

HIGH POWER TEST OF S-BAND VACUUM ISOLATOR AND CIRCULATOR FOR NEW WAVEGUIDE SYSTEM OF SPring-8 LINAC

Tsutomu Taniuchi^{#A)}, Shinsuke Suzuki^{A)}, Hirofumi Hanaki^{A)},
Atsushi Miura^{B)}, Shigetsugu Tsuruoka^{B)}, Kibatsu Shinohara^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} Nihon Koshuha Co., Ltd.

1119 Nakayama-cho, Midori-ku, Yokohama, 226-0011

Abstract

A pressurized sulfur hexafluoride (SF₆) waveguide system at an electron injector section of SPring-8 linac, will be replaced with a vacuum waveguide system in order to renew old equipments and improve a phase stability. For this renewal, a vacuum RF isolator and a circulator are newly developed. High power RF test for these components were performed and a good result for RF and vacuum characteristics were obtained.

真空仕様 S バンド単向管及びサーキュレータの大電力試験

～ SPring-8 線型加速器電子入射部立体回路真空化に向けて～

1. はじめに

SPring-8 線型加速器は建設以来、性能および信頼性向上のための様々な改良が施され安定運転が続いているが、建設から 14 年を経て経年劣化が進み、更新が必要な機器が出始めている。電子入射部立体回路においても、特にモーター駆動機器の故障、劣化が進んでおり更新が必要となっている。また、本立体回路で使用されている六フッ化硫黄ガス(SF₆)は地球温暖化防止排出抑制対象ガス(地球温暖化係数は CO₂ の 23,900 倍)であり、使用量を極力削減することが望ましい。そこで他の立体回路と同じ真空導波管回路への更新を進めることになった。

真空導波管へ更新するにあたっては、定在波空洞であるプリバンチャー空洞およびバンチャー加速管立体回路で使用されている SF₆ 仕様サーキュレータを真空仕様に変更する必要があるが、真空仕様サーキュレータ製品が存在していなかったため今回新たに開発した。

2. 電子入射部立体回路

2.1 現在の回路構成

SPring-8 線型加速器電子入射部は図 1 に示すように第 1、第 2 プリバンチャー空洞 PB1, PB2 及びバンチャー加速管 B (いずれも定在波空洞) から構成されており、これらに RF 電力を供給するための立体回路は第 1 加速管 (ACC-H0) 用 S バンド 80MW クライストロンの出力導波管から分岐されている。各導波管に通常伝送されているピーク RF 電力は、PB1, 2 系が 12.4kW、B 系が 6.2MW である。パルス幅、繰り返しはそれぞれ 2.5μs、10pps である。本立

体回路には定在波空洞からの反射波を吸収するための加圧 SF₆ 仕様サーキュレータが含まれているため、分岐点から空洞直前までの導波管は RF 窓により真空側と仕切られ、SF₆ ガスが加圧充填(大気圧との差圧 112kPa)されている。加圧 SF₆ 用導波管の肉厚は 4mm であり真空導波管の 5mm に比べ肉厚が薄いために大気圧変動による導波管断面の変形が大きく、これに起因する RF の位相変動がビーム安定度に影響する。そこで SF₆ ガス圧を制御することにより位相の安定化を実現している。

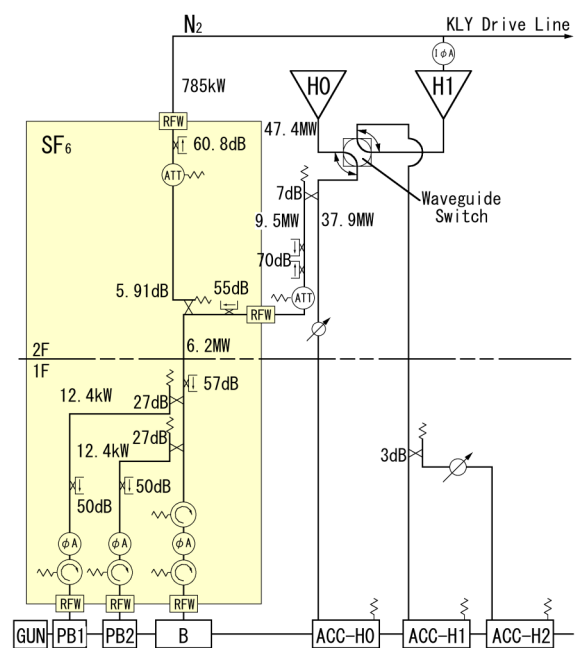


図 1 : 現在の電子入射部立体回路構成

[#] ihcuinat@spring8.or.jp

しかしながら SF_6 の大気放出を極力抑えるため、圧力減少時のみガス供給を行っている。そのため図2に示すように、低気圧通過時に導波管内圧力が最大 3kPa 程度上昇する場合があります。位相変動が生じる。なお、クライストロンドライブライン導波管は建設当初の SF_6 から N_2 に変更され^[1]、圧力および温度がそれぞれ $\pm 0.3\text{kPa}$ 、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内に安定化されているため電子入射部と比べて外乱の影響を受けにくい。

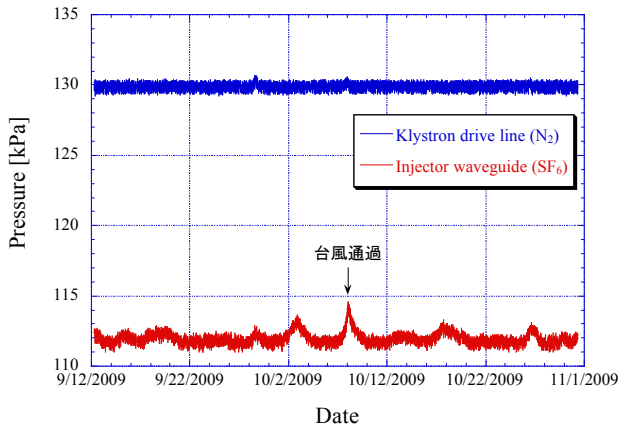


図2：電子入射部立体回路導波管(SF_6)とクライストロンドライブライン(N_2)の圧力変動

2.2 新回路構成

現在検討されている立体回路更新案を図3に示す。本更新における最大の問題点は、真空中で動作するサーキュレータ製品が存在していないことであった。過去に関連する研究開発の報告も無かったため、新たに開発を行うことにした。

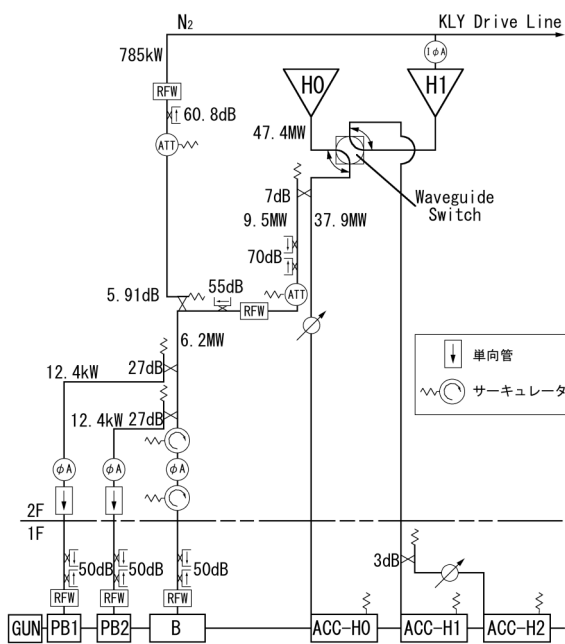


図3：新立体回路構成案

なお、PB1、PB2 伝送ラインについてはピーク電力が 12.4kW と低いため、反射電力をフェライト内

で吸収させる構造で外付けのダミーロードが不要となる単向管の開発を目指した。その他は基本的に現在の回路構成と同じであるが、メンテナンス性を考慮して移相減衰器(ϕA)などのモーター駆動機器を建家2階のクライストロンギャラリーに設置する予定である。

3. 大電力試験

3.1 真空サーキュレータの製作

真空サーキュレータを製作するにあたって最も懸念された点は、真空中でのフェライトからのガス放出であった。そこで、従来から SF_6 サーキュレータで使用されているガーネット系フェライトのガス放出量を測定した結果、単位面積あたりのガス放出量は SUS の 34 倍程度であり、超高真空中でも使用できる事が分かった。ただし、焼結体であるフェライトは表面積が大きいので、表面状態や保管条件によってガス吸着、放出量が大きく変わる事が予想される。

本開発で最も時間を要したのはフェライトと無酸素銅(導波管)の接合方法の検討であった。様々な接合方法を検討した結果、フェライトに金属をはめ込んで、金属と導波管面を真空ハンダ付けする方法を採用した。本接合方法によりフェライトと金属の接合強度、熱伝導ともに良好な結果が得られた。

大電力試験に供する試験体として、単向管及びサーキュレータと同じ磁場条件に設定した移相器を製作した^[2]。

3.2 大電力試験セットアップ

大電力投入試験は SPring-8 の RF 電子銃試験装置を用いて行った。今回使用した大電力試験装置のセットアップ写真を図4に示す。

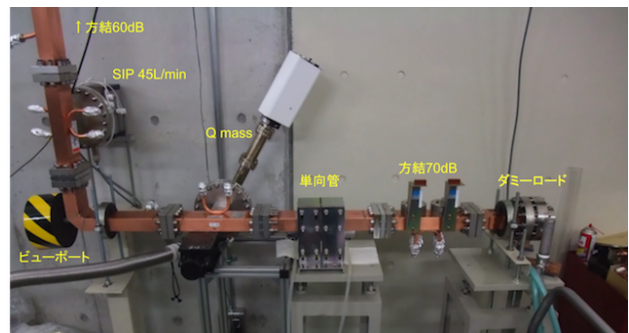


図4：大電力試験セットアップ

RF 窓から試験体(単向管/移相器)を経てダミーロードまでの区間は排気速度 45L/s のイオンポンプ 1 台にて真空排気された。RF 電力の測定は試験体の上下流に取り付けられた方向性結合器にて行い、挿入損失及び VSWR を求めた。また、フェライトの表面温度を BaF_2 窓から放射温度計にて測定するとともに、放電発光をビューイングポートから CCD カメラにて観察した。真空圧力はイオンポンプ

電流にて測定し、残留ガス成分を4重極質量分析器にて測定した。

3.3 エージング履歴

単向管（順方向）のRFエージング履歴の例を図5に示す。磁場中のフェライトへのRF投入ではマルチパクタリングによる真空悪化が予想されたが、数MW以下のパワー領域で圧力上昇が見られたものの、それ以上の領域（～45MW）では深刻な放電、真空圧力上昇は見られず、RF窓やSiCダミーロード等と類似のエージング履歴となった。

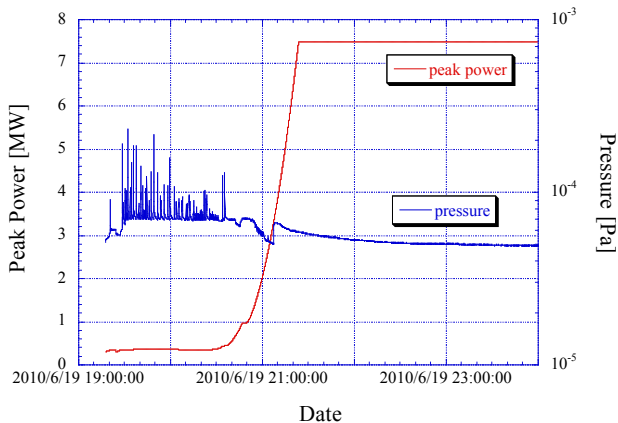


図5：単向管（順方向）エージング履歴

3.3 投入電力に対するRF特性変化

単向管の重要な特性であるアイソレーションを測定するため、単向管を逆方向（RFをフェライトで吸収する方向）に設置し、最大ピーク電力45MW、パルス幅2.5μs、繰り返し10ppsまでの試験を行った。その結果、図6に示すように100kW以上ではピーク電力の上昇とともにアイソレーションが悪化することが分かった。

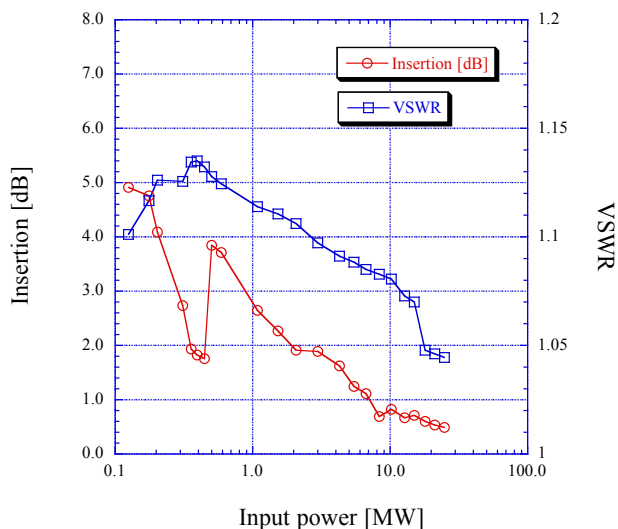


図6：投入電力に対する単向管のRF特性変化

これは、大電力RF磁場により共鳴特性が変化し

ていると考えられる。電子入射部立体回路更新では本単向管を最大ピーク電力12.4kWのPB1、PB2伝送ラインで使用するため、問題ないと考えている。100kW以上の大電力で使用できる単向管を実現するには、特性の異なるフェライトへの変更や、電力に応じて磁場を変化させるなどの対策が必要となる。

単向管の磁場強度をサーキュレータと同程度に上げた移相器についても大電力投入試験を行った。この結果、図7に示すように45MWまでの領域にわたり特性の大きな変化は見られなかったので、サーキュレータとしても良好な結果が得られると予想される。

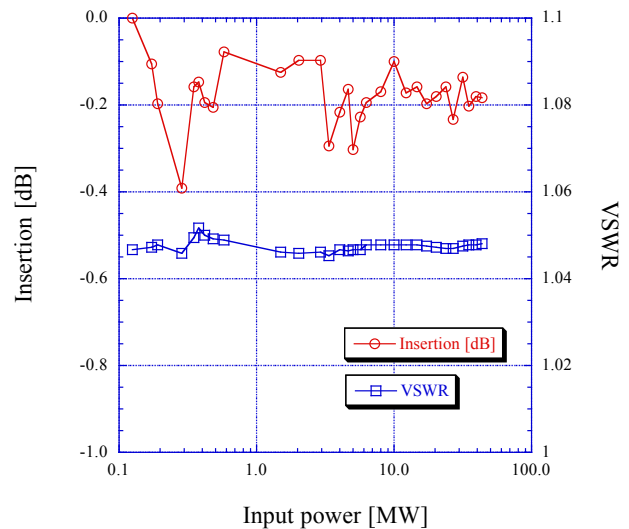


図7：投入電力に対する移相器のRF特性変化

3.3 真空到達圧とガス分析

単向管設置後に粗排気装置にて真空排気を開始し、圧力が 10^4 Pa台に到達後、イオンポンプによる排気を行った。単向管未設置時には排気開始約17時間後には 3×10^{-6} Paに到達するのに対し、単向管設置時は 2×10^{-5} Paであった。これは焼結体であるフェライトからのガス放出が大きいためであると考えられる。フェライト表面は図8に示すような $10\mu\text{m}$ 程度の凹凸構造を有している。

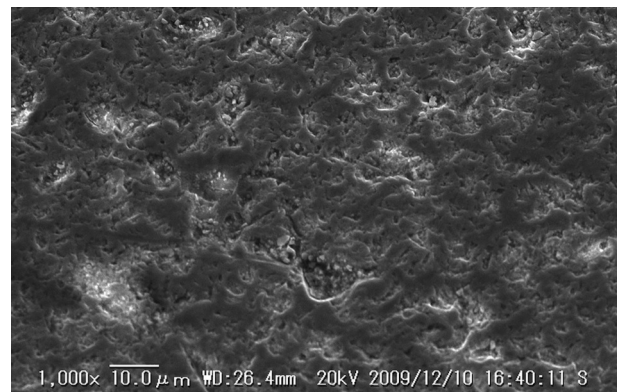


図8：フェライト表面のSEM画像
また、4重極質量分析器による残留ガス測定では

特に H_2O 及び H_2 の割合が大きい (図9)。これは工場での最終調整時に長時間 (約 1 週間) 大気に曝したことによるガス吸着が原因であると考えられる。

そこで、真空排気時にフェライトの冷却配管に 80°C の温水を通水する事によりガス放出を促したところ、到達圧力は $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ に改善した。実機へのインストールでは排気能力を改善するとともに温水ベークを施して、短期間で真空立ち上げ、RF エージングを実施する予定である。

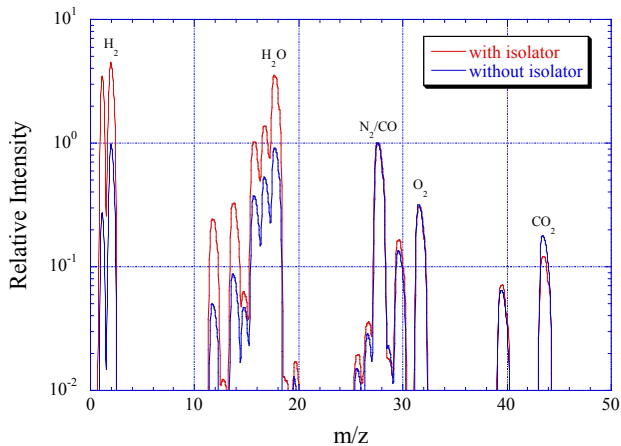


図9：ガス分析スペクトル (N_2/CO に対する相対強度、赤：単向管あり、青：単向管なし)

4. まとめ

SPRING-8 線型加速器では電子入射部 SF_6 立体回路の経年劣化対策および位相安定化を目的として真空立体回路への更新を進めており、新たに真空サーキュレータおよび単向管を開発した。大電力試験の結果、RF 特性および真空特性ともに良好であることが分かり、更新に必要な主要コンポーネントが揃った。今後はサーキュレータ及び単向管の最適化を行うとともに具体的な立体回路設計を進め、2011年度に実機更新工事を実施する予定である。

参考文献

- [1] M. Hirota, et al., “SPRING-8 線型加速器における高周波励振部の安定化”, Proc. of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, 323 (2002).
- [2] A. Miura, et al., “大電力真空サーキュレータの開発”, Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.