

Xバンド大電力3ポートサーキュレータの設計・製作 DEVELOPMENT OF AN X-BAND 3-PORT CIRCULATOR

金田健一^{*A)}, 水島弘二^{A)}, 草野譲一^{A)}, 田辺英二^{A)}
Kenichi Kaneta^{*A)}, Hiroji Mizushima^{A)}, Joichi Kusano^{A)}, Eiji Tanabe^{A)}
^{A)}AET, Inc.

2-7-6 Kurigi Asao-ku, Kawasaki City, Kanagawa, 215-0033, Japan

Abstract

We newly develop a Y-junction circulator as a high-power component. Experiments of the X-band circulator are conducted with a high power source at 9.3GHz and it withstands 1.1 MW peak power; 0.4 kW of average power. In order to reduce the maximum electric field intensity, we separate two ferrites with large gap. The design was a challenging task since we normally create wide-band circulator with small gap of ferrites. 3D EM simulation was performed in order to overcome those design limitations.

1. はじめに

Xバンド大電力3ポートサーキュレータの開発を行った。サーキュレータはアーキング等の負荷側のインピーダンスミスマッチによる反射電力による発振源の不安定動作や破壊を防ぐ装置である。開発した3ポートサーキュレータはピーク電力300kW、平均電力300Wの可搬型小型高エネルギー加速器システムに使用する予定である^[1]。システムの可搬性を重視するためには装置のコンパクト化が求められる。現在の小型高エネルギー加速器システムは4ポートサーキュレータを使用しており、システム全体が大きくなってしまったため、コンパクトである3ポートサーキュレータの開発が急務となる。

大電力で使用するサーキュレータに使われるフェライトは薄い板状に加工して導波管の上下に貼り付けて使用される。通常ここではフェライトが接着する導波管部の間隔を狭くし、インピーダンスを下げることで広帯域のサーキュレータを設計する。しかし本装置はあえて、放電を抑えるために、2枚のフェライト間隔を広げて電界強度を低くした。VSWR1.1以下の帯域は40MHzになったが、加速器等の狭帯域デバイスで使用する限り問題とならない。

また、非線形効果を避けるために above resonance で設計を行なった。サーキュレータの設計には above resonance と below resonance があり、above resonance は非線形効果が起こりにくいことで知られている。またこのサーキュレータを設計する際には強い外部静磁場が必要のため、ネオジウム磁石を使用した。

本装置が動作周波数9.3GHz、ピーク出力1.1MW、平均出力0.4kWの大電力下で稼動することを確認した。本論文ではシミュレーション結果から設計製作、大電力試験について報告する。

2. Xバンド大電力3ポートサーキュレータの設計

2.1 仕様

基本仕様を Table 1 に示す。

* kaneta@aetjapan.com

Table 1: Specifications of X-BAND 3-PORT CIRCULATOR

| | |
|---------------|-----------------|
| Frequency | 9.3GHz±20MHz |
| Peak power | 300kW |
| Average power | 300W |
| Waveguide | WRI-112 (WRJ-9) |
| Flange | UG-51/U |

2.2 基本設計

大電力サーキュレータを設計する上で考慮すべき課題を以下に挙げる^[2]。

1. フェライト内の電力損失に基づく発熱温度上昇によりフェライトの飽和磁化が変化する。
2. スピン波発生にともなう非線形性の問題が起こり、挿入損失が急激に増える。

課題1の対策として挿入損失を減らすために Calcium, Vanadium ドープのフェライトを選択した。このフェライトは磁気共鳴半値幅 ΔH が非常に少ないことが特徴である。フェライトの挿入損失が低くなると電力損失に基づく発熱量が少なくなる。また、フェライトの温度を一定にするため空冷ではなく水冷方式を採用した。

課題2の対策として共鳴印加直流磁界以上の外部磁場で動作する above resonant 型サーキュレータにする。Above resonant 型サーキュレータは強い外部磁場でフェライト中のスピン方向を一様に揃えることから非線形問題が起こりにくい。共鳴印加直流磁界は

$$H_{res} = \frac{2\pi f}{|\gamma|} + 4\pi M_s \quad (1)$$

である。ここで f は動作周波数、 $4\pi M_s$ はフェライトの飽和磁化、 $|\gamma|/2\pi=2.8$ [MHz/Oe] は磁気回転比 (gyromagnetic ratio) である。

2.3 外部磁場

Above resonance に必要な外部磁界は共鳴印加直流磁界で決まる。式(1)で示したように共鳴印加直流磁界に

はフェライトの飽和磁化が含まれる。飽和磁化は帯域の広さに関するパラメータである。

Magnesium 系や Nickel 系では 3~4kGauss の飽和磁化を持つフェライトも存在するが、一般的によく使われる YIG 系フェライトの飽和磁化は 1.8kGauss 程度であり他の金属をドーピングすることでさらに飽和磁化が低下する。磁気共鳴半値幅が少ない Calcium, Vanadium ドーピングのフェライトの飽和磁化は 1~1.6kGauss になる [3]。広帯域サーキュレータ設計では

$$P = \frac{|\gamma|4\pi M_s}{2\pi f} \quad (2)$$

を 0.7 以上に設定する。P は正負円偏波透磁率の裾広がりを決定するパラメータで値が大きいほど広帯域サーキュレータの設計が容易に行える。しかし、Calcium, Vanadium ドーピングのフェライトを用いた X-band サーキュレータでは動作周波数が高いため、 $0.30 < P < 0.48$ となる。飽和磁化 1kGauss と 1.6kGauss の正負円偏波比透磁率と $\sigma = |\gamma|H_{res}/2\pi f$ の関係を Figure 1 に示す。P が小さいため正円偏波透磁率の変化が急峻であ

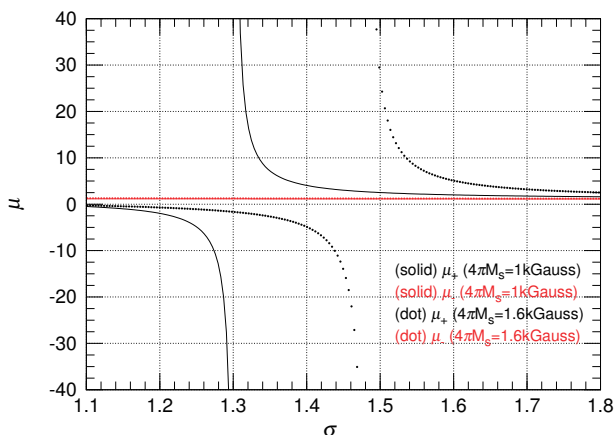


Figure 1: Positive and negative permeability.

る。一方で、飽和磁化が高いフェライトを使用すると共鳴印加直流磁場が大きくなり、above resonance に必要な外部磁場 ($> H_{res}$) を印加することが困難となる¹。本論文では磁気共鳴半値幅が少なく、飽和磁化が低いフェライトである Trans-Tech 社の TTVG-1000($4\pi M_s = 1\text{kGauss}$) を選択した。TTVG は温度によって飽和磁化が変化しやすい欠点があるため、フェライトの温度を一定にする設計が必要である。そこで冷却水を流し、強い静磁場をかける構造にするため Figure 2 のようにネオジム磁石で冷却水をシールする方法を採用した。冷却構造を持たせつつ磁石をもっとも近づけたときにネオジム磁石間隔は 16.6mm となり、静磁場のシミュレーション^[4] から得られるフェライト表面での外部磁場強度は $417\text{kA/m}=5240\text{Gauss}$ ($\sigma = 1.58$) となる (Figure 3)。この構造であれば above resonance で設計するのに十分な静磁場を得ることが可能である。

¹Above resonance に必要な外部磁場は $1.1\sim 1.2H_{res}$ 程度が良いとされる。

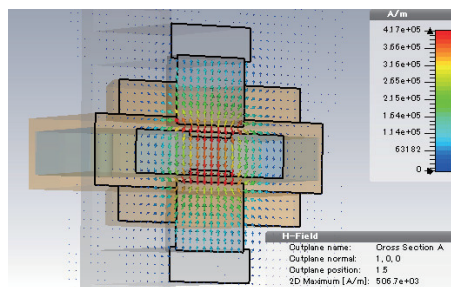


Figure 3: External static magnetic field.

2.4 フェライト寸法

フェライトは熱伝導率が悪いためできるだけ薄くする必要があり。加工性や強度、熱伝導率を考慮してフェライト厚さは 1.5mm に決定した。次に、フェライト径を決めるために以下の式を用いた [5]。

$$a = \frac{X_a(\theta)\lambda_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_{eff}}}\sqrt{\frac{\{t'+\epsilon_r(1-t')\}}{\{t'+(1-t')/\mu_{eff}\}}}\left\{1 + \frac{\eta^2}{2(1+\xi^2)}\right\}$$

where $\xi = \frac{2(1-t')}{t'\tilde{\mu}}$ (3)

ここで λ_0 は自由空間波長、 ϵ_r はフェライトの比誘電率、 $\mu_{eff} = 2\mu_+\mu_-/(\mu_+\mu_-)$ は実効比透磁率、 t はフェライト厚さ、 $2h=12.6\text{mm}$ は導波管の高さ ($t' = t/h$)、 $X_a(\theta)$ は給電角 θ の関数で、フェライトの回転電磁界分布が最適になるのは $\theta=1.3$ [rad.] の時であり、 $X_a(1.3) \sim 1.8$ である。 $\eta = (\mu_+ - \mu_-)/(\mu_+ + \mu_-)$ 、 $\tilde{\mu} = (\mu_+ + \mu_-)/2$ は透磁率に関するパラメータで μ_{\pm} は円偏波比透磁率である。この式を above resonance の設計条件 (共鳴印加直流磁場の 1.2 倍) で計算すると最適なフェライト半径は 7.4mm となる。フェライト寸法が決定したので、300W の平均電力が及ぼす温度上昇を一次元定常熱伝導方程式で計算したところフェライト面の温度差は 5 度以下であった。十分な水流でフェライト接着面の温度を一定にしておけば熱による問題は起こらない。

3. Xバンド大電力3ポートサーキュレータの製作

3.1 Xバンド大電力3ポートサーキュレータの構造

Figure 4 に Xバンド大電力3ポートサーキュレータの外観を示す。内部はサーキュレータの中心に二枚のフェライトが上下に接着した単純な構造である。フェライトの接着後、インピーダンスマッチングのためにスタブで補正を行っている。スタブは電流放電を懸念してネジ止めして低温ハンダ付けした。

3.2 低電力試験

低電力試験での反射特性、挿入損失、アイソレーションを Figure 5、6 に示す。反射損失のピーク位置をあえてずらした。これはフェライトが温度依存性を持つため周波数の低いところにピークがあることで、大電力を入力した時に特性が良くなるように考慮したためである。シミュレーションは測定結果の反射損失ピークにあわせて 9.288GHz で調整している。その後静磁場を変化させて 9.3GHz にマッチングさせ、300kW の入力電力を仮

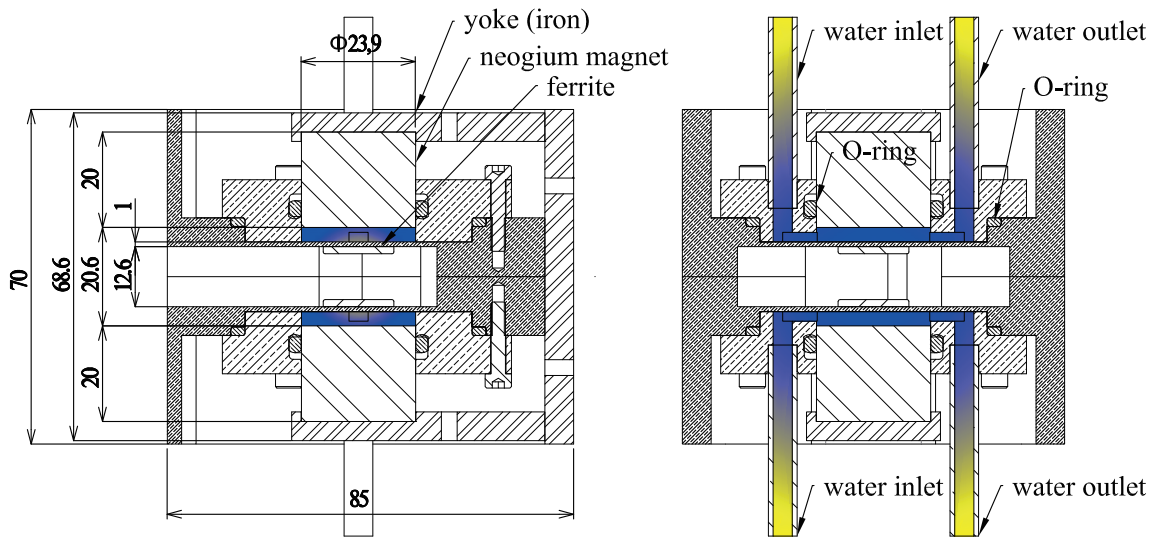


Figure 2: Outline of X-band 3-port circulator.

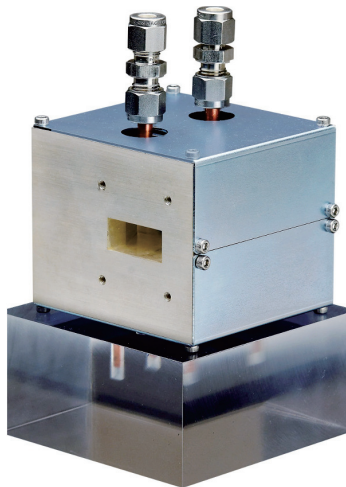


Figure 4: External view of X-band 3-port circulator.

定してシミュレーションするとフェライト表面の最大電界強度は 6MV/m になった。

Figure 7 に冷却水の温度変化によってどの程度特性がシフトするかを示す。本装置は冷却水の温度を 35 °C で使用する。水温が ± 10 °C 変化した時に周波数は ± 7 MHz シフトすることが分かった。これはフェライトの飽和磁化が温度変化によって 4Gauss/°C 変化するためである。

4. 大電力試験

4.1 大電力試験セットアップ

大電力試験を行うにあたり、Figure 8 のようにシステムを構成した。終端側はダミーロードとショートプランジャーを取り換えられるようになっている。

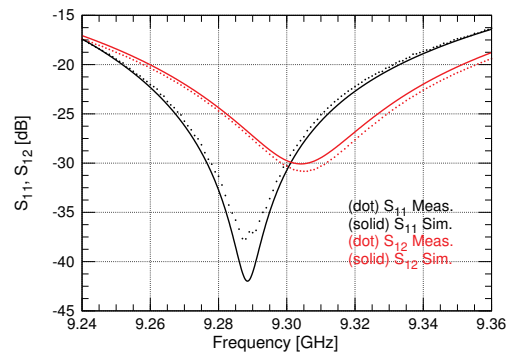


Figure 5: Measurement and simulation of return loss and isolation at input port.

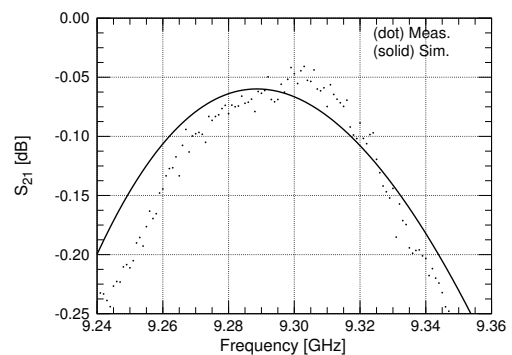


Figure 6: Measurement and simulation of insertion loss from input port to output port.

4.2 終端をダミーロードとした時の大電力試験結果

3.5 μ s 100pps 出力のマグネトロンで大電力試験を行った。その結果を Figure 9,10 に示す。VSWR が RF power の上昇につれて減っているのは反射特性が高周波側にシフトしたためと考えられる。高周波の高磁場でフェライ

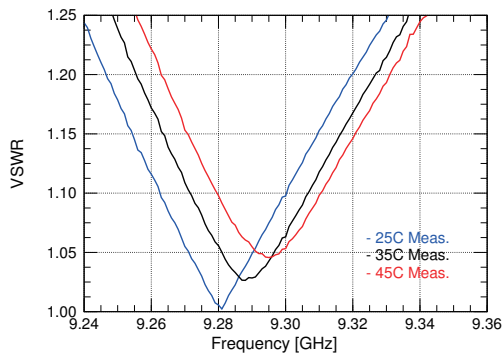


Figure 7: Return loss at input port.

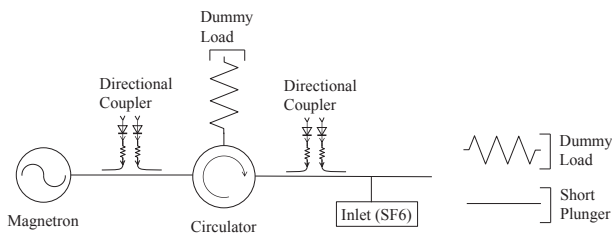


Figure 8: Set up of high power test for X-band 3-port circulator.

トの共振点がシフトすることは他の論文でも指摘されている^[6]。温度の影響でシフトしたのか、高周波磁場でシフトしたのかを検討する必要がある。しかし、この試験では時間が十分なかったため、その検証を行なうことが出来なかった。

サーキュレータなしでの測定を back ground とし、その影響を差し引くことでサーキュレータの電気特性が低電力試験と近いことがわかる。マグネトロンで 1.1MW の大電力を通したが、反射波形の乱れはなかった。つまり大きなアーキングが起こらなかったことを確認した。

4.3 終端をショートプランジャーとした時の大電力試験結果

ショートプランジャーを製作して終端側に取り付け大電力印加時にショート板の位置を変えて VSWR が最も大きくなったときに数分間放置して特性が変わらない

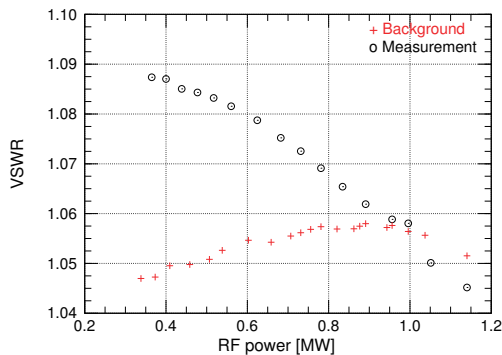


Figure 9: VSWR at 9.3GHz at input port.

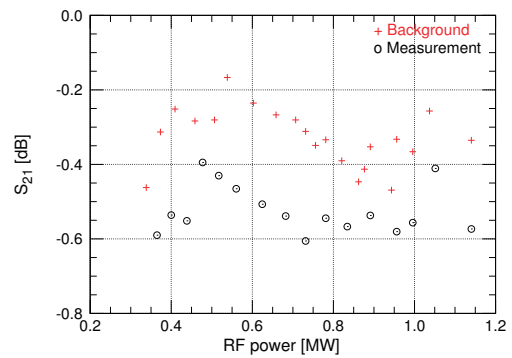


Figure 10: Insertion loss at 9.3GHz from input port to output port.

ことを確認した。本試験では、ピーク 300kW のマグネトロンを使用し、繰り返し 300pps, 2.8 μ s のパルスで連続運転している。Output 側をショートにして最大負荷となる時に VSWR は 1.29 で挿入損失は -0.35dB であった。この試験中もアーキングは起こっておらず、安定に動作することを確認した。

5. まとめと今後の課題

9.3GHz 大電力 3 ポートサーキュレータの開発を行い、大電力試験をおこなった。大電力サーキュレータを設計する上で電界強度を知ることは重要である。シミュレーションからその最大電界強度は 6MV/m であることが分かった。シミュレータの進歩により様々な条件を与えている角度で物理現象を観測できるようになっている。例えば、静磁場を変えてサーキュレータの特性が変わることもシミュレーションで再現できる。この試験結果から本装置は SF6 ガスを加圧して 300kW の電力で使用するのには問題ないことが分かった。将来的にはさらにハイパワーを入力する予定である。

最後になりましたが、大電力試験を行うに当たり協力をしていただいた東京大学の土橋様、またその他関係者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] <http://www.accuthera.com/accelerator.php>
- [2] Y. Konishi, A high power U.H.F circulator, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT15, pp. 700-708, 1967.
- [3] <http://www.trans-techinc.com/>
- [4] <https://www.cst.com/>
- [5] Y. Konishi, 実用マイクロ波技術講座—理論と実際〈第4巻〉, ケイラボ出版, pp. 74.
- [6] A. Miura, et al., "真空大電力サーキュレータの開発", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.