

原研 972MHz RF テストスタンドの現状

山崎正義¹、千代悦司、菅沼和明、小林鉄也、堀利彦、鈴木浩幸、長谷川和男、吉川博
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

概要

原研 972MHz RF テストスタンドは、2001 年 9 月より陽子加速器開発棟で 972MHz クライストロン（初号機）を含めた RF コンポーネントの大電力試験などを開始した。各種特性試験（高周波特性試験、出力電力のカロリメトリック測定、励振系の自動振幅制御回路の試験など）にてデータ取得を行い、そして本年 2 月より超伝導空洞用の長パルス化試験調整を行ってカプラエージングに必要な出力パラメータ（パルス幅 2.5ms 出力 350kW）が得られた。

1. はじめに

大強度陽子加速器施設の線形加速器では、2 種類の高周波源（324MHz、972MHz）を使用する。高エネルギー加速部（190～400MeV に常伝導 ACS 空洞、400～600MeV に超伝導空洞）では、周波数 972MHz のモジュレーティング・アノード（M・アノード）型パルスクライストロン^[1]を高周波源として使用する。972MHz で使用する RF コンポーネントの大電力試験、直流高圧電源等の性能を評価するため 972MHz RF テストスタンドを 2001 年 8 月に陽子加速器開発棟（B2F）に設置した。本報告では、972MHz RF テストスタンド構成機器について述べ、これまで行ってきた各種動作特性試験の概要、そして長パルス化試験調整の結果について報告する。

2. 972MHz RF テストスタンドの構成

RF テストスタンドは、定格出力（3MW(max)、600 μ s(RF 出力)、50pps）の高周波源を評価するものである。図 1 に RF テストスタンドのブロック図を示す。1) クライストロン駆動用直流高圧電源^[2]

直流高圧電源は、実機で使用するクライストロン 4 台を駆動できるものであり、カソード直流高圧電源（平均出力-110kV、6.3A）と M・アノード変調器および電源制御盤から構成される。M・アノード変調器は、FET 素子を用いた高圧半導体スイッチ^[3]を採用している。現在のところ運転時間は 800 時間程度であるが順調に稼働している。

2) クライストロン部

クライストロン部は、クライストロン本体、集束コイル、オイルバスから構成される。972MHz クライストロンは、3 極管構造でボディ - カソード間には最大-110kV(DC)が印加され、他方 M・アノード電極に-90kV ($\pm 10\%$ の電圧タップ切替可能)、パルス幅 600 μ s、最大パルス繰返し数 50pps のパルス電圧が印加される。クライストロンは、RF 出力 3MW、パービアンス：1.37 μ Perv. が選定され電源構成や電子銃など 324MHz との共有化が図れた。出力窓は、ピルボックス型（セラミックス窓の直径 30cm）を採用した。

3) 高周波伝送系

大電力試験のための高周波伝送系には、WR-975 の各種部品（方向性結合器、3 スタブ移相器、ダミーロード、E ベンド、フレキシブル導波管など）が用いられている。RF 励振系のローレベル制御は、A.G.C（Automatic Gain Control）回路を含め原研で作製した。今後 324MHz で開発が進められている高周波制御系

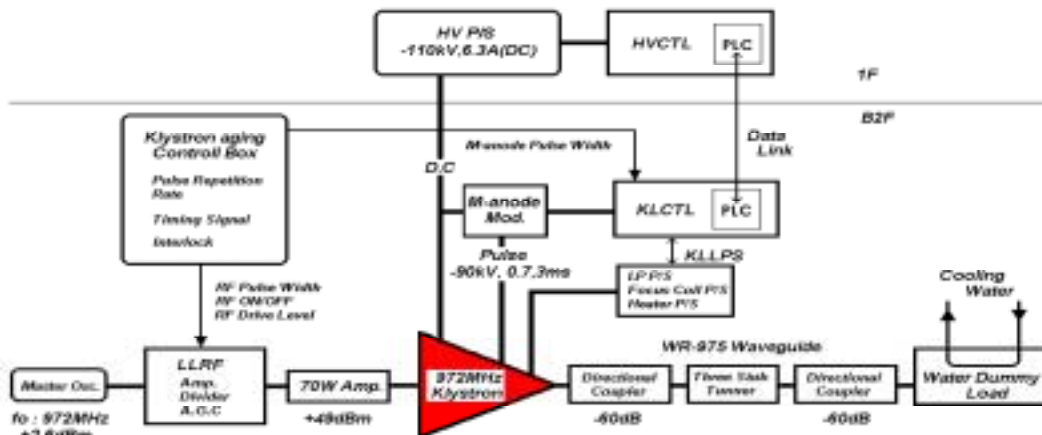


図 1 RF テストスタンドブロック図

¹ E-mail: yamazaki@linac.tokai.jaeri.go.jp

の高速コンポーネントシステム^[4]を 972MHz に置き換えたものを評価する予定である。

4) 冷却水系

クライストロン各部分(コレクタ、ボディ、集束コイル、RF出力窓)の冷却やダミーロード及びM・アノード変調器の冷却に水冷を使用する。冷却水の温度は、個別温調ヒータを使用し 27 ± 0.1 の精度でコントロールされる。また、温度は 25 ~ 29 の範囲で任意に設定可能であり、精度は ± 0.1 である。

5) エージング制御盤

パルス幅、パルスの繰返し、RFレベル、その他各種タイミング信号等を総合的に取り扱うエージング制御盤を新たに作製した。エージング制御盤にて各種インターロックによる表示・停止制御等を行っている。

表1に現在までにRFテストスタンドで実施した主な試験と結果について示す。

表1: RFテストスタンドでの主な試験内容

- ・972MHz クライストロンの管内エージング
10pps, 100us, 低電力から徐々にカソード電圧を上昇し、最大出力まで5日で完了した。
- ・972MHz クライストロンのRF特性試験
クライストロンパービアンス、ゲイン、効率測定、並びに入出力電力特性と周波数特性測定など。
- ・クライストロン出力のカロリメトリック法による絶対値測定
方向性結合器 + 検波器での計測データと比較してカロリメトリック法が約 1.5% 高い値で計測された。高精度の流量計 (F.S: $\pm 0.02\%$) を調達し、今年度も継続して行う。
- ・WR-975 導波管の表面温度測定
実機での導波管壁冷却の基礎データとして計測を行なう。冷却水なしで表面上昇温度の最大値は 43 。
- ・クライストロン出力 RF 窓の温度上昇試験
出力 RF 窓はピルボックス型で、窓外周部を間接冷却方式 (4L/min) をしている。測定の結果、窓中心部の最大温度は 60.8 で、間接冷却方式でも十分に熱除去が可能なデータが得られた。
- ・実機 972MHz 系クライストロンギャラリー配置のための立体回路と架台の設計、評価
- ・長パルス幅動作パラメータ試験

3. 長パルス化試験調整

3.1 デューティの制限

本RFテストスタンドは、常伝導ACS空洞用の高周波源(高パワー、低デューティ)であるが、超伝導空洞の試験(低パワー、高デューティ)に本テストスタンドを利用することを計画している。そこで、

7月に予定している超伝導空洞用カプラ試験を前にパルス幅 2.5ms, RF出力 350kWの動作パラメータを取得した。パルス幅及び繰返しを制限する要因としてクライストロンのコレクタ損失など各コンポーネントの最大定格を調査したところ M・アノード変調器の分圧抵抗の電力容量がデューティを制限していることがわかった。そこで要求を達成するため、ビーム電圧を下げ、350kWで安定に動作するパラメータを選定した。また、M・アノード変調器筐体内の絶縁油温度を監視しながら動作確認を行った。その結果、カソード電圧は 75kV、パルス繰返し数は 25ppsと決定した。

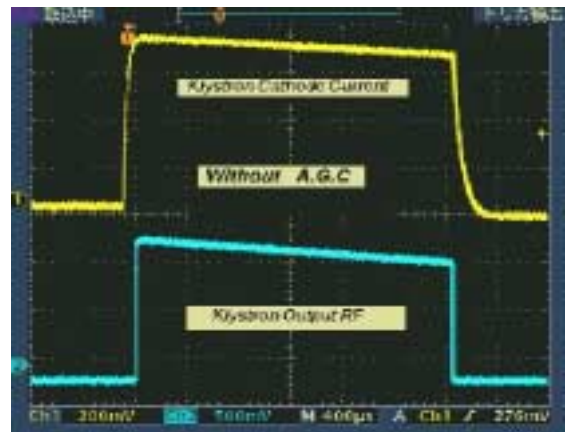


図2 A.G.C-OFF時のクライストロン動作波形
時間軸(400us/div)
(上) ビーム電流波形 (8A/div)
(下) 出力電力波形

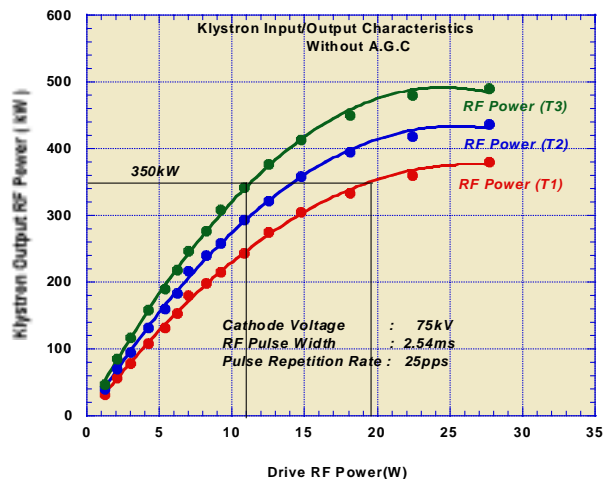


図3 クライストロン出力電力パルス内電力相違

3.2 長パルスのサグ評価

長パルス運転を行うとクライストロン出力のパルス平坦部でのサグ量が大きくなる。そこで、クライストロン出力サグを補償する A.G.C 回路を動作しない条件でサグ量を評価した。図2にこの条件で得られたクライストロンビーム電流波形とクライストロン出力電力波形を示す。ここでクライストロン出力波形のパルス立ち上がりでの出力を T3、パルス中央を T2、パルス立ち下りを T1 とし、この3点の RF 電

力をプロットしたものを図3に示す。図2、3よりサグの最大値は22.6%であり、この時の電力差は110kWであった。実測したカソード電圧、電流のサグから算出したクライストロン出力サグは10%（計算値）であり、実測データは約2倍も大きい結果であった。この相違に関しては現在検出中であるが電源側の原因ではなく、クライストロンのパルス内ゲインや効率が変化しているためと考えている。

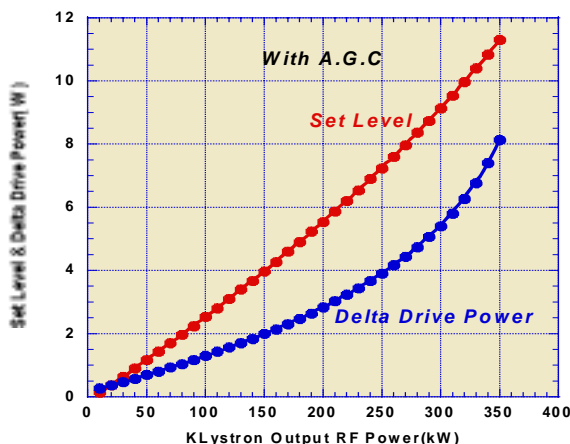


図4 クライストロン出力電力値と2パラメータ電力レベル(ドライブ電力、パルス内変化量)

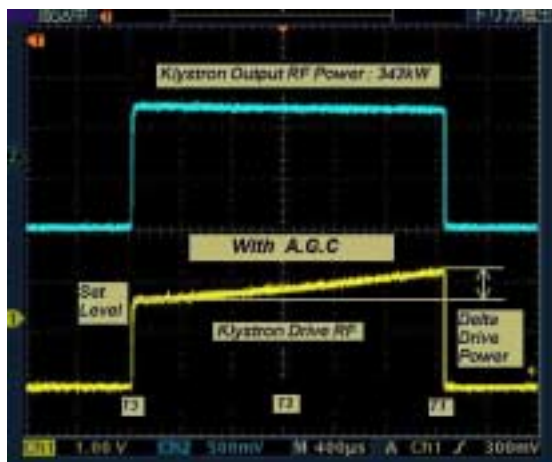


図5 A.G.C-ON時のクライストロン動作波形
時間軸(400us/div)

- (上) RF出力電力波形
- (下) RF入力電力波形

3.3 A.G.C 回路調整

A.G.C 回路は、入力信号レベルが変化しても出力信号レベルが一定になるよう、増幅器の利得を可変する回路である。ローレベル出力波形は、設定値(Set Level)とパルス内変化量(Delta Drive Power)との2つのパラメータで決定される波形である。例えば、図3において出力を350kW一定とすると設定値はT3時点のドライブ電力11Wであり、パルス内変化量はT1とT3の差のドライブ電力19.5W-11W=8.5Wで

ある。図4は、パルス幅2.5msでのクライストロン出力に対するドライブ電力設定値とパルス内変化量を示す。図4からA.G.Cの設定値の設定範囲は、0W~12Wであり、パルス内変化量も含めるとA.G.Cのダイナミックレンジは12W+8W=20W(43dBm)必要である。また、以上の結果からA.G.CのPINスイッチ及び後段アンプの応答性、ダイナミックレンジ並びにリニアリティに注意したコンポーネントの選択および調整を行いA.G.C制御ユニットを製作した。図5は、その結果を示す。クライストロン出力を一定にするためA.G.C回路によりドライブパワーは、パルス先頭から後部にかけて8W変化しており、良好な動作を確認した。

4. おわりに

972MHz RFテストスタンドは、当初の予定していた試験等を順調に実施している。クライストロンは、ガンオシレーション等の問題もあるが今後予定している次号機を含め各種の試験、検討を行う。今年度は以下の試験を予定しており、実機での運用・保守性の改善並びに全体制御系への統合に関して継続的に検討を行う予定である。

- ・サーキュレータ、空洞反射用ダミーロードの大電力試験
- ・超伝導カプラのエージング試験
- ・ACS空洞の大電力試験
- ・972MHzクライストロン次号機のRF特性試験

謝 辞

972MHzクライストロンの設置、調整、RF各種試験等に際して東芝ディスプレイ・部品材料社の坂本光徳氏、浦方弘人氏に御努力頂きました。また、直流高圧電源の調整と運転に関しては日立製作所の久保宏氏、市川雄一氏に御協力頂きました。

最後になりましたが、本RFテストスタンドの設計や製作に関して御教授、御指導を頂いた高エネルギー加速器研究機構の穴見昌三氏、福田茂樹氏、小野正明氏、山口誠哉氏、川村真人氏、福井佑治氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] A.Yano, et al., "Development of the Klystrons for the High Intensity Proton Accelerator Facility", Proc. of the APAC 2001, Beijing, China, pp.44-pp.48
- [2] 川村真人 他," KEK-JAERI 統合加速器計画リアック用クライストロン電源システムの開発 ", Proc. of the 26TH Linear Accelerator Meeting in Japan, 2001, Tsukuba, Japan, pp204-206
- [3] T.Nakamura et al., "HIGH VOLTAGE TRANSISTOR SWITCH FOR KLYSTRON MODULATING ANODE MODULATOR", Proc. of the 25TH Linear Accelerator Meeting in Japan, 2000, Himeji, Japan, pp219-221
- [4] 道園信一郎 他," KEK-JAERI 大強度陽子加速器リアック高周波源のデジタルフィードバックシステム ", Proc. of the 26TH Linear Accelerator Meeting in Japan, 2001, Tsukuba, Japan, pp85-87