

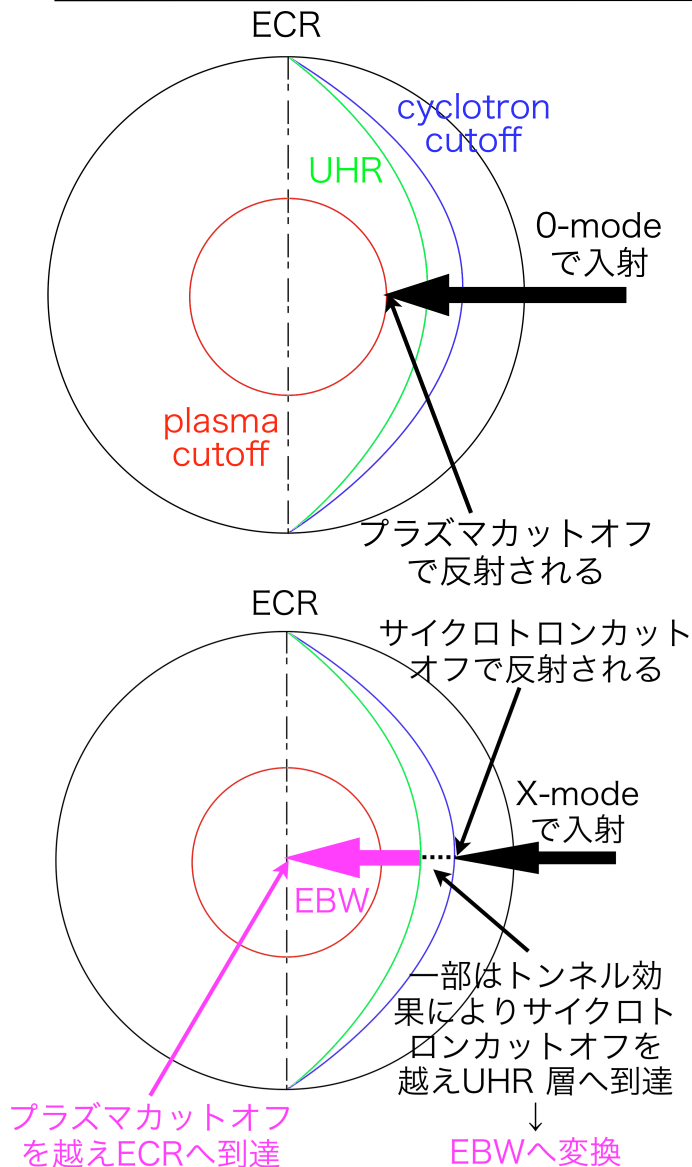
低アスペクト比トーラスプラズマ
における電子バーンスティン波の
励起と検出

京都大学エネルギー科学研究科
プラズマ物性物理学研究室

野口悠人 麦谷吉正 打田正樹

田中仁 前川孝

背景・目的

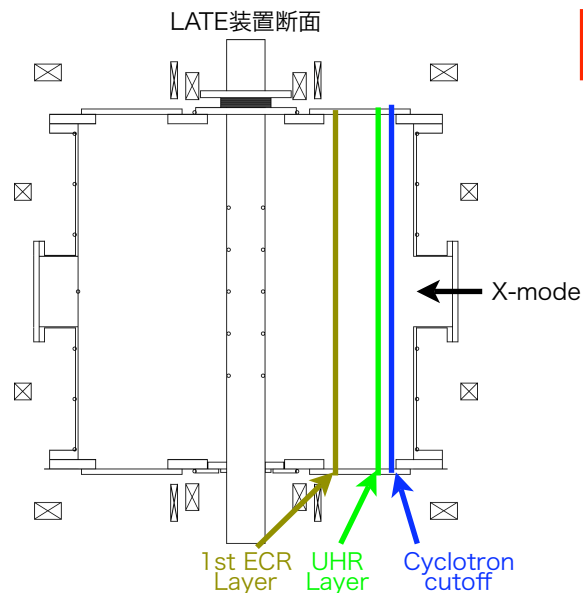


高密度のトーラスプラズマを加熱する際、通常の電磁波モードではカットオフ層で遮断されプラズマ内部まで伝播することはできない。しかし電子バーンスタイン波(EBW)は密度の上限がなくECR層まで到達し、サイクロトロン共鳴吸収によりプラズマを加熱できるという点で注目されている。

しかし今までにEBWの伝播・吸収の過程を明確に検証した例はない。

今回新たにLATE装置におけるEBWの励起・検出システムの設計・製作を行った。そのシステムを用いて初期実験を試みた。

LATEにおけるEBWの励起及び伝播特性



EBWの励起 = X-modeの弱磁場側からの垂直入射

入射されたマイクロ波は右手サイクロトロン遮断層に到達



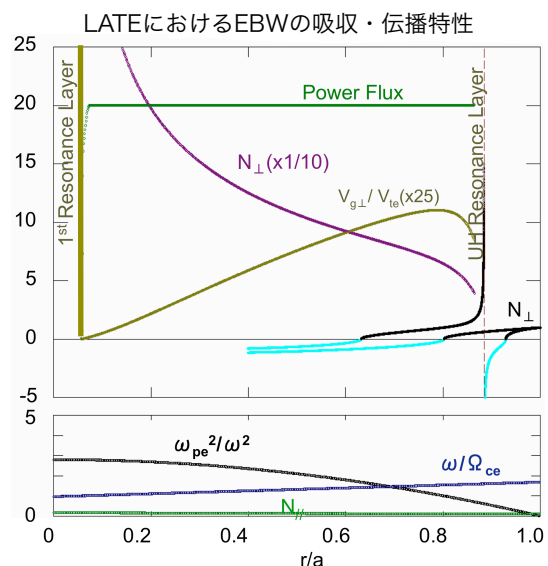
さらにトンネル効果によりエヴァネッセント領域を越えてUHR層に浸入



X-modeからのモード変換によりEBWが励起される



EBWへとモード変換された波は大きな屈折率 N_{\perp} を持ってプラズマ内部へ伝播し、ドップラーシフトによりECR層の手前で共鳴吸収される。



LATEにおける観測の利点

LATE=低アスペクト比トーラス装置

ECR層とUHR層との空間を広く取ることができる

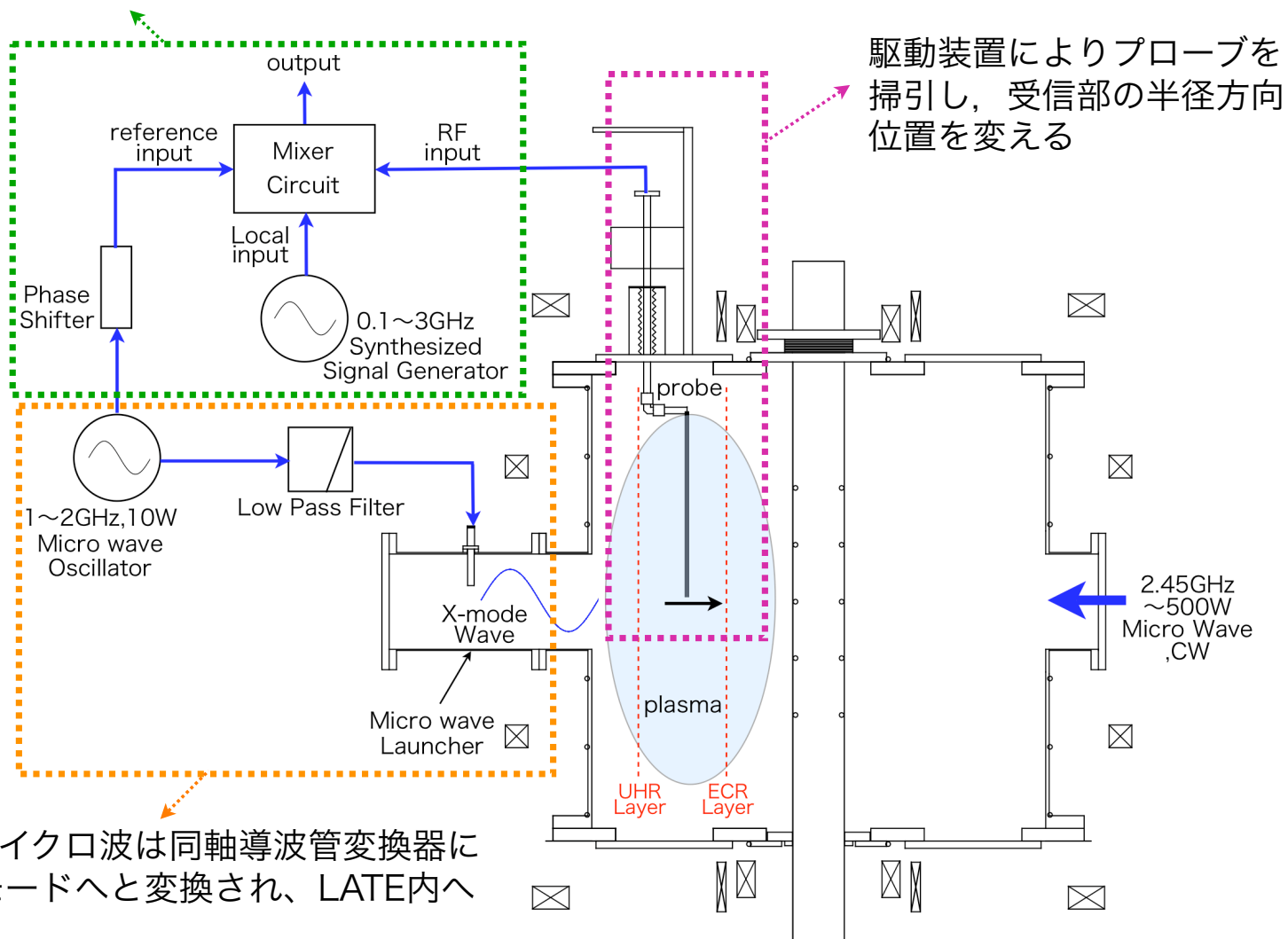
(ex.) LATE内に生成したプラズマに対して 1.2GHzのマイクロ波を入射した場合 → ECR層：～26cm
UHR層：～40cm)

- ・ UHR層におけるEBWの励起
- ・ ECR層に到達するまでの伝播
- ・ ECR層付近での吸収の様子

大域的に調べる
ことが可能

EBW励起・検出システム

ミキサー回路を用いて位相差により干渉パターンを検出

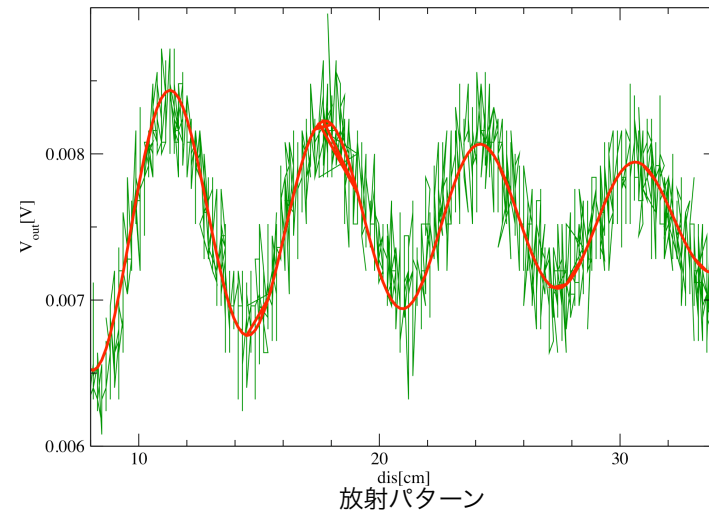
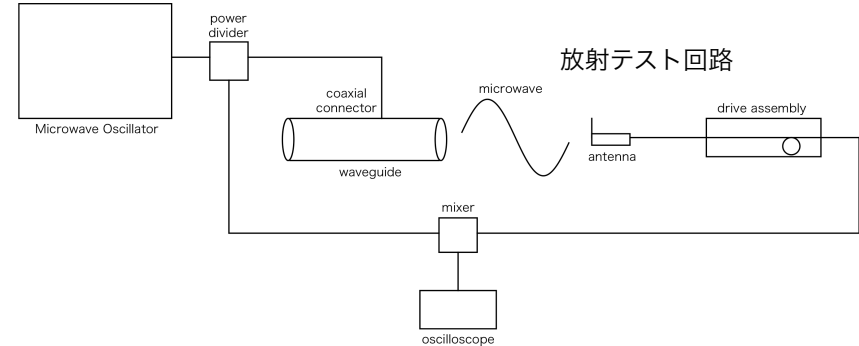
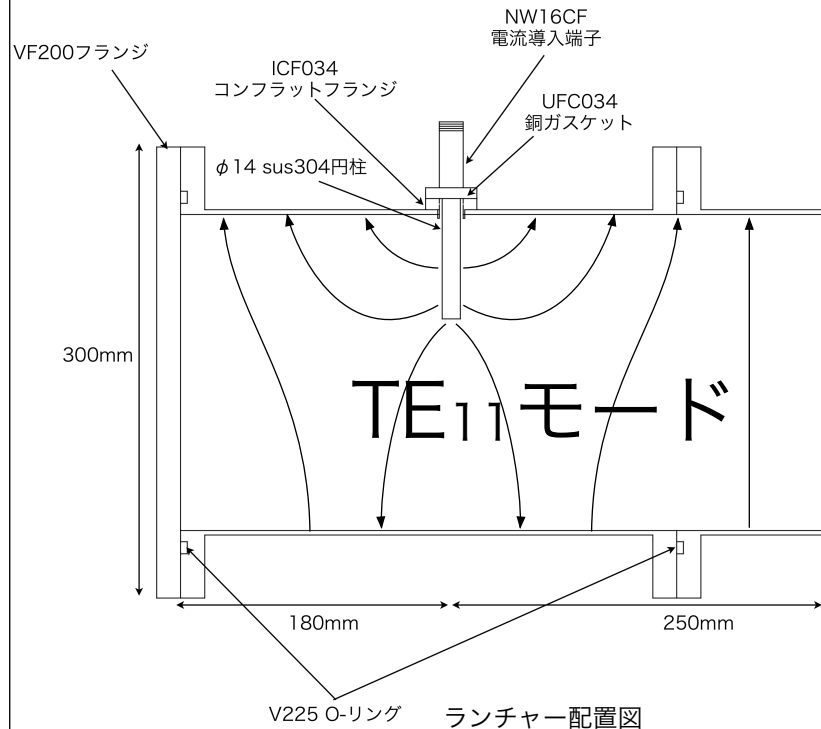


励振されたマイクロ波は同軸導波管変換器によってTE₁₁モードへと変換され、LATE内へ入射される

EBW励起システム

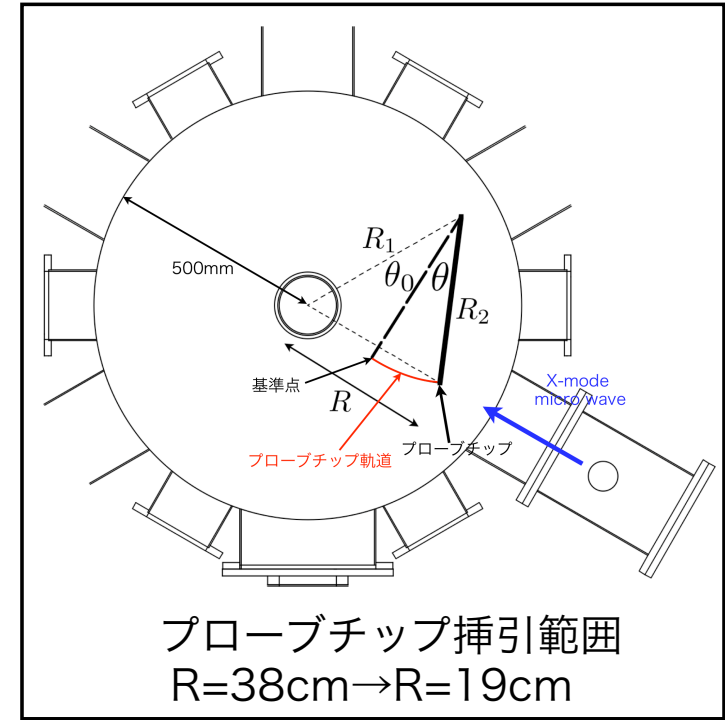
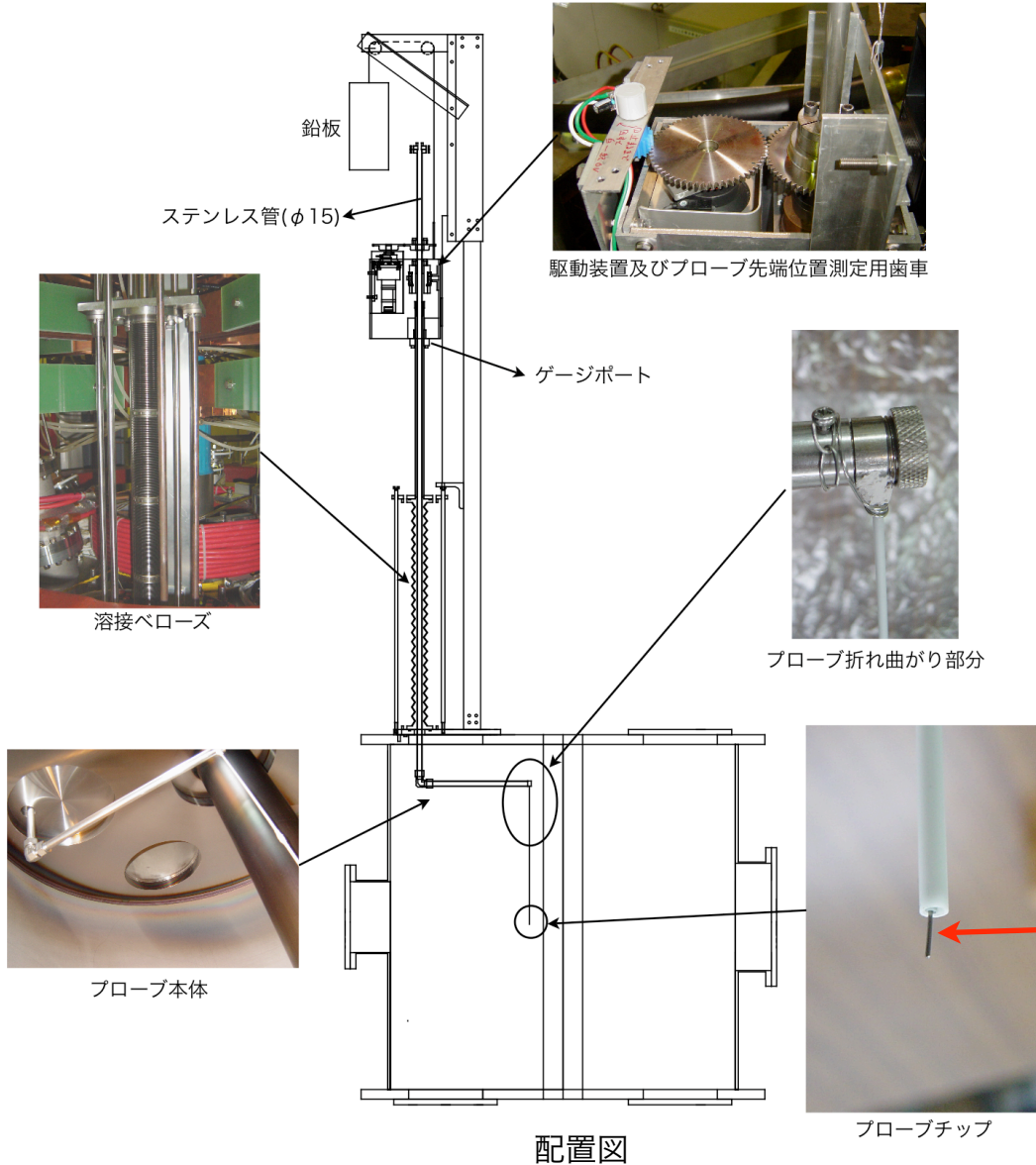
EBWの励起=
X-modeの弱磁場側からの垂直入射

TE₁₁モードをトロイダル
磁場に対して垂直入射する



ランチャーのテストとして、真鍮円筒に同軸コネクタを取り付け、真鍮棒をコネクタの芯線にハンダ付けして同軸導波管変換器とし、マイクロ波を放射した。大気中におけるマイクロ波の放射パターンをアンテナにより計測

EBW検出システム(アンテナ)



LATE上部より

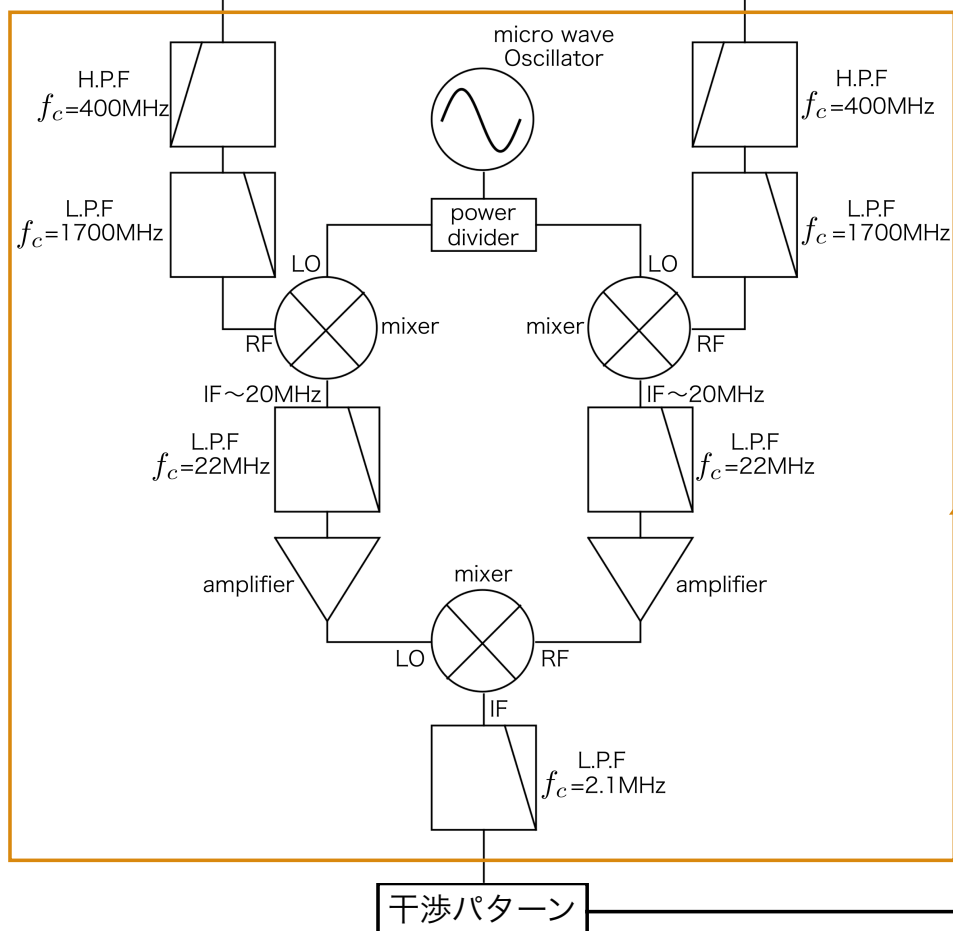
プローブチップ
 $\phi=0.5\text{mm}$, $L=4.1\text{mm}$
初期実験として垂直方向
の電場を受ける

EBW検出システム(ミキサー)

検出回路ブロックダイアグラム

Oscillatorから分岐し、位相器を介したreference信号

プラズマに挿入されたアンテナで受信したRF信号



シールドボックス



回路写真

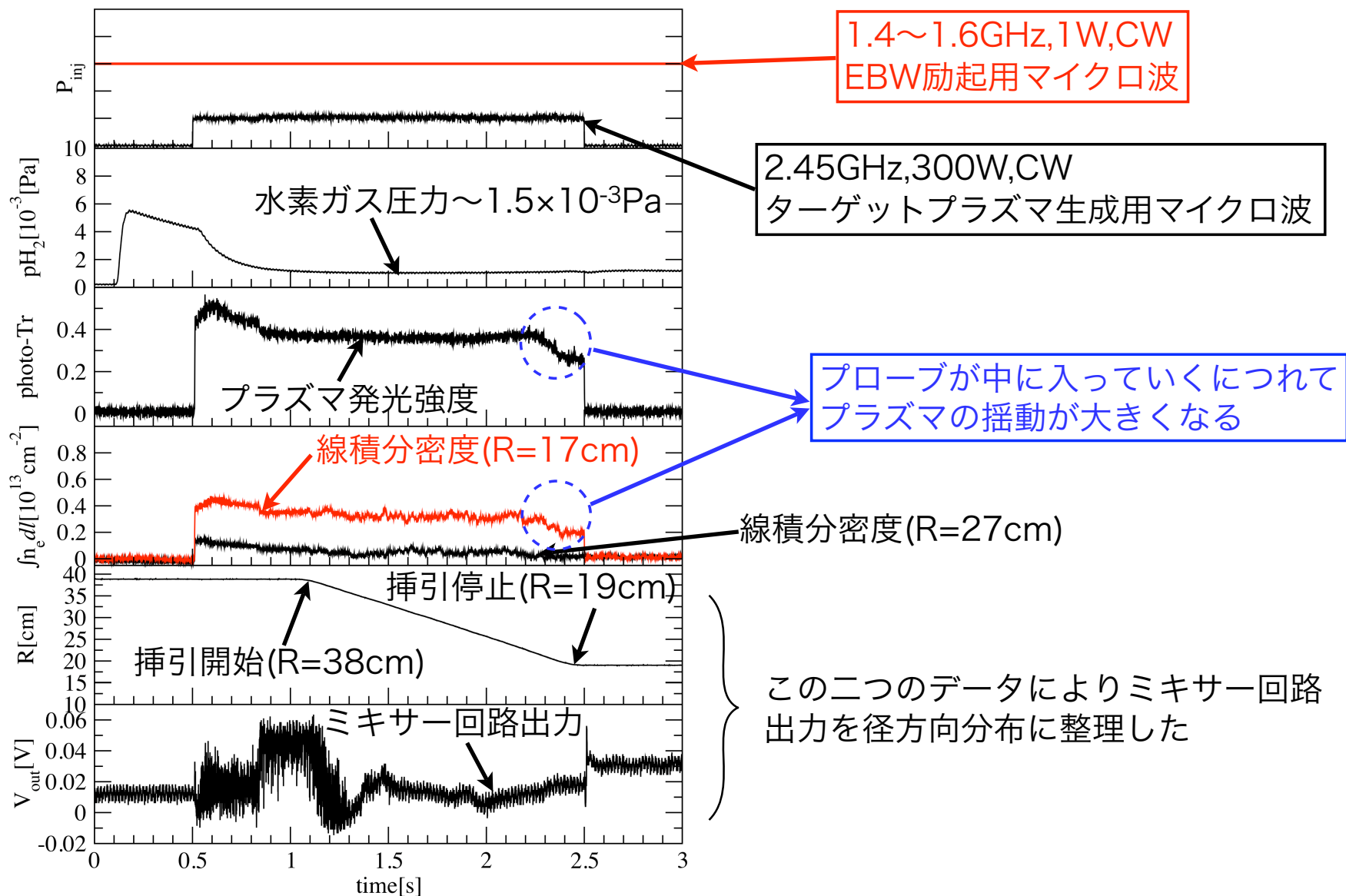
シールドボックスにより
外来のノイズを遮断

$$V_{out} = A \cos \phi + B$$

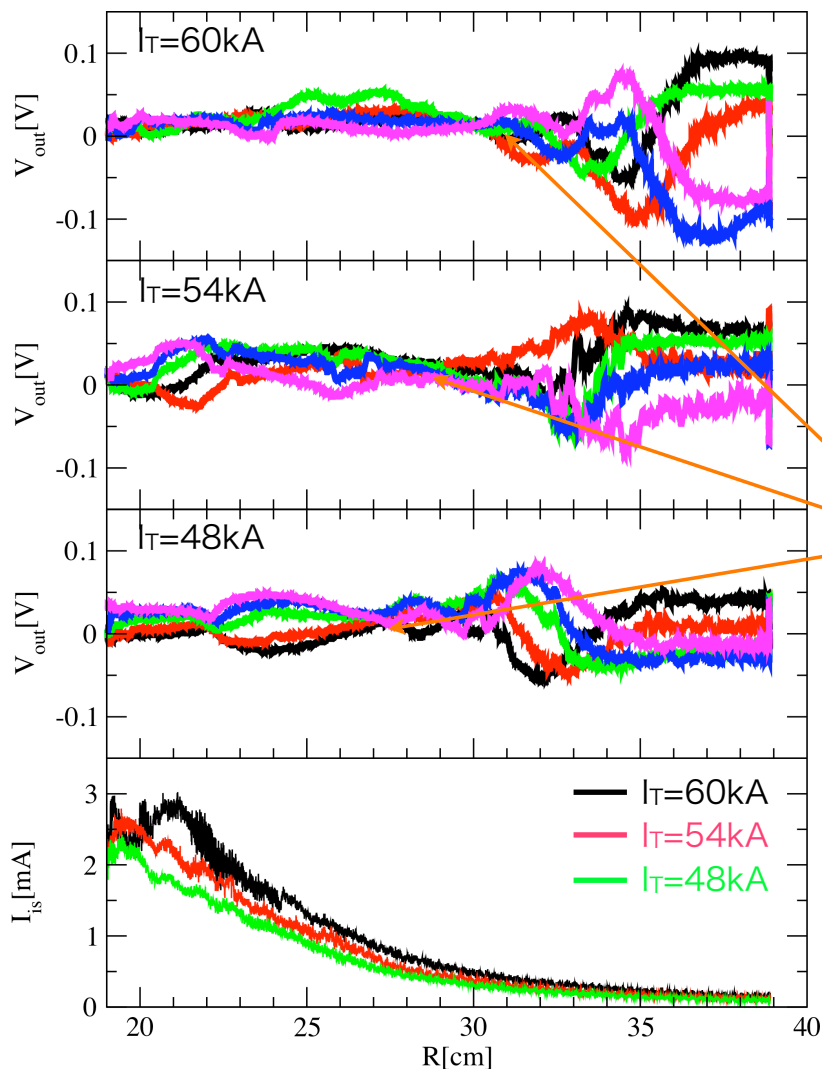
プローブチップの掃引による
位相変化

↓
干渉パターンが出力される

代表的な放電波形及びミキサー回路出力



初期実験(励起周波数 $f=1.5\text{GHz}$, $I_T=60\sim 48\text{kA}$)



干渉パターン及びイオン飽和電流の空間分布
(励起周波数 $f=1.5\text{GHz}$, $I_T=60, 54, 48\text{kA}$)

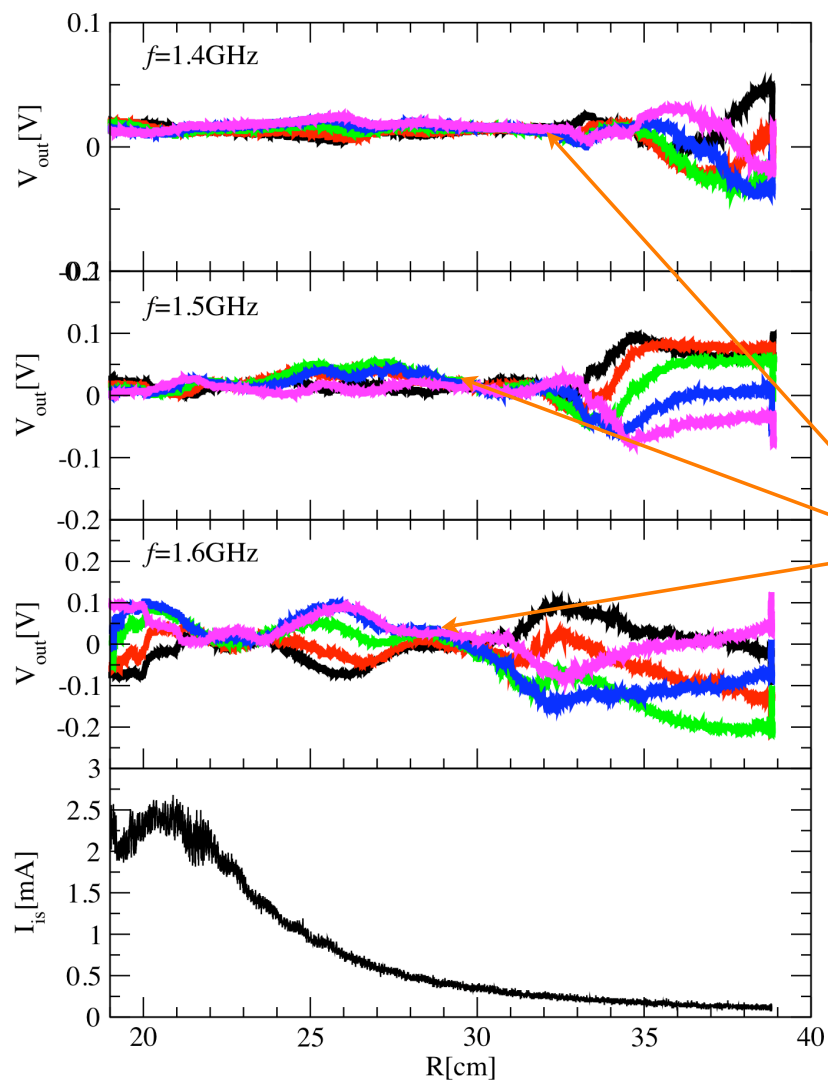
EBW励起周波数を $f=1.5\text{GHz}$ に固定し、プラズマ生成の際のトロイダルコイル電流を $I_T=60\text{kA}/54\text{kA}/48\text{kA}$ と変えて測定を行った。

干渉信号の振幅が低下している



磁場強度を下げるに従って干渉信号の振幅の低下位置が強磁場側へとシフトしている

初期実験(励起周波数 $f=1.4\sim 1.6\text{GHz}$, $I_T=60\text{kA}$)



干渉パターン及びイオン飽和電流の空間分布
(励起周波数 $f=1.4\sim 1.6\text{GHz}$, $I_T=60\text{kA}$)

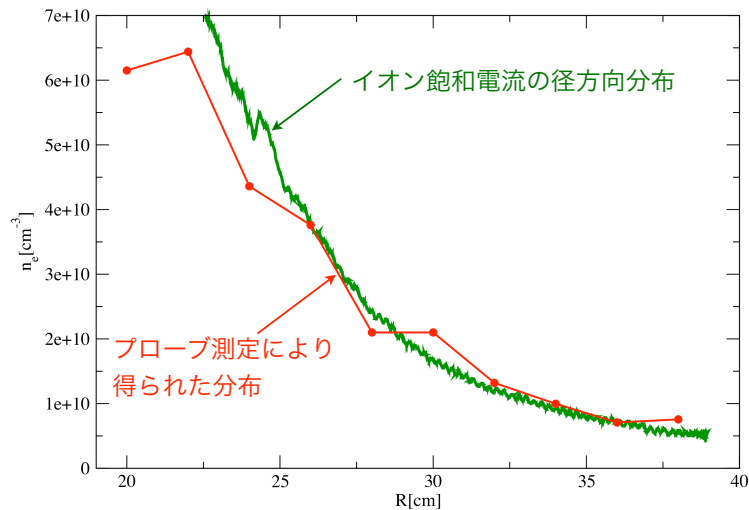
プラズマ生成の際のトロイダルコイル電流を固定し、EBW励起周波数を $f=1.4\text{GHz}/1.5\text{GHz}/1.6\text{GHz}$ と変えて測定を行った。

干渉信号の振幅が低下している



周波数を高くするに従って干渉信号の振幅の低下位置が強磁場側へとシフトしている

考察



イオン飽和電流の径方向分布とプローブ測定によって得られた密度が一致

イオン飽和電流により局所的な密度分布を推定

密度分布と磁場強度分布により

電子サイクロトロン共鳴周波数 $\Omega_{ce} = \frac{eB}{m}$

プラズマ遮断周波数 $\omega_{pe} = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}$

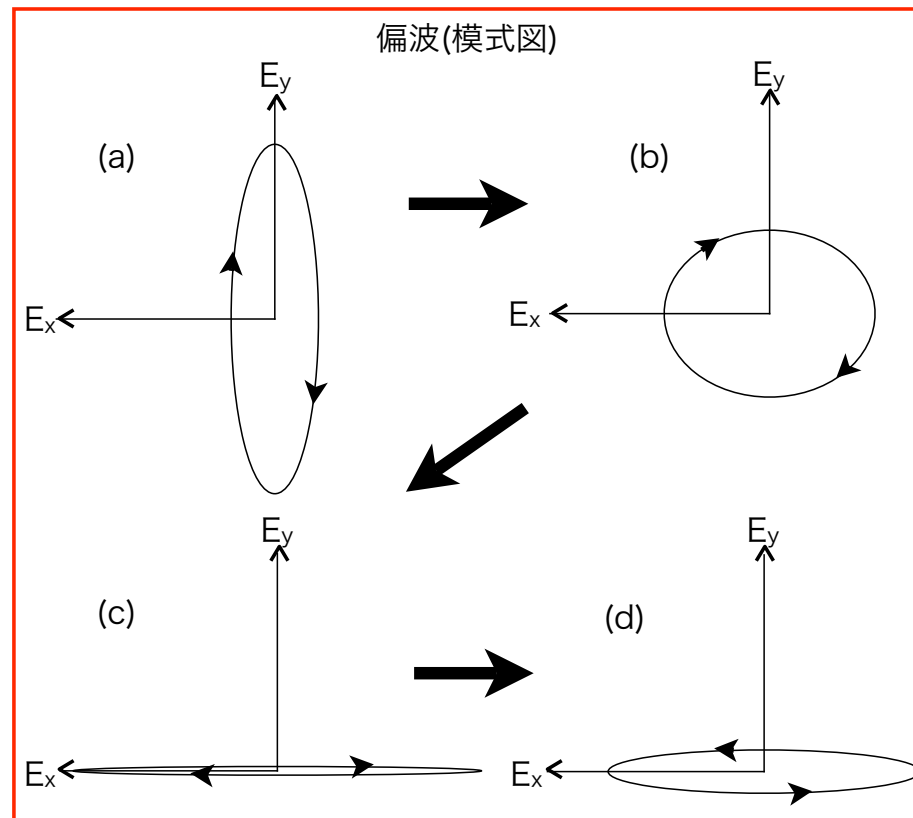
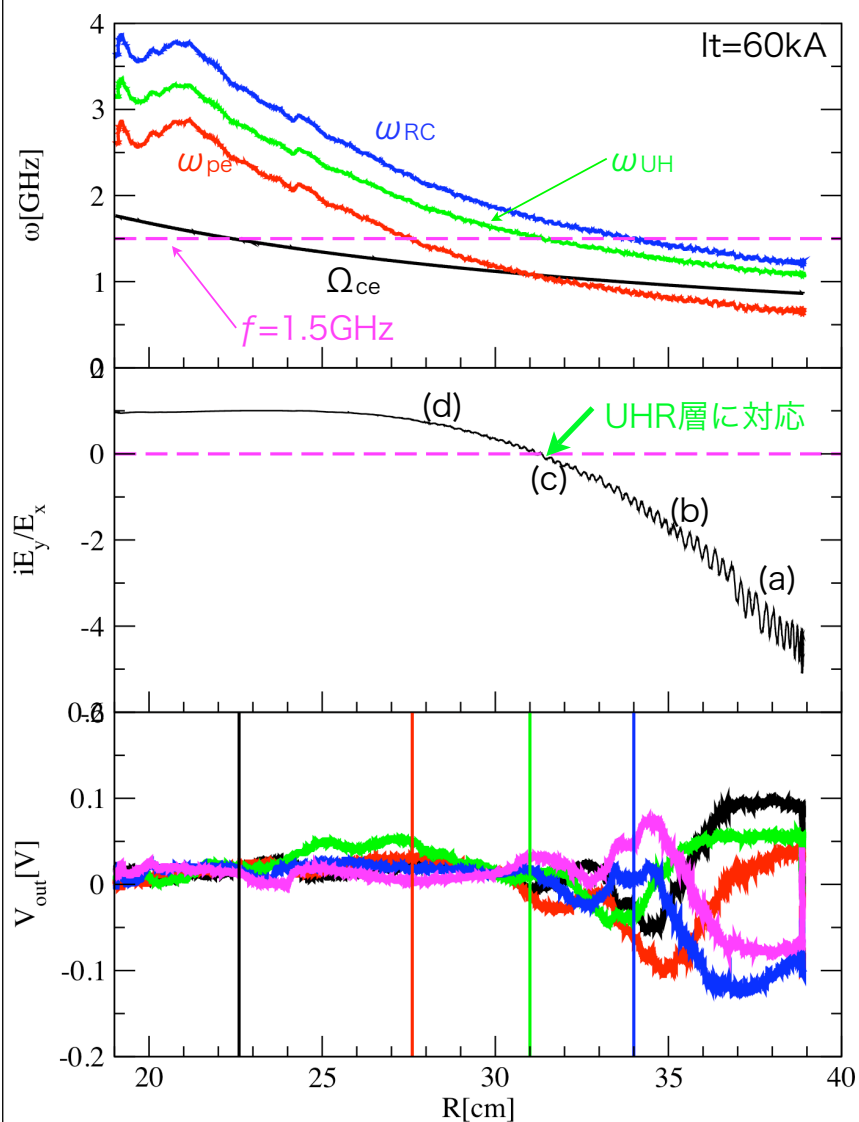
高域混成共鳴周波数 $\omega_{UH} = \sqrt{\Omega_{ce}^2 + \omega_{pe}^2}$

右手サイクロトロン遮断周波数 $\omega_{RC} = \frac{\Omega_{ce} + \sqrt{\Omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2}}{2}$

X-modeの偏波 $i \frac{E_y}{E_x} = \frac{\omega(\omega_{pe}^2 - \omega^2 + \Omega_{ce}^2)}{\omega_{pe}^2 \Omega_{ce}}$

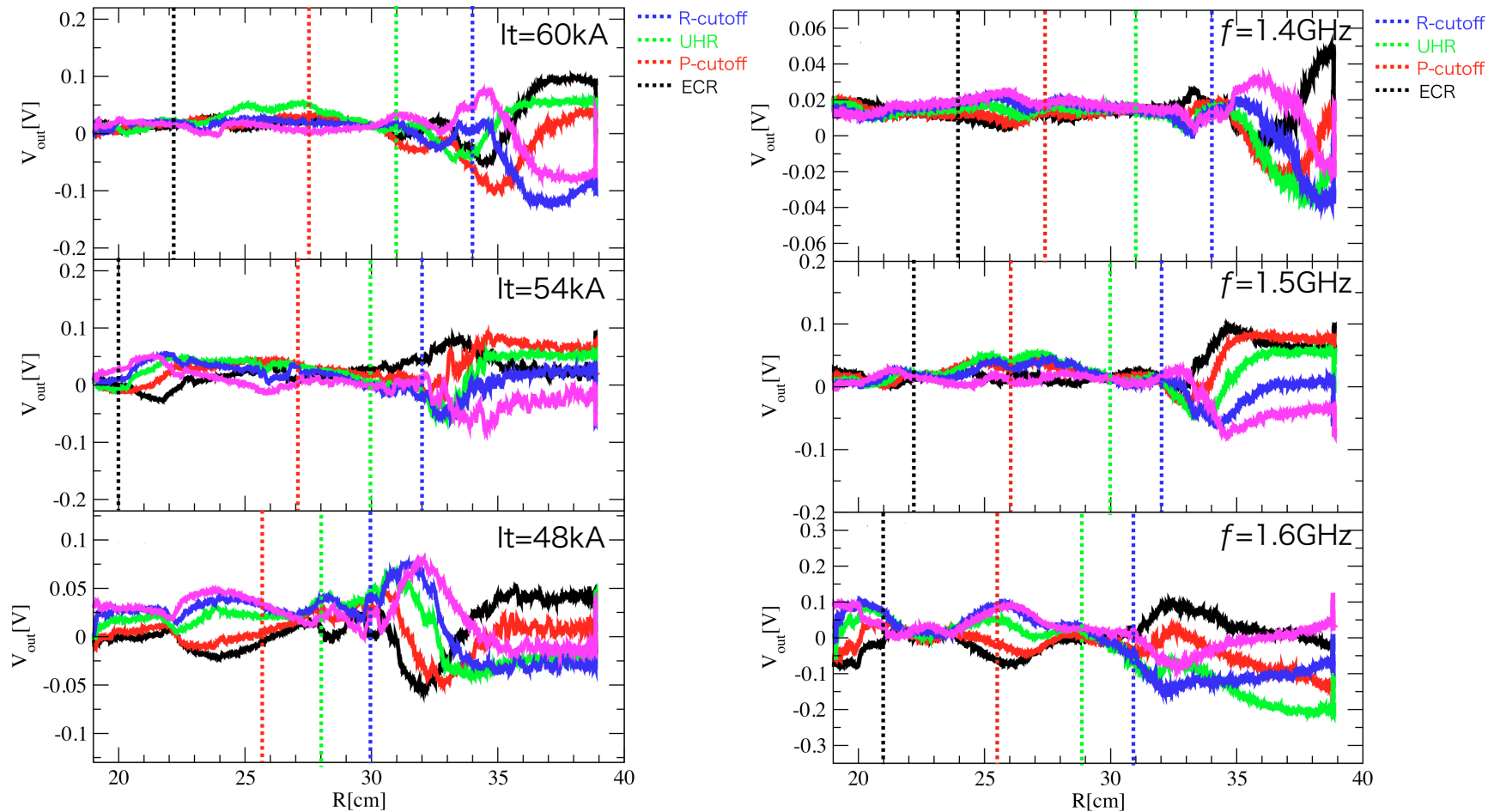
を計算し、実験結果との比較を行った。

計算結果(1)



実験結果は偏波の移り変わり
に対応していると考えられる

計算結果(2)



右手サイクロトロン遮断層・UHR層がトロイダルコイル電流を下げるにつれて、
若しくは入射マイクロ波周波数を上げるにつれて強磁場側へシフト

→定性的に実験結果と一致=X-modeの波が検出されている

まとめ

- LATE装置においてEBW励起・検出システムを設計し、製作した.
- EBW励起システムとしては TE_{11} モードを磁場に垂直に入射するという方法を用いた.
- EBW検出システムとしてはプラズマ内に挿入したプローブが受信する信号と reference信号との干渉計測という方法を用いた.



- 初期実験として垂直方向の電場を受信するプローブチップを用いてX-modeの波を計測する実験を行った.
- 初期結果として出力された信号が干渉パターンであることが確認され、干渉計測システムが機能していることが分かった.
- 線形理論と比較した結果、X-modeの波がサイクロトロン遮断層に到達し、さらにトンネル効果によってUHR層へ到達したものと推定される.



- アンテナに関して波の進行方向に平行な成分を計測できるものにする・reference信号をプラズマ内に固定したプローブが受信する信号として密度揺動による位相変化の影響を減らすといった改良点が挙げられる.
- EBWの励起に関してUHR層に到達する電力を上げる・密度勾配を制御してモード変換を最適化するといった改良点が挙げられる.
- 以上のようなリファインにより今後EBW計測へと発展できるものと考えている.