

972MHz RF SOURCES FOR J-PARC HIGH ENERGY LINAC

Etsuji Chishiro^{1,A)}, Masato Kawamura^{B)}, Masayoshi Yamazaki^{C)}, Yuji Fukui^{B)},
Tetsuya Kobayashi^{A)}, Fujio Naito^{B)}

A) Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

B) High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

C) Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd., 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

In the J-PARC Linac, upgrade with the output energy of 400MeV is performed. In this report, we describe overview of the upgrade scheme and the development status of 972MHz high power rf components. In the klystron development, we suppressed the undesirable oscillations and confirmed klystron operation that satisfies the required specification. And we made minor modification such as downsizing collector form. Although the klystron power supply has same specification for 324MHz PS system, it reports the configuration and manufacture situation. In development of the waveguide, we describe the improvement method of the temperature characteristics of the circulator.

J-PARCリニアック972MHz高周波源

1. はじめに

J-PARCのリニアックは、加速周波数324MHzで200MeVまで加速を行う低 リニアックと972MHzで200MeVから400MeVまで加速する高 リニアックから構成される。低 リニアックの高周波源^[1]は、2006年10月より運転が開始され、現在まで1万1千時間稼働し、良好に動作している。高 リニアックの建設は、2008年に着手され、現在、構成機器の量産を行っており、2010年から逐次リニアック棟に設置される予定である。

図1は、高 部の高周波源の構成を示す。高 リニアックの空洞は、全てACS加速空洞で構成され、1クライストロンあたり1ユニットのACS空洞を駆動する。クライストロンステーションは、バンチャー空洞用に2台、ACS加速空洞用に21台、デバンチャー用に1台で、合計24台のステーションから構成される。クライストロンは、三極管構造の電子銃

を有し、アノード変調器によってカソード電圧を分圧しアノード電圧を発生することによりパルス幅700 μ s、最大繰返し50Hzのパルス運転を行う。1台の直流高压電源は、最大4台のクライストロンを駆動し、バンチャー、デバンチャーステーション用に80kV電源1台、ACS加速空洞用に6台の直流高压電源がクライストロン電源室2に設置される。低 部の高周波源を併せると、電源室に12台の直流高压電源が、クライストロンギャラリーには44台のステーションが設置される。

高 部で要求されるクライストロンの飽和出力は、SUPERFISHコードのシミュレーション結果の80%Q値から空洞の壁損失を、ビームのエネルギーゲインからビームローディングを算出し、これらの和に0.9の伝送損失ファクターとフィードバックのための0.9のRFマージンファクターを除することにより見積もった。その結果、ACS空洞の初段部では2.4MW、後段部で2.6MWの飽和出力が要求される。

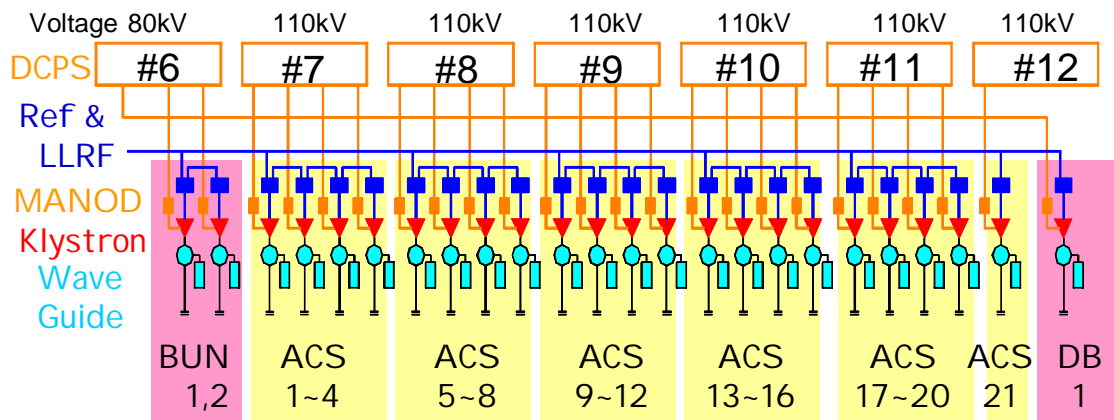


図1: J-PARC リニアック972MHz高周波源の構成図

¹ E-mail: etsuji.chishiro@j-parc.jp

2. 972 MHz クライストロン

2001年より972MHzクライストロンの大電力試験を行ってきた。開発当初、クライストロンの中間空洞である第2空洞、第3空洞の高次モードに起因する発振現象^[2]がクライストロン1号機および2号機で確認された。これら中間空洞の高次モードの電場分布をギャップに対し非対称とし、また、空洞構成材料を高抵抗のものに換えQ値を下げることで定格電圧(-110kV)まで発振が生じないことをクライストロン3号機で確認した。表1は、クライストロンの仕様と試験結果を示す。定量的に評価するためには精度の高い測定系を構築する必要があるが、おおむね要求仕様を満たした結果が得られた。

表1：972MHzクライストロンの仕様および動作値

	仕様	3号機
ビーム電圧 (kV)	110以下	106
ビーム電流 (A)	50以下	45
RF出力 (MW)	3.0以上	3.1
ゲイン (dB)	47以上	51
効率 (%)	55以上	67
パービアンس($\mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$)	1.37 \pm 0.1	1.30
帯域 (MHz)	± 5	± 8

クライストロンの量産を行う前に、コレクターの小型化が4号機に追加された。3号機までのコレクターは、324MHzクライストロンと同形のサイズが採用されてきたが、小型化による重心位置の低下やコストダウンを図るため再設計された。設計では、コレクターからの逆流電子量をシミュレートし、その量が数%以下であることを確認した後、その形状が決定された(図2参照)。2009年現在、4号機は大電力試験中であるが、その動作特性に逆流電子による影響は現れていない。

3号機までの出力窓のセラミックは、日本特殊陶業製のHA-95が用いられてきたが、窓部での発熱を更に低減するため、HA-997に変更された。HA-997において、メタライズの不備によるロー付け不良が懸念されたが、4号機では良好に製造され、窓温度上昇が3号機の半分以下に低減された。

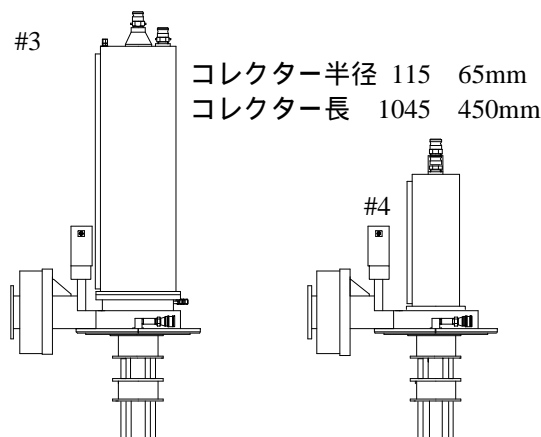


図2：972MHzクライストロンコレクターの小型化

3. クライストロン電源

高リニアックのクライストロン電源は、低リニアックで稼動している機器と同じ仕様の電源を採用した。代表仕様を表2に示す。1台の直流高圧電源より4台のアノード変調器と4台のクライストロンが駆動される。

表2：クライストロン電源の代表仕様

クライストロン駆動数	4台
カソード電圧	110kV(無負荷120kV)
カソード電流	500A(最大)
パルス幅	700 μ s
繰返し数	50Hz
直流電流	6.8A at 110kV
DCフィルター	28.8 μ F, 10H
KLY短絡保護	クローバ(Ignitron5直列)
クローバ動作時間	6 μ s以下
変調器内保護抵抗	14 Ω
変調器内スイッチ	FET150直列
スイッチ遮断電流	1A

次に、電源の仕様が高リニアックの要求を満足するか確認を行った。図3にコンデンサーバンク、アノード変調器およびクライストロンの等価回路を示す。コンデンサー($C_f=28.8\mu\text{F}$)の初期充電電圧を定格電圧である $V_c = -110\text{kV}$ とし、スイッチが閉じてからの各ノードの電圧、電流の過渡応答を差分法により算出し、アノード・カソード間電圧とパービアンスからカソード電流を、カソード電圧・電流およびRF変換効率からクライストロン飽和出力を求めた。クライストロンのパラメータは、パービアンスを1.37、効率を55%とした。図4は、シミュレーション結果を示す。コンデンサーバンクからの電荷流出と直列抵抗の電圧降下によりパルス後半の0.7msでのサグ電圧は5.7kVであり、この時の飽和出力は2.63MWとなった。この出力は1項で記した最大要求

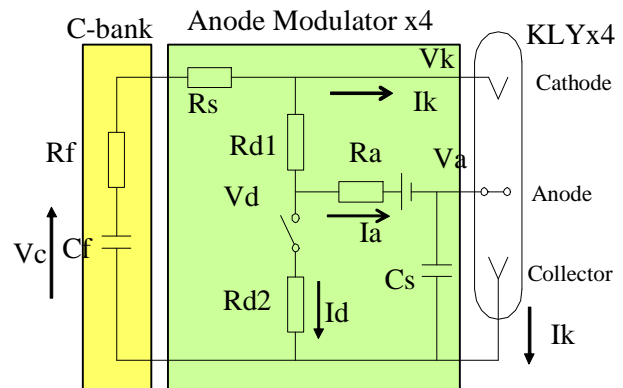


図3：クライストロン電源等価回路(パルス回路のみ)
回路定数;Rf:3 Ω , Rs:14 Ω , Rd1:92.7k Ω , Rd2:12.5k Ω , Ra2:10k Ω , Cs:800pF, Bias:-3kV

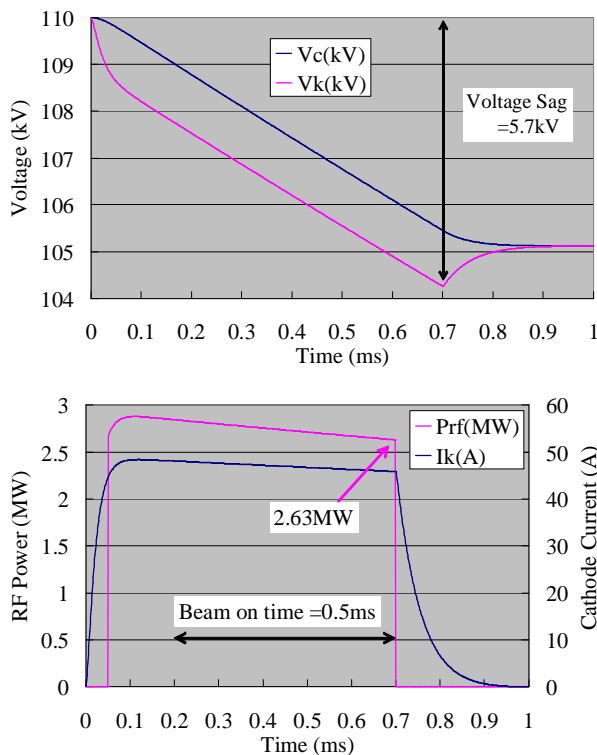


図4：クライストロン飽和出力計算(4台駆動時)

電力とほぼ同じ値であり、本電源の仕様では、高リニアック後段部の電源は定格運転を行うことにより要求電力を供給できることが判明した。実際には効率の良いクライストロンを優先的に後段に配置するなど、負荷軽減に配慮が必要である。

4．立体回路

982MHz高周波源の立体回路は、WR-975規格で製作され、クライストロン出力部からサーキュレータを経てそのまま空洞に接続される。これまでの開発でダミーロード、可とう導波管、方向性結合器、コーナから構成される機器のフルデューティ(3MW、3%)試験を行い、問題なく動作することを確認した。

サーキュレータの評価では、低電力特性や全反射時の耐電圧特性は良好であったが、VSWRの特性が

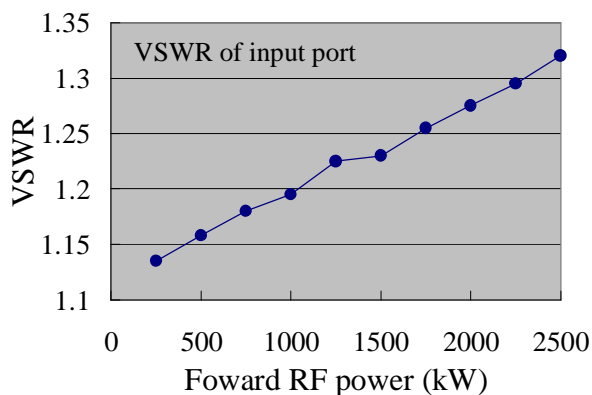


図5：サーキュレータ入力ポートのVSWR特性

悪く、要求仕様を満足できなかった。図5は、サーキュレータの通過電力に対する入力ポート(クライストロン出力側)のVSWR特性を示す。2.3MW以上の通過電力でVSWRが1.3以上となり、クライストロンの最大VSWR耐量である1.3を超過する。この原因はサーキュレータに使用したフェライトの温度特性が影響されているものと考え、現在、飽和磁化率の温度特性が平坦なフェライトで再度、サーキュレータを設計・製作している。

各種機器の健全の確認に加えて導波管の温度上昇に伴う位相のシフト量を測定した。平均電力60kWを長さ15mの導波管(WR-975)に伝送すると、自然空冷状態で6導波管表面温度が上昇した。この時、導波管両端での位相変化量は4.2°であった。この結果からACS空洞に電力を伝送する導波管(長さ30m、平均電力39kW)での位相変化量を推算すると5.8°位相がシフトすると思われる。我々は、当初、導波管を水冷することにより位相を安定化させることを考えていたが、RI系の冷却水の取扱いの困難さや、トンネル内の空調温度が安定していることから、LLRFで位相変化を補正することにし、導波管は自然空冷にすることとした。

5．まとめ

400MeV加速用の大電力高周波源構成機器の発注はほぼ終了し、現在、受注元で量産を行っている。クライストロンは、今年度に4台製作され、2010年以降、順次製作されていく。クライストロン電源は、今年度中にほぼ製作を終え、今年度末からリニアック棟に設置させる予定である。立体回路の内、直導波管の一部は今夏の長期シャットダウン中に敷設を行い、来年度以降も長期シャットダウンを利用して敷設が行われる。新たに設計したサーキュレータは、今年度中に再評価が行われ、その結果をもって量産の成否を決定する。これらの機器の据付けは、リニアックの181MeV共用加速運転を行いながら2011年3月までに終了するよう工程調整しながら実施していく。

参考文献

- [1] E.Chishiro, et. al., "Status of RF System for the J-PARC Linac", Proceedings of the 2nd Annual Meeting Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.239-241, 2005.
- [2] M. Yoshida, et. al., "Oscillation Analysis of J-PARC 972MHz Klystron", This Proceedings. Proceedings of the 2nd Annual Meeting Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.281-283, 2005.