

PRESENT STATUS OF THE 972MHZ RF TEST STAND AT JAERI 2005

Toshihiko Hori^{1, A)}, Etsuji Chishiro^{A)}, Masayoshi Yamazaki^{A)}, Hiroyuki Suzuki^{A)}, Kazuo Hasegawa^{A)}

Mitsuo Yoshida^{B)}, Seiya Yamaguchi^{B)}, Syozou Anami^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}

^{A)} Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

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

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A 972MHz Klystron (tube #1) was observed strong oscillation with three frequencies. It was found that the cause of oscillation was drift tube coupling at higher mode frequencies. A repaired klystron (tube #2) was achieved the output power of 3MW without oscillations. A prototype cryomodule containing two 9-cell superconducting cavities had been constructed at JAERI site. The high rf power test in 350kW, 3ms, 25pps have been successfully carried out.

原研972MHz RFテストスタンドの現状 2005

1. はじめに

原研972MHz RFテストスタンドはJ-PARCリニアックの高エネルギー加速部に使用される周波数：972MHz RF機器の開発や大電力試験を行うことを目的に、陽子加速器開発棟の地下2階に設置された。昨年度実施された大きな改良は、約20mの新たな導波管と立体回路などが敷設されたことである。これは、超伝導クライオモジュールの大電力試験を1階の実験エリアで行うため、開発棟内の2箇所のエリアに大電力のRFを供給することが可能となった。

昨年度（2004/07～2005/6）実施した主な活動は、972MHzクライストロン初号機で観測された発振の対策試験並びに、この結果を反映した2号機改修管での検証試験、及びADS用プロトタイプの超伝導クライオモジュール大電力試験であった。本報告では上記3項目の現状と得られた成果を報告する。

2. 972MHzクライストロンの発振対策

2.1 発振原因R&D

972MHz初号機クライストロンでは60kV以上の電圧で3種類の周波数の発振が観測され、特に75～90kV、102kV以上の電圧範囲でクライストロンを全く動作出来なかった⁽¹⁾。昨年の中半までは、ガンオシレーションがその主原因であると考え各種の検証試験を行ったが、結果的にクライストロンのビーム電流と第2空洞との高次モード結合（Drift Tube Oscillation）による発振であることが判明した⁽²⁾。そこで、ギャップセンタ間は初号機と同寸法であるが、第2,3空洞を各々-6,-2mm狭くし、高次モードの電場が非対称になるよう改造された2号機改修管を製作し(2005/03納入)、この球での検証実験を行った。

2.2 改修管での特性試験

2度の検証試験の結果、1)106kV以上のカソード電圧で周波数:4.077GHzの発振がモニタされたこと、2)その原因は、改修前と同様に第2空洞とビーム電流との高次モード結合であること、3)ただし、フォーカスコイル電流を設計値の-5%値で動作すると、定格の110kVまで発振は観測されないこと、などが明らかになった。図1に最終的に得られた2号機改修管の入出力特性を3つのカソード電圧値(100,104,108kV)別に示す。励振RF電力:20W、カソード電圧:108kV印加時に3MWのピーク出力が得られ、効率:59%、クライストロンゲイン:52dBなど設計値とほぼ合致した良好な動作を確認した。

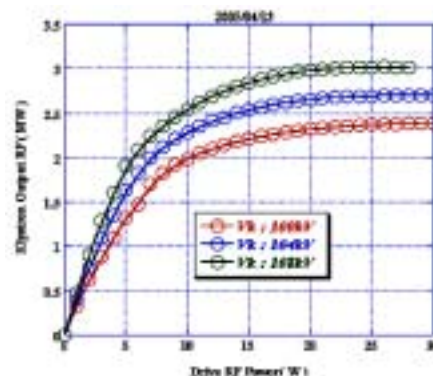


図1 2号機改修管の入出力特性

3. 972MHzプロトタイプ超伝導クライオモジュールの大電力試験

超伝導クライオモジュールは、 $\beta = 0.725$, 9セルの空洞が2台内装されたもので、この大電力試験が

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

2004/10月から2005/3月まで2週間単位で、合計4回実施された³⁾。

3.1 要求性能と経緯

本テストスタンドには大電力試験を行うために、1)RFパルス幅：0.1, 0.6, 3ms、2)ピーク電力：330kW以上（空洞入力で300kW以上）、3)出力パルス平坦度：±1%以下、4)最小電力ステップ幅：1kW(目標値)、5)パルス繰り返し数：10,25pps、6)電力安定度：±1%以下、7)瞬時帯域特性：972MHz±2MHz程度、の性能が要求された。なお、上記の性能は全ての電力範囲で同時に満足する必要がある。

我々は本試験前に実施された入力結合器の大電力試験⁴⁾などで上記と同等の性能を確保しテストスタンドを運用していた。しかし今回の試験時には、3msパルス内のサグ補償と同時に電力安定度を向上するためのローレベル系A.G.C回路（Automatic Gain Controller）⁵⁾が不具合のため使用できず、今回新たなローレベル系を構築する必要が生じた。これに加え、高圧停止のインターロック回数と自励発振RFレベルとの間に大きな相関が認められたR&D試験結果⁶⁾より、クライストロン動作電圧において自励発振が全く生じないパラメータ（具体的にはカソード電圧とフォーカスコイル電流値との組み合わせ）を実験的に求めたところ、3msパルス時点での電力値は260kWが最大で、要求性能を満足するためには一工夫必要であった。

3.2 超伝導試験時のパラメータ

表1にクライストロンの性能評価など実機仕様（常伝導）で運用する際のマシンパラメータと超伝導試験時との相違を示す。本テストスタンドのM-アノード変調器（FETを使用した半導体スイッチを実装）の仕様は600μs(FWHM),50ppsであるが、これを運用的に超伝導仕様の3msパルス幅で使用するため、カソード電圧とパルス繰り返し数に制限が生じる。これに加えて、パルス幅が5倍長くなることによって、カソード電圧とクライストロンビーム電流のパルス内サグは各々3.2%,12%も生じる。なお、これらの数値は高圧電源のバックアップコンデンサ容量がクライストロン4本接続時に電圧サグ：5%以下で設計されている（25.5μF）ことによる。⁷⁾

表1.実機仕様／超伝導試験時の相違

項目	実機	超伝導
M-アノードパルス幅	600μs	3ms
カソード電圧(Max)	110kV	75kV
パルス繰り返し数 (Max)	50pps	25pps
カソード電圧のサグ	0.65%	3.2%
クライストロンビーム電流のサグ	2.5%	12%

3.3 出力電力の増加

以下に示す対策を実施し、カソード電圧：72kV印加時で350kW（3msパルス時点）のRF出力を得た。

- 1)第3空洞を-0.4mm離調したこと。この結果、瞬時帯域特性は3MHz程度犠牲となったが、要求性能を満足できる範囲内で調整した。なお、符号のマイナスはギャップ距離が縮まる方向を示す。
- 2)カソード電圧を一定に保持したまま、M-アノード電圧だけを変化可能な（設計値の100%に対して±10%）電圧タップを100%から90%に下げたこと。これによりカソードから放出されるビーム電流の初速度が変わり、発振開始のカソード電圧値が高い電圧にシフトした結果ピーク値が増加した、と考えている。

3.4 クライストロン出力RFのパルス平坦部サグ

前項の調整後、基本システム構成（PINダイオード減衰器を矩形波電圧で駆動）で運転した時に得られた代表的な各部波形を図2に示す。図からPINダイオード電圧とクライストロン励振RF間の波形応答性は良いが、励振RFと出力RF間の波形は応答していない。原因は表1に示したカソード電圧に3.2%の電圧サグが生じているためであり、この電力サグは計算上： $(3.2\%)^{5/2}=18\%$ となる。そこで、PINダイオードの駆動電圧を可変して、クライストロン出力値別のパルス平坦部サグ(%)を実測したデータを図3

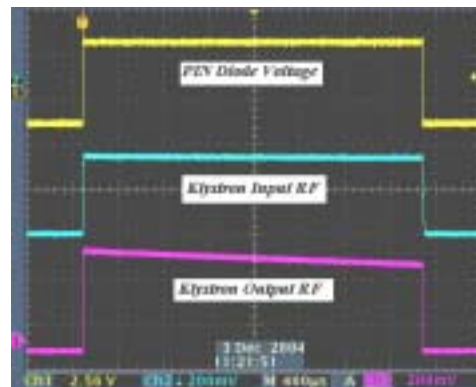


図2 基本システム構成での上:PINダイオード減衰器ドライブ波形、中:クライストロン励振RF波形、下:クライストロン出力RF波形

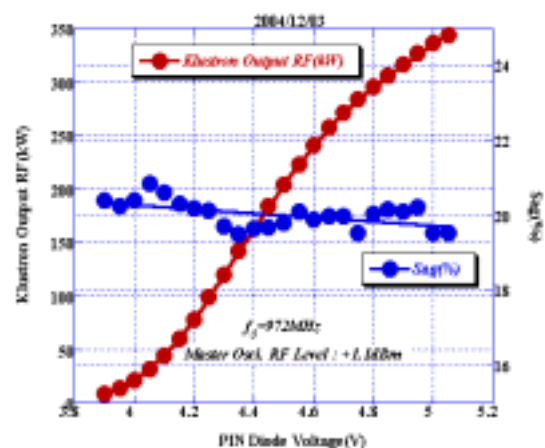


図3 PINダイオード電圧を変化した時の3msパルス時点の電力値（赤）とパルス平坦部サグ（青）

に示す。若干の電力依存性は認められるが、全ての範囲で約20%と計測され、計算値とほぼ合致した。

3.5 フィードフォワード電圧波形によるサグ補償

パルス内サグを補償する方法として、クライストロン入出力の波形応答性を最初から考慮した電圧波形でPINダイオードを駆動する、一種のフィードフォワード方式を採用した。図2のクライストロン出力RF波形のパルス平坦部は、ほぼ直線的な傾きを持っているため、当初は矩形波とのこぎり波を合成した直線ランプ波電圧でPINダイオードを駆動した⁽⁸⁾。結果、300kW出力時のパルス平坦度で+1.2%、-2.7%が限界であったため、我々は次に任意波形発生器の任意波形出力による補償に取り組んだ。図4にHIOKI製7990型任意波形発生器を使用し、パルス平坦部が±1%以下となるよう詳細な調整を行った後に得た各部波形を示す。7990型はWindows環境で簡易に任意の電圧波形を作成することが出来、今回のサグ補償回路としては非常に便利であった。

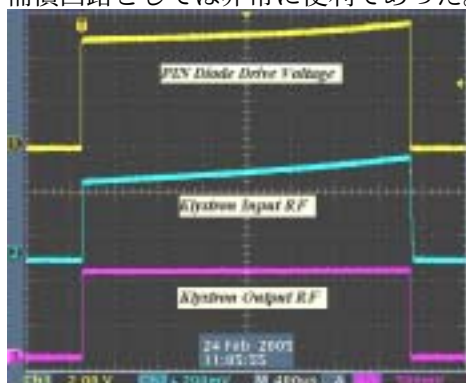


図4 フィードフォワード方式での上:ピンダイオード減衰器ドライブ波形、中:クライストロン励振RF波形、下:クライストロン出力RF波形

3.6 カソード電圧可変方式による電力調整

最後にクライストロン出力電力の調整方法であるが、PINダイオードを矩形波でドライブする場合はその電圧値を単純に高/低することで出力調整は比較的簡単に行える。しかし、図4に示した指数関数的な傾きを持つ電圧波形の場合、PINダイオードの減衰特性がドライブ電圧に対して非線形であるため、単純な電圧可変方式は使えない。そこで、今回の大電力試験では位相に関する性能（ビームに対する加速位相やパルス内位相差）を必要としないことから、低電力系での調整は行わず、クライストロンの静特性を利用したカソード電圧可変方式を採用した。その代表的な例として2004/12/14に実施されたRFプロセッシング時のカソード電圧及び、クライストロン出力の履歴を示す。この日はパルス幅の切り替えを含み3段階のプロセッシングが実施されており、3ms,10pps、最大RF電力：300kWまでのRF通過に約6時間要した。カソード電圧とクライストロン電力は5/2乗の関係で変化するため、高い電力値になるほど最小ステップ幅は大きくなる。しかし、制御盤のタッチパネルには0.1kVステップでカソード電圧

を調整可能なUP/DOWNキーが用意されており、微小な電力調整用に非常に有用であった。

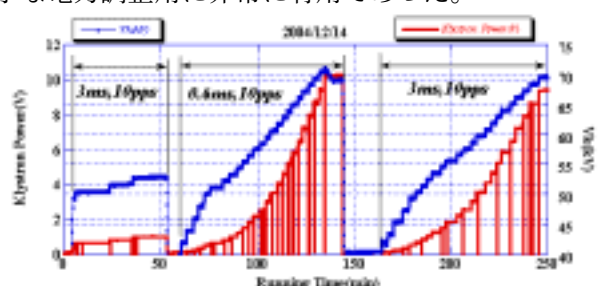


図5 RFプロセッシング時のカソード電圧(青)とクライストロン出力RF(赤)の履歴

4. まとめと今後

972MHz初号機での発振は、第2空洞とビーム電流との高次モード結合が原因であった。この結果を反映した改修管では106kV以上の電圧で同様の発振がモニタされたが、設計とほぼ合致した良好な動作を確認した。ADS用超伝導クライオモジュールの大電力試験を実施するに先立ち、出力の増加や3msパルス内の電力サグを改善する必要があった。そこで今回、新たなPINダイオード駆動方式とカソード電圧可変方式などを採用することで要求性能を十分満足した。今後は、ACS用バンチャ空洞のエージングと3号機クライストロンの特性試験などを行う予定である。

5. 謝辞

972MHzクライストロンの発振実験に際して御努力・御協力いただいたクライストロン製造メーカの東芝電子管デバイス株式会社 林健一氏、坂本光徳氏、浦方弘人氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] T.Hori, et al., “原研972MHz RFテストスタンドの現状報告”, Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004
- [2] M.Yoshida, et al., “J-PARC用972MHzクライストロンの発振解析”, these Proceedings
- [3] E.Kako, et al., “ADS超伝導リニアック用クライオモジュールの大電力試験”, these Proceedings
- [4] E.Kako, et al., “J-PARC超伝導空洞用入力結合器の大電力試験”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 30-Aug.1,2003
- [5] M.Yamazaki, 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, URL: <http://lam27.iae.kyoto-u.ac.jp/>
- [6] T.Hori, 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 Feb. 2004
- [7] Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC, JAERI-Tech 2003-044
- [8] T.Hori, et al., “超伝導加速空洞のRFコンディショニングにおける原研972MHz RFテストスタンドの性能向上”, URL:<http://tech2005.sci.osaka-u.ac.jp/>