

J-PARC リニアックでの 972-MHz サーキュレータ放電とその対策 DISCHARGE OF THE 972-MHz CIRCULAR AT J-PARC LINAC

二ツ川 健太^{*A)}, 相澤 修一^{C)}, 奥山 恒幸^{C)}, 川村 真人^{A)}, 小林 鉄也^{A)}, 佐藤 文明^{B)},
篠崎 信一^{B)}, 千代 悦司^{B)}, 方 志高^{A)}, 福井 佑治^{A)}, 堀 利彦^{B)}, 道園 真一郎^{A)},
Kenta Futatsukawa^{*A)}, Tsuneyuki Okuyama^{C)}, Shuichi Aizawa^{C)}, Makoto Kawamura^{A)},
Tetsuya Kobayashi^{A)}, Fumiaki Sato^{B)}, Shin-ich Shinozaki^{B)}, Etsuji Chishiro^{B)},
Zhigao Fang^{A)}, Yuji Fukui^{A)}, Toshihiko Hori^{B)}, Shin-ichiro Michizono^{A)},

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

^{B)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{C)}NIHON KOSHUHA Co., Ltd.

Abstract

In the J-PARC linac, the injection energy to the next ring was upgraded from 181 MeV to 400 MeV by installing Annular Coupled Structure (ACS) cavities which has the resonant frequency of 972 MHz. Therefore, the 972-MHz RF system had been developed and the twenty-five systems were installed and operated from 2013. The cavity conditioning was started from Nov. 2013, but the discharged problem of some 972-MHz circulars happened. The source was the imperfect RF contact between the body and the metric spring with the problem of the manufacturing accuracy. Ten circulars with the discharge problem were recalled at Dec. 2013 and Jan. 2014 and the others will be improved at this summer. We would like to report the discharged problem of 972-MHz circulars.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC の加速器は、400-MeV リニアック、3-MeV Rapid Cycle Synchrotron (RCS)、30-GeV Main Ring Synchrotron (MR) で構成されており、世界最高クラスの大強度で陽子を加速し、物質・生命科学実験施設 (MLF)、ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設にビームを供給している。各実験施設に設置された水銀、炭素、金などの固定標的に陽子ビームを衝突させて発生した中性子、ミューオン、ニュートリノ、 K 中間子・ π 中間子などの二次粒子を最先端の実験に利用している [1]。

第一期計画ではリニアックの出射エネルギーは 181 MeV であったが、平成 25 年度の 7 月から 11 月の間に ACS 空洞 (Annular-Coupled Structure linacs) [2] 25 式を既設のビームラインの下流に追加することでエネルギー増強を行い、2014 年 1 月に 400 MeV 加速に成功した [3]。既設空洞 (RFQ, DTL, SDDL) が加速周波数 324 MHz であるのに対して、ACS 空洞の共振周波数は 3 倍高い 972 MHz である。そこで、リニアックの高周波 (RF) 機器としては、低電力システム関係の

- 972-MHz 低電力高周波制御システム [4],
- 972-MHz デジタルフィードバックシステム [5, 6, 7, 8, 9],
- 324-MHz/972-MHz の同期を可能とする基準信号分配システム [10],

加えて、大電力の構成要素としては

- 972-MHz クライストロン (最大出力パワー 3 MW, パルス幅 700 μ sec, 周期 50 Hz) [11, 12, 13, 14, 15, 16],
- 972-MHz サーキュレータ [17],
- 972-MHz ダミーロード
- 立体回路 [18]

等を開発する必要があった。これらの 972 MHz の RF 機器は、2013 年の秋からは実機として導入された (図 1)。

2. 972-MHz サーキュレータ仕様

リニアックの設計値である電流 50 mA のとき、今回導入した ACS 空洞はビーム負荷込みで約 2.0 MW の電力が必要となる。伝送経路での損失などを考慮して、972 MHz の RF システムとしては最大電力 3 MW, パルス幅 700 μ sec, 繰り返し 50 Hz の性能が要求されている [1]。サーキュレータに関しても、この通過電力に対して耐圧を持っていることが要求される。表 1 に 972-MHz サーキュレータの性能を示す。当該サーキュレータは、永久磁石を用いた導波管 2 段接合型で、日本高周波株式会社によって量産された。

Table 1: Specification of 972-MHz Circulators

frequency	972 \pm 3 MHz
max. input power	3 MW at peak
pulse width	700 μ sec
repetition	50 Hz
VSWR	\leq 1.15 at 972 MHz
Insertion loss	\leq 0.2dB at 972 MHz
Isolation	\geq 25dB at 972 MHz

3. 972-MHz サーキュレータ放電現象

3.1 大電力試験体制

リニアックのエネルギー増強にあたり 25 式の 972 MHz の ACS 空洞と RF システムを新規導入する必要があった。しかし、冷却水・放射線の観点から構築できた ACS 空洞の大電力試験スタンドは 1 ステーションのみであり、震災以降は 2 式の空洞を抽出して、空

*kenta.futatsukawa@kek.jp

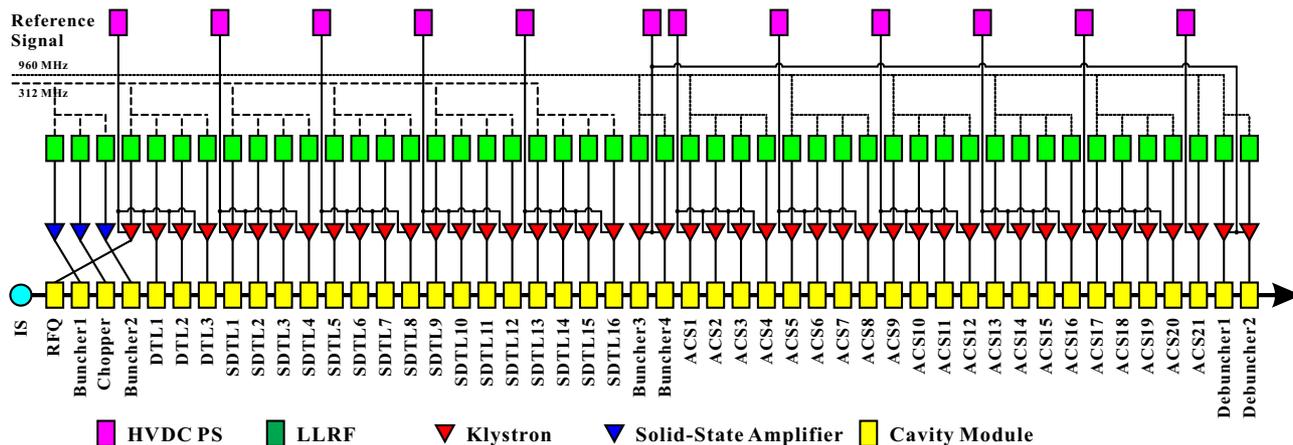


Figure 1: Overview of the RF system at the J-PARC linac. The cavities and the RF systems located upstream of SDTL16 had been operated until 2013. The 972-MHz RF systems (Buncher3,4, ACS01-21, Debuncher1,2) were installed due to the injection-energy upgrade at the summer of 2014.

洞を入れ替えることにより大電力試験を行った [19]。クライストロンの大電力試験スタンドは3ステーション構築して全数の特性試験を行ったが [20]、サーキュレータに関しては量産機に対して大電力試験を行わなかった。これは大きく反省すべき項目のひとつである。

また、2013年7月3日のクライストロン特性試験の最中に、2 MW の出力で ACS17 のサーキュレータで放電が頻発した。日本高周波で当該サーキュレータを分解して観察した結果、フェライトの破片と思われる 1 mm³ 程度の金属片が発見された。しかし、この金属片が放電原因なのか、またはサーキュレータの分解時に混入したのかは判別できないまま調査を終了してしまった。サーキュレータ全式の大電力試験は時間的にも人手的にも容易ではなかったことは事実だが、このときに量産機の耐圧性能を疑うべきであったことは否めない。

従って、2014年11月末のACS空洞のコンディショニング開始までに、量産機サーキュレータの中で大電力の通過を経験していた機器は、25 式中の僅か 4 式のみであった。

3.2 ACS11 における最初の放電

2013年12月3日のACS空洞コンディショニング中に、ACS11でサーキュレータ・アークのインターロックの発報が頻発する事象が発生した。当初、発報時のクライストロン反射波形が乱れていなかったことなどからノイズの混入を疑ったが(図2)、翌日に放電音があったこと、ACS01とACS20でも同様にアークのインターロック発報が頻発したことから、サーキュレータ内部で異常な事象が起きていることは明らかであった。ACS11のサーキュレータを取り外して、クライストロンギャラリで目視や内視鏡で調査を行ったが、放電の痕跡を見つけることは出来なかった。

そこで、のぞき穴付導波管を図3のように2ヶ所に設置し、CCDカメラで放電時のサーキュレータの状態を観測することにした。この時点で、当該サーキュレータの耐圧は700 kW程度に落ちており、放電頻度も数分間に1回程度になっていた。調査の結果、図4にあるように放電時のカメラ映像から、青白く発光していることが分

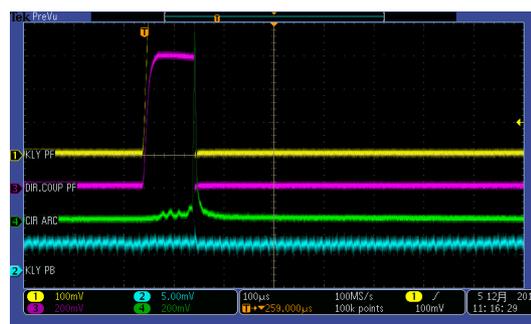


Figure 2: Oscilloscope screen when the circulator arc occurred. The signal of the arc sensor had the sharp peak and RF tuned off by the fast interlock system. However there was almost no variation for the reflection wave.

かった。放電は導波管2段接合型サーキュレータの上段部から生じていることが確認できた。しかし、アークの光りは筐体に反射して発生源の特定が困難であったため、この調査ではカメラアングルを変えても放電箇所を見つけることは出来なかった。そこで、より確実に放電箇所を特定するため、全体が見渡せるサーキュレータのテーパ管にのぞき穴を開ける決断をした。穴開け作業のために当該サーキュレータを日本高周波に持ち帰ったが、そのときに筐体とVSWR調整用のスタブとの間で放電痕が確認された。

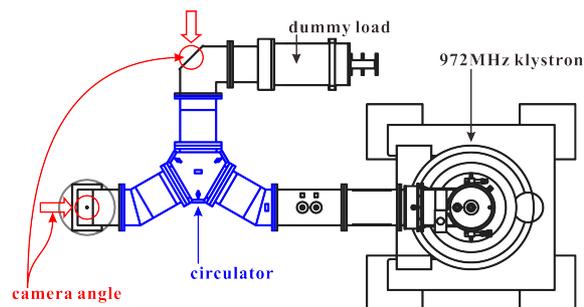


Figure 3: Camera angle to find the discharge source.

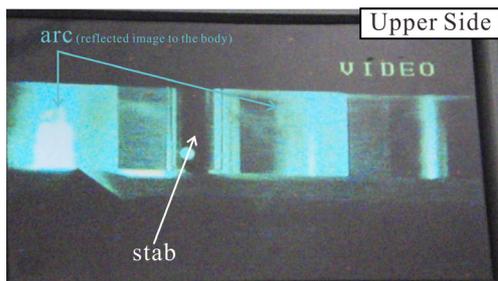


Figure 4: Arc discharge in the ACS11 circulator due to the imperfect contact.

3.3 解体・調査結果

ACS11 サーキュレータ上段のクライストロン側のスタブの根本にある (b) ポスト, (c) 皿バネ, (d) 筐体に放電の痕跡が確認された (図 5)。円型の皿バネと筐体間では放電痕が等しく付いている訳ではなく、偏りが見られた。皿バネはポストが斜めになって筐体との不完全接触になることを吸収するために設置されているが、その役目を十分に果たしていないことが想像された。この皿バネの設計値の高さは 2.0 mm であったが、放電のあった皿バネの高さを測定すると 1.6 mm であった。また、2013 年 12 月から 2014 年 1 月の期間で ACS11 以外にも 9 式のサーキュレータを放電頻発のため改修を行ったが、いずれもスタブ周辺に放電痕が確認されており、皿バネの高さが 2.0 mm に満たなかった。

この皿バネは、7 枚を重ねて型にはめて熱処理して製作されているが、この製造過程に問題があったと思われる。現に、予備品として保持していた皿バネの高さも測定したが、製造誤差が大きいことが分かった。そこで、この皿バネに関して、複数枚の同時製造を止め、1 枚ずつ成形するように製造過程を見直すと共に、製品検査を徹底した。その結果、改修されたサーキュレータにおいては放電が頻発する現象はなくなった。

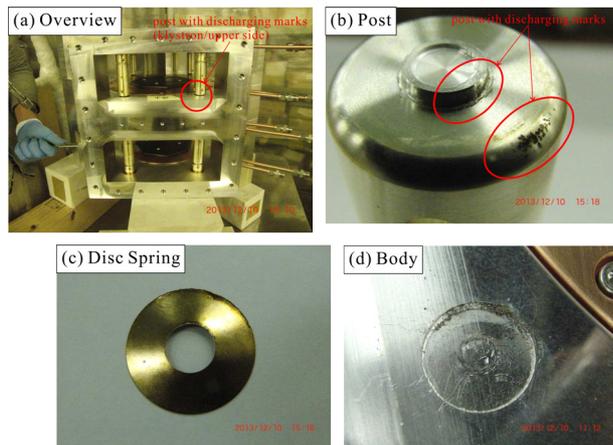


Figure 5: Photographs of discharge marks in the 972-MHz circulator. It was caused by the imperfect contact between posts, disc springs and the body.

3.4 異物混入による再放電

当初、ACS11 に設置してあったサーキュレータは、改修後には ACS20 ステーションに取り付けられた。しかし、当該サーキュレータでの放電が再び頻発する事象が発生した。のぞき穴付導波管を用いてカメラで放電光を確認したところ、場所はサーキュレータ下段で、発光色はオレンジであった (図 6 (a))。前述のポストと筐体の不完全接触が原因の放電 (図 4) とは色合いが異なっていることが分かる。この観察でも、詳しい場所の特定までは至らなかったが、激しい放電音も度々あったことから、既に放電痕はついていて分解して観測することで原因を特定することができると判断して、取り外しと解体を行った。

再び日本高周波に持ち帰り、当該サーキュレータを解体・調査の結果、下段フェライトから金属片 (1 mm³ 程度、磁性体と思われる) が見つかった (図 6 (b))。金属片が熱で溶けた痕跡のあることから、これが放電の原因であると考えられた。従って、サーキュレータ内部を清掃して再組上げを行ったところ、放電の頻発は止まった。ACS09 に関しても、改修後に同様な放電があり、サーキュレータ内部の清掃を行っている。



Figure 6: Discharge in the ACS11 circulator. (a) is the arc picture of the discharge and (b) is metallic materials causing the discharge.

3.5 サーキュレータの移動履歴

ACS 空洞のコンディショニングは 2013 年 11 月から開始されたが、上記でも述べたようにサーキュレータの放電が頻発する不具合が生じた。放電したサーキュレータは計 10 式になり、皿バネの改修には分解・調査した後、新しい皿バネを使用して組立・調整の工程を行う必要があった。一方で、リニアックでのビーム試験は 2013 年 12 月 16 日に開始し、翌 2014 年 1 月末には終了しなければならなかった。必然、ACS 空洞のコンディショニングは、その前に終了する必要がある。

そこで、空洞コンディショニングが目標電力まで到達したサーキュレータを別のステーションに移動して、健全なサーキュレータを複数の空洞で使い回しながらコンディショニングを進めた。また、コミッションングで位相スキャンは上流の空洞から順に行うため、上流のステーションには健全なサーキュレータを設置することでコミッションングの工程への影響を最小限に抑えるよう努めた。図 7 にサーキュレータの移動履歴を示す。

	製造番号 (Circ据付け時)	12月9日	12月10日	12月11日	12月13日	12月16日	12月18日	12月19日	12月20日	12月25日	12月26日	12月27日	1月7日	1月10日	1月16日	製造番号 (1/10現在)	備考
BUN1	544952・23															544952・23	
BUN2	544952・6						取外				取付 (ACS02)					544952・9 (ACS02)	日高波改修品
ACS01	544952・21	取外/取付 (ACS10)														544952・20 (ACS10)	
ACS02	544952・9					取外	取付 (ACS19)									544952・3 (ACS19)	
ACS03	544952・5															544952・5	
ACS04	544952・17															544952・17	
ACS05	544952・11			取外			取付 (ACS15)									544952・16 (ACS15)	
ACS06	544952・22						取外		取付 (ACS20)							544952・1 (ACS20)	日高波改修品
ACS07	544952・19															544952・19	
ACS08	544952・18															544952・18	
ACS09	544952・10					取外						取付 (ACS18)				544952・8 (ACS18)	日高波改修品
ACS10	544952・20	取外	取付 (ACS01)	取外								取付 (ACS09)				544952・10 (ACS09)	日高波改修品
ACS11	544952・13	取外/取付 (ACS01)	取外				取付 (ACS16)									544952・2 (ACS16)	
ACS12	544952・15															544952・15	
ACS13	544952・12									取外		取付 (ACS06)				544952・22 (ACS06)	日高波改修品
ACS14	544952・4															544952・4	
ACS15	544952・16				取外									取付 (BUN2)		544952・6 (BUN2)	日高波改修品
ACS16	544952・2				取外								取付 (ACS11)			544952・13 (ACS11)	日高波改修品
ACS17	544952・14															544952・14	
ACS18	544952・8					取外							取付 (ACS21)			54377 (ACS21)	
ACS19	544952・3						取外							取付 (ACS13)		544952・12 (ACS13)	日高波改修品
ACS20	544952・1			取外			取付 (ACS11)	取外	取付 (ACS01)							544952・21 (ACS01)	日高波改修品
ACS21	54377												取外		取付 (ACS05)	544952・11 (ACS05)	日高波改修品
DB1	544952・7															544952・7	
DB2	549711															549711	

Figure 7: Removal History of the circulators for the discharging trouble.

4. 972-MHz サーキュレータの現状

リニアックの 400 MeV の達成後から本年の利用運転停止後まで(約 5.5ヶ月)の期間のサーキュレータ・アークのインターロック発報数を図 8 に示した。改修済みのサーキュレータの平均発報数(青)は平均で 1.9 回/式、未改修のサーキュレータ(赤)は 1.1 回/式となった。改修済みの発報数が未改修の発報数より多い原因は、改修済みのサーキュレータの中に他と比較して特性の悪い機器(ACS15)が含まれているためである。これらを加味しても、全サーキュレータのインターロック回数の合計は 1 週間あたり 1~2 回であり、利用運転を長時間止める原因とはなっていない。

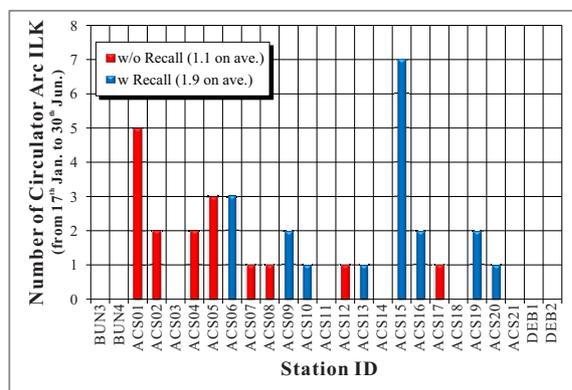


Figure 8: Number of arc interlocks for a 972-MHz circulator from 17th Jan. to 30th Jun.

アークのインターロック発報数の統計データからは、現状の未改修のサーキュレータに問題はないと考えられる。しかし一方で、これらのサーキュレータには品質管理が十分でないときの皿バネを使用していることは事実であり、いつか放電が頻発するかもしれないという不安が拭えない。そこで、我々としては 2014 年の夏季シャットダウン中(7~9月)に未改修のサーキュレータに関しても改修を行い、今後のビーム運転に備える予定である。

5. まとめ

J-PARC リニアックでは、972 MHz の ACS 空洞や RF 機器を導入して、2014 年 1 月から後段の RCS への入射エネルギーを 400 MeV するエネルギー増強を行った。ACS 空洞のコンディショニングの際に、量産型の 972-MHz サーキュレータのポストで放電が頻発した。ポストを支える皿バネの製造過程に問題があったため、製作誤差が大きくなり、筐体との不完全接触を引き起こしていたことが原因であった。最終的には、2013 年 12 月と 2014 年 1 月の間で、10 式のサーキュレータで放電が頻発したため、改修を行っている。2014 年 1 月から 6 月の時点では、未改修のサーキュレータに放電が頻発することはなかったが、2014 年夏季シャットダウンの間に未改修のサーキュレータに関しても、皿バネの交換を行う予定である。

6. 謝辞

ACS 空洞担当者には、当該事象のためコンディショニングが工程通り進められずに迷惑をかけたにも関わら

ず、サーキュレータの脱着に関して手伝って頂き、感謝の意を述べたい。また、日本高周波には、無理のある改修工程であったにも関わらず、製作企業として責任ある対応をして頂きました。誠に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki for J-PARC accelerator design team, "Accelerator technical design report for J-PARC", KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.; <http://www.j-parc.jp>
- [2] H. Ao and T. Sugano, "Development of the annular-ring coupled structure for J-PARC", in these proceedings, SUOLA3, 2014.
- [3] T. Maruta, et. al., "Progress of beam commissioning at J-PARC linac after 400 MeV upgrade", in these proceedings, SUP011, 2014.
- [4] T. Okuyama, et. al., "Development for 972 MHz LLRF System", in these proceedings, SAPI09, 2014.
- [5] S. Michizono, et. al., "Digital Feedback Control for 972 MHz RF System of J-PARC Linac", Proc. of PAC09, p. 2201-2203, 2009.
- [6] T. Kobayashi, et. al., "972-MHz RF Digital Feedback Control System for J-PARC Linac", Proc. of 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1068-1070, 2009.
- [7] Z. Fang, et. al., "LLRF Controller Upgrade for the J-PARC 400 MeV Linac", Proc. of IPAC'10, p. 1434-1436, 2010; Z. Fang, et. al., "Development of LLRF Control Software for the J-PARC 400 MeV Linac", Proc. of 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1068-1070, 2010.
- [8] T. Kobayashi, "Stability Evaluation for Long FB Loop Delay in the ACS Cavity Field Control for the J-PARC LINAC 400-MeV Upgrade", Proc. of LINAC2010, p. 253-255, 2010; T. Kobayashi, "Stability Evaluation with Long FB Loop Delay in the ACS Cavity RF Control for the J-PARC 400-MeV Linac", Proc. of 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1082-1084, 2010.
- [9] T. Kobayashi and M. Ikegami, "Beam Test of Chopped Beam Loading Compensation for the J-PARC Linac 400-MeV Upgrade", Proc. of LINAC2010, p. 256-258, 2010; T. Kobayashi and M. Ikegami, "Beam Test of Chopped Beam Loading Compensation for the J-PARC Linac 400-MeV Upgrade", Proc. of 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 696-698, 2010.
- [10] K. Futatsukawa, et. al., "Upgrade of the RF Reference Distribution System for 400-MeV Linac at J-PARC", Proc. of IPAC2012, p. 2630-2632, 2012; K. Futatsukawa, et. al., "Upgrade of the RF Reference System for the J-PARC 400-MeV Linac", Proc. of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 628-630, 2011.
- [11] A. Yano, et. al., "Development of the Klystron for the High Intensity Proton Accelerator Facility", Proc. of APAC2001, p. 783-785, 2001.
- [12] E. Chishiro, et. al., "Development of 972 MHz Klystron for High-Intensity Proton Accelerator Facility", Proc. of LINAC2002, p. 455-457, 2002.
- [13] M. Yoshida, et. al., "Oscillation Analysis of J-PARC 972 MHz Klystron", Proc. of 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 281-283, 2005.
- [14] E. Chishiro, et. al., "972 MHz RF Source for J-PARC High Energy Linac", Proc. of 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1059-1061, 2009.
- [15] E. Chishiro, et. al., "972 MHz High Power RF Sources for J-PARC Linac", Proc. of 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 936-38, 2010.
- [16] M. Yamazaki, et. al., "原研 972 MHz RF テストスタンド 現状 1", 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, 8P-10, 2002; M. Yamazaki, et. al., "原研 972 MHz RF テストスタンド 現状 2", 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, TP-21, 2003; T. Hori, et. al., "Present Status of 972 MHz RF Test-Stand at JAERI", Proc. of 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 212-214, 2004; T. Hori, et. al., "Present Status of 972 MHz RF Test-Stand at JAERI 2005", Proc. of 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 239-241, 2005; T. Hori, et. al., "Present Status of 972 MHz RF Test-Stand at JAERI 2006", Proc. of 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 346-348, 2006; T. Hori, et. al., "Present Status of 972 MHz RF Test-Stand at JAERI 2007", Proc. of 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 425-427, 2007; T. Hori, et. al., "Present Status of 972 MHz RF Test-Stand at JAERI 2008", Proc. of 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 482-484, 2008.
- [17] K. Sukanuma, et. al., "Development of A 972 MHz Circulator for the J-PARC Linac (I)", Proc. of 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 275-277, 2004.
- [18] 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, p. 289-292, 2008.
- [19] J. Tamura, et. al., "Resuming of ACS high-power test for J-PARC linac energy upgrade", Proc. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 437-439, 2013.
- [20] M. Kawamura, et. al., "Present status of klystron power supply system for J-PARC linac", Proc. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 605-607, 2013.