

## Present Status of the 972MHz RF Test Stand for J-PARC 2008

Toshihiko Hori<sup>1, A)</sup>, Masayoshi Yamazaki<sup>A)</sup>, Etsuji Chishiro<sup>A)</sup>, Hiroyuki Suzuki<sup>A)</sup>,  
Hiroyuki Ao<sup>A)</sup>, Kouichiro Hirano<sup>A)</sup>, Kazuo Hasegawa<sup>A)</sup>, Seiya Yamaguchi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

### Abstract

The 972MHz RF test stand has been operated for various high power tests such as 972MHz Circulator development, The #2 ACS Buncher Cavity test and the first ACS module test, etc. The Klystron tube has been improved in a strong oscillation. It has been tested and confirmed that no drift tube related oscillation has been observed in any regions. We have measured phase variations of a tentative waveguide system which consists of a circulator and 15m long waveguide. Status of 972MHz RF test stand is presented.

## 972MHz RF テストスタンドの活動状況 2008

### 1. はじめに

原子力機構原科研内の陽子加速器開発棟地下2階に設置されている972MHz RFテストスタンドは、J-PARCリニアックの高 $\beta$ 加速部(200MeV以上)で使用される972MHz RF機器の大電力試験が行える唯一の施設である。本年度(2007/8~2008/7)は400MeVアップグレード計画の第一歩が始まったこともあり、実機仕様を策定する各種試験が活動的に行われた。

本論文では、機器製作時のコスト低減を目的に行った972MHz大電力立体回路の位相測定試験を中心に、今年度の活動状況を報告する。

### 2. 今年度の主な活動状況

以下に今年度実施した主な試験や機器の改修を時系列で示す。

- 直流高圧電源の20D高圧ケーブルの端末処理部で絶縁破壊が発生した。本テストスタンドでの経験を生かし、実機で稼働中の6台の高圧電源を含め使用中の全電源の20Dケーブルを改修した(07/8)。
- J-PARC仕様の972MHz用サーキュレータ<sup>(1)</sup>の全反射試験。この準備として、3-スタブチューナーのVSWR&位相測定、サーキュレータ内フェライト温度及び冷却水温度上昇測定、10パルス発生器と波形評価用計測系の構築などを行った(07/9,10)。結果、定格電力まで放電は観測されなかった。
- ACSバンチャー空洞2号機の大電力試験。この予備試験として、RFエージングを行うための低電力RF系の機器調整並びに、RF窓の上昇温度測定を行うための機器調整を行った(07/9)。
- 大電力立体回路(WR975導波管、サーキュレータ)の位相変動測定(07/11~08/2)。詳細は第3章。

- #3号機クライストロンに発振対策を施すため、予備の#2号機をオイルバスに装着し高圧、RFの両エージング作業を行った。結果、長期保管後の性能劣化は認められず、次に述べるLow $\beta$ 用ACS加速モジュールの大電力試験はこの号機で行うことに決定した(07/12~08/2)。
- Low $\beta$ (E=200MeV相当)用ACS加速モジュール初号機の大電力試験<sup>(2)</sup>。この準備として立体回路の組み換え作業、エージング用低電力RF系の再構築などを行った(08/1~4)。図1にACS加速モジュール(加速セルが17ある加速空洞が2個とブリッジ空洞で構成)が7m×4m×3.5m(高さ)の試験エリア(第2種管理区域)に設置された時の外観図を示す。大電力試験は合計:123時間行なわれ、1.2倍の定格電力までのエージング試験並びに、RF窓温度上昇試験などが行われた。



図1. ACS加速モジュール初号機の外観図

<sup>1</sup> E-mail: hori.toshihiko@jaea.go.jp

・空洞表面の一部に、SUS材を使用することで第2空洞のQ値を下げた#3号機クライストロン改修管の発振並びに、性能評価試験(08/4~7)。発振の有無はフォーカスコイル電流とカソード電圧のパラメータサーチが必要で、非常に複雑である。そこで今回は、最初にクライストロンの入出力特性を調査し、出力飛びなど正常なクライストロン動作以外の2パラメータの組み合わせに着目し性能評価した。結果、定格の110kVまで全ての範囲で発振は生じていない良好なデータを得た。

### 3. 大電力立体回路の位相測定

#### 3.1 導波管位相測定の影響と試験時の機器構成

J-PARCリニアックの高周波源グループでは、400MeVエネルギーアップグレード計画に沿って、972MHz RF機器の最終仕様を継続的に検討している。その一つに、位相を安定化するWR975規格の導波管(材質:Al)の恒温化対策(クラッド材を用いCu水冷配管とAlとを溶接する)を実機で採用するか否かを判断する時期が迫った。大電力RFの伝送ロスから生じる導波管温度変化( $dT$ )と位相変化( $d\phi$ )の関係は

$$\frac{d\phi}{dT} = \frac{2\pi\alpha L g}{\lambda_0^2} (\text{rad/deg.})$$

と表される<sup>3)</sup>。

ただし $\alpha$ =線膨張係数( $Al=23.2 \times 10^{-3} \text{mm/deg.}$ )、 $\lambda_g$ =管内波長:394.1mm、 $\lambda_0$ =自由空間波長:308.4mm、 $L$ =導波管長、である。ここで実機に想定される導波管長:30mを上式に代入すると、

$$\frac{d\phi}{dT} \cong 1^\circ/\text{C}$$

となり、導波管温度変化と位相変動量はほぼ等しい。

予備的な導波管温度測定は2001年10月に行われ、室温状態と定格運転(3MW-600 $\mu$ s-50pps)時との位相差は約20°であった。このデータから972MHz用導波管には既設の324MHz立体回路とは異なり、恒温水( $\pm 1^\circ\text{C}$ )を流す方針をたて、2002年以降に製作した予備、実験用の導波管には全て恒温化対策済みのものが納入された。

今回コスト削減とメンテナンスの容易さ等の観点から導波管の恒温化対策を見直すことになり、以下に示す性能を確認、調査する必要があった。

- 1) 2.5MW-600 $\mu$ s-25ppsの当面のビーム運転時において、比較的短時間のRFトリップ後の再投入されたRF位相が低電力RFシステム<sup>4)</sup>(LLRF)で制御可能な位相:約10°以内に収まっているかどうか。
- 2) 空冷導波管の場合、クライストロンギャラリーの室温変化はダイレクトに導波管位相に反映されるため、ギャラリーの室温変化の現状並びに、空調能力の調査。

今回の大電力試験は1)を検証するために実施したものである。図2に試験時に構築した評価用立体回

路並びに、測定系を含む機器の構成(概略図)を示す。導波管長は実機の1/2スケール(15m)、クライストロン出力条件は2MW-600 $\mu$ s-50ppsである。位相はサーキュレータ及び導波管直後の上流(基準)/下流(計測)に設置した方向性結合器からの信号を位相検出器(PDU-K02,  $\pm 1^\circ$  日高波)で計測した<sup>5)</sup>。

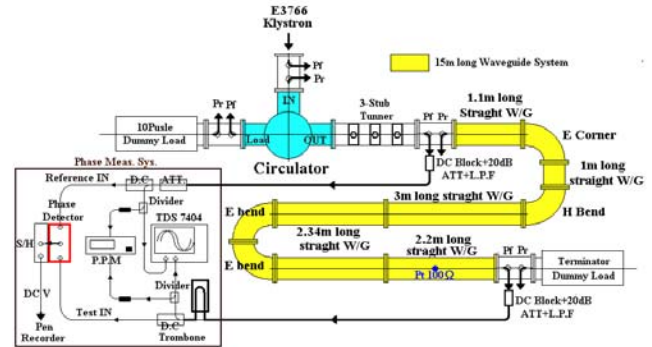


図2. 15m長立体回路、位相測定系などの機器構成

#### 3.2 位相変動のRF停止時間依存性と実験手順

ビーム運転時の立体回路で生じる位相変動の主な原因は、空洞からの反射波電力過大、空洞の真空度悪化などのインターロックによるRFトリップである。インターロック原因が解除され、再度RFが投入された時の位相変動量はRFが停止していた時間によって異なり、停止時間が長くなるに伴い大きくなる。我々のLLRFは、この位相変動を高速の振幅&位相フィードバックシステム<sup>4)</sup>で制御する。しかし、この制御量にも上限があり変動量が大きい場合、必要な性能は満たせない。以上の考察から比較的短時間、RFがトリップしていた後の位相変動量とLLRFでの制御量との大小が導波管恒温化対策の一番の判断材料であると考えた。そこで今回の大電力試験では、導波管温度が飽和したことを確認した後、模擬的に数秒~数分間RFをOFFし、その後RF ONした時点で生じるサーキュレータと評価用15m長導波管の位相変動を測定した。

#### 3.3 サーキュレータの位相測定結果

図3にRF OFF時刻(横軸:0)の5秒前から1分後までの位相変動量の時間的な推移をRF OFF時間:4,7,11,15秒間(図中 Interval Time)毎に示す。なお、この図は時系列の計測データからRF OFFの時刻を図3の時間軸:0に置き換えた。図よりRF ON直後の位相変動量は0.9, 1.65, 2.4, 3.41°で停止期間が長くなると共に大きくなるが、一方その値は時間の経過と共に指数関数的に小さくなる。先の代表的な4点に加えて76, 152, 301, 452, 600秒、合計10点のRF OFF時間と位相変動量との関係を図4のDelt Phase(赤)に示す。図から位相変動量は90秒までの停止時間では大きくなるが、90秒以上RFが停止した場合約6°一定であった。次に位相変動量が1°まで戻る(図3中のデータが縦軸の1°を横切る時刻)時間をリカバリー時間と定義して、この時間と

RF OFF 時間との関係を図 4 の Recovery Time に示した。図からリカバリー時間も 90 秒を境に同様の傾向で、90 秒以上 RF が停止した場合でも約 26 秒一定であった。

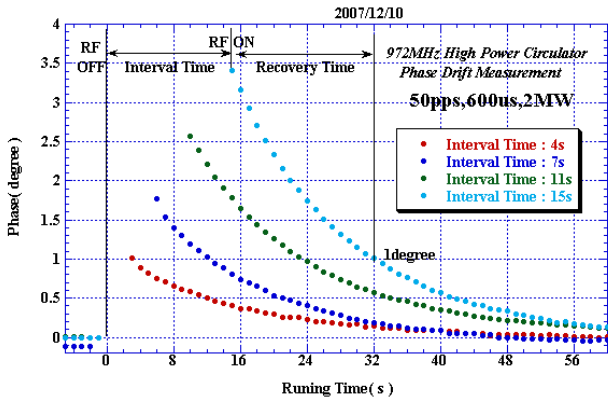


図3. RF OFF時間別の位相変動量の時間的な推移

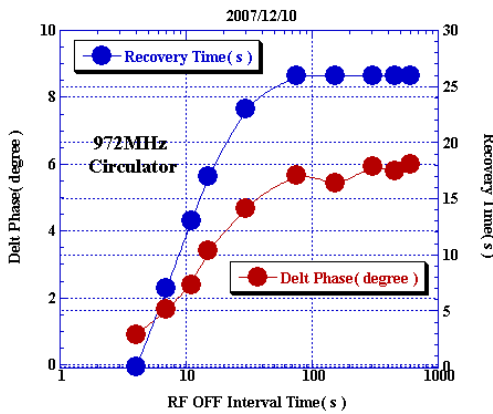


図4. 位相量とリカバリー時間のRF OFF時間と関係

### 3.4 15m長評価用導波管の位相測定結果

導波管温度の飽和時間は約 3 時間で、逆の飽和温度から室温までに要する時間は約 2 時間であった(測定中の室温は  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  以内)。次に、今回の実験で得られた位相検出器での計測値は、3.1 の式から算出される位相量と誤差の範囲内で良く合致した<sup>(5)</sup>。図 5 に今回の実験で得られた位相変動量と RF OFF 時間(5,15,30,90,150,300 秒)との関係を示す。90 秒以下の RF OFF 時間での変動量は  $0.1^\circ$  以下であり、その時間的な変化率も 90 秒以上 RF が停止した場合と比較して非常に小さいデータが得られた。

### 3.5 考察

今回の測定結果から、実機での立体回路の位相変動は最大: 約  $12^\circ$  と算出された<sup>(5)</sup>。しかし、この値はサーキュレータと空冷導波管(30m 長)が室温状態からビーム加速運転時の条件 (2.5MW-600  $\mu\text{s}$ -25pps) までの間に变化する値である。今回の試験で明らかになった導波管の熱応答性が遅いことを考

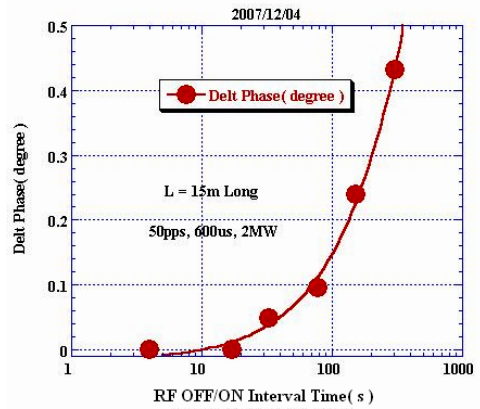


図5. 15m長導波管のRF OFF時間と位相量との関係

慮すると、運転時に一番の問題となる比較的短時間のRFトリップについての位相制御はサーキュレータの位相変動: 約  $6^\circ$  であり、この値は324MHz LLRFの実績から考えて制御範囲内である。324MHz高周波源機器の運転経験から、ビーム加速運転時における比較的長いRF停止には、例えば高压電源のフォルトなどがある。しかし、このケースでも10分もあればその再起動は可能であり、コスト低減を最優先に考えるのであれば、導波管の恒温化対策は必要なしと言える。ただし、これらのデータは室温変動が少ない環境での測定結果であるため、特にクライストロンギャラリーの温度管理が重要である。

## 4. 謝辞

クライストロンの発振対策については高エネルギー加速器研究機構の福田茂樹教授、吉田光宏氏を中心に解析されました。クライストロンの性能試験については製造メーカーである東芝電子管デバイス(株)の坂本光徳氏、浦方弘人氏との共同作業を行いました。位相測定方法と発振評価方法について有意義な助言を頂いた高エネルギー加速器研究機構の穴見昌三教授に感謝いたします。

## 参考文献

- [1]K.Suganuma, et al., "J-PARC リニアック用 972MHz サーキュレータの開発 (1)", Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 4-6, 2004, Funabashi, p275-277
- [2]K.Hirano, et al., "High Power Test of the first ACS Module for the J-PARC Linac", in these Proceedings.
- [3]R. B. Neal, et al., "The Stanford two-mile accelerator", W.A.Benjamin, New York,1968, P356
- [4]Z.Fang, et al., "RF Feed Back System of the J-PARC LINAC", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2007, Wako Japan, p507-509
- [5]T.Hori, et al., " J-PARC リニアック 972MHz 立体回路の大電力試験", 平成 19 年度核融合科学研究所技術研究会, May10-11,2008,Toki, P289-292