

原研 972MHzRF テストスタンドの安定動作 R&D 試験

堀 利彦^{A)}、千代悦司^{A)}、山崎正義^{A)}、鈴木浩幸^{A)}、長谷川和男^{A)}

^{A)}日本原子力研究所東海研究所 大強度陽子加速器施設開発センター

概要

原研 972MHzRF テストスタンドは実機に向けた RF コンポーネントの開発・評価試験を行うと共に、超伝導空洞用のカプラー開発試験にも RF を提供しているが、この試験中に高圧停止インターロックが多発し、これを改善することが急務であった。インターロック発生原因を調査したところ、高圧停止頻度とクライストロンの発振 RF 電力レベルとの間には強い相関関係があることが判明し、この電力レベルを低減することが高圧停止頻度を下げる有効な対策であることがわかった。発振 RF レベルはカソード電圧、ヒータ電流、フォーカスコイル電流の設定値により増減するが耐圧や飽和温度特性などを考慮し、今回はフォーカスコイル電流の値を変えることで、従来の発振レベルよりも 1 桁少ない値を実験的に求めた。今回の R&D 試験で得られた新たなクライストロン動作条件で第 4 回目のカプラーエージング試験に RF を供給したところ、約 40 時間に亘る実験中の高圧停止回数は大幅に減少し、クライストロン安定動作のための基礎データを得た。

1 はじめに

原研と高エネルギー加速器研究機構(KEK)とが共同で開発・建設を進めている大強度陽子加速器施設(通称 J-PARC)は原研東海研内に建設され、平成 18 年度中のビーム加速試験に向け精力的に計画を推進している。我々原研リニアック RF グループは、400MeV 常電導リニアックの 200~400MeV 高エネルギー加速部に使用される周波数:972MHz の RF 機器の開発や評価などを主に担当している。これに加えて、実機に向けた安定な RF 供給や機器間通信の R&D 試験などを行うため、「972MHzRF テストスタンド」が東海研・陽子加速器開発棟の地下 2 階試験エリアに約 2 年前設置された。この 2 年間の活動状況やテストスタンドの機器構成などは参考文献(1)と(2)に詳しく記載されているのでここでは割愛し、クライストロンの耐電圧を回復するために行った耐圧処理(SK 試験)作業以降に行った高圧停止頻度を改善するための各種 R&D 試験結果を中心に報告する。

2 インターロック発生状況と耐圧処理作業

2.1 インターロック発生状況

RF テストスタンドのクライストロン制御ラックには、構成機器の各種パラメータやインターロック動作時の情報が集約してモニタ可能なよう操作・監視用タッチパネルが設置されており、高圧停止インターロック発生時には「M-アノードパルス異常」、「クライストロンビーム過電流」項目が発報していた。そこで、クライストロンビーム電流波形と M-アノード電圧波形をビーム過電流が発生したタイミングと同期を取ったトリガー系でデータ収集したところ、M-アノードを 700 μ s パルス駆動するためのパルス繰返しトリガー(最大 50pps)である正規トリガー以外の時間点で両波形とも過電流及び短絡が発生し、高圧が停止していた。次に、クライストロンヒータに電流を流さない運転条件で再度データを蓄積していくと、ビーム過電流が発生しない条件でも M-アノード電位は短絡していることが判明したため、M-アノード電位の短絡が第 1 次要因であると結論付けた。

2.2 原因調査と耐圧処理作業

M-アノード電位が短絡する原因として M-アノード変調器や高圧ケーブル並びに高圧碍子部、もしくはクライストロン管球内の耐圧劣化などが考えられた。そこでこれらの箇所を切り分けて調査するため、クライストロン負荷と同等の耐圧を有する上にカソード・アノード両電極に電圧を印加可能な耐圧試験器（KEK より借用）を使用し、各部の耐圧を確認した。結果、クライストロン管球内の真空度をモニタしているイオンポンプ電流の‘振れ振幅’から管球内の耐圧劣化が M-アノード電位短絡の主原因であることを突き止めた。次に、耐圧を回復する方法としては電極面の突起物などを通常の使用電圧以上の DC 電圧で叩く‘Spot Knocking’いわゆる SK 試験が知られており、我々もトータル 30 時間の耐圧処理作業を行った⁽²⁾。結果、暗電流値が最大 35%減少したデータ（DC120kV 時）も得、この作業によりインターロック発生頻度は改善されることが期待された。

3 安定動作 R&D 試験

3.1 反射波波形歪と入出力特性の出力飛び

耐圧処理作業後、高圧停止頻度を注意深く監視したところ、励振 RF 無しの条件では停止回数が大幅に減少したデータが得られた。しかし、RF で励振した（クライストロンから大電力 RF を出力する）通常の運転モードでは、耐圧処理前と比較し、その頻度は改善されていなかった。そこで我々は、クライストロンが RF で励振された時にクライストロン管内でどのような現象が生じているのかを調査するため、クライストロン入力反射波に着目し、これを正確にモニタ可能なよう診断用の方向性結合器をクライストロン入力直前に設置した。図 1 に励振 RF レベルを徐々に増加させていった時の入力反射波波形の変化を示すが、この図は反射波電力を検波器で計測した時の波形である。励振レベルが 3.3W までの反射波波形は図 1 上部のような理想的な矩形波（入力進行波と相似）であったものが、3.4W 設定時、突如パルス平坦部の後半から欠けだし、その平坦部にはサグ（波形歪）が観測された（図 1 下部）。この波形のパルス先頭部ピークは約 3.6W の励振レベルで消失したが、平坦部のサグは 3.6W 以上の全ての励振レベルでモニタされた。次に励振 RF レベルとクライストロン出力電力との関係を表す入出力特性曲線を図 2 の上部（赤色）に示すが、歪波形が生じた励振レベル以上のクライストロン出力に‘出力ジャンプ’現象が見られた。出力ジャンプとは励振 RF レベルとクライストロン出力が直線的に増加するリニア領域において、その直線性からクライストロン出力が外れ増加（ジャンプ）するものである。図 2 の下部（青色）には、RF パルス幅中央地点（300 μ s）の反射波電力値と励振レベルとのプロットを示したが、出力ジャンプ点を境界に値が大きく異なっていることもわかった。

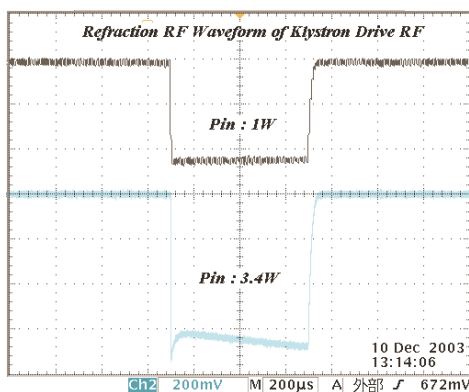


図 1. リニア/出力とび領域別の反射波波形

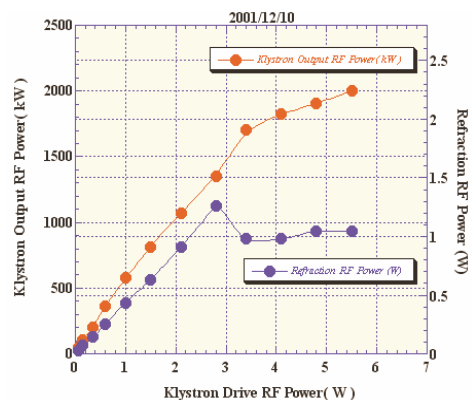


図 2. パラメータ以前の入出力特性曲線

3.2 逆行電子と発振 RF 電力レベル

以上のデータより、高圧停止頻度の高/低をクライストロン入出力特性のリニア/出力飛び領域別という新たな視点で調査したところ、出力飛び領域で高圧停止が多発するという明快な相違が初めて確認された。そこで、先述のクライストロン入力反射波の波形変化が生じる点を注視しながら、これと同期して変動する他のパラメータを追及したところ、クライストロンビーム電流との相関が認められた。図3にその代表例として、励振 RF パルス幅が $300\mu\text{s}$ でクライストロンを出力飛び領域で動作した時の出力電力検波波形（上部）とビーム電流のパルス平坦部拡大波形（下部）を示す。図から明らかなように、平坦部の電流値は RF 出力が有(パルス前半部) / 無(パルス後半部)の別によって減少/ 正常値となっており、その電流減少量の増/減は励振 RF レベルの高/低と正の相関関係にあった。この現象はクライストロンゲインを高くとった動作条件で見られる、クライストロン出力空洞通過後のビーム電流が正常な軌道でコレクター部まで到達出来ないことが原因と考えられ、このビーム電流の一部は逆行電子となりクライストロンの自励発振を増大し不安定動作の要因となる⁽³⁾。以上の考察から、高圧停止頻度を改善するためには、クライストロンの自励発振レベルを低減する必要があるが、現状のクライストロンゲイン(56dB程度)を確保した上で逆行電子を減らすためには、出力空洞とコレクター部近傍の磁場強度と分布を独立に変化させる必要があり、現状では大掛な改造を伴い困難である。そこで、可能な限りのゲインを確保した上で、クライストロンの発振 RF レベルを低減することが可能かどうかを実験的に求めることにした。

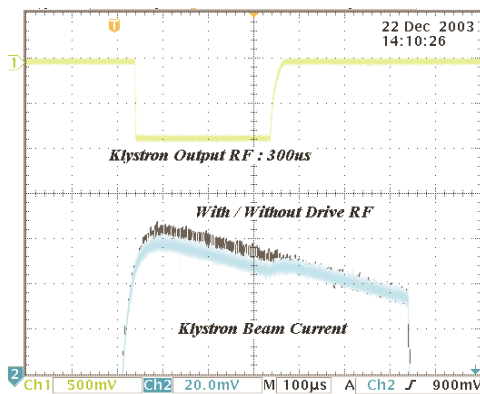


図3.励振 RF 有/無の別によるビーム電流波形

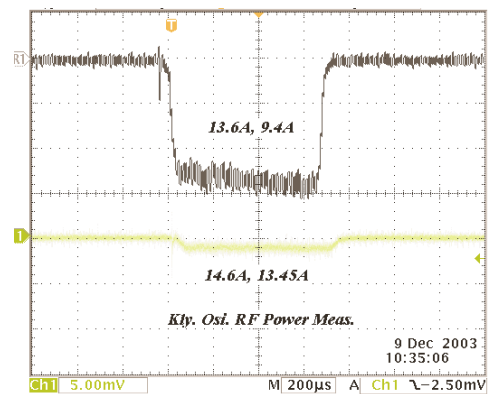


図4.クライストロン自励発振 RF の代表波形

3.3 発振 RF 抑制のパラメータサーチ

図4 上部に励振 RF 無しの条件で、クライストロン出力から得られた自励発振波形を示すが、この図はパルス幅: $720\mu\text{s}$ で M-アノードを変調しているだけでクライストロンから出力される RF 波形である。この時のクライストロン動作条件はカソード電圧:100kV、フォーカスコイル電流:13.6A(メインコイル)、9.4A(バックアップコイル)、ヒータ電流は2次側換算で4.02Aである。なおメイン/バックアップコイル電流の13.6A/9.4Aの現状の設定値は、この#1号機クライストロンを設置した当初その出力電力が最大になるよう実験的に決定された値で、本来の設計値とは異なっている。次に各種のクライストロンパラメータと発振 RF レベルの増減を調査したところ、カソード電圧、ヒータ電流、フォーカスコイル電流と各々相関関係にあることがわかったが、耐圧や温度飽和特性などを考慮し、今回のパラメータサーチはフォーカスコイル電流のみを変化させた。図5にメイン/バックアップコイル電流を0.2A/1Aステップで変化した時の発振レベル値をプロットしたが、最終的にメイン/バックアップコイル電流を14.6A/13.45Aと設定した時に最小の値である1.4mVが得られた。この時の発振波形を図4の下部に示すが、メイン/バックアップコイル電流の初期設定値13.6A/9.4A時と

比較して、その発振 RF レベルは約 1 桁少なくなった。

以上の作業終了後、新たに得たフォーカスコイル電流値でクライストロンを再動作した時に得られた入出力特性曲線(上部)とクライストロン入力反射波値(下部)とを図 6 に示す。このデータから、クライストロンゲインは 50dB と算出され、ピークの RF 出力電力は 1.2MW 程度と従来値の約 1/2 程度であったが、励振 RF 電力 : 15W 時まで出力ジャンプ現象も入力反射波サグも生じていない良好なクライストロン動作条件を得た。なおこの条件での反射波電力値は励振 RF レベルの増加と共に単調増加するデータとなり、励振 RF 有/無によるクライストロンビーム電流の減少もモニタされなかった。

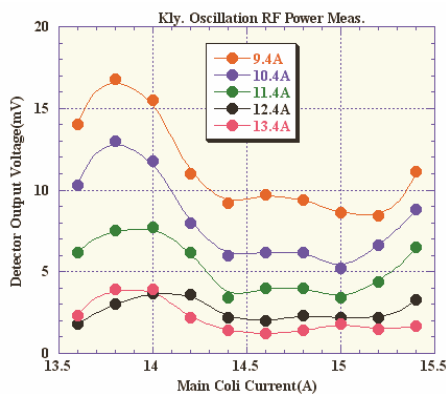


図 5.発振 RF レベルのフォーカスコイル電流依存性

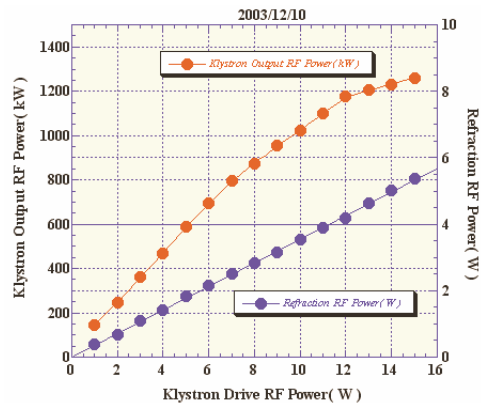


図 6.1° ラム-サ-チ以降の入出力特性曲線

2003 年 11 月 25 日より第 4 回目のカプラーエージング試験が開始し、RF パルス幅 : 600 μ s ,パルス繰り返し数 : 50pps,クライストロン出力電力 : 1MW の条件までトータル 37 時間に亘りこの運転条件で RF の供給を行った。結果、パルス変調器とクライストロンタンク間を接続する高圧ケーブルが主原因と考えられる高圧停止インターロックが 20 回程度発生したが、クライストロンの動作不安定性による高圧停止は数回程度であり、従来と比較して大幅に高圧停止頻度を改善することが可能であった。

4 まとめ

RF テストスタンドの高圧停止頻度を改善するためその原因を調査したところ、クライストロン出力空洞通過後の逆行電子が主原因と考えられる発振 RF レベルの増大がクライストロン動作の不安定性となり、最終的には M-アノード電位の短絡が多発していた。今回の R&D 試験を通じ不具合箇所を特定するための手法として、多数のパルスモニタ波形の同期を取った上での同時計測可能な測定系を構築すること及び、例えば耐圧試験機のようなシステム構成機器を切り分けて判断可能な保守 (診断) 装置が、特に実機では不可欠であること、並びに今回新たに取り付けたクライストロン入力反射波波形モニタに代表されるような診断用モニタで種々の現象を正確なデータとして収集すること、などが非常に重要であることがわかった。

参考文献

- [1] 山崎正義, et al, “原研 972MHz RF テストスタンドの現状 ”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, August 1-9,2002,Kyoto,Japan, P296 – P298
- [2] 山崎正義, et al, “原研 RF テストスタンドの現状 2”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 30th – August 1st,2003,Tokai,Japan, P363 – P365
- [3] 東芝電子管デバイス (株) 浦方、林氏との Private communication