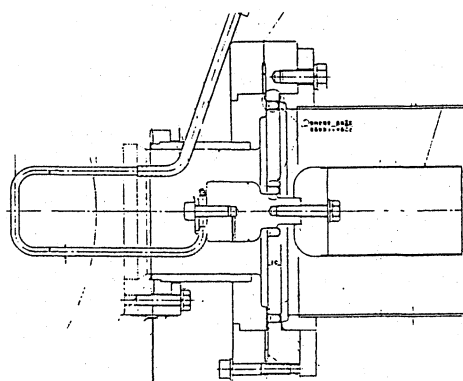


図5 RFカプラ (初期型)

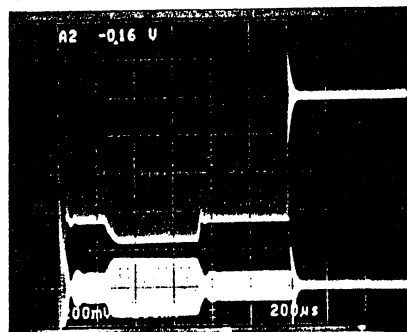
5. ビームテスト

イオン源、RFQを接続してのビーム加速試験を行った。この試験を通してRF制御回路の動作確認と、ビームローディングがHPAに及ぼす影響について調べた。ビームは52 mAのプロトンビームである。図6-1にビーム幅500 μ s時のHPA進行波・反射波、図6-2に電圧誤差信号と位相誤差信号を示す。ビーム電流値は設計値の半分ではあるがビームローディングがHPAの動作に影響することはなかった。ビーム通過時反射電力が増加しているが、これはRFQの枯らし時にカプラを調整し、そのままの状態でのビーム加速試験を行ったからである。

今回の試験ではフィードフォワード回路は使用していない。電圧安定度、位相安定度共にそれぞれビーム通過から50 μ s、150 μ s以内に制御が完了している。先にも述べたように大電流の加速の場合、放射化の問題等の理由でビームロス可能な限り少なくする必要がある。今後ビーム通過の初期の部分 (~150 μ s) の安定化のテスト、つまりフィードフォワード回路のテストを行う必要がある。このテストは今年8月から原研東海でおこなう予定である。

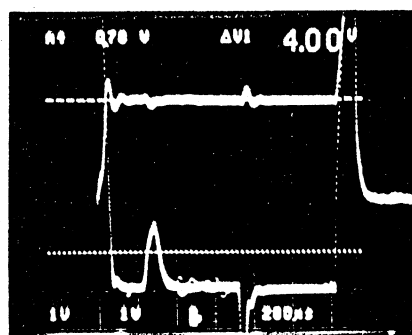
6. まとめ

BTA用のRFシステムで問題になると思われた、201.25 MHzで1 MW出力の高周波増幅器とビームローディングを考慮したRF制御回路それぞれについて実現の目処がついた。今後HPAについては出力回路内の放電対策、RF制御回路についてはフィードフォワード回路の動作確認を行う予定である。



上; 進行波 下; 反射波
(ビームロード約 95 kW)

図6-1 HPA出力波形



上; 電圧誤差 下; 位相誤差
(1% / div, 3° / div)

図6-2 電圧誤差・位相誤差

参考文献

- [1] C.M. LORING Author, "RESULTS OF TESTS OF THE X2274 HIGH POWER TETRODE IN A J T-60 110 TO 130 MHz ICRH AMPLIFIER"
- [2] 熊谷 "加速器"