

GAMMA10極小磁場アンカー一部におけるICRF加熱に関する研究

研究背景・目的

GAMMA10におけるICRF加熱

極小磁場アンカー一部アンテナ

実験

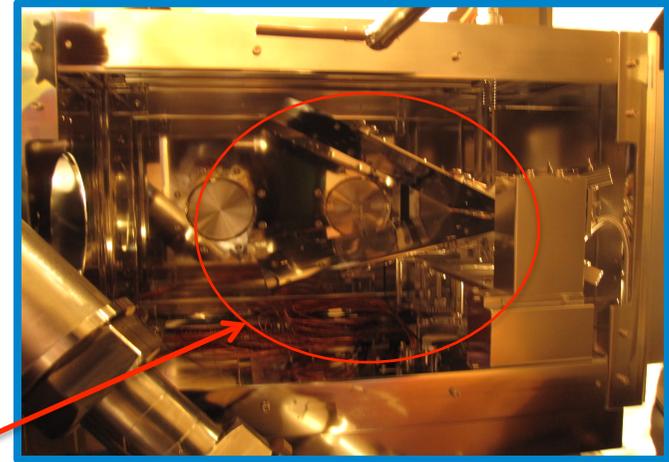
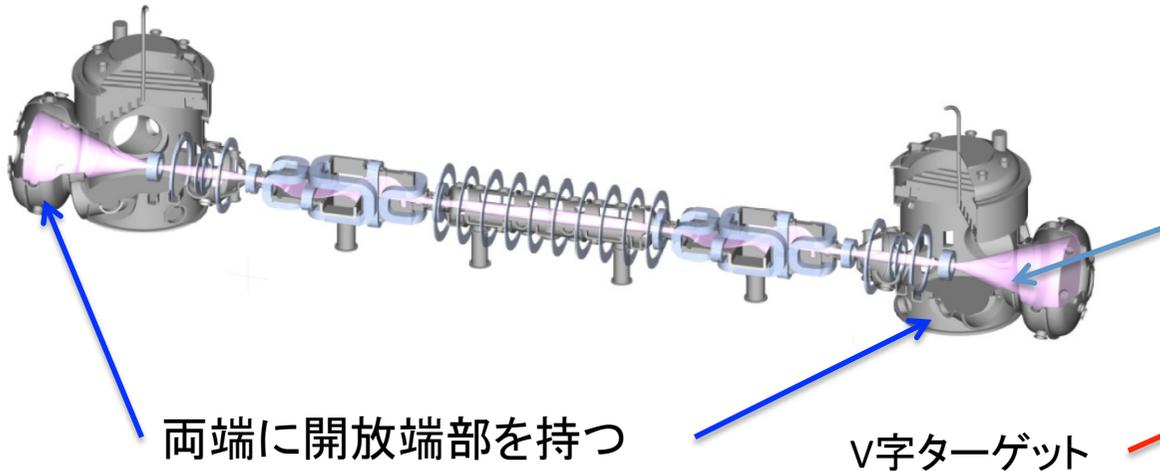
まとめ

第16回 若手科学者によるプラズマ研究会
プラズマ輸送・閉じ込め物理の総合的理解に向けた予測・検証手法の進展
2013.03.04-06 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

横山拓郎, 市村真, 池添竜也, 平田真史, 福山淳¹, 宇賀神ゆめと
齋藤裕希, 佐藤達典, 飯村拓真, 今井剛, GAMMA10 team
筑波大学・プラズマ研究センター
京都大学 工学研究科原子力工学専攻¹

研究背景・目的

西側開放端に導入されたダイバータモジュール



境界プラズマ模擬によるダイバータプラズマ輸送制御

E-divertor:

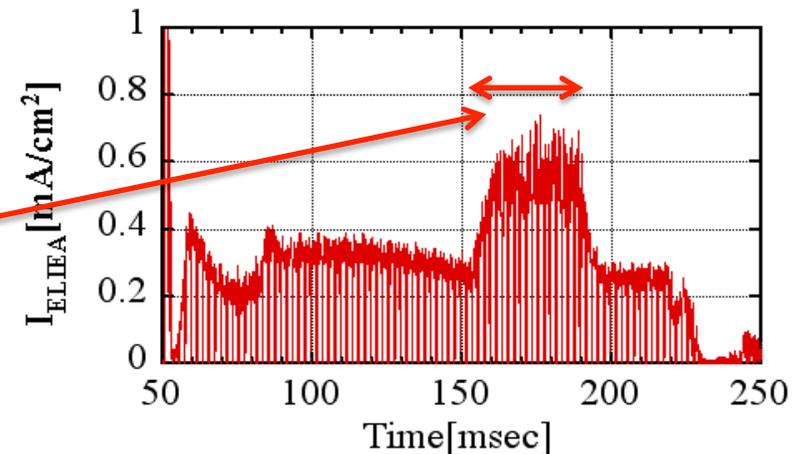
開放端部に昇降式のダイバータモジュールが導入され、端損失熱流束・粒子束を活用した研究が進められている。

他のダイバータシュミレータと比較した特徴

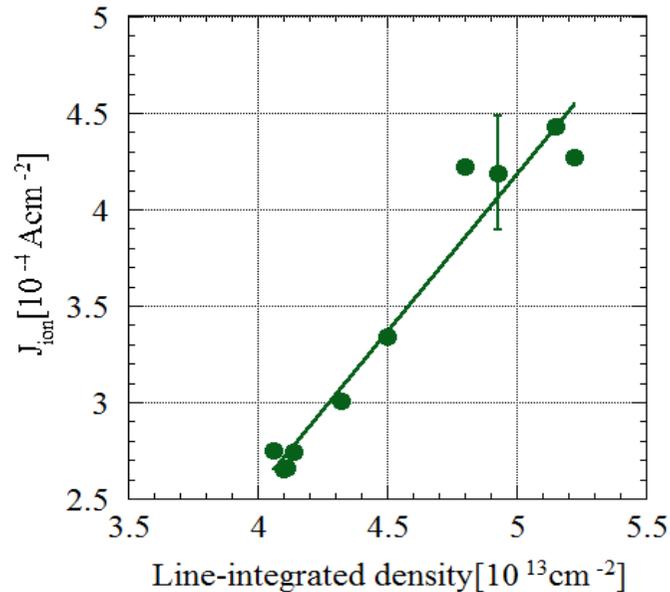
- ・高いイオン温度
- ・強磁場

極小磁場部ICRF加熱

加熱方法により高い端損失粒子束を得られる。

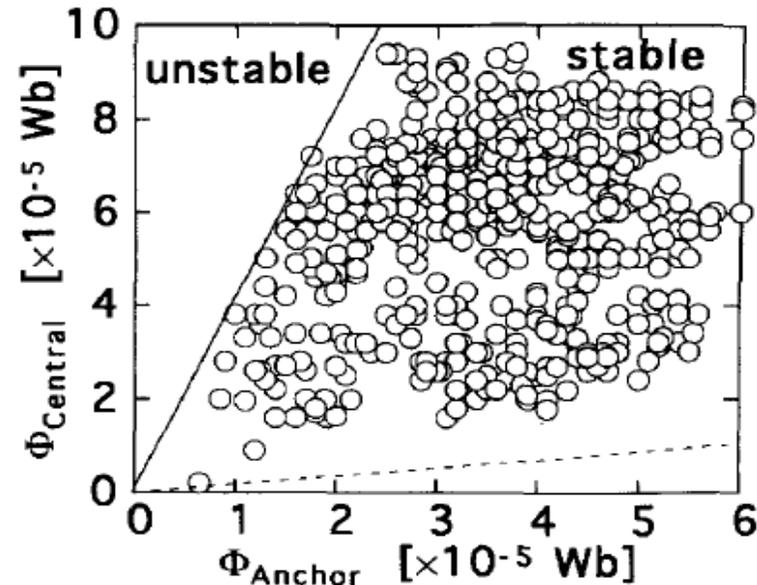


研究背景・目的



端損失イオン流と密度の関係

主閉じ込め部により高い密度が必要であることがわかる。



主閉じ込め部と極小磁場部の関係

GAMMA10において、高ベータプラズマを生成するためには、極小磁場部にも高ベータが必要となる。

ダイバータ模擬実験において、プラズマ高密度化、パラメータ制御性の向上が求められている。ICRFの観点から、極小磁場アンカー部の加熱強化を目的とした。

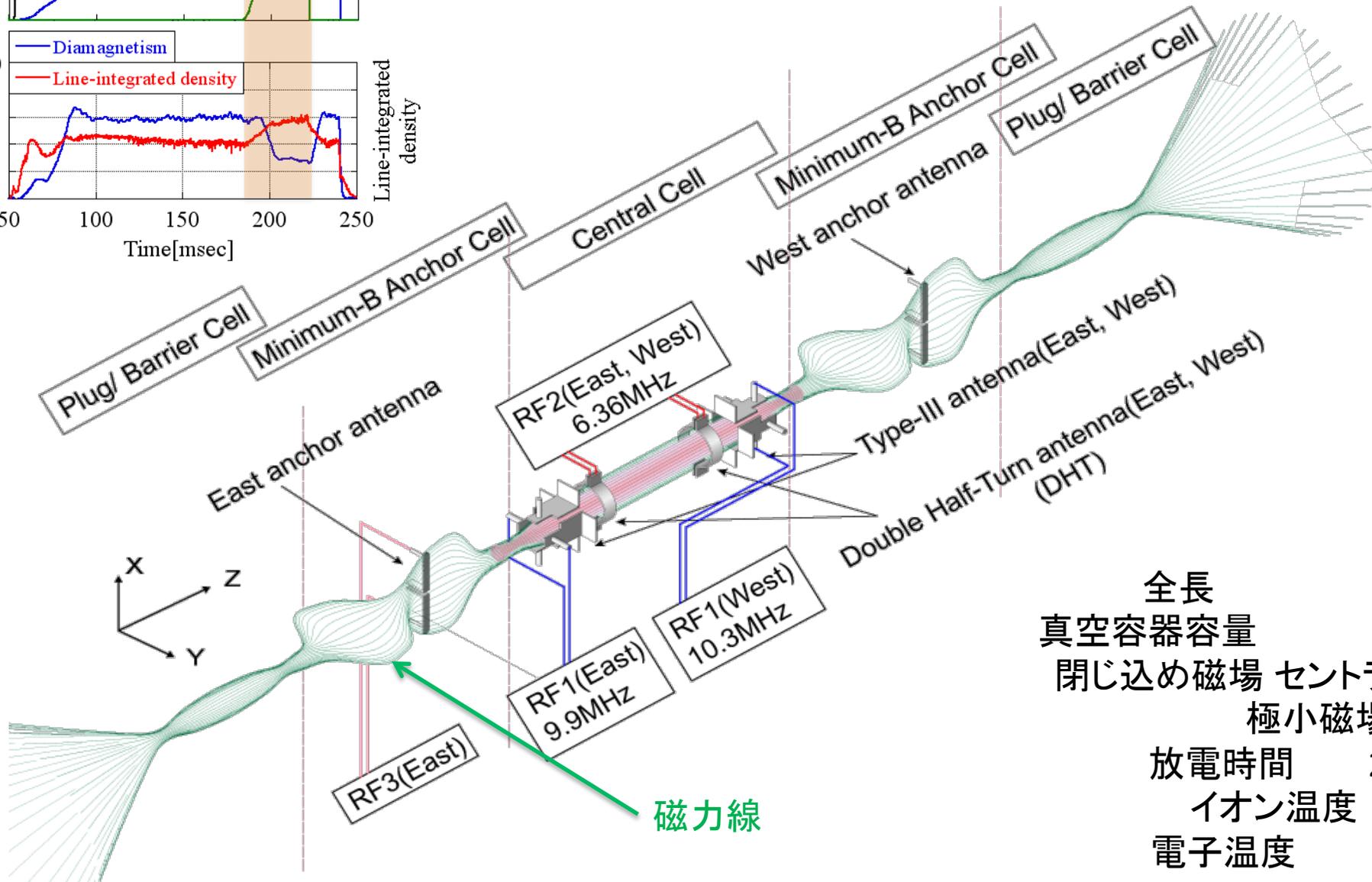
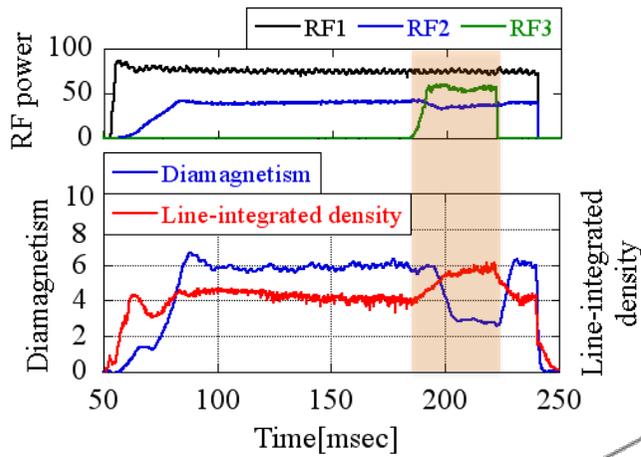
I. 極小磁場アンカー部加熱強化のためのアンテナ改造

- 3次元波動伝搬コード(TASK/WF:京都大学福山先生開発)による評価
- 実験による評価

II. 複数のアンテナを用いた極小磁場部加熱実験

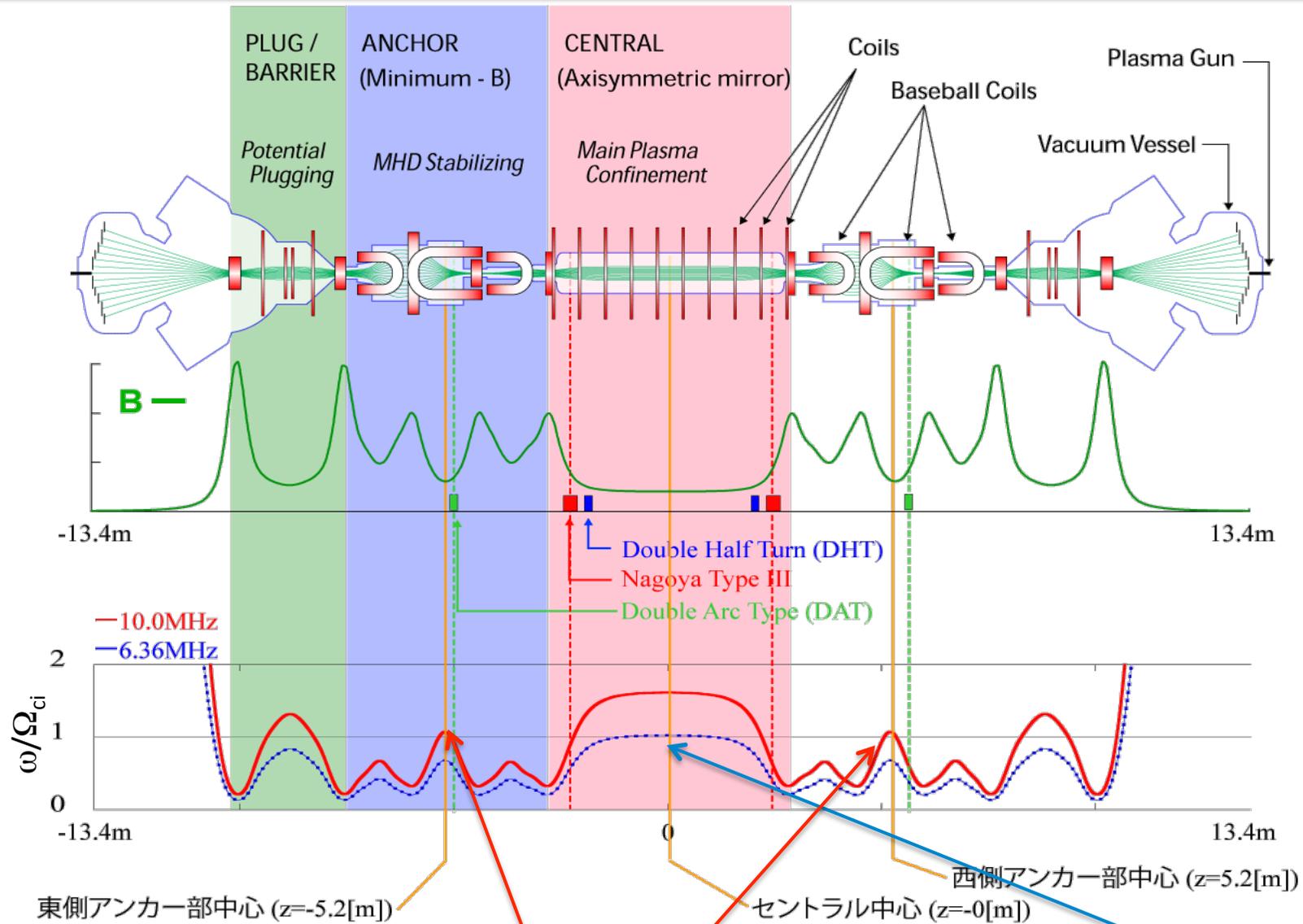
- 共鳴層とアンテナの位置関係の異なる東西アンカー部を用いた実験

GAMMA10



全長	27m
真空容器容量	150m ³
閉じ込め磁場	セントラル 0.4T
	極小磁場部 0.6T
放電時間	200msec
イオン温度	数keV
電子温度	~100eV

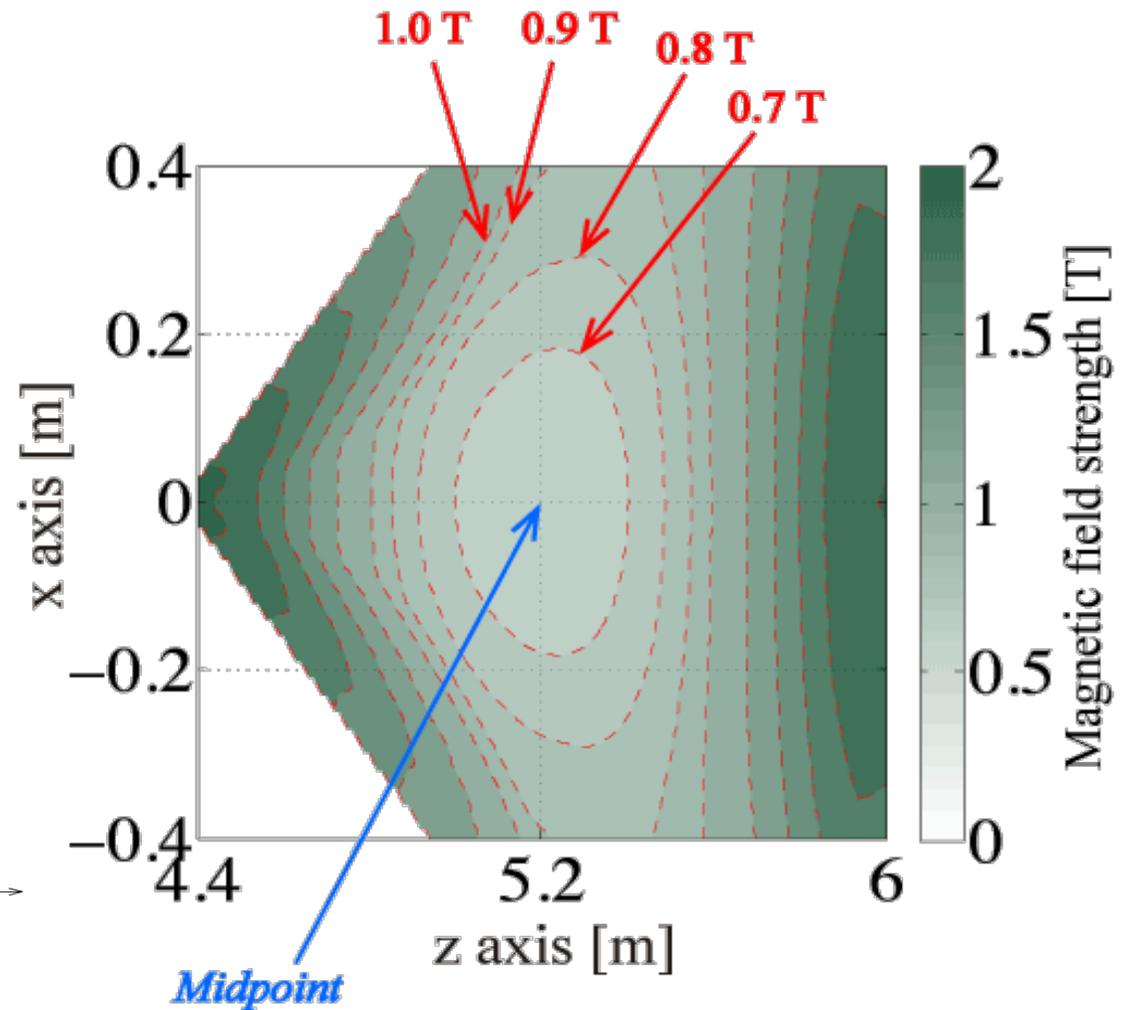
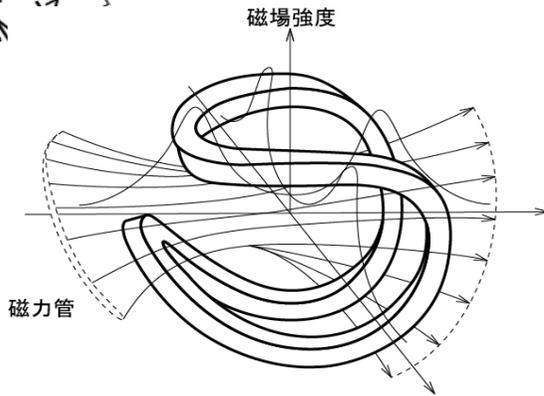
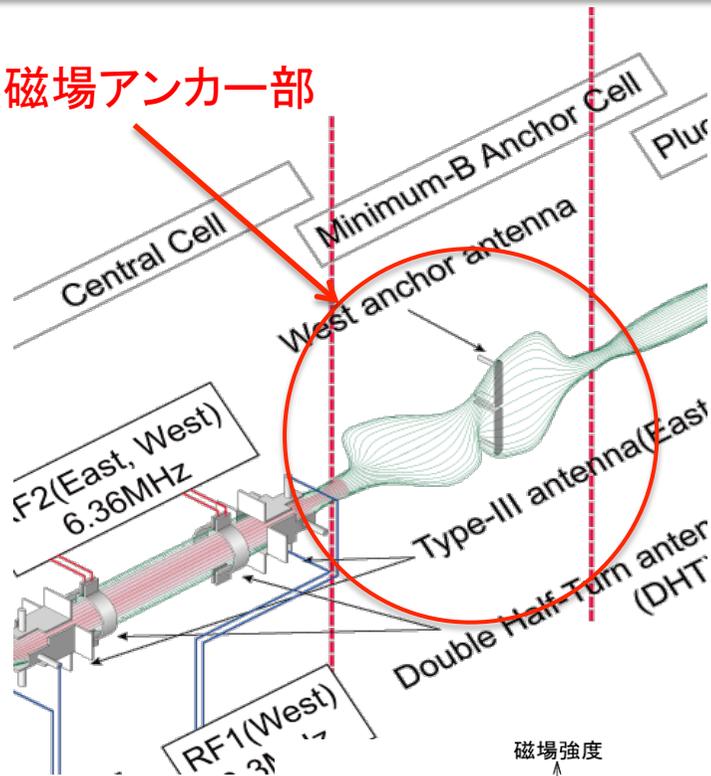
GAMMA10におけるICRF加熱



極小磁場アンカー部に共鳴層を持つ10MHz付近, セントラル部に共鳴層を持つ6.36MHzを用いて加熱する。

GAMMA10極小磁場アンカー部

極小磁場アンカー部

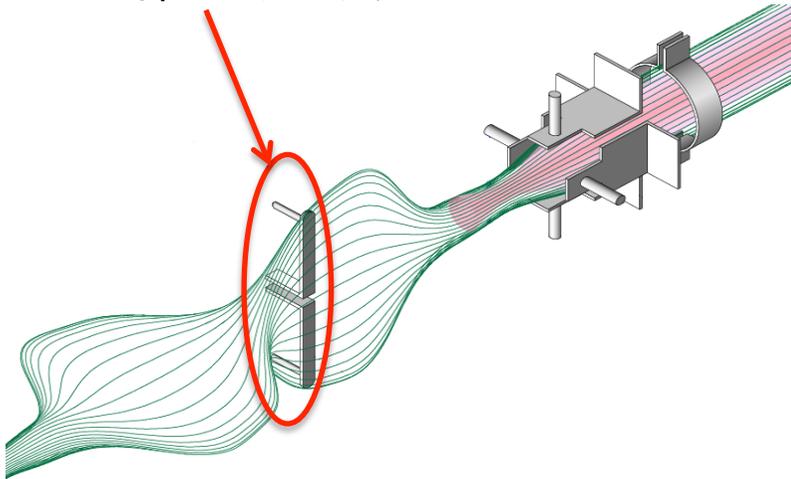


ベースボールコイルで、磁力線曲率が内側に凸になる構造を持つ。
また極小磁場部も、磁場強度分布からミラー磁場になっていることがわかる。

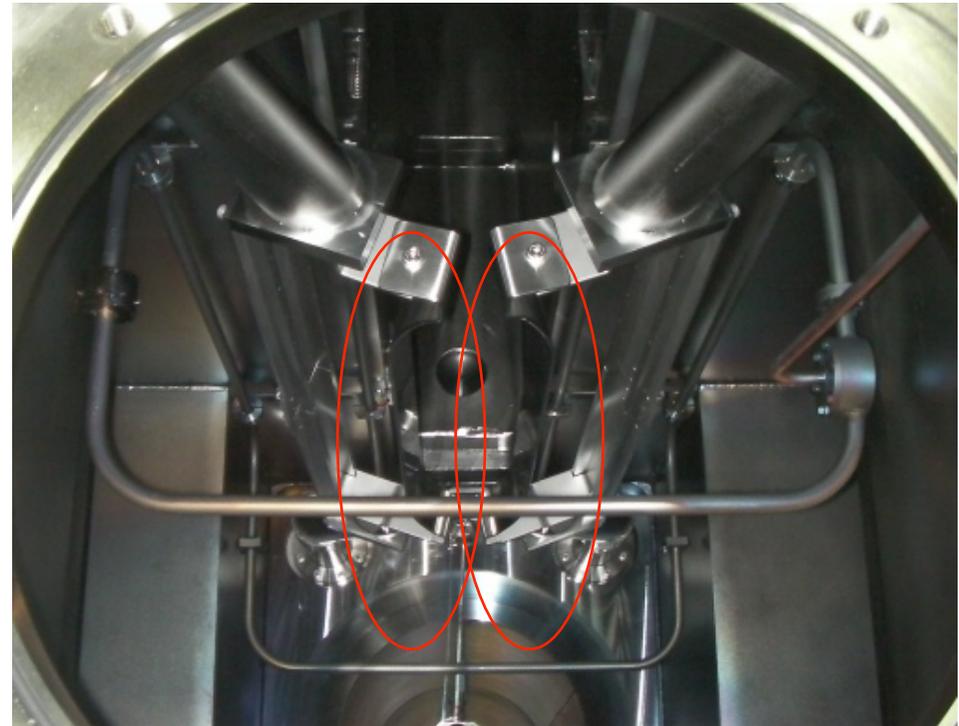
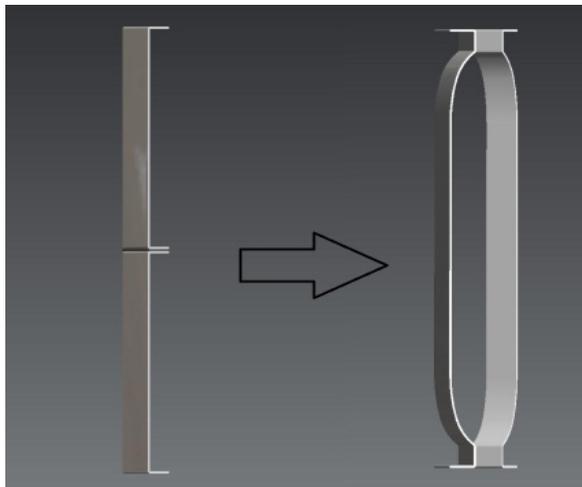
極小磁場アンカー部アンテナ

アンカー部加熱強化のため、東西アンカー部アンテナを直線型アンテナから楕円弧状アンテナに変更した。

アンカー部ICRFアンテナ



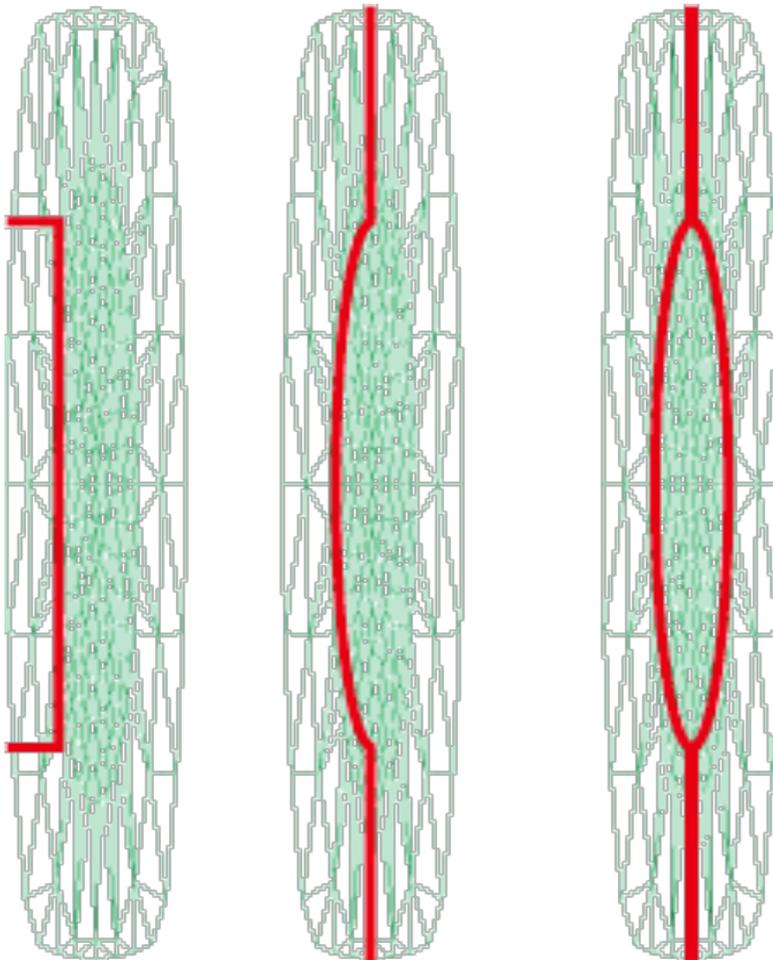
東西ともに直線型アンテナから
DATアンテナに変更



導入した楕円弧状アンテナ(DATアンテナ)を、
計算・実験それぞれの手法により評価を行う。

3次元波動伝搬コードによる評価

3次元空間で波動を計算できるコードを用いて、磁場構造が複雑なアンカー部に設置されているアンテナについて計算を行う。



TASK/WF: マクスウェル方程式を解くコード
(京都大学 福山先生が開発)
計算方法: 3次元有限要素法

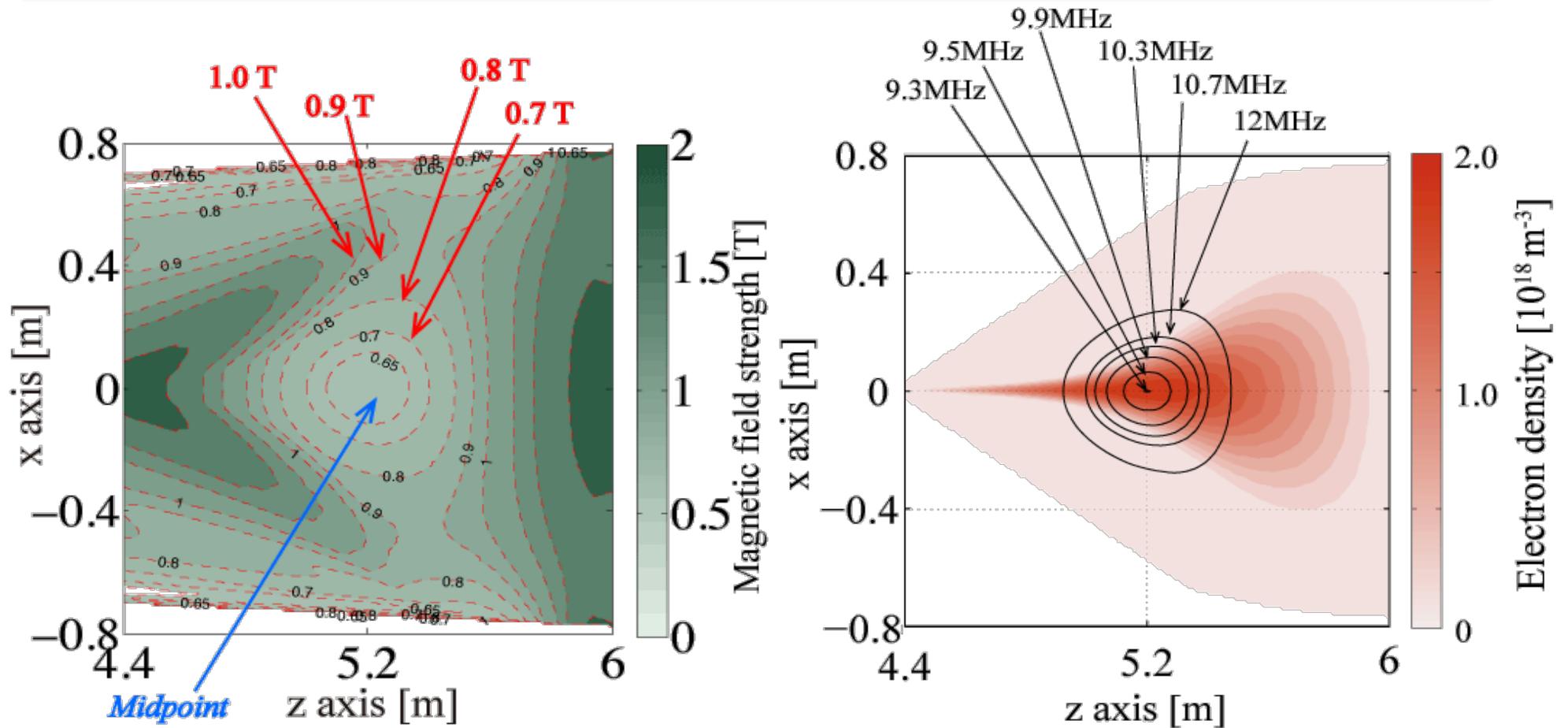
計算範囲: $z = 4.4 \sim 6.0$ [m]
 $x, y: R_{cc} = \sim 0.50$ [m]
アンテナ半径: $R_{cc} = 0.20$ [m]
中心密度: $1.0, 2.0 \times 10^{18}$ [m⁻³]
周辺密度: 1.0×10^{17} [m⁻³]
アンテナ電流密度: 5.0 [A / m]
アンテナ設置位置: $z = 5.475$ [m]

形状による効果を検討するため、

- ・直線型アンテナ
- ・片側楕円弧状アンテナ
- ・楕円弧状アンテナ (DATアンテナ)

ただしDATアンテナは、2つの素片合わせてアンテナ電流の設定となっている。

3次元波動伝搬コードによる評価



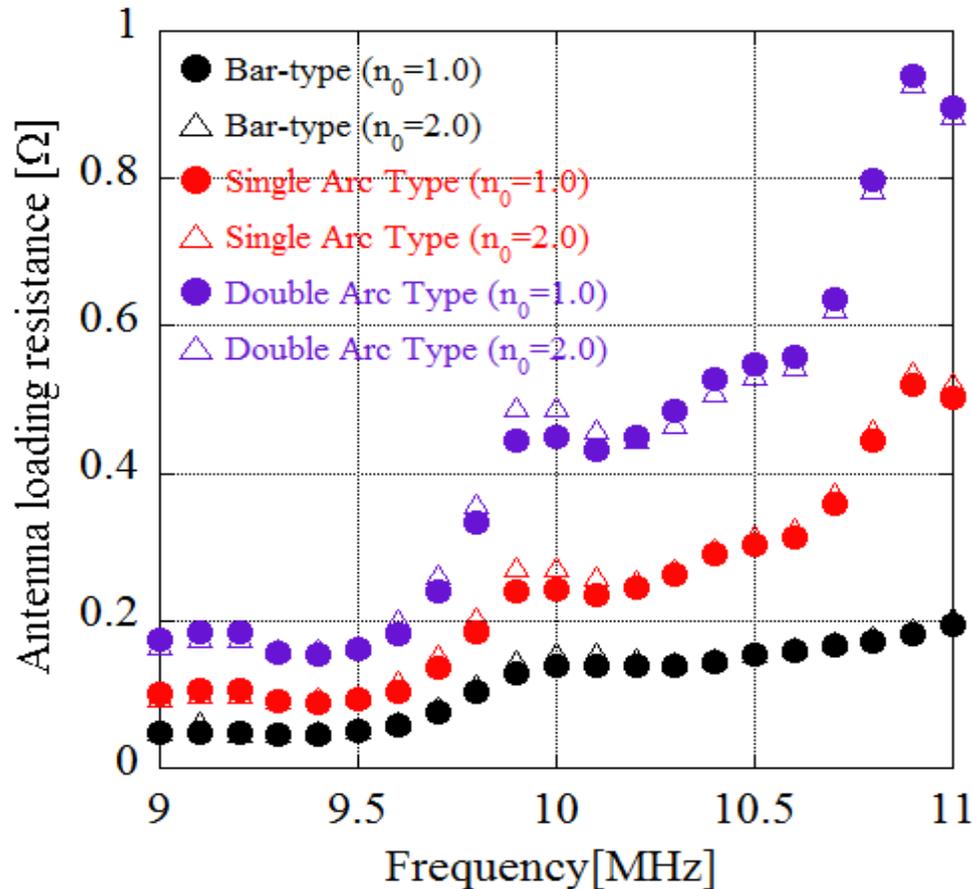
プラズマ密度分布

- 軸方向は $z=5.2\text{m}$ の位置に中心とする
- $z=4.4, 6.0\text{m}$ で周辺密度になるように設定した。

磁場配位:0.91PUの設定

GAMMA10実験時に使用している磁場強度を設定した。

3次元波動伝搬コードによる評価



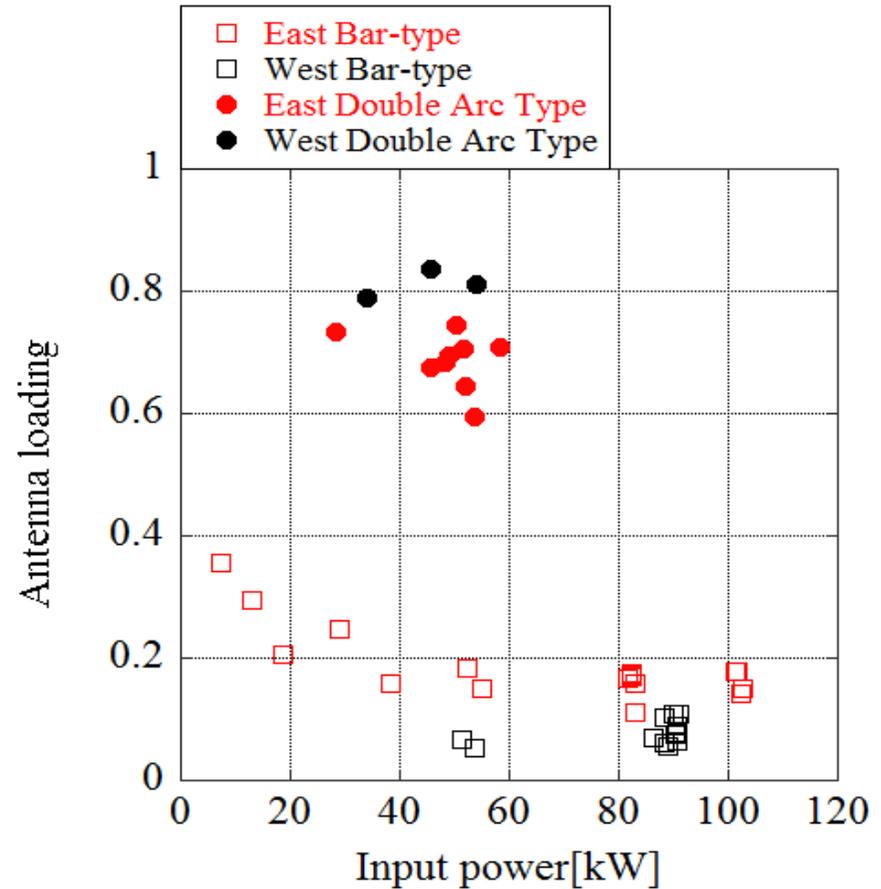
- 直線型アンテナからDATアンテナにすることにより3倍程度放射効率の改善が示唆される。(10MHz付近)
- 片側楕円弧にすることにより, 2倍程度の改善となることから, 形状変更による効果があることがわかる。
- 形状変更, アンテナ面積の増大により放射効率が改善している。
- 中心密度による効果は, 今回の計算条件範囲では小さかった。

実験による評価

RF1・RF2で生成したプラズマに、アンカー部アンテナから高周波電流を印加することにより効果を確認する。

9.7MHzを用いた実験を行った。

グラフの横軸は入射電力，縦軸はアンテナ放射抵抗である。Bar-typeアンテナでは0.2程度の放射抵抗が，DATアンテナに変更することにより0.7程度まで向上していることがわかる。



9.7MHzの高周波を用いた実験では，直線型アンテナ(Bar-type antenna)から，磁力線形状に合わせた形状のアンテナ(Double Arc Type antenna)に変更することにより，放射効率の向上，プラズマパラメータへの影響の増大が確認できた。

GAMMA10におけるICRF加熱実験（位相制御実験）

放電領域拡張のため高周波を干渉させる実験を行う。

アンカー部アンテナ，セントラル部アンテナを用いた積極的な干渉を用いる実験
同一周波数の高周波の位相差を制御することにより，波動の干渉効果を制御する。

- End side

$$\frac{P_E}{P_0} = \frac{R_{RF3}}{R_0} = 1 + \cos(\delta - k_z d)$$

δ : phase difference

k_z : wave number

d : distance between antennas

P_0 : power only one antenna

R : antenna loading

- Central side

$$\frac{P_C}{P_0} = \frac{R_{RF1}}{R_0} = 1 + \cos(\delta + k_z d)$$

- Between antennas

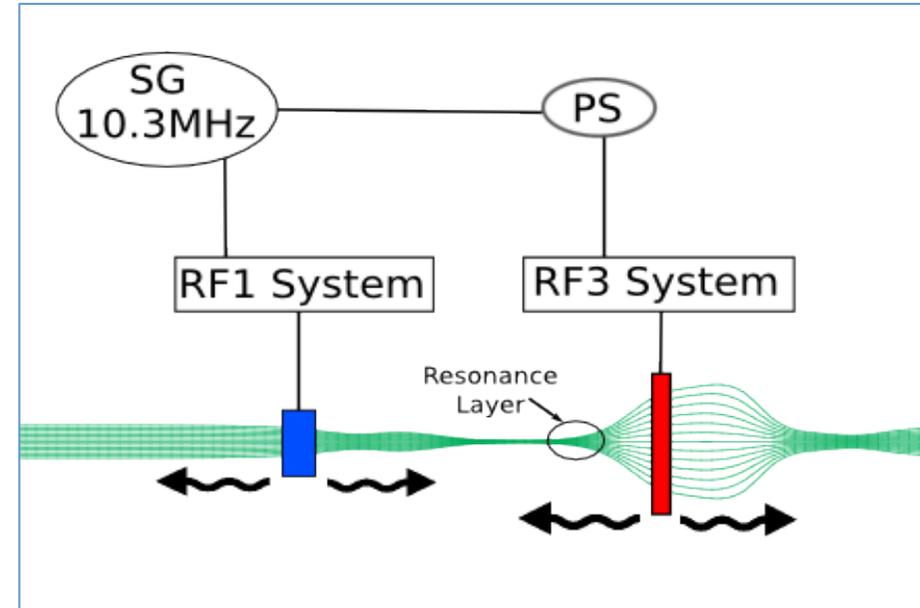
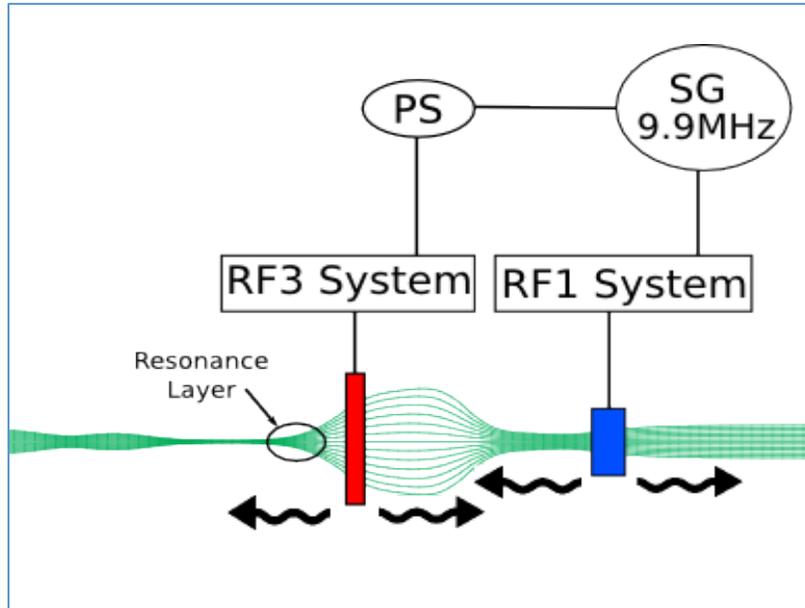
$$\frac{P_{Th}}{P_0} = 1 + \cos\{\delta + k_z (2z - d)\}$$

単純なモデルでは，位相差を操作した高周波を用いることにより，波動が伝搬する方向を制御できることがわかる。

位相制御実験

GAMMA10東側配位

アンカー一部共鳴層・アンカーアンテナ・セントラルアンテナとなる配位



GAMMA10西側配位

セントラルアンテナ・アンカー一部共鳴層・アンカーアンテナとなる配位

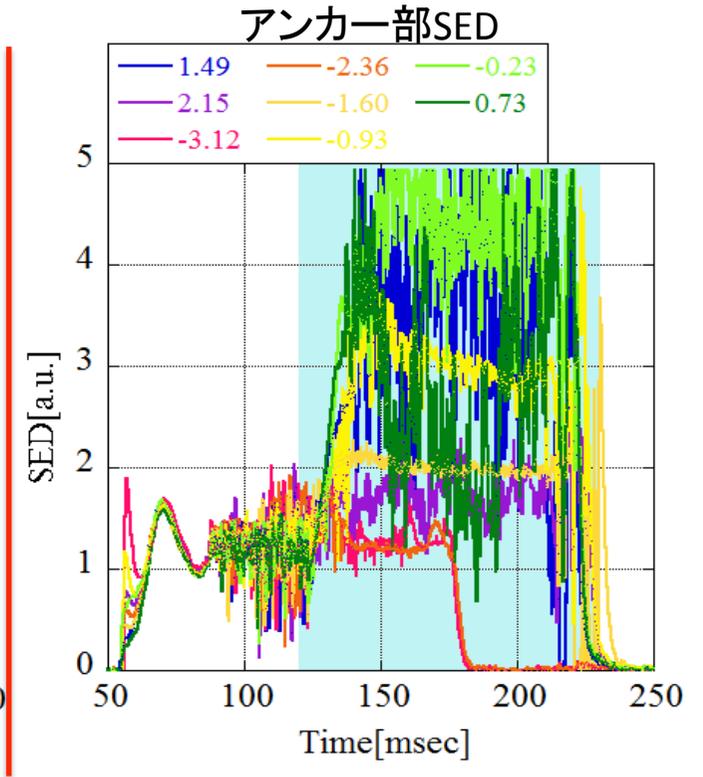
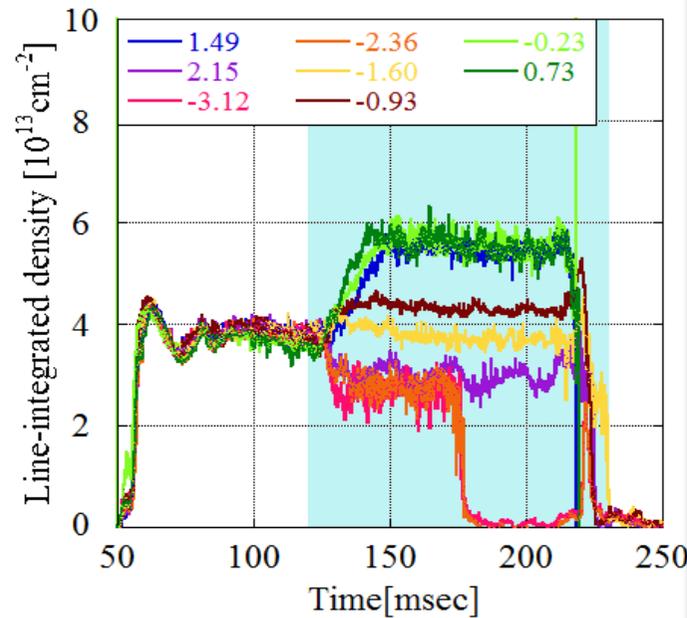
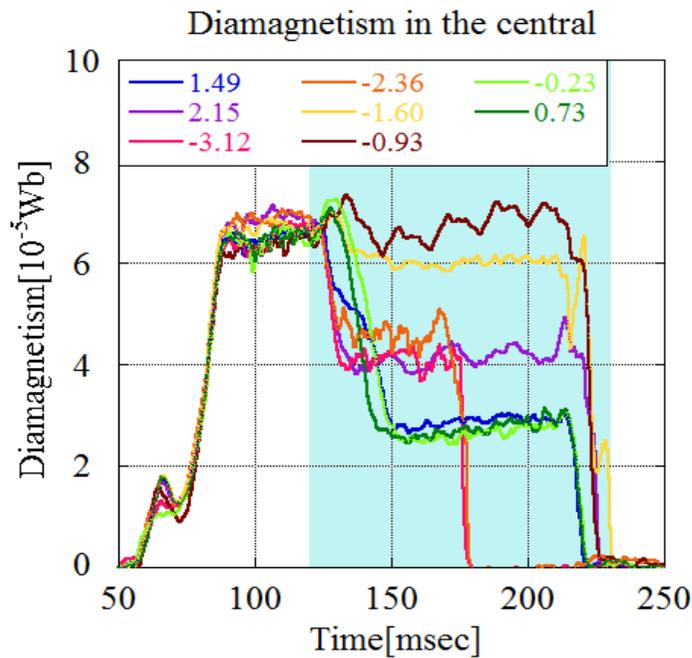
東側・西側の配位を用いて位相制御実験により、複数のアンテナを用いるICRF加熱実験を行った。

位相制御実験（東側）

東側位相制御実験

アンカー一部共鳴層・アンカーアンテナ・セントラルアンテナとなる配位

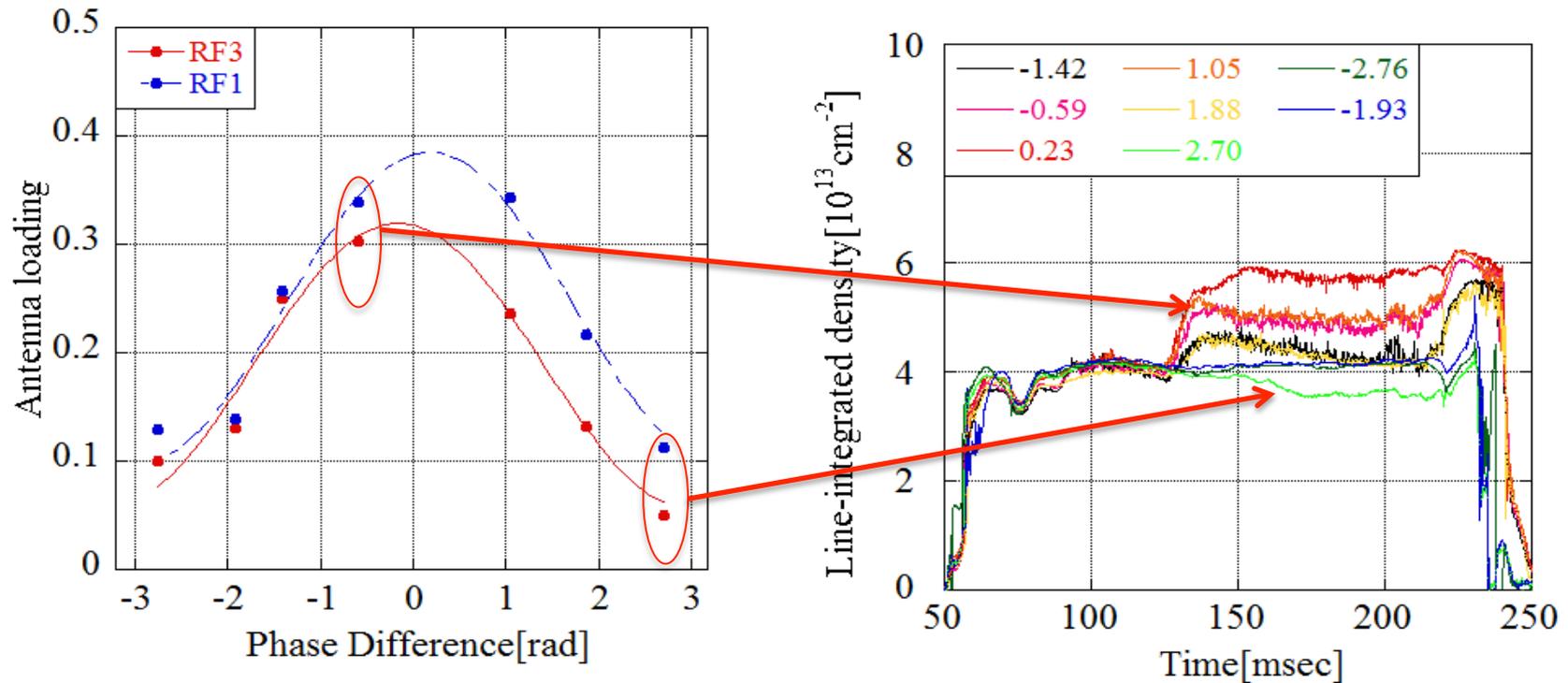
セントラル部反磁性量と電子線積分密度



アンテナ間位相差を操作することにより、セントラル部・アンカー部プラズマパラメーターに位相差による有意な変化がみられる。アンカー部では加熱が行われている。

位相制御実験（東側）

アンカー一部Bar-typeアンテナとセントラル部アンテナを使った実験



放射抵抗が大きくなる時

- アンテナからセントラル側，アンカー側に波動が伝搬されると示唆される。
セントラル部では密度上昇が強く行われている。

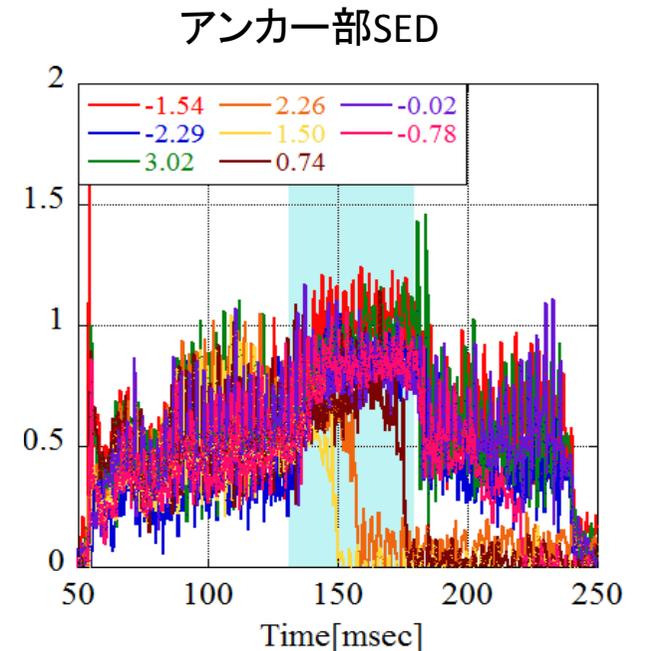
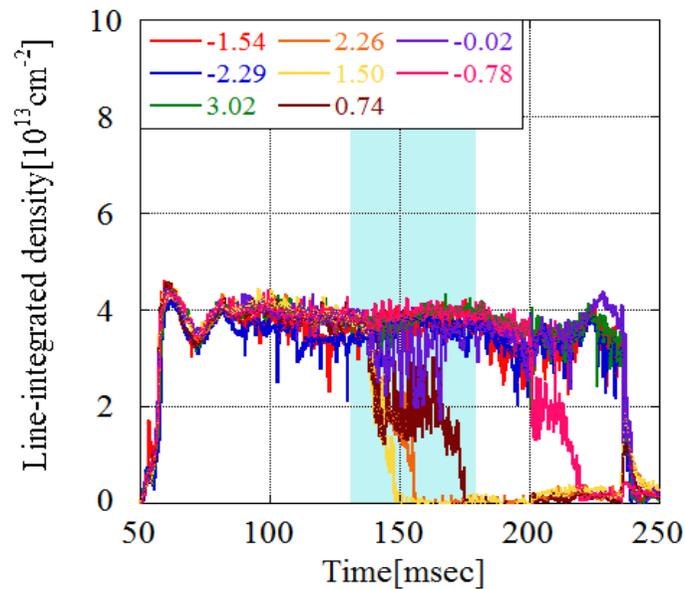
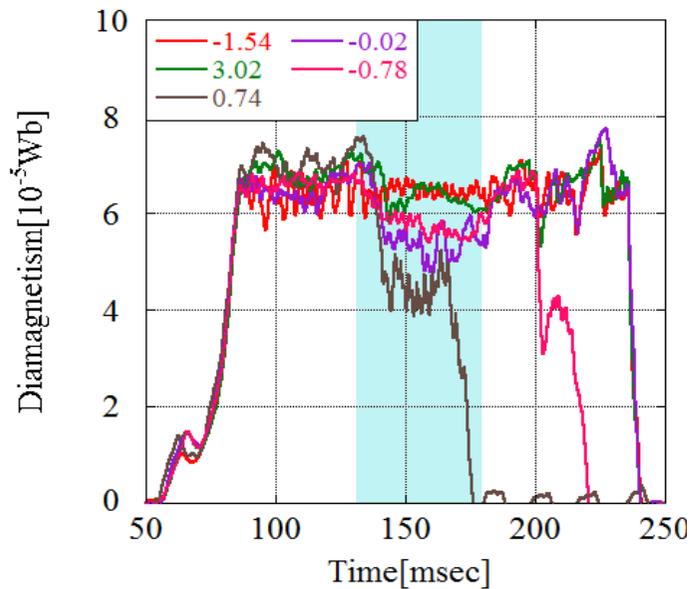
放射抵抗が小さくなる時

- アンテナ間に定在波があると示唆される。
セントラルの密度上昇とも低い

位相制御実験

アンテナ間にアンカー部共鳴層がある配位

セントラル部反磁性量と電子線積分密度

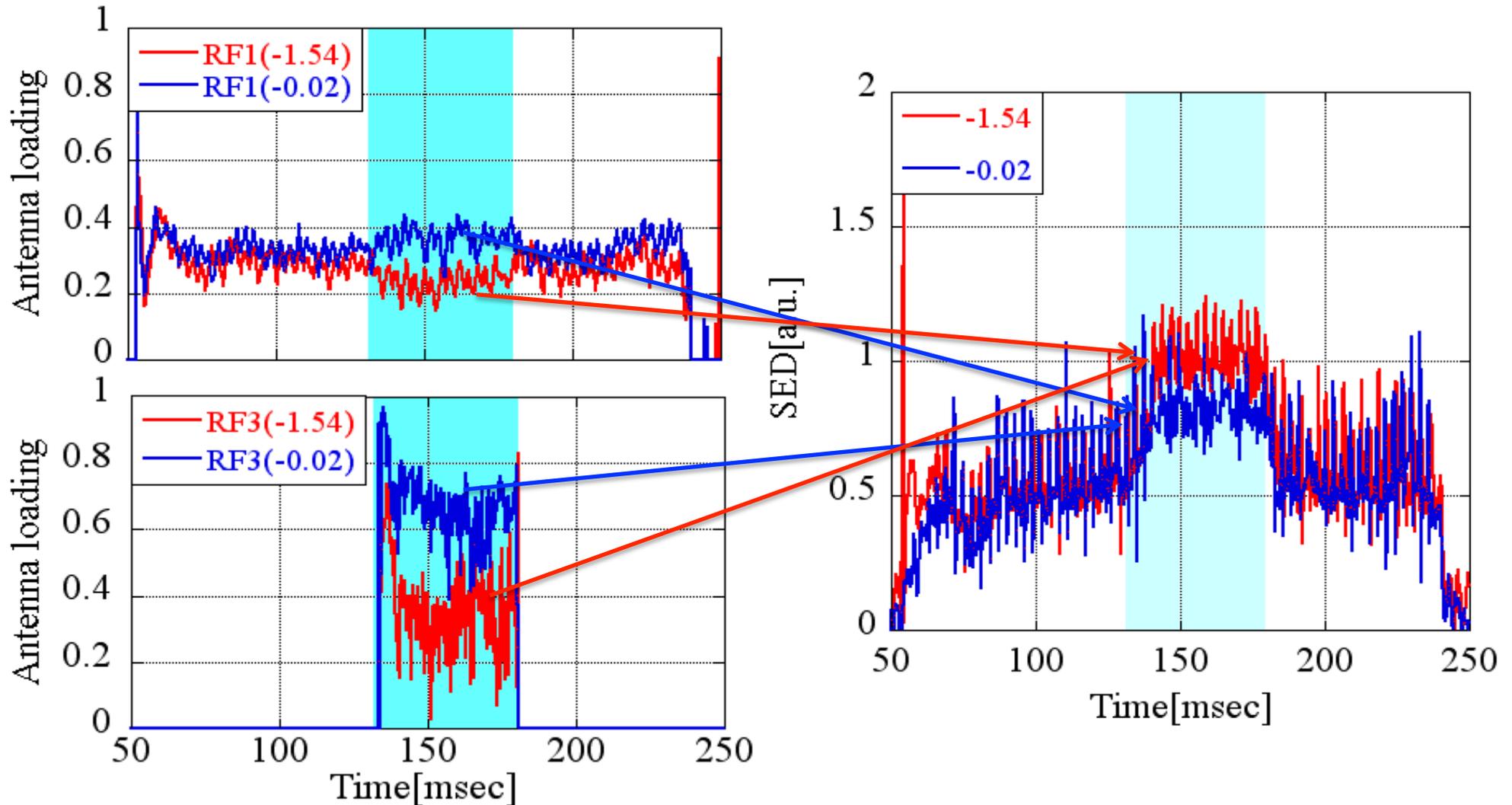


西側を用いた実験においても、アンテナ間位相差を操作することにより、セントラル部、アンカー部プラズマパラメーターに有意な変化がみられる。

位相制御実験（西側）

西側位相制御実験

アンテナ間に共鳴層がある配位



放射抵抗が小さくなる時 → アンテナ間に定在波があると示唆される。
このときSED信号からアンテナ一部が強く加熱されていることがわかる。

まとめ

ダイバータ模擬実験に貢献するため、極小磁場配位を有するアンカー一部の加熱強化を行い、以下の結果を得た。

1. アンカー一部新アンテナを計算・実験により評価を行った
 - 計算により形状変更したことにより、放射抵抗向上を行えたことが分かった。
 - 計算の範囲では、中心密度による影響は形状変更よりも小さい。
 - 実験においても、形状変更による放射抵抗向上を確認した。
 2. 積極的な干渉を用いた位相制御実験を行った
 - 東側の実験では、アンテナの外側に波動が伝搬すると考えられるとき、セントラル部での密度上昇が強くなる。
 - 西側の実験では、アンテナ間に波動が伝搬すると考えられるとき、アンカー一部加熱が強くなることがわかった。
- 実験から波動伝搬方向をアンテナ間位相差により制御できることが示唆される。

今後の研究において、

- ・TASKコードの計算領域をアンカー一部からセントラル部まで拡張することにより波動励起構造を詳細に調べる。
- ・アンカー一部計測器を充実させより詳細な計測を行う。