

ECRH用28GHz-1MWジャイロトロンの 長パルス化及び出力窓の性能評価

3/14 若手研究会
筑波大学 プラズマ研究センター
ECRHグループ 中林 英隆、江口 濯

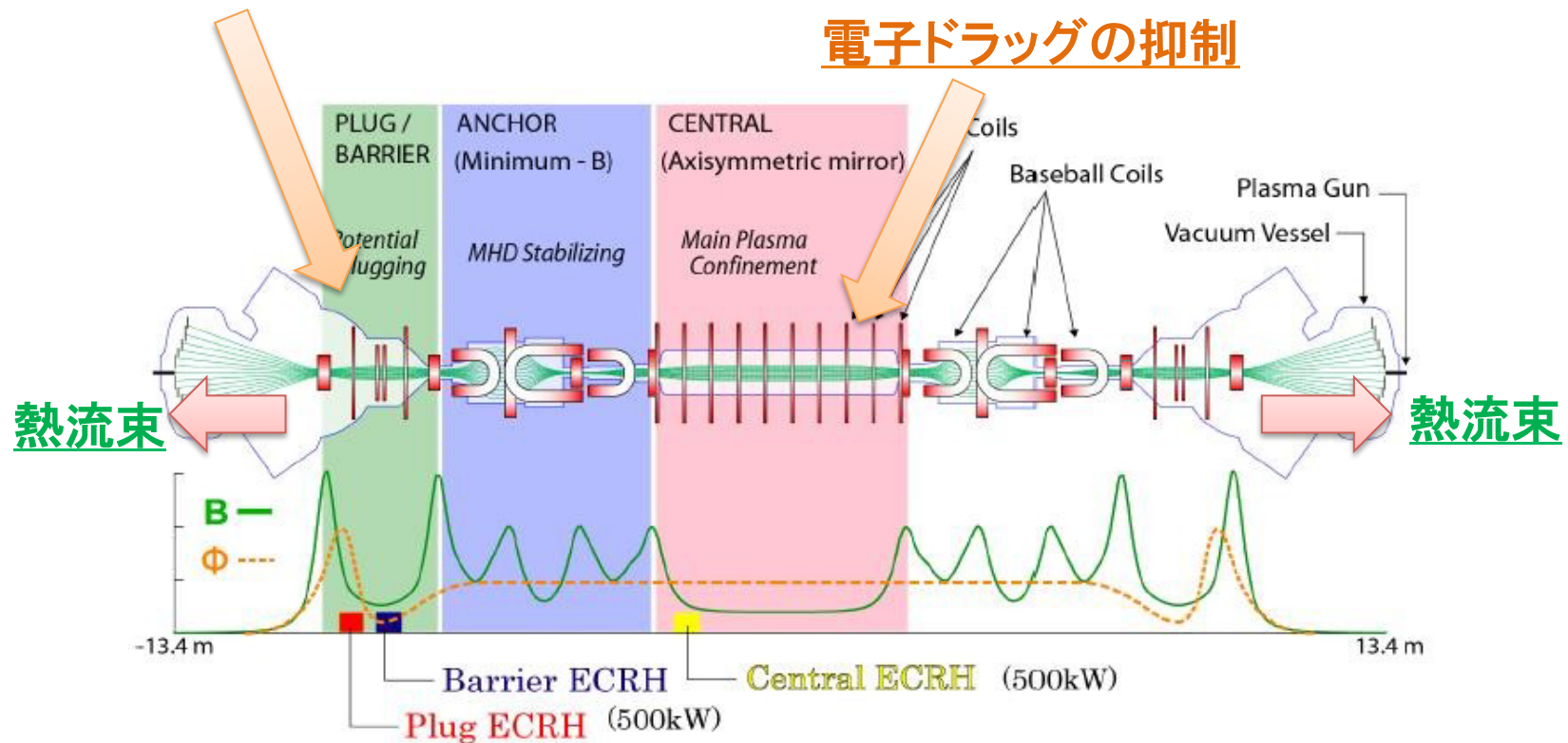
1.研究背景(1)

1/14

筑波大学タンデムミラー型閉じ込め装置GAMMA10において、ジャイロトロンを用いて電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)を行なっている。

- プラグ/バリア部：軸方向閉じ込め改善のための**電位形成**
- セントラル部：電子加熱における**イオン温度の低下の抑制**
- エンド部：境界プラズマ研究におけるダイバータ模擬実験(**高熱流束生成**)

閉じ込め電位生成

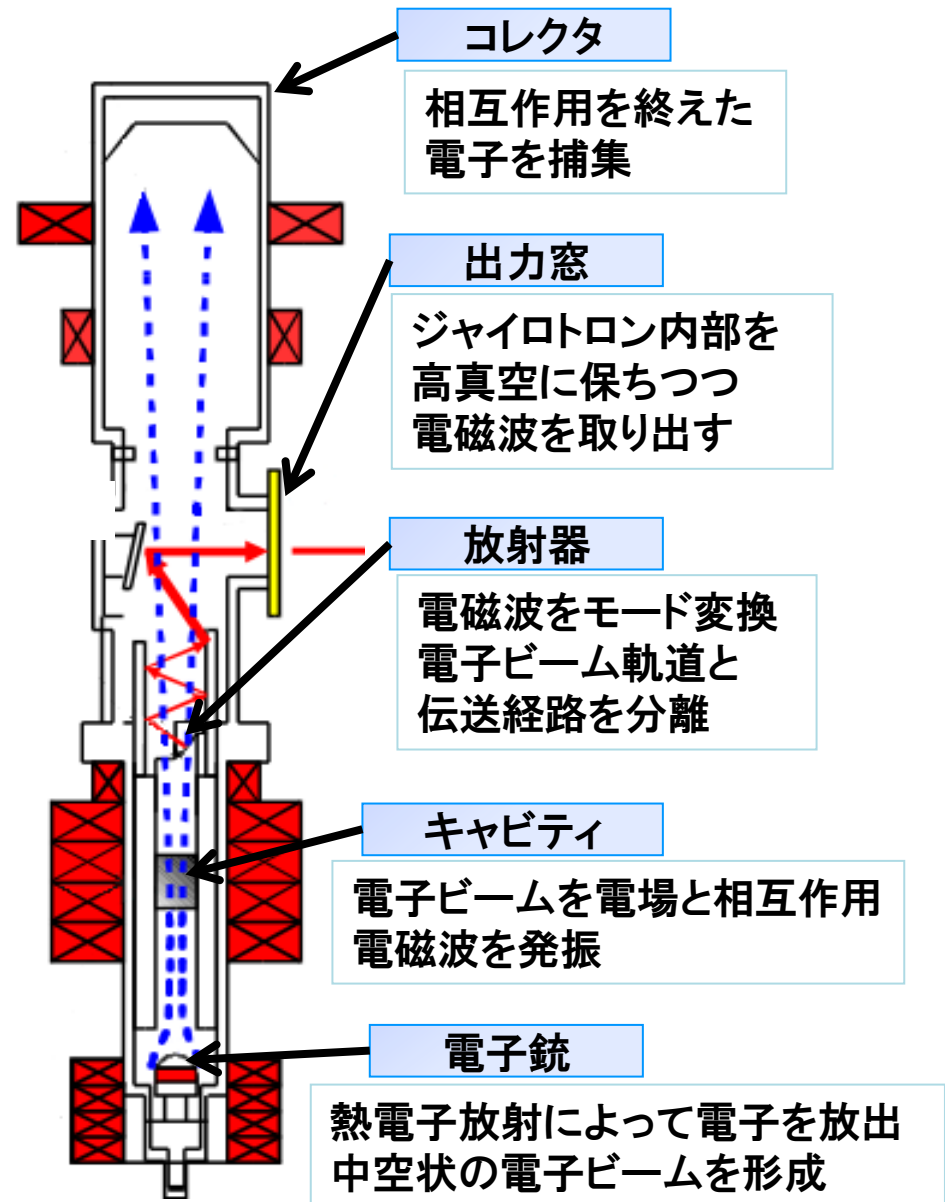


1.研究背景(2)

プラズマ研究センターでは、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)に用いられるジャイロトロンの開発を行っている。

ジャイロトロン

- ECRHのマイクロ波源として用いている**大電力マイクロ波発振管**
- 電子のエネルギーと電磁波のエネルギーを変換することで電磁波を発振



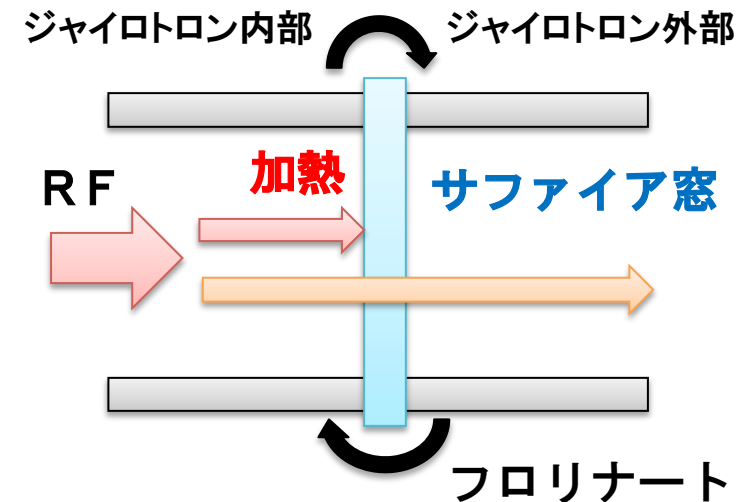
2. 28GHz-1MWジャイロトロンの設計パラメータ^{3/14}

28GHzジャイロトロンの設計パラメータ比較

	G-10既設管	新型管
周波数	28GHz	
最大出力	0.5MW	1MW
パルス幅	0.1s	1s
ビーム電流	20A	40A
ビーム電圧	75kV	80kV
電子銃	2極型	3極型
発振出力モード	TE ₄₂	TE ₈₃
出力モード	Gaussian like	
出力窓	アルミナ (シングルディスク)	サファイア (シングルディスク)

シングルディスク窓の特徴・構造

- ディスク端を冷却
- 最もシンプルな構造



出力窓の熱負荷により発振可能な出力が制限される。

→ 適切な窓を選ぶ必要

3.研究目的(1)

[筑波大学GAMMA10用28GHz-1MWジャイロトロン の現状]

- プラズマ閉じ込めの改善
- 高温高密度プラズマの生成
- 高熱流束の生成

これらはジャイロトロン の出力に依存していることが今までの実験で判明している。

2009年に28GHz-1MWジャイロトロンを開

筑波大学GAMMA10用に28GHz-1MWジャイロトロン の
高出力・長パルス化の試験開始

- 2009 年
初期試験において 1MW (短パルス)の発振に成功
- 2010 年
長パルス試験において400 kW / 1 s の発振に成功

1MW-1sの発振を目指して、性能評価試験を継続中

3.研究目的(2)

5/14

[今後ジャイロトロン開発計画]

下記仕様のジャイロトロンの製造を計画中

- プリンストン大学NSTX装置 28GHz-2MW-数秒
- 九州大学QUEST装置 28GHz-400kW-CW

[サファイア出力窓の性能評価]

GAMMA10用1MWジャイロトロンの長パルス試験を行いジャイロトロン発振時の出力窓の温度上昇を赤外線カメラを用いて測定する。



新たに計算コードを開発し、測定結果を解析することで温度の計算に必要な物性値を求める



計算コードを用いてシミュレーションすることで、どのような構造の出力窓を用いれば2MW-数秒, 400kW-CWの要求を満たせるかを評価する

4. 短パルス長パルス試験

[短パルス試験]

● 2010

2009年で1MW発振に成功

しかし、2010年で出力低下が確認された

出力低下の原因

磁場分布の異なるSCM(超電導磁石)を用いたことが原因

□ ラミナー性の劣化

□ ピッチファクターの分散値の増加

● 2011

SCM#3と同様の磁場分布を持つSCMを用いて評価試験を行なった。

➡ 出力の低下が改善された。

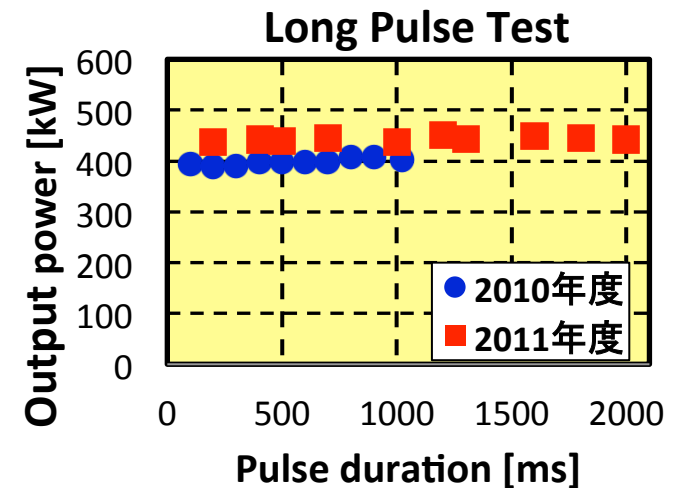
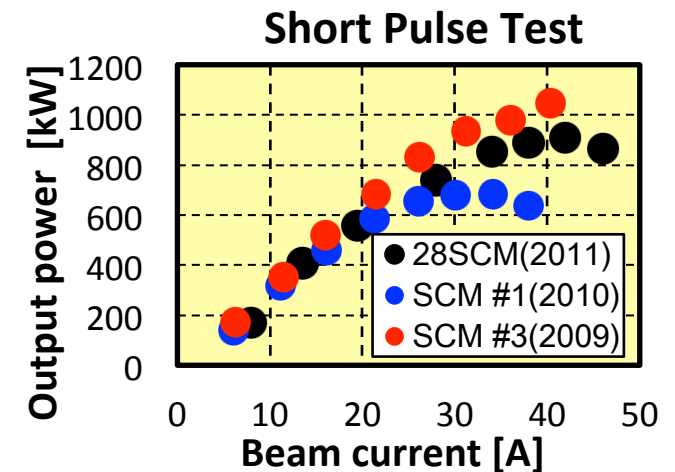
[長パルス試験]

● 2010 : 400kW-1s

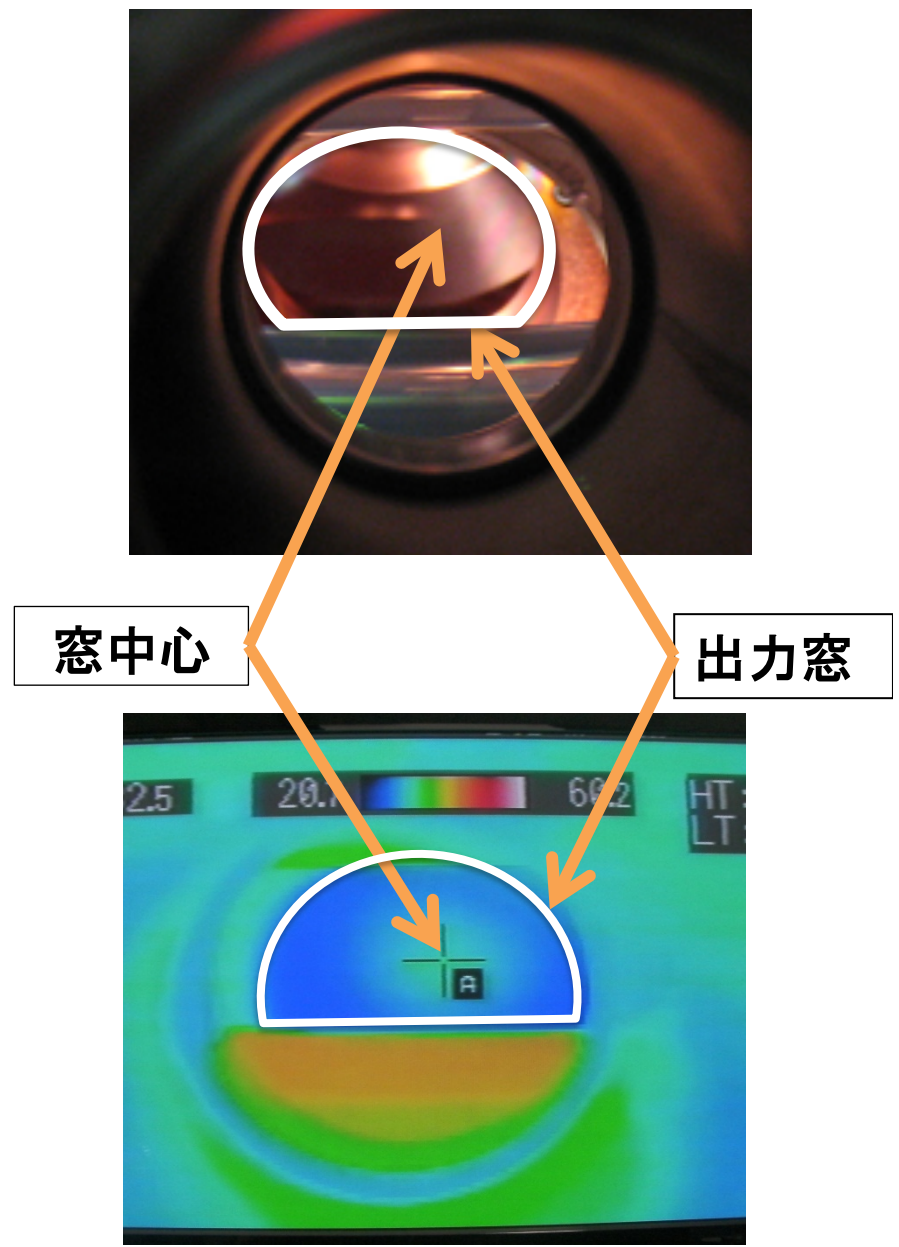
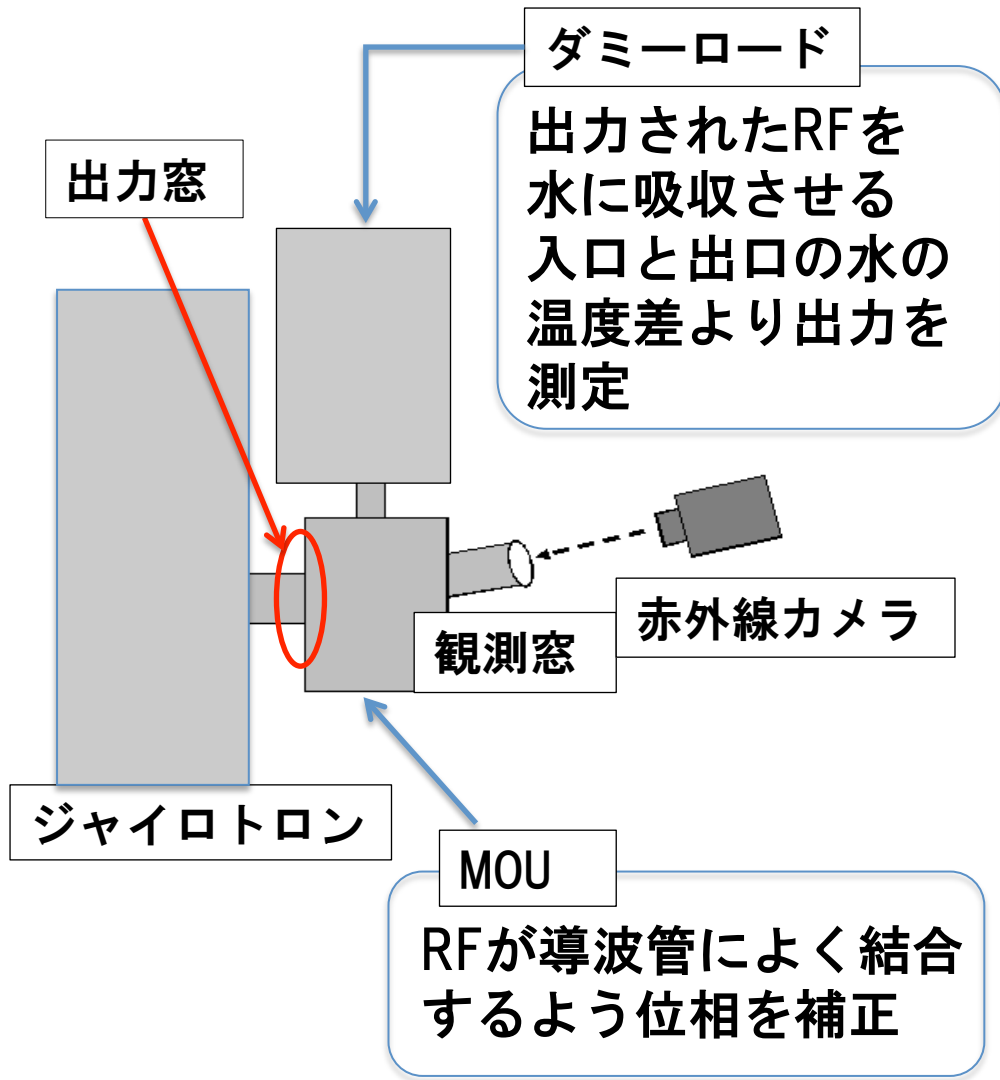
● 2011 : 450kW-2s

出力やパルス幅は電源の電圧電流容量により制限されている。

2009	2010	2011
SCM#3	SCM#1	28SCM



5.出力窓温度測定方法



5.測定結果

- 出力450kWパルス幅 2s で **約9°Cの温度上昇**を確認
- 冷却材の温度と一致するまで40秒以上かかる

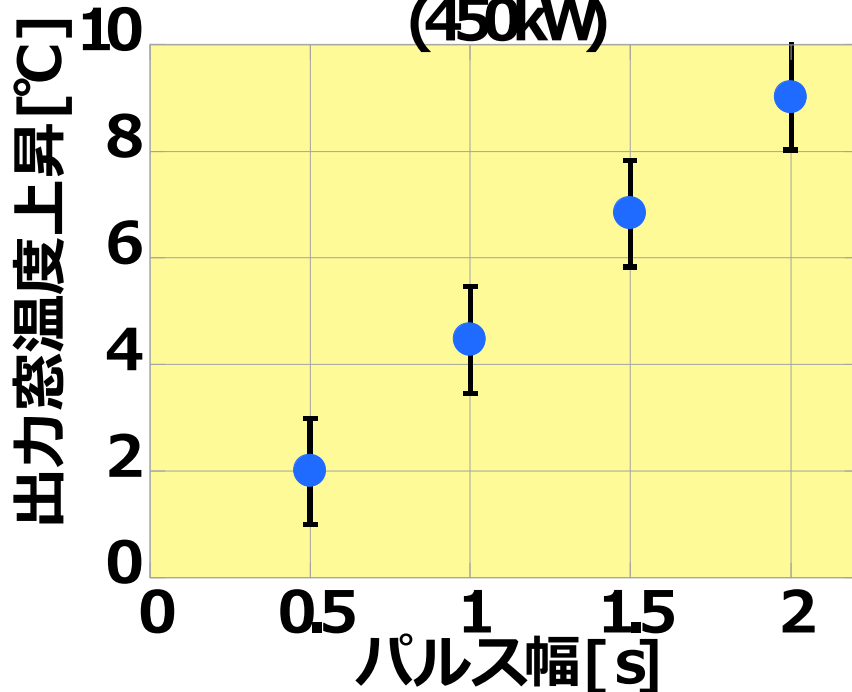


サファイア窓でも28GHzであればMW級の発振に数秒耐えられる

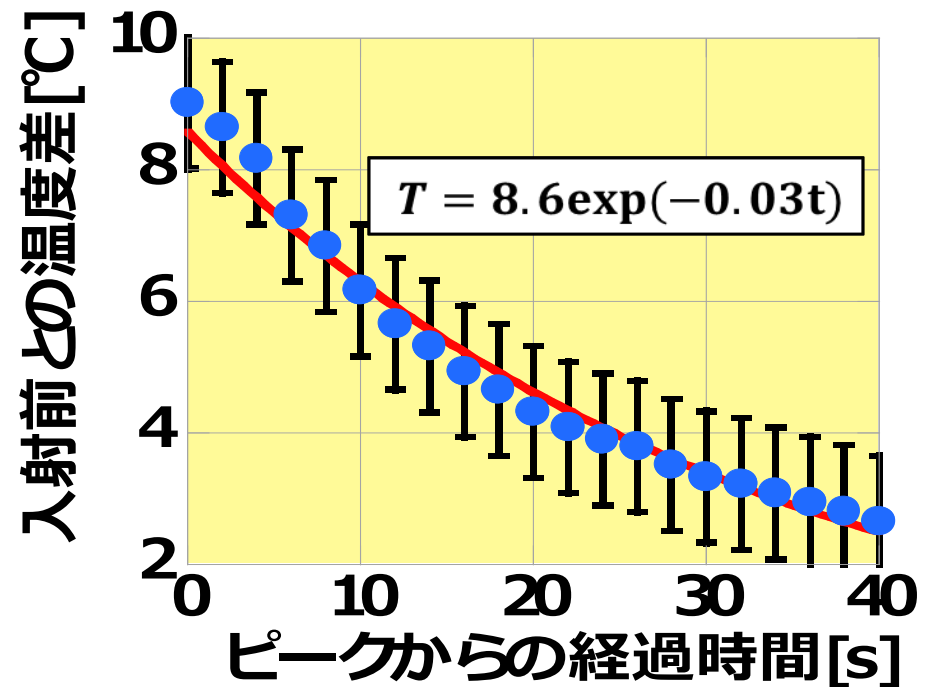


CWの動作には向かない

各パルス幅での出力窓温度上昇 (450kW)



パルス幅 2sでの冷却曲線



6.測定結果の解析

$$d\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right]_r = dk \nabla^2 T + AP(r) - h(T - T_c)$$

要素間の熱伝導

冷却材による冷却

要素の温度変化

RFの吸収エネルギー

開発したコードを用いて
計算すると、

誘電損失率 = 2.1×10^{-5}
熱伝導率 = $0.3 [W/cmK]$

で測定結果とよく一致

$A = \pi f (\epsilon + 1) \tan \delta d / c$: 吸収係数
 $P(r)$: 入射エネルギー

$\tan \delta$: 誘電損失率 ϵ : 誘電率

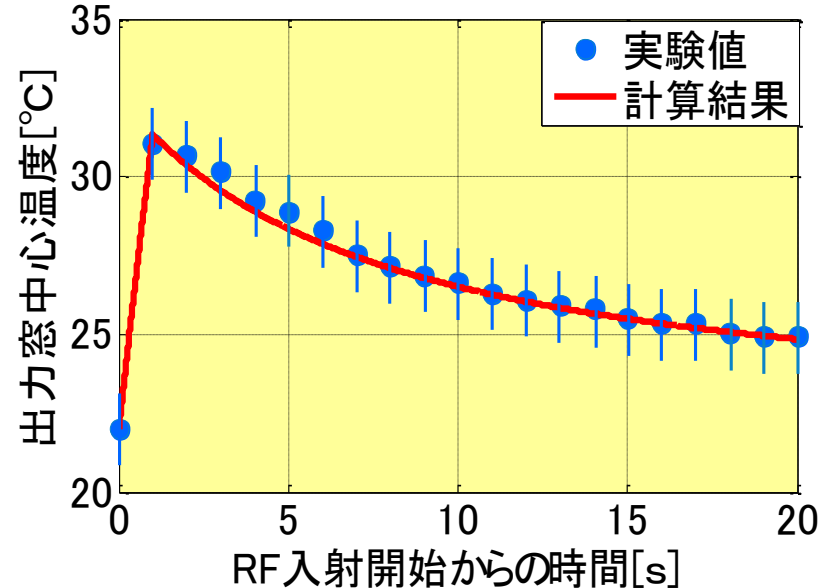
k : 熱伝導率 h : 熱伝達係数

d : ディスク厚 ρ : 密度 C_p : 比熱

発熱に大きく影響

冷却に大きく影響

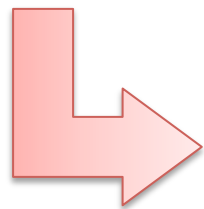
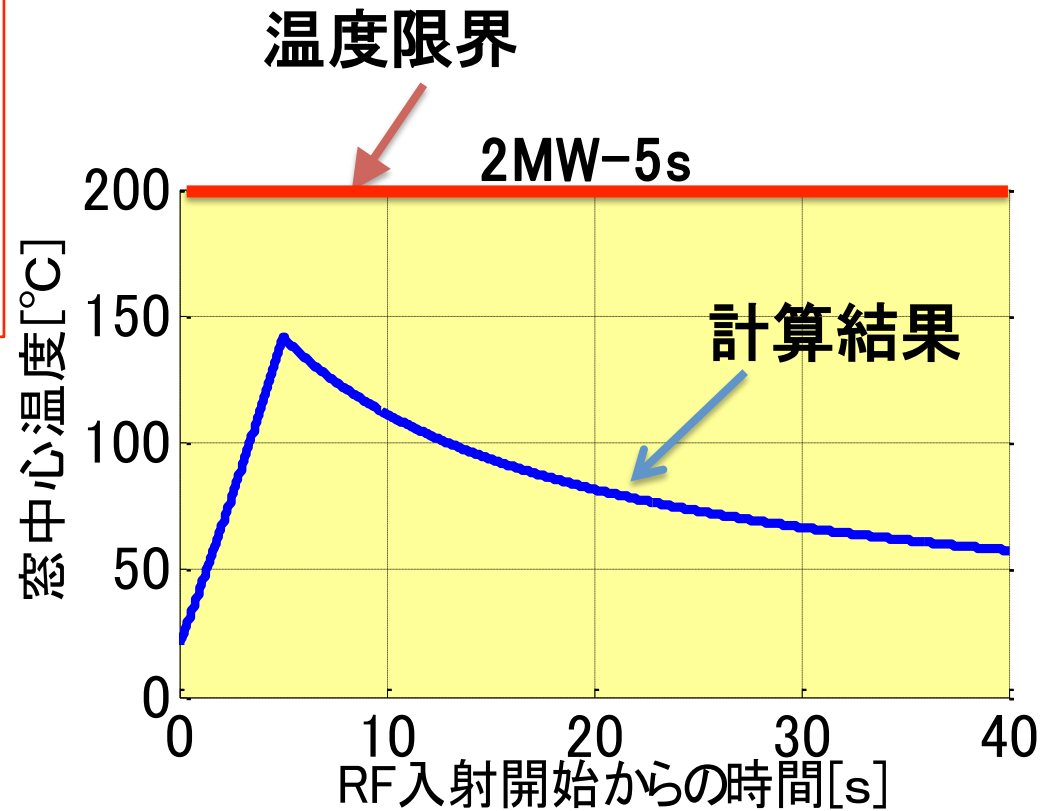
450kW-2s動作時の出力窓温度変化



6.NSTX要請 (2 MW-数秒)

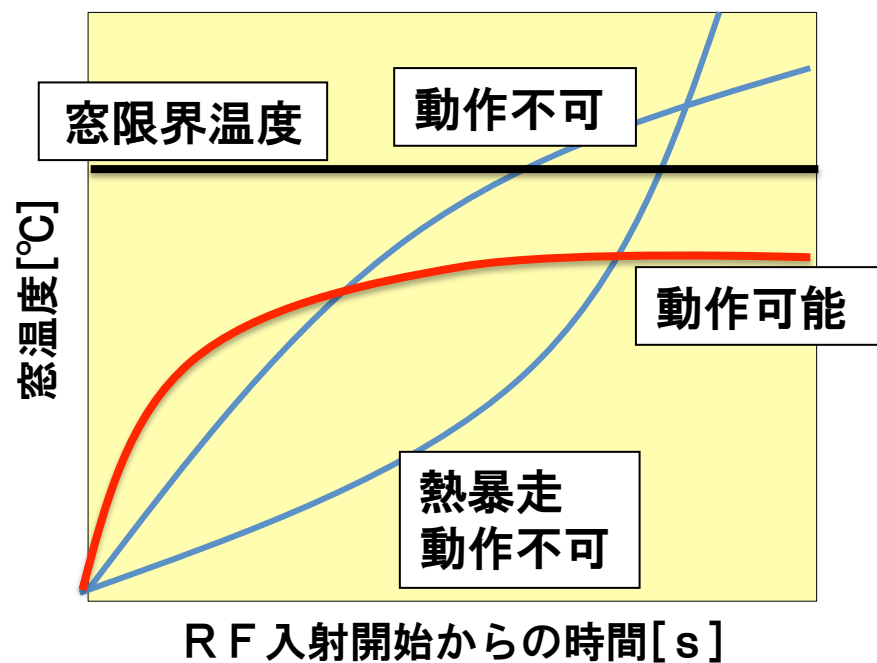
シングルディスク窓の限界
||
熱応力で割れる温度
200°Cまでなら十分耐えうる

出力窓中心の最高温度は
パルス幅5秒でも約140°C
に収まっている



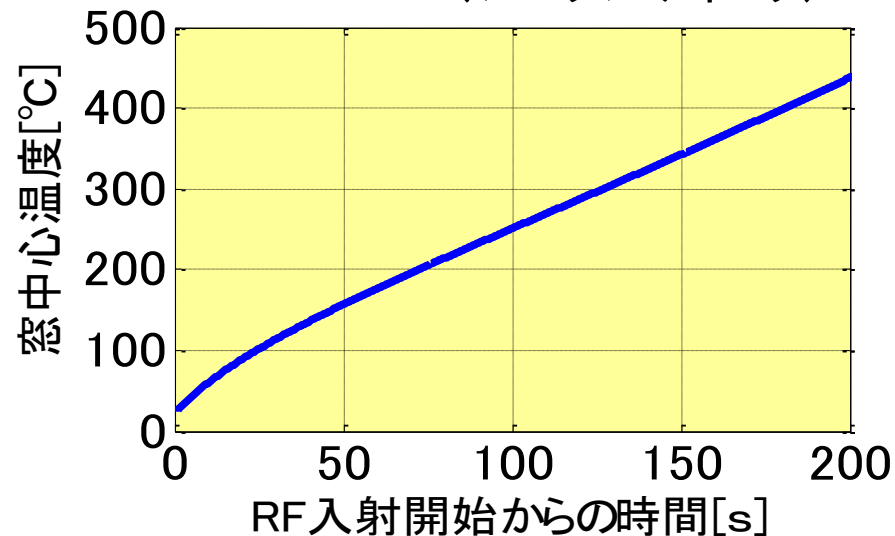
サファイア製シングルディスク窓を用いて
28GHz-2MW-数秒の動作が可能

6.QUEST要求 (400kW-CW)



計算コードを用いた計算結果

400kW-CW (シングルディスク)



窓温度が飽和せず

熱応力により窓破壊の危険性

シングルディスク窓では

400kW-CWの動作は不可能

400kW-CW要求を満たすには？

窓の材料を変更

ダイヤモンド窓を使用

優れた性能
非常に高額

冷却方法を変更

構造は複雑になる

まずこちらを
検討

6.ダブルディスク窓でのシミュレーション

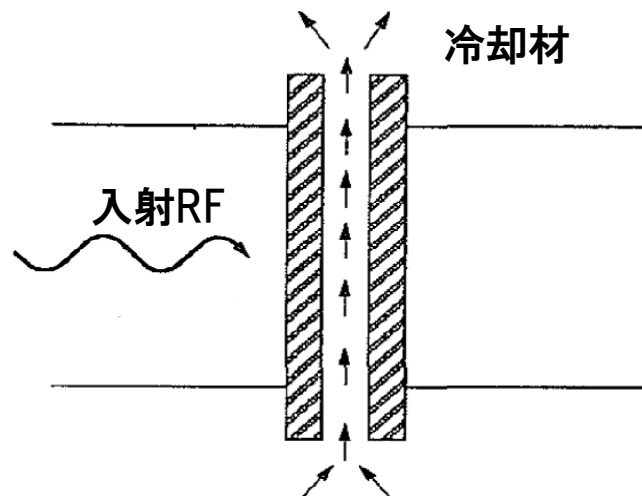
13/14

ダブルディスク窓

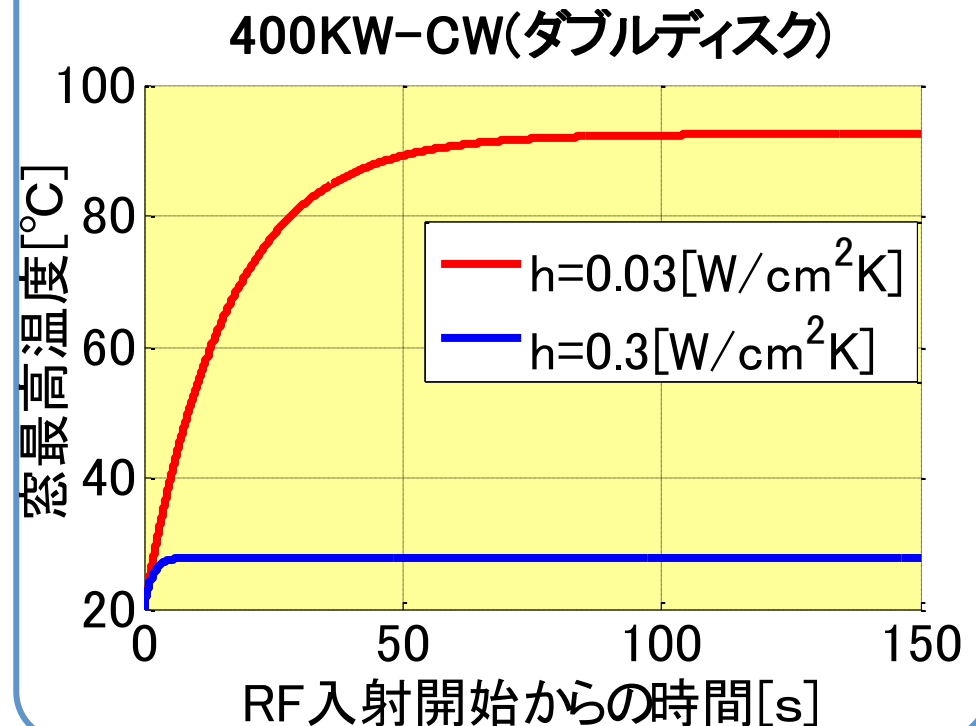
2枚の誘電体ディスクの間にRF吸収の少ない冷却材を流し面冷却を行う

冷却材の流速を上げることで熱伝達係数を大きくできる

限界は冷却材の気化点(約100°C)



熱伝達係数を $0.03 \text{ [W/cm}^2 \cdot \text{K]}$ 以上まで上げればダブルディスク窓を用いて $28\text{GHz-}400\text{kW-CW}$ での動作が可能である。



7.まとめと今後の課題

- 短パルス試験 : **1MWを達成**
SCMの規格の違いにより出力低下が見られたが、SCMの取り換えにより出力低下が改善された。
- 長パルス試験 : **540kW-2sを達成**
出力やパルス幅は電源の電圧電流容量やダミーロードの熱容量により制限されている。

出力窓温度測定

450kW-2秒の発振に対してサファイアシングルディスク窓の約9°Cの温度上昇を観測

開発した計算コードを用いた解析により、28GHz・約20°Cで

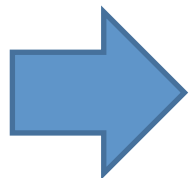
誘電損失率が 2.1×10^{-5}

熱伝導率が0.3[W/cmK]

であることが分かった

計算コードによるシミュレーション

- シングルディスク窓を用いての2MW-数秒の動作が可能
- 冷却材の流速を上げ熱伝達係数を0.03[W/cm²・K]以上にできればダブルディスク窓を用いて400kW-CWの動作が可能



ダミーロード・電源を強化 さらなる高出力・長パルス試験
熱伝達係数が求められている値を得られているか確認