

可動ECRHアンテナによる GAMMA10ミラープラズマの 加熱特性

青木瞳、飯泉英昭、近藤秀幸、太田真雄
今井剛、假家強、南龍太郎 GAMMA10グループ
筑波大学 プラズマ研究センター

—発表内容—

- 研究の目的
- GAMMA 10 装置の概要
- 垂直方向可変アンテナによる実験結果
- 水平方向可変アンテナの設計と低電力試験性能
- 水平方向可変アンテナを用いた実験結果
- 偏波モードを変えたときの実験結果
- まとめ

目的とタンデムミラー装置 GAMMA 10

本研究の目的、概要:

イオンサイクロトロン共鳴加熱によるベースプラズマでは、電子温度はイオン温度よりも二桁ほど低い ($\sim 100 \text{ eV} \ll \text{イオン温度} \sim 5 \text{ keV}$)

電子温度の向上を目的とし、セントラル部に電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) を導入

垂直方向 1軸自由度の可動アンテナに導波管直近ミラーを改良 (2008年度)

プラズマの径方向 ρ (径方向位置/プラズマ半径) $< \sim 0.03$ 程度の計算による吸収位置の変化にもかかわらず、明らかな変化、性能向上度が見えた

2009年度は

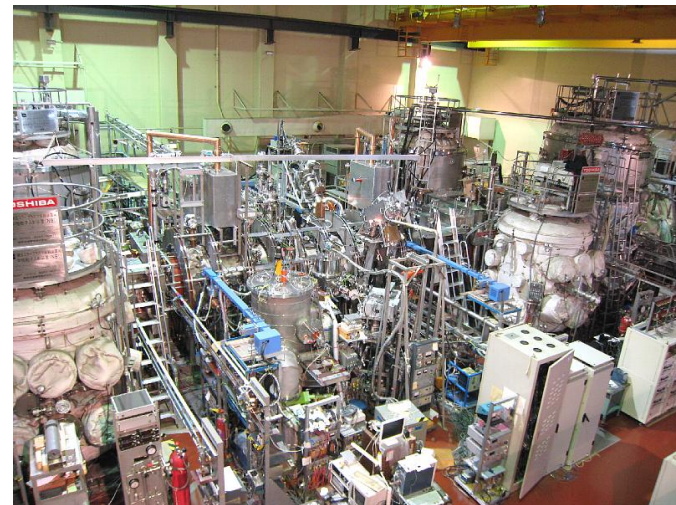
より最適化を進めるため、垂直方向最適設定値の下に、水平方向可動アンテナを導入した。それと同時に偏波Xモード特性についても測定した。

— 各ECRHの役割 —

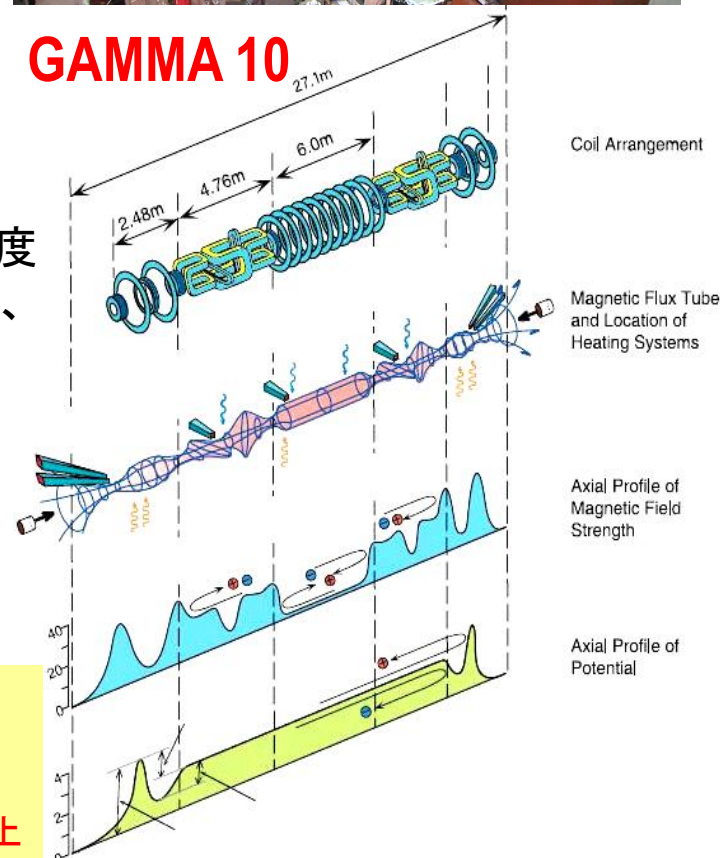
バリアECRH: 電位バリア形成

プラグECRH: プラグ部電子温度向上

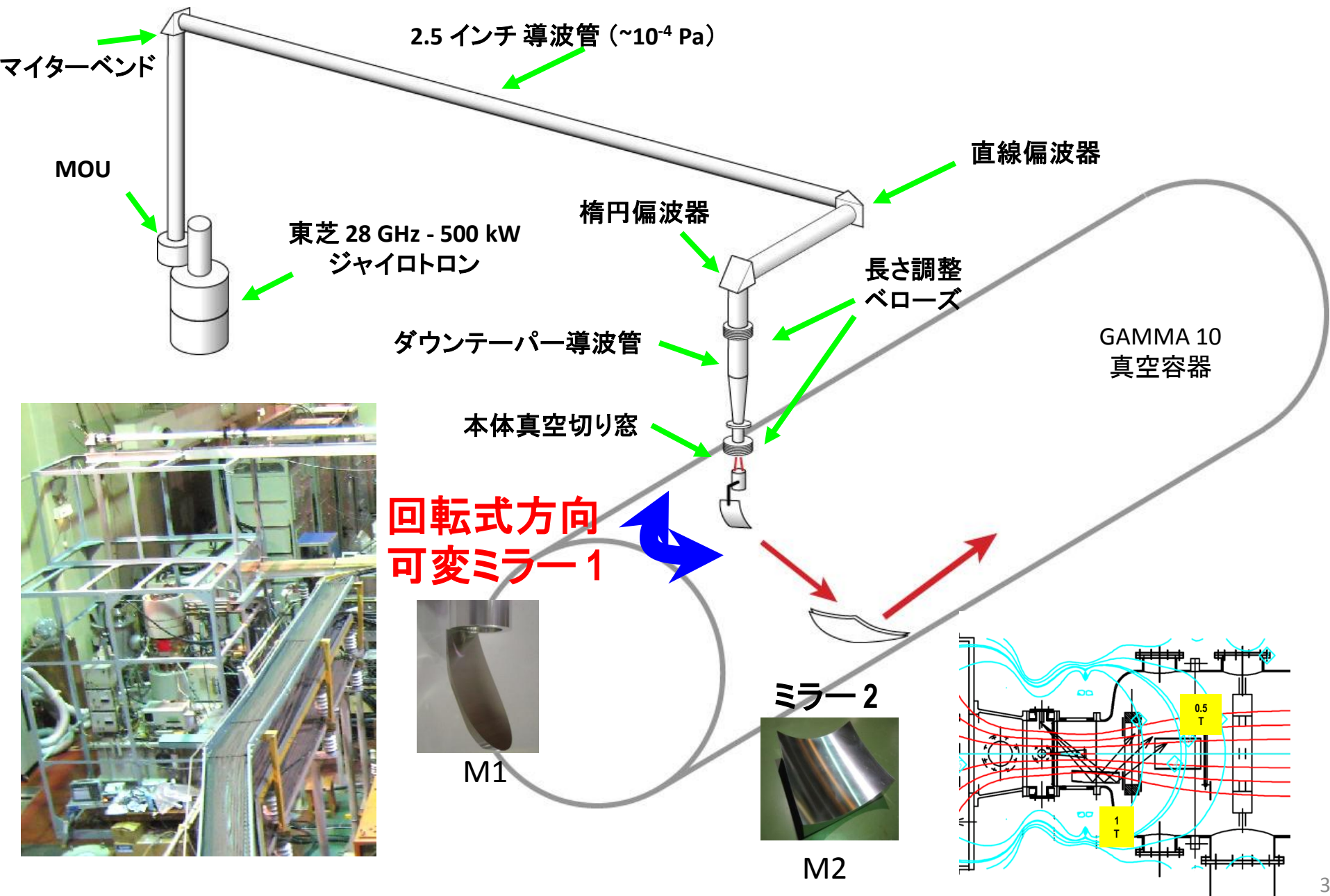
セントラルECRH: セントラル部電子温度向上



GAMMA 10

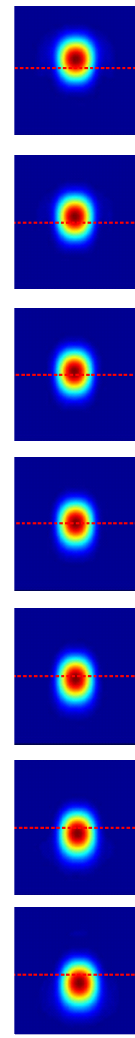
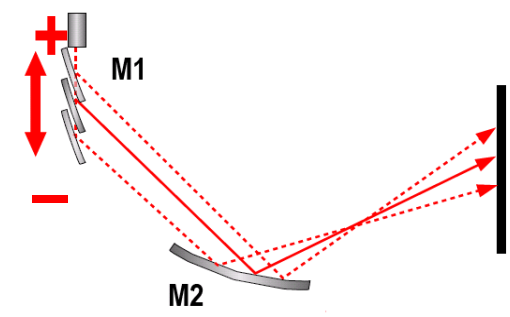


セントラル ECRH システム (水平方向可動アンテナ設置時):

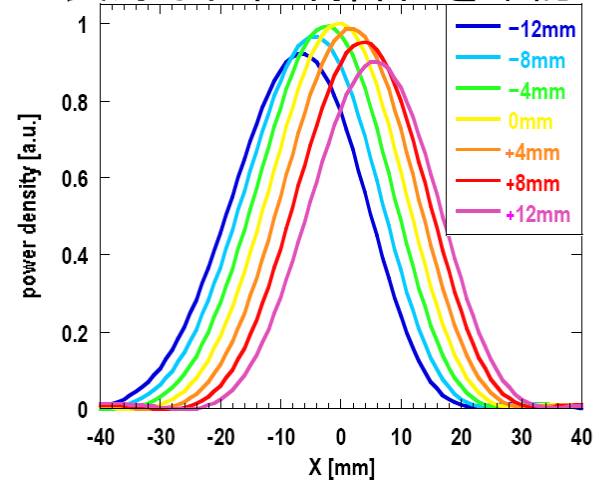


垂直方向1軸可動アンテナの性能:

- ・ミラー可動範囲: $\Delta 24$ mm (B_{res} では $\Delta 12$ mm に対応)
- ・3分割 延長導波管により、可動範囲域を変更可能
- ・可動ミラーを集束度の異なるものに変更可
(ビーム集束度 (power e-folding): 14.7/11.2 mm @ B_{res})

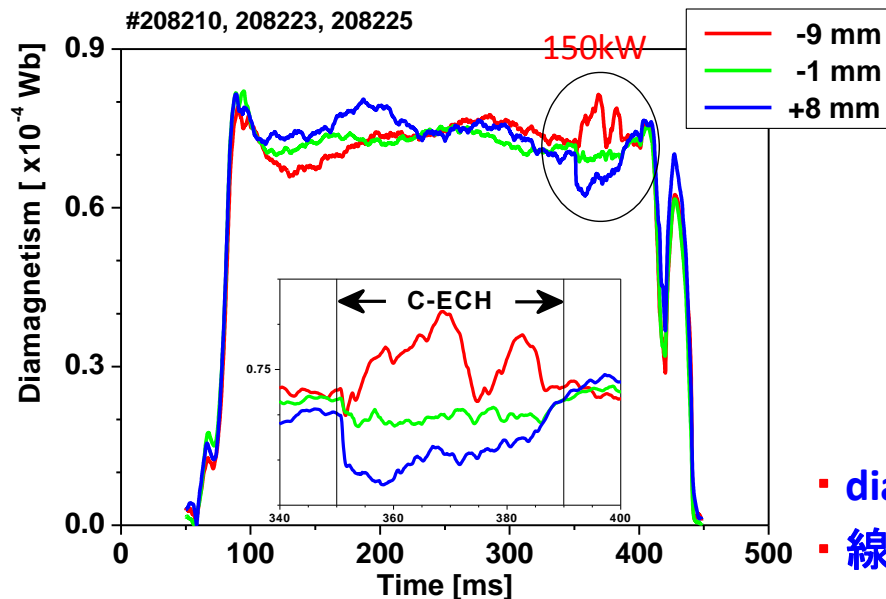


1-W / 28-GHz 低電力試験
良好な位置制御性を確認



M1 height shift [mm]	-12.0	-8.0	-4.0	0.0	+4.0	+8.0	+12.0
Beam shift @ B_{res} [mm]	-6.4	-4.2	-2.1	0.0	+2.1	+4.2	+6.3

垂直方向可動アンテナを用いた実験結果例:

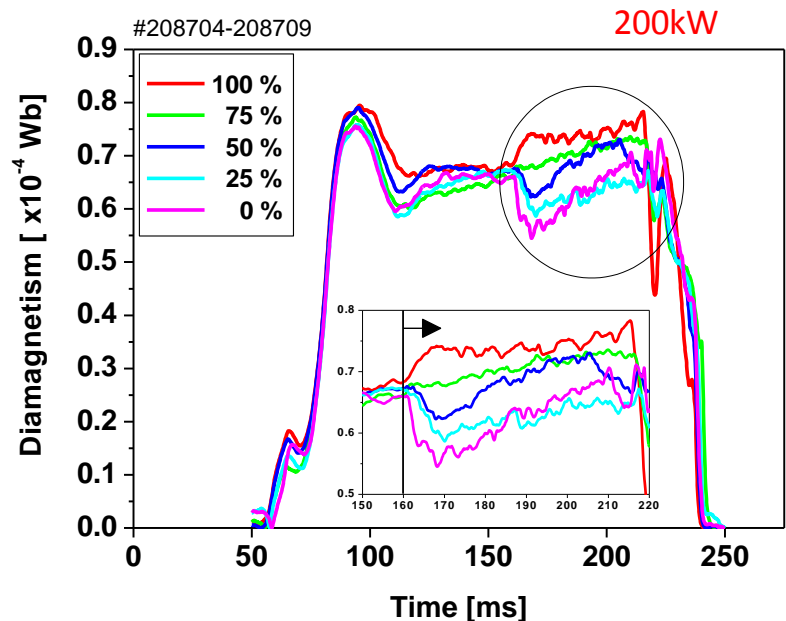


— ECRH 設定 —

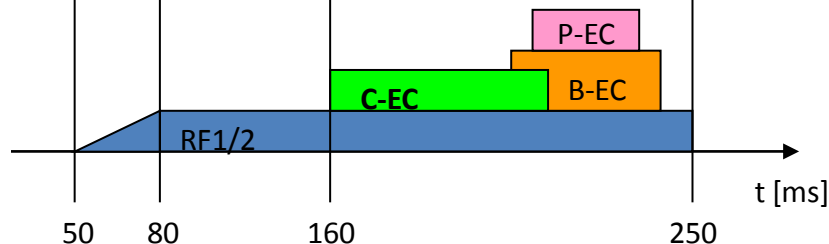
P(B-ECH): 2nd-X @0.5T 150 kW,
 P(P-ECH): 1st-X @1T 300 kW,
 P(C-ECH): 1st-X @1T 100~200 kW 350ms-385ms

アンテナ位置依存性

- diamag値の変化率: -6% → +12%
- 線密度はC-ECH印加により微減



アンテナ実験時のプラズマ維持加熱設定

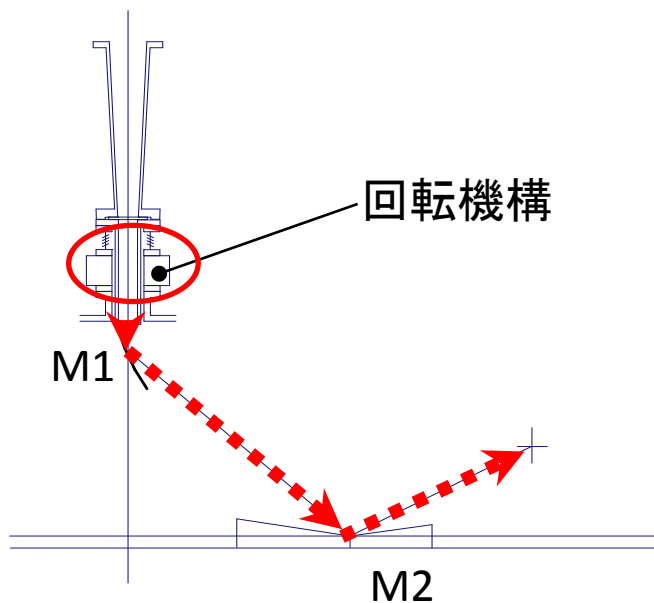


偏波依存性

- diamag値の変化率: -12% → +12%
- X-mode 100% 設定により安定な上昇、維持が可能
- 線密度はC-ECH印加により微減

水平方向可変アンテナ

低電力試験により、
入射方向の可変化性能を評価

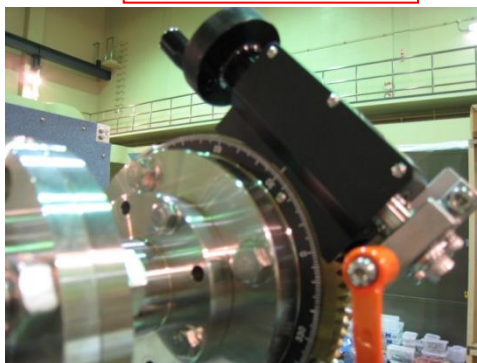


北野精機: KRP-114 を改良



+30° ~ -30° の角度可変性能

角度設定部

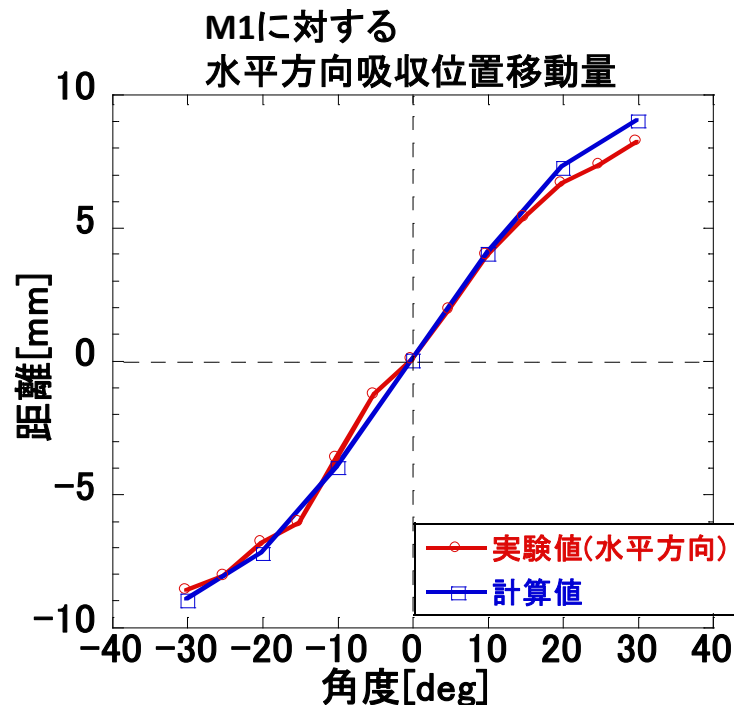
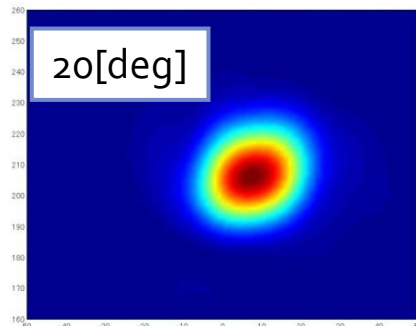
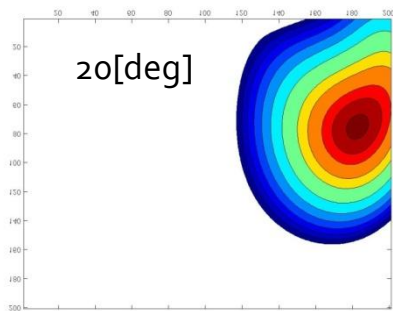


底面

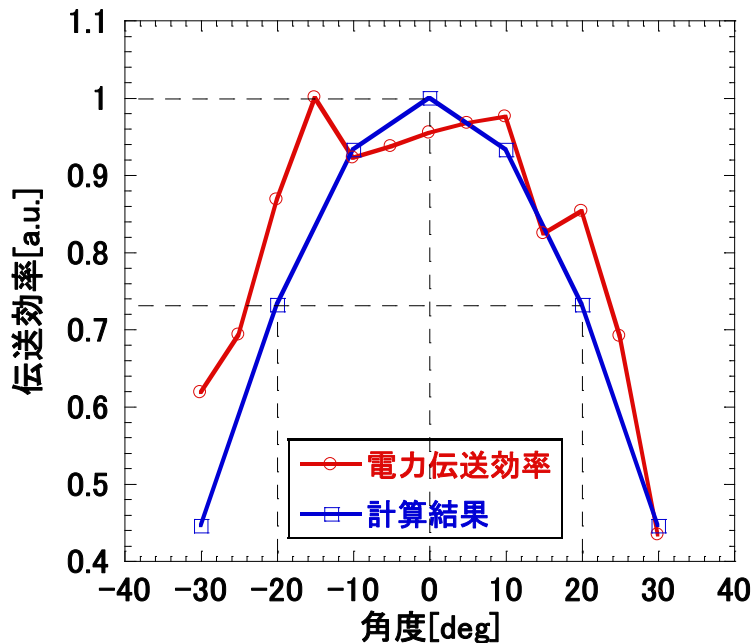


入射角可変化性能: 低パワー試験結果と計算結果の比較

計算結果: 最終ミラーM2(縁はpower 1/e)、
共鳴層位置でのパワー分布



電力密度の水平位置依存性

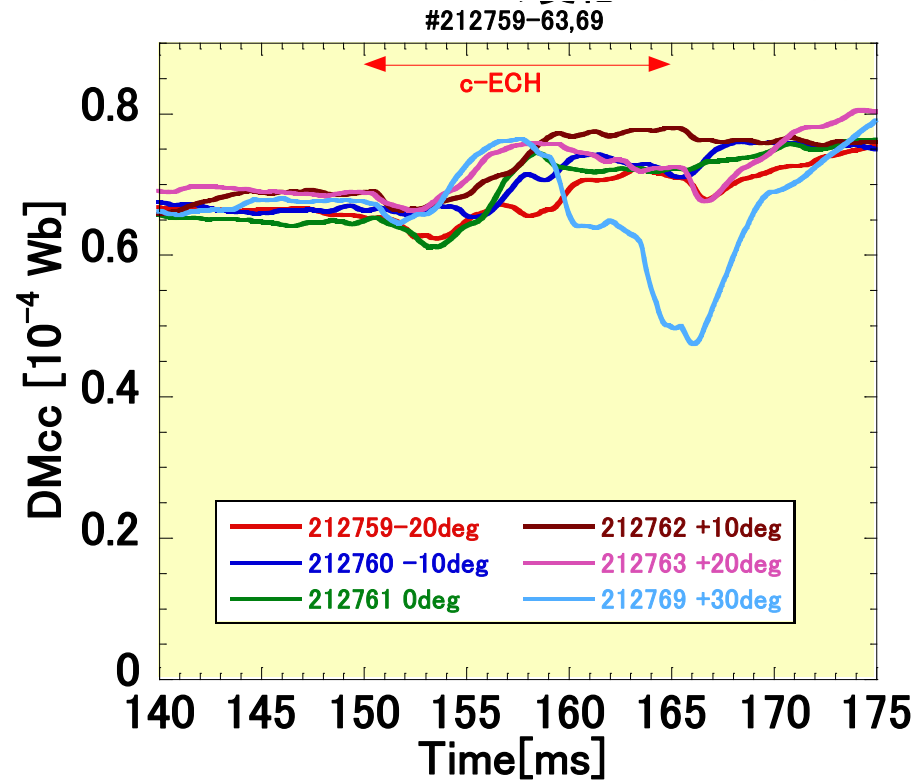


- 低パワー試験により、
入射方向の可変化性能を評価
- 高信頼性、高設定精度を確認
- $\pm 20^\circ$ の範囲内では最終ミラーM2による
70%以上の伝送効率、7mm程度の移動量

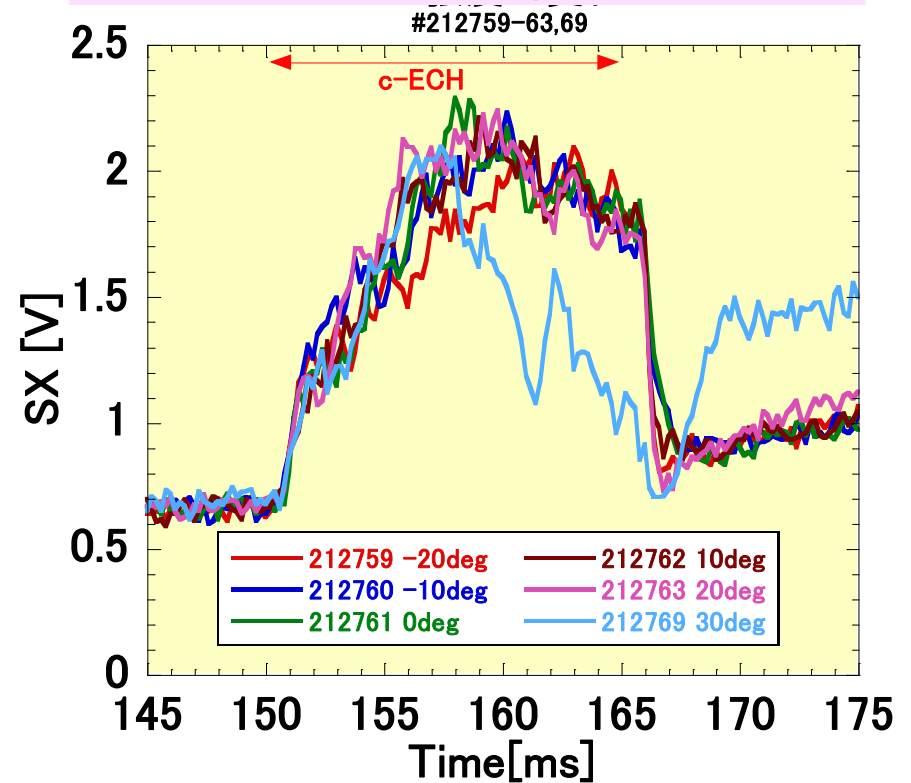
水平方向可動アンテナを用いた実験結果:

~DM,SX時間変化~

アンテナ水平位置スキャン
C-ECH時の蓄積エネルギー(DMcc)の変化



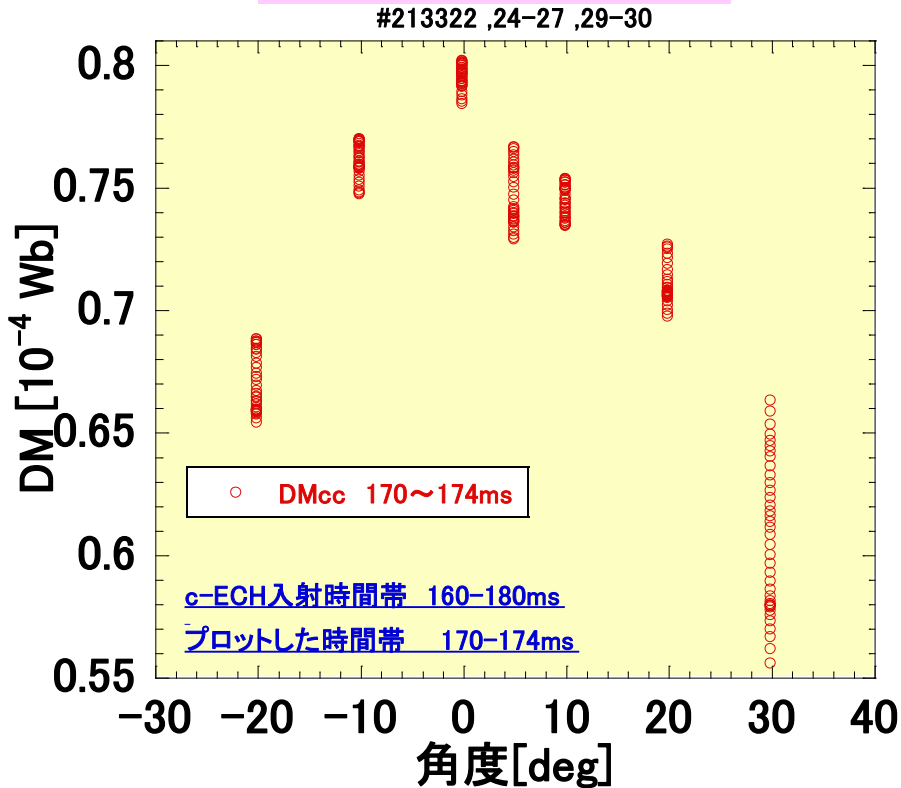
アンテナ水平位置スキャン
C-ECH時の中心(x=0)SX強度の変化



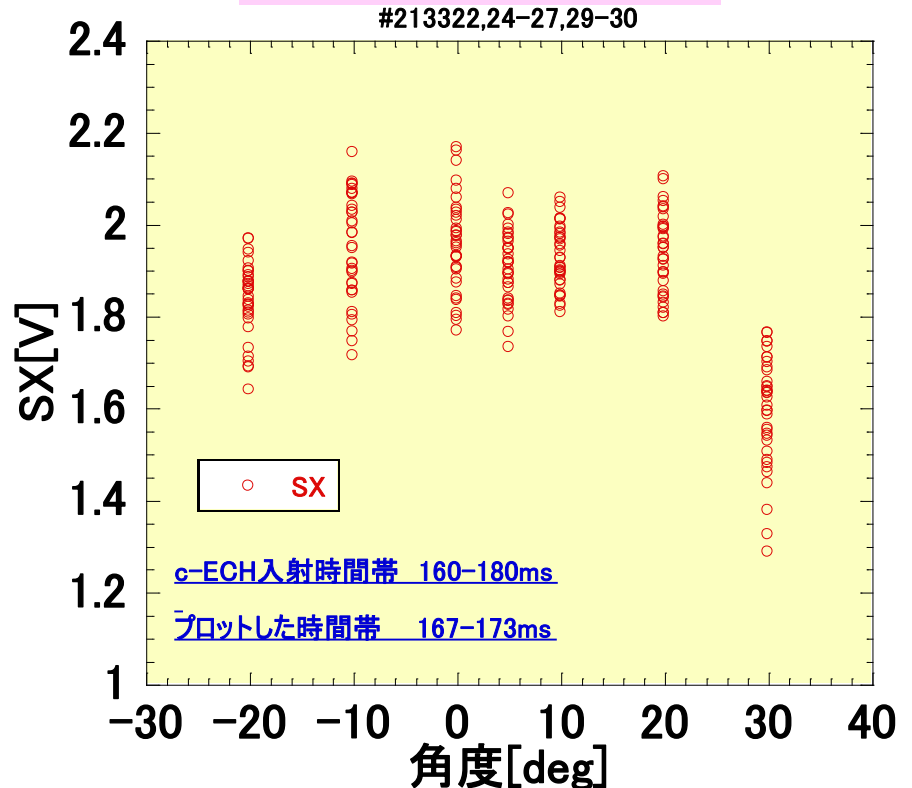
DMcc増加維持時間から
-10~+10° が良好な特性を持つことがわかる

~DM,SX水平吸収位置依存性~

C-ECH時の蓄積エネルギー(DMcc)の
水平吸収位置依存



C-ECH時の中心(x=0)SX強度の
水平吸収位置依存



アンテナ角度に対する蓄積エネルギー(DMcc)とSX信号の変化から**角度0°** 近辺が最適と判断できる

Xモード割合を変えたときの実験結果:

~軟X線強度積分量(IsxL)~

セントラル部ECRH基本設定

入射時間:160-180 [ms] 偏波 X-mode:100 [%]

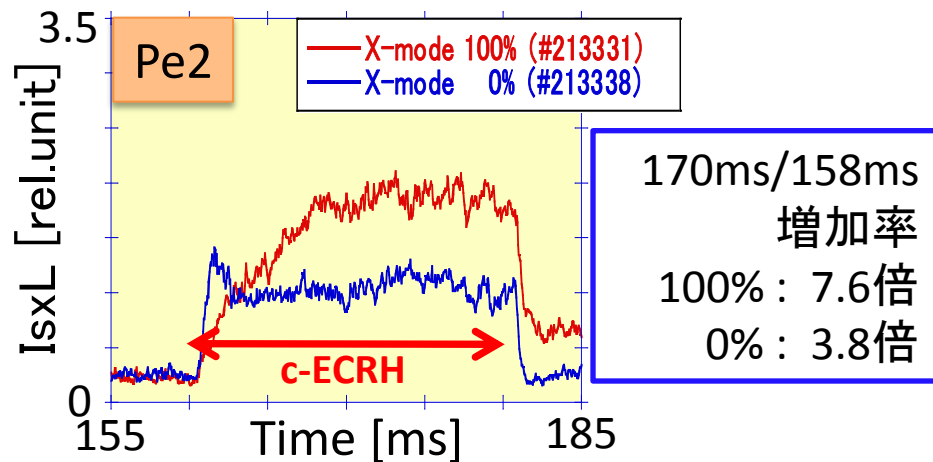
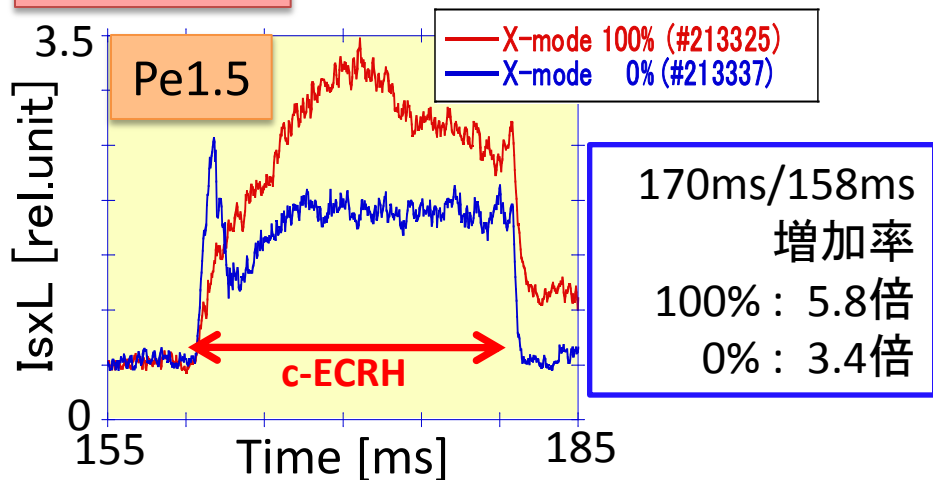


比較

X-mode:100 [%] 吸収が良い

0 [%] 吸収が悪い

時間変化



信号比(Pe2/Pe1.5)

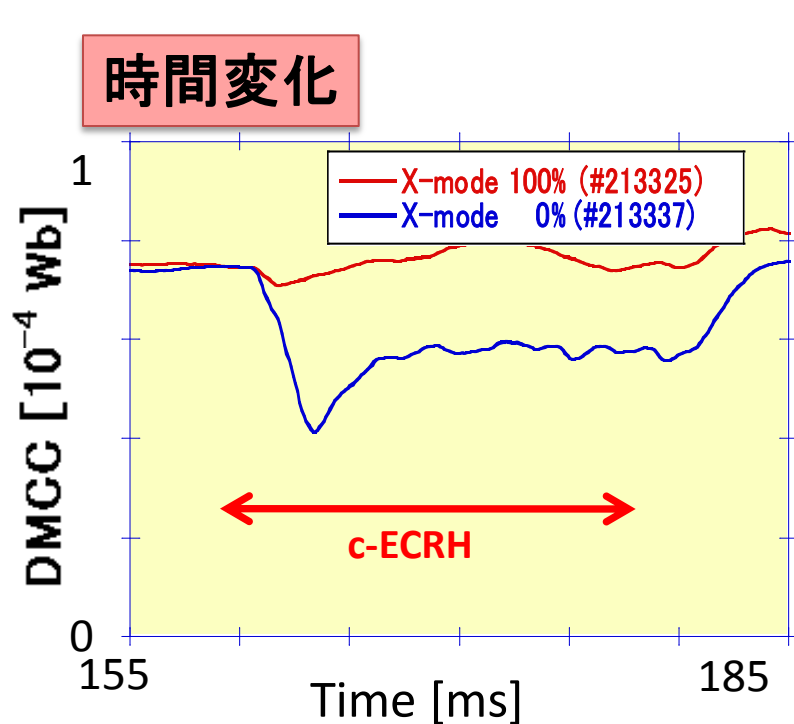
158ms → 170ms

100%: 0.43 → 0.56

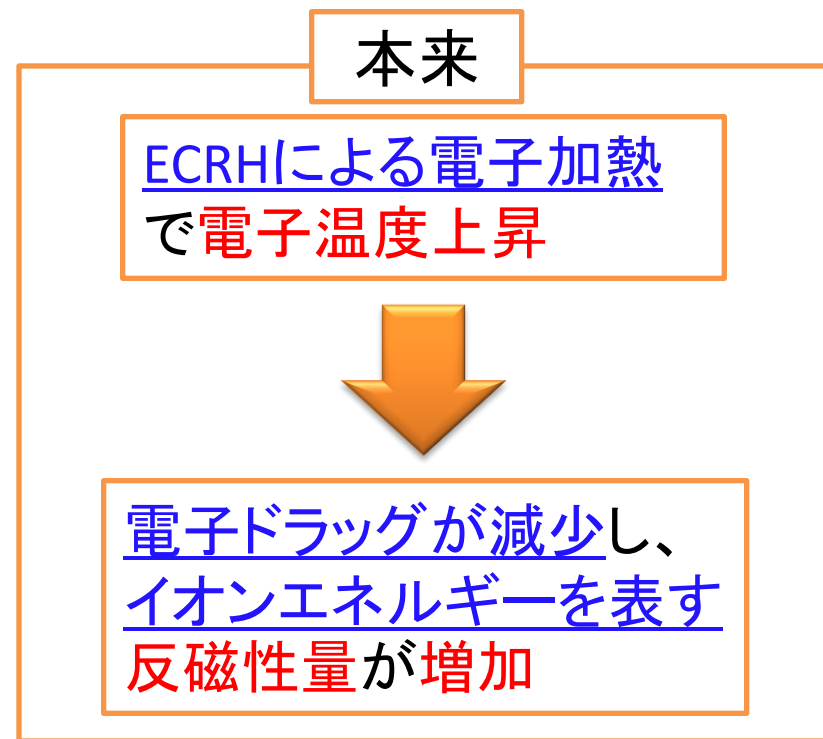
0%: 0.47 → 0.52

X-mode 100%,0%共に、ECRHによって電子加熱が行われ、**電子温度が上昇**している。
基本設定である100%の方が効率よく電子加熱が行われている。

~反磁性量(DMCC)~



170ms/158ms
増加率
100% : 1.05倍
0% : 0.78倍

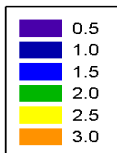


0%では、電子温度上昇にも関わらず、逆に反磁性量(イオンエネルギー)が減少

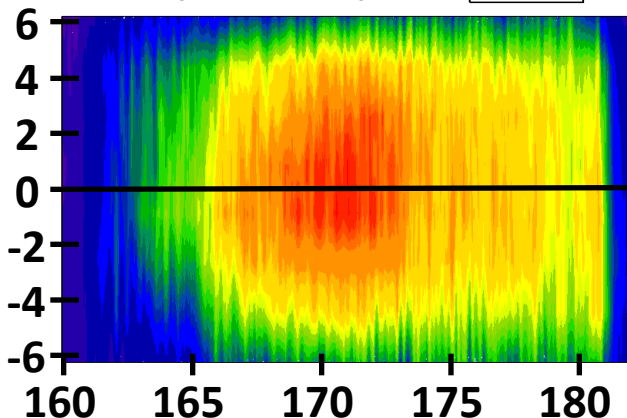
~軟X線強度積分量(IsxL)~

径方向分布

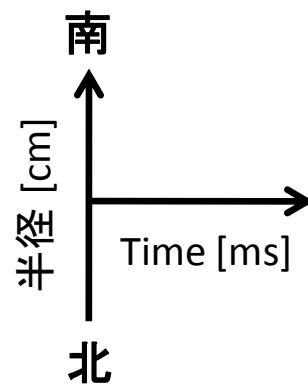
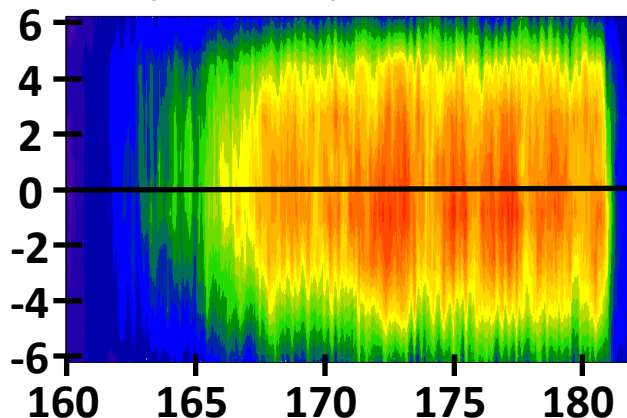
X-mode 100%



Pe1.5(#213325)

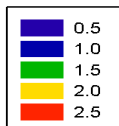


Pe2(#213331)

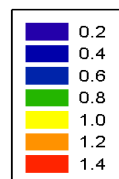
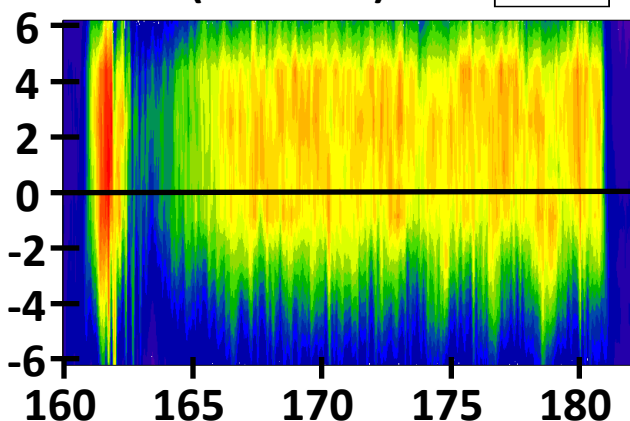


基本設定の
X-mode 100%では、
Pe1.5, 2共に
ほぼ軸対称な分布

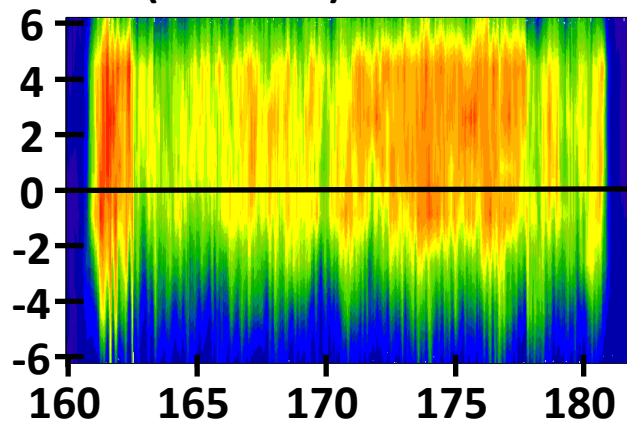
X-mode 0%



Pe1.5(#213337)



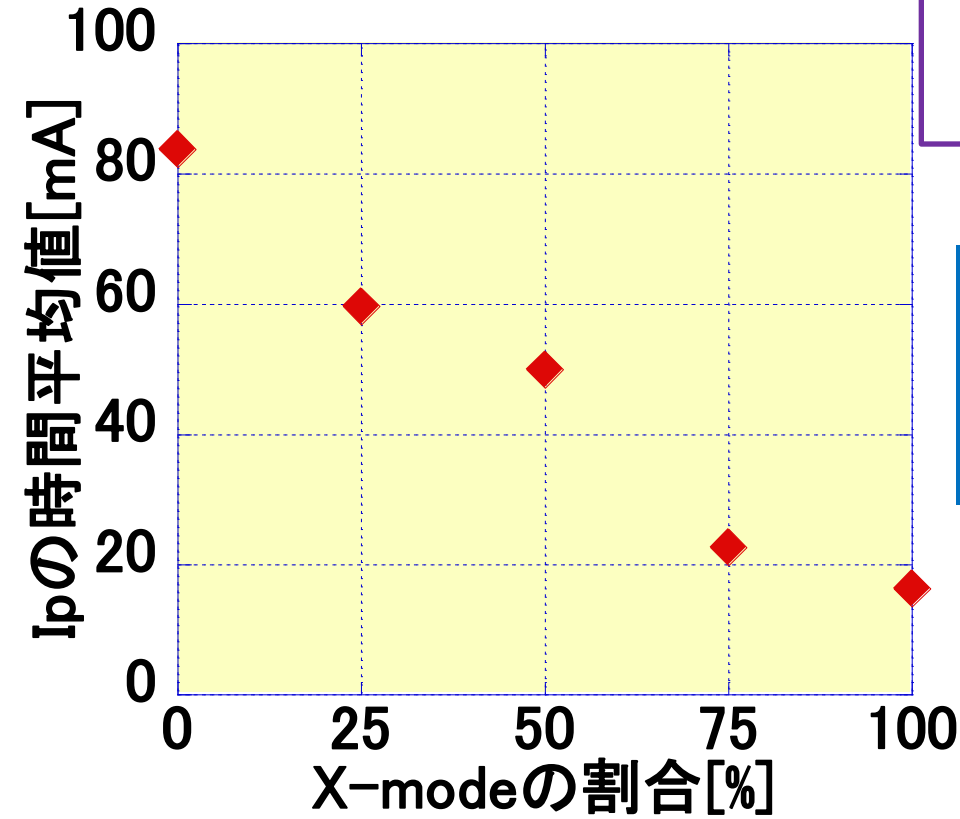
Pe2(#213338)



X-mode 0%では、
Pe1.5, 2共に
南側に寄った分布

~イオンの径方向拡散~

イオン電流 I_p のECRH印加時間平均のX-mode割合依存性



ISP(イオンセンシティブプローブ)

プラズマの中心軸から20.9cmの径方向位置に設置。電子とイオンのラーモア半径差を利用し、比較的能量の高いイオンの量を測っている装置。

X-modeの割合が低くなると、プラズマ周辺部に流れるイオン電流量は増えていく。



プラズマ周辺部にイオンが損失してきている

まとめと今後の展開

- 電子温度の増大と非等方性の改善、また、実験の自由度の増大を目標に、GAMMA 10装置セントラル部ECRHアンテナの特性向上を目指した
- 垂直方向の実験的最適化による結果を用い、さらなる実験的最適化を図った
- 水平可動アンテナは低パワー試験から $-20^\circ \sim +20^\circ$ の角度(プラズマ径比で $\rho > \sim 0.03$ の吸収位置)での可動範囲性能を持つ(垂直方向の可変性性能と同等以上)
- アンテナ角度変え実験の結果から、角度 0° (設計軸中心)に対して、
 - 1) 蓄積エネルギー/SX信号の強度の変化から $-10^\circ \sim +10^\circ$ では大きな差はみられなかった
 - 2) 角度依存の対称性から、**最適な水平位置は 0°** ($X=0$ の軸上を狙ったマイクロ波ビーム軌道)であることがわかった
- 偏波を変えた実験の結果から、
 - 1) Xモード100%入射が最適であることがわかった
 - 2) SXの分布やISPの増大から、ECRHの**非軸対称な電子加熱やイオンの径方向拡散**が起きていることがわかった

今後の展開

- トムソン散乱によるTe計測などとあわせて解析を進める。
- 第1ミラーM1の伝送効率向上、最終ミラーM2後のビーム集束度についてさらなる最適化設計を進める
- 非軸対称な電子加熱の原因究明のため、電位分布や密度分布などの詳しい測定を行う