

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)

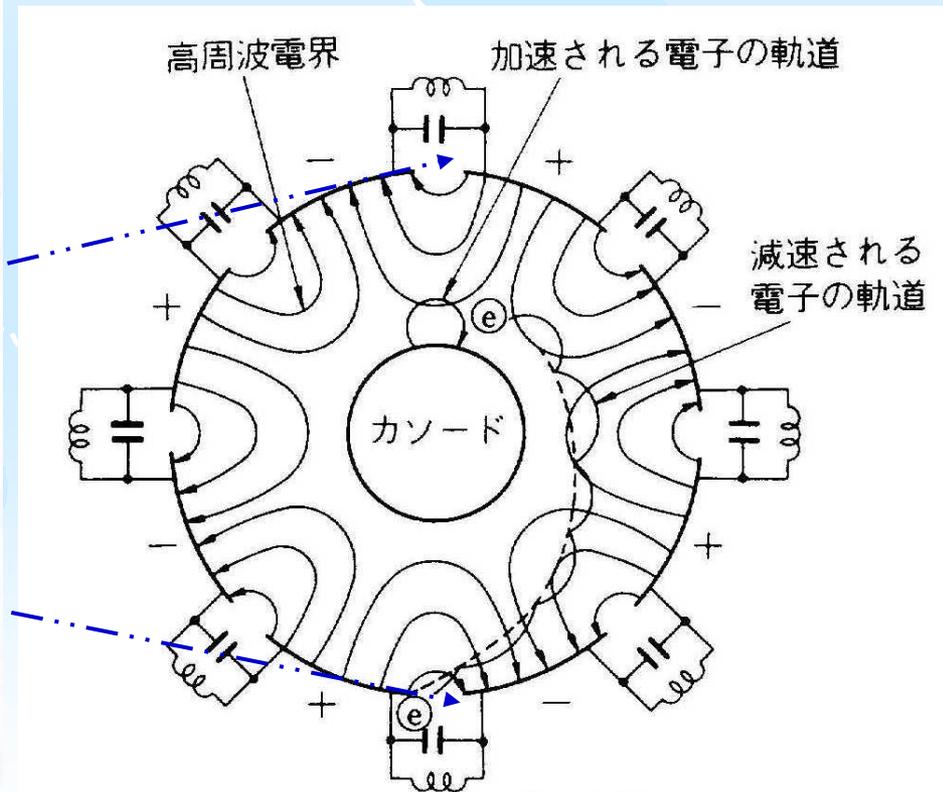
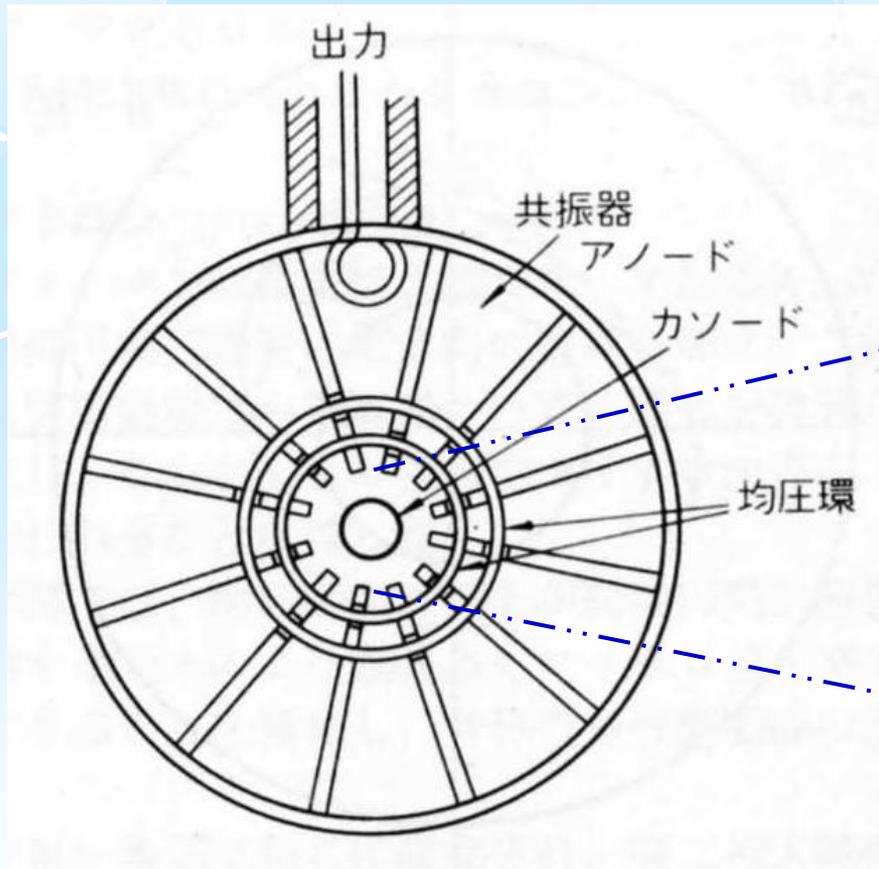
進行波管

通信、放送、レーダ

ジャイロトロン

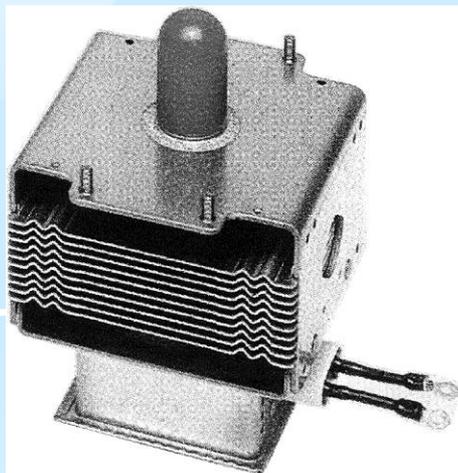
核融合ECH、ミリ波加熱

マグネトロン

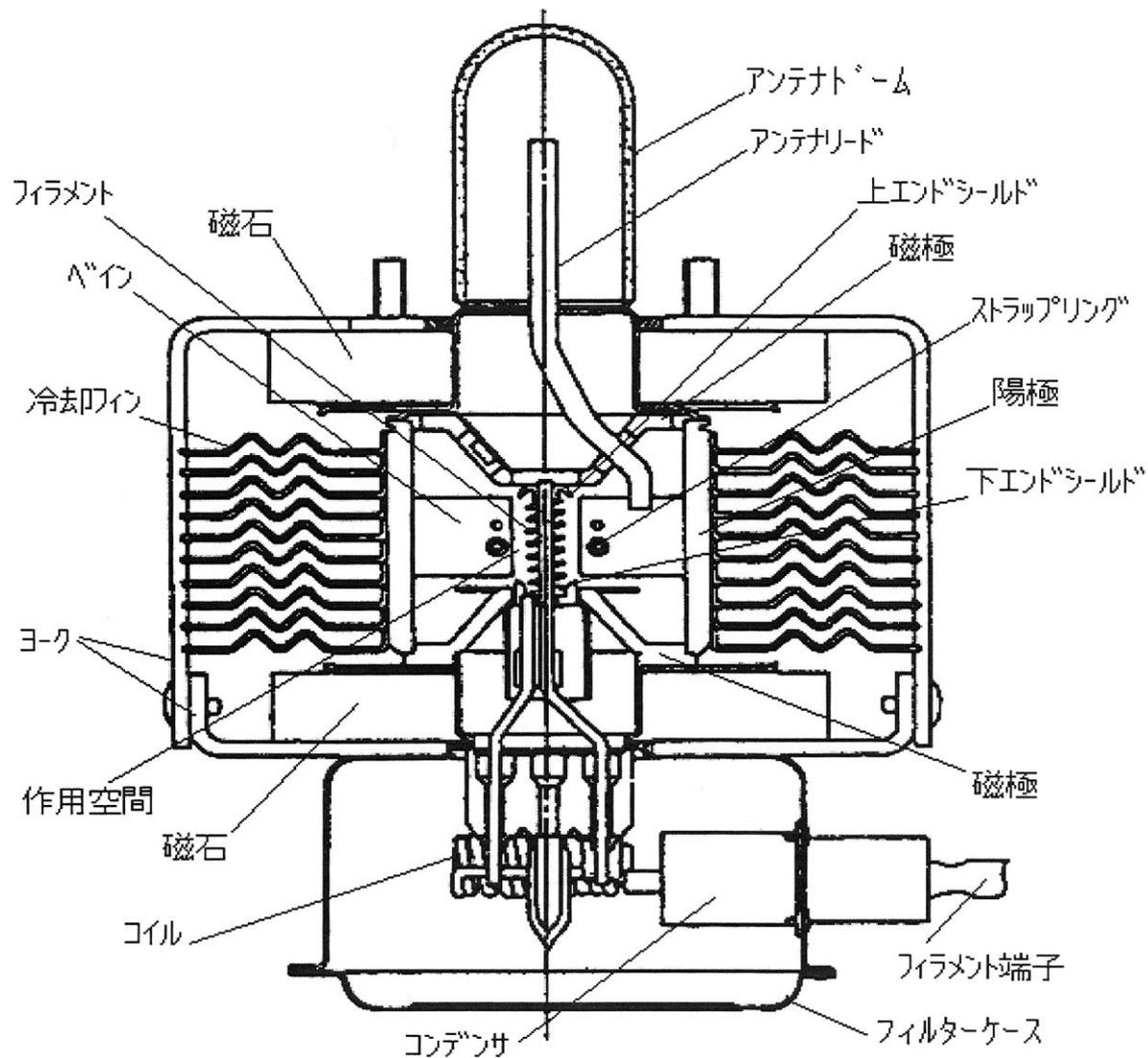


マグネトロン

2M130



$P_o: 1,800W$ 、強制空冷



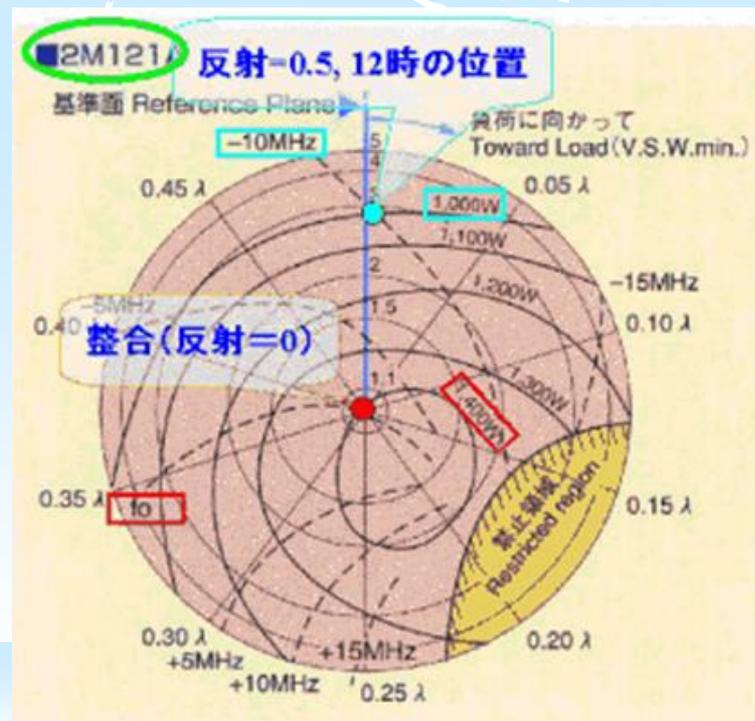
マグネトロン発振装置の問題点:

- ① 出力を変えると周波数が変化する
- ② 反射によって出力と周波数が変わる
- ③ 周波数スペクトラムが良くない
(6-10MHzの幅を持っている)

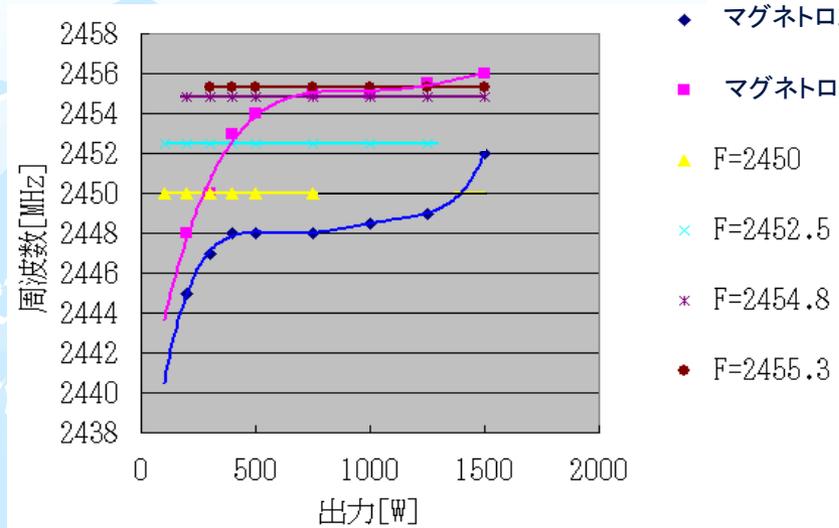
リーケダイアグラム

単相全波整流
定格陽極電流

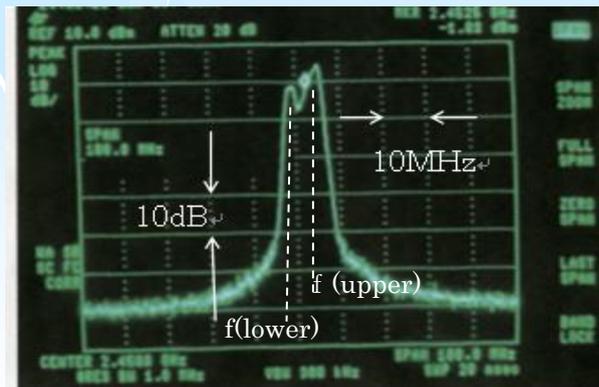
————— 出力
----- 周波数



マグネトロンの特性改善

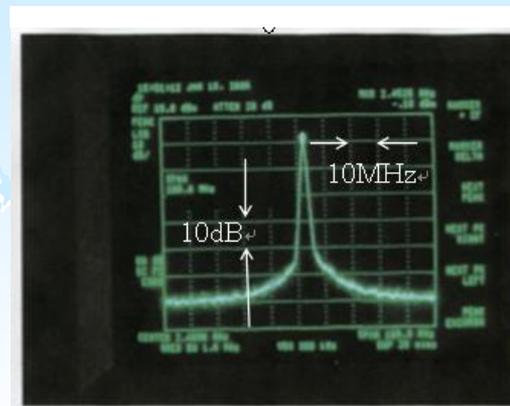


マグネトロンおよび制御型マグネトロン装置の出力特性



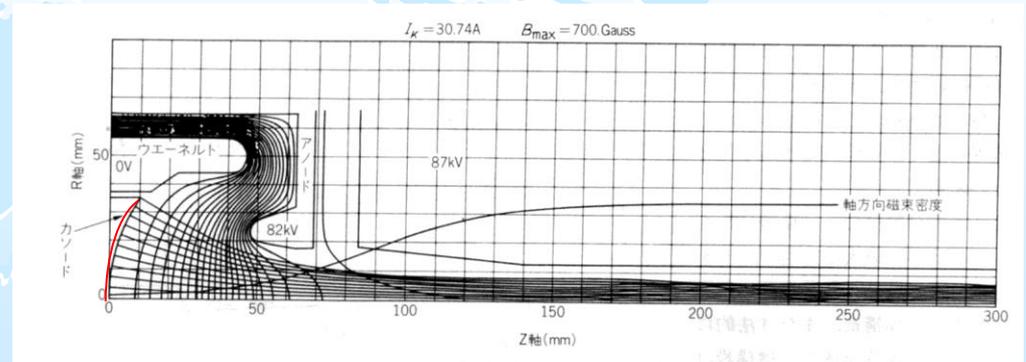
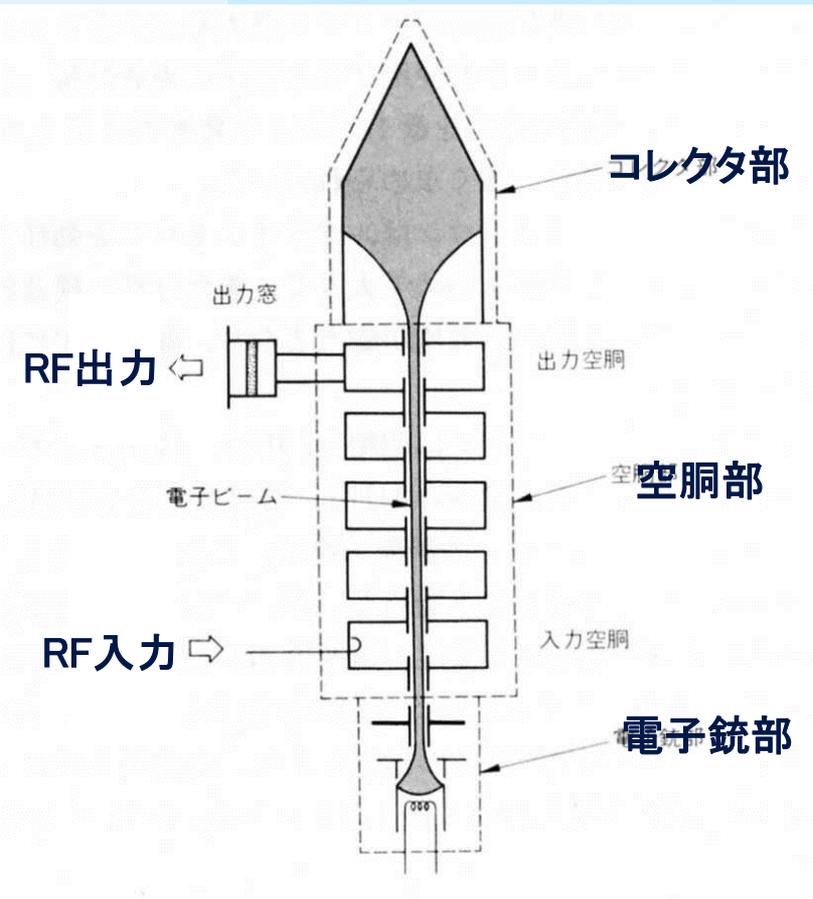
マグネトロン発振装置の出力波形
(代表的な波形の一例)

IDXマイクロ波

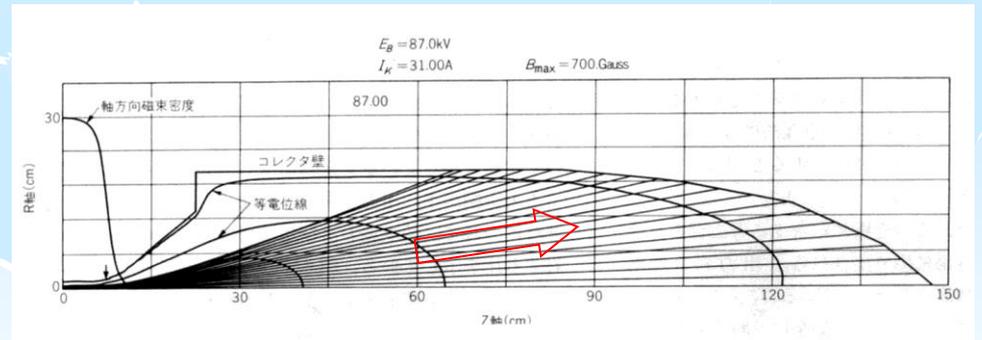


制御型マグネトロン装置の出力波形
(代表的な波形の一例)

クライストロン(直進形)



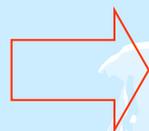
電子銃部の電子軌道



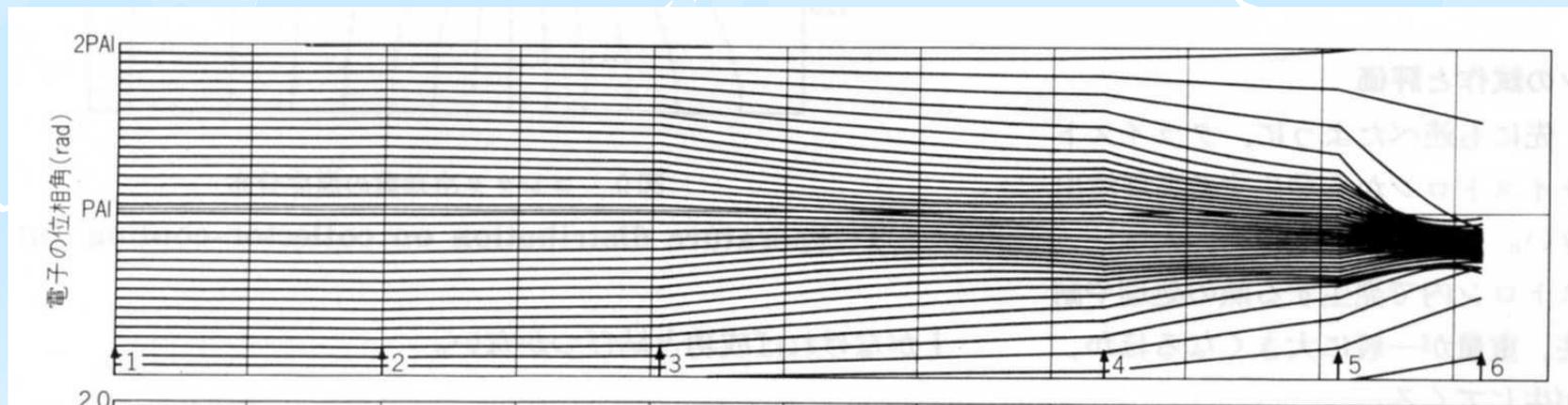
コレクタ部の電子軌道

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



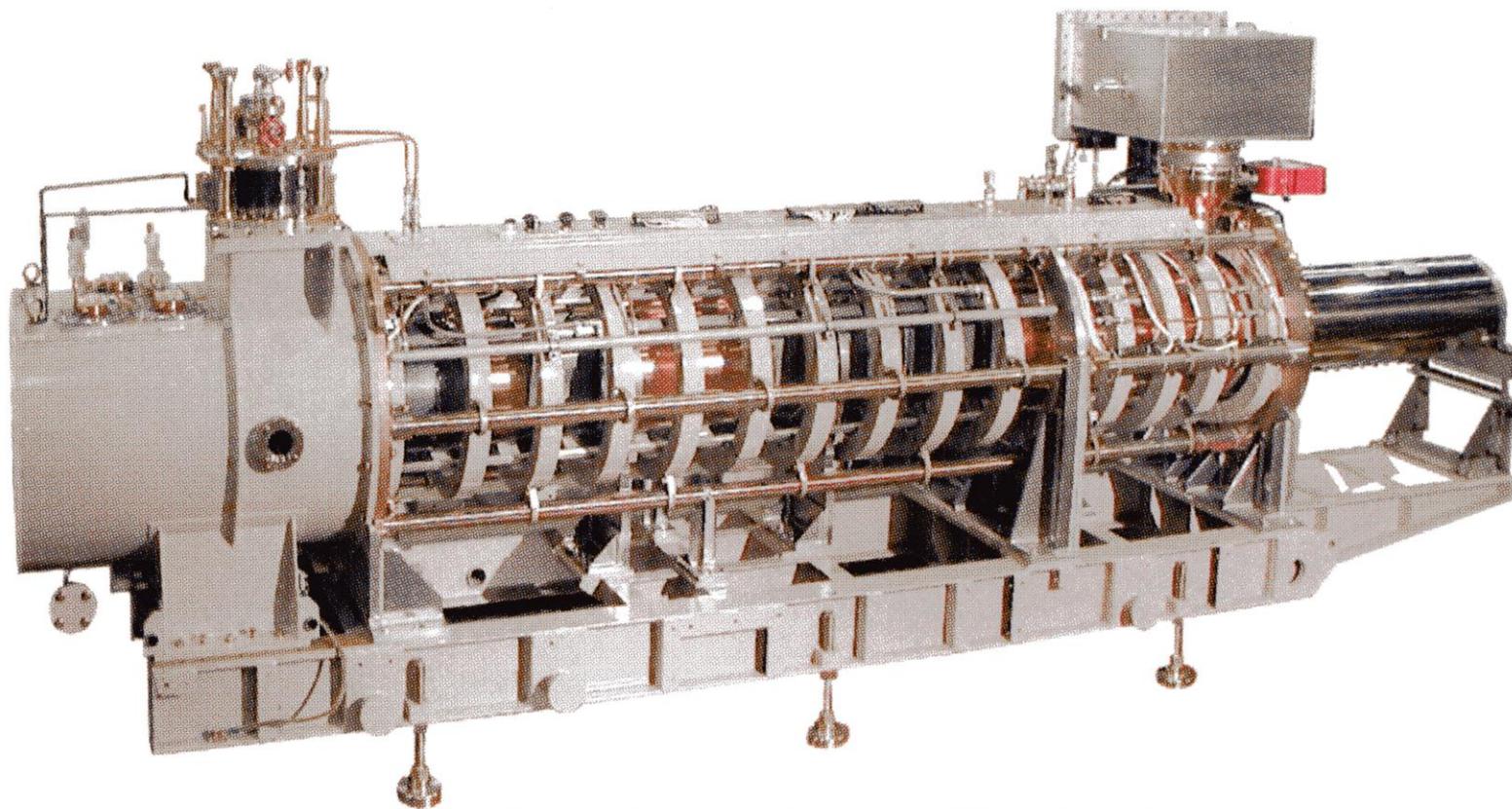
500MHz
CW 1,200kW

E3732
4.35m



E3712
1.9m

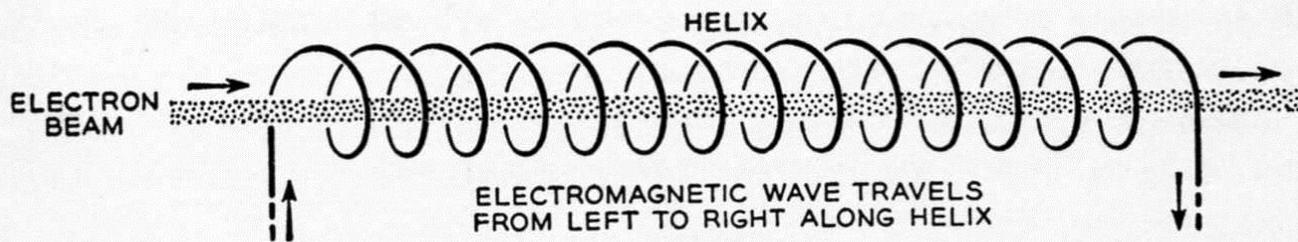
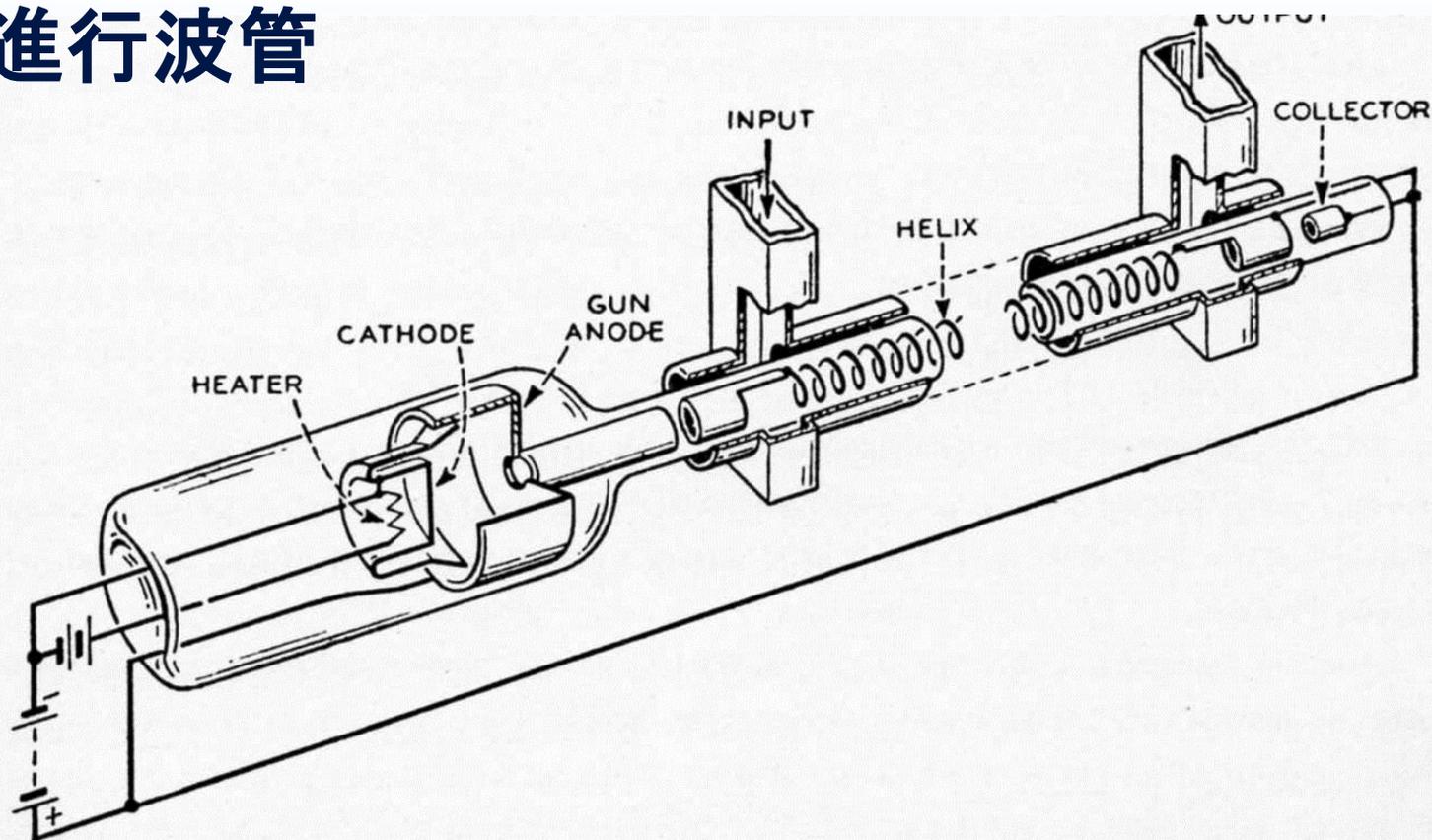
2,856MHz
パルス100MW



E3740A

(324MHz、パルス 3MW、パルス幅 620 μ s)

進行波管



進行波管

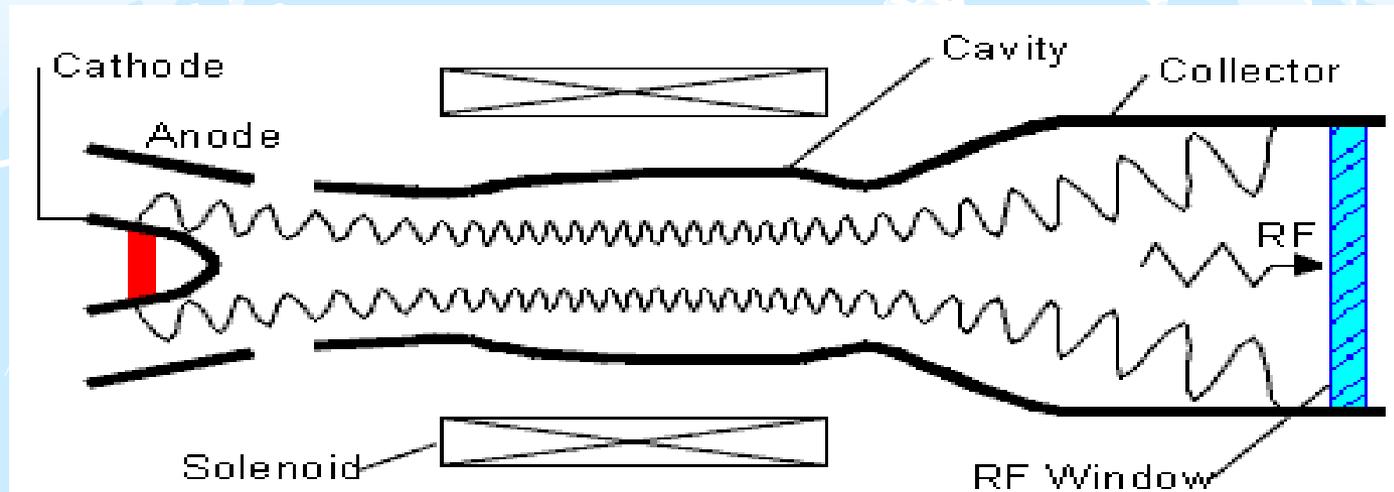
- マイクロ波中継回線
- UHFテレビ放送
- 衛星通信・衛星放送搭載/地球局
- レーダ
- 飛行体搭載
- 測定器

- ・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

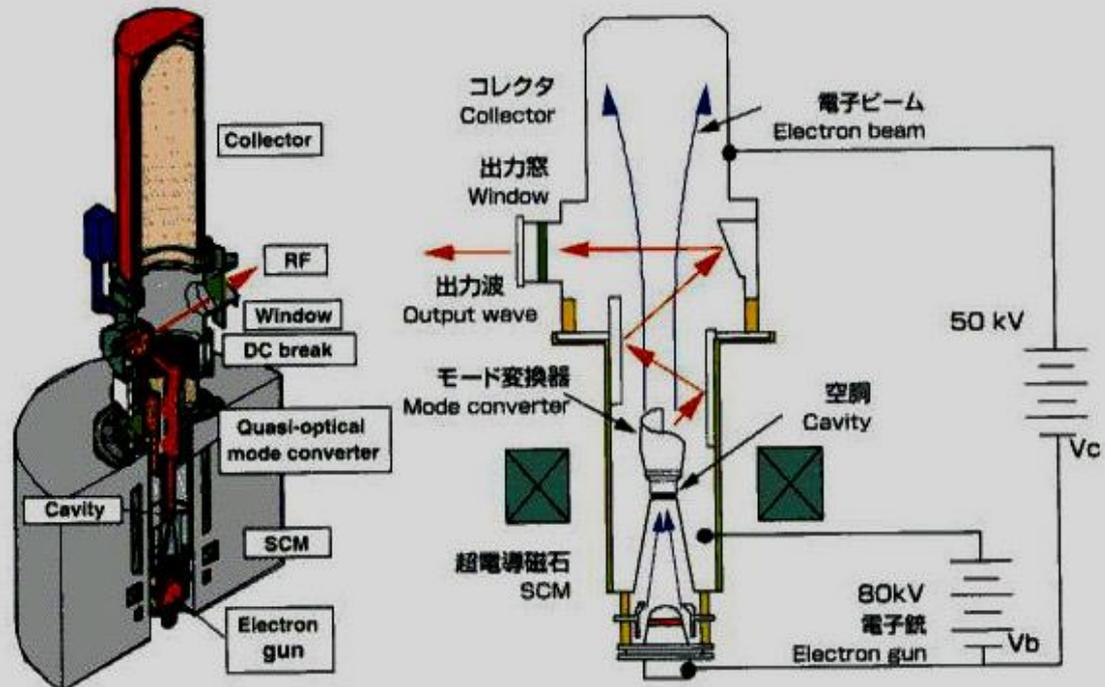
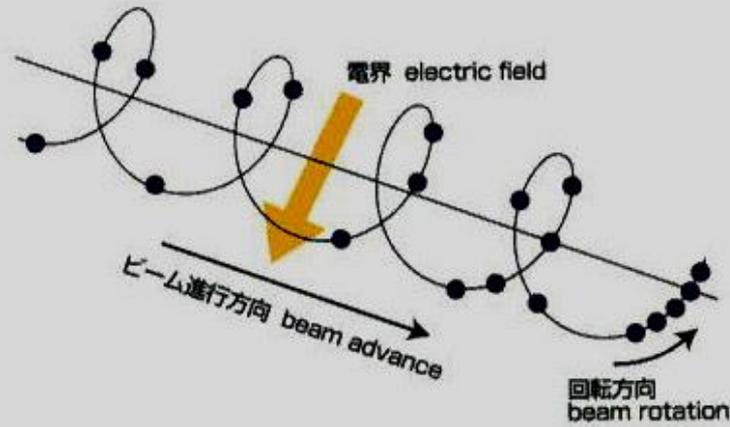
初期のジャイロトロン



PM収束ジャイロトロン
GTC0301

28GHz CW10kW
TE02 モード

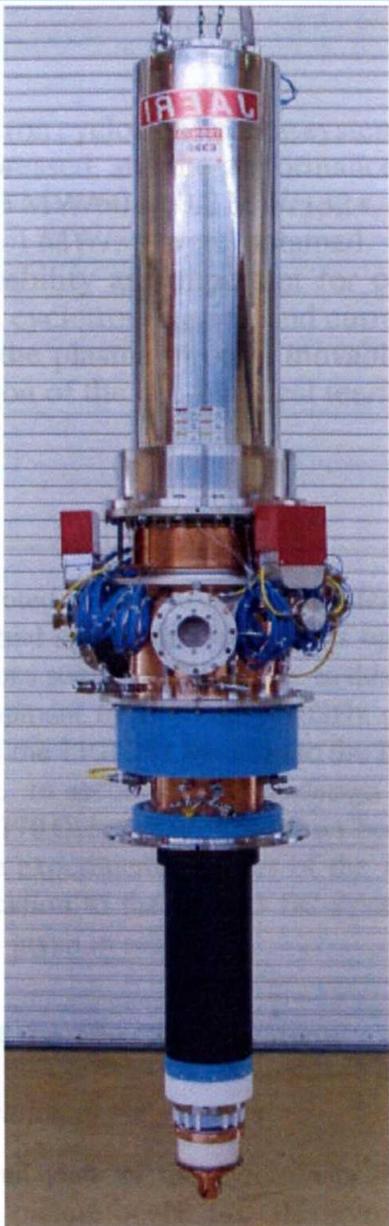
ジャイロトロン



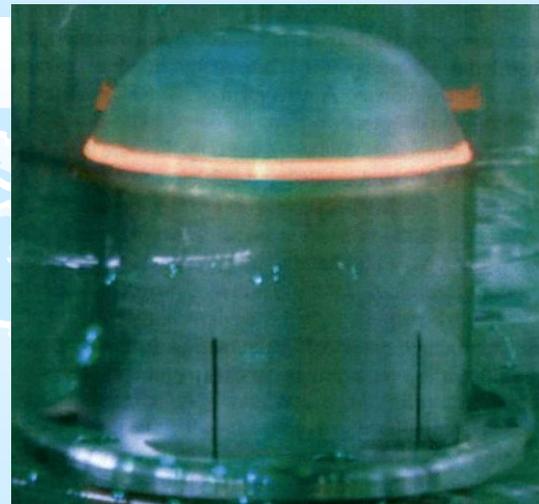
日本原子力研究所 提供
Picture courtesy of JAERI (Japan Atomic Energy Institute)

LHD ECH ジャイロトロン

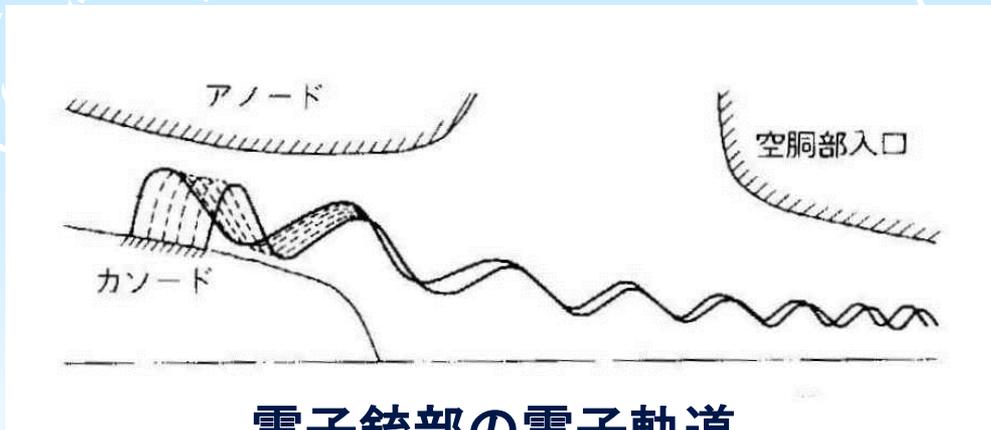
写真:NIFS提供



出力窓



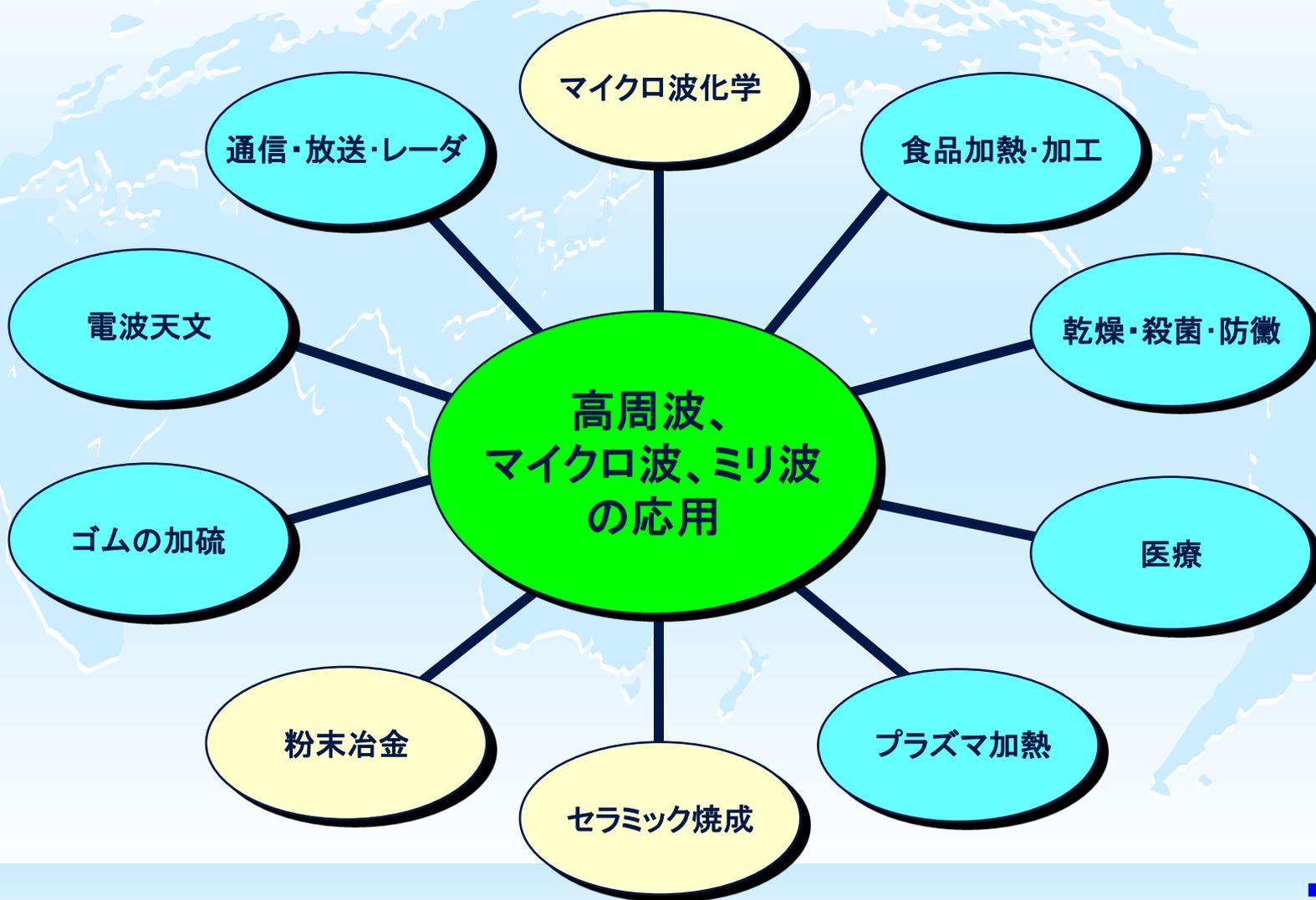
カソード



電子銃部の電子軌道

170GHz 600kW 1,000s
ジャイロトロン

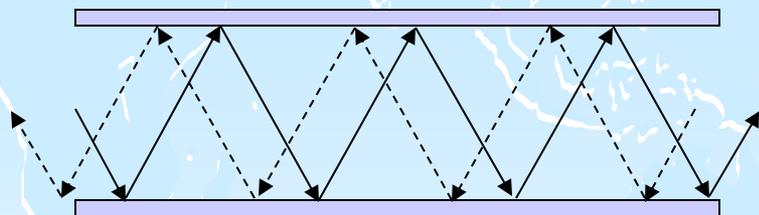
広がるマイクロ波の応用技術



ISM周波数

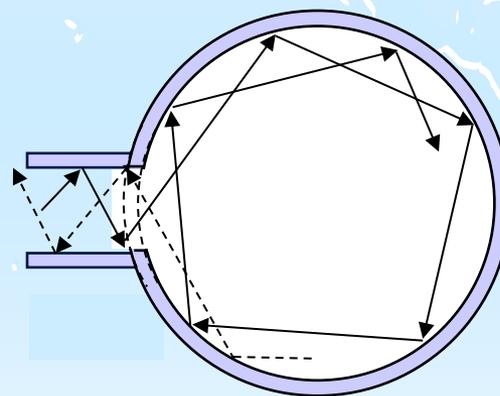
ISM周波数	帯域幅
6.78 MHz	± 15.0 kHz
13.56 MHz	± 7.0 kHz
27.12 MHz	± 163.0 kHz
40.68 MHz	± 20.0 kHz
915 MHz	± 13.0 MHz
2,450 MHz	± 50.0 MHz
5,800 MHz	± 75.0 MHz
24,125 MHz	± 125.0 MHz
61.25 GHz	± 250.0 MHz
122.50 GHz	± 500.0 MHz
245.00 GHz	± 1.0 GHz

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

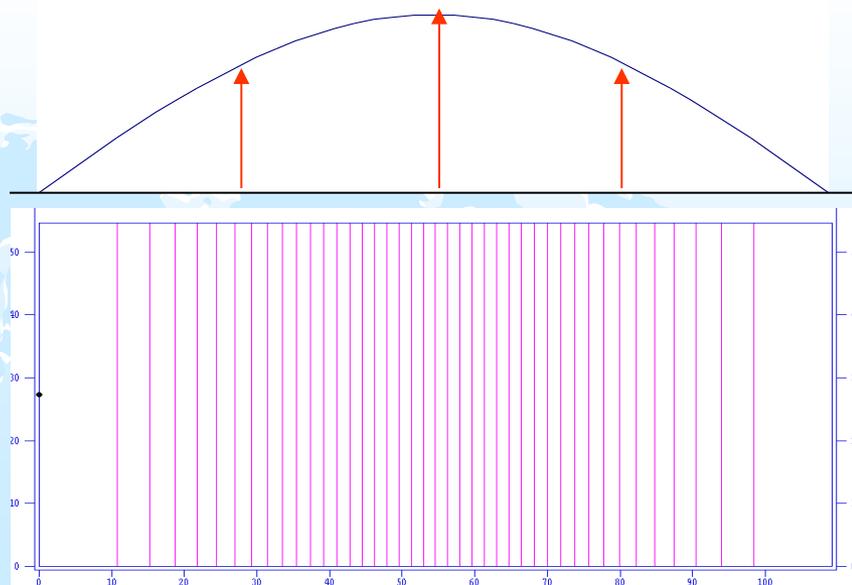
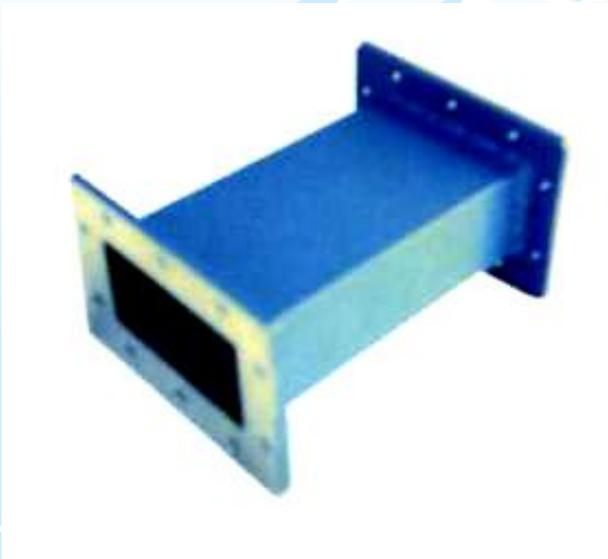


入射波



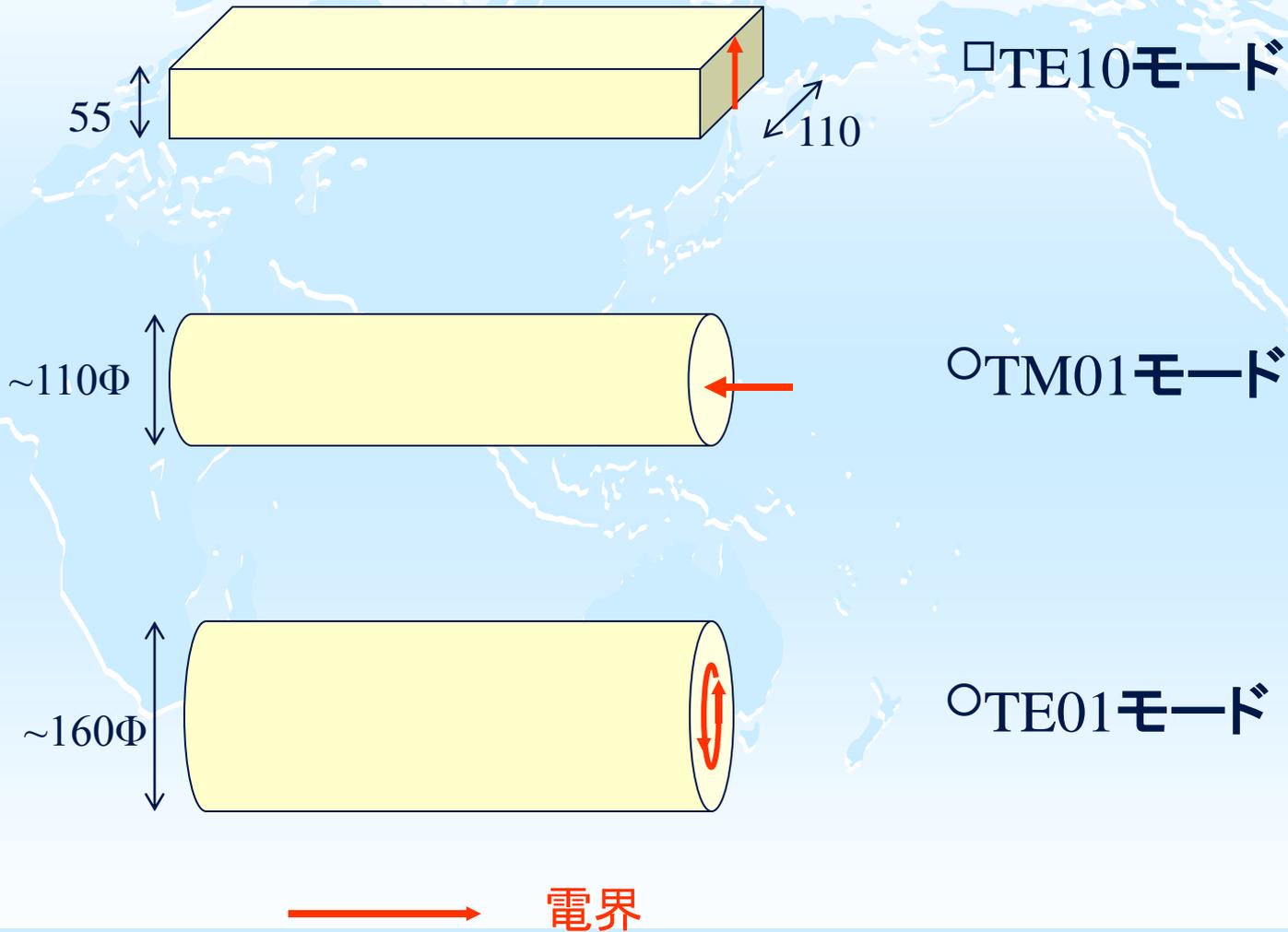
反射波

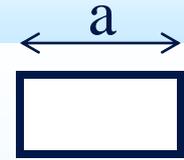
方形導波管



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





遮断波長:

□TE₁₀: $\lambda_c = 2a$

○TM_{mn}、TE_{mn} $\lambda_c = (2\pi R) / \chi_{mn}$

遮断域の単位長当たりの減衰:

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

$\lambda > \lambda_c$ 、 [dB/単位長]

モード	χ_{mn}
TE ₁₁	1.8411
TM ₀₁	2.4048
TE ₂₁	3.0542
TM ₁₁	3.8317
TE ₀₁	3.8317

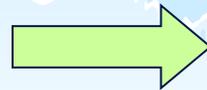
マイクロ波加熱、マイクロ波効果：

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。

- ① 選択加熱
- ② 高速加熱
- ③ 高温加熱
- ④ 高効率加熱
- ⑤ 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 ϵ_r

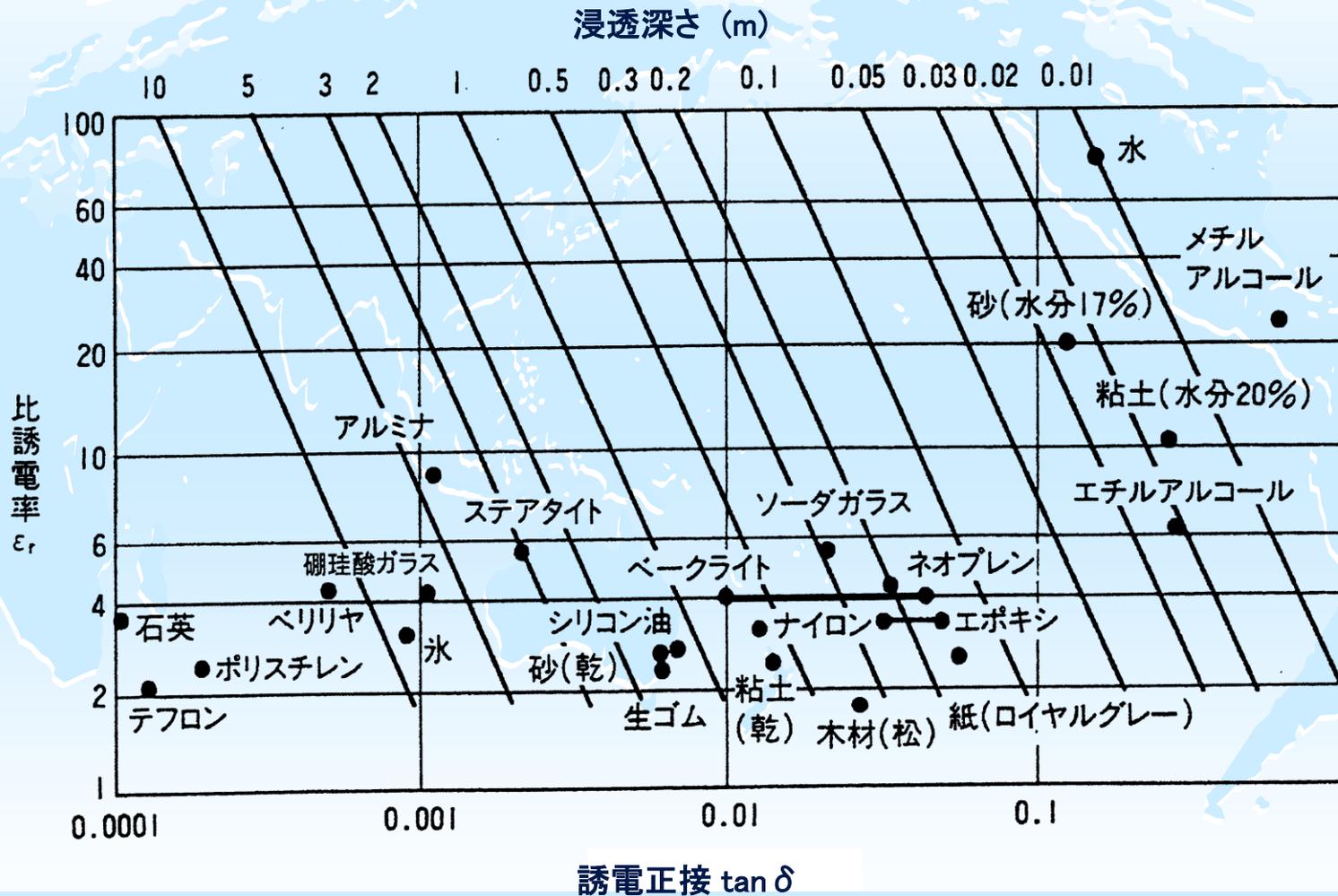
誘電体損失角 $\tan\delta$

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、 $\tan \delta$ 、浸透深さ ($f=2450\text{MHz}$)



Maxwellの方程式

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

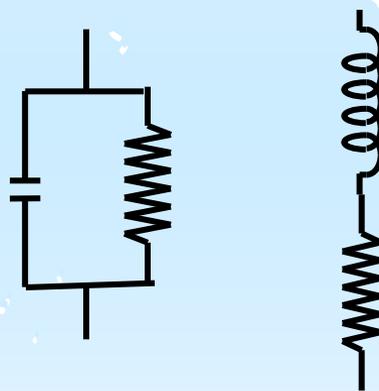
$$\text{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = (\sigma + j\omega\varepsilon) \vec{E} = \{(\sigma + \omega\varepsilon'') + j\omega\varepsilon'\} \vec{E}$$

複素誘電率 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$

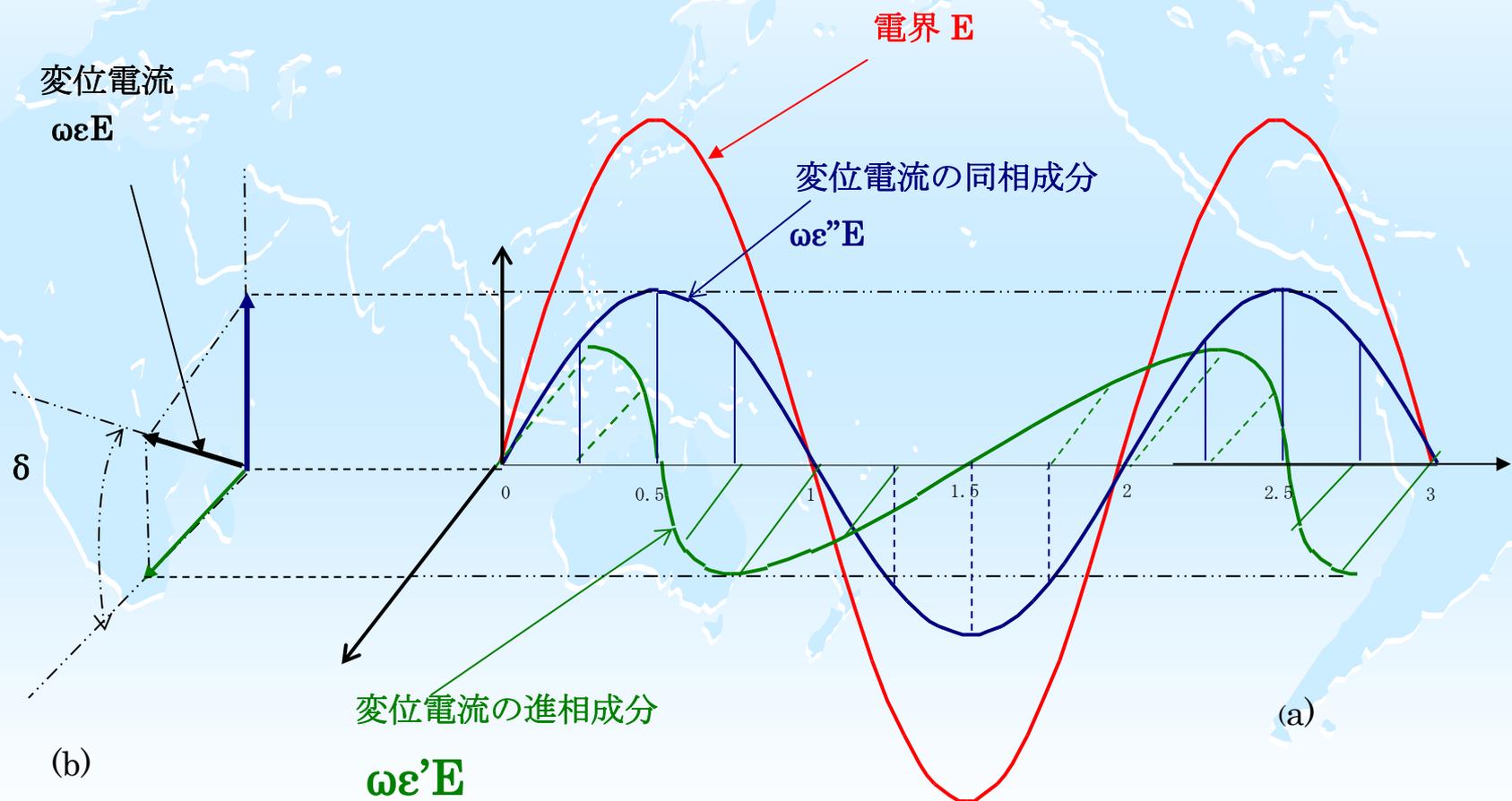
複素導磁率 $\mu = \mu' + j\mu''$

マイクロ波損失:

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

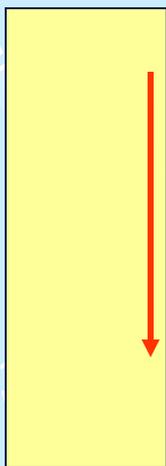


電界と変異電流



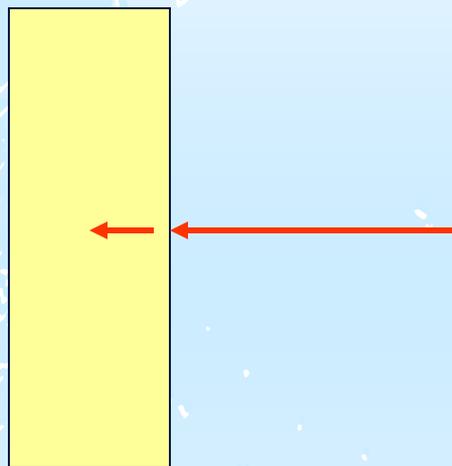
境界条件

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

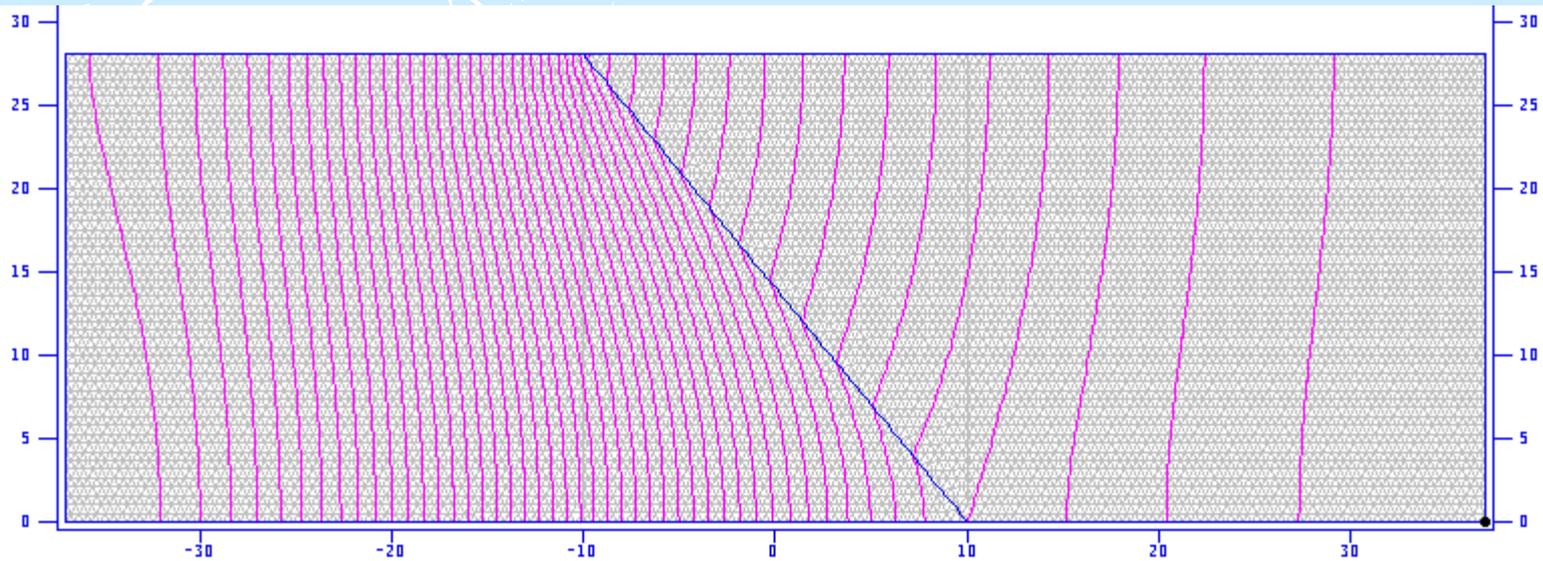
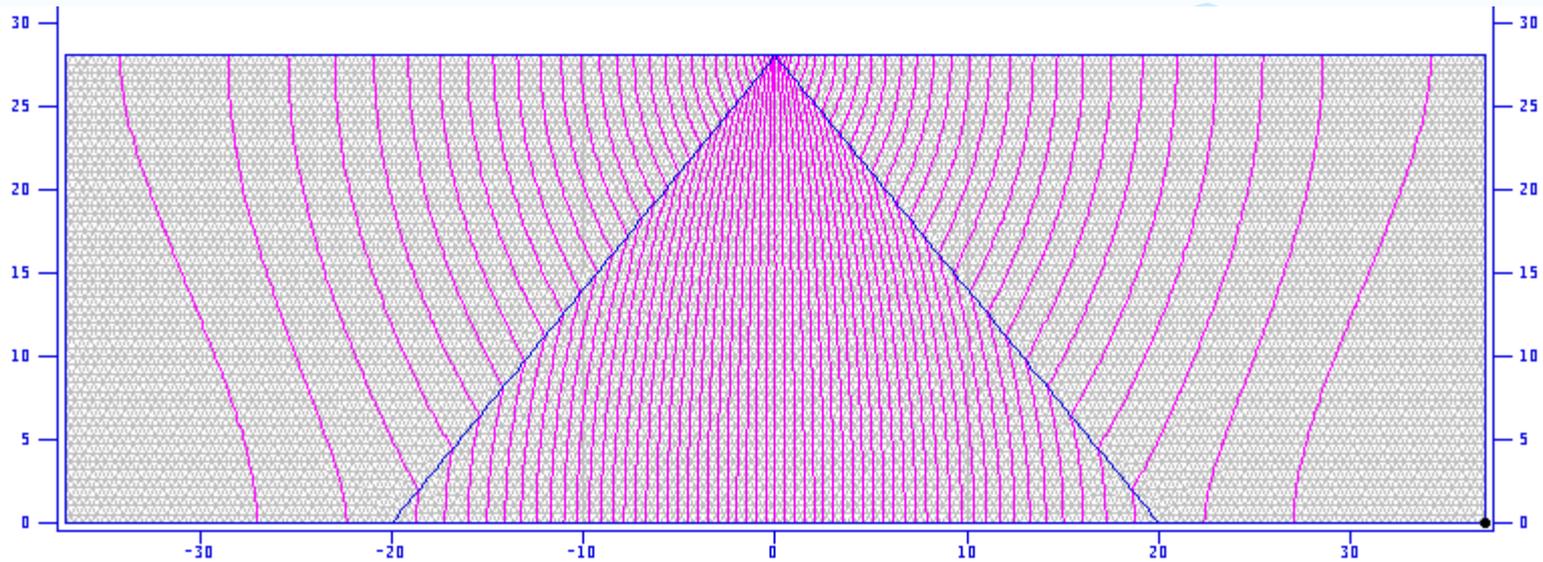
例えば、アルミナで
は電界が1/9、石英
では1/4になる

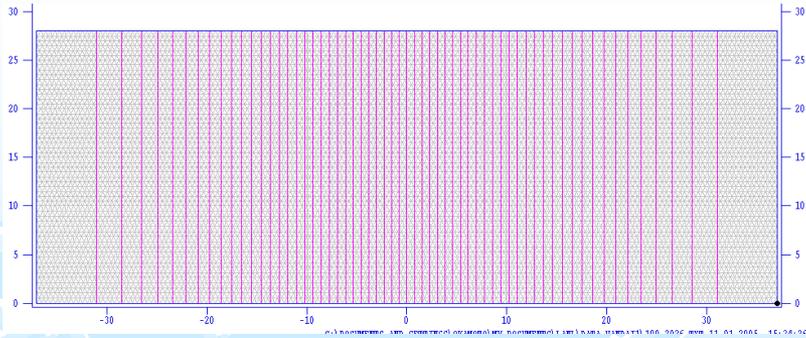
電界が斜めになっ
ている場合



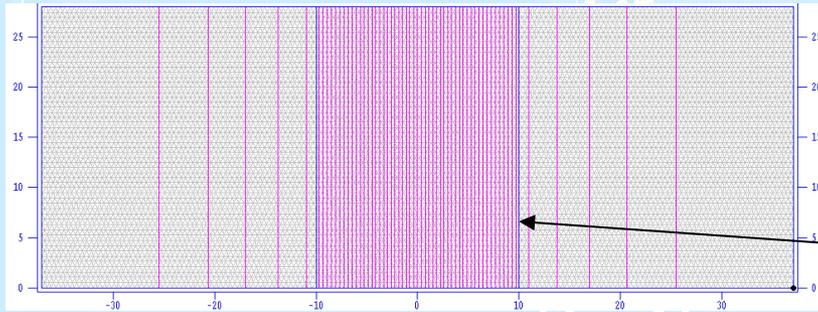
電界の向きが
表面に沿う方向
に屈折する

誘電体の影響





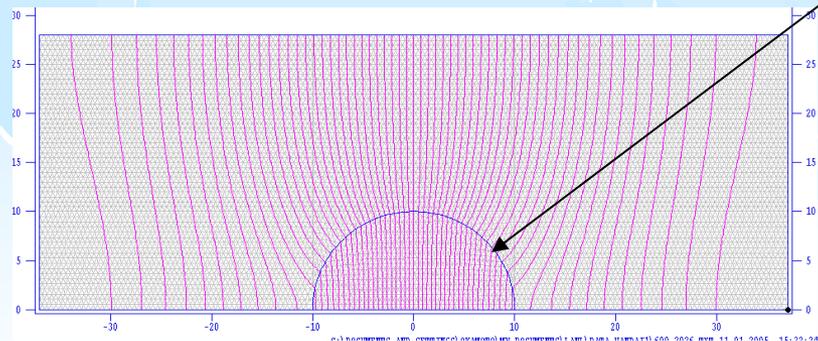
(a)



(b)

[0.66]

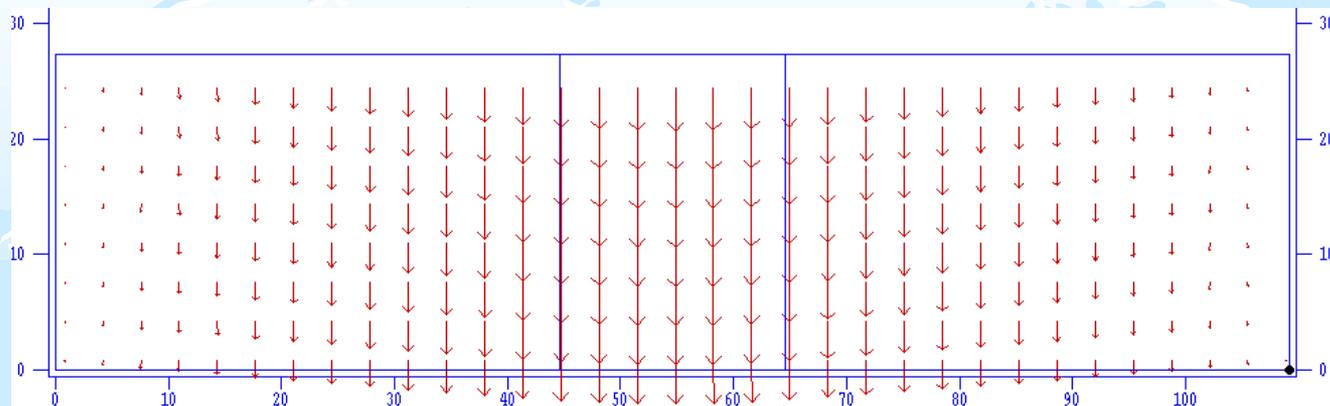
誘電体



(c)

[0.32]

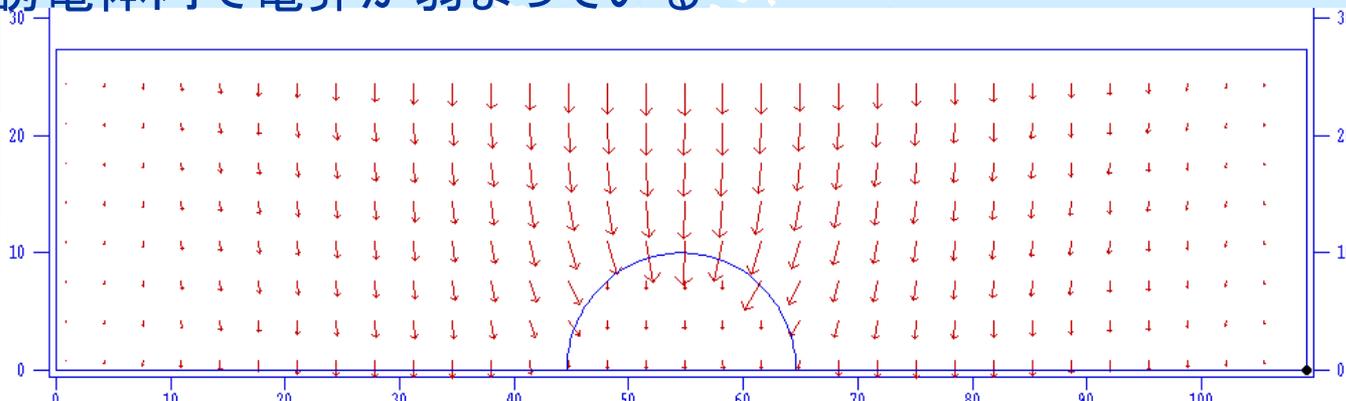
誘電体内外で電界が等しい



誘電体

↓ 電界の強さ

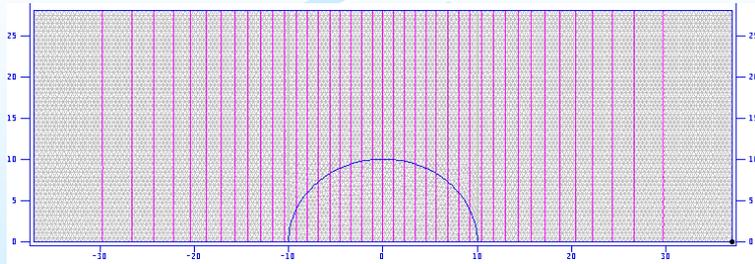
誘電体内で電界が弱まっている



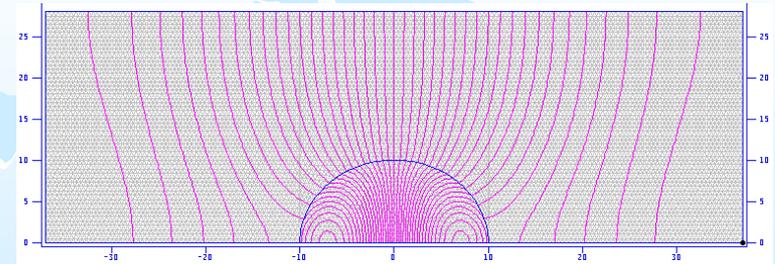
誘電体

(比誘電率 ϵ_r)

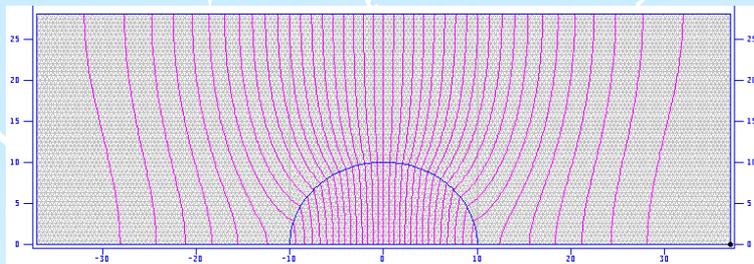
円柱状誘電体によるTE10モード方形導波管の電界



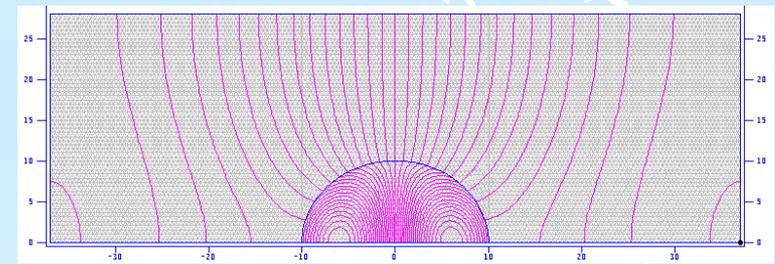
$\epsilon_r=1$ [1.00]



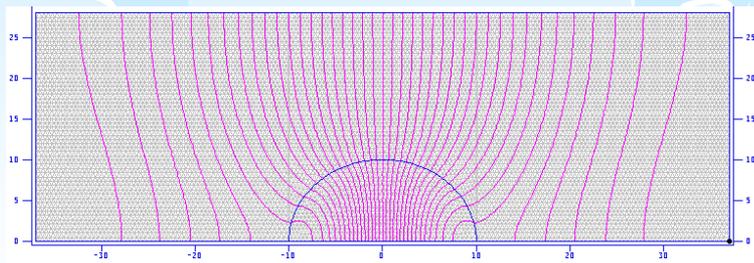
$\epsilon_r = 50$ [0.111]



$\epsilon_r=10$ [0.222]



$\epsilon_r = 70$ [0.141]

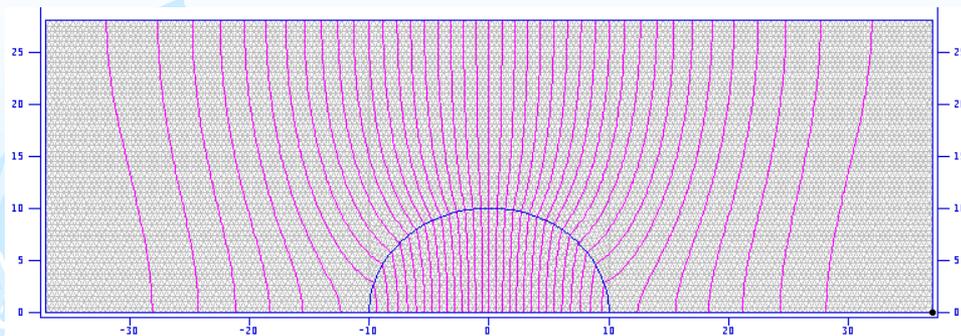


$\epsilon_r=30$ [0.116]

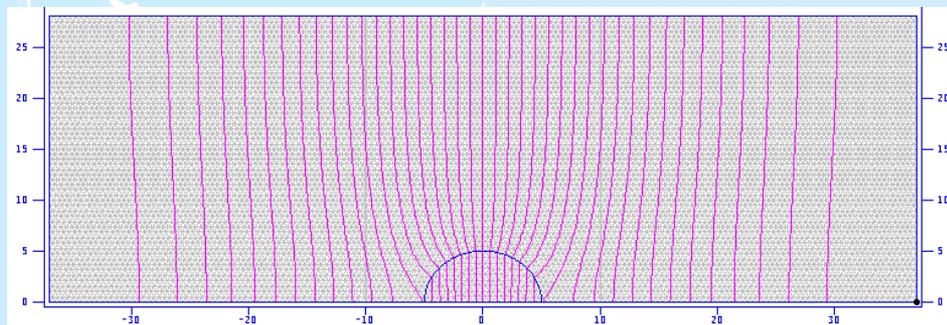
[]内の数値は $\epsilon_r=1$ の中心電界
に対する円柱中心の電界の比

$d=20\text{mm}$

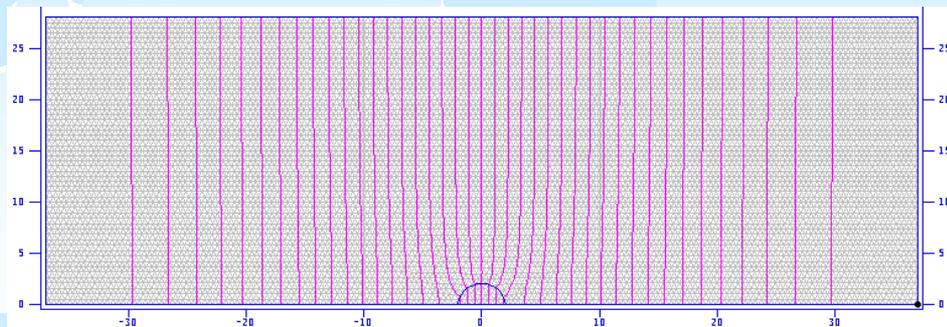
誘電体の大きさによっても電界分布と強度が変わる



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



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



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

$\epsilon_r=10$

マイクロ波と化学反応¹⁾

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

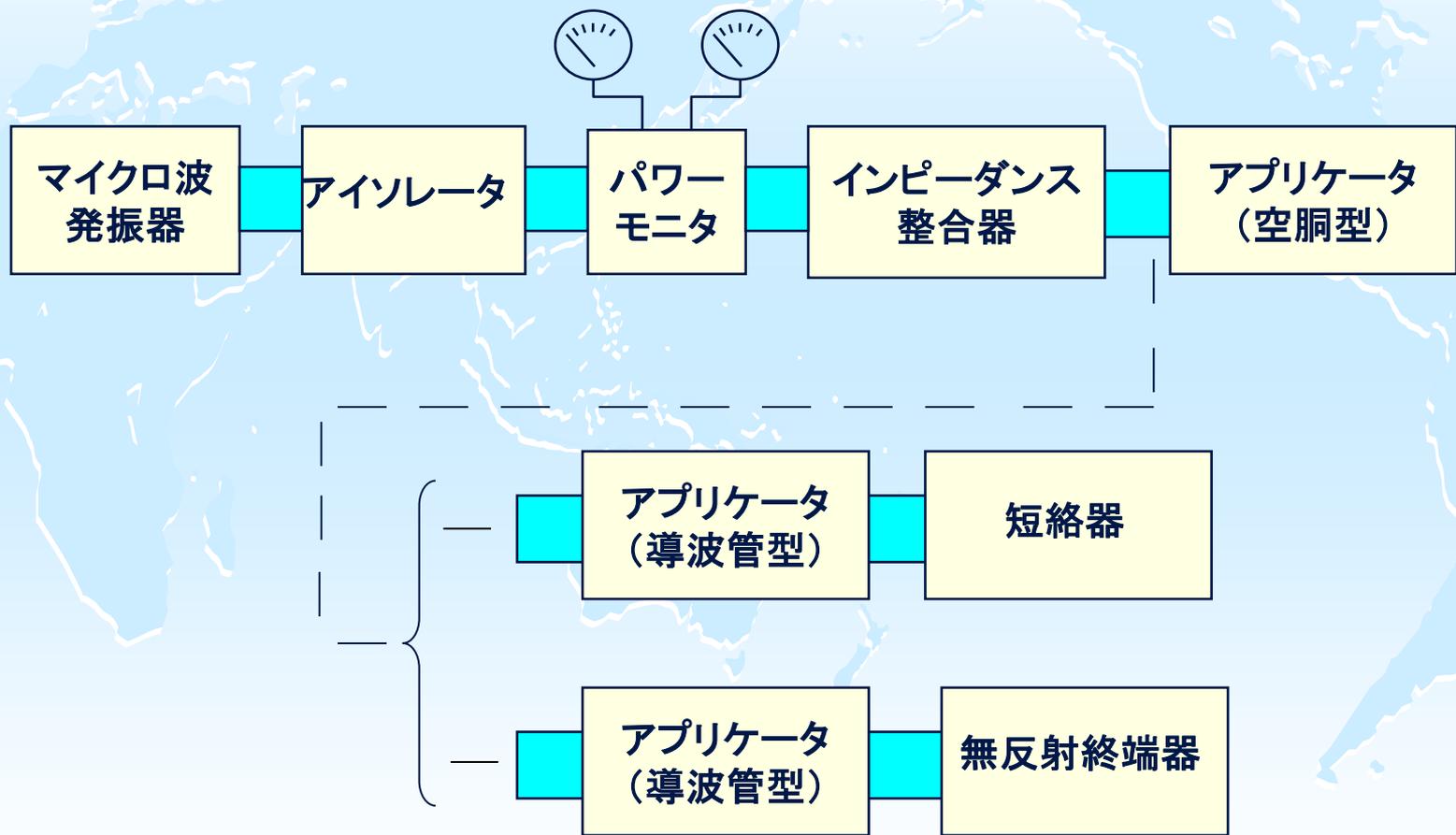
反応器の種類		モード	整合	位置	同調	備考
整合負荷 導波管型	E と ⊥	□TE10	*			グリーンモチーフ
	E と //		必要			
短絡 導波管型	E と ⊥	□TE10	*	調整		
	E と //		必要	必要		化学&粉末冶金装置
空洞 共振器型	E と ⊥	○TE110	必要		必要	
	E と //	○TE010				
		□TM110				シート加熱装置
		○TM010				化学反応装置
	マルチモード	**			化学反応装置	

* ポストで対応

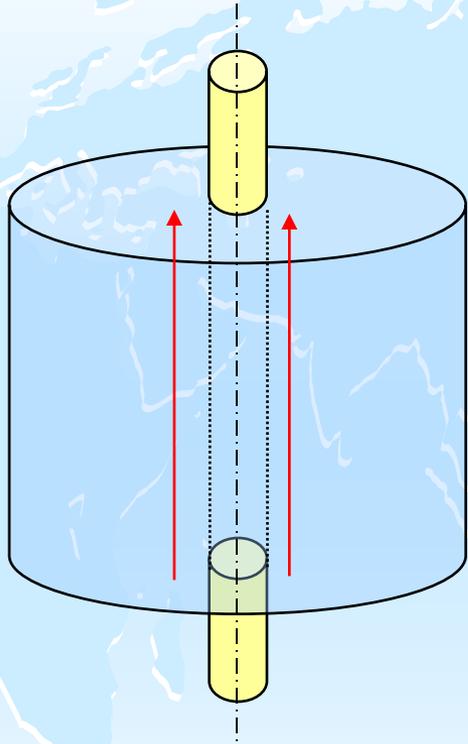
** 工業用では整合器を使用

マイクロ波装置

反射波電力 進行波電力



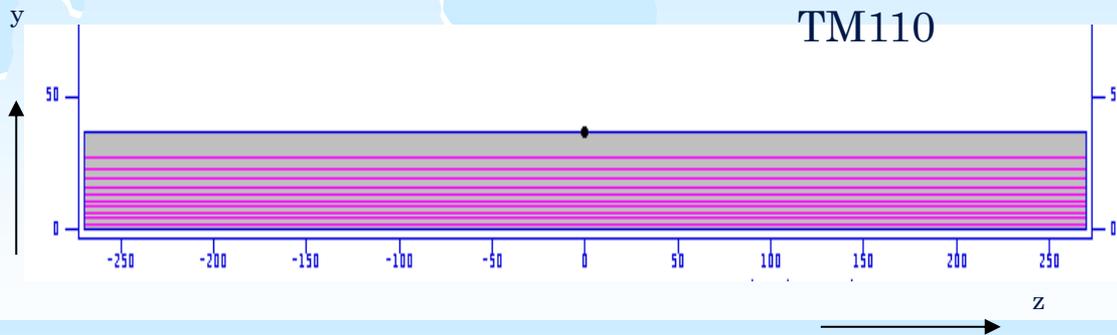
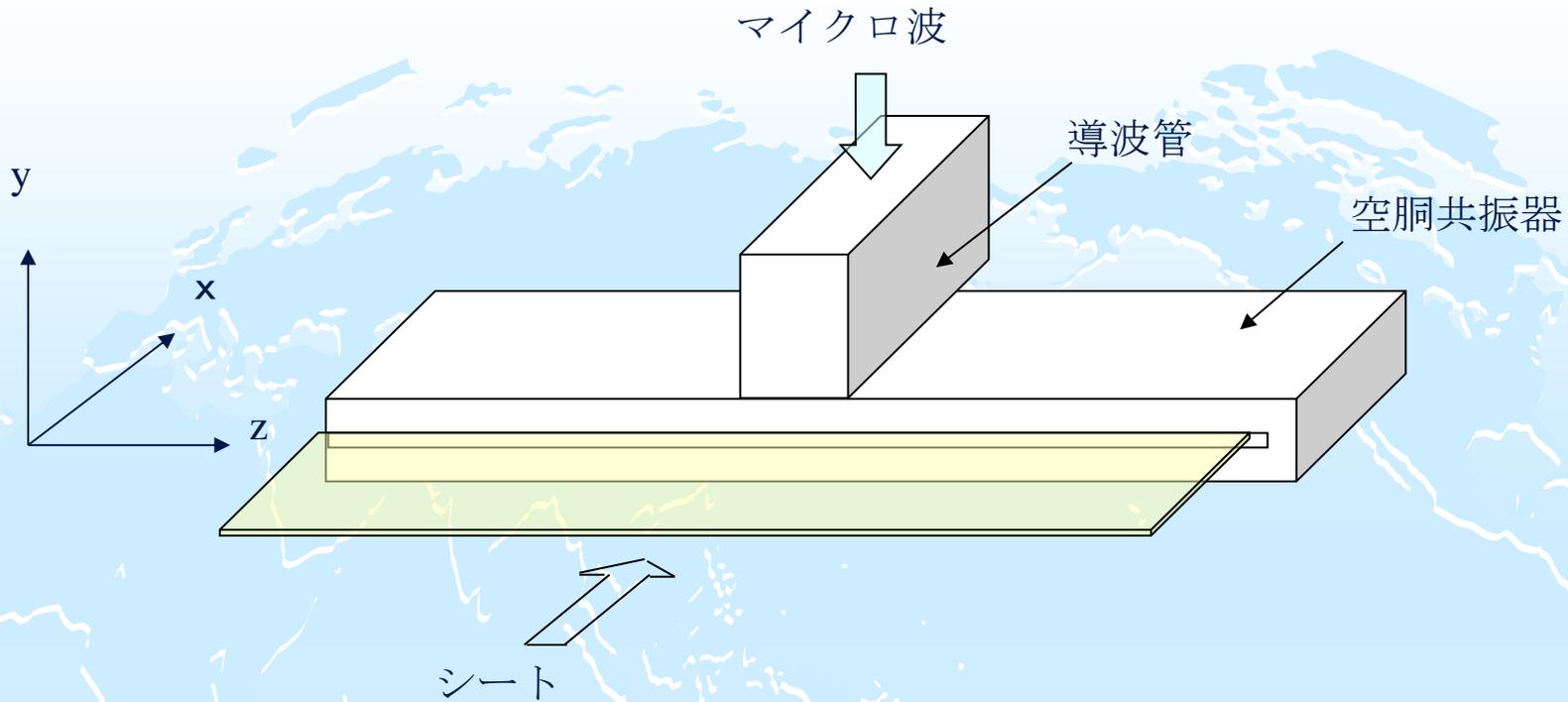
シングルモード反応器

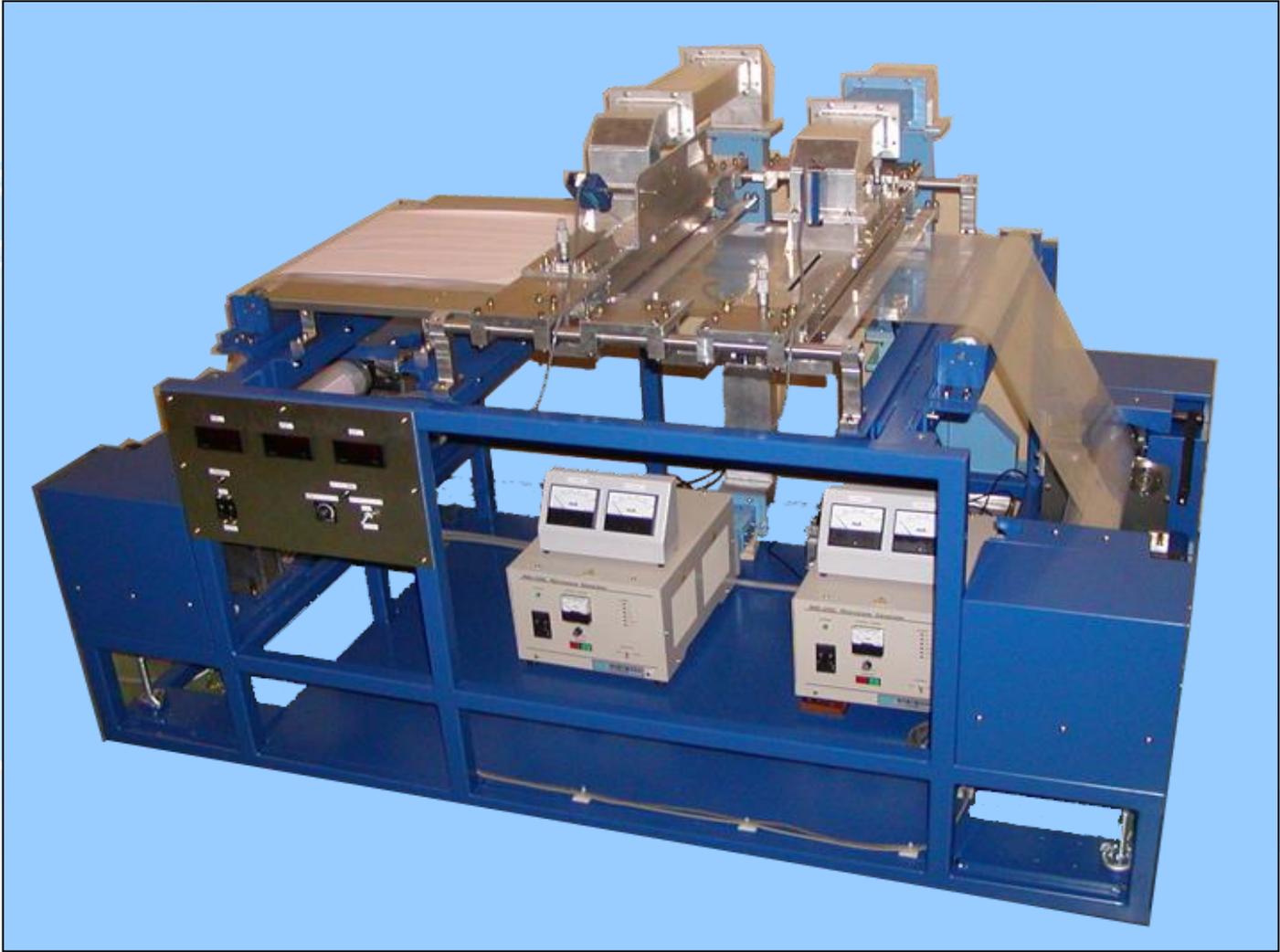


TM010モード

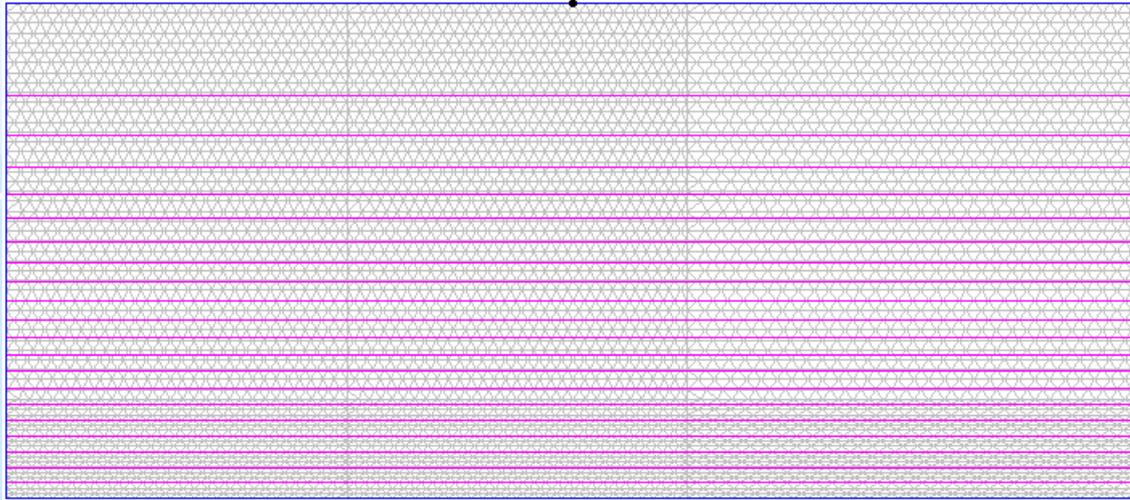


TM110モード

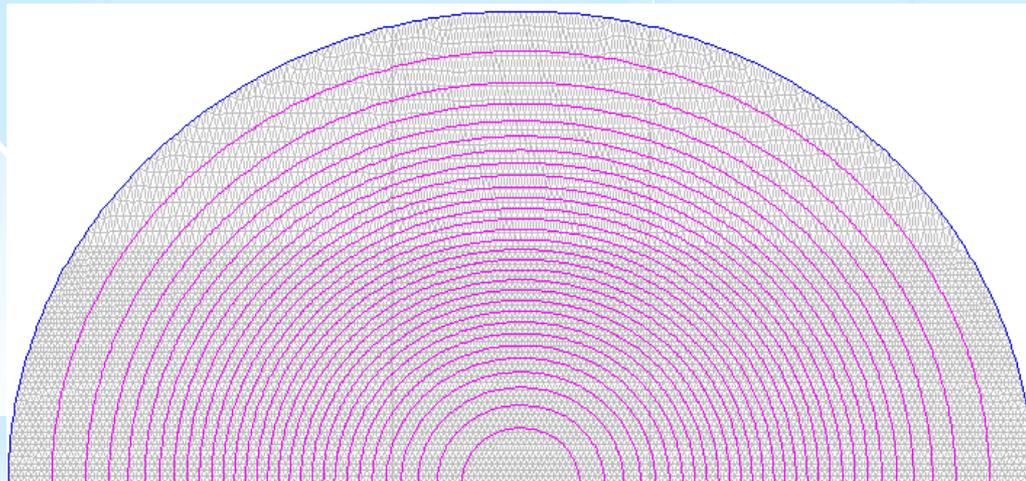




TM010およびTE010モードの電界分布

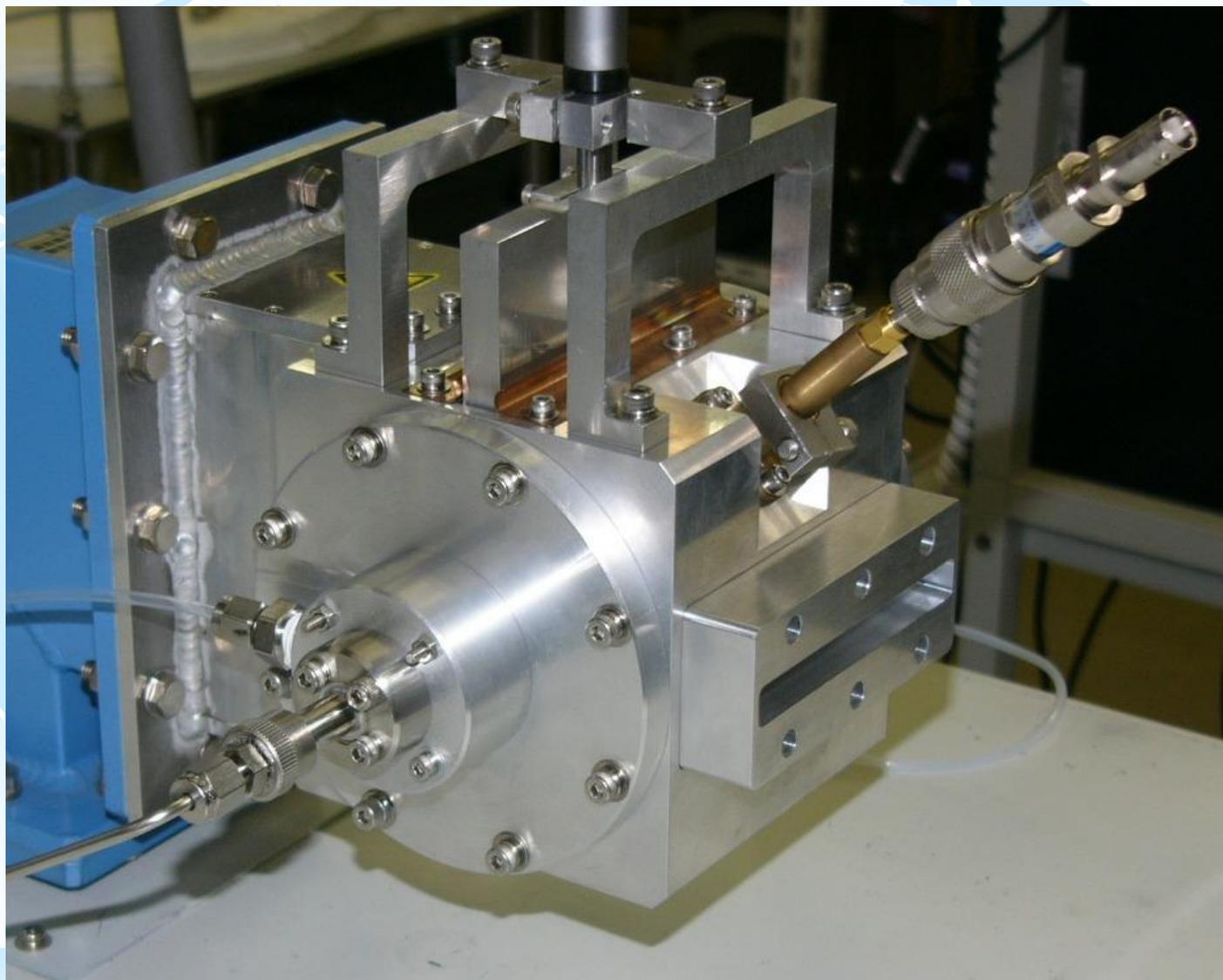


TM010
(zr平面)

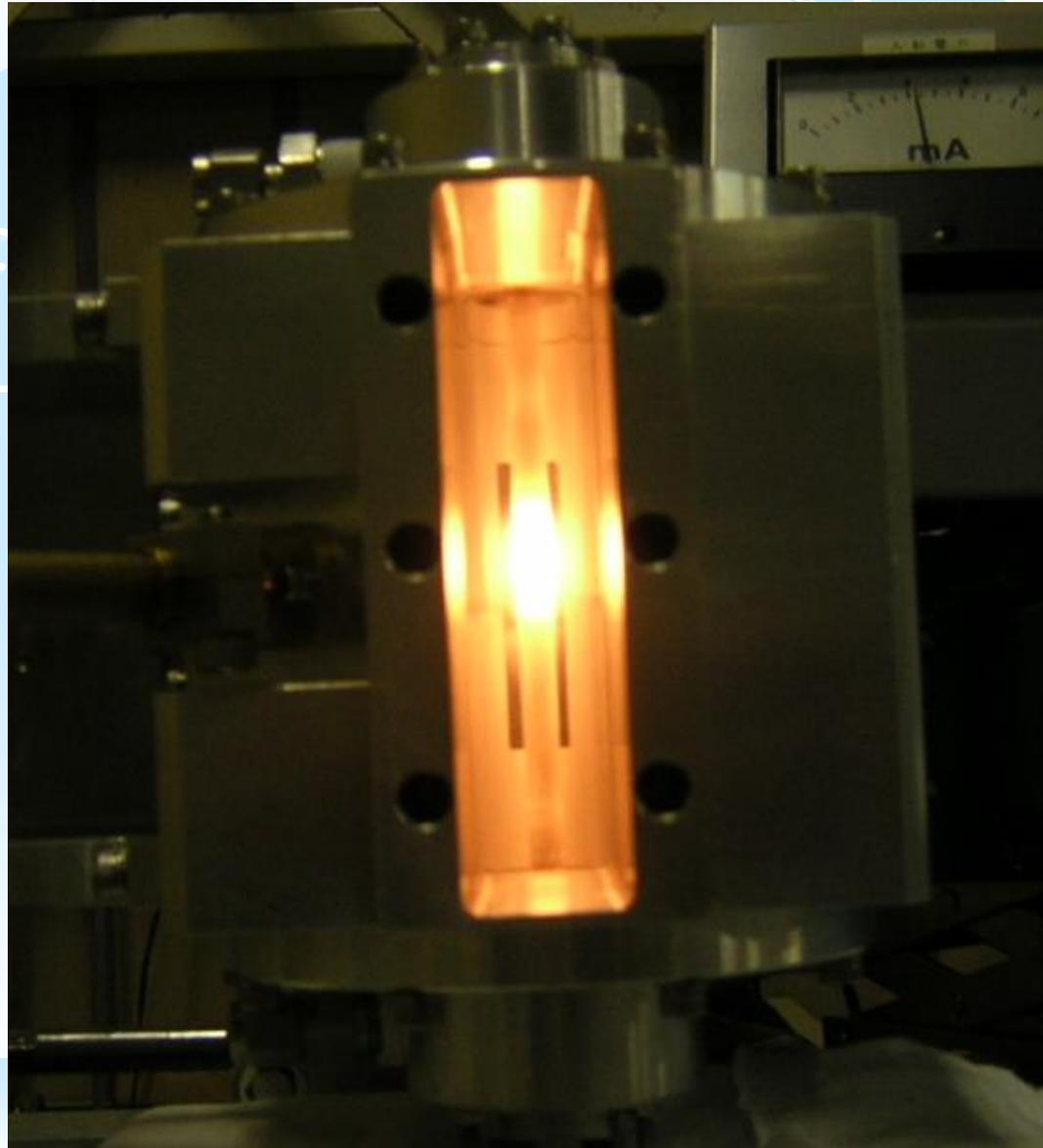


TE010
(rθ平面)

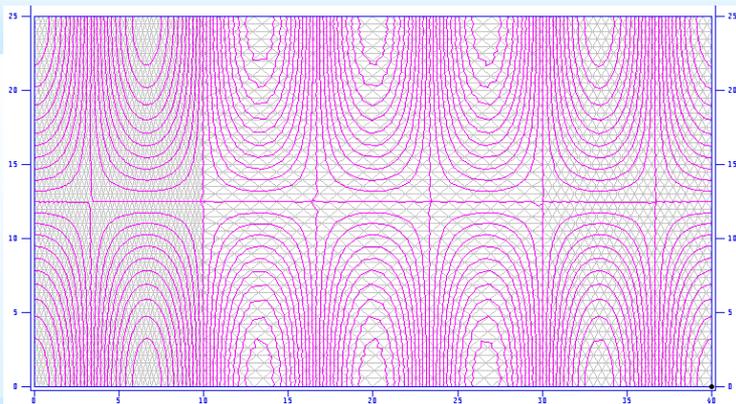
メンブリアクタ実験装置



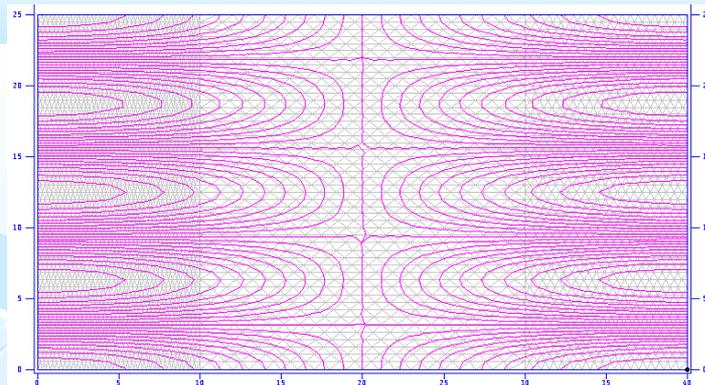
TM010空胴による加熱例



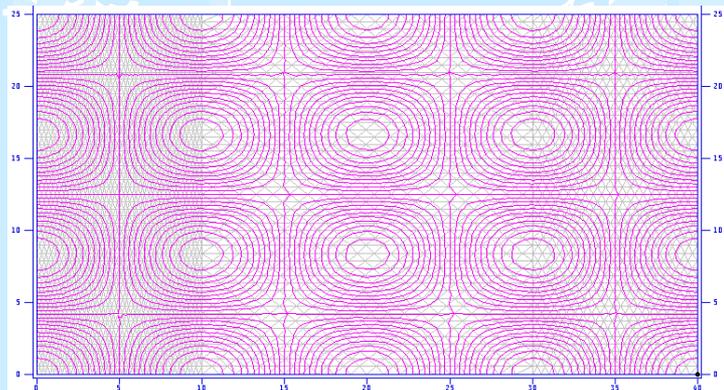
1



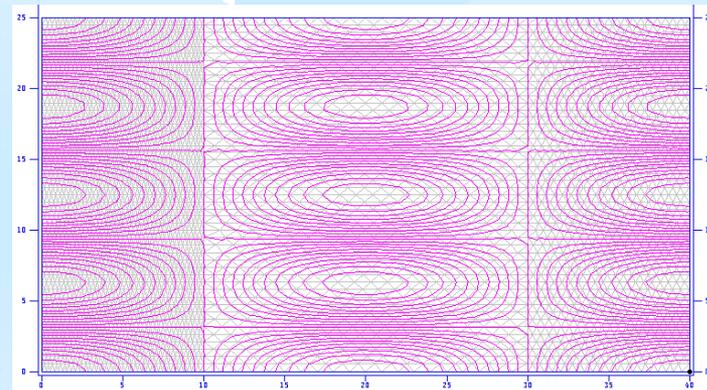
4



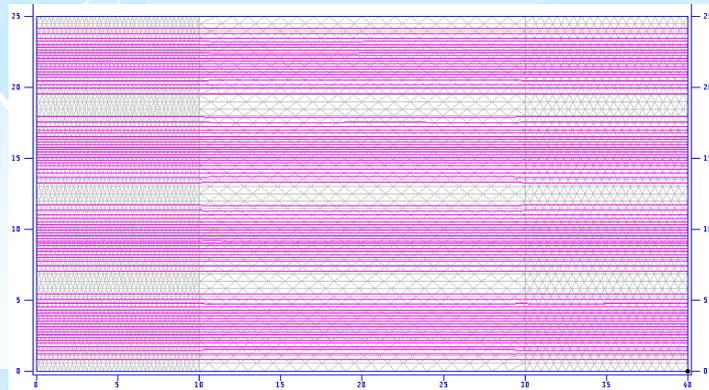
2



5



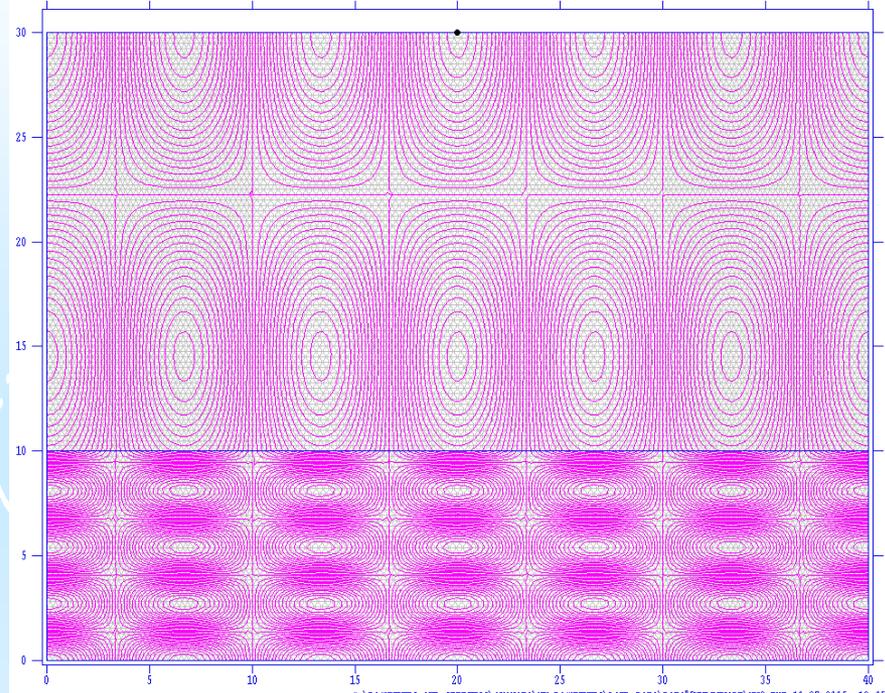
3



- | | | | |
|---|----------|---|----------|
| 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)

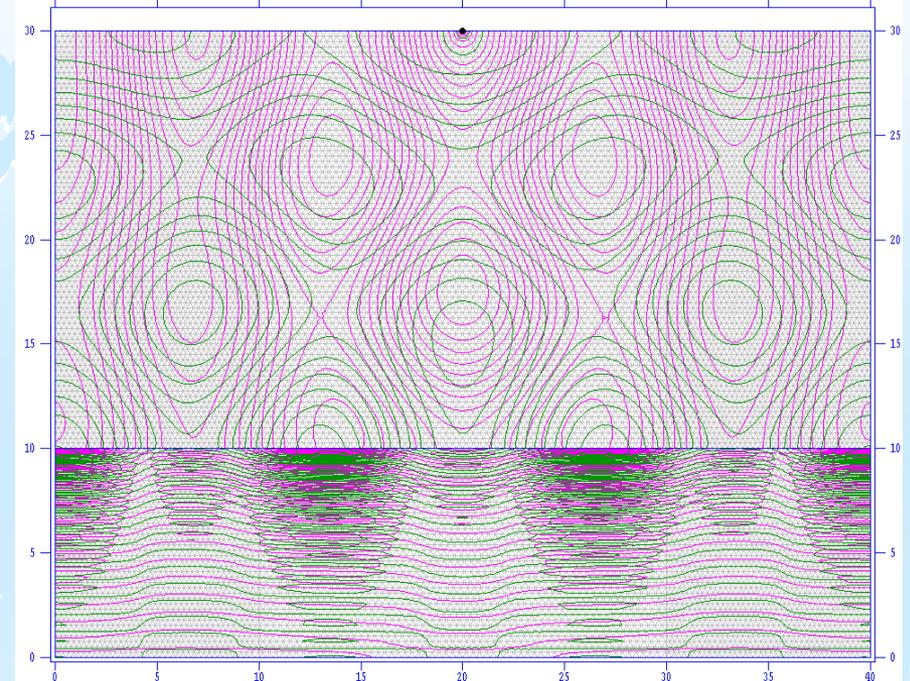
Data of Multi-mode F = 2449.1767 MHz



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〕

Data 01 Multi-mode F = 2446.1963 MHz



C:\DOCUMENTS AND SETTINGS\OKAMOTO\MY DOCUMENTS\LANL DATA\DATA\MULTIMODE\M06.TXT 10-28-2005 15:40:28

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〕