

# 大電力3-portサーキュレータの開発

株式会社エーイーティー  
金田健一

# 概要

- 可搬型大電力加速器システム(非破壊検査装置、がん治療装置等)のコンパクト化
- X-band加速器システム→コンパクトな装置



非破壊検査装置

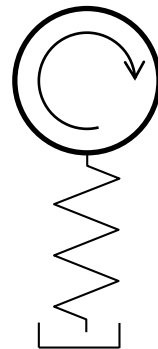
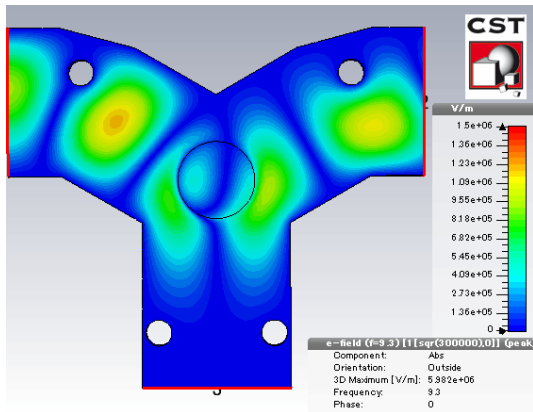
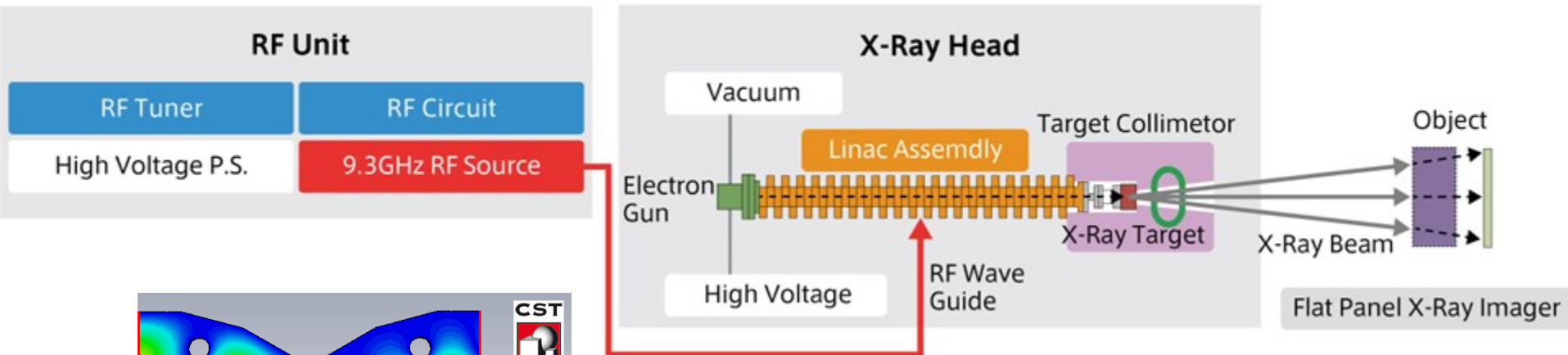


がん治療装置

# 概要

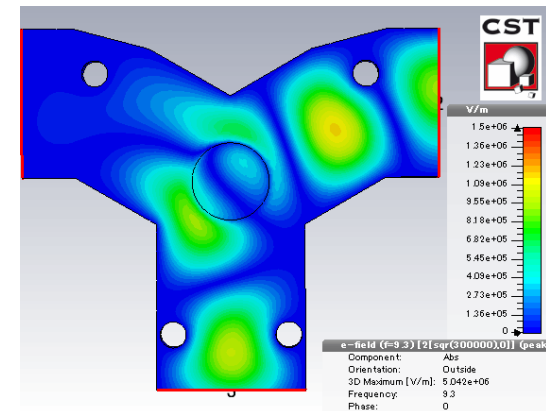
- 大電力が反射した時パワーソース(RF Source)を保護するために“サーキュレータ”を導入する

## System Configuration

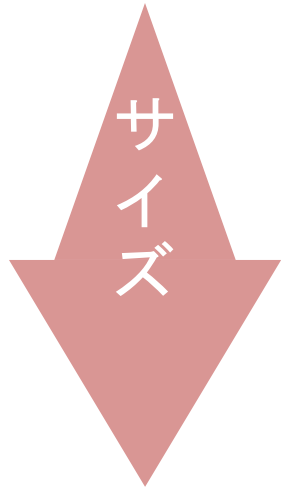


Circulator

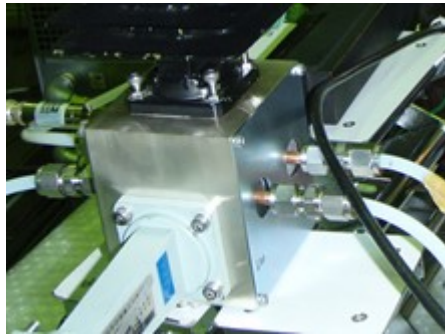
Dummy load



# アイソレータ(サーキュレータ)の種類



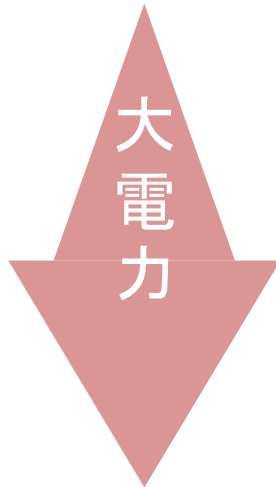
単向管



3ポートサーキュレータ



4ポートサーキュレータ



# 3portサーキュレータ

- Resonance条件

$$H_r = \frac{\omega_0}{|\gamma|} + 4\pi M_s$$

$H_r$ : 共鳴磁場

$H_0$ : 外部磁場

$\omega_0$ : 角周波数

$\gamma$ : 磁気回転比

$4\pi M_s$ : 飽和磁化

$$H_0 > H_r$$

## Above resonance設計

帯域が狭い、大電力下でも安定

$$H_0 < H_r$$

## Below resonance設計

帯域が広い、大電力下で挿入損失が大きくなる

# フェライトの種類

		飽和磁化	磁気共鳴半値幅			
		Saturation Magnetization (Gauss)	Line Width (Oe)	Dielectric Constant	Curie Temperature (°C)	
YIG (Yttrium Iron Garnet)	Calcium Vanadium Doped	TTVG-1000	1000 ± 5%	<=10	14.0 ± 5%	199
		TTVG-1100	1100 ± 5%	<=10	14.1 ± 5%	205
		TTVG-1200	1200 ± 5%	<=10	14.4 ± 5%	208
		TTVG-1400	1400 ± 5%	<=10	14.5 ± 5%	215
		TTVG-1600	1600 ± 5%	<=10	14.6 ± 5%	220
	Gadolinium Aluminum Doped	G-1000	1000 ± 5%	<=66	14.7 ± 5%	250
		G-1200	1200 ± 5%	<=60	15.1 ± 5%	260
		G-1400	1400 ± 5%	<=60	15.1 ± 5%	265

$$\frac{\omega_0}{|\gamma|} : 3320 \text{ Gauss}$$

<http://www.trans-techinc.com/index.asp>

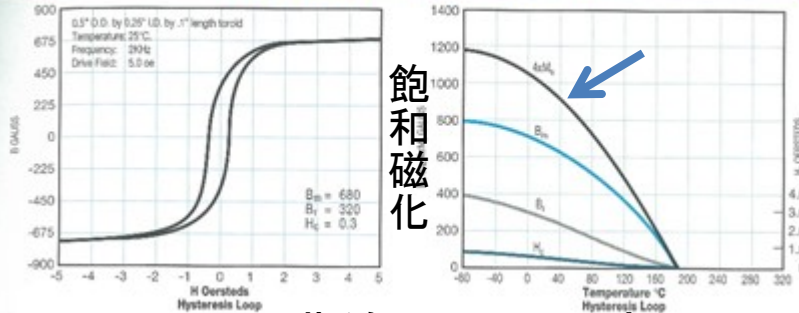


ネオジウムマグネット(N40~50)を使って $H_0$ は5kGauss(gap=17mm)程度なので出来るだけ低い飽和磁化のフェライトを選択したい

# フェライトの温度特性

Calcium Vanadium

TTVG-1000 Narrow Line Width Garnet



ヒステリシス曲線

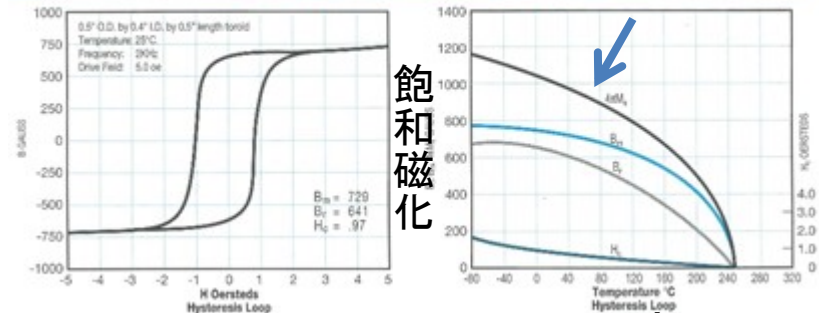
温度

飽和磁化

変化量  $4\pi M_S \rightarrow 4\text{Gauss}/^\circ\text{C}$

Gadolinium Aluminum

G-1000 Gadolinium & Aluminum Doped

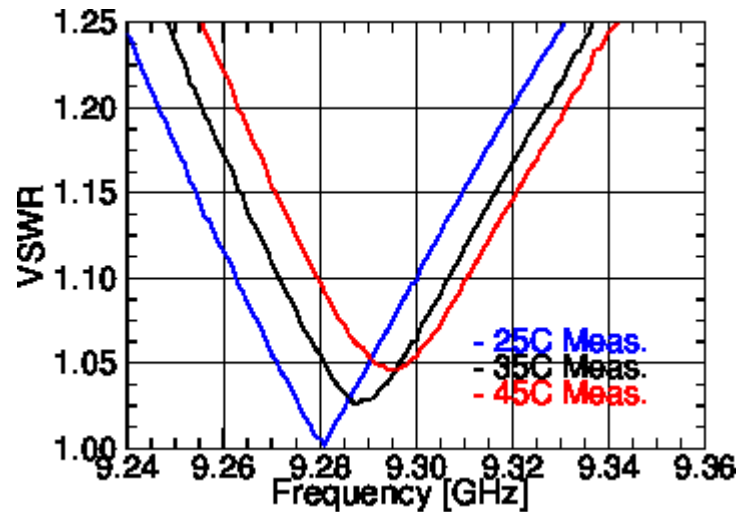


ヒステリシス曲線

温度

飽和磁化

変化量  $4\pi M_S \rightarrow 1.7\text{Gauss}/^\circ\text{C}$

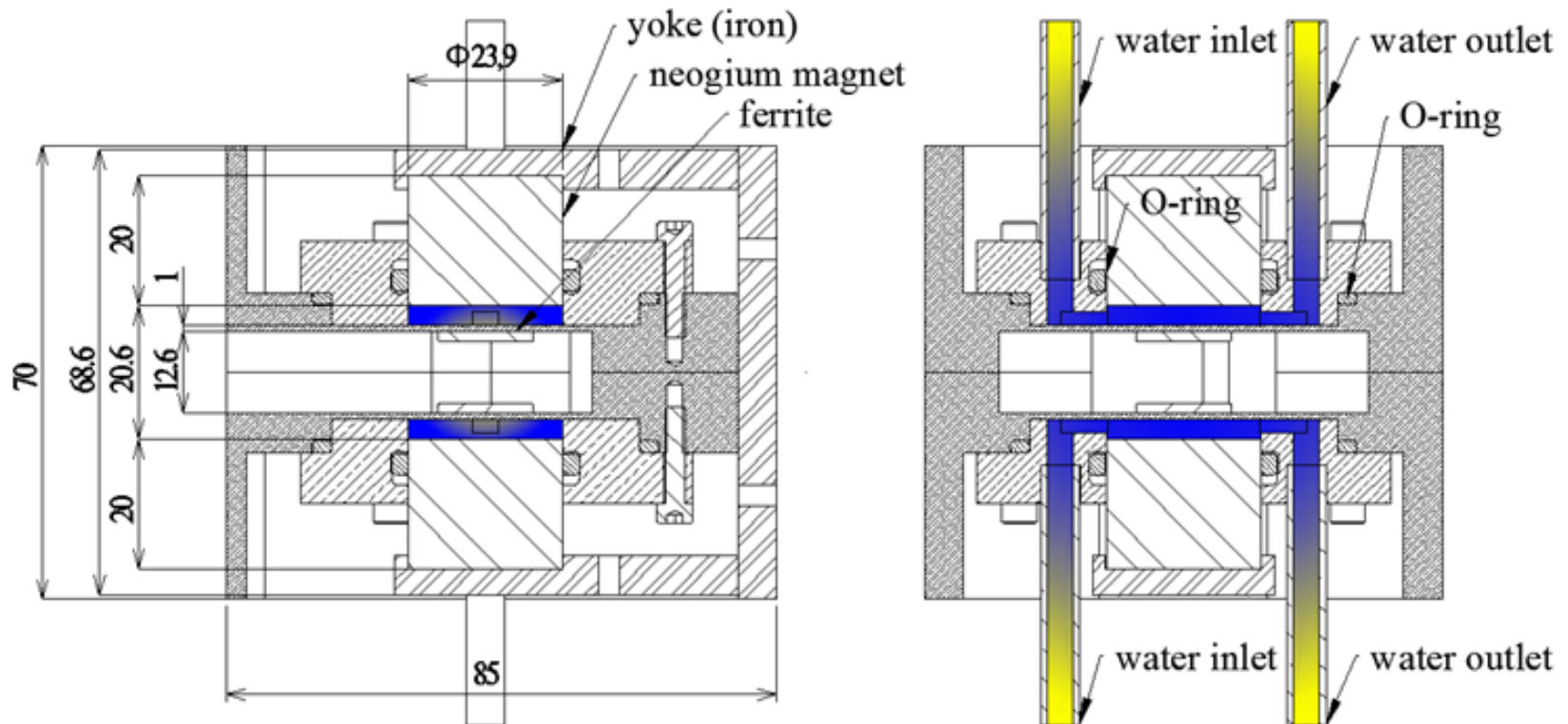


- Calcium Vanadiumフェライトは温度特性が良くない
- 水温が $10^\circ\text{C}$ 変わると反射特性が7MHzシフトする



# 3-portサーキュレータ設計

- フェライトの温度変化を少なくするために水冷方式を採用
- 電界強度を下げるために2枚のフェライトを離して設計
- スタブはハンダ付けして導波管面としっかりコンタクトする



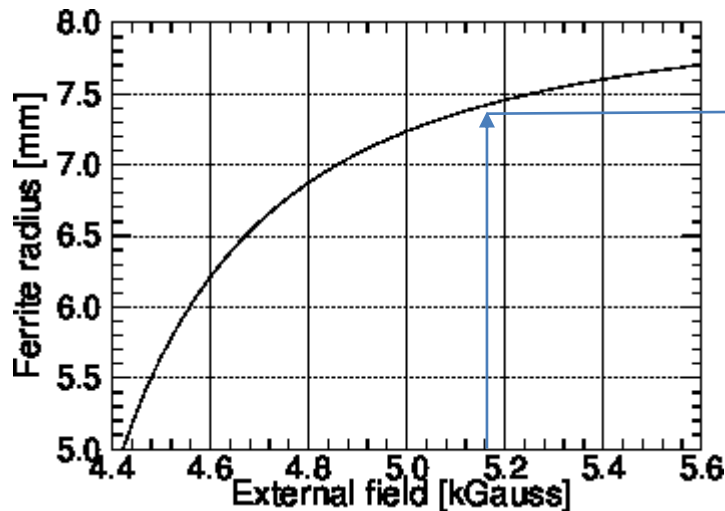


# フェライト寸法

- 熱伝導率を良くするためにフェライト厚さを1.5mmとする
- フェライト径(半径 $a$ )は帯域が広くなるように決定する

$$a = \frac{cX_a(\theta)}{\omega_0\sqrt{\mu_{eff}\epsilon_r}} \sqrt{\frac{\{t' + \epsilon_r(1 - t')\}}{\{t' + (1 - t')/\mu_{eff}\}}} \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{2(1 + \rho^2)} \right\}$$

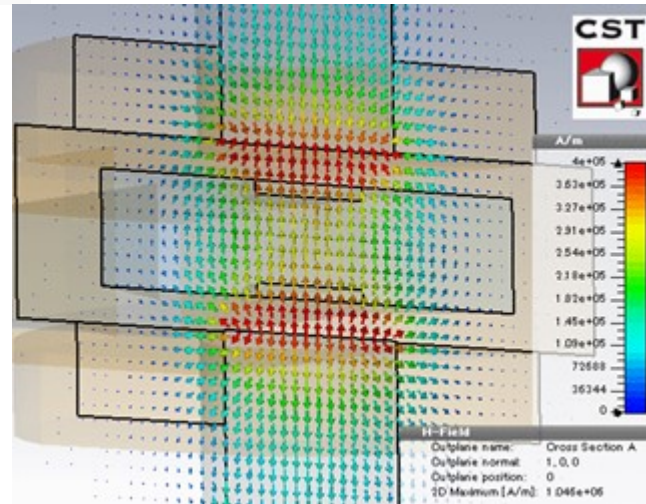
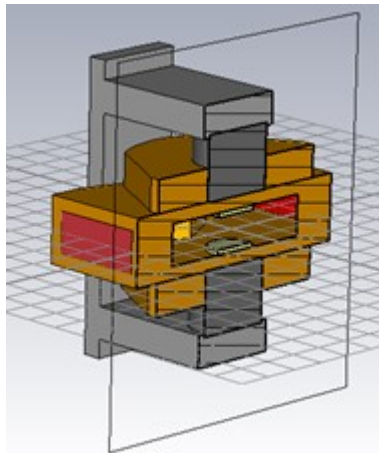
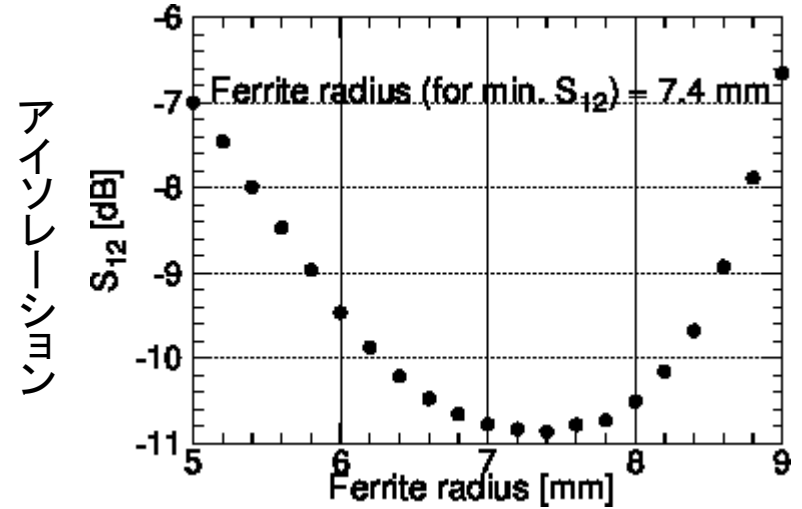
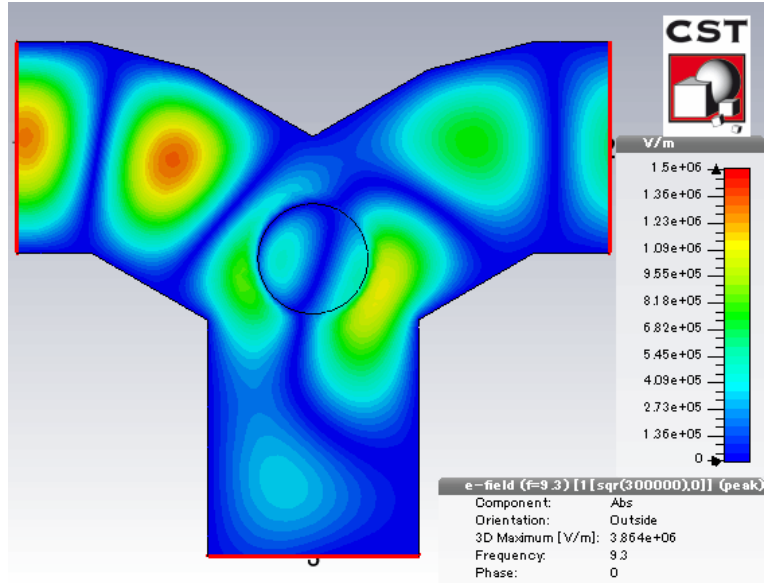
$$\rho = \frac{4\mu_0(1 - t')}{(\mu_+ + \mu_-)} \quad \sigma = \frac{\mu_+ - \mu_-}{\mu_+ + \mu_-} \quad \mu_{eff} = \frac{2\mu_+\mu_-}{\mu_+ + \mu_-} \quad \mu_{\pm} = 1 + \frac{4\pi M_s|\gamma|}{H_0|\gamma| - 4\pi M_s|\gamma| - \omega_0} \quad t' = \frac{t}{h}$$



5.18kGaussで $a=7.4$ mm

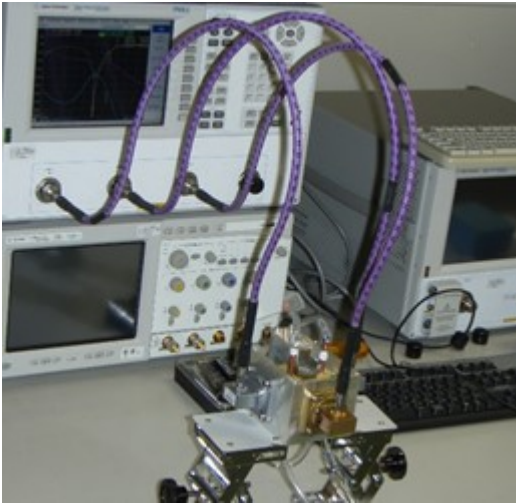
- $c$ : 光速
- $\epsilon_r$ : フェライトの比誘電率
- $t$ : フェライトの厚み
- $2h$ : 導波管の短辺長( $b$ )
- $X_a(\theta)$ : 給電角 $\theta$ の関数 $\sim 1.8$

# 3D EM シミュレーション

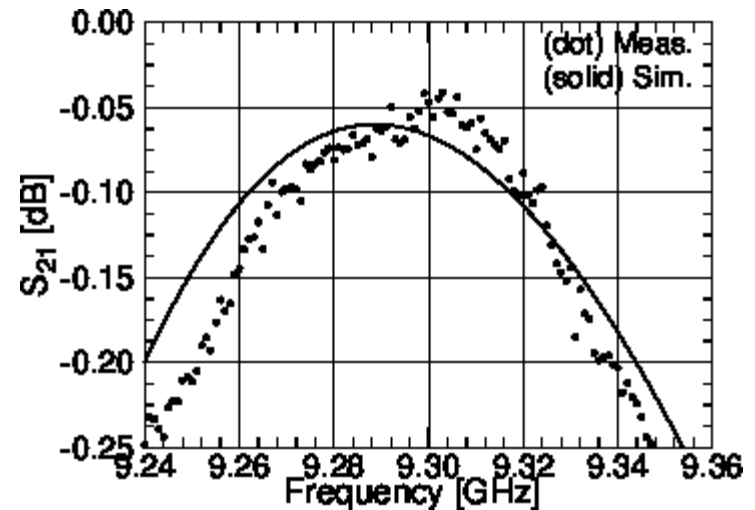
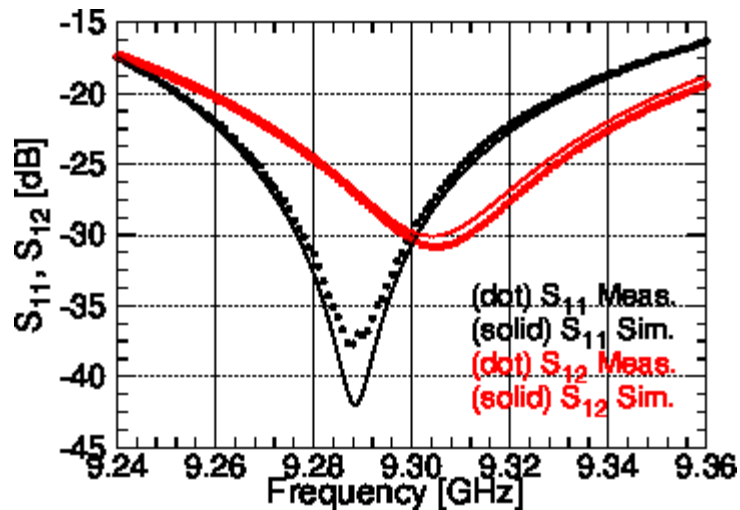


静磁場分布(A/m)

# 低電力試験

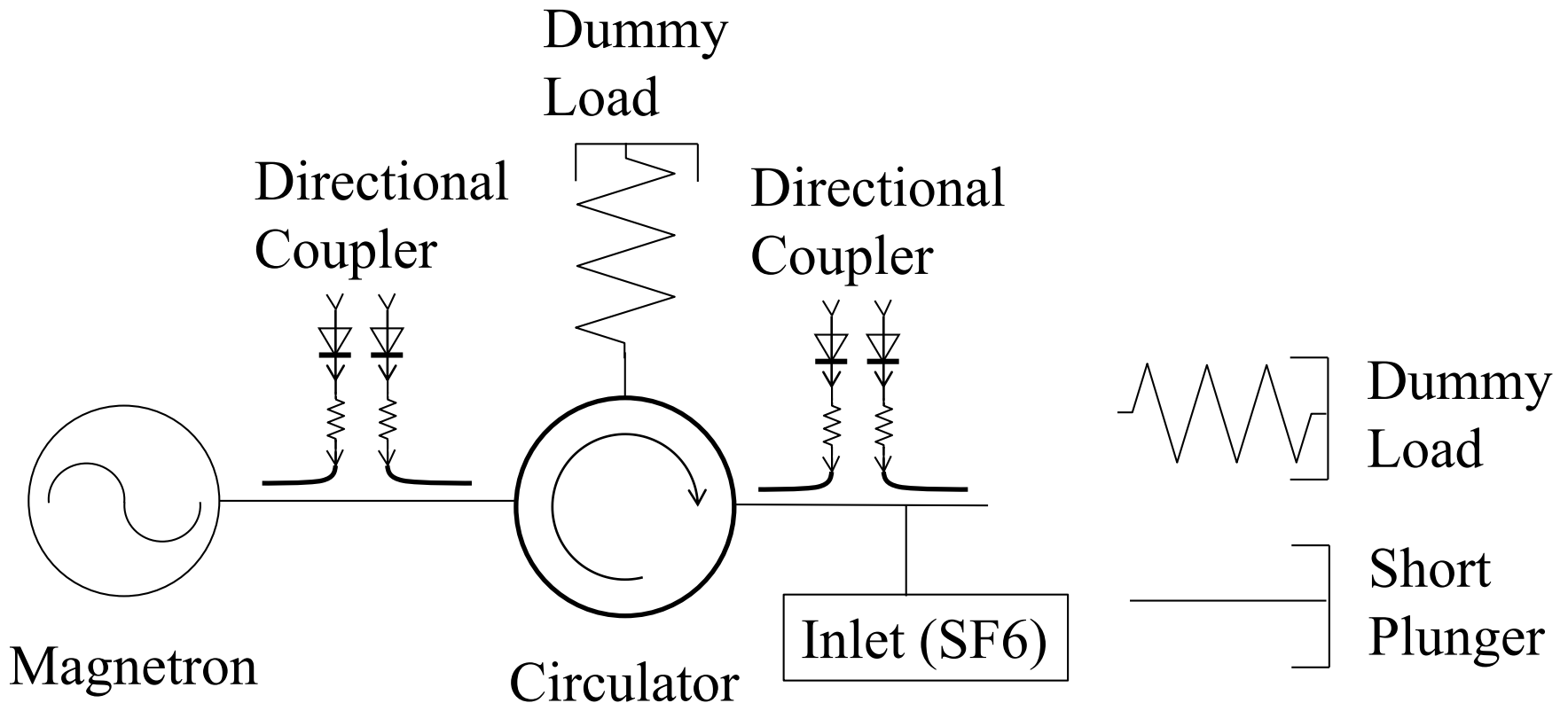


- 熱によって高周波側に反射特性がシフトするためあえて低周波側にピークが来るように調整した
- 最大電界強度は6MV/m(300kW入力時)

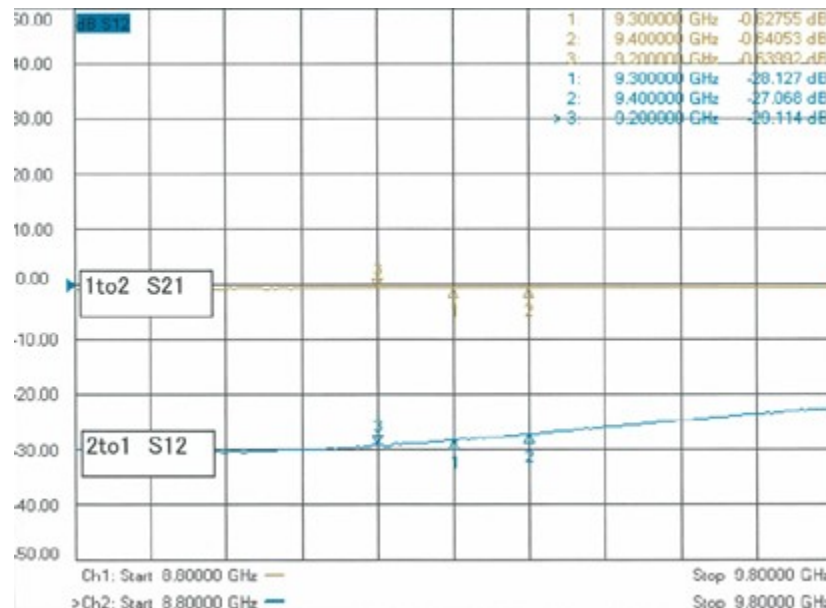
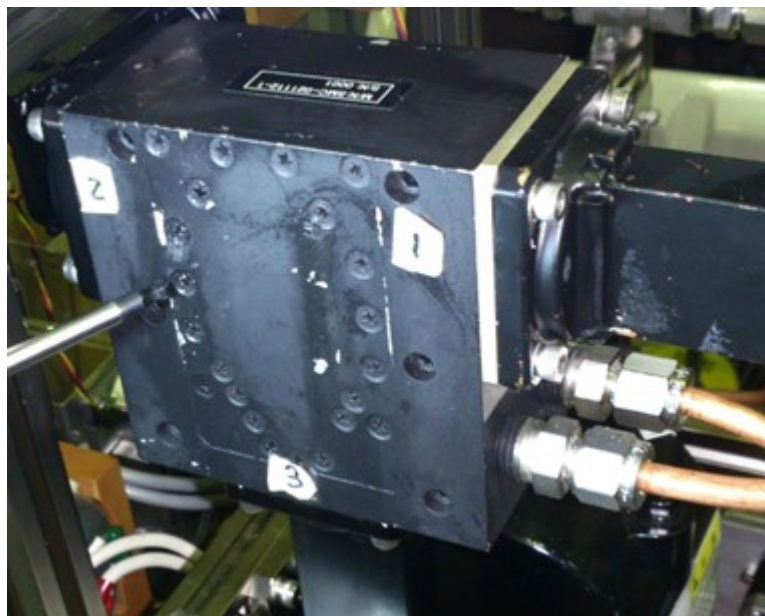


# 大電力試験

- マグネトロンは300kWピークと1.2MWピークの2種類を用意した



# Below resonance 3-portサーキュレータ



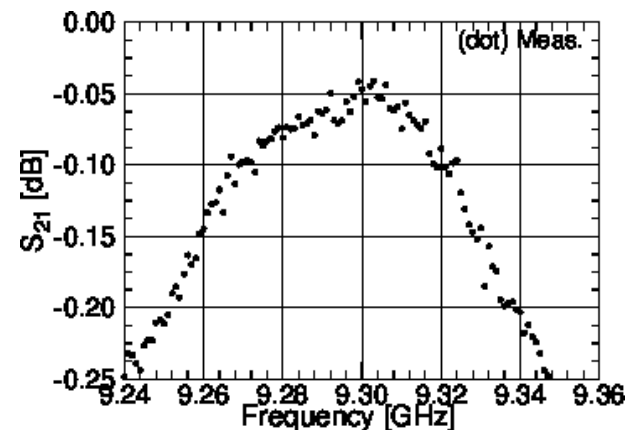
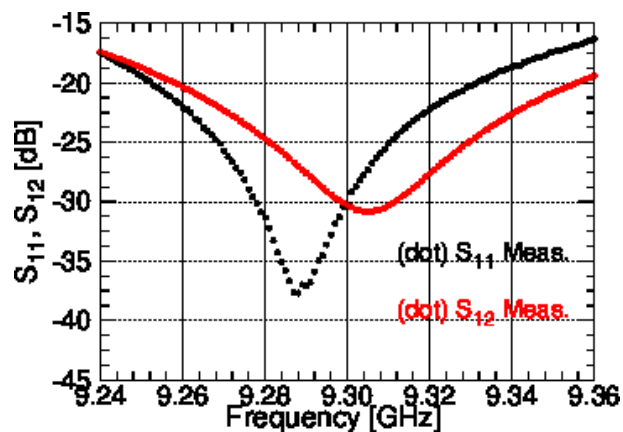
**SIERRA MICROWAVE TECHNOLOGY**

<http://www.sierramicrowave.com/>

帯域20%(2GHz)

パルス2 $\mu$ s, 100pps	
入射電力(kW)	挿入損失(dB)
86.91	-1.54
124.34	-1.70
250.34	-2.33

# Above resonance 3-portサーキュレータ



帯域0.8%(80MHz)

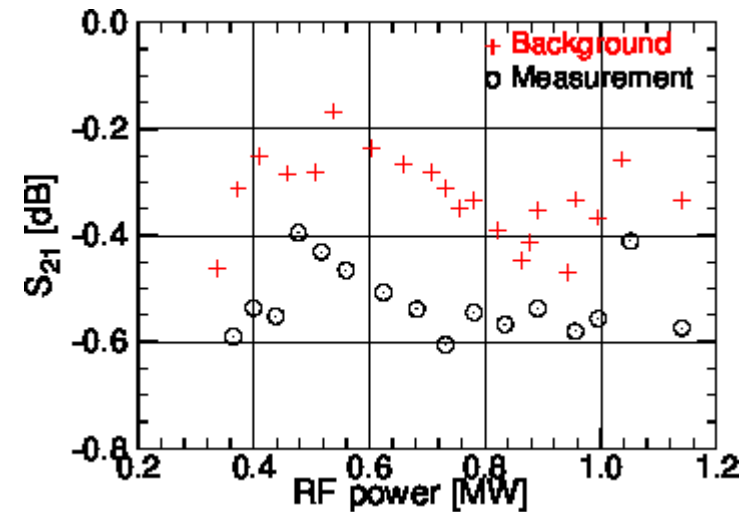
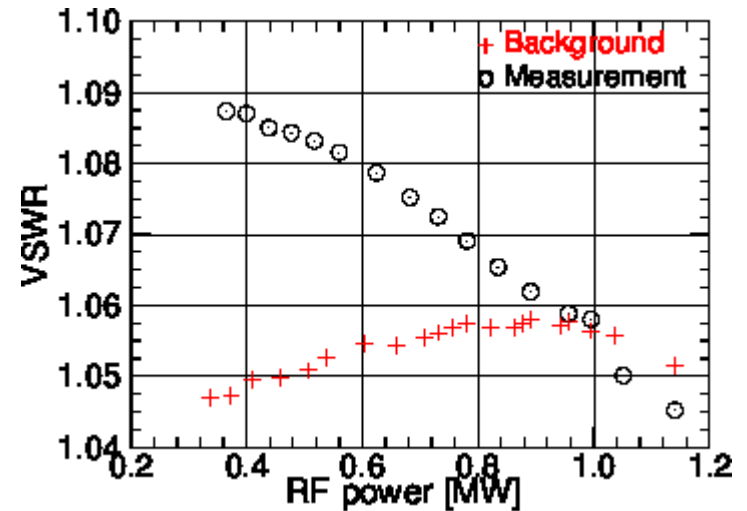
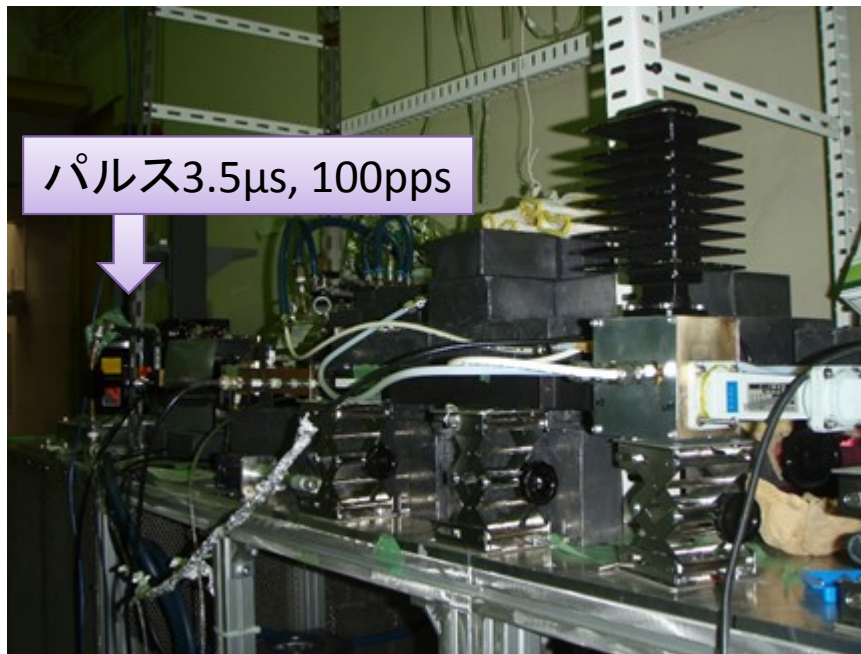
パルス2.8 $\mu$ s, 300pps

入射電力(kW)	挿入損失(dB)
129.88	-0.32
161.19	-0.47
189.20	-0.35

\* 出力側をショート板にした最大負荷試験



# 1.2MWマグネトロン試験





# まとめ

- Above resonance型3ポートサーキュレータは大電力下でも非線形効果が発生しない
- フェライトギャップ間隔を広くすることでより大電力に耐えるサーキュレータを設計できる
- 磁気共鳴半値幅の少ないフェライトを使用することで、挿入損失を低く抑えることが可能
- シミュレーションと低電力試験の結果がほぼ一致した
- さらにハイパワーの大電力試験を今後実施する予定