

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

金田 健一^{*A)}、水島 弘二^{A)}、田辺 英二^{A)}、豊川 弘之^{B)}
Kenichi Kaneta^{*A)}, Hiroji Mizushima^{A)}, Eiji Tanabe^{A)}, Hiroyuki Toyokawa^{B)}

^{A)}AET, Inc.

^{B)}AIST

Abstract

We newly develop a Y-junction circulator as a high-power component for AIST. Experiments of the C-band circulator are conducted with a high power source at 5.3GHz and it withstands 450 kW peak power. In order to reduce the maximum electric field intensity, we separate two ferrites with large gap. 3D EM simulation was performed in order to overcome those design limitations.

1. はじめに

産業技術総合研究所では道路床版や鉄筋コンクリート構造物などの社会インフラの劣化診断を高精度かつ迅速に行うため、高エネルギー X 線を用いた後方散乱 X 線イメージングによる非破壊検査手法の研究をスタートしたところである。小型電子加速器のメリットである可搬性を活かし、野外でのコンクリート内部を高精度画像として可視化することを目指している。そのための X 線源として 1 [MeV] 以下の小型電子加速器を開発することとなった。よりコンパクトにするため加速管はシャントインピーダンスの高い定在波型にした。定在波型加速管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マグネトロン不安定動作や破壊を防ぐため、アイソレータが必要になる。コンパクト化を求めピーク電力 600 [kW]、平均 600 [W] マグネトロン用アイソレータとして海外製 3 ポートサーキュレータを採用したが、大電力試験中に非線形効果を確認した。調査を行ったところ海外製サーキュレータは Below Resonance で設計されていた。海外製 3 ポートサーキュレータが 600 [kW] の大電力下で使用できないことが分かったので、緊急措置として 4 ポートサーキュレータを使用して後方散乱 X 線試験を行なったが、システム全体が大きくなってしまったため、コンパクトな 3 ポートサーキュレータの開発が急務となった。今回開発したサーキュレータは放電を抑えるためにフェライト間隔を広げ、非線形効果を避けるために Above Resonance で設計している。サイズは海外製 3 ポートサーキュレータより小さく設計した。本装置が動作周波数 5.3 [GHz]、ピーク出力 450 [kW] の大電力下で稼動することを確認した。マグネトロンの出力が下がっていたため 600 [kW] までの試験は行えなかったが、結果を見ると 600 [kW] で問題なく使用できそうである。またショート板を用いた負荷側が完全反射した場合の大電力試験も実施している。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。

*kaneta@aetjapan.com

2. Cバンド大電力3ポートサーキュレータの設計

2.1 仕様

開発した C バンド大電力 3 ポートサーキュレータの基本仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specifications of C-Band 3-Port Virculator

Frequency	5.3GHz±20MHz
Peak power	600kW
Average power	600W
Waveguide	WRI-187 (WRJ-5)
Flange	UG-148C/U
WG pressure	0.2MPa
Cooling water flow rate	0.5 [L/min]
Cooling water temp.	30±5 [°C]

2.2 基本設計

大電力サーキュレータを設計する上でフェライトのスピン波の発生に伴う非線形効果と電力損失に基づく発熱の問題を考慮すべきである [1]。そこで使用実績のある Trans-Tech 社 [2] の TTVG-1000(飽和磁化: 1kGauss) Calcium, Vanadium ドープフェライトを選択して、Above resonant 型サーキュレータで設計した [4]。シミュレーションの結果、フェライトは薄くするほどフェライトの表面電界強度が低くなることが分かった。しかし、薄すぎるとサーキュレータとしての動作しない。そこで加工性や強度、熱伝導率を考慮してフェライト厚を 2 [mm] とした。また、フェライト径は理論式から 13.1 [mm] に決定した [3]。

3. Cバンド大電力3ポートサーキュレータの製作

3.1 Cバンド大電力3ポートサーキュレータの構造

Figure 1 に C バンド大電力アイソ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構造である。Figure 2 に示すよう

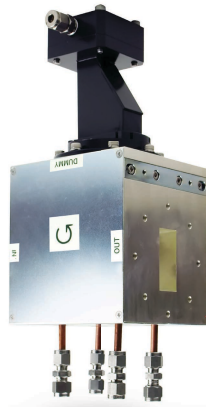


Figure 1: External view of C-band 3-port circulator.

に、フェライトを取り外すことも考え、フランジ形状にしている。また、フランジの接触面が放電しないように接触部の電界強度、電流密度が高くないことを CST STUDIO SUITE[5] を用いて確認した。

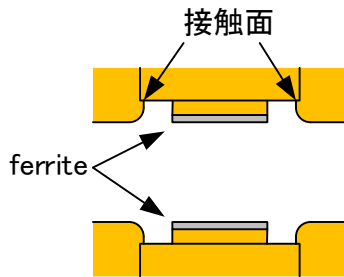


Figure 2: Cross-section view of C-band 3-port circulator.

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 3、4、5 に示す。水温を $\pm 5 [^{\circ}\text{C}]$ で変化させて測定を行った。シミュレーションは実際に使用する水温 $30 [^{\circ}\text{C}]$ の測定結果にあわせて設定した。600 [kW] の入力電力を仮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 $2.7 [\text{MV}/\text{m}]$ であった。

測定の結果水温が $\pm 5 [^{\circ}\text{C}]$ 変化した時に周波数は $\pm 10 [\text{MHz}]$ 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 $4 [\text{Gauss}/^{\circ}\text{C}]$ 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

大電力試験は Figure 6 のテストシステムを構成した。終端側はダミーロードとショート板を取り換え

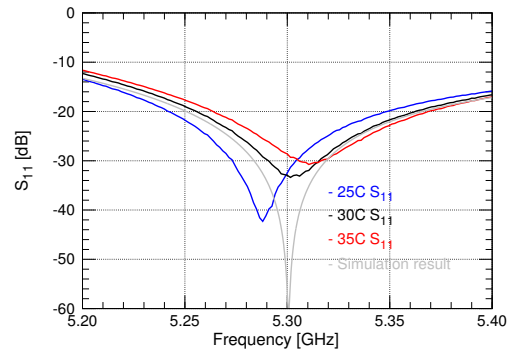


Figure 3: Measurement and simulation of return loss at input port.

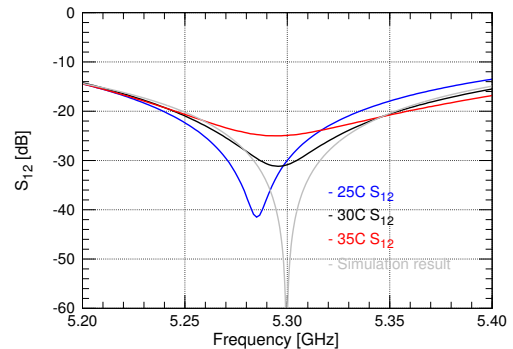


Figure 4: Measurement and simulation of isolation.

ることが可能である。異なるセットアップで大電力試験結果を比較する。また、ショート板については管内波長 $\lambda_g/4$ のスペーサを用いることで、最大負荷試験が行える。

4.2 終端をダミーロードとした時の大電力試験結果

パルス幅 $2 [\mu\text{s}]$ 、繰り返し $100 [\text{pps}]$ の出力で大電力試験を行った。試験後にサーキュレータを左右反転させてアイソレーションの測定も行っている。その結果を Figure 9, 10 に示す。試験結果から終端がダミーロードであれば $450 [\text{kW}]$ まで問題なく使えることが分かった。

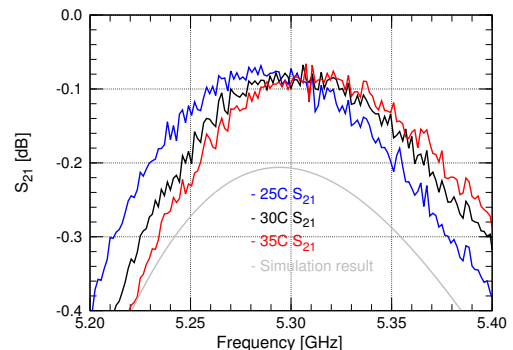


Figure 5: Measurement and simulation of insertion loss.

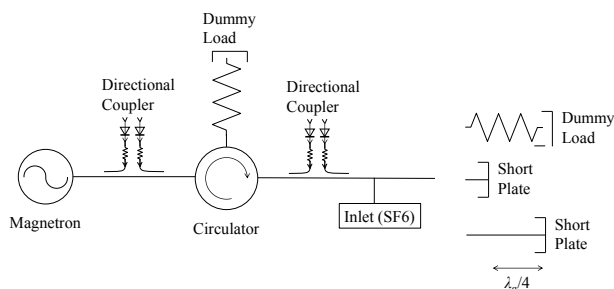


Figure 6: Set up of high power test for C-band 3-port circulator.

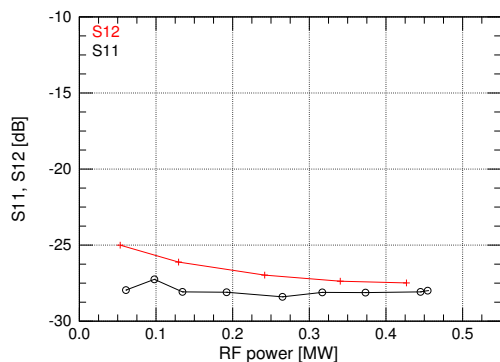


Figure 7: Return loss and isolation at 5.3 [GHz].

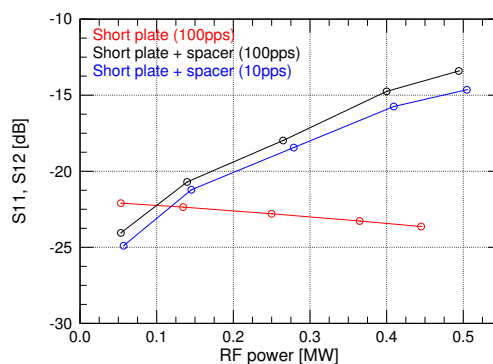


Figure 9: Return loss at 5.3 [GHz].

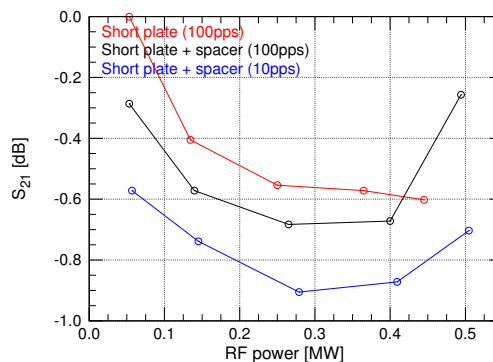


Figure 10: Insertion loss at 5.3 [GHz].

4.3 終端をショート板とした時の大電力試験結果

次にショート板を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大電力試験を行った。管内波長 $\lambda_g/4$ 厚のスペーサーを取り付けて試験した結果、反射特性が入力 RF パワーに従い劣化することを確認した。熱の問題であることも考えられるので Duty を 1/10 にして試験したが、その傾向は変わらなかった。一方で挿入損失には RF パワーに応じた変化が無い。 $\lambda_g/4$ スペーサーを取り付けて試験した場合、フェライト上で強電磁場が発生して、フェライトのスピン運動を阻害していると考えられる。

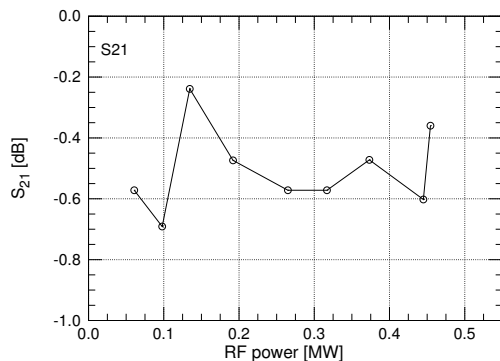


Figure 8: Insertion loss at 5.3 [GHz].

5. 最大電界強度

今回の反射特性が入力 RF パワーに従い劣化する現象をシミュレーションで検証するため、大電力試験構成をモデル化してシミュレーションした。その結果、 $\lambda_g/4$ スペーサーがあったときに電界強度が最も高い結果を得た。推測であったフェライト上の強電磁場が発生して、フェライトのスピン運動を阻害していることを裏づける結果として Figure 11 に示す。シミュレーションの結果、今回開発したサーキュレータは最大電界強度が 4.5 [MV/m] を超えると問題が起こることがわかった。一方で、去年製作した X バンドサーキュレータでは 6 [MV/m] で問題がなかったことを考えると、今回製作したサーキュレータの耐電界強度値が低下していることが分かった [4]。これは温度試験をしたときに温度変化による特性の変化が X バンドサーキュレータに比べて大きかったことが関連していると考えられる。結論として、動作点である外部磁場が適切な設計値よりも低かったのではないかと考える。

6. まとめと今後の課題

5.3GHz 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った。今回の結果より、よりハイパワーで使用できるサーキュレータを設計するためには外部磁場を十分大きくすればよいことが分かった。または温度特性変

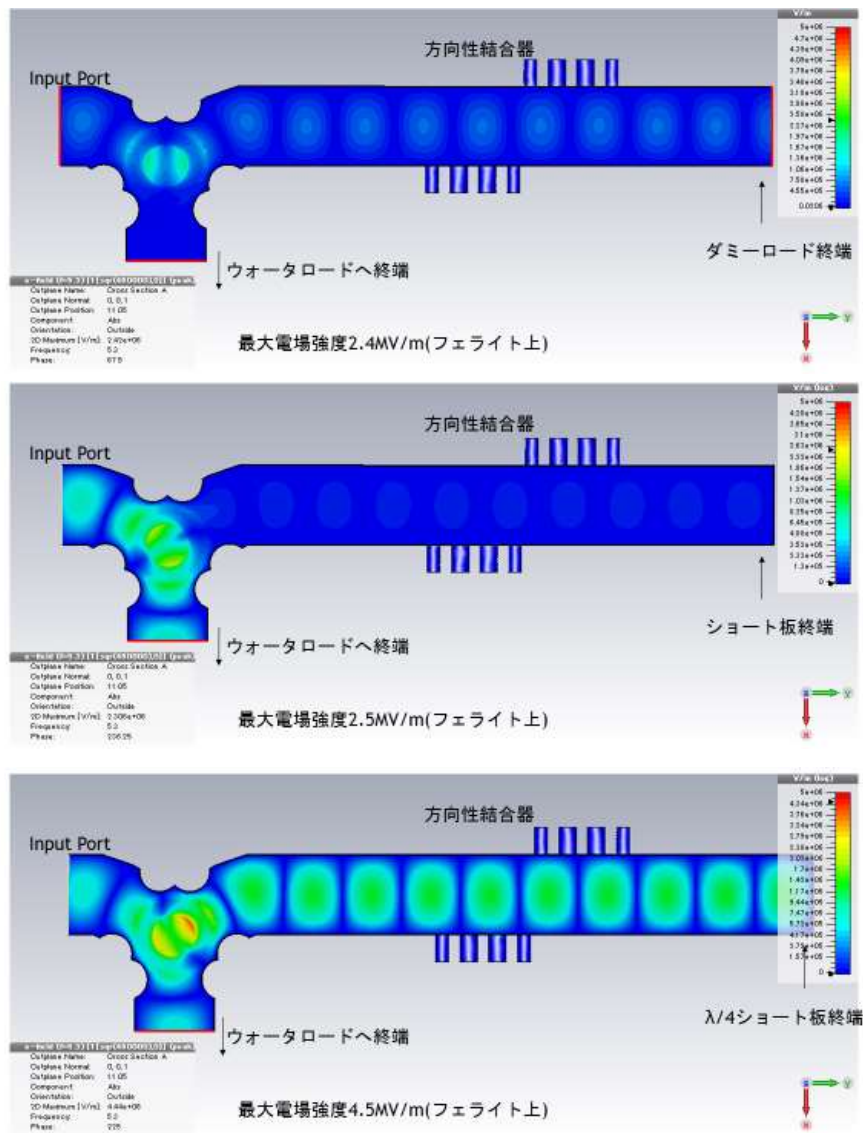


Figure 11: Simulation results (480 [kW]).

化の少ないフェライトを選択する方法も考えられる。今回の試験で加速管とサーキュレータとの物理的距離を適切に選択すれば、今回開発したCバンドサーキュレータがピーク電力 600 [kW] の大電力下で問題なく稼動することが分かった。要望があれば、さらにハイパワーの3ポートサーキュレータの開発を進めていく予定である。

参考文献

- [1] Y. Konishi, A high power U.H.F circulator, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT15, pp. 700-708, 1967.
- [2] <http://www.trans-techinc.com/>
- [3] 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.
- [4] K. Kaneta *et al.*, "Xバンド大電力3ポートサーキュレータの設計・製作", Proceedings of the 12th Annual Meeting

of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 5-7, 2015.

- [5] <https://www.cst.com/>