

原研 972MHz RFテストスタンドの現状 2

山崎正義¹、千代悦司、堀利彦、鈴木浩幸、長谷川和男
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2-4

概要

昨年度に引き続き、原研972MHz RFテストスタンドでの活動状況を報告する。本年新たに開発されたRFコンポーネントは平均電力：120kWのサーキュレータ及び、全反射吸収用10パルスダミーロードで、いずれも大電力試験の結果、良好なデータを得た。

実機RF系の設計に反映させるR&Dとしては立体回路のレイアウト、冷却水ヘッダ評価機の製作などを行なった。このテストスタンドでは超伝導用RFコンポーネントの評価試験も行なわれており、空洞用カプラのエージング試験が2～4週間単位で合計3回実施された。本年後半はエージング試験時に多発した高圧OFFインターロック原因の究明とクライストロンの耐電圧回復試験を行い、安定でしかも継続的なRF供給を行なうための改善や実機における運用性の向上をめざした開発を行なっている。

1. はじめに

大強度陽子加速器施設（J-PARC）線形加速器の200～400MeVまでの高エネルギー加速部では周波数：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が高周波源として使用される。972MHz RFテストスタンドは、2001年8月に原研陽子加速器開発棟B2Fに設置され、9月より972MHzクライストロン初号機を含めたRFコンポーネントの開発、評価、大電力試験などを実施している^[1]。図1にRFテストスタンドの配置図を示すが、主に以下の機器により構成されている。

- ・-110kV,6.3A定格の直流高圧電源
- ・M・アノード駆動用変調器
- ・定格3MW出力の972MHzクライストロン
- ・全負荷ダミーロードなどを含む立体回路系

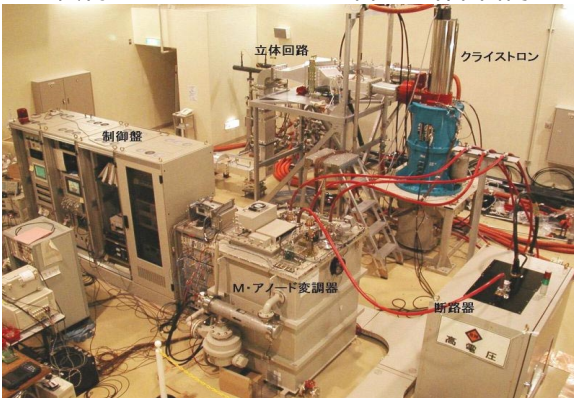


図1. RFテストスタンド配置図

- ・制御信号を統括するエージング制御盤

本年の主な活動状況を以下に述べるが、昨年度後半から改善が要求されていた高圧停止インターロックの原因調査と最終的に行ったクライストロンの耐圧処理については多くの労力と時間を費やし検討や作業を行ったので3.で詳細に報告する。

2. 活動状況

2002年7月から2003年6月の期間にRFテストスタンドで実施した評価試験並びに、不具合状況等について表1にまとめた。表2には超伝導空洞用カプラエージング試験時の運転パラメータを示したが、長短パルス（0.1～3ms）、2.2MWの大電力出力まで幅の広い安定なRF供給が要請されている。

表1. RFテストスタンドの主な状況

実機RF系の設計に反映するための試験
・972MHz系立体回路のレイアウトR&D 立体回路で使用する972MHzRFコンポーネントの実寸が出揃ったので、メンテナンス性、省スペースを考慮したレイアウトを2案設計し、テストスタンドで評価を行った結果、従来案と比較し全導波管長を約120m短縮可能な機器配置を考案した。
・実機冷却水ヘッダのR&D 実機冷却水ヘッダを製作するに先立ち、その評価機を今回製作し、操作性やメンテナンス性などの評価を行い、これを反映した総数23台の冷却水ヘッダ設計業務を完了した。
テストスタンドの不具合状況
・M・アノード用バイアス電圧の異常（パルス電子） 運転中に、バイアス電圧低下インターロックが多発した。原因は、高圧部からの電圧モニタ用光ケーブルの端末処理不良により光量が減少していたためで、改修を行なった。
・直流高圧電源の放電スイッチ不具合（日立） 高圧OFF信号で機械式放電スイッチは高圧側に接触する構造を有しているが、バネ定数の経年変化によりリバウンドが発生していた。人的、機器保護のためにも重要なスイッチであり、定期的なチェックが必要ことがわかった。
・M・アノード用高圧ケーブルの改修 M・アノード用高圧ケーブルの絶縁物及び外導体（シールド）部に放電によると思われる変色を確認した。KEKから新規の高圧ケーブルを手配し交換を行なったが、新たに電位傾度を和らげる3重同軸構造のケーブルを検討中である。
クライストロン耐圧試験時の不具合
クライストロン耐電圧処理作業の当初、高圧ケーブル開放部寸法が正規品と比較して30mm程度短いことに気づかず、耐圧試験器側ケーブルヘッド部で放電が生じていた。

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

表 2 . 超伝導空洞用カプラ試験の運転パラメータ

年-月	パルス幅 [ms]	RF電力 [kW]	繰返し [pps]	RF出力端
02-09	2.45	380	25	ダミーロード
	0.6	1100	25	ダミーロード
02-11	0.6	2200	25	ダミーロード
	0.6	800	25	全反射(ショート板)
03-02	3.0	370	25	ダミーロード
	3.0	370	25	全反射(ショート板)

3 . 972MHZクライストロン耐圧回復試験

3.1 インターロック発生原因の調査

昨年10月末より超伝導カプラのエイジング試験中に、‘ 高圧OFF ’ インターロックが多発し始め、継続的でしかも安定にRF電力を供給することが困難であった。そこで、インターロックの第1次要因を特定するため、クライストロン及び高圧電源各部のモニタ波形を同時計測した結果、アノード電位の短絡が主原因であると判断した。アノード電位短絡の要因としては、以下の箇所の耐圧劣化や耐圧不良が考えられる。

- 1)Mアノード変調器回路内の高圧素子
- 2)上記変調器とクライストロンオイルバスを接続する高圧ケーブル及び高圧碍子部
- 3)クライストロン管球内部

これらの箇所を切分け、短絡場所を特定するためにはクライストロン相当の負荷並びに、クライストロンに単独で高圧を印加可能な高圧発生装置が必要である。そこで、KEKより耐圧試験器を借用し、最初にこれをクライストロン模擬負荷として使用し運転を行ったところ、110kVの定格出力まで正常に動作した。この試験結果より、今回の高圧インターロック原因はクライストロン管内で閃絡が生じているためと考えられ、耐圧回復の高圧処理を行った。

3.2 クライストロンの耐圧処理

図 2 にクライストロン耐圧処理時の試験装置構成図を示す。高圧発生器には気中仕様パルス電子製 HDV-150k10SU (DC-150kV,10mA) を使用し、耐圧試験機 (WVT-120K,油中仕様パルス電子製) を高圧発生器からクライストロン電極へ高圧を供給するための中継 (切替え) 器として用いることで、クライストロンアノード及びカソード電極に最大-140kVの高圧を印加する。

耐圧処理を行うに当たり、クライストロン製造メーカーの東芝担当者から処理手順を聞いたところ

- 1) 高圧を上昇するステップ幅は2.5kV間隔
- 2) 放電せず電圧が一定に印加される保持時間を最低30分間以上とすること
- 3) 印加電圧は最大-140kVまで

との回答があり、新たな管球を出荷する際には24時間体制 (夜間は電圧一定で保持) で2週間程度耐圧処理を行っているとの説明であった。

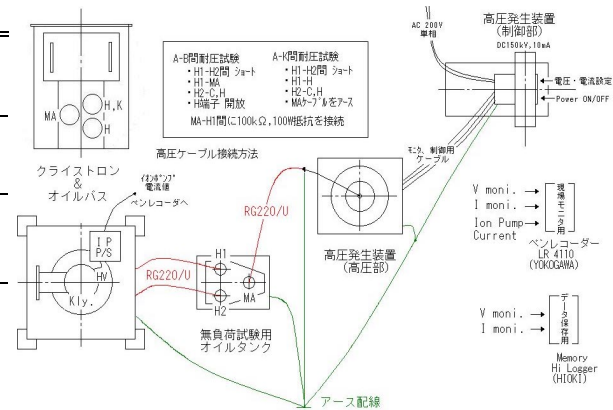


図 2 . 耐圧処理試験装置の構成図

3.2.1 アノード(A) - ボディ(B)間耐圧処理

クライストロンボディ (アース) に対してアノード、カソード両電極に高圧を印加して耐圧処理を行うもので、今回の管球内アノード電極の耐圧劣化はこの処理で改善すると考えられる。図 3 はA-B間耐圧処理時に得られた代表的なデータとして120kV印加時の耐圧処理履歴を示す。高圧印加後10分程度経過したのち、放電が連続して発生しクライストロン管内真空度は悪化したが、数回の放電の後、真空度が十分回復するまで比較的長い待機時間をとることで、再度高圧が印加できるようになった。

A-B間処理は-140kVまで2日 (約16時間) で完了したが、電圧値別の耐圧処理時間とクライストロン放電回数とを図 4 に示す。なお、-130kV以上の電圧値ではクライストロン管内放電以外の耐圧試験器や高圧ケーブルでの放電が多発したため、系統立てたデータとはならず今回は割愛した。この図から、耐圧処理時間には電圧依存性が認められ、-120kV近傍と-130kV以上の電圧値で長い処理時間が必要であり、この傾向は東芝での工場出荷時に行っている耐圧処理作業での経験と非常に良く合致した。

3.2.2. アノード (A) - カソード(K)間耐圧処理

アノードをアース電位とし、カソード電極に高圧を印加して耐圧処理を行うもので、カソード、アノード近傍に付着しているバリウムなどを電界で除去する目的で行った。今回行なったA-K間の耐圧処理時間は5時間程度で、A-B間処理後に実施したためか、クライストロン管内放電は-140kVの電圧まで一度も発生せず、良好な結果を得た。図 5 には耐圧処理前後の暗電流値をプロットしたが、図中の高圧値と共に直線的に増加している測定点 (緑色表示) はクライストロン未接続時の測定系が有する暗電流値である。処理作業の結果、暗電流値には顕著な相違が見られたが、これを電圧値別の低減率で示したものが図 6 で、例えば、電圧: 120kV時では約35%

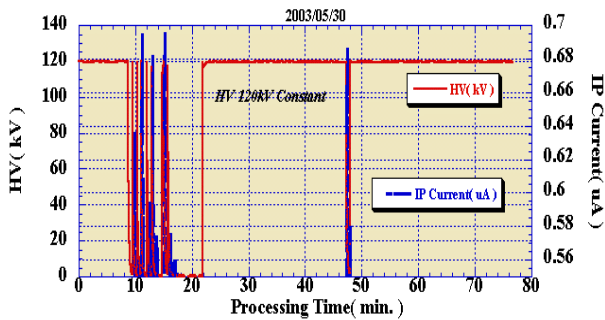


図3 . -120kV A-B間耐圧処理時の電圧値vs クライストロンイオンポンプ電流値のログデータ

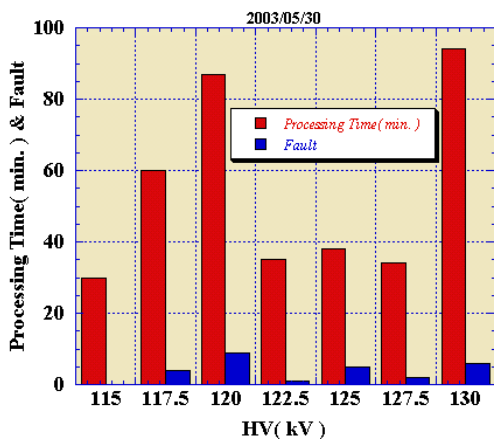


図4 . 電圧値別の耐圧処理時間と放電回数 (ただし、132.5kV以上のデータは除く)

も暗電流が減ったデータを得た。このクライストロンの定格電圧は-110kVであり、試験耐圧電圧：-140kVは高すぎる値との感想をもっていたが、以上のデータから、定格の約1.1倍までの耐圧を短時間で、しかも効率良く活性化するために必要な電圧値であることが理解できた。なお、今回の耐圧処理は時間の関係上、5時間程度であったがより長い時間処理作業を行うことで、暗電流値は大幅に改善されることが期待できる。

以上の耐圧処理後、クライストロンを正規に接続し定格電圧まで注意深く試運転したところ、高圧停止インターロックは発生することなく、正常に動作していることを確認した。今回行なったクライストロンの耐圧処理作業が、実機運用時のメンテナンスとして定期的に必要なであるとすると、より短時間でしかも安全に行なえるよう手順をも含めた検討を今後行なう予定である。

4. まとめ

972MHz RFテストスタンドは、クライストロンの耐圧劣化等の問題はあったが当初の予定していた試験等を順調に実施したが、今後もクライストロンの耐圧劣化については注意をはらう必要がある。今後の予定であるが、8月初旬には972MHzクライストロン2号機が納入される予定で、これらを含めた以下の試験を行なう予定である。

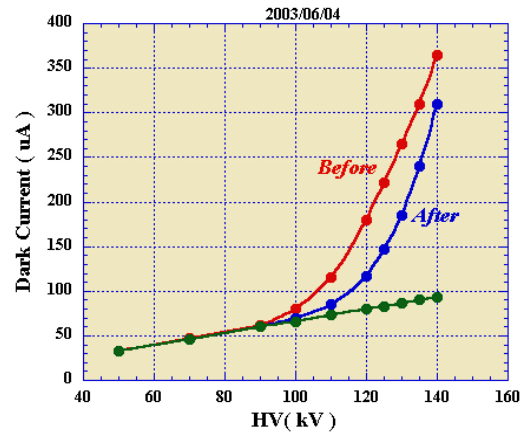


図5 . A-K間耐圧処理前後の電圧別暗電流値

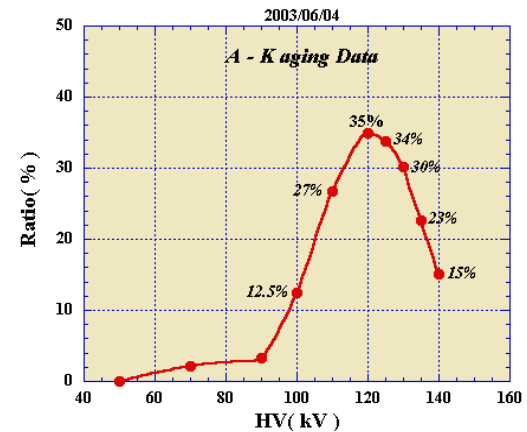


図6 . A-K間耐圧処理前後の電圧別暗電流低減率

- ・972MHzクライストロン2号機のRF特性試験
- ・RFテストスタンドの連続試験運転
- ・超伝導空洞用カプラのエージング試験 (継続)
- ・ACS空洞の大電力試験
- ・高精度流量計を用いたカロリメトリック法によるクライストロンRF出力電力の絶対値測定

謝辞

972MHzクライストロンの耐圧試験等に際して東芝の坂本光徳氏に御指導頂きました。また、直流高圧電源の調整と運転及び測定に関しては日立製作所の弓野雄一氏、パルス電子の中村司氏に御協力頂きました。そして、本RFテストスタンドの試験・運転に関して御指導、御協力頂いた高エネルギー加速器研究機構の穴見昌三氏、川村真人氏をはじめRFグループに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 山崎正義 他, "原研 972MHz RFテストスタンドの現状", Proc. of the 27TH Linear Accelerator Meeting in Japan, 2002, Kyoto, Japan, pp294-296