

PRESENT STATUS OF 972MHz RF TEST-STAND AT JAERI

T.Hori^{1,A)}, E.Chishiro^{A)}, M.Yamazaki^{A)}, H.Suzuki^{A)}, and K.Hasegawa^{A)}

^{A)}Japan Atomic Energy Research Institute

Shirakata-Shirane 2-4, Tokai, Naka, Ibaragi, 319-1145

Abstract

The JAERI 972MHz RF Test-Stand has been operated for the development and estimation of 972MHz RF Components at J-PARC Linac in July 2001. In this paper, we describe the operational results in last year and report the R&D status of Klystron RF characteristics for a 972MHz first tube.

原研972MHz RFテストスタンドの現状報告

1. はじめに

原研972MHz RFテストスタンドは約3年前に、J-PARCリアックの高エネルギー加速器部(200~400MeV)で使用される周波数:972MHzのRF機器の開発や評価を行うことを主目的に、東海研陽子加速器開発棟に設置された。過去2年間の活動状況とテストスタンドの機器構成などは参照文献¹⁾に詳しく記述されているので割愛し、昨年(2003/7~2004/6間)実施した主な試験や機器の改修を列挙すると、フォーカスコイル(メインコイル)電源のACライン流出ノイズレベル低減対策(8月)、972MHz超伝導空洞用カプラエージング試験並びに、この試験を円滑に行うためのテストスタンド安定動作R&D試験(10~12月)²⁾、クライストン初号機での電子銃発振対策試験(12月、6月)、クライストン2号機のビームエージング&発振測定(2月)、直流高圧電源の改修(3~6月)、長パルス(3ms)運転仕様のM-アノード半導体スイッチドライブ用ユニットの性能評価(3月~)、ローレベル系の振幅、位相制御の基礎データとなるパルス内位相測定(5月~)などであった。

本報告は最初に上記項目中の主な2件について述べた後、出力飛び現象を究明するための波形測定結果から得られた新たな知見を報告する。

2. 昨年の主な活動状況

2-1. クライストン初号機の電子銃発振対策試験

972MHzクライストン初号機には、設置当初よりガンソレーションが原因と考えられる発振周波数が3種類($f=1.332, 3.21, 1.463\text{GHz}$)観測されており、カット電圧が75~90kVと102kV以上の2つの電圧範囲でクライストンを動作出来ない状態である。製造メーカーによるHFSSの解析結果より、電子ビームと相互作用する電子銃のRF電磁界は、アノード-カット間に励振される同軸TEMモードであり、これと電子銃構造の外部に存在するTEMモードとが結合している、ことがわかった。そこで電波吸収体を電子銃近傍まで近づけたセットアップでの試

験と外部TEMモードの共振構造を積極的に変えるセットアップでの試験とを実施した。結果、2回の試験とも計算で得られた効果ほど発振を低減出来なかったが、 $f=3.21, 1.463\text{GHz}$ 成分の発振はガンソレーションではないと推定される新たなデータを得た。今後も実機23台分のクライストン設計に向けて、明快な原因が究明されるまで、試験を継続して行う予定である。

2-2. 直流高圧電源の改修

今年の3月1日、直流高圧電源のサイリスタ電圧調整盤(AVR盤:600V系)とこの電圧を120kVまで昇圧し全波整流するための変圧整流器との間を接続する600V CVケーブル12本の内の3本が焼損するケーブル火災が発生した。原因を調査したところ、以下の経緯で焼損まで至ったと推定される。①AVR盤内の点弧角制御用サイリスタ(正逆2方向のサイリスタが1相分)12個中の1個(U相)のゲート回路駆動用ICが何らかの原因で動作不良が発生、②当該サイリスタのゲートパルスが欠相、③昇圧トランスU相の1次側に1方向の電流のみが通電、④昇圧トランスのU相が偏磁、⑤偏磁過電流が通電しケーブルが過熱、⑥過熱による絶縁体の溶融によりケーブルラック(アース電位)との間で短絡電流が流れ、⑦サイリスタ保護用フェーズ(1000A)が溶断すると同時に6.6kV系統のVCBが開放され高圧電源は停止した。今回のケーブル焼損の根本原因は極めて一般的に使用されているトランジスタの動作不良であり、この故障率から考えて事前に予見することは非常に困難であった。しかしながら、原子力施設内での火災(小火程度でも)は対応如何ではJ-PARC計画の進展を左右する出来事であり、この認識の上に立った設計・製作が非常に重要である。

対策として、交流側の過電流と偏磁電流を検知するための検出ユニット(NIM)の追加並びに、AVR盤入力に新規のMCCB盤を設置するなどの改修を行い、機器間の保護協調を最大限強化した。

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

3. 出力飛び現象と原因

超伝導加速器試験時に高圧停止インターロックが多発したため、その原因を調査したところ、クライストロン入出力特性の出力飛び領域で運転している時にその頻度が高かった。そこで、出力飛びの現象を正確にモニタ出来るよう既存の計測系の整備（S/N比の改善やアスラインの見直し）や新たな診断用のモニタを設置し、4.に示す各種の測定を実施した。ここではこれに先立ち、開発途上の球の特性ではあるが、972MHzクライストロン初号機で観測された2つの現象について述べる。

3-1. 入出力特性の出力飛び現象

クライストロンの入出力特性は、励振電力の増加と共にクライストロン出力電力が直線的に増加するリア領域と、これに続く飽和領域とで示される。図1に972MHzクライストロン初号機を運用値（メインバックのフォーカスコイル電流値が13.6A/9.4A）で動作した時の、代表的な入出力特性とクライストロンゲイン値とを示す。図からリア領域後半部の励振電力:2.5Wを境界に出力電力がジャンプ（出力飛び）しており、これと同期してゲイン値も0.7dB増加していることが読み取れる。このような動作曲線を我々はクライストロンの出力飛びと呼んでおり、J-PARCリアックの低エネルギー加速部（～200MeV）のRF源として開発された324MHzクライストロンの開発途上でも観測された現象である⁽³⁾。324,972MHzクライストロンの動作点は電子リアックで通常使用される飽和領域では無く、リア領域の直線性を利用したローレベル系での位相、振幅制御でクライストロン出力性能を達成するため、この問題は非常に重要である。

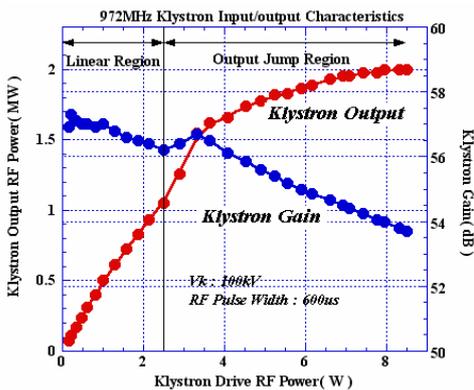


図1. 972MHzクライストロン初号機の代表的な入出力特性曲線とクライストロンゲイン値

3-2. 逆行電子と負のフィードバック現象

出力飛び原因を製造メーカーと議論したところ、クライストロン出力空近傍からの逆行電子による負のフィードバック現象が主な原因であると推定した。クライストロンゲインを設計値より大きくとった条件でクライストロンを動作した時、出力空洞通過後のクライストロンビーム電流は比較的大きなエネルギー損失を受けることによって、正常なビ

ーム軌道でコレクター部まで到達できなくなる。このビーム中の位相が180°反転している極僅かな電子は出力空洞に再度トラップされ、新たに正規のビーム電流とは逆向きに加速（変調）され、中間空洞・入力空洞を経て、カート方向に戻ってくる。この逆向きの電子を逆行電子と呼ぶが、この電子が入力空洞を通過する際に空洞との共振条件を満足した時、入力空洞に新たなRFを励起する。したがって、このフィードバックがかかった状態でのクライストロンは、70W主アンプから供給される正規の励振電力に加え、上に述べた励起RFとの2つの合算されたパワーで励振されることになり、その結果、クライストロン出力電力はフィードバックが成立した直後にリア特性から外れジャンプする⁽⁴⁾。なお、逆行電子と似た名称に、324MHzクライストロン開発中に問題となったコレクタ部からの反射電子⁽⁵⁾が挙げられるが、逆行電子はクライストロンが励振された状態で生じる現象であり、この点で明らかな相違がある。

以上述べた非常に興味のあるメカニズムが、我々の計測系でどのような波形変化として観測されるのかを調査した。

4. 測定及び測定結果

4-1. クライストロンビーム電流の減少

クライストロンのビーム電流は、M-アノード変調器内に取り付けられた電流トランス(25mV/A, ヒアソンC.T:Model3025)で測定しており、カート電圧:100kV時のビーム電流波高値(パルス中央部)は42Aである。600μsのパルス平坦部には約2%のサグが生じているが、これはカート電圧のサグ(電圧サグの仕様は、直流高圧電源とクライストロンとの構成比が1:4の時に5%以下)が原因である。図2の下図に出力飛び領域(励振電力:4W)でモニタされた代表的なビーム電流のパルス平坦部波形を示す。

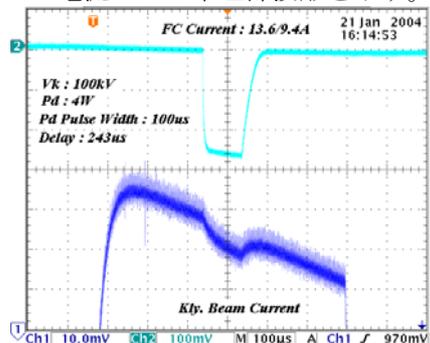


図2. 出力飛び領域での上図:クライストロン入力反射波波形、下図:クライストロンビーム電流波形

図2の上図には入力反射波の検波器（HP Model320）波形を示すが、この図の励振RFパルス幅は100μs（通常値は600μs）、励振RFとビーム電流パルス平坦部との相対的タイミングをパルス中央に設定した。なお、以上の調整は電流波形をモニタしているオロスコープの垂直感度を最高レンジまで拡大することと共に、励振RF有/無

の別による電流波形の変化を識別する際に非常に有用であった。図2のビーム電流パルス平坦部には、励振RFタイミングとパルス幅に対応した電流値のくぼみ(ディップ)がモタされた。CTの極性から判断して、この時のビーム電流値は、励振されていない時と比較して減少しており、このことは励振期間中のビーム電流はディップ電流値分だけコレクタ(ホティとも共通のアース電位)まで到達していないと解釈できる。

4-2. 入力反射波RFの周波数分析

クライストロン入力コネクタ直前に結合度:-20dBの方向性結合器(HP778D,0.1~2GHz)を新たに取り付け、その反射波ポートから得られるRF信号を、直接RG8/Uケーブル(8m長)でスペクトラムアナライザ(HP8595E,9kHz~6.5GHz)まで伝送し、その周波数成分を測定した。

図3に中心周波数:972MHzの±8MHz帯域におけるリア/出力領域別の代表的なスペクトル図を示す。結果、リア領域のスペクトルは励振RF波形と相似形であったが、出力飛び領域のスペクトルには励振RF成分には無い972MHzの-7MHzから+5MHzまでの周波数成分がモタされ、この周波数成分は出力飛び領域の全域で観測された。

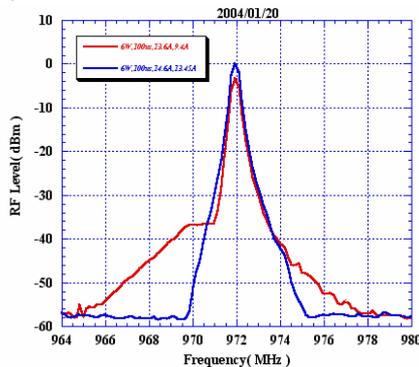


図3. リア(青)/出力飛び(赤)領域別の入力反射波信号の周波数スペクトル

5. 考察

J-PARCリアックの324,972MHzクライストロンには大電流(~50mA)ビーム加速時のビームローディングを補償するため、帯域(-3dB)が中心周波数:fcの±5MHzを確保出来るよう設計されている。その一例として、972MHz初号機の離調周波数(第2,3,4空洞)を調整した際に得られた瞬時帯域特性を図4に示す。図3でモタされた972±2.5MHz(主発振器の周波数成分)以外の周波数成分は、この帯域特性が入力反射波信号として観測されたと考えられる。言い換えると、クライストロンの入力側で出力特性の一部がモタされたと言え、これは一度出力空洞まで到達し、その出力特性の情報を有した電子が再度入力空洞まで戻った、と考える以外説明出来できない。以上の考察より、クライストロン入出力特性の出力飛び領域にはクライストロン管球内を逆走する逆行電子が確かに生じていると言える。

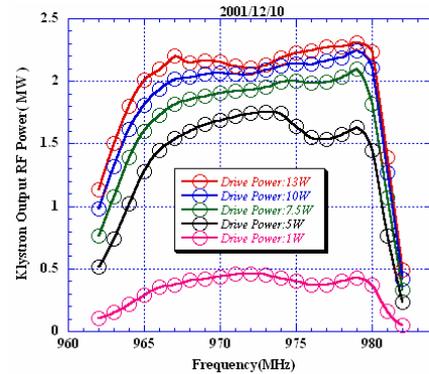


図4. 972MHz初号機クライストロンの瞬時帯域特性

次に、図2のビーム電流ディップ量をビーム電流波高値(42A)で割り、これを電流減少率と定義した値と励振RF電力値との相関を図5に示す。図からリア領域の後半で既にビーム電流の減少が生じていること、励振電力が3.5W以上の出力飛び領域での電流減少率は、ほぼリアに増加していることがわかった。リア/出力飛び領域の境界点の電流減少率は0.1%で、ビーム電流値に換算して42mAである。ただし、この値はコレクタまで到達しなかったビーム電流の総和であり、リア/出力領域を決定する負のフィードバックに関与している逆行電子はこの値よりも十分少ないと考えられる。

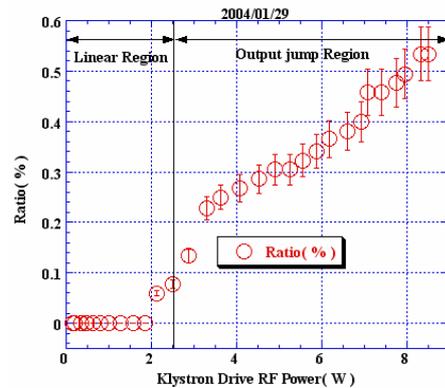


図5.クライストロンビーム電流減少率と励振RF電力の相関

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2”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, July30-August 1, 2003, Tokai, Japan, P363-P365
- [2]堀利彦, et al., “原研972MHz RFテストスタンドの安定動作R&D試験”, KEK Proceedings 2003-16, February 2004.
- [3] M.Kawamura, et al., ” DEVELOPMENTS AND HIGH-POWER TEST OF THE 324MHZ PULSED KLYSTRON ”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July12-14, 2000, Himeji, Japan, P198-P200
- [4]東芝電子管デバイス(株) 林、浦方氏とのPrivate Communication
- [5] Z.Fang, et al., ”Investigation of Spurious Oscillation in Klystron Due to Back-going Electrons from Collector”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 12-14, 2000, Himeji, Japan, P216