

## 真空大電力サーキュレーターの開発

### DEVELOPMENT OF HIGH POWER VACUUM CIRCULATOR

三浦厚<sup>#, A)</sup>, 鶴岡茂嗣<sup>B)</sup>, 篠原己拔<sup>A)</sup>, 谷内努<sup>C)</sup>, 鈴木伸介<sup>C)</sup>, 花木博文<sup>C)</sup>

Atsushi Miura<sup>#, A)</sup>, Shigetsugu Tsuruoka<sup>B)</sup>, Kibatsu Shinohara<sup>A)</sup>,

Tsutomu Taniuchi<sup>C)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>C)</sup>, Hirofumi Hanaki<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Nihonkoshuha.co.ltd

<sup>B)</sup> N・K・S

<sup>C)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

#### Abstract

We have developed high power vacuum circulator for useful exchanging from pressure type (SF<sub>6</sub>) waveguide to vacuum type component. High power tests of Y-junction type vacuum circulator were performed. No discharge was occurred at input power level of 30MW and vacuum level was reached at  $1.3 \times 10^{-5}$  Pa for short aging time. The results show also us that isolation value is depended on input rf power. In case of Y-junction type circulator maximum power range is limited 20 MW under isolation value of 20dB. This phenomena caused by tune shift of ferrite which occurred by high magnetic field strength of input rf power. Two vacuum circulators were installed and operated at injector linac of SPring-8.

#### 1. はじめに

SF<sub>6</sub>等を使用した加圧型の立体回路はコストが安価なメリットがある反面、放電後のメンテナンスや位相の安定度の問題があり真空導波管への切り替えを検討する必要がある。しかしながら真空仕様のサーキュレーターは存在せず、これが切り替えの障害となることが多い。筆者らはまず S バンド真空型単向管を試作し大電力試験を行った。フェライトの真空中でアウトガスの測定、フェライトと金属の接合方法の開発等を行った。試作機は 50MW の大電力試験でも放電なく安定に運転できることを確認した<sup>[1,2]</sup>。高磁場中に置かれた導波管でもマルチパクタ等の異常がないことがわかり、製作技術も確立したと判断し S バンド Y 型真空大電力サーキュレーターの試作を行った。本稿では試作機・実機の製作及び大電力試験について報告する。また真空型単向管の実機も製作・大電力試験したので報告する。

#### 2. フェライトと金属の接合

単向管の場合フェライト形状は一般的に長方形である一方、大電力 Y 型サーキュレーターの場合は一般的に丸型である。金属とセラミックの接合は丸型の方が圧倒的に有利と考えられたが本件の場合上手いかなかった。単向管と同じ接合方法<sup>[1]</sup>で試したがフェライトが割れてしまう。フェライトが割れないような荷重では熱伝導が悪くなるのが分かりまた新たな接合方法の開発が必要になった。円形の場合鏡面加工が安易にできるためフェライト及び無酸素銅を鏡面にして接触させ、更に鏡面間に金箔

を挟み込むことで更に熱伝導を改善できることがわかった。

今回 SPring-8 入射器で使用する真空型単向管と真空サーキュレーターの仕様を Table 1 に示す。今回の仕様ではフェライトでのロスが 11.3W 以下である。鏡面加工+金箔では真空ハンダに比べ熱伝導は劣るが可能であると判断した。

Table 1: Specifications of Vacuum Circulator and Isolator for SPring-8 Injector Linac

	Y-junction vacuum circulator	Isolator
Operation frequency	2856MHz	2856MHz
Peak power	10MW	10kW
Pulse width	2.5 $\mu$ sec	2.5 $\mu$ sec
Repetition rate	10pps	10pps
Isolation	>20dB	>20dB
Insertion loss	<0.6dB	<0.2dB
Input VSWR	<1.1	<1.1
Loss of Ferrite	11.3W (in case of 0.2dB of insertion loss and perfect reflection)	0.25W

#### 3. 真空サーキュレーターの制作

##### 3.1 真空サーキュレーターの構造

Photo 1 に Y 型真空サーキュレーターの外観写真を示す。内部構造は大気型サーキュレーターとほぼ

<sup>#</sup> miura@nikoha.co.jp

同じである。フェライトは水冷機能を持った丸フランジに接合される。そのフランジを Y 分岐の中心の E 面両側にヘリコフレックスシールにてボルト止めする。大気型サーキュレーターと唯一異なる部分である。

VSWR 及びアイソレーションはスタブで補正をする。磁石は高磁界が必要なためネオジウム磁石を使用した。Y 型分岐部分は無酸素銅ブロックから切削加工し導波管を形成する。分岐部分は軸対象とし T 型にするためのコーナー部とは別々の設計をしている。試作器の大電力試験後、実機として同じものを 2 台目として製作した。

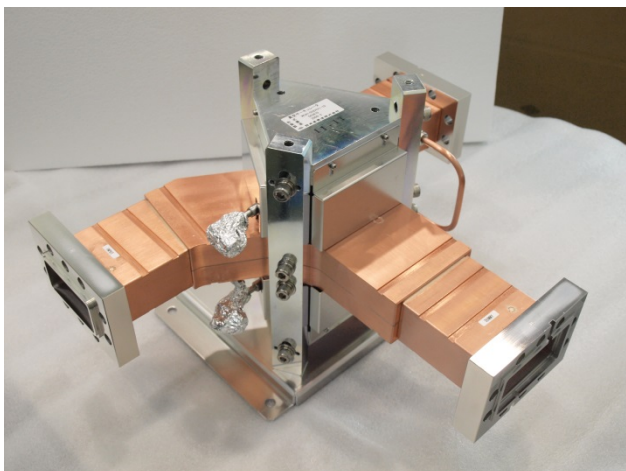


Photo 1: External view of Y-junction type high power vacuum circulator.

### 3.2 真空型単向管

Photo 2 に真空型単向管の外観を示す。試作機の制作と大電力試験については既に報告している<sup>[1]</sup>。試作機のフェライト長を倍にして仕様を満たす様に設計した。これも 2 台製作した。

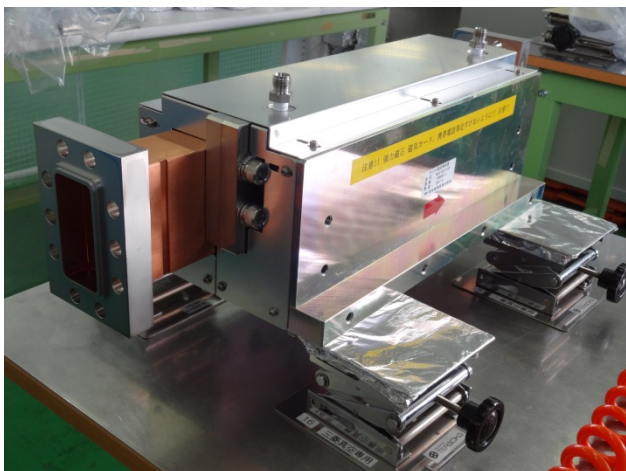


Photo 2: External view of vacuum isolator.

### 3.3 低電力試験

Table 2 に 2 台の真空サーキュレーターと単向管の低電力試験結果を示す。

Table 2: The Results of Low Power Measurement for Vacuum Circulator and Isolator at 2856MHz

At 2856MHz	Vacuum circulator 1	Vacuum circulator 2	Vacuum isolator 1	Vacuum isolator 2
Input VSWR	1.02	1.02	1.05	1.05
Isolation	35.7dB	76.9dB	14.6dB	26.0dB
Insertion loss	0.13dB	0.2dB	0.12dB	0.32dB

真空型単向管は入力 10 kW 時にアイソレーションが最適値になる様磁場調整されているため低電力測定では仕様を満たしていない物もある。

## 4. 大電力試験

### 4.1 大電力試験セットアップ

大電力試験のセットアップを Figure 1 に示す。真空サーキュレーターのダミーポートには SiC ダミーロードを設置した。順方向と逆方向は真空サーキュレーターを逆に接続し挿入損失、アイソレーションの測定を行った。

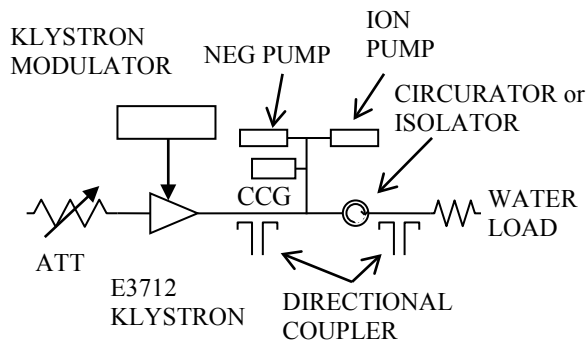


Figure 1: Set up of high power test for vacuum circulator and isolator.

### 4.2 大電力試験結果

真空サーキュレーター試作機の大電力試験を行った。繰り返しは 10Hz で、パルス幅 0.7  $\mu$  sec と 2.5  $\mu$  sec で夫々透過電力を増していった。試作機は低電力でアイソレーションが最大になる様磁場設定されているものである。

順方向エージングの様子はセラミック等の場合と酷似しており、数 MW 以下で多くのアウトガスを放出し、それ以上では比較的順調に電力増加できた。



逆方向は SiC ダミーのエイジングを兼ねるため非常に時間を要し時間的な制約で 14MW までとした。

Figure 2 にパルス幅  $0.7\mu$  と  $2.5\mu$  sec、繰り返し 10Hz で透過電力を増加していった時のアイソレーションと挿入損失を示す。

順方向では 32MW まで電力投入したが、問題となる放電や放電痕は観測されなかった。これも時間的な制約での終了である。逆方向では 14MW まで入力したがアイソレーションは入力電力に依存することがわかる。このカーブはパルス幅  $0.7\mu$  sec と  $2.5\mu$  sec でほぼ同じあり、アイソレーションの電力依存性は熱によるものではないこともわかった。単向管と同様フェライトの共振点のズレが大電力高周波の高磁場で引き起こされていると考えられる<sup>[1]</sup>。サーキュレーターの場合単向管と異なり磁場動作点はフェライトの共振点を使用していない。このため入力電力は単向管と比べ 3 桁異なるがアイソレーションは電力上昇と共に減少することがわかった。単向管実機の大電力試験で磁場強度を調整すると任意の電力でアイソレーションが最大になる様調整できることがわかっていて、入力電力 10MW でアイソレーションが最小になるようにすると 0-20MW の真空サーキュレーターが可能であることもわかった。

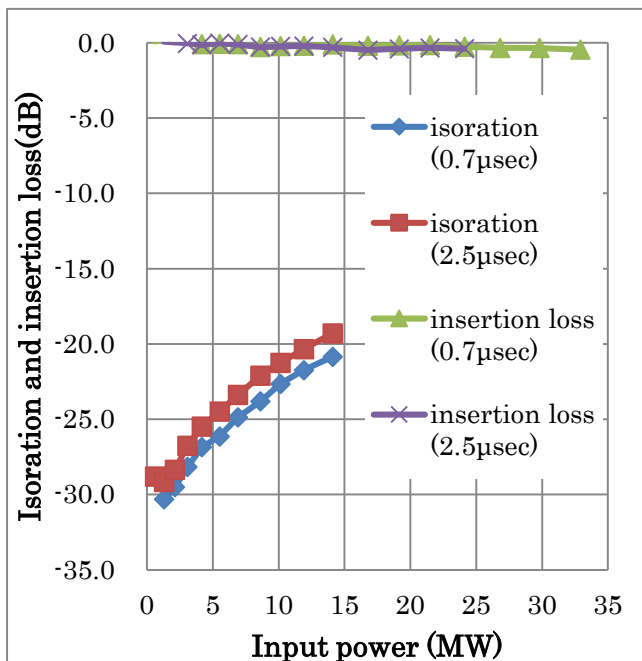


Figure 2: The results of high power test of vacuum circulator. Values inside round brackets show pulse width.

#### 4.3 SPring-8 線形加速器用実機の製作と設置及び運転

試作機を含めて真空型単向管及び真空サーキュレーターを其々 2 台製作した。サーキュレーターは今回 10MW 仕様なので低電力でアイソレーション最大、単向管は入力 10kW 時にアイソレーションが最適になる様磁場調整を行い納入した。2013 年末から加圧導波管の撤去を開始、2014 年 2 月中旬に

真空導波管の設置完了。同年 3 月よりビーム入射を開始した<sup>[3]</sup>。Photo 3 に線形加速器に実装された真空サーキュレーターの様子を示す。

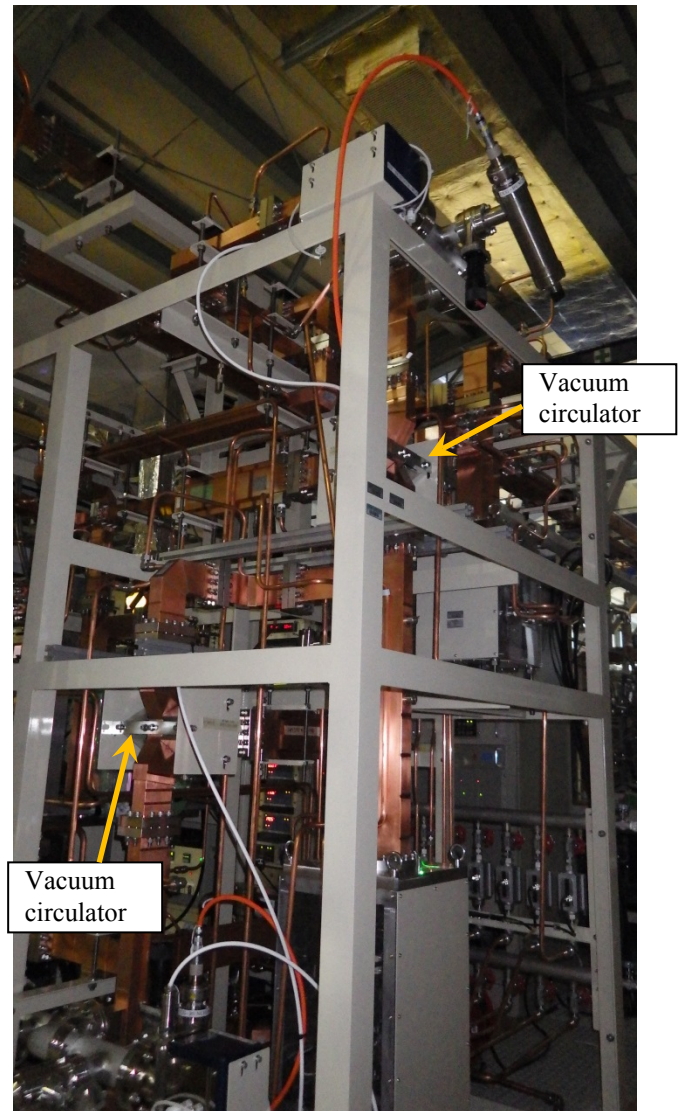


Photo 3: Vacuum circulators and isolators installed at SPring-8 injector linac.

#### 5. まとめと今後

真空サーキュレーターの開発を行い最大電力 10MW の真空サーキュレーターを製作、SPring-8 線形加速器に実装し営業運転を開始することができた。真空サーキュレーターは今のところ問題なく動作している。真空単向管は 1 台ヘリコフレックスシールに失敗しバイトン O リングシールで納入したが、O リングからの透過ガスが認められた。現在周りを乾燥窒素で覆い運転をしている。冬の停止期間中にヘリコフレックスに交換する予定である。

現在 30MW タイプの Y 型真空サーキュレーターを製作している。20dB 以上のアイソレーションは入力電力 10MW ~ 30MW の範囲のみである。またフェライトと金属の熱伝導を改善する必要がある。現在真空ハンダ法より熱伝導の良い接合方法を

