

# GAMMA10 ECRH用 28GHz-1MWジャイロトロンの開発

---

数理物質科学研究科 物理学専攻  
200920251 太田真雄

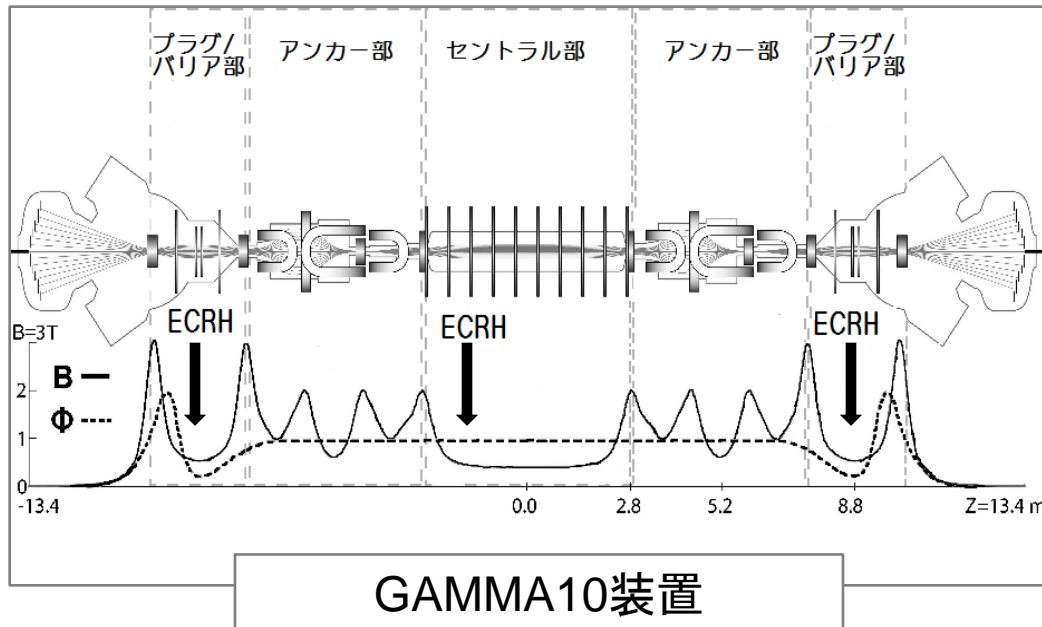
## —内容—

- 研究背景と目的
- ジャイロトン設計
- 評価試験
- 計算値と試験値の比較
- まとめと今後の課題

# 背景

研究背景と目的

- GAMMA10では、磁気ミラー効果を用いた粒子閉じ込めに加え、プラグ/バリア部で電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)により電位障壁を形成し、閉じ込め改善を行なっている
- セントラル部では、イオン温度と電子温度の差によって生じるエネルギードラッグを軽減するためにECRHによる電子加熱を行なっている



## 電子サイクロトロン共鳴加熱

磁場中でサイクロトロン運動をしている電子に対して、その回転周波数に応じた電磁波を入射することで電子を加熱する方式

# 目的

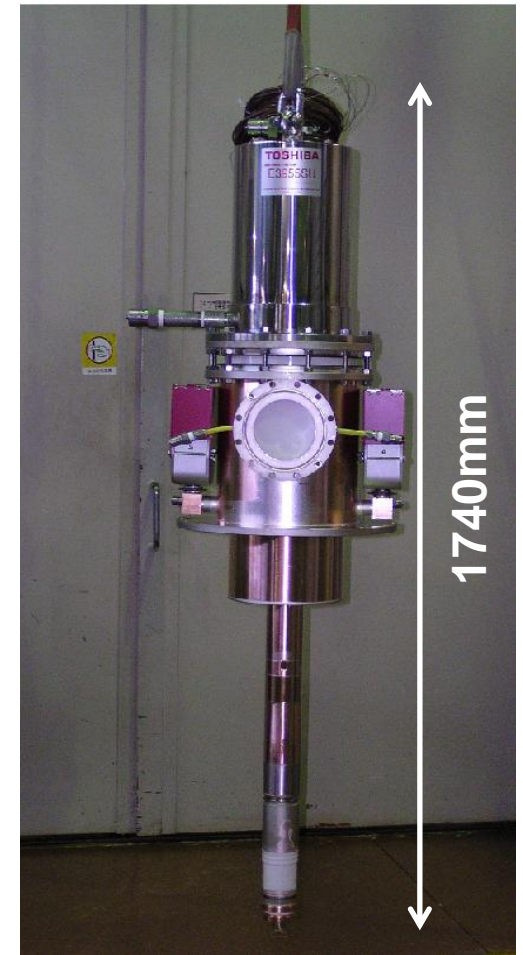
研究背景と目的

ECRH用の高周波源としてジャイロトロンと呼ばれるマイクロ波発振管が用いられる。ジャイロトロン出力増加により、電位障壁の拡大、電子温度の上昇が確認されている。



## 研究目的

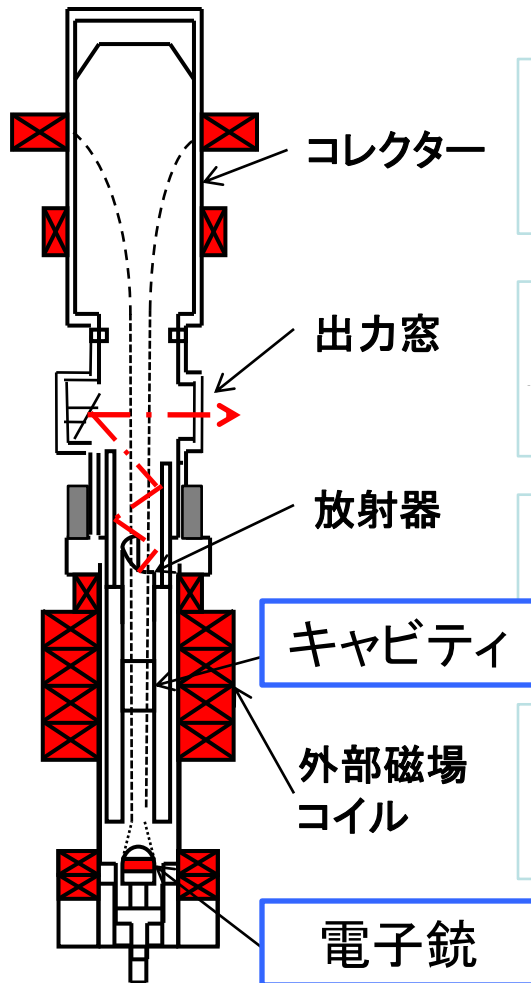
- 既設500kWジャイロトロンを大電力化、出力1MWを目標とした設計を行なう
- 単独運転による評価試験にて設計値と実験値との比較を行なう



28GHz-500kWジャイロトロン

# ジャイロトロン

ジャイロトロン設計



## 電子銃

内部ヒーターで加熱されたカソード部エミッションベルトより熱電子を放出し、電子ビームを形成する

## キャビティ

電子ビームの磁場に垂直な回転エネルギーを電磁波のエネルギーに変換する

## 放射器

発振させた導波管モードの電磁波を直線偏波のガウス分布型電磁波ビームに変換する

## 出力窓

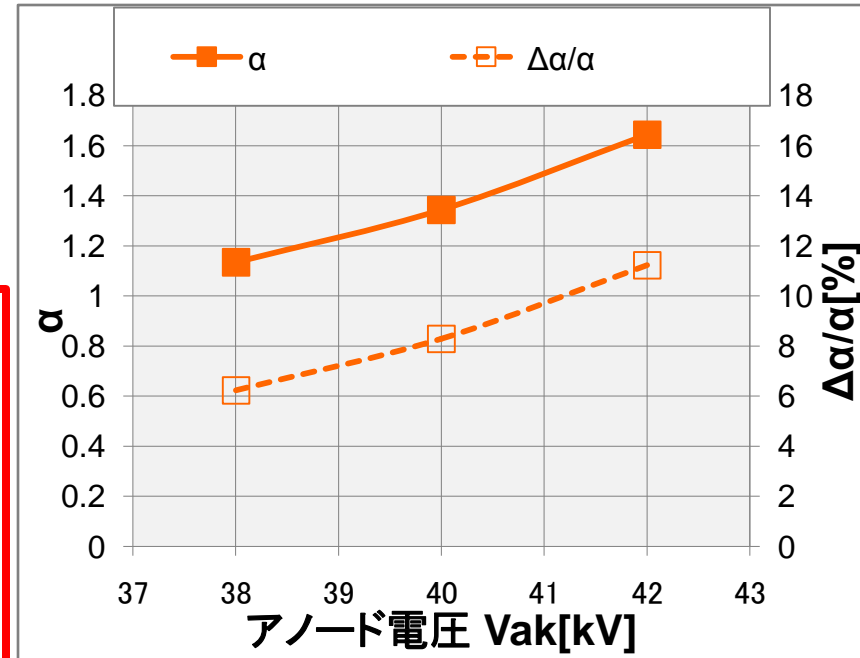
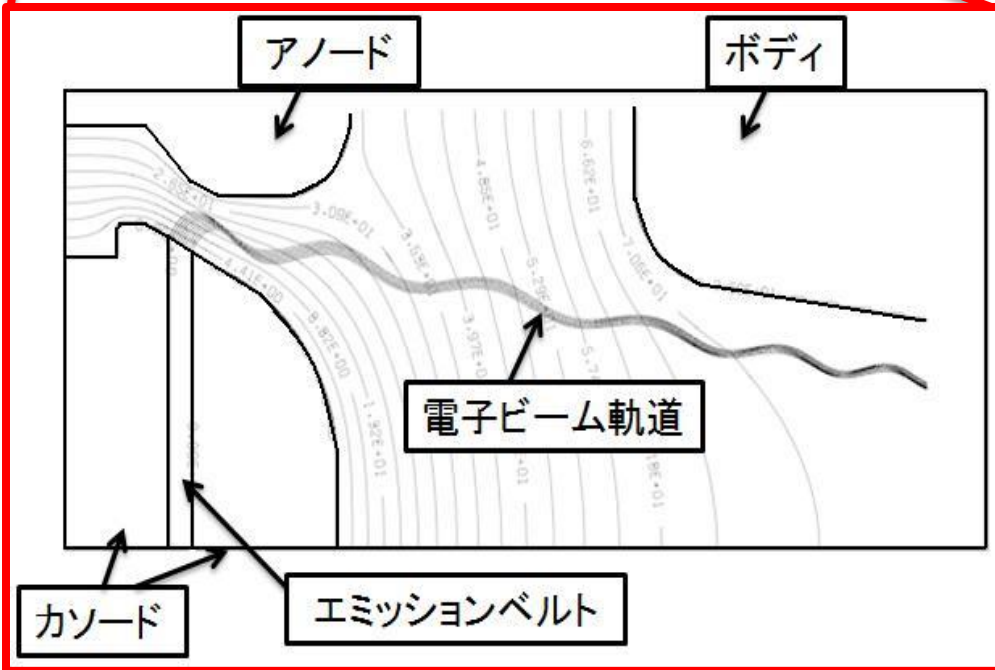
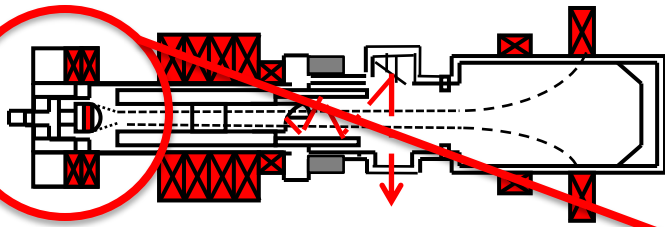
ジャイロトロン内部の真空と大気とを隔て、低損失で電磁波をジャイロトロン内から取り出す

## コレクター

相互作用後の電子を回収する

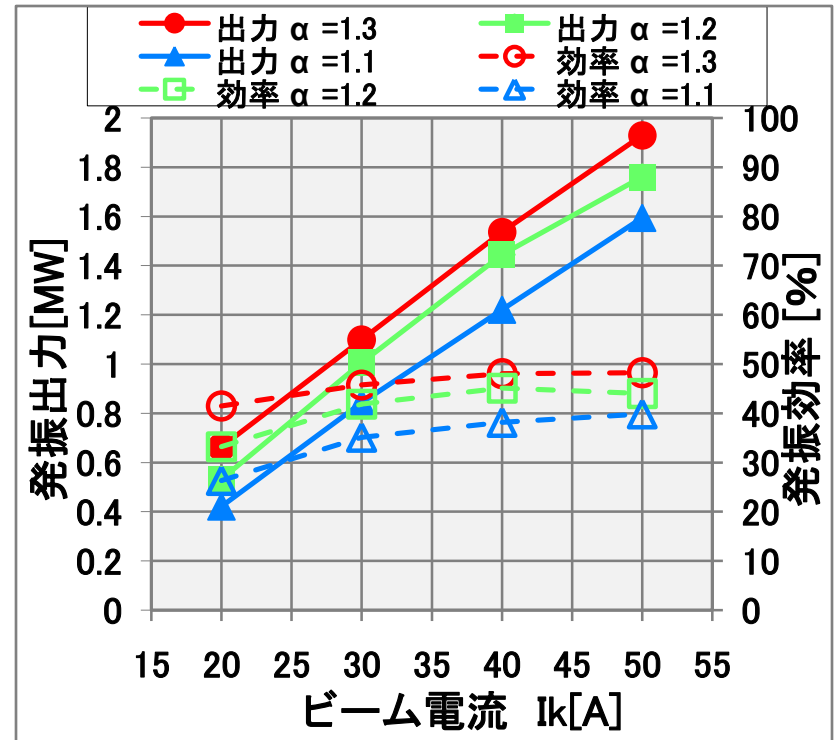
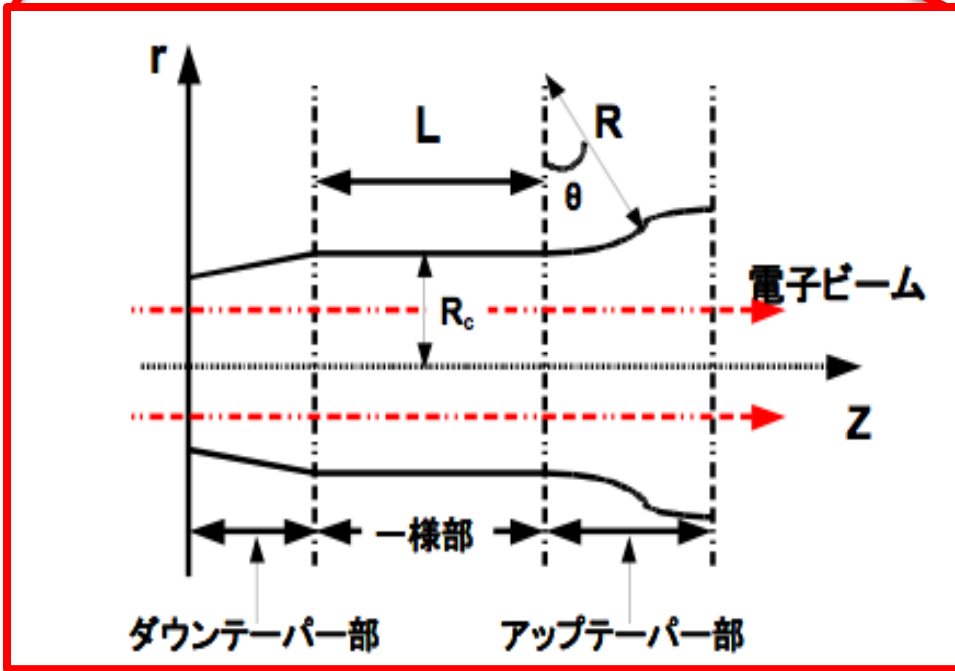
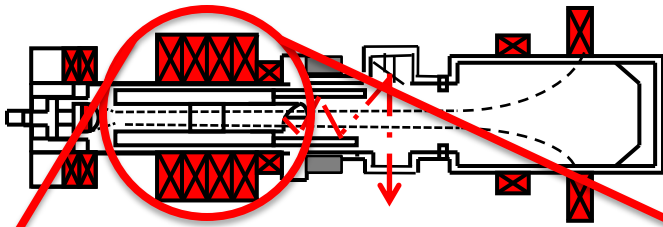
ジャイロトロン模式図

# 電子銃



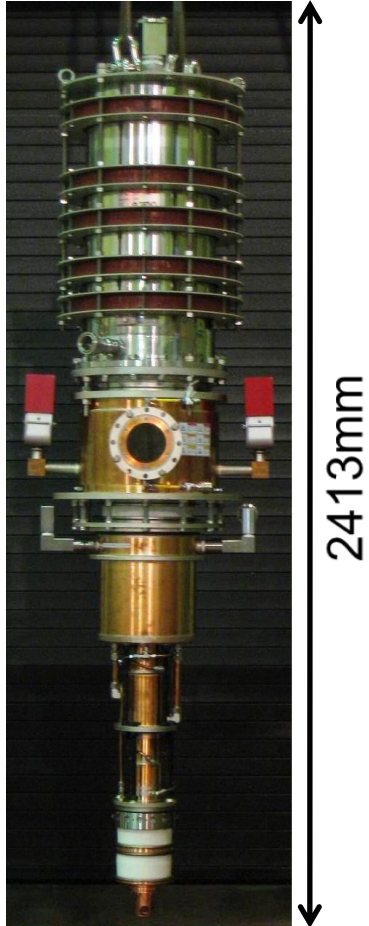
$V_{ak}=38\sim40$ [kV]で  
 $\alpha=1.1\sim1.3$ 、 $\Delta\alpha/\alpha<8$ [%]を達成

# キャビティ



$I_k=40$ [A]において  
 $\alpha=1.1$ で発振出力1.22[MW]を達成

# 完成



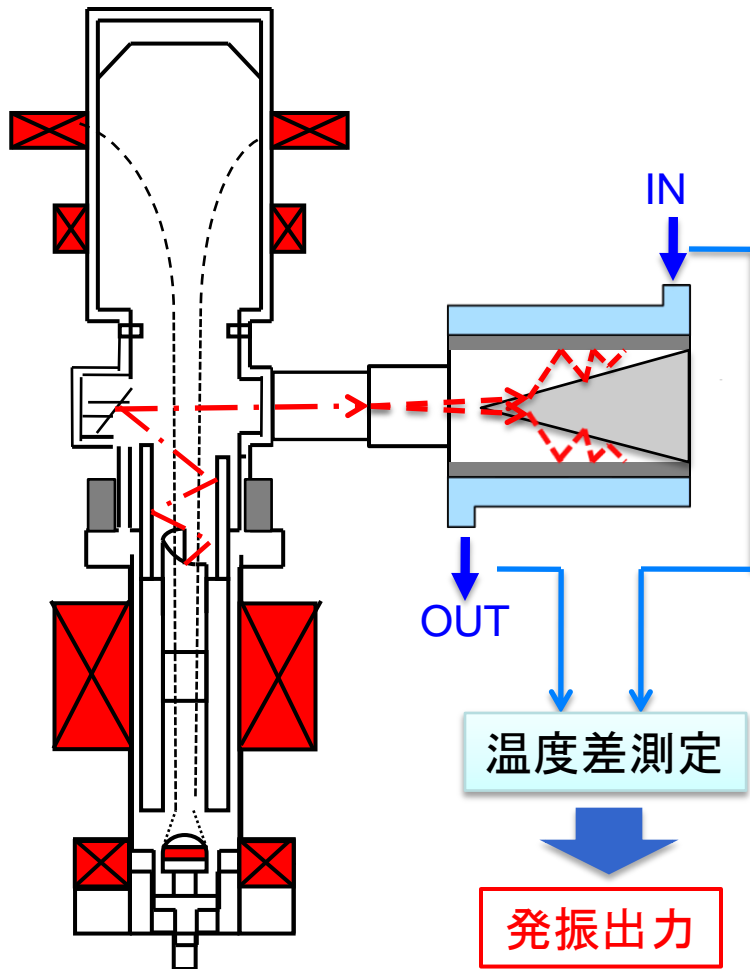
## 設計パラメータ比較

|       | 既設ジャイロトロン         | 新型ジャイロトロン         |
|-------|-------------------|-------------------|
| 発振周波数 | 28GHz             | 28GHz             |
| 発振出力  | 0.5MW             | 1MW               |
| パルス幅  | 0.1s              | 1s                |
| ビーム電圧 | 75kV              | 80kV              |
| ビーム電流 | 20A               | 40A               |
| 発振モード | TE <sub>4,2</sub> | TE <sub>8,3</sub> |
| 出力窓   | アルミナ              | サファイア             |

28GHz-1MWジャイロトロン

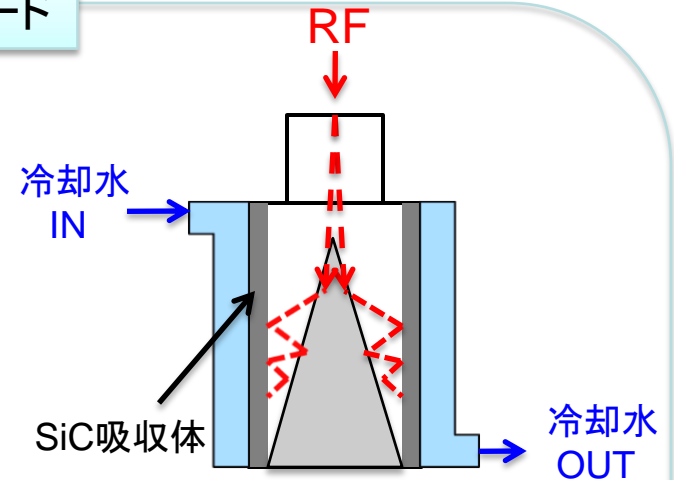
# 評価試験

評価試験



出力測定方法

ダミーロード



ジャイロトロンより発振されたマイクロ波を内部で多重散乱させ、マイクロ波が持つ出力を壁面のSiC吸収体に吸収させる。  
吸収体壁の外側に冷却水を一定流量で流し、その温度変化からマイクロ波の出力を算出する。

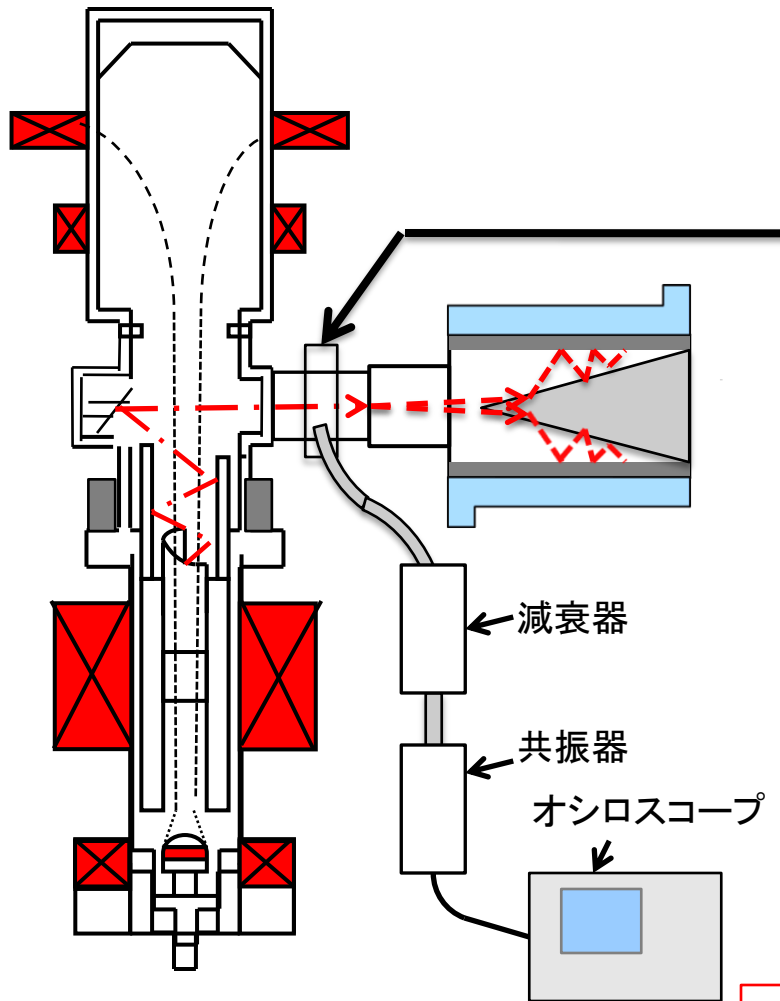
$$P = 4.18 \left[ \frac{\text{J}}{\text{cm}^3} \right] \times C \left[ \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \times Q \left[ \frac{\text{ml}}{\text{s}} \right] \times d \left[ \frac{\text{J}}{\text{cm}^3} \right] \times \Delta T [^\circ\text{C}] \times \frac{1}{D}$$

C:比熱=1、d:密度=1、Q:流量、D:デューティー



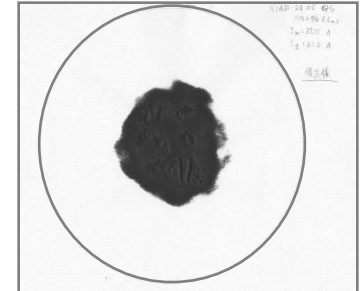
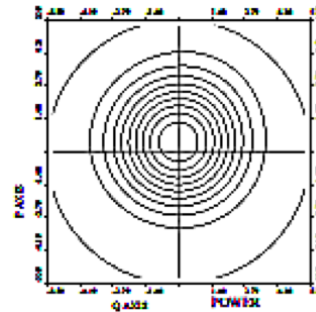
# バーンパターンと発振周波数

評価試験



## バーンパターン

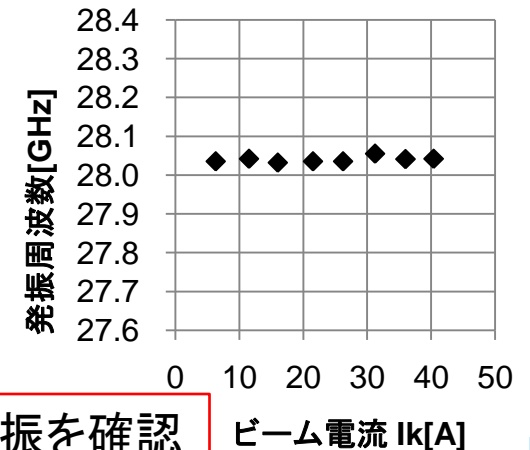
出力窓とダミーロードの間に感熱紙をはさみ、  
発振されたマイクロ波の形状を確認



窓中心に円形の分布を確認

## 発振周波数

出力窓とダミーロードの  
間からマイクロ波の  
一部を分岐し、共振器  
を用いて周波数を測定



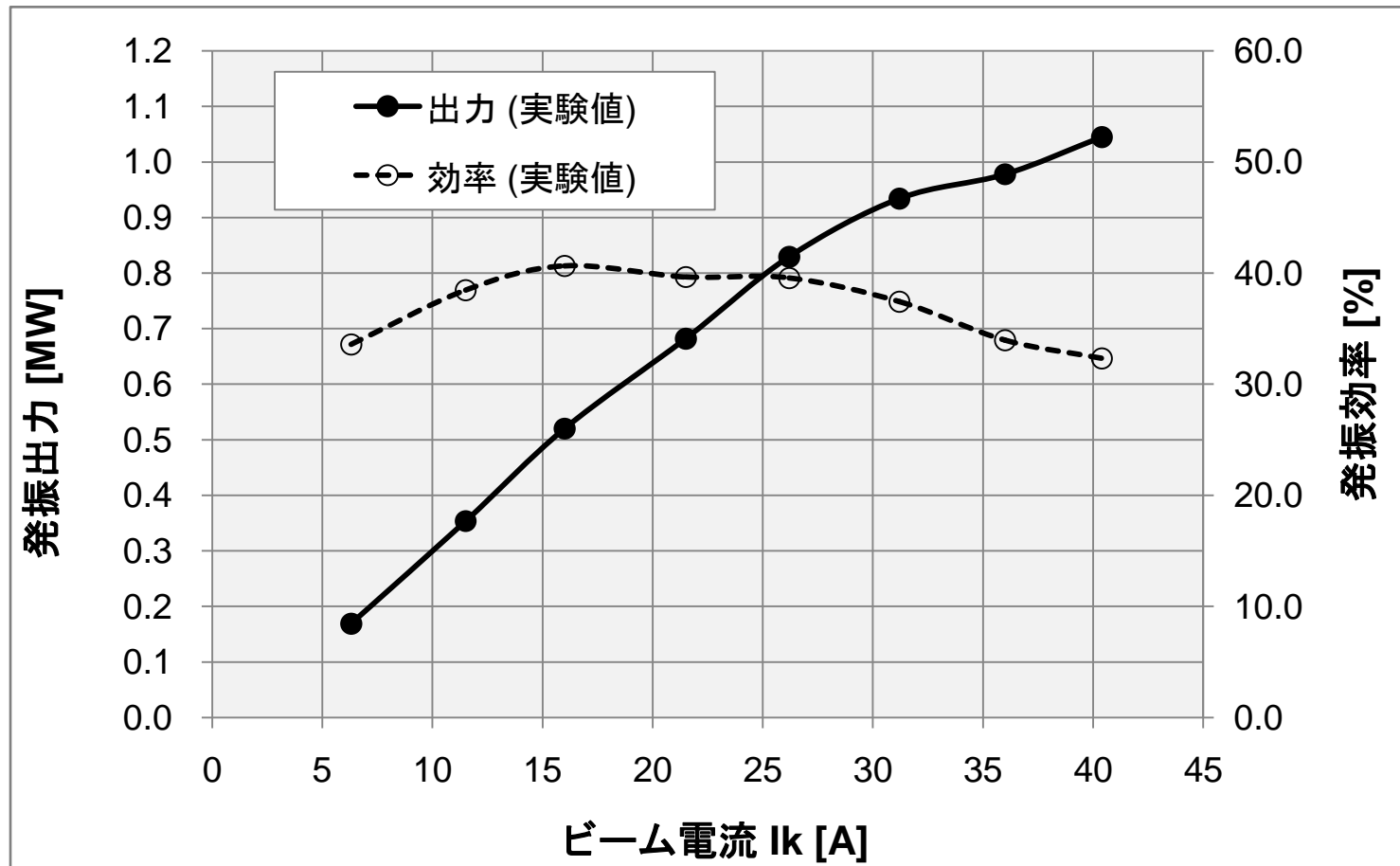
バーンパターンと周波数測定

Ikによらず28.05GHzの発振を確認

ビーム電流 Ik [A]

# 発振出力測定

評価試験



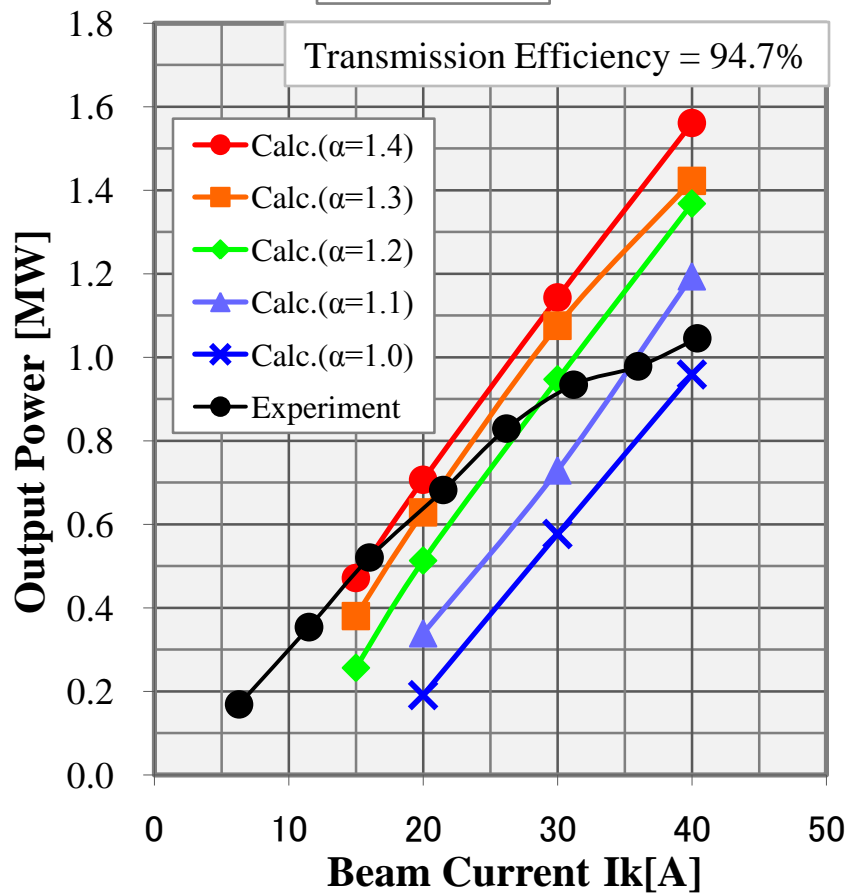
結果

- $I_k=40$ [A]において発振出力1MWを**達成**
- $I_k \geq 16$ [A]で発振効率の低下を確認

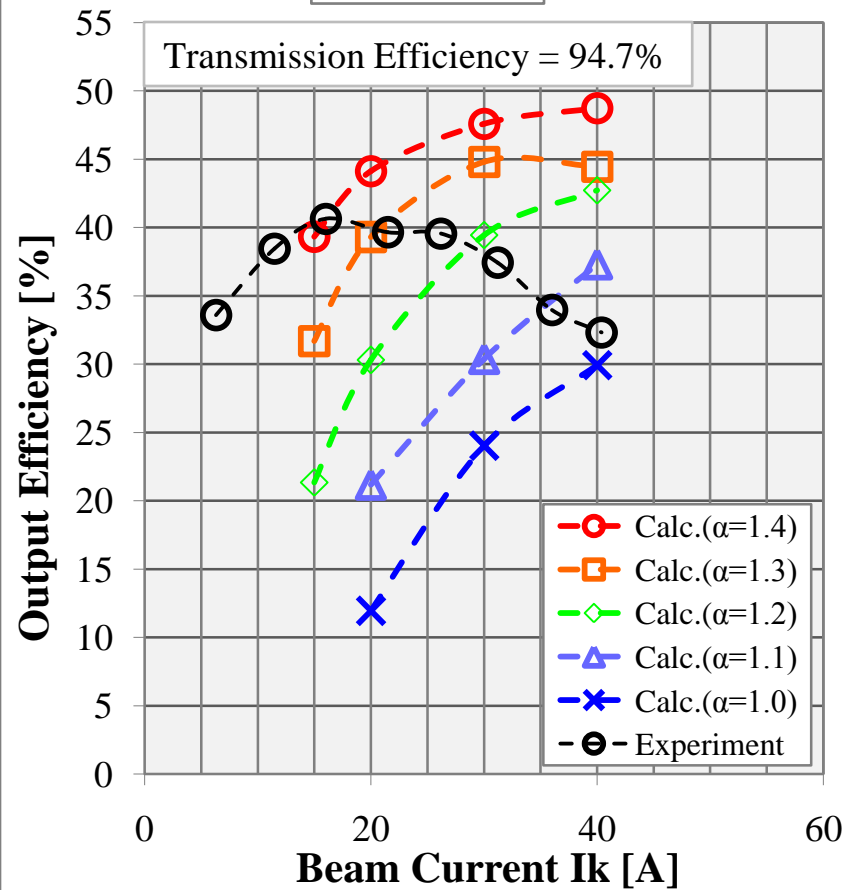
# 計算値と試験値

計算値と試験値の比較

## 発振出力

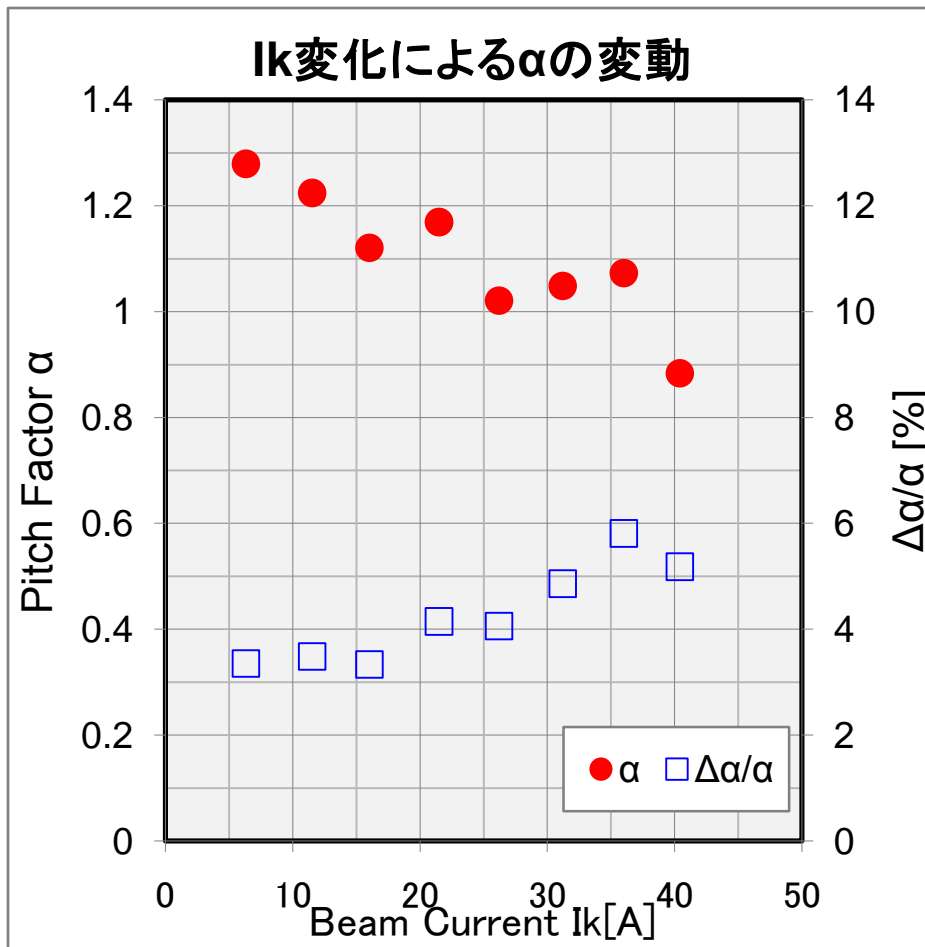


## 発振効率



# 発振効率低下の要因

計算値と試験値の比較



電子銃計算コードにより評価試験における外部磁場、電子銃の各電極電圧をパラメータにピッチファクター $\alpha$ の計算を行なった。



Ik増加に伴い、 $\alpha$ の低下・ $\Delta\alpha/\alpha$ の増加が確認された。

$\alpha$  : 1.3  $\rightarrow$  0.9  
 $\Delta\alpha/\alpha$  : 3.3%  $\rightarrow$  5.8%

# まとめと今後の課題

## まとめ

- 発振出力1MWを目指した新型28GHzジャイロトロンを設計し、評価試験を実施した
- 目標発振出力の1MWを $I_k=40A$ で達成した
- 発振効率が $I_k=15A$ での40%から低下し、 $I_k=40A$ では32%までの減少が確認された
- ビーム電流量の増加に伴い、ピッチファクターが1.3から0.9まで低下していることが確認された

## 今後の課題

- さらなるジャイロトロン高効率化を目指すため、発振効率低下の原因と考えられるピッチファクター減少が生じる要因の究明と改善
- 新型ジャイロトロン.getLongパルス試験の実施
- GAMMA10プラズマ実験への適応