

A light blue world map is visible in the background, centered behind the text.

# マイクロ波大電力発振器 効率と伝送技術

2006.11.2  
IDX 岡本 正

# 電波と主な利用

周波数	波長	慣用の名称	主用途
1mHz ~ 3Hz	0.3Tm ~ 0.1Gm	極々超長波 ULF	
3Hz ~ 3kHz	0.1Gm ~ 0.1Mm	極超長波 ELF	
3kHz ~ 30kHz	0.1Mm ~ 10km	超長波 VLF	標準電波、潜水艦通信
30kHz ~ 0.3MHz	10km ~ 1km	長波 LF	船舶無線、ロランC
0.3MHz ~ 3MHz	1km ~ 0.1km	中波 MF	中波ラジオ
3MHz ~ 30MHz	0.1km ~ 10m	短波 HF	短波ラジオ、アマチュア無線
30MHz ~ 0.3GHz	10m ~ 1m	超短波 VHF	VHFテレビ、FMラジオ
0.3GHz ~ 3GHz	1m ~ 0.1m	極超短波 UHF	UHFテレビ、携帯電話
3GHz ~ 30GHz	0.1m ~ 10mm	マイクロ波 SHF	衛星通信、衛星テレビ
30GHz ~ 0.3THz	10mm ~ 1mm	ミリ波 EHF	衛星通信、簡易無線
0.3THz ~ 3THz	1mm ~ 0.1mm	サブミリ波	電波天文

# 大電力マイクロ波管

## マグネトロン

1921年、A.W.Hull

1927年、岡部金治郎が陽極を分割して性能を大幅に高めた

## クライストロン

1939年、W. C. Hahn、G. F. Metcalf、R. H. Varian、S. F. Varian

バリアン兄弟が命名

## 進行波管

1942年、R. Kompfner

1947年、J. R. Pierce 理論確立

## ジャイロトロン

1958年、R. Q. Twiss 理論提唱。

1974年、N. I. ZaytzevらがMIGを使って効率30%を達成、ジャイロトロンと命名

# マグネトロン

レーダ、電子レンジ、**マイクロ波加熱**

# クライストロン

## 反射型クライストロン

通信装置、測定器に多用、今はこれらの装置は固体装置化

出力 数mW ~ 数100mW

## 直進型クライストロン

UHF-TV放送、見通し外通信、衛星通信・衛星放送地球局、

レーダ、**マイクロ波加熱**、核融合LHH、加速器

出力 ~ 1MW (CW)、~ 100MW (パルス)

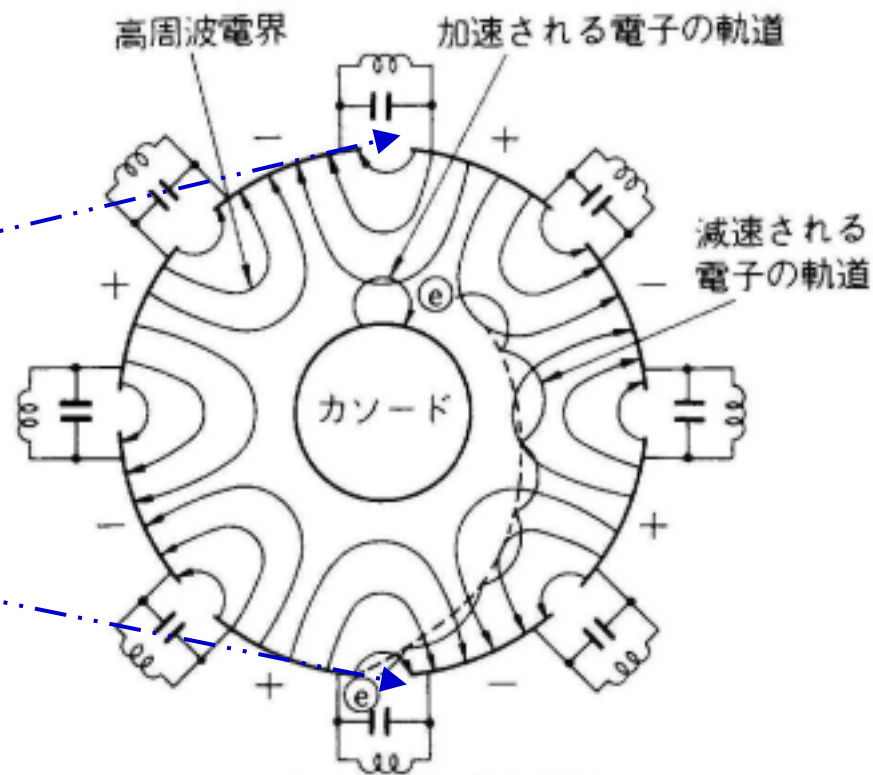
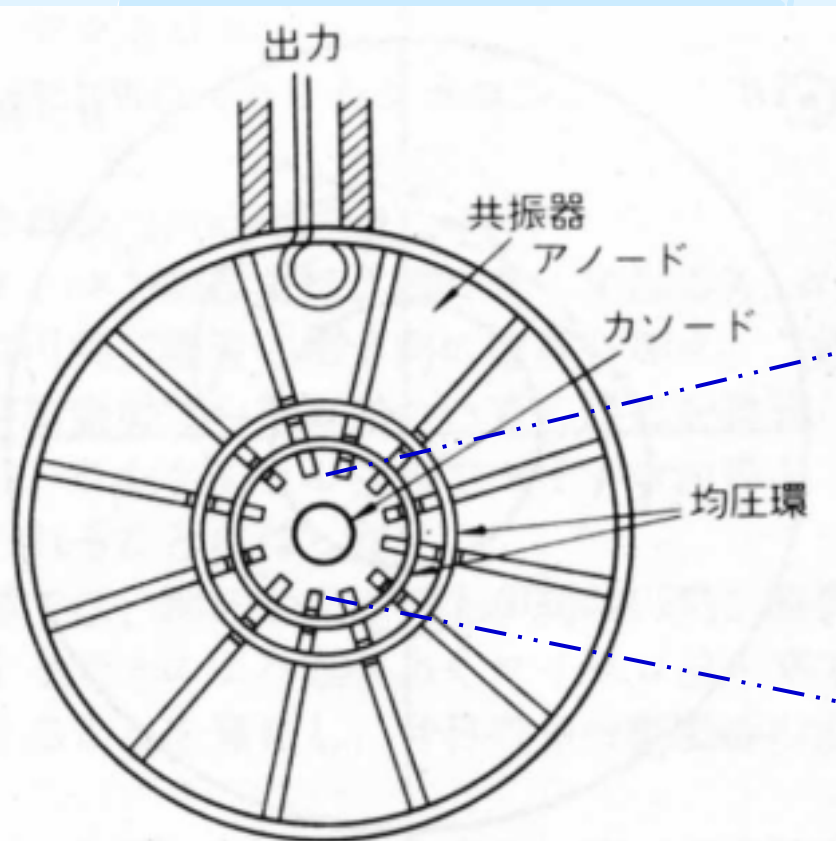
# 進行波管

通信、放送、レーダ

# ジャイロトロン

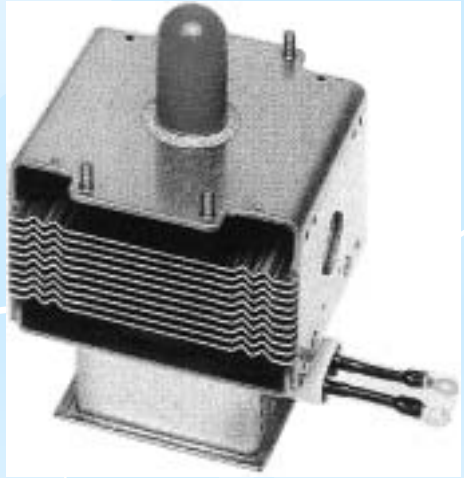
核融合ECH、**ミリ波加熱**

# マグネトロン

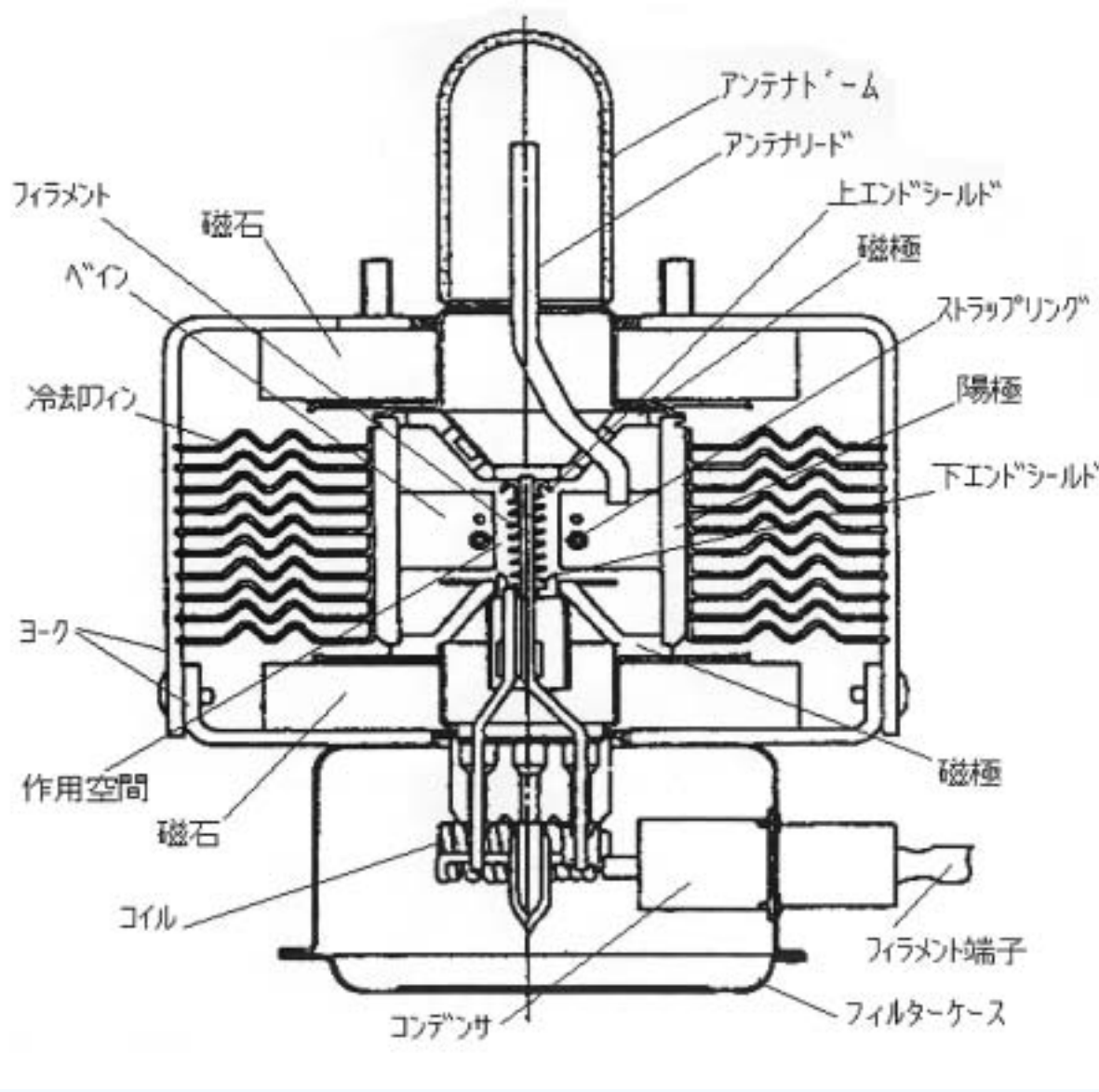


# マグネトロン

2M130



$P_o$ : 1,800W、強制空冷



# マグネトロン発振装置の問題点:

出力を変えると周波数が変化する

反射によって出力と周波数が変わる

周波数スペクトラムが良くない

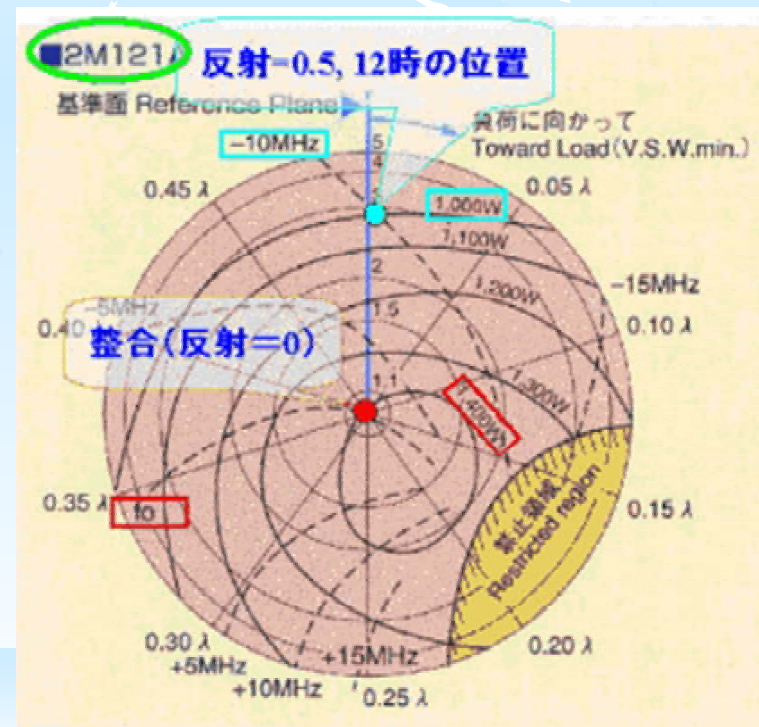
(6 - 10MHzの幅を持っている)

## リーケダイヤグラム

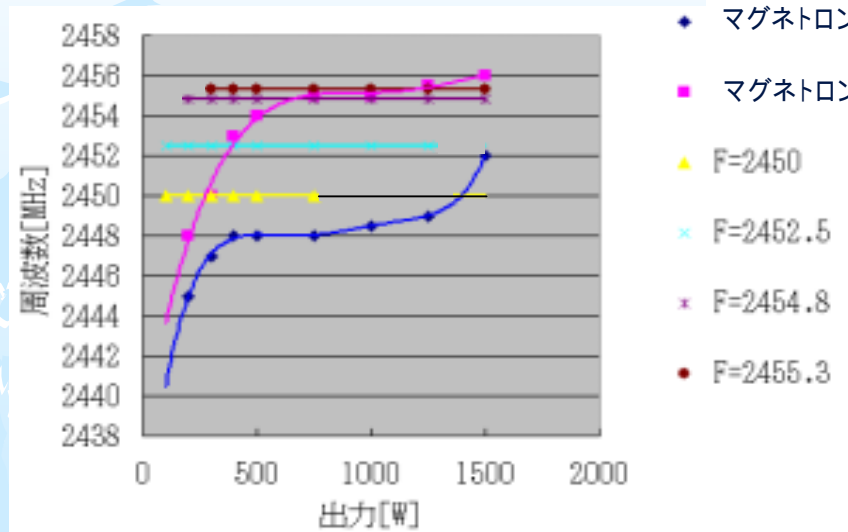
単相全波整流  
定格陽極電流

————— 出力

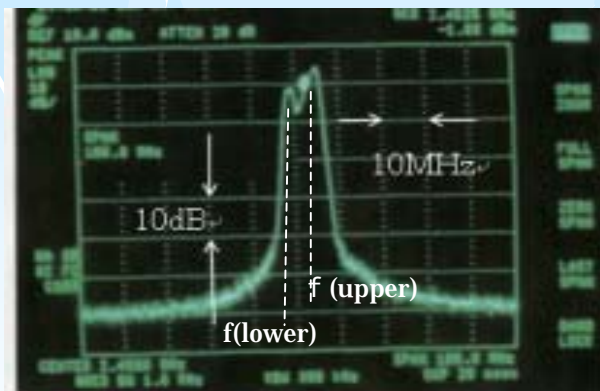
- - - - - 周波数



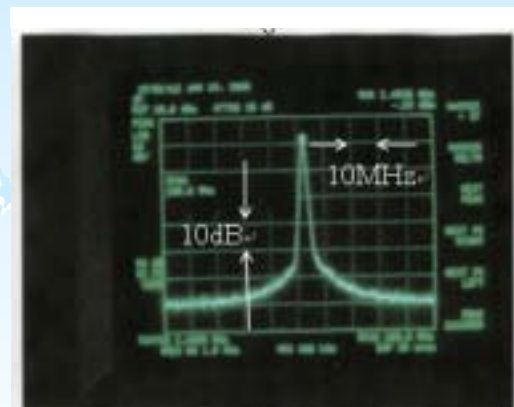
# マグネトロンの特性改善



## マグネトロンおよび制御型マグネトロン装置の出力特性



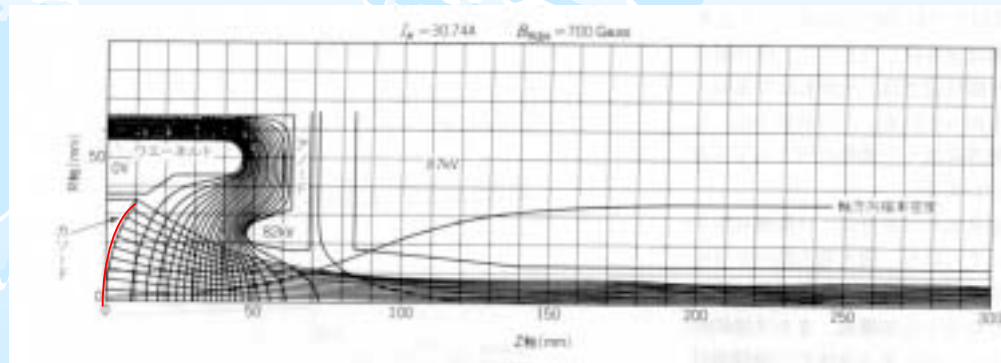
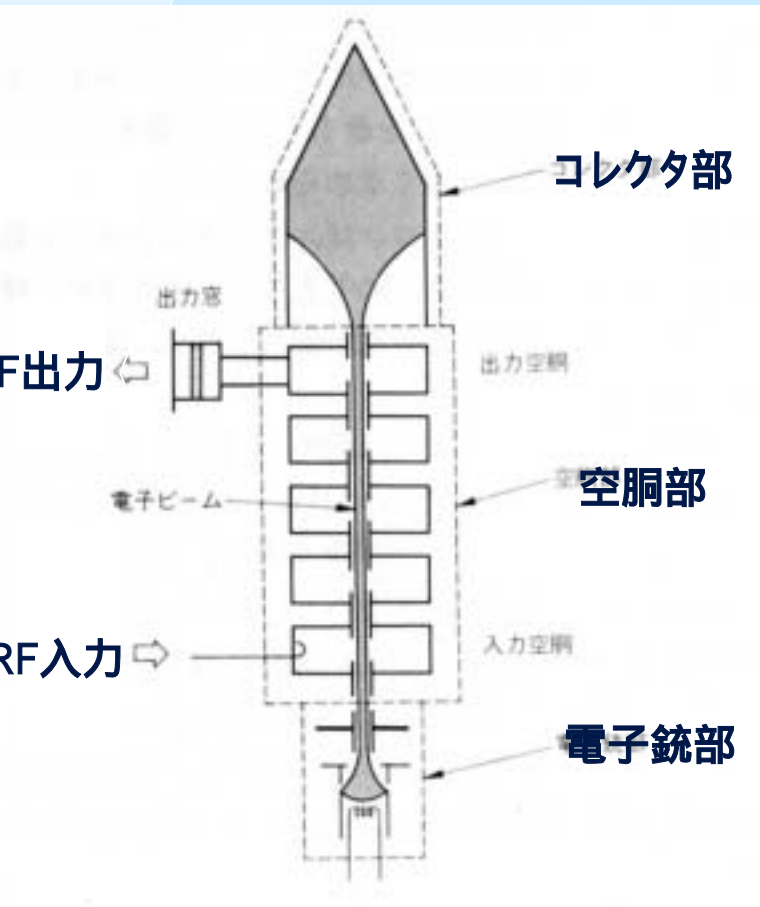
マグネトロン発振装置の出力波形  
(代表的な波形の一例)



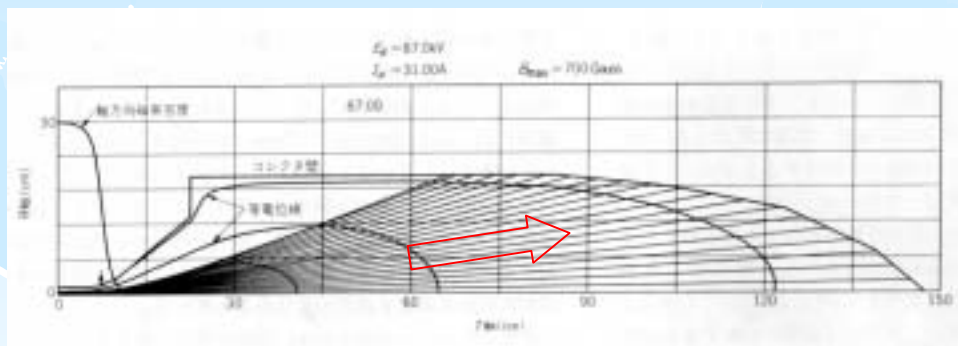
制御型マグネトロン装置の出力波形  
(代表的な波形の一例)



# クライストロン(直進形)



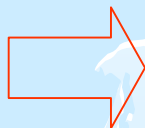
電子銃部の電子軌道



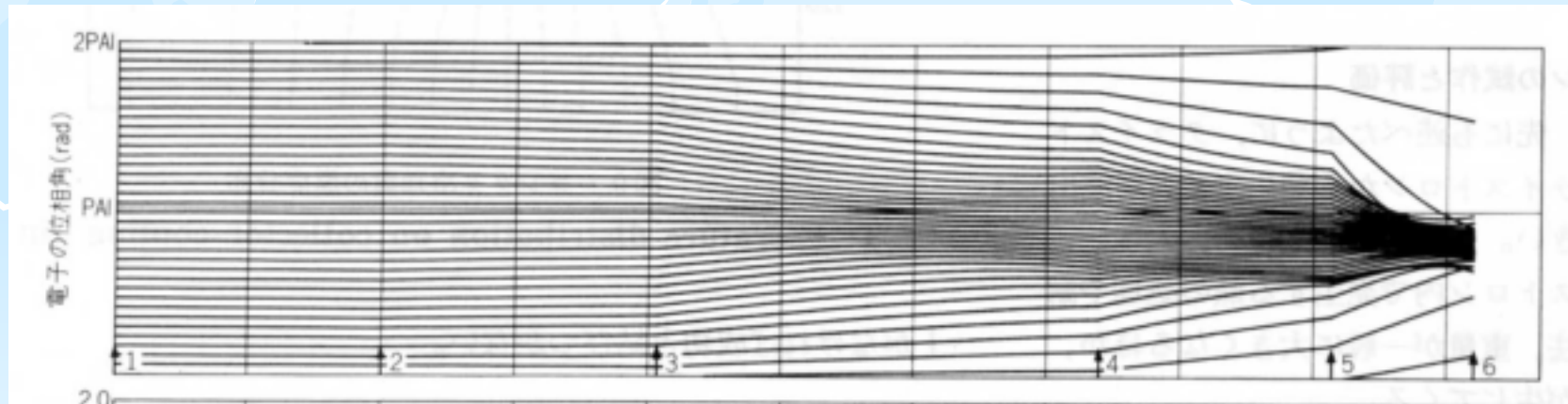
コレクタ部の電子軌道

# クライストロンにおける電子ビームの集群

速度変調



密度変調



出力端で減速



電子の運動エネルギーが電波のエネルギーに変換される



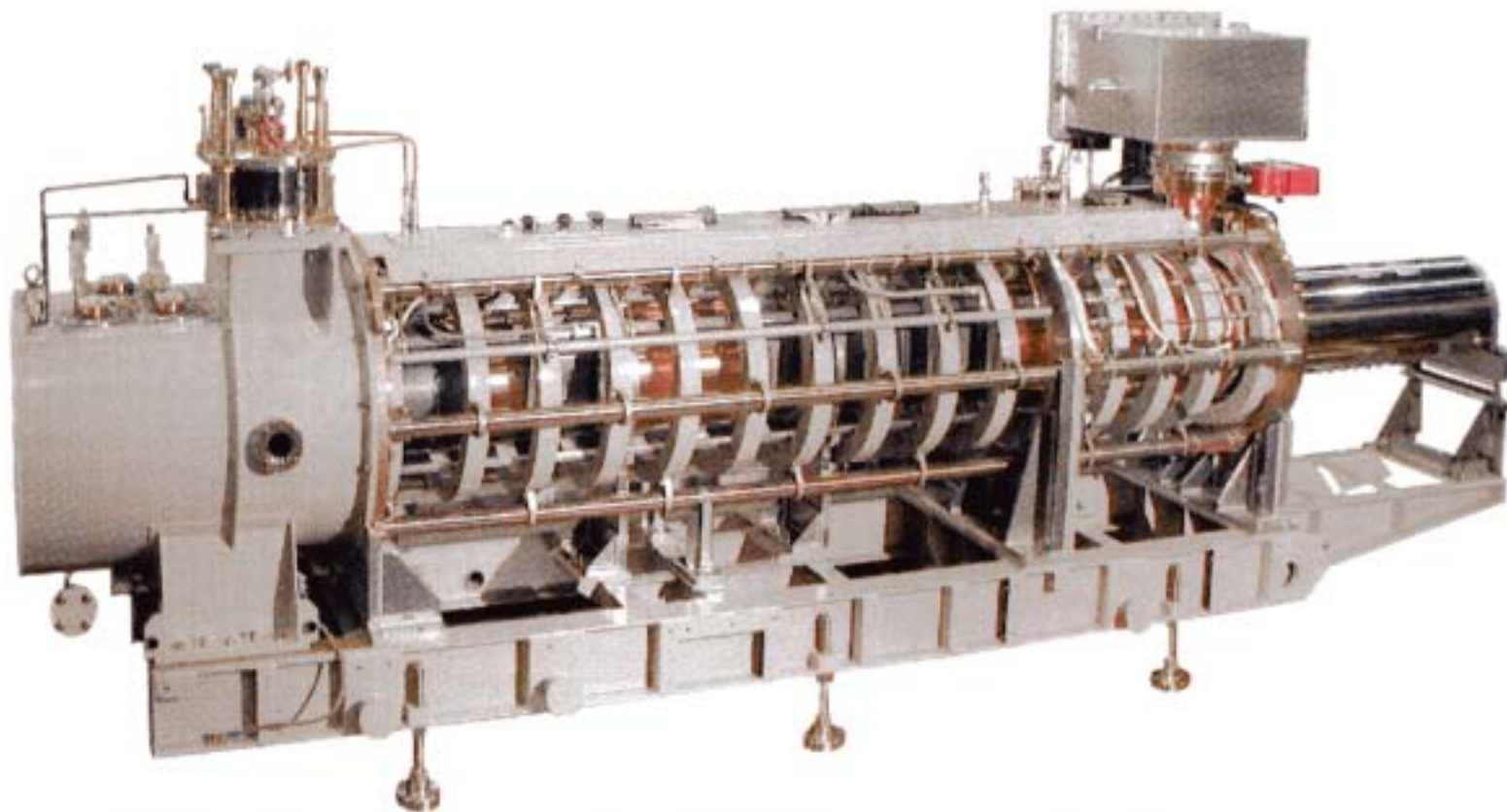
5 0 0 MHz  
CW 1,200kW

**E3732**  
4.35m



**E3712**  
1.9m

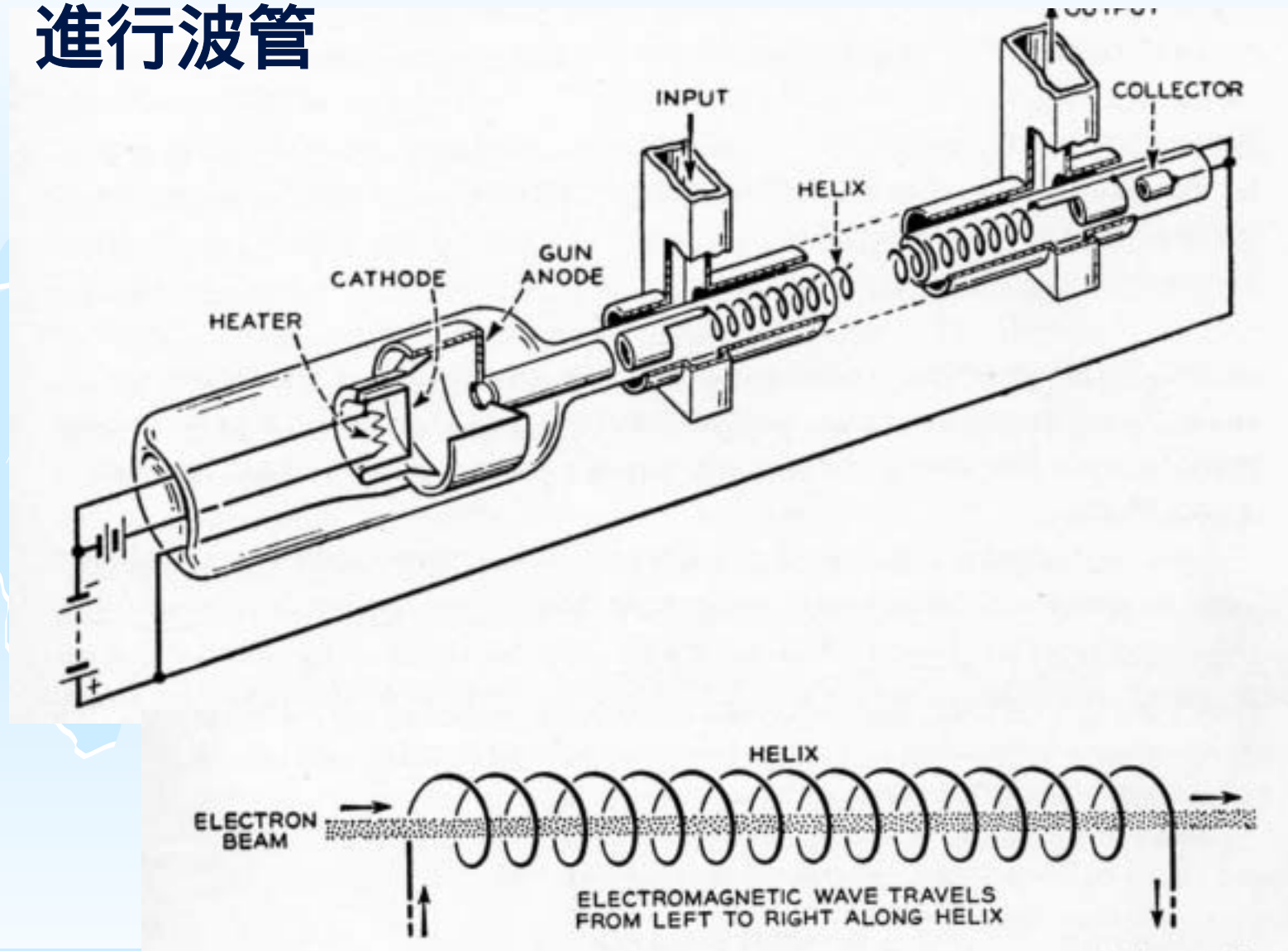
2,856MHz  
パルス100MW



**E3740A**

(324MHz、パルス 3MW、パルス幅 620  $\mu$ s)

# 進行波管



# 進行波管

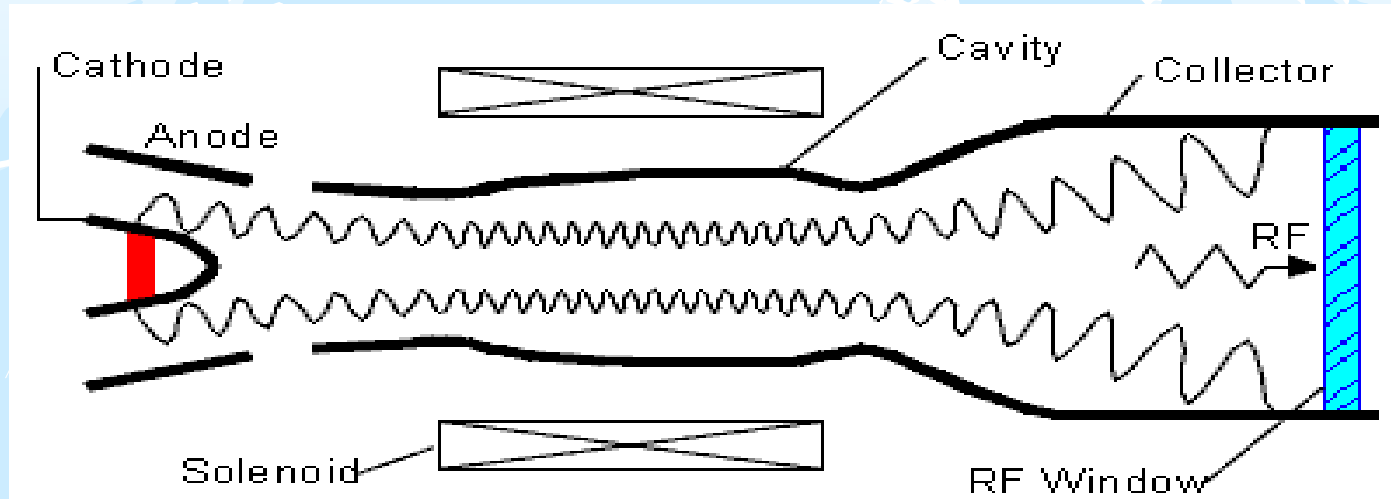
- マイクロ波中継回線
- UHFテレビ放送
- 衛星通信・衛星放送搭載/地球局
- レーダ
- 飛翔体搭載
- 測定器

- ・らせん形、空洞結合形TWTなど
- ・固体化が進んでいるが、21GHz次期放送衛星搭載用TWTなどの開発も進められている。

12GHz 200W TWT

21GHz 10W TWT

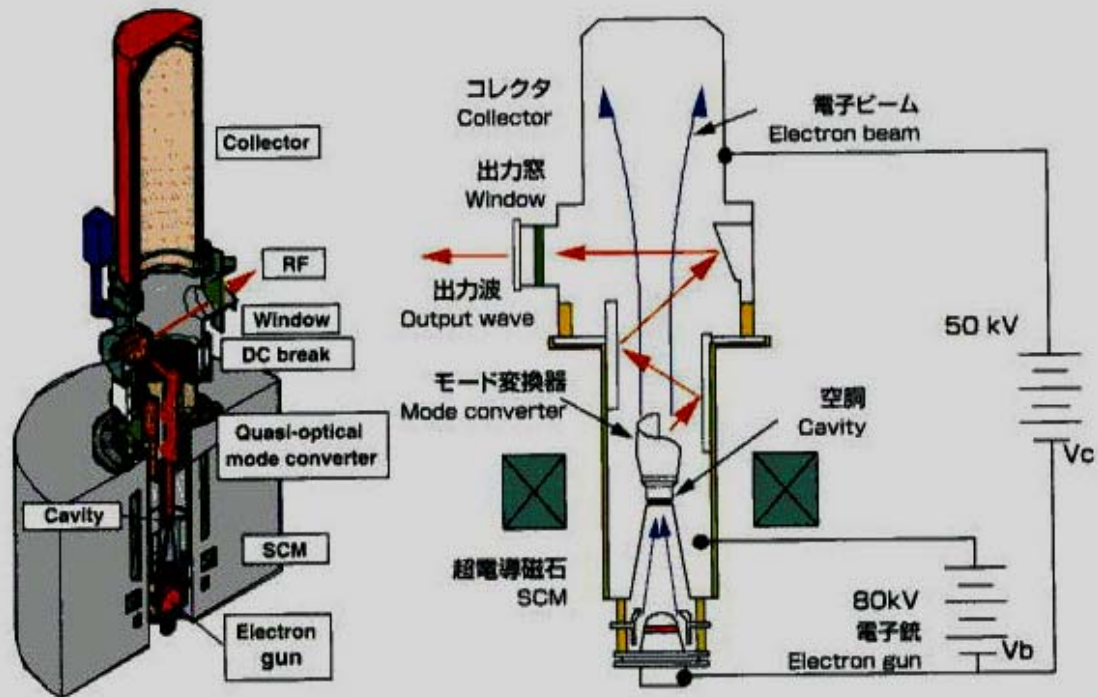
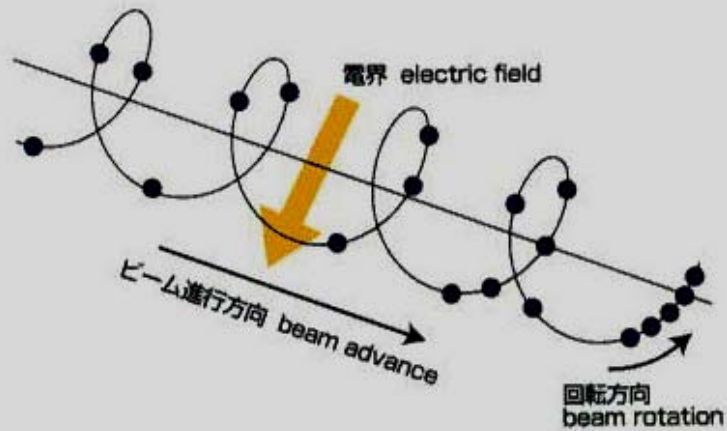
# 初期のジャイロトロン



PM収束ジャイロトロン  
GTC0301

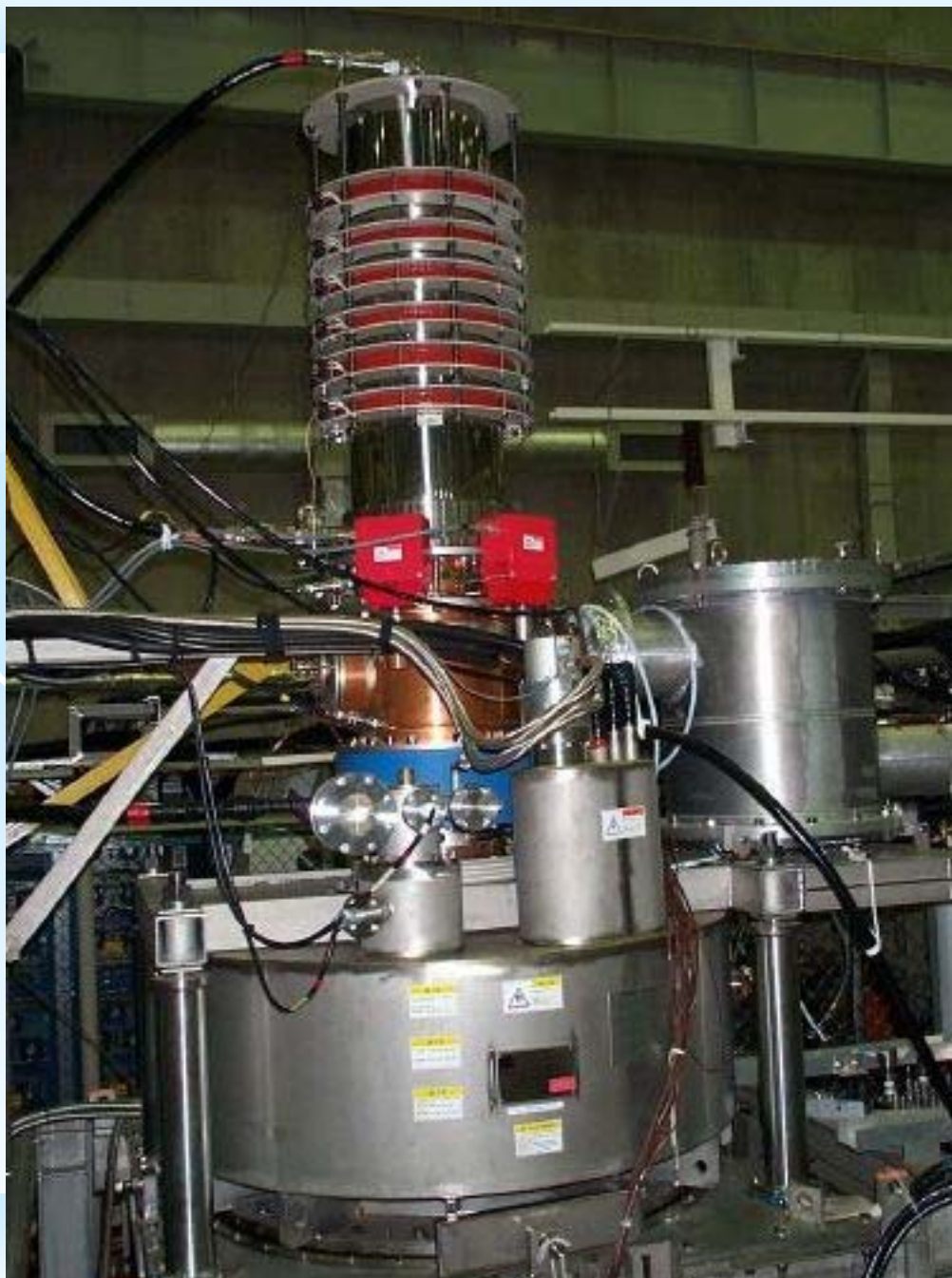
28GHz CW10kW  
TE02 モード

# ジャイロトロン



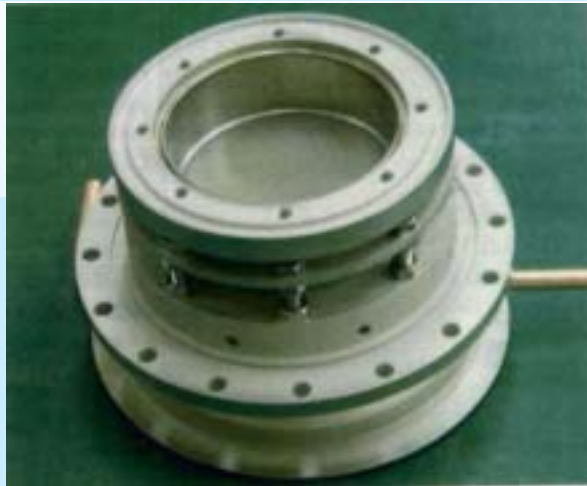
日本原子力研究所様ご提供  
Picture courtesy of JAERI (Japan Atomic Energy Institute)





## LHD ECH ジャイロトロン

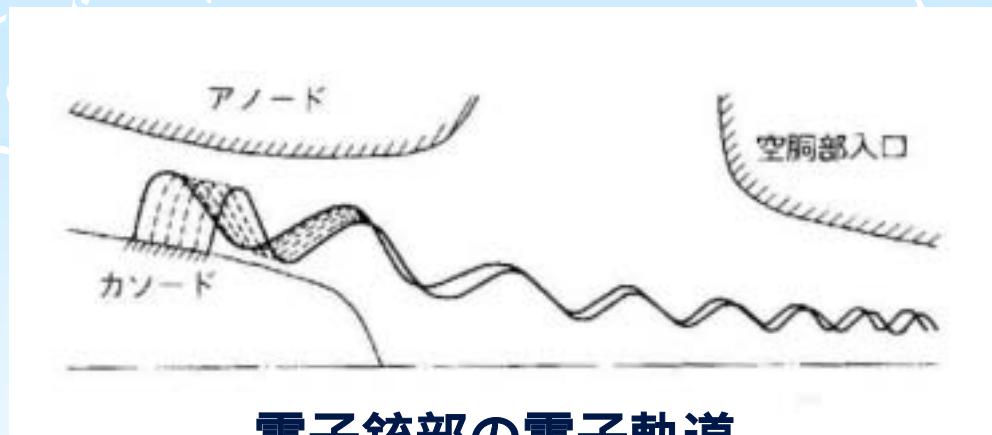
写真: NIFS提供



出力窓



カソード



電子銃部の電子軌道

170GHz 600kW 1,000s

ジャイロトロン

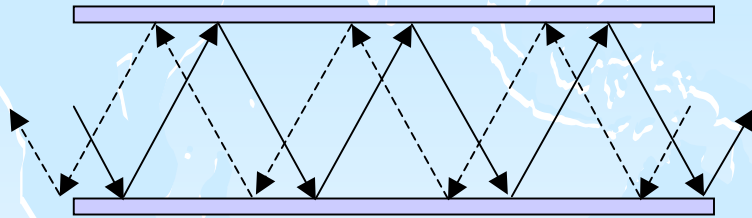
# 広がるマイクロ波の応用技術



# ISM周波数

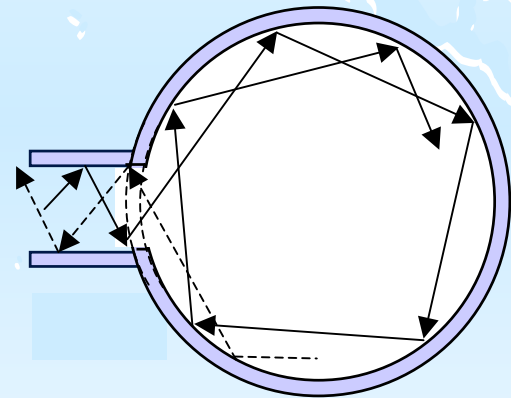
ISM周波数	帯域幅
6.78 MHz	$\pm 15.0$ kHz
13.56 MHz	$\pm 7.0$ kHz
27.12 MHz	$\pm 163.0$ kHz
40.68 MHz	$\pm 20.0$ kHz
915 MHz	$\pm 13.0$ MHz
2,450 MHz	$\pm 50.0$ MHz
5,800 MHz	$\pm 75.0$ MHz
24,125 MHz	$\pm 125.0$ MHz
61.25 GHz	$\pm 250.0$ MHz
122.50 GHz	$\pm 500.0$ MHz
245.00 GHz	$\pm 1.0$ GHz

# マイクロ波は金属面で反射される



導波管

(無反射終端を接続すると反射がなくなる)



空洞

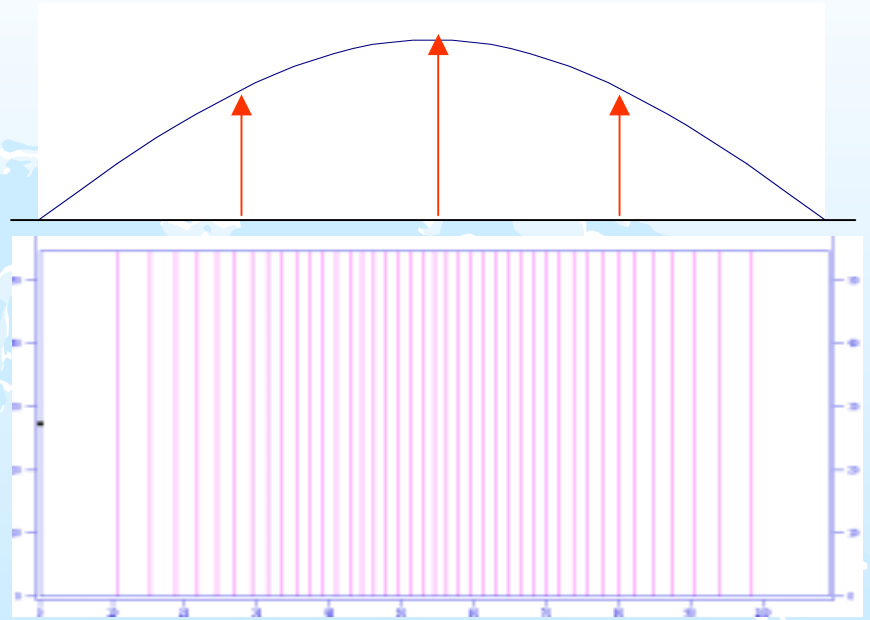
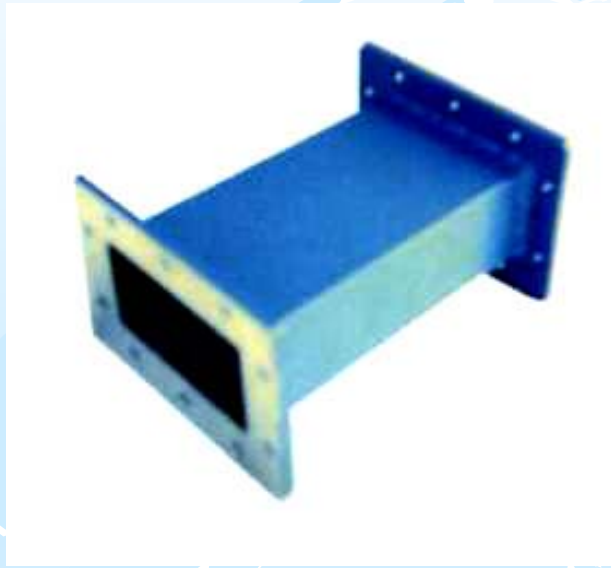


入射波



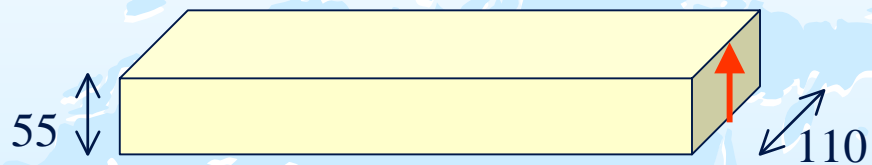
反射波

# 方形導波管



利用周波数	型名	EIAJ型名	EIA型名	内径呼寸法(mm)
915MHz	-	WRI-9	WR975	247.65 × 123.82
2,450MHz	WRJ-2	WRI-22	WR430	109.22 × 54.61
5.8GHz	WRJ-6	WRI-58	WR159	40.39 × 20.19

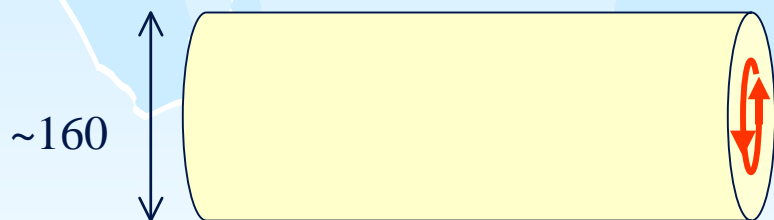
# 伝送線路とモード



TE10モード



TM01モード



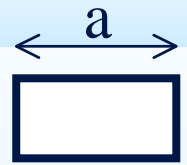
TE01モード

→ 電界

遮断波長:

$$\text{TE}_{10}: \quad c = 2a$$

$$\text{TM}_{mn}, \text{TE}_{mn} \quad c = (2R) / mn$$



遮断域の単位長当たりの減衰:

$$\alpha = \frac{54.6}{\lambda_c} \times \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^2}$$

$\alpha > c$ 、 [dB/単位長]

モード	mn
TE <sub>11</sub>	1.8411
TM <sub>01</sub>	2.4048
TE <sub>21</sub>	3.0542
TM <sub>11</sub>	3.8317
TE <sub>01</sub>	3.8317



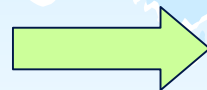
# マイクロ波加熱、マイクロ波効果：

誘電体： 誘電体内の電界により**直接加熱**する。

磁性、導電性を持つ物質： 条件により**直接加熱**が可能。

選択加熱  
高速加熱  
高温加熱  
高効率加熱  
閉じた空間内の加熱

単純な  
加熱・乾燥  
装置



・粉末冶金装置  
・セラミック焼成  
・化学反応装置

# マイクロ波と誘電体

## 誘電体パラメータ

比誘電率  $\epsilon_r$

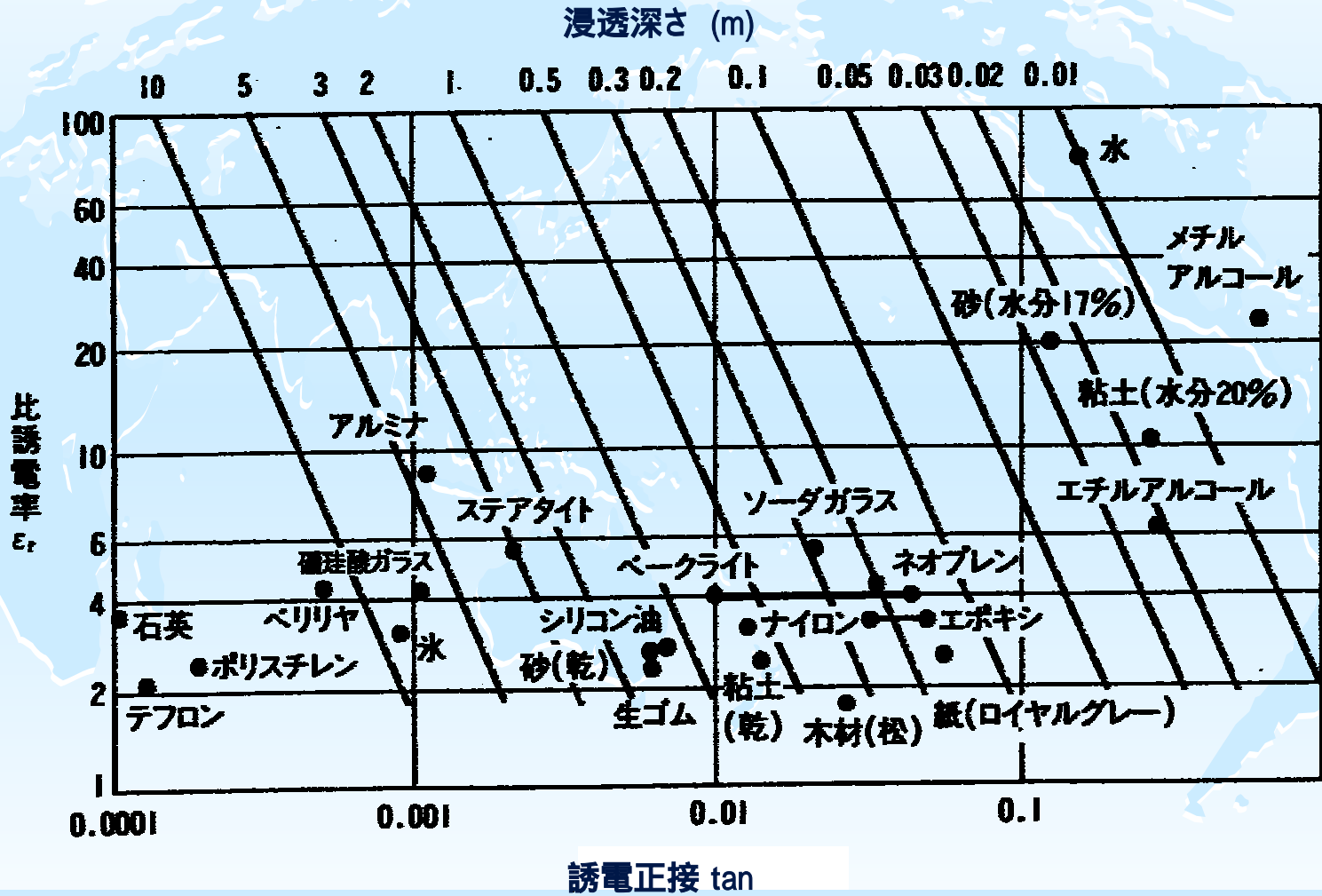
誘電体損失角  $\tan \delta$

周波数と温度の  
関数である

下記のパラメータも重要な影響を持つ

- ・電界分布
- ・誘電体の形状
- ・誘電体の大きさ
- ・誘電体と電界の相互関係

# 比誘電率、 $\tan$ 、浸透深さ ( $f = 2450\text{MHz}$ )



# Maxwellの方程式

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -j\omega\mu \vec{H} = (\omega\mu'' - j\omega\mu') \vec{H}$$

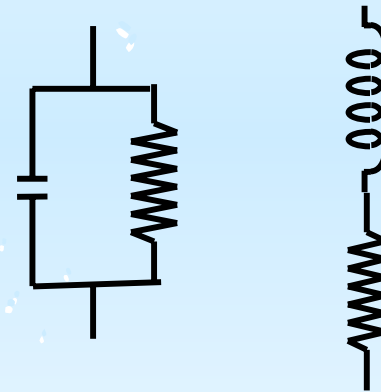
$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = (\sigma + j\omega\varepsilon) \vec{E} = \{(\sigma + \omega\varepsilon'') + j\omega\varepsilon'\} \vec{E}$$

複素誘電率 = ' - j ''

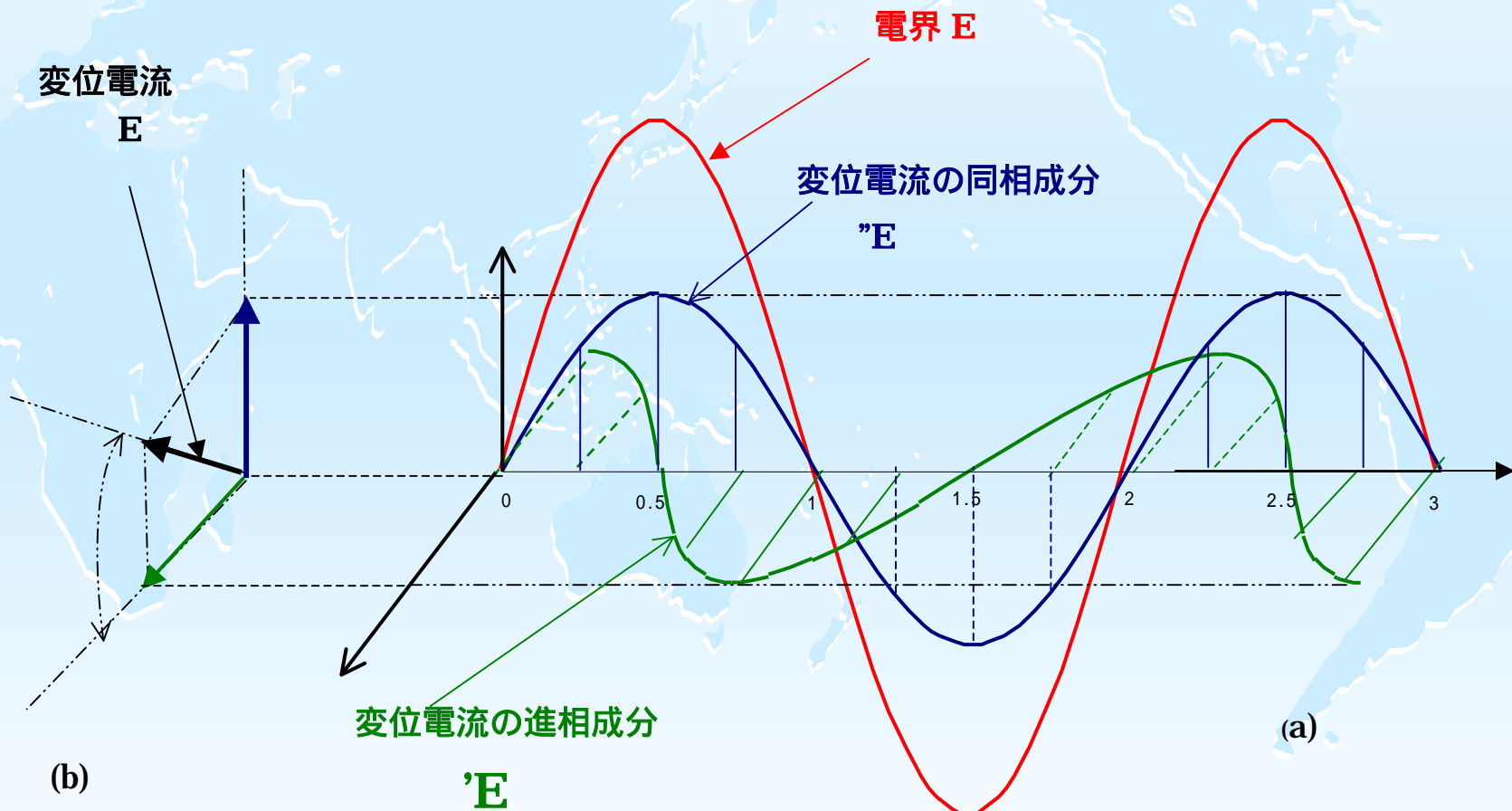
複素導磁率  $\mu = \mu' + j\mu''$

マイクロ波損失:

$$P_L = \int \left( \frac{\sigma}{2} \vec{E} \vec{E}^* + \frac{1}{2} \omega \mu'' \vec{H} \vec{H}^* + \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' \vec{E} \vec{E}^* \right) dV$$

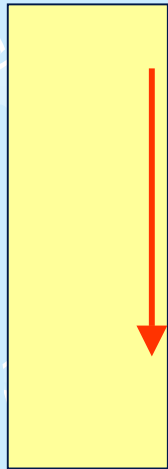


# 電界と変異電流



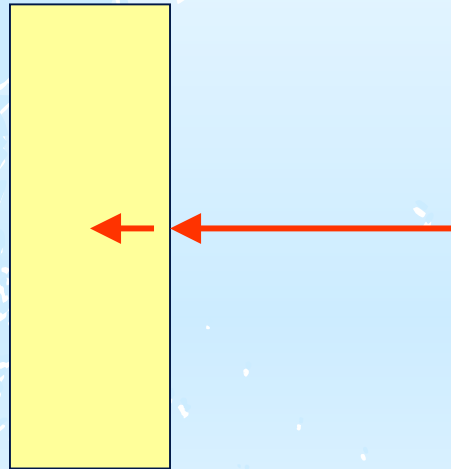
# 境界条件

電界が境界面に  
に平行の場合



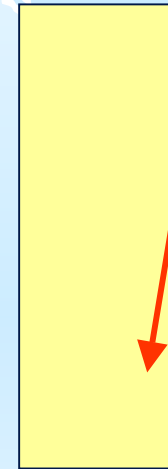
誘電体内外で  
電界が等しい

電界が境界面に  
に直交の場合



誘電体内部で  
 $1/\epsilon_r$  になる

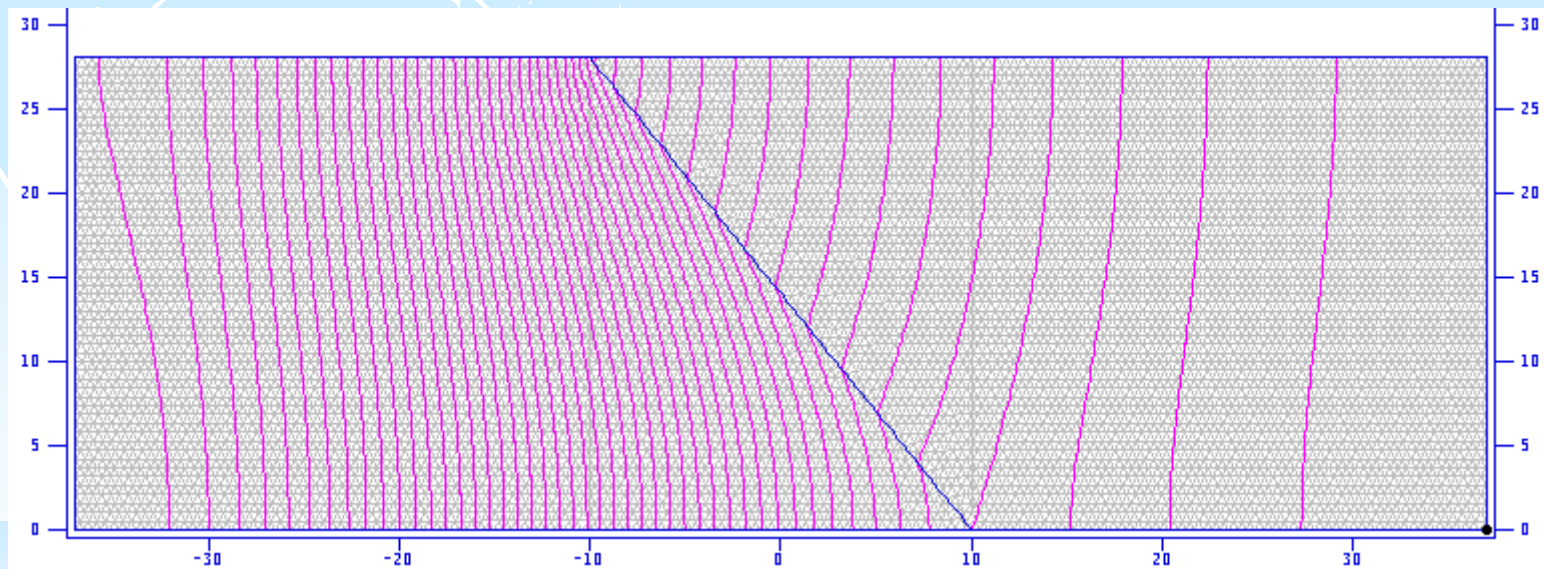
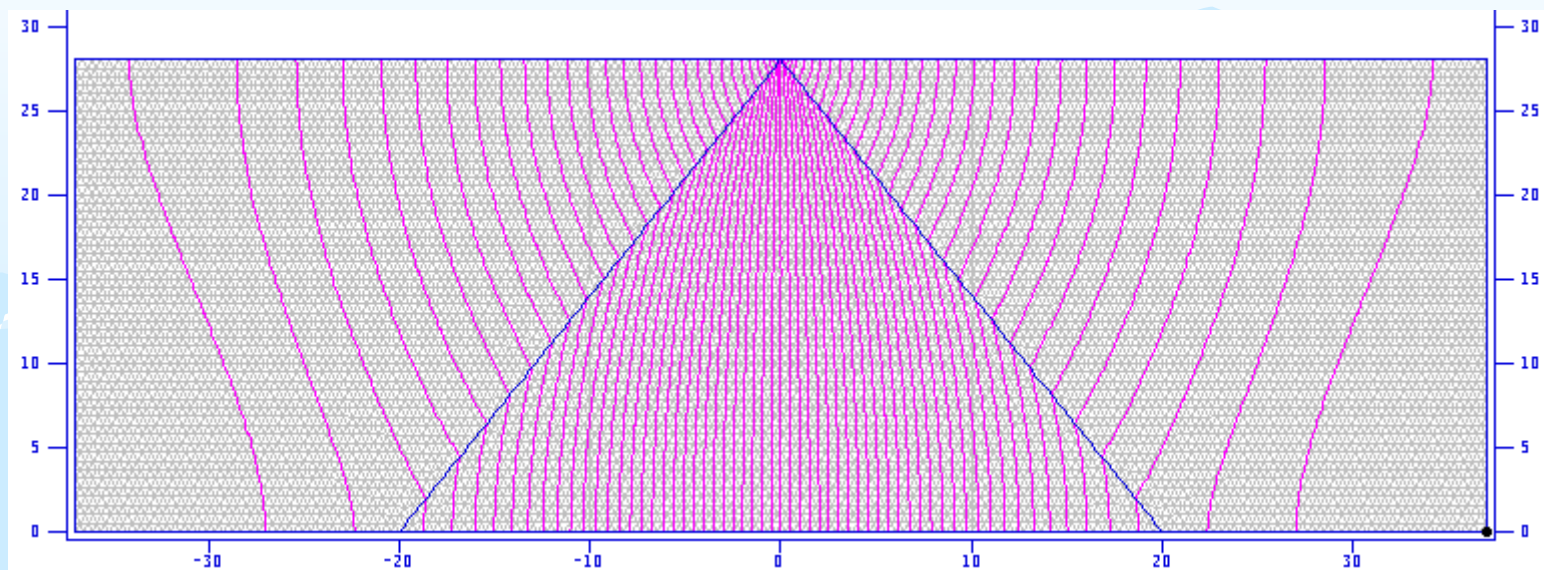
電界が斜めになっ  
ている場合

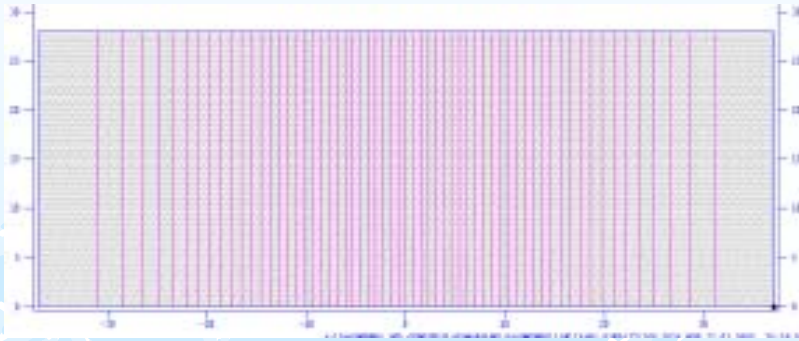


電界の向きが  
表面に沿う方向  
に屈折する

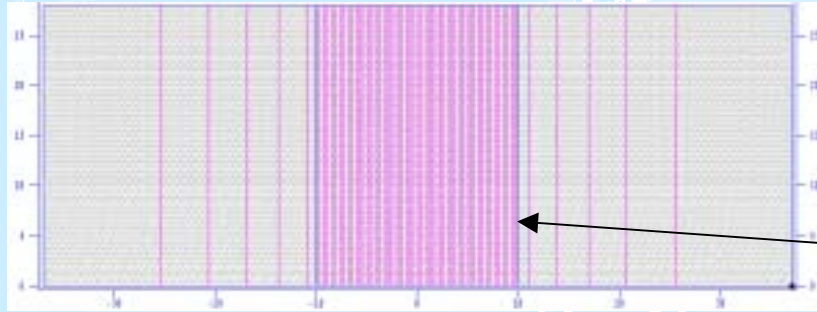
例えば、アルミナで  
は電界が $1/9$ 、石英  
では $1/4$ になる

# 誘電体の影響



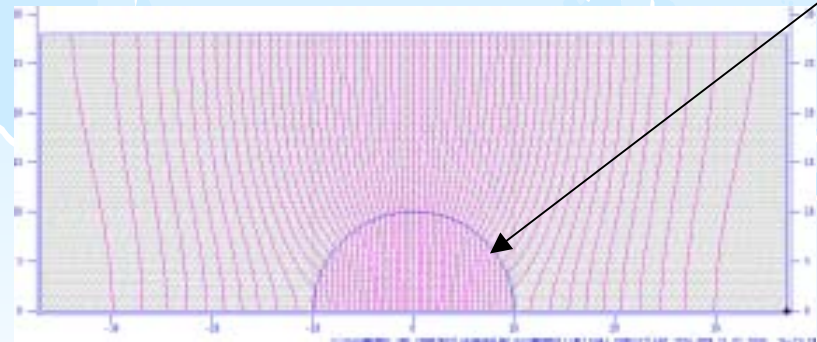


(a)



(b)

[0.66]



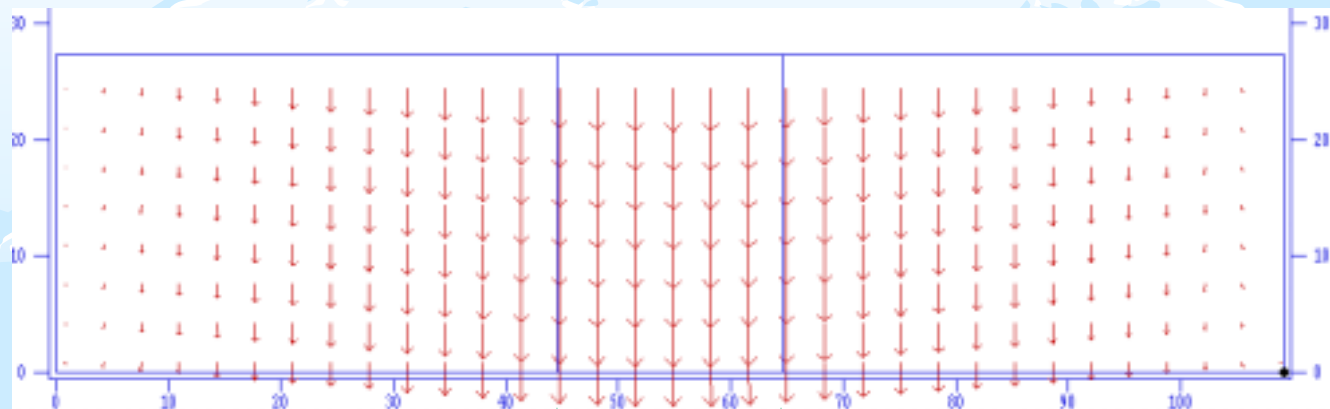
(c)

[0.32]

誘電体



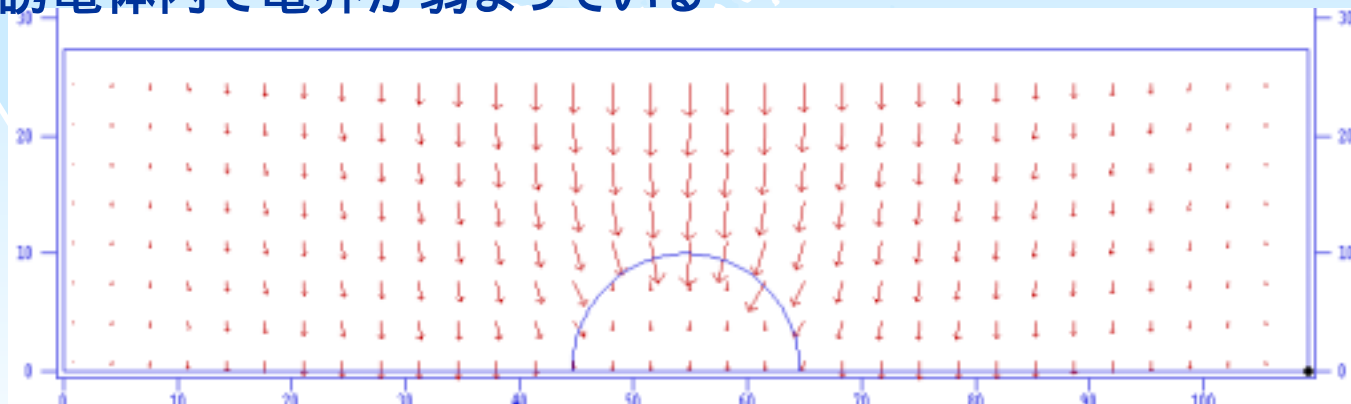
## 誘電体内外で電界が等しい



誘電体

↓ 電界の強さ

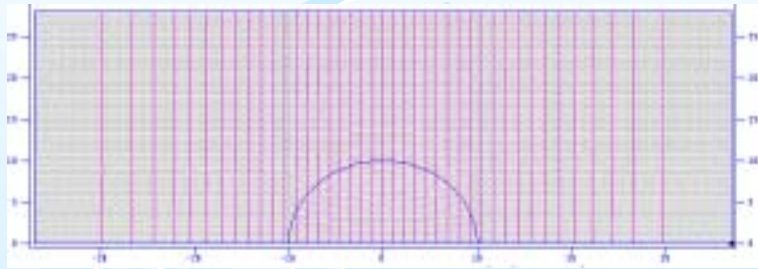
## 誘電体内で電界が弱まっている



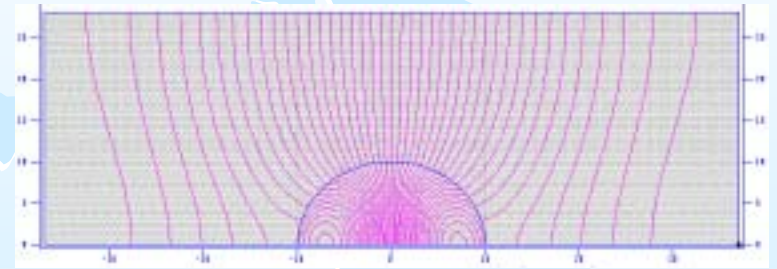
誘電体

(比誘電率  $\epsilon_r$ )

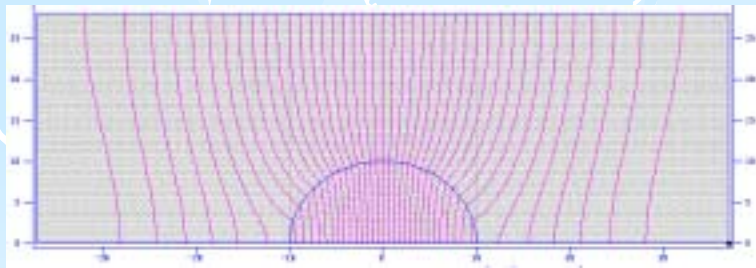
# 円柱状誘電体によるTE<sub>10</sub>モード方形導波管の電界



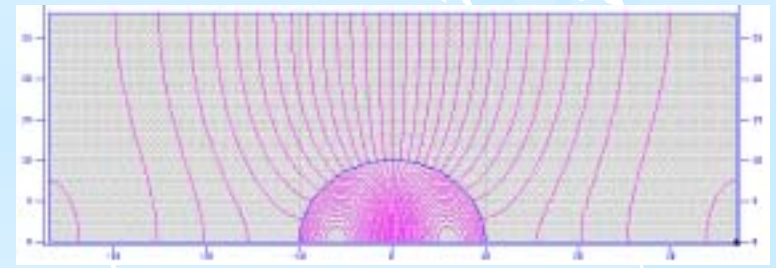
$r=1$  [1.00]



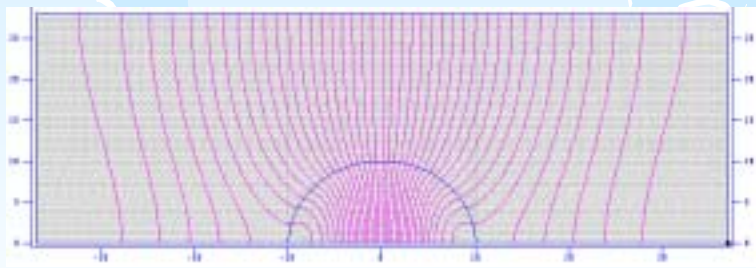
$r=50$  [0.111]



$r=10$  [0.222]



$r=70$  [0.141]

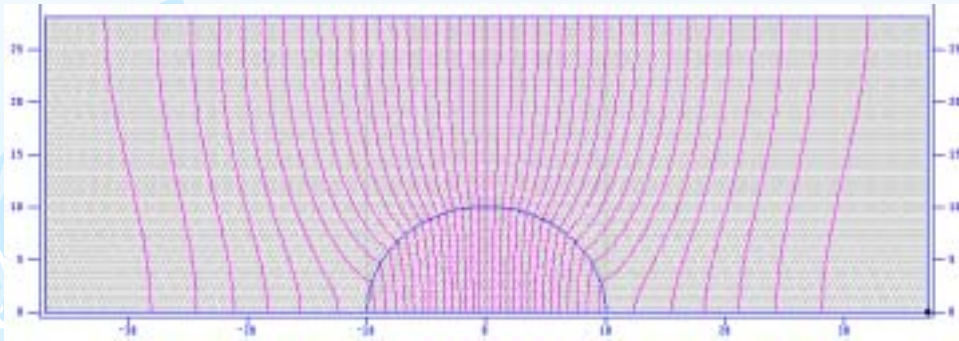


$r=30$  [0.116]

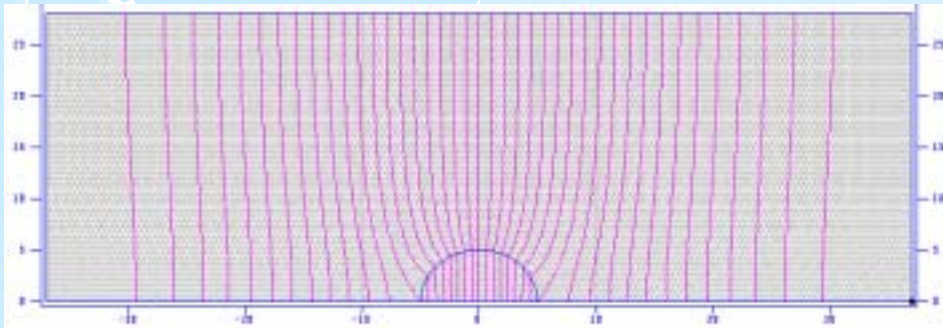
[ ]内の数値は  $r=1$  の中心電界に対する円柱中心の電界の比

$d=20\text{mm}$

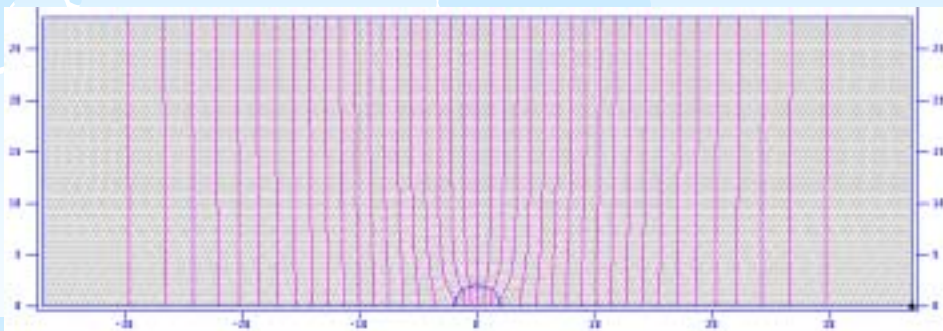
# 誘電体の大きさによっても電界分布と強度が変わる



$d=20\text{mm}$   
[0.222]



$d=10\text{mm}$   
[0.195]



$d=4\text{mm}$   
[0.183]

$r=10$

# マイクロ波と化学反応<sup>1)</sup>

効果1 迅速・内部・均一加熱

効果2 ローカルスーパーヒーティング

効果3 特殊効果(非熱効果)



極めて短い時間での化学反応(1ないし3桁の加速)  
高収率  
特異な選択性  
無触媒反応  
無溶媒反応

- ・ 現状は殆ど実験室レベル
- ・ セミプラントレベルの装置開発の動きがある  
(バッチ、セミバッチ、流通型)

1) 和田、竹内、滝沢、小林:マイクロ波の化学プロセスへの応用、化学工学Vol.69,No.4、pp205

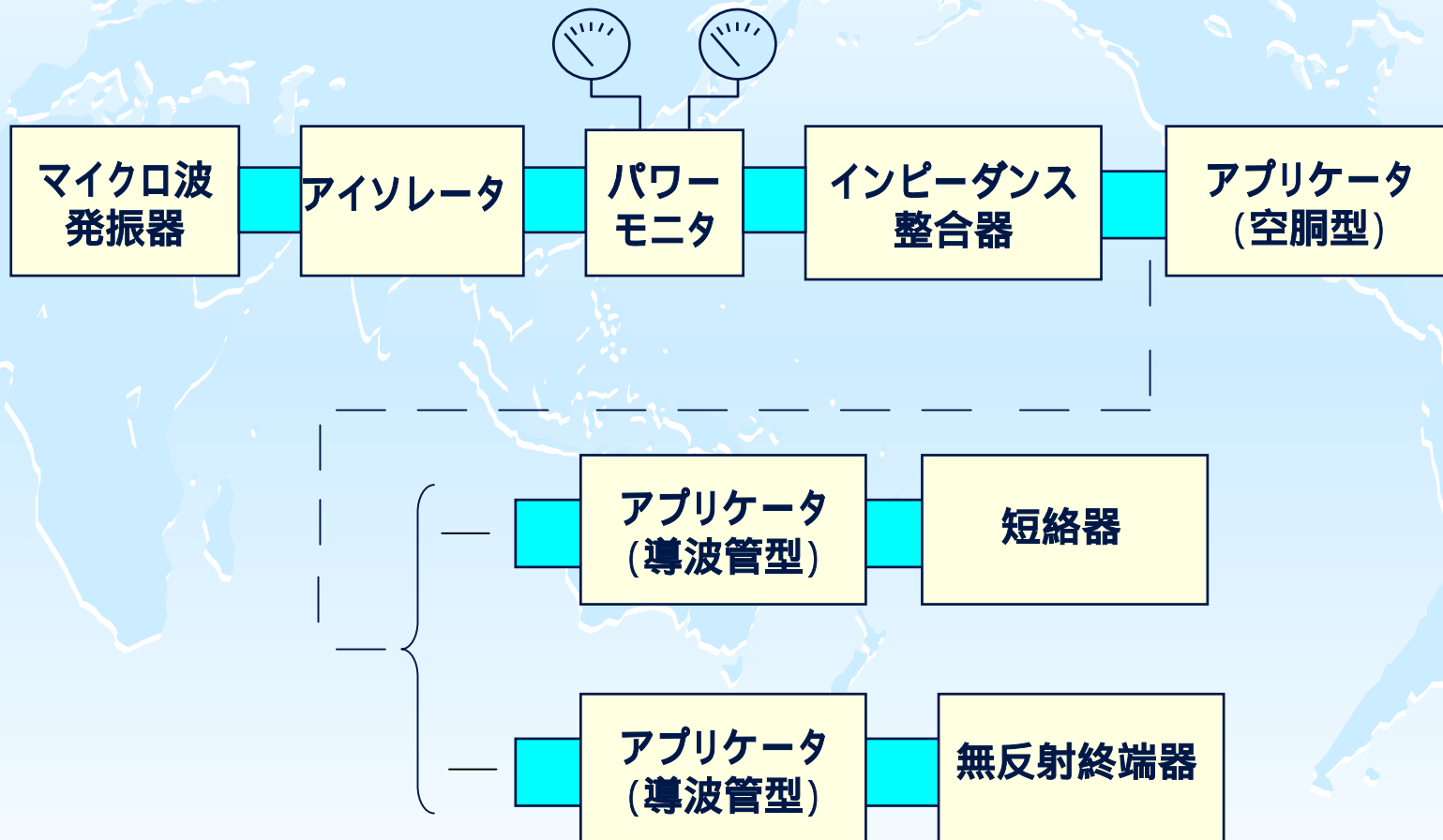
## マイクロ波反応器の種類

反応器の種類		モード	整合	位置	同調	備考
整合負荷 導波管型	E と	TE10	*			グリーンチーフ
	E と //		必要			
短絡 導波管型	E と	TE10	*	調整		
	E と //		必要	必要		化学 & 粉末冶金装置
空洞 共振器型	E と	TE110	必要		必要	
	E と //	TE010				
		TM110				シート加熱装置
		TM010				化学反応装置
		マルチモード	**			化学反応装置

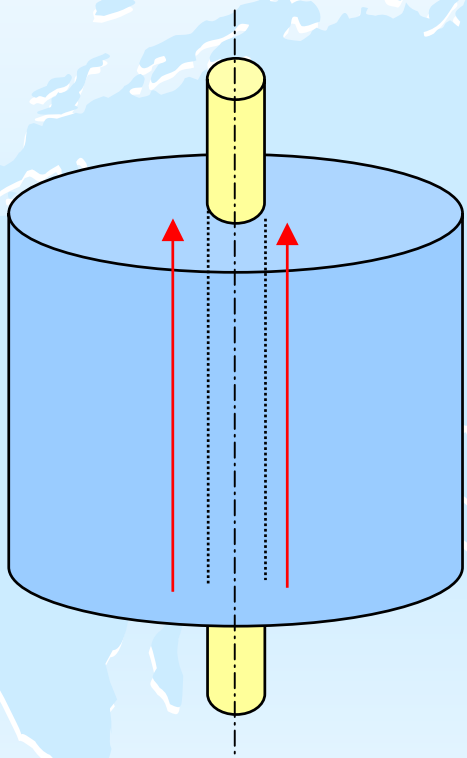
- \* ポストで対応
- \*\* 工業用では整合器を使用

# マイクロ波装置

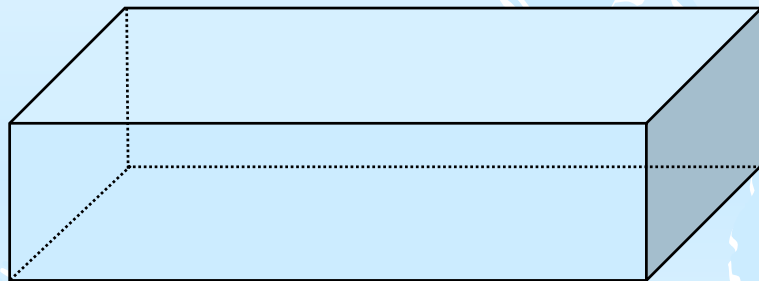
反射波電力 進行波電力



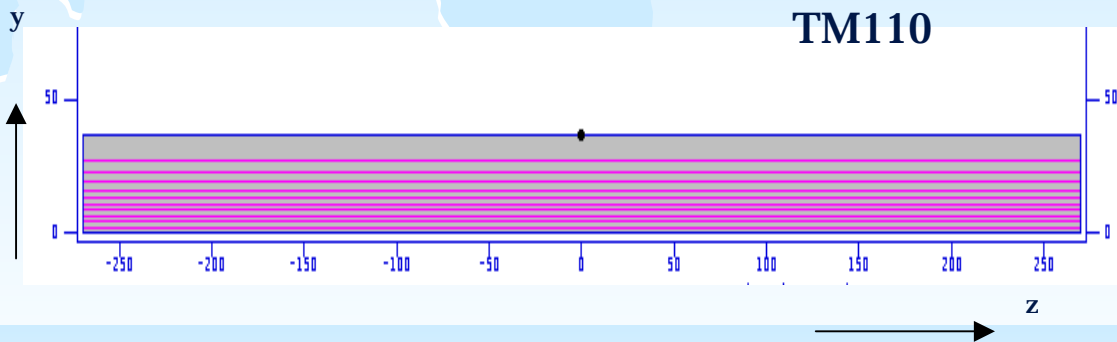
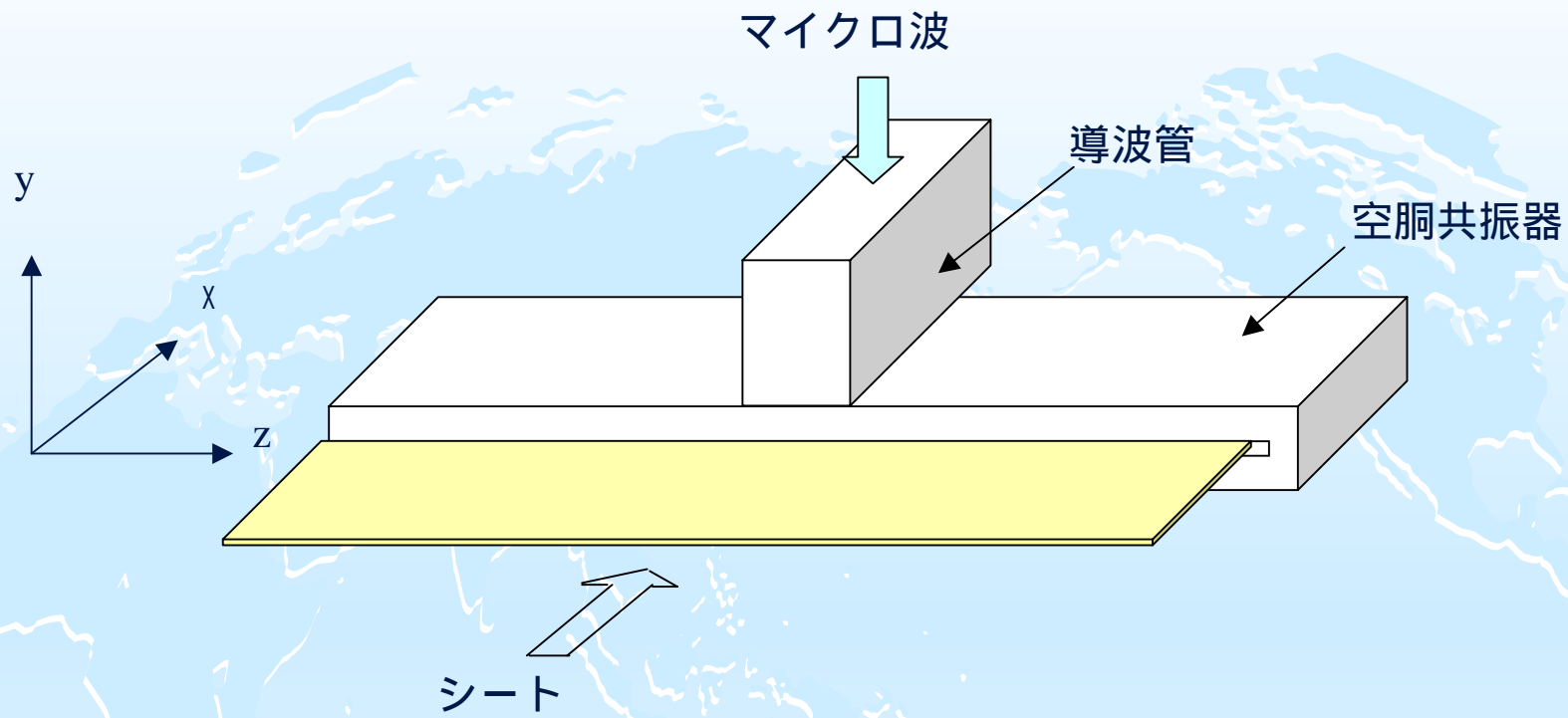
# シングルモード反応器



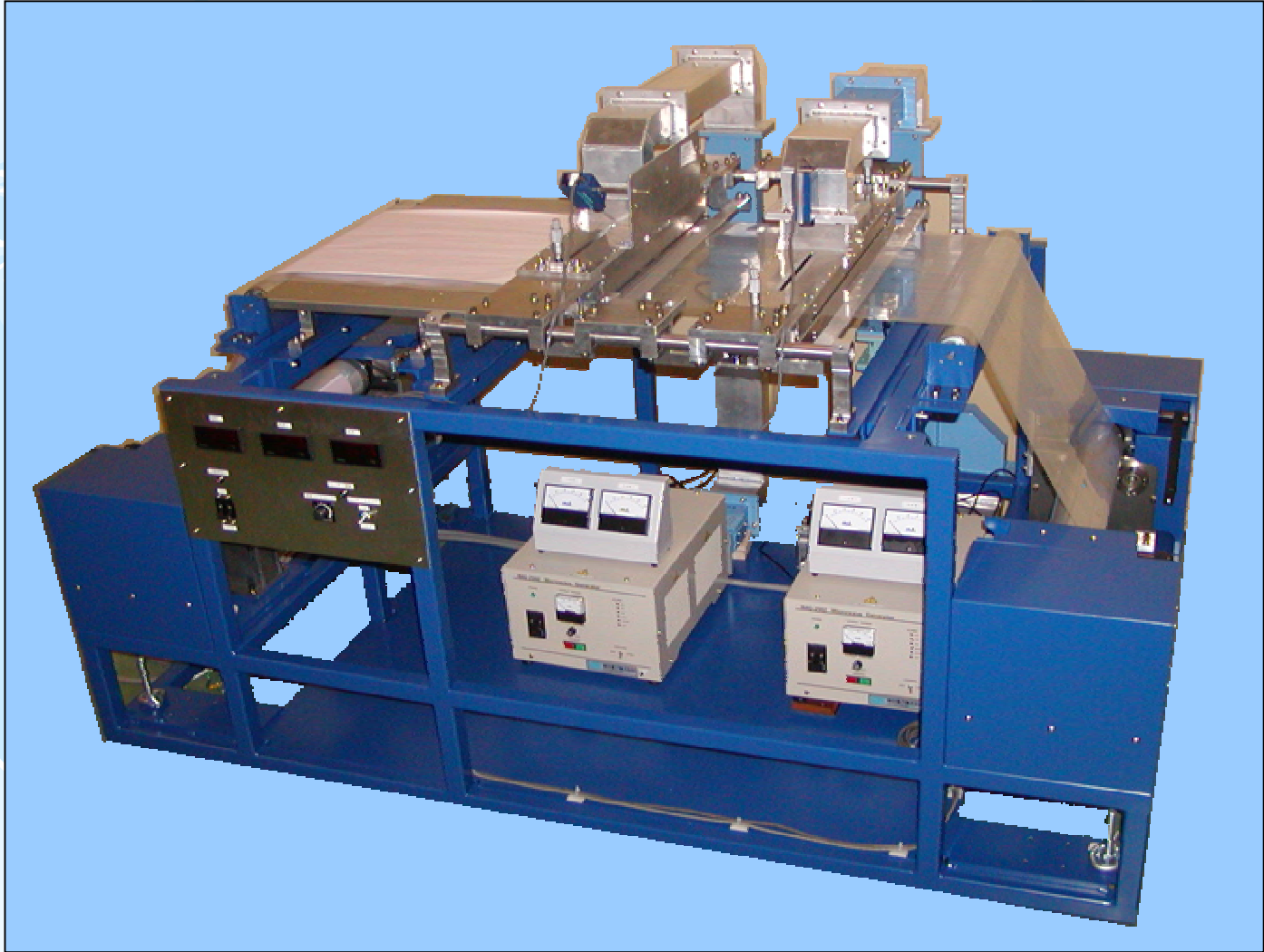
TM010モード



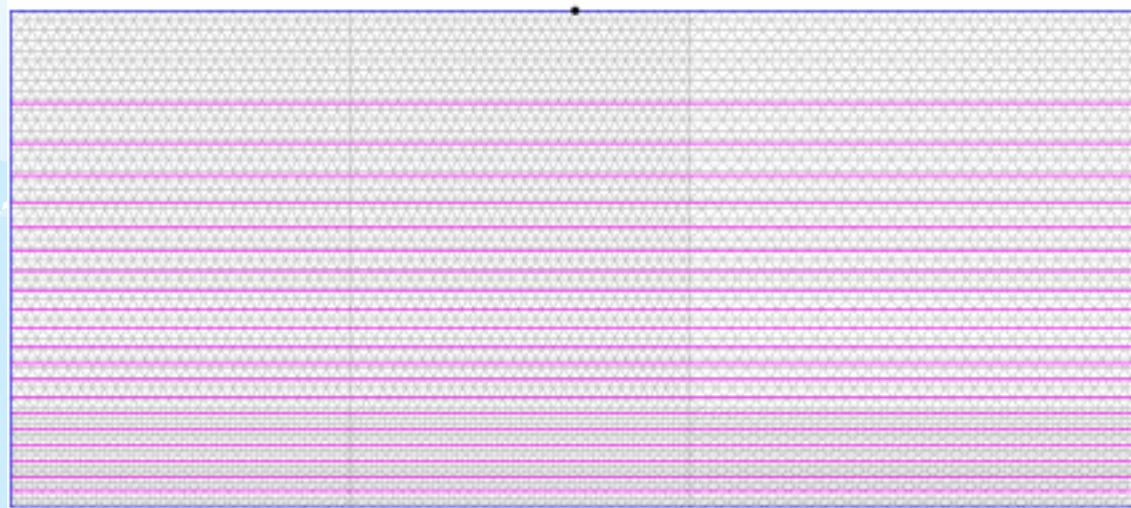
TM110モード



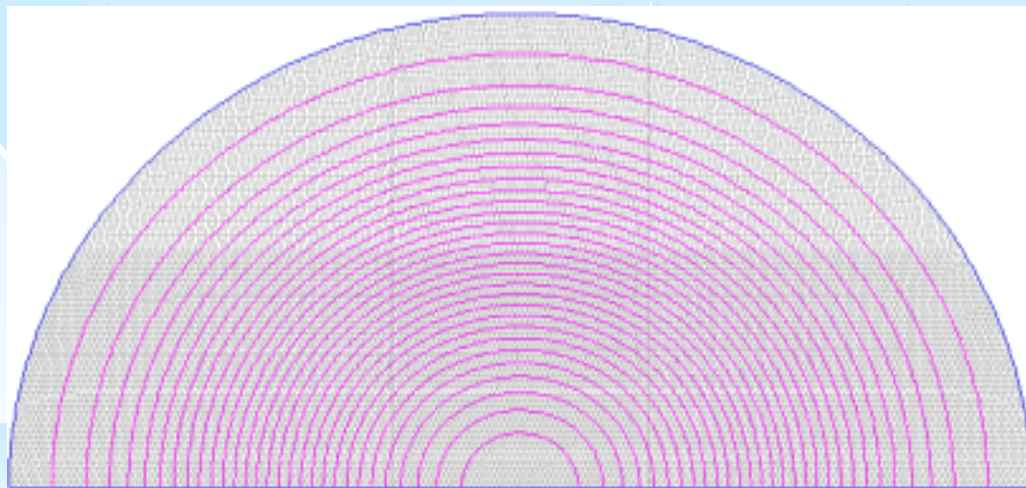




# TM<sub>010</sub>およびTE<sub>010</sub>モードの電界分布

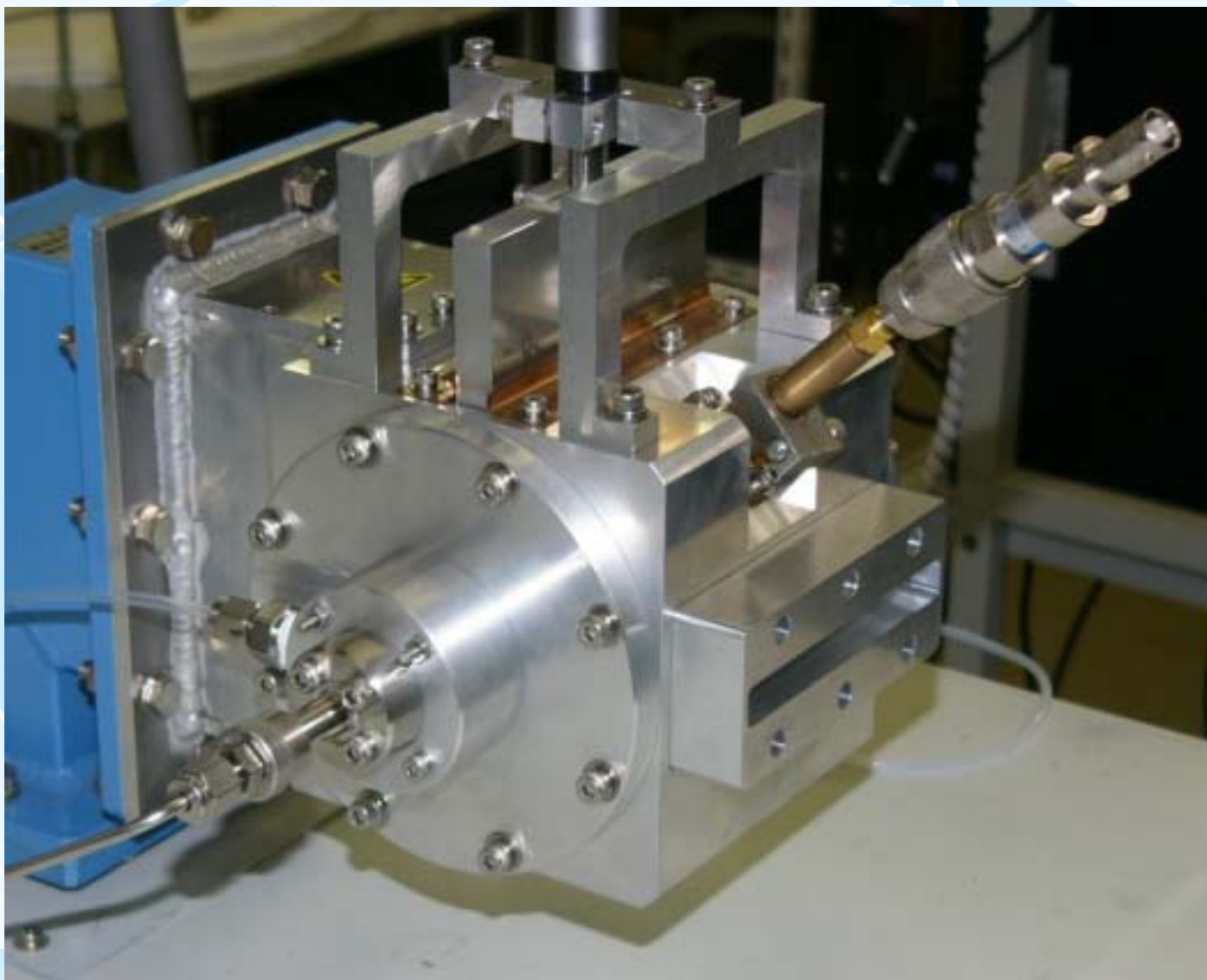


TM<sub>010</sub>  
(z-r 平面)



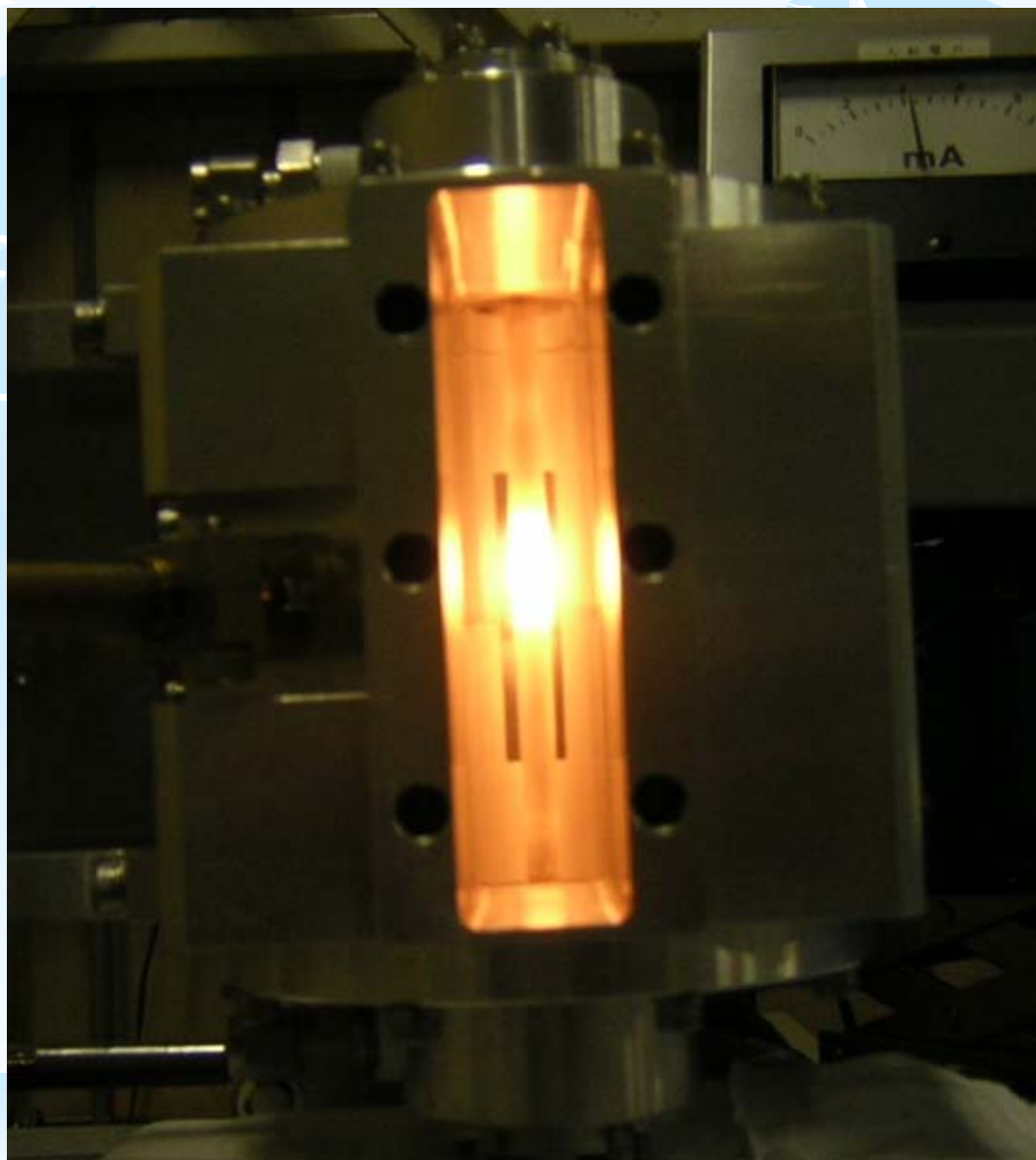
TE<sub>010</sub>  
(r-z 平面)

# メンブレンリアクタ実験装置

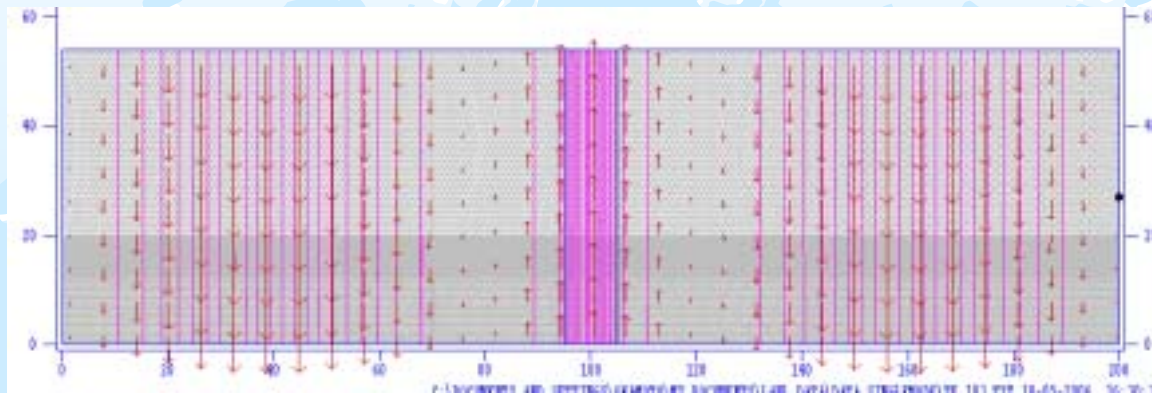


写真：産総研コンパクト化学プロセス研究センター殿提供

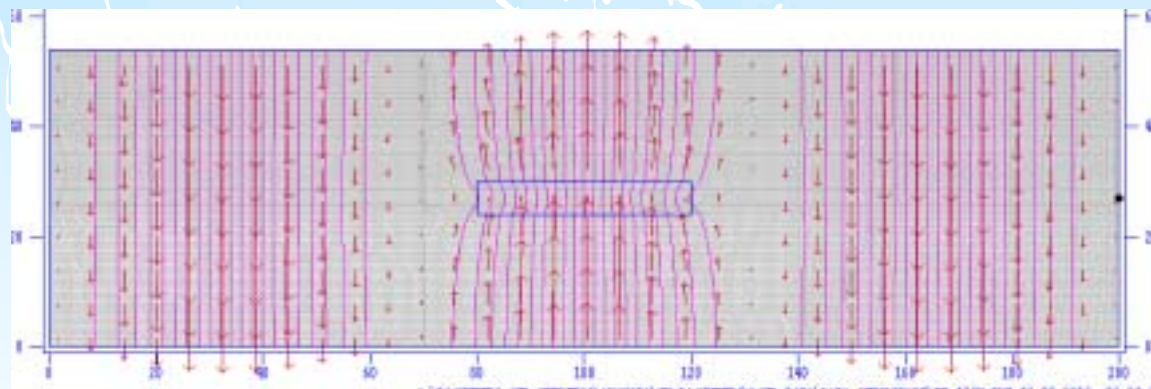
# TM010空洞による加熱例



# TE103モードの共振



電界に平行な  
板を挿入

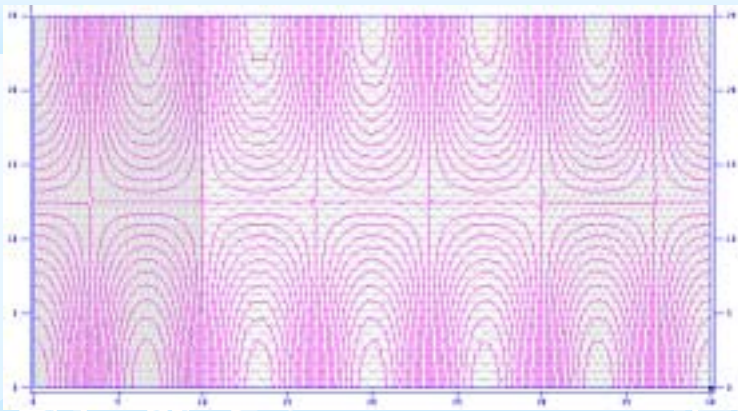


電界と直交する  
板を挿入

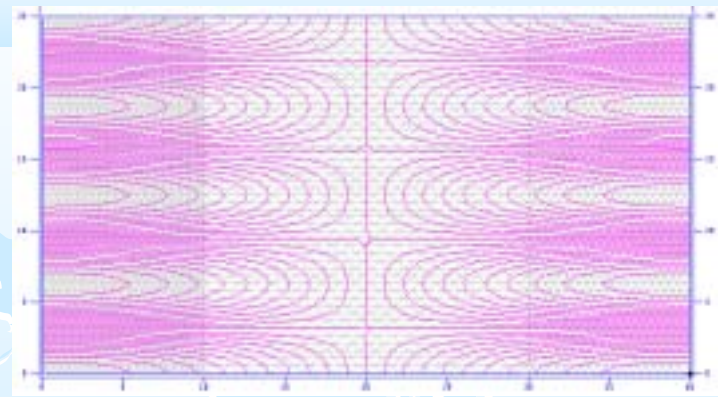
誘電体内で電界は約  
約1/6に低下している

比誘電率 = 6

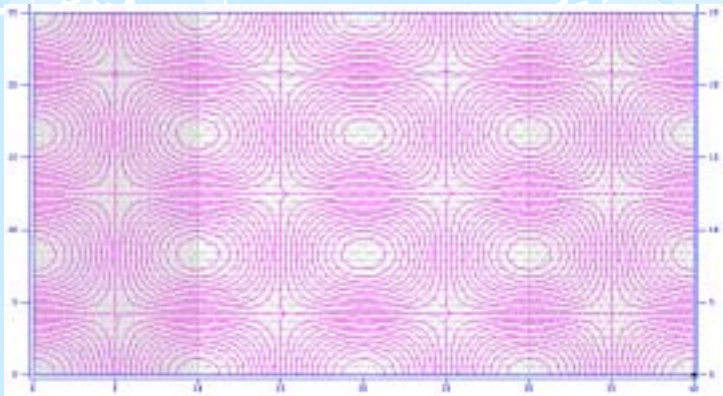
1



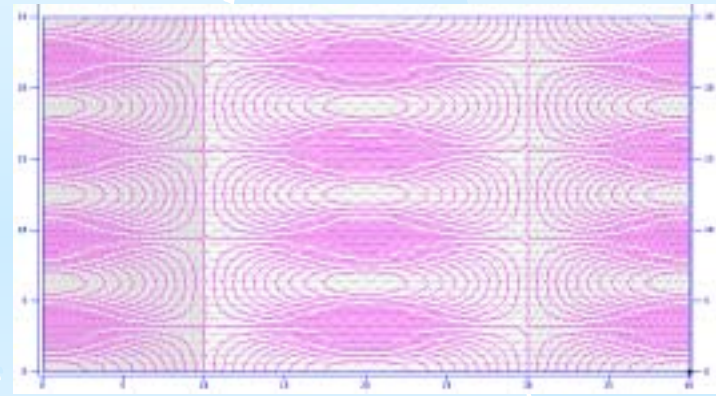
4



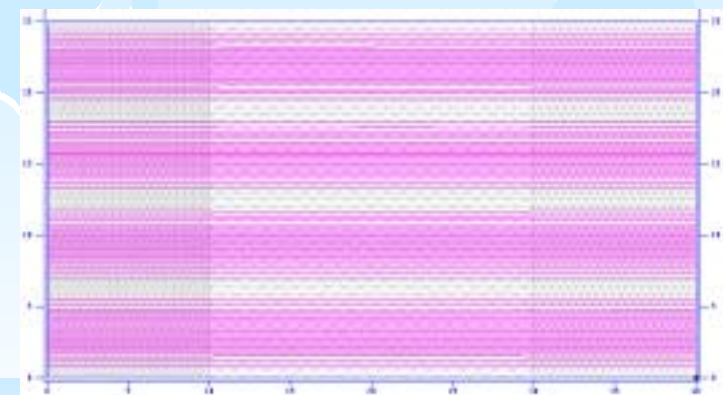
2



5



3



1 2,337MHz

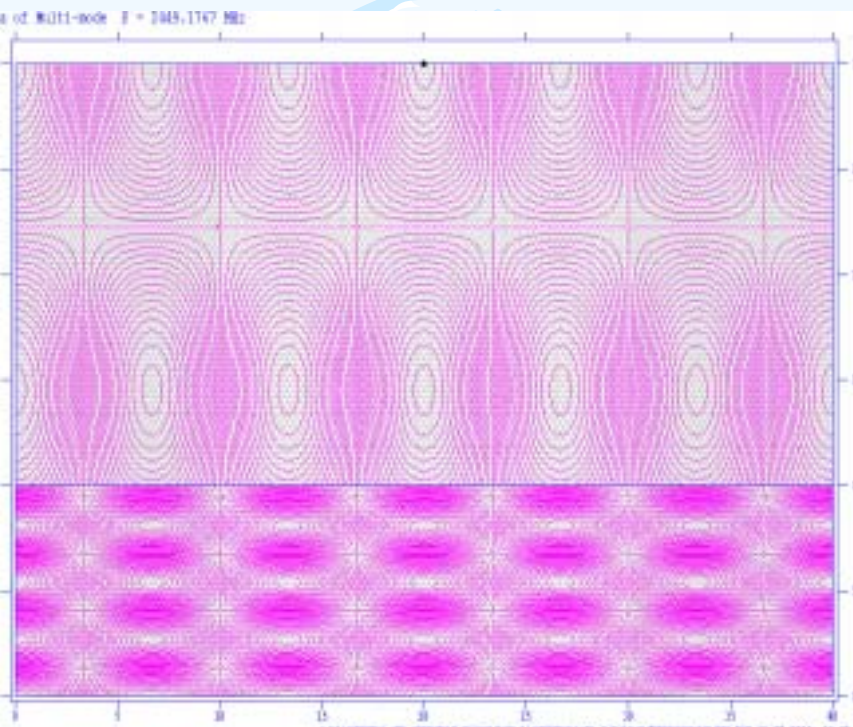
4 2,431MHz

2 2,346MHz

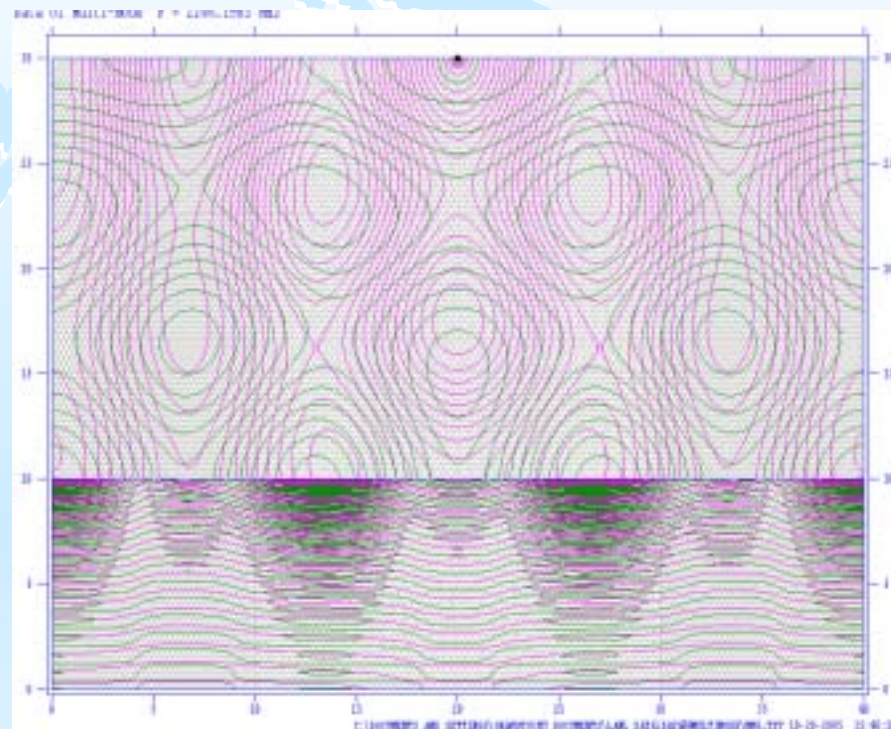
5 2,517MHz

3 2,402MHz

マルチモード空洞の計算例(TM)  
(2次元シミュレーション)



マルチモード共振の電界分布  
 [ 下1/3の部分に比誘電率 = 6の  
 誘電体を充填した場合 ]



マルチモード共振の電界分布  
 [ 下1/3の部分に比誘電率  $70 + j10$  の  
 誘電体を充填した場合 ]