

直線型実験装置GAMMA10における位相制御を用いたICRF加熱実験

研究背景・目的

実験装置(磁場配位・アンテナ)

位相制御実験

実験配位(アンテナと共鳴層の位置関係)

位相差とプラズマ変化の関係

主プラズマ高密度化

3次元波動解析による解析へ向けた取り組み

まとめ

第17回 若手科学者によるプラズマ研究会

2014.03.05-07

日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

筑波大学 プラズマ研究センター

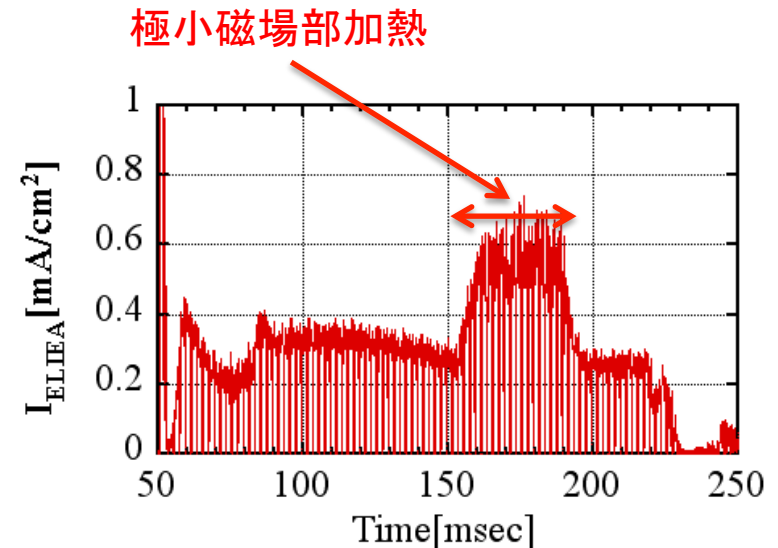
横山拓郎, 隅田脩平, 寺門明紘

研究背景・目的

直線型実験装置(GAMMA10)は、端部で開放となる磁力線配位、複雑な磁場配位を有する極小磁場配位を有することなどの特徴を持つ。端損失イオン流を用いた境界プラズマに関する研究、ダイバータ模擬実験が進められている。

これらの研究から以下のことが求められている

- ・プラズマ高性能化
- ・温度／密度などの制御

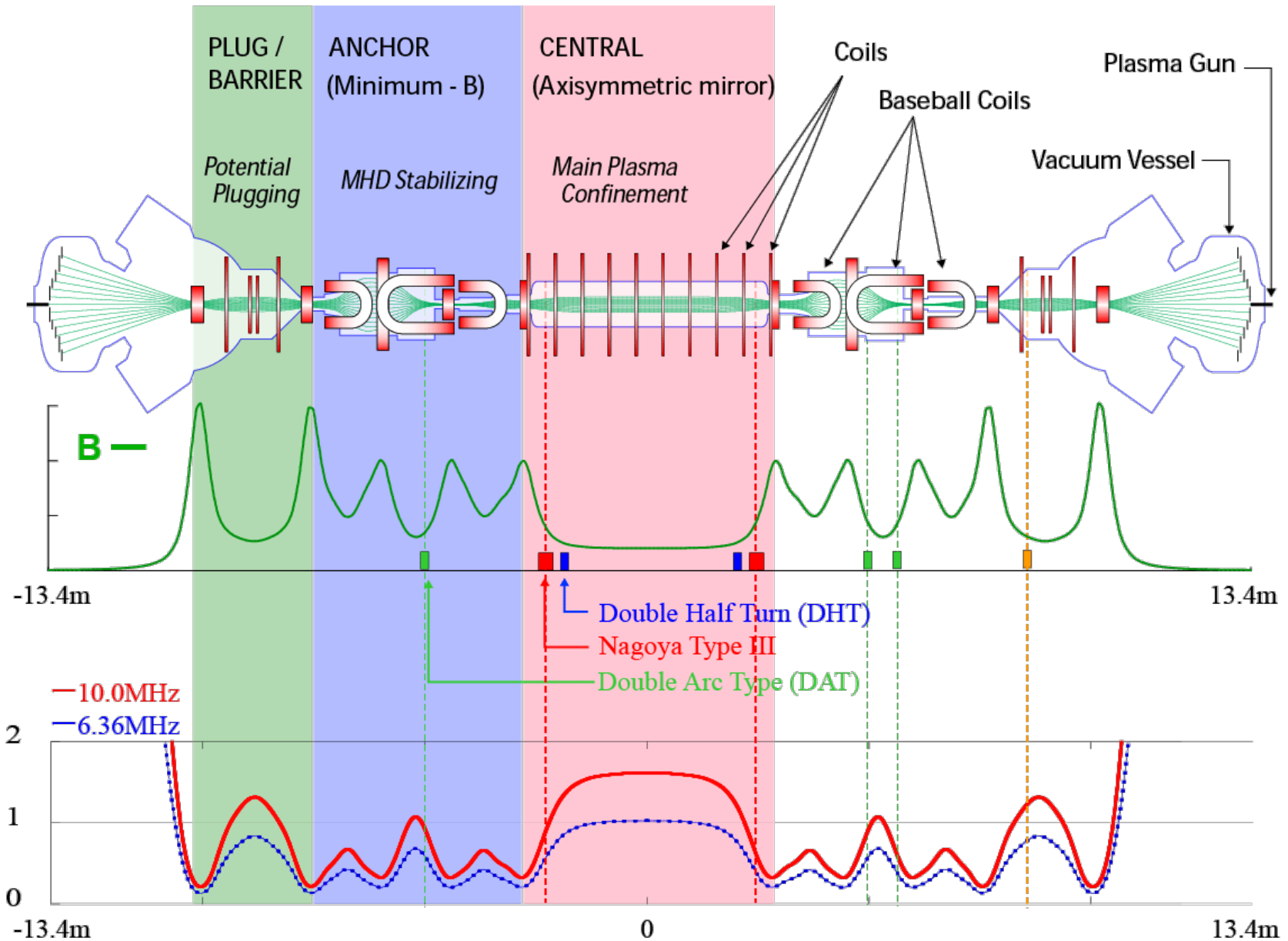


以上を達成するため、極小磁場部のプラズマ加熱・制御を2つのアンテナから励起される波動を干渉させる手法を用いて行なう(位相制御アンテナによる実験)。

- ・実験によるプラズマ温度・密度の観測
- ・極小磁場部における波動を詳細に解明するために
3次元波動解析

以上を用いて複雑な磁場中での波動加熱の詳細を解明する。

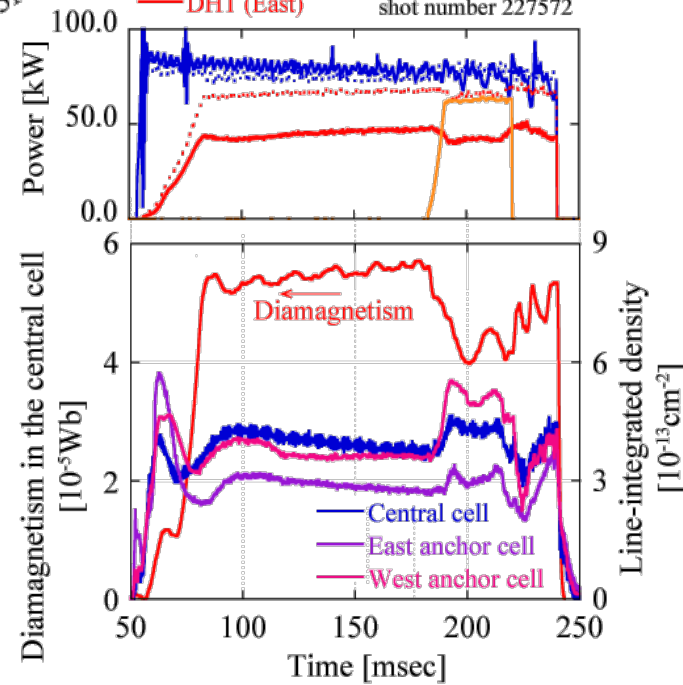
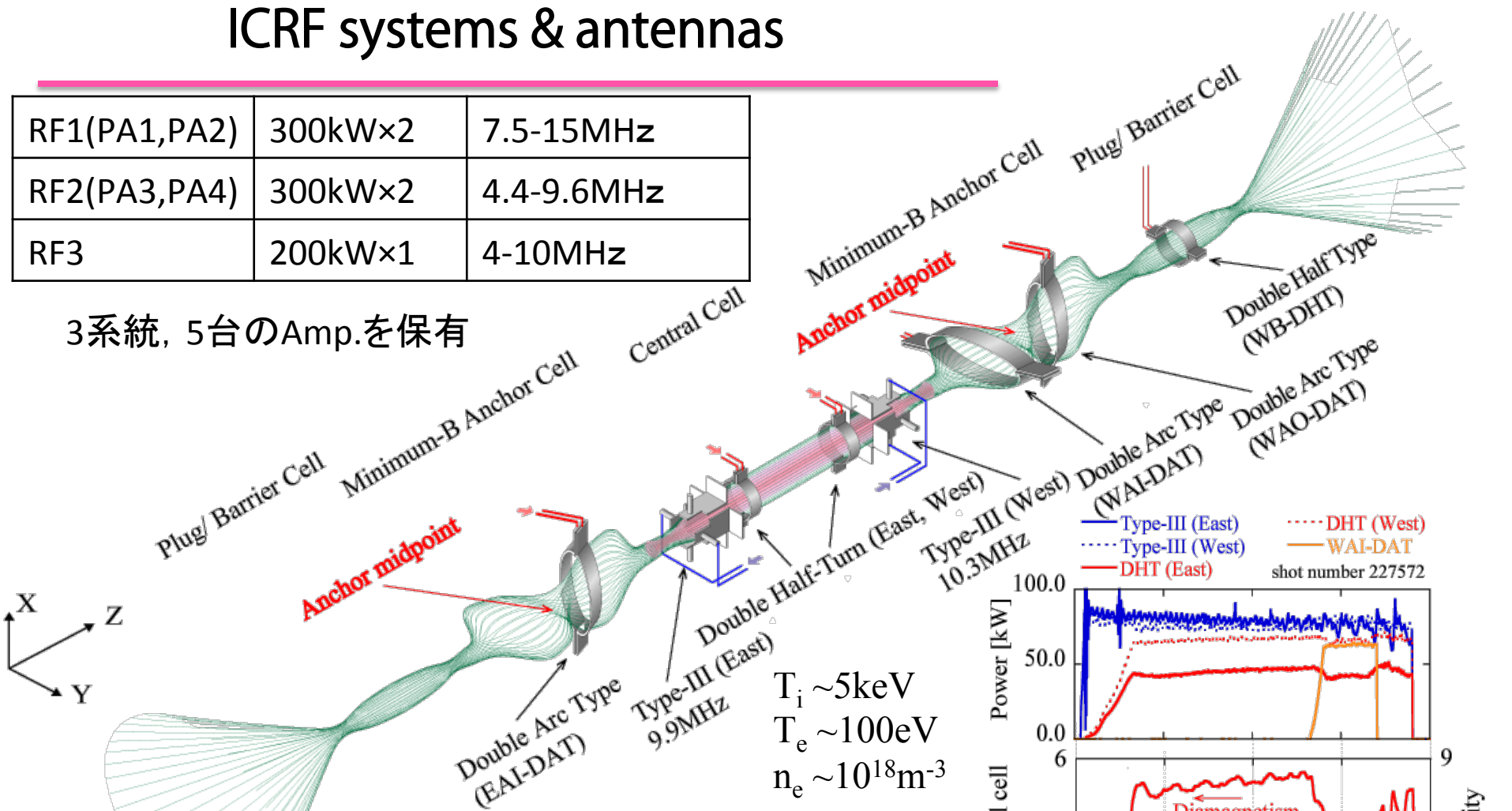
GAMMA10 (コイル・磁場強度)



ICRF systems & antennas

RF1(PA1,PA2)	300kW×2	7.5-15MHz
RF2(PA3,PA4)	300kW×2	4.4-9.6MHz
RF3	200kW×1	4-10MHz

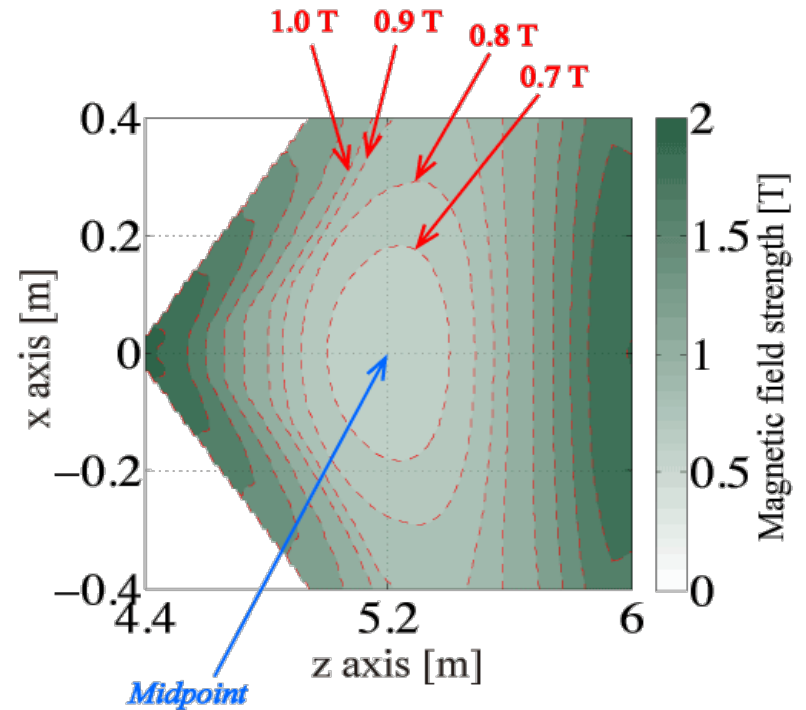
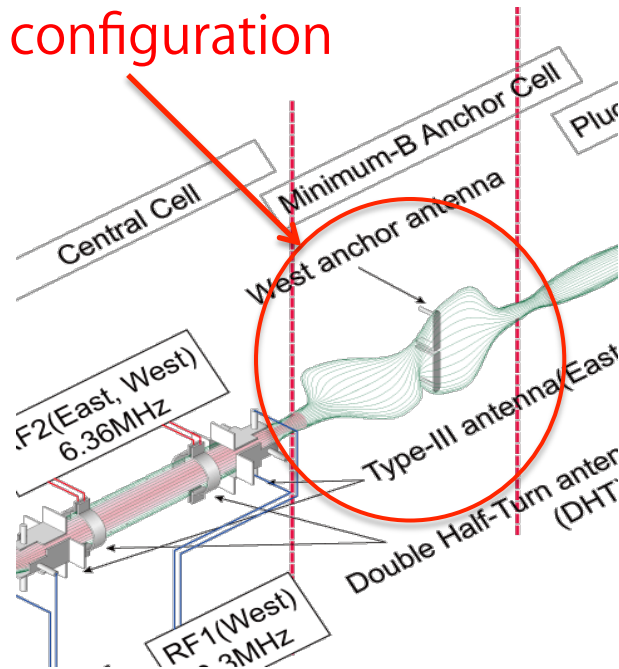
3系統, 5台のAmp.を保有



Type-III	セントラル部	プラズマ生成 アンカー加熱
DHT	セントラル部 西barrier部	セントラル加熱 バリア加熱
DAT(DHT型)	東西アンカー部	アンカー加熱

極小磁場アンカー部

Minimum-B configuration



MHD安定を確保するため、2カ所の極小磁場アンカー部を有している。

アンカー部加熱は

- ・セントラル部アンテナからの波動 (mode変換あり)
(同じアンテナからの波動でプラズマ生成も行う)
- ・アンカー部アンテナからの波動 (遅波によるビーチ加熱)

以上によって行われる。

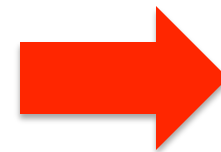
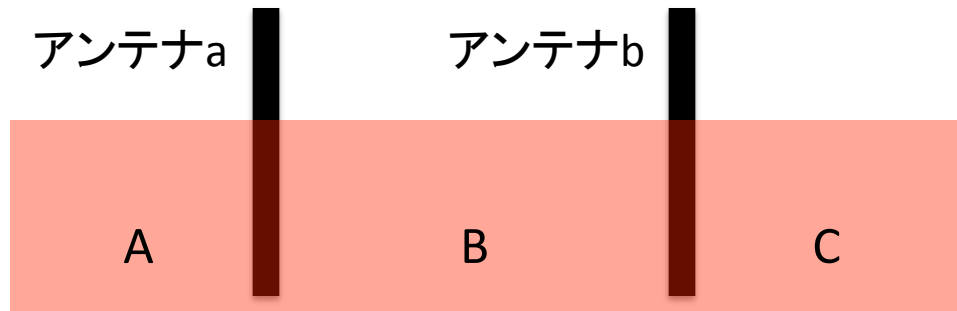
より効率的な極小磁場アンカー部加熱, セントラル部密度上昇を目指し, 2本のアンテナを用いて波動を干渉させる手法を導入した。

波動干渉

ICRF波動をより効率的にプラズマ加熱・生成に利用するため、波動干渉を導入した。
⇒波動干渉を用いることにより意図した場所に電力を効率的に印加する。

・位相制御実験

無限円柱状に2つのアンテナがあるとすると、アンテナに印加する波動に位相差をつけることにより、波動が強く励起される場所を選択することができる。



GAMMA10に適用することで、極小磁場部共鳴層でのイオン加熱、セントラル部でのプラズマ生成により多くの電力を印加することを目指す。

$$A: \frac{P_A}{P_0} = 1 + \cos(\delta - k_z d)$$

$$B: \frac{P_B}{P_0} = 1 + \cos\{\delta + k_z(2z - d)\}$$

$$C: \frac{P_C}{P_0} = 1 + \cos(\delta + k_z d)$$

δ : アンテナ間の位相差

k_z : 波動の波数(密度に依存)

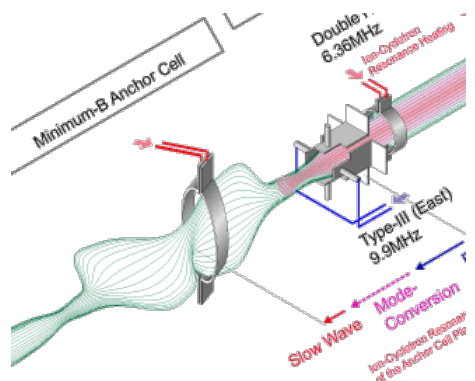
d : アンテナ間の距離

P_0 : 単独アンテナでのパワー

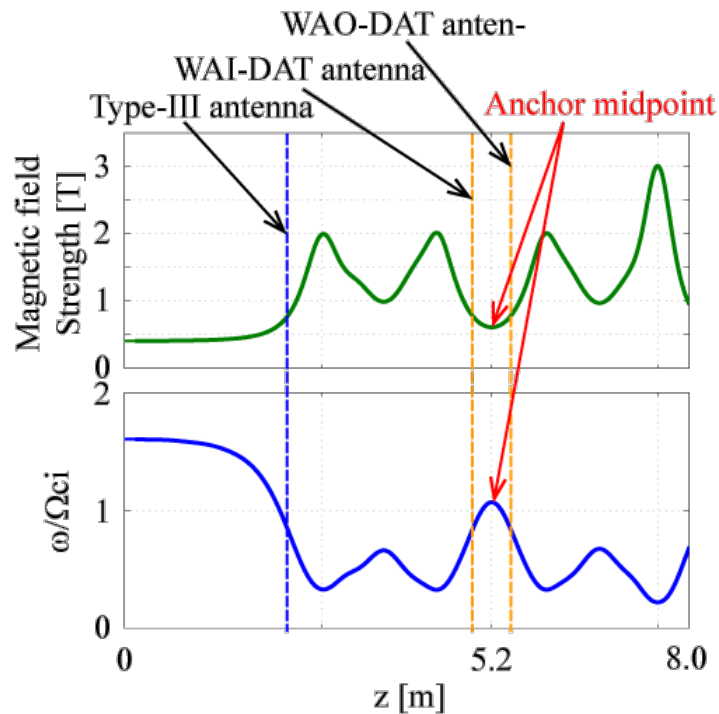
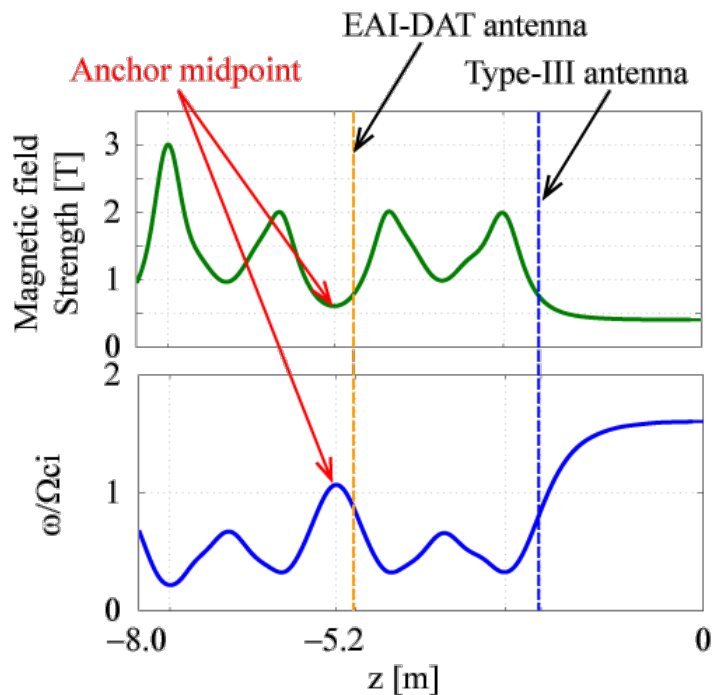
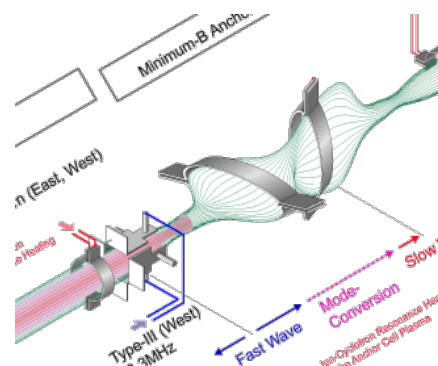
R : アンテナ負荷

位相差実験とアンテナ・共鳴層の位置関係

① 東側での実験配位
(2つのアンテナより外側に共鳴層)



② 西側での実験配位
(2つのアンテナより外側に共鳴層)
(2つのアンテナの間に共鳴層)



位相差実験によるアンカー部密度の変化

これまでに位相差を用いる手法が、極小磁場部高密度化に有効であることがわかっている。

右側のグラフは、追加熱を行なった東側アンカー部線密度(色の差はアンテナ間設定位相差)

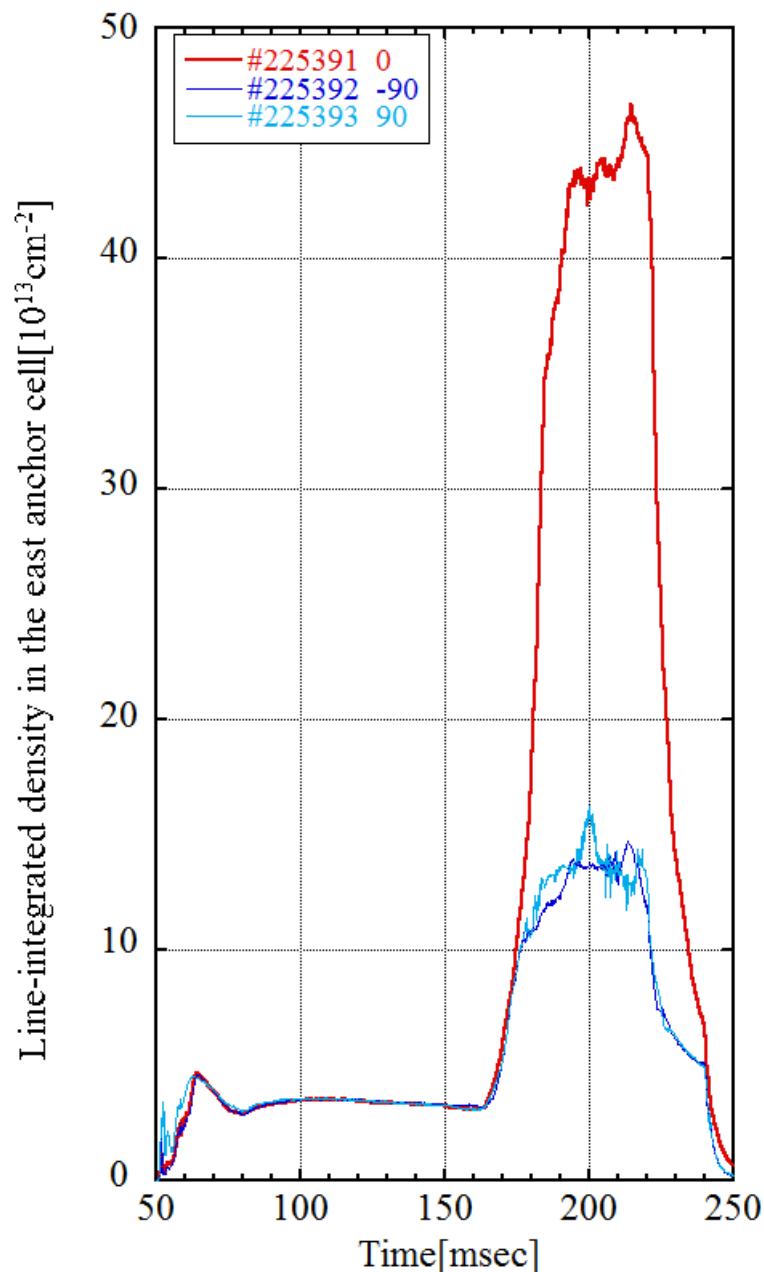
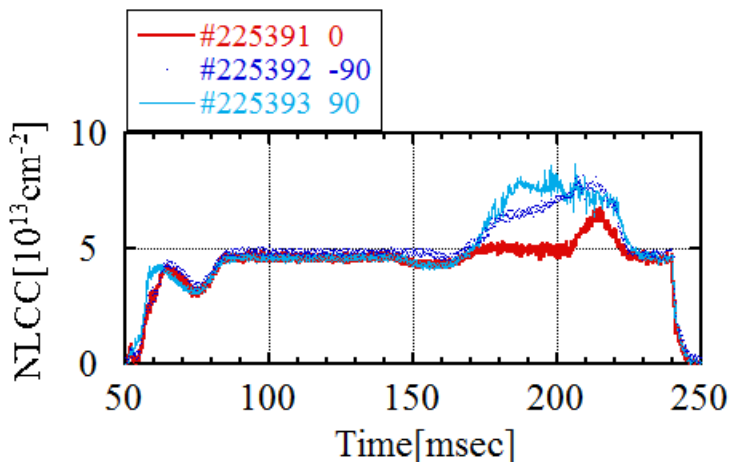
→ 数倍以上に上昇することを確認

下のグラフは、セントラル部線密度

→ 上昇する条件があることがわかる

→ アンカー部で変化が大きいとき、セントラル部で変化が大きいときで条件が異なる

⇒位相差とプラズマ変化の関係について調べる。



位相差実験における実験結果

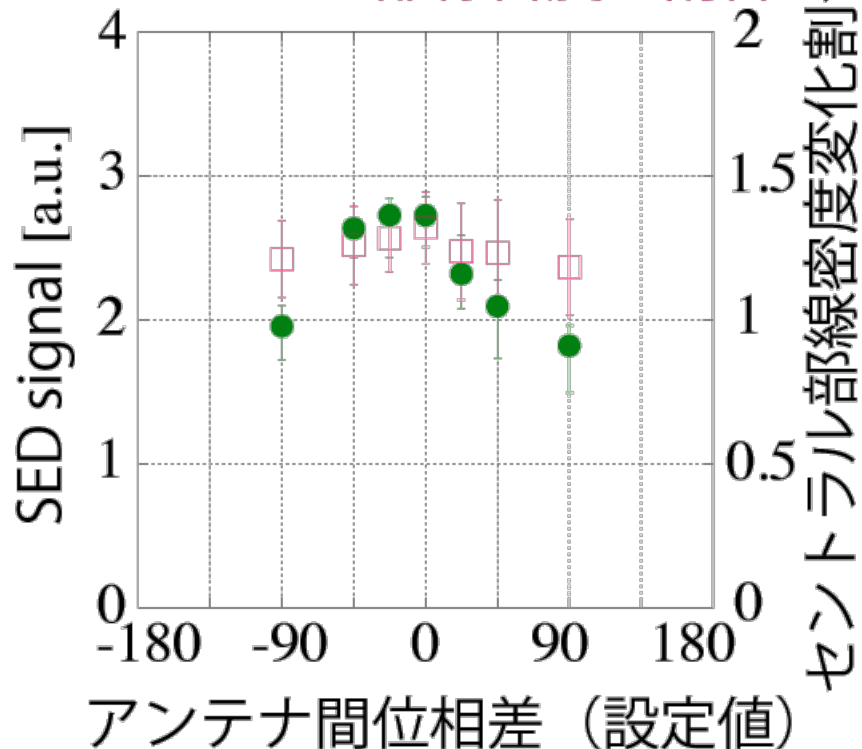
① 東側 (EAI-DAT & Type-III)

共鳴層 / アンカーアンテナ

／ セントラルアンテナ

● 東アンカー部 S.E.D. signal

□ セントラル部線密度の割合



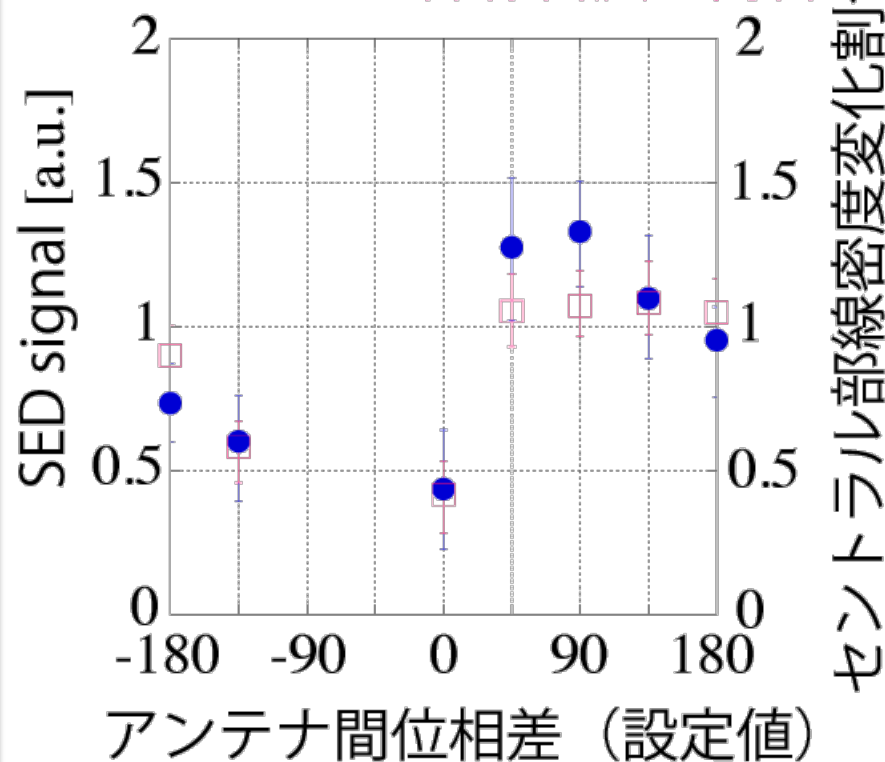
② 西側 (Type-III & WAI-DAT)

セントラルアンテナ / アンカーアンテナ

／ 共鳴層

● 西アンカー部 S.E.D. signal

□ セントラル部線密度の割合



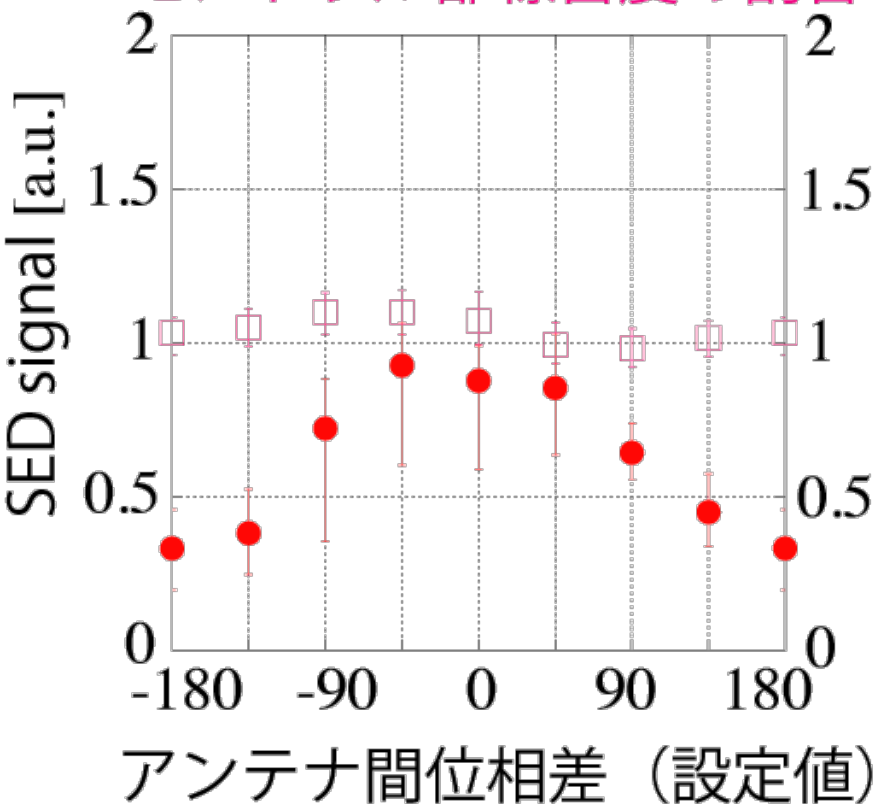
$$\text{セントラル部線密度の割合} = \frac{\text{アンカー部加熱が重畳されている時間の平均}}{\text{定常な時間の平均}}$$

位相差実験における実験結果

③ 西側(Type-III & WAO-DAT)

セントラルアンテナ／共鳴層
／アンカーアンテナ

● 西アンカー一部S.E.D. signal
□ セントラル部線密度の割合



セントラル部線密度変化割合

アンテナ間の位相差を制御することにより、アンカー部加熱，セントラル部密度を制御できることがわかった。

① 東側 (EAI-DAT & Type-III)

② 西側 (Type-III & WAI-DAT)

※2つのアンテナの外側にアンカー一部共鳴層

→アンカー一部加熱，セントラル部密度上昇が起こる条件が同じ位相差設定である

③ 西側 (Type-III & WAO-DAT)

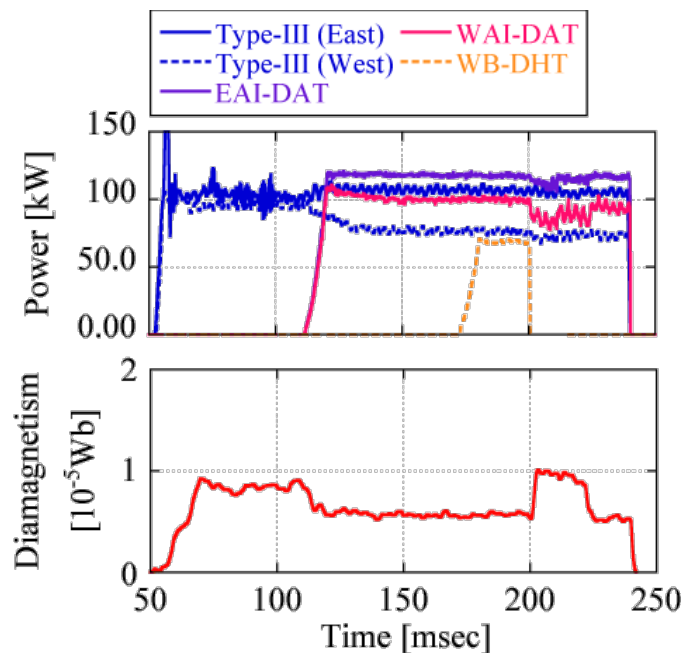
※2つのアンテナの内側にアンカー一部共鳴層

→アンカー一部加熱，セントラル部密度上昇が起こる位相差設定が異なる。

以上より位相制御による効果を確認できた。(より詳細計測は必要)

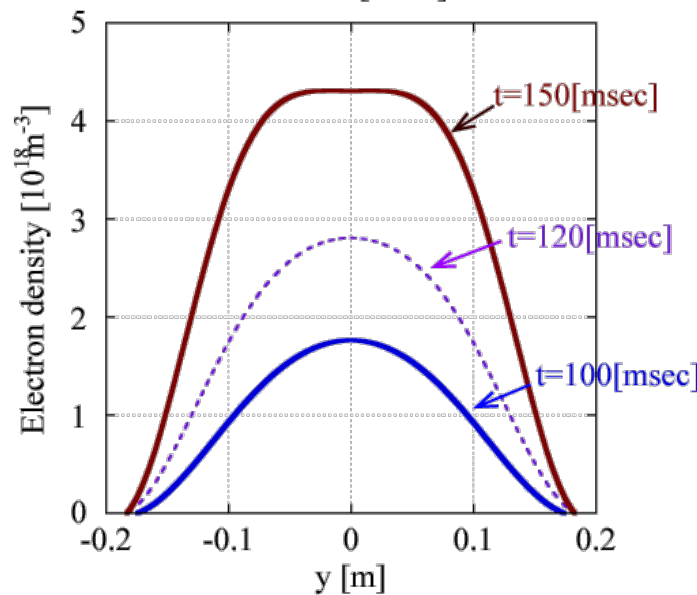
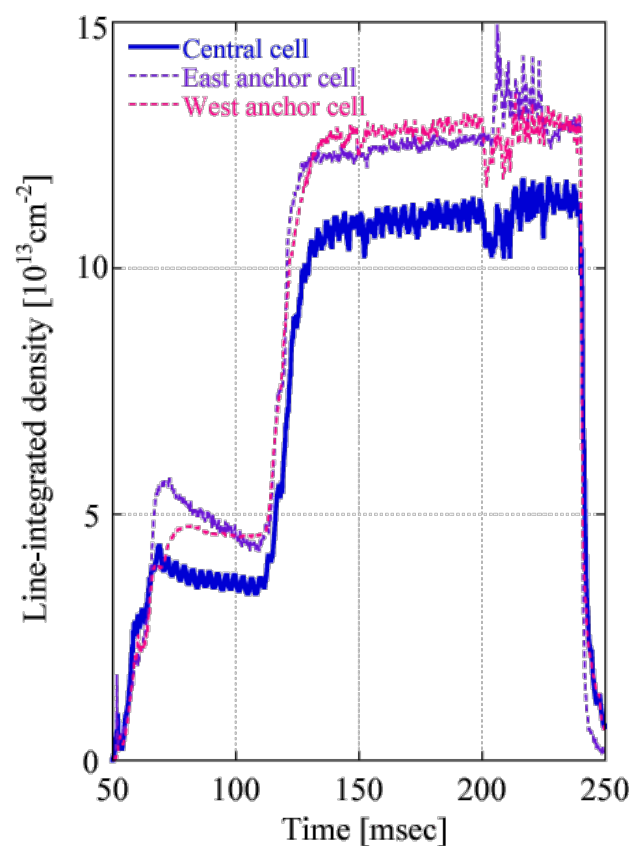
位相差制御手法を用いた セントラル部高密度化

極小磁場アンカー部の密度制御に位相差制御を使うと有効なことがこれまでにわかった。位相差制御を用いて、極小磁場部に高密度プラズマを生成・維持しセントラル部高密度化実験を行った。東西それぞれに高密度プラズマができる条件で同時に印加 ⇒ 両アンカーに高密度プラズマが生成される。同時にセントラル部高密度化も達成 ($4.3 \times 10^6 \text{m}^{-3}$)。



右下のグラフは、密度分布の変化

時間ごとに中心密度が上昇していることがわかる。



3次元波動解析コード (TASK/WF) による波動解析への取り組み

複雑な磁場配位(極小磁場部)におけるイオン加熱は、主にセントラル部で励起された波動がモード変換(Fast waveからSlow wave)することにより行われている。複雑な磁場配位における波動を詳細に調べるため、3次元波動解析コード(TASK/WF)をGAMMA10について適用する。

TASK/WF

3次元有限要素法(3D-FEM)により、Maxwell方程式を解くコード

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} - \frac{\omega^2}{c^2} \overset{\leftrightarrow}{\varepsilon} \cdot \mathbf{E} = i\omega\mu_0 \mathbf{J}_{ext}$$

Plasma model

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - m\mathbf{v}\mathbf{v}$$

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \mathbf{j} = \sum_k n_k q_k \mathbf{v}_k$$

$$D = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \equiv \varepsilon_0 \overset{\leftrightarrow}{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}$$

$$\overset{\leftrightarrow}{\varepsilon} \equiv \overset{\leftrightarrow}{I} + \frac{i}{\omega\varepsilon_0} \overset{\leftrightarrow}{\sigma} = \overset{\leftrightarrow}{I} + i \sum_s \frac{n_{s0} q_s}{\omega\varepsilon_0} \overset{\leftrightarrow}{\mu}_s$$

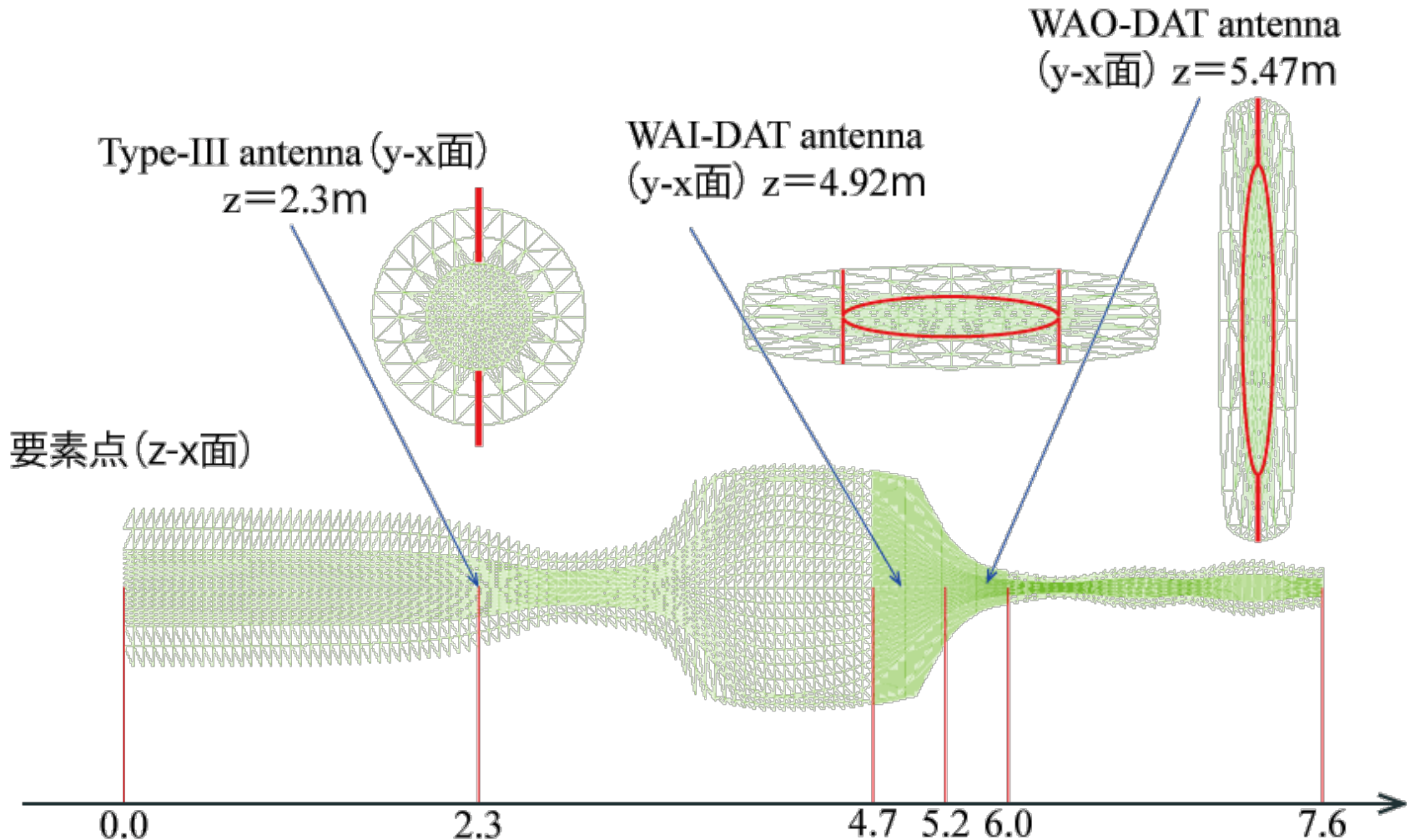
アンテナに流れる電流により印加される波動電界についてのMaxwell方程式を解くコード、プラズマは衝突のある冷たいプラズマを仮定している。

計算範囲の設定

GAMMA10セントラル部からアンカー一部の領域を計算する連続的に計算を行なう。

計算範囲 : $z=0\sim 7.6\text{m}$, $x,y=\text{半径}0.5\text{m}(z=0\text{面換算})$

要素点 56,842 要素数 $\sim 370,000$



位相差実験を模擬する 計算条件設定

アンテナから励起される波動を調べるため、右図に示す計算条件を設定した。

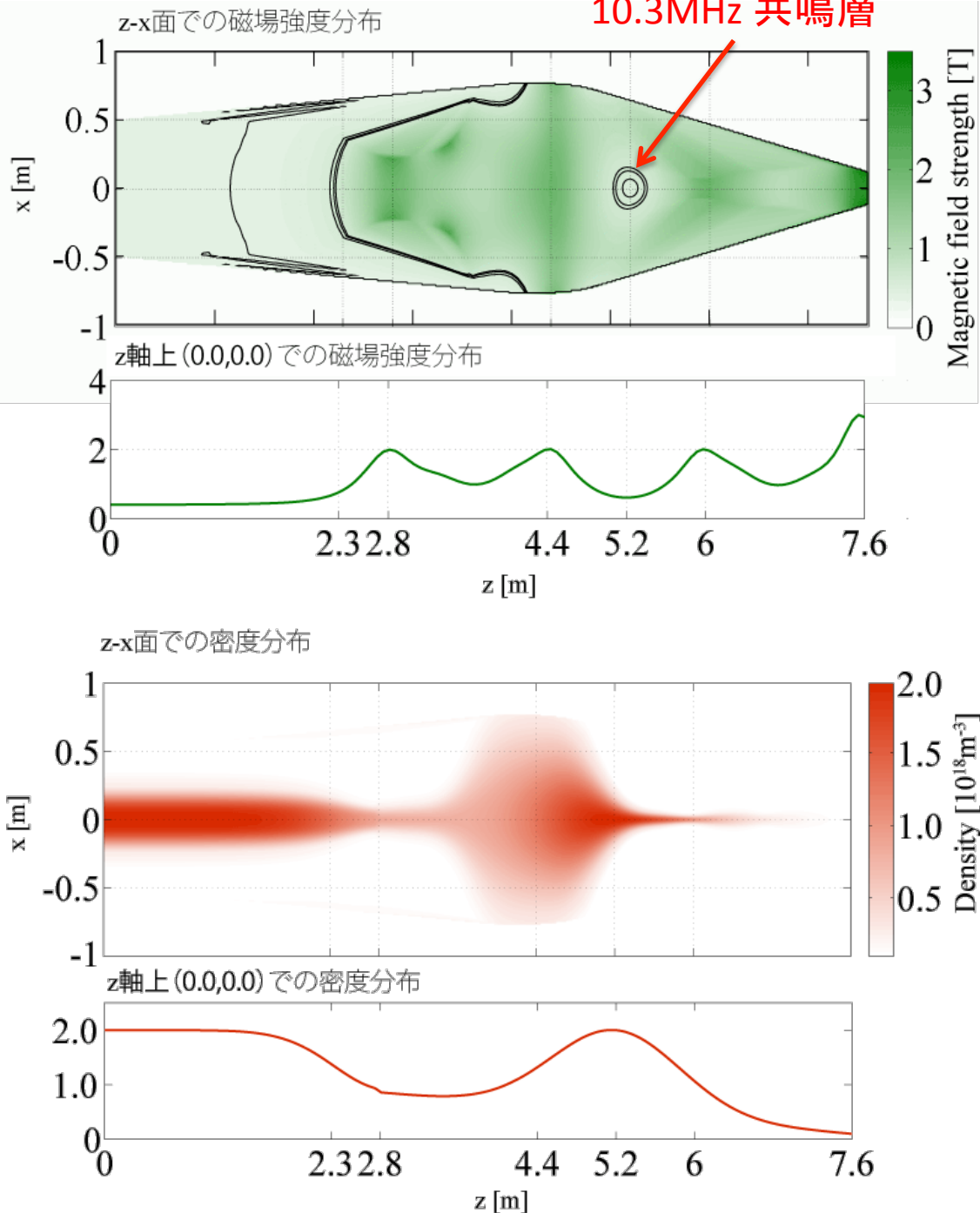
—磁場強度分布

GAMMA10各コイルに実験時に使用している電流が流れているものとする。

—密度分布

今後検討が必要であるが、今回はセントラル中心($z=0.0\text{m}$)、アンカー中心($z=5.2\text{m}$)にそれぞれ頂点があるような分布を設定した。

⇒要素分割・パラメータ設定等の確認を進めている。



TASK/WF 並列化

位相差実験と同じ配位を計算するとき、これまで以上の要素数が必要である。
現在、要素点57000点、計算時間3.5時間程度必要であり高速化の必要がある。

⇒ TASK/WFの並列化

並列化は、MPI(Message Passing Interface)を使うことで複数コアを使うことにより計算時間を短縮する。

GAMMA10用テストコードの計算時間(要素点 ~3882)

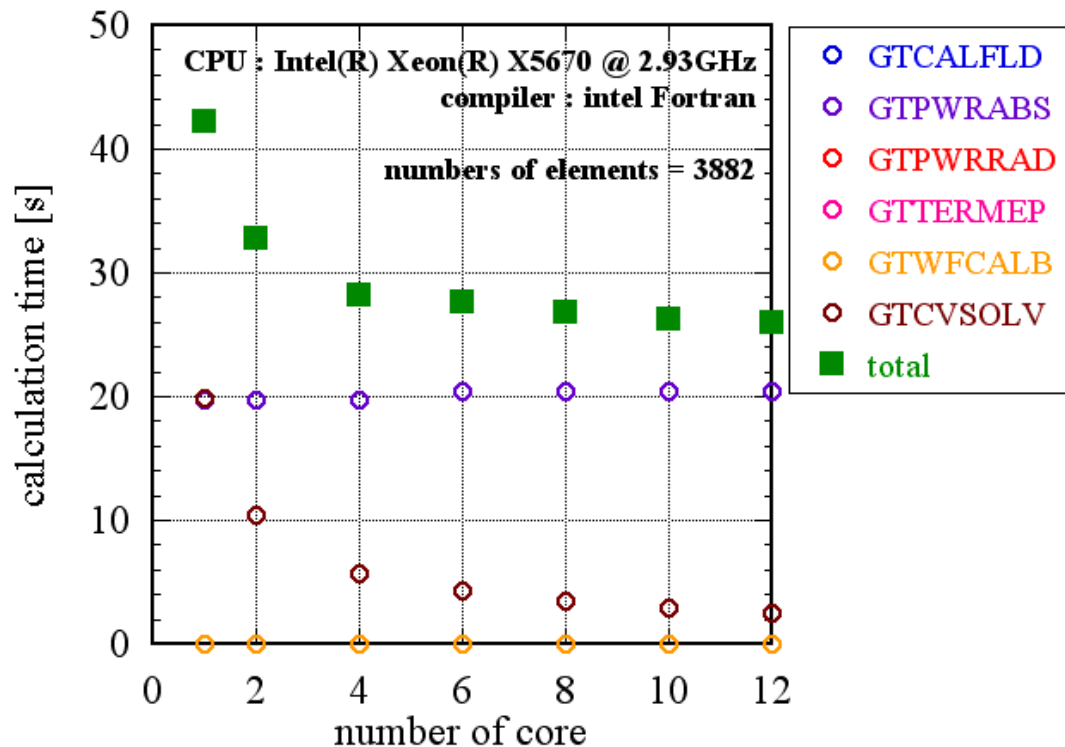
— TASK/WF(single)
74.111s(solv 35.850)

— TASK/WF3D(single core)
42.260s(solv 19.850)

— TASK/WF3D(4core)
28.261s(solv 5.680)

solv時間が2倍以上短縮されることが見込まれている。

Calculation time of subroutines and total of TASK/WF3D in case of test code of GAMMA10



まとめ

より効率的なイオン加熱，プラズマ生成を目指して，位相制御による方法を導入し，温度・密度などの制御を行い以下の結果を得た。

- アンテナ・共鳴層の位置関係から温度，密度を有効に制御できることが観測された。
- セントラル部での密度上昇，極小磁場部での温度上昇が同時にできる条件があることが実験により確認された。
- 位相制御を用いる手法を用いることにより，セントラル部においてこれまで以上の密度を達成した。

以上における詳細な波動を調べるため，3次元波動解析コードを実験を行った配位への適用を進めた。より詳細な情報を得るため，並列化コードの適用を進めている。

- 実験条件の模擬を行い，より詳細な波動構造解析を行う予定である。
- 大規模な計算を行うため，並列化コードを導入した。
テストコードでは現状コードより数倍早く計算できることを確認した。

今後の課題

- 実験において対象としている極小磁場部の情報が少ない
- CX-NPAの設置・校正が進められており，定量評価に向けイオン温度を得られる見込みである。