

GAMMA10におけるダイバータ模擬実験 に向けたICRF波動加熱実験

池添竜也, 齋藤裕希, 飯村拓真

筑波大学プラズマ研究センター

第15回若手科学者によるプラズマ研究会

平成24年3月14～16日 原子力機構那珂研

ダイバータ模擬実験計画

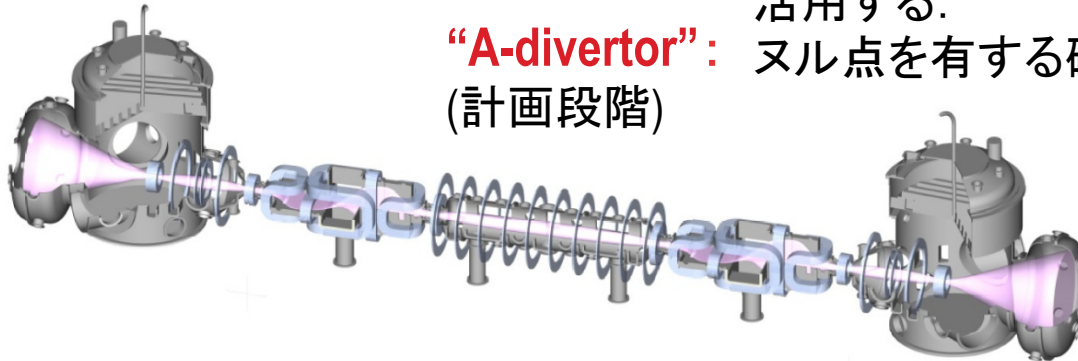


「コア・プラズマの輸送制御」

「境界プラズマ模擬によるダイバータプラズマ輸送制御」

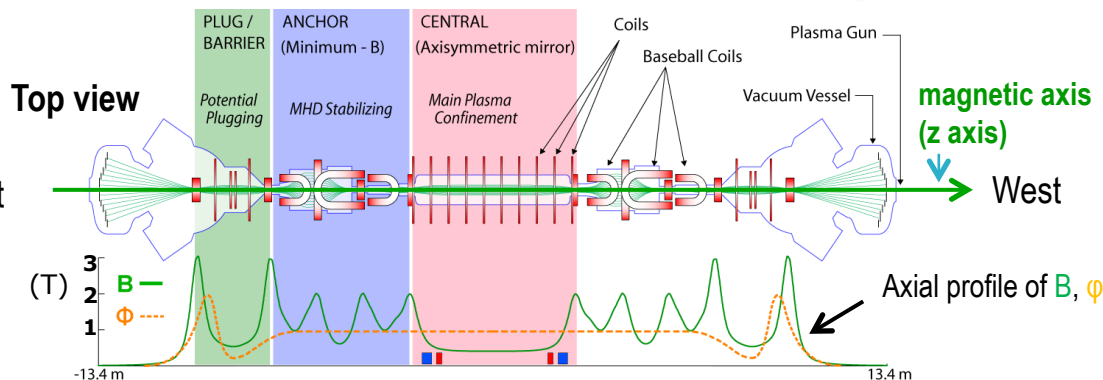
“E-divertor”: エンドミラー部(開放端)に昇降式ダイバータボックスを取付け, 端損失熱流束・粒子束を活用する.
(進行中)

“A-divertor”: ヌル点を有する磁気ダイバータを取付ける.
(計画段階)



ダイバータシミュレータとしての主な特徴:

1. 高いイオン温度
2. 分布したイオンエネルギー
3. 強磁場, 等

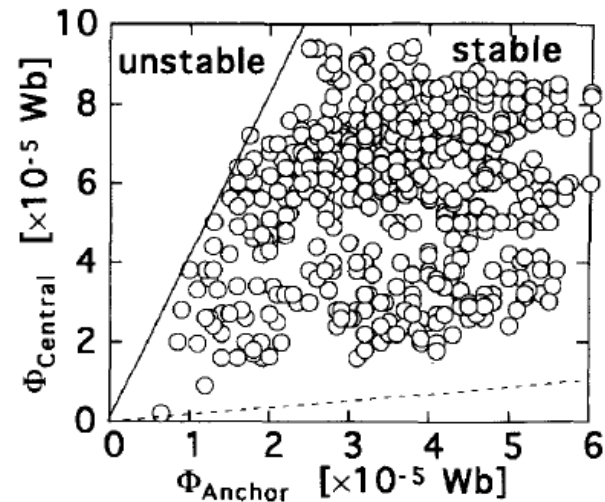
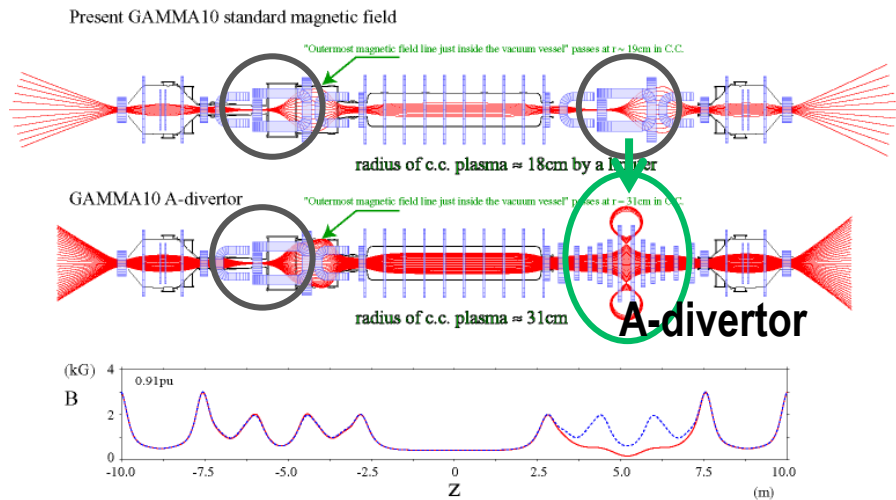


GAMMA 10 → GAMMA PDX



研究の背景と目的

セントラルセル部に高ベータプラズマを閉じ込めるためには、極小磁場配位をもつアンカー部に高ベータプラズマを生成し、MHD安定性を確保する必要がある。



A-divertorでは片側アンカー部が磁気ダイバータに置き換わる

↓
MHD安定性の劣化

ダイバータ模擬実験に向けて、

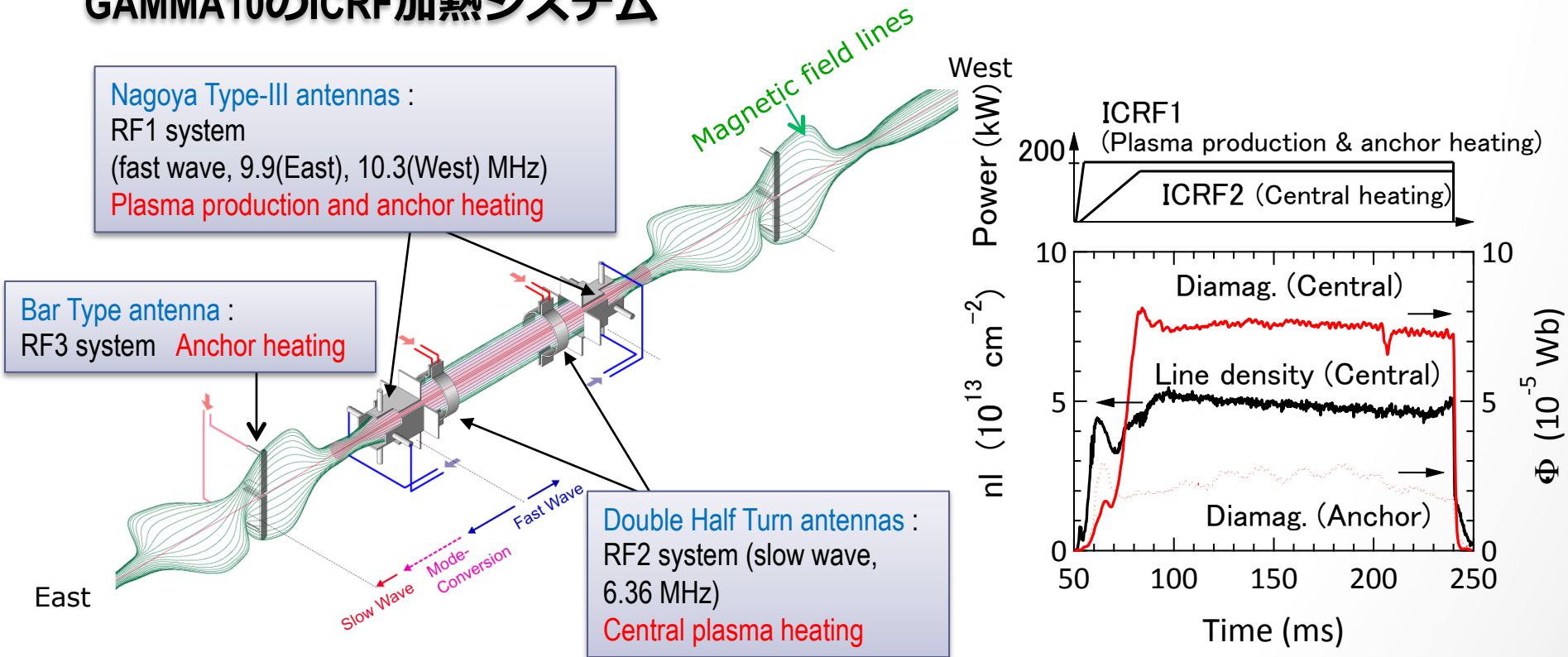
- アンカープラズマ加熱の強化
- プラズマパラメータの拡張及び制御性の獲得

が重要である。

二つのICRF加熱実験



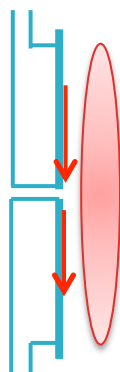
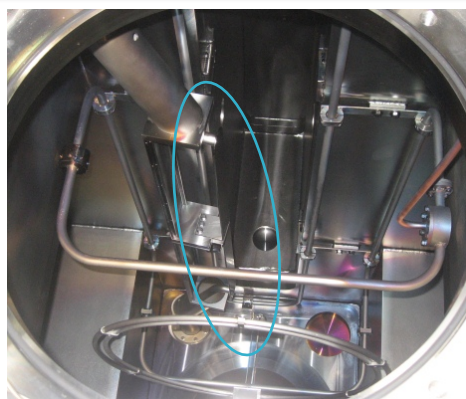
GAMMA10のICRF加熱システム



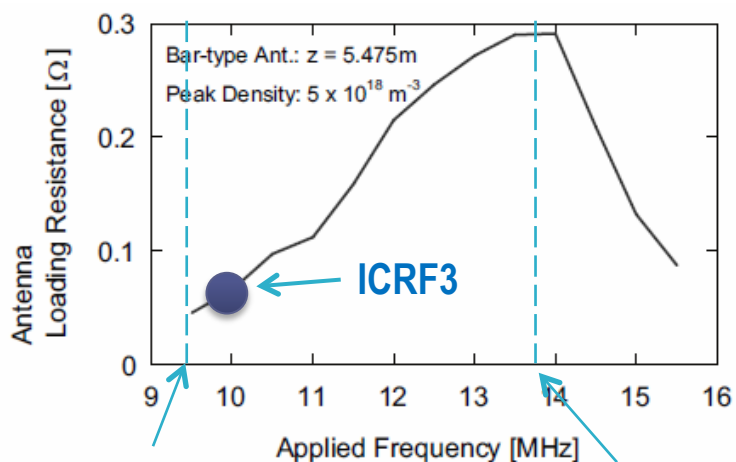
アンカー加熱の強化と高い加熱の自由度, プラズマパラメータの制御性の確保を目的として下記の実験を行った.

1. 波動励起効率改善の為のアンカーアンテナの改造
2. 軸方向に離れた二つのアンテナを用いた波動干渉実験

bar-typeアンテナの低い放射抵抗の改善方法



アンカー部に設置されていたbar-typeアンテナのloading ($=P_{\text{net}} / P_{\text{in}}$) は20%程度であり, 他のアンテナと比較して大幅に低い。



放射抵抗の計算結果

(三次元波動伝播解析コード “TASK/WF”)

(Y. Yamaguchi et al., Fusion Science and Technology, 59, No.1T (2011) 253-255.)

極小磁場配位の
中心における ω_{ci}

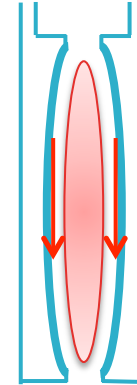
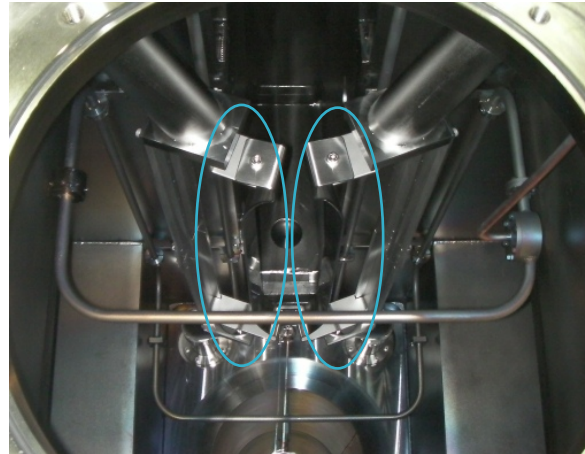
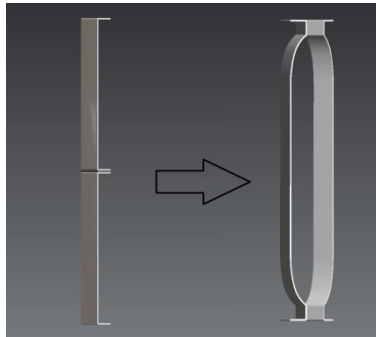
Bar-typeアンテナ前の ω_{ci}

~~① 印加周波数の上昇 (← 中心領域を加熱する必要性)~~

~~② アンテナ設置位置の変更(共鳴層側へ) (← 計測器, NBIのライン)~~

➡ ③ アンテナ形状の変更

両側Elliptic-arc アンテナの導入



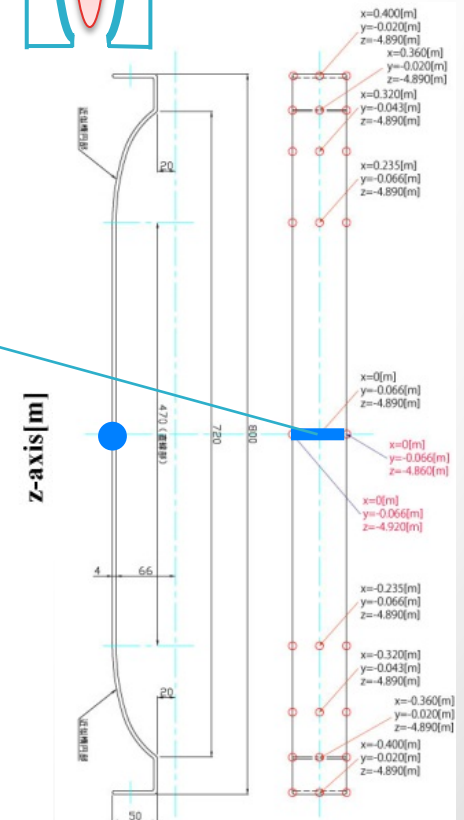
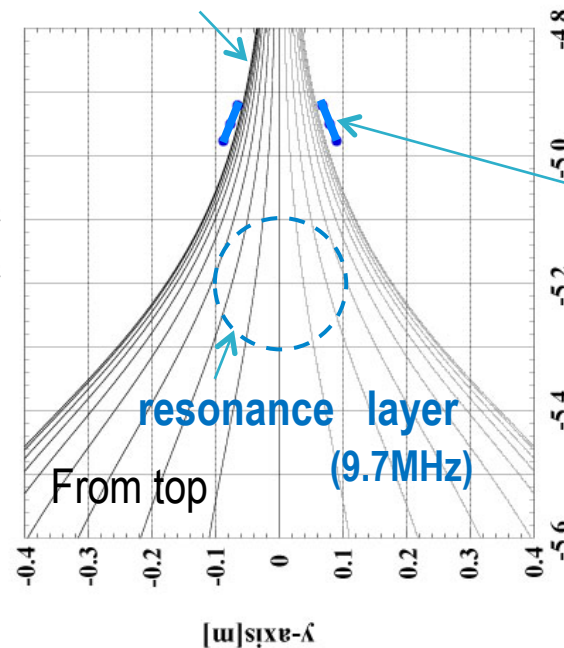
改良点

1. bar-type → elliptic-arc
2. 片側 → 両側

2011年 春： 東側アンカーアンテナ置換

2011年 夏： 西側アンカーアンテナ置換

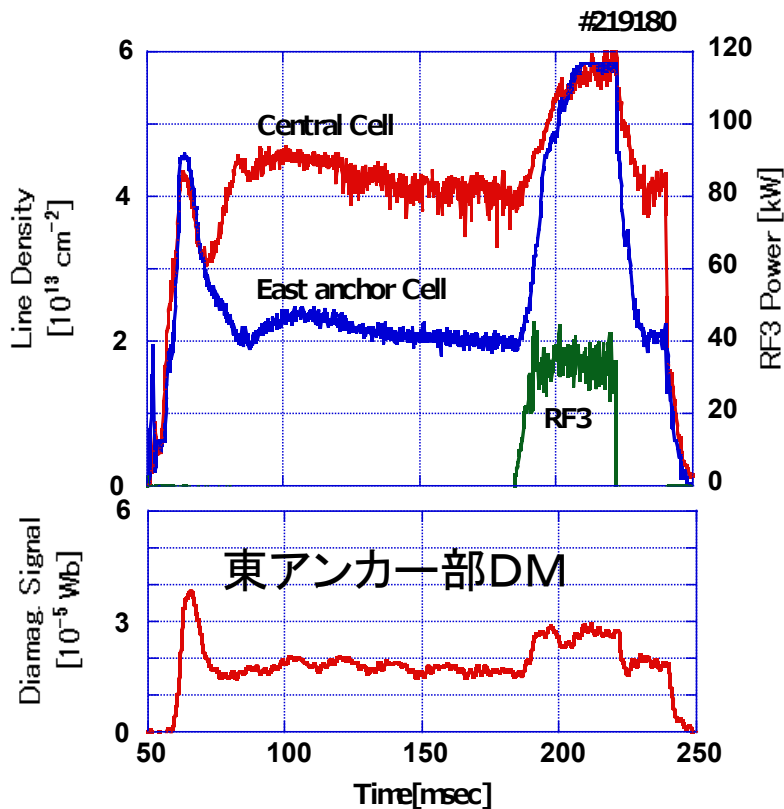
outer most field line



アンテナloadingの改善



ICRF3系統を用いて、新しく設置した両側elliptic-arcアンテナから9.7 MHzの波動を励起させ、典型的な放電の後半の時間帯に重畳させた。



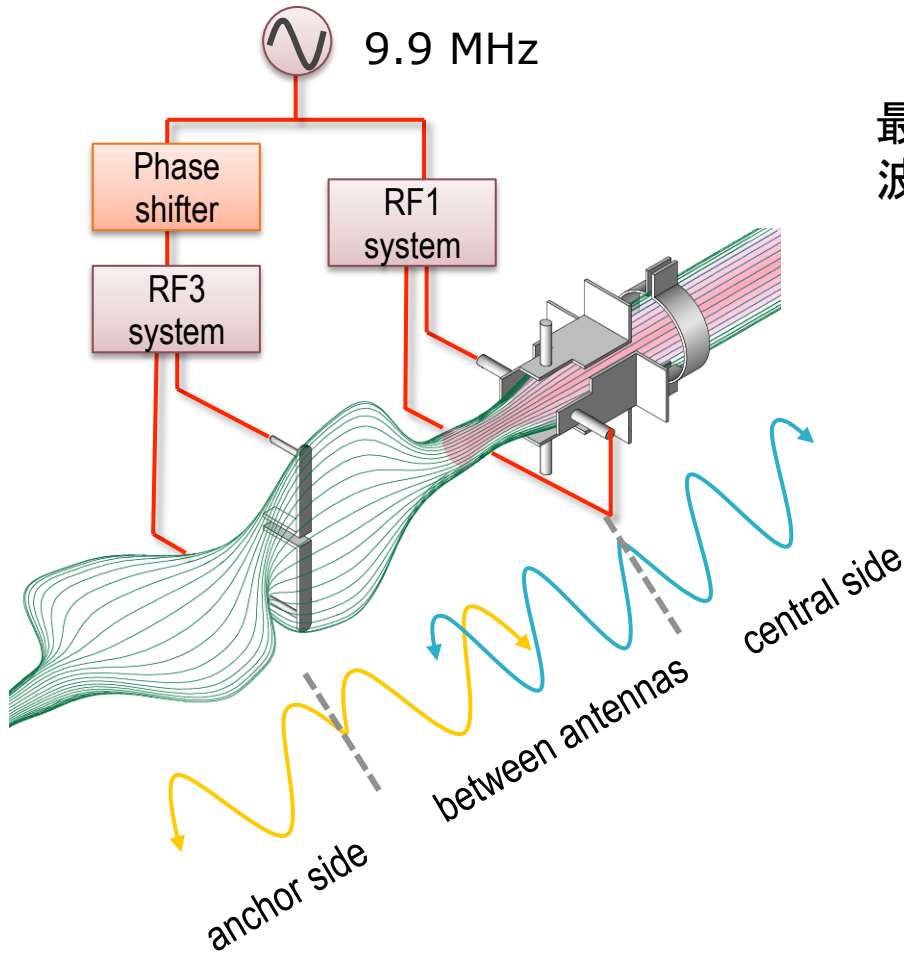
- ICRF3パワーの印加により、セントラル、アンカーそれぞれの線密度が共に上昇.
- アンカー部の反磁性量は最大で50%程度上昇.
→アンカー加熱の強化
- アンテナのloadingが大幅に改善;
60%以上 ↔ 20%程度 (bar-type)

プラズマパラメータへの顕著な影響, loadingの改善を確認した.

2. 積極的な波動干渉実験



同一周波数で励起された波動同士は互いに干渉する。
→二つの波動間の位相差を変更することで、波動の伝搬を変えることが可能。



最も単純化したモデルでは、干渉した結果の波動パワーは以下で記述される。

δ : phase difference

k_z : wave number

d : distance between the antennas

P_0 : power of an antenna

R : antenna loading resistance

▪ Anchor cell side

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

▪ Central cell side

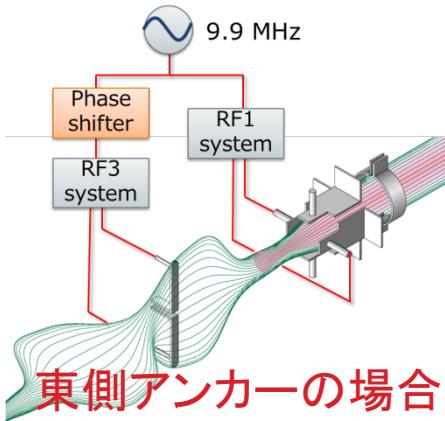
$$\frac{P_C}{P_0} = \frac{R_{RF1}}{R_0} = 1 + \cos(\delta + k_z d)$$

▪ Between antennas

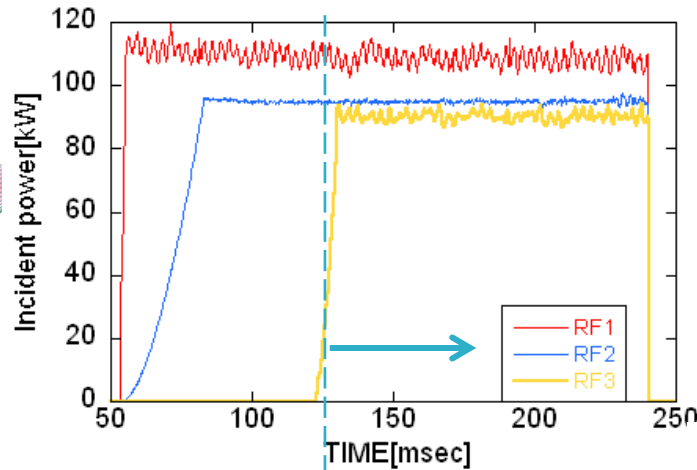
$$\frac{P_{Th}}{P_0} = 1 + \cos\{\delta + k_z (2z - d)\}$$



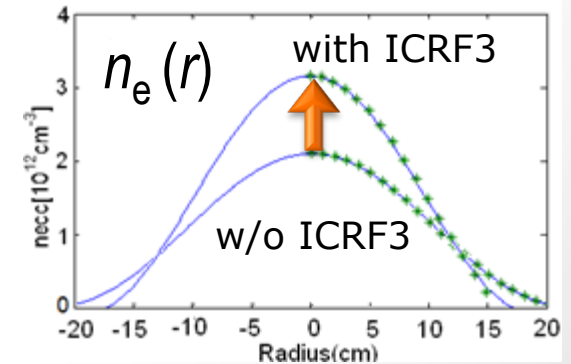
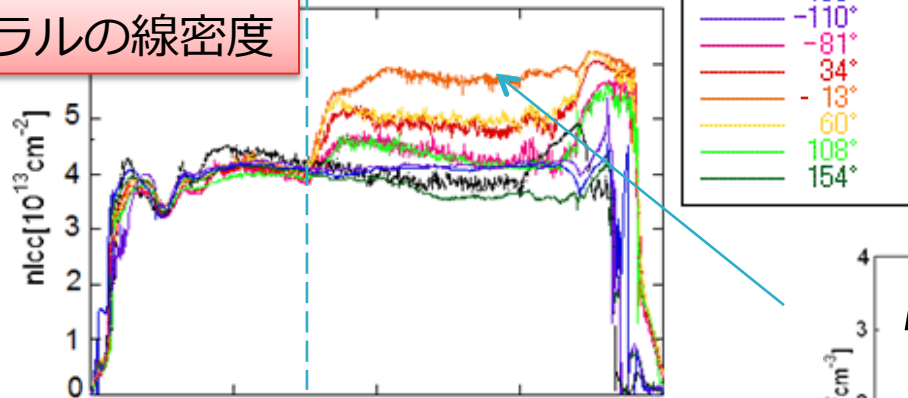
異なるセットアップ^o（位相差）が及ぼす影響



東側アンカーの場合



セントラルの線密度

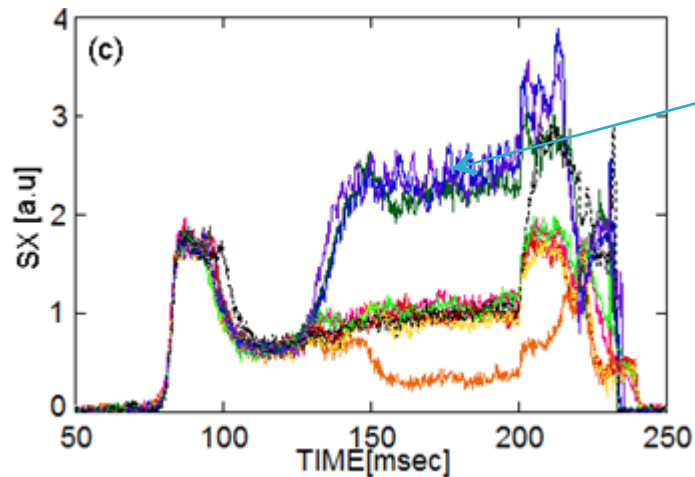


- 位相差の違いによりセントラルの線密度に明らかに異なる影響が観測された。

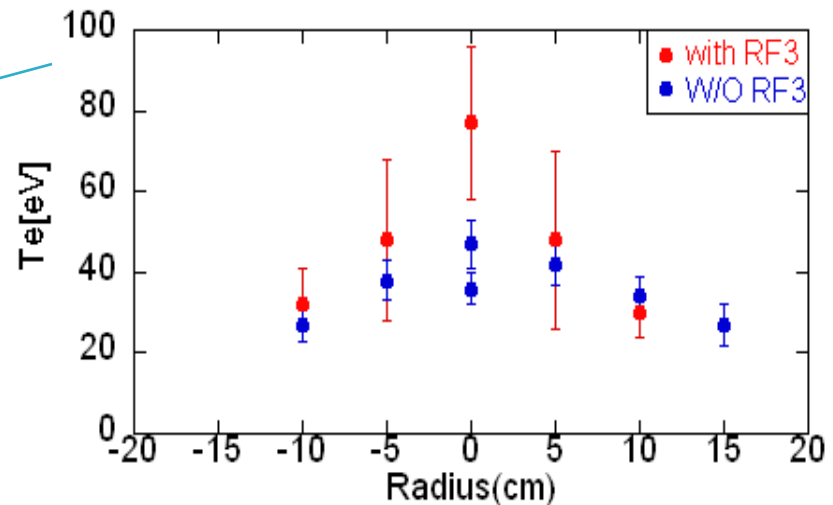
電子温度上昇を引き起こす位相



セントラルの軟X線発光強度



セントラルのTe分布(トムソン散乱)

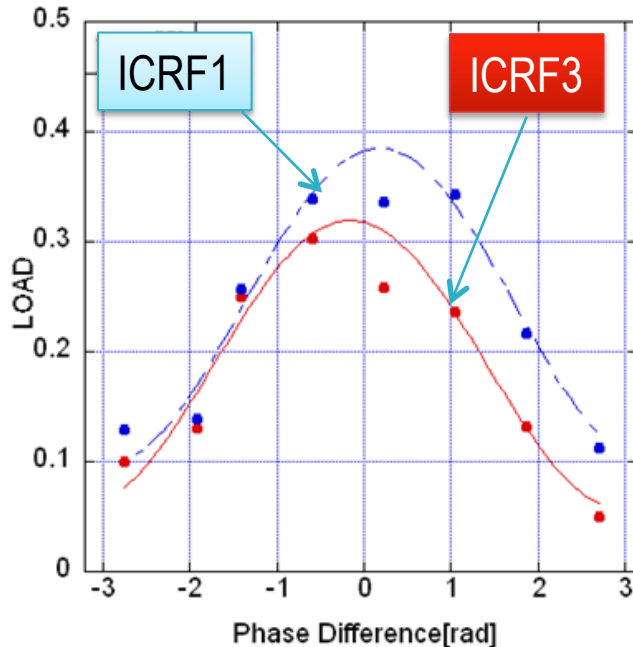


- 密度が上昇する位相の反位相において、軟X線発光強度の増加が観測された。
→ 昨年から本格稼働を始めたトムソン散乱計測により、**コア部の電子温度上昇**に起因していることが確かめられた。

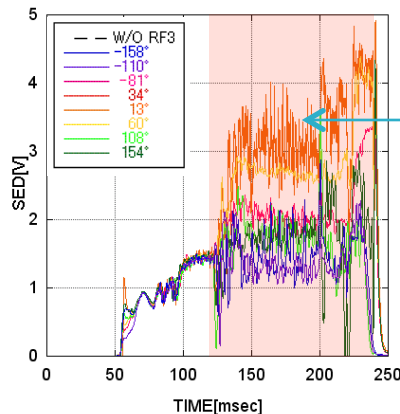


Loadingで見積もる位相差と波動伝搬の関係

Loadingの位相差依存性



- ICRF1とICRF3のloadingに正弦状の位相差依存性が得られた。→ 波動干渉の証拠
- 位相差 ~ 0 の時, loadingは両方とも最大となる。
→ セントラル側とアンカー側の両側へ波動が伝搬していると推測される。



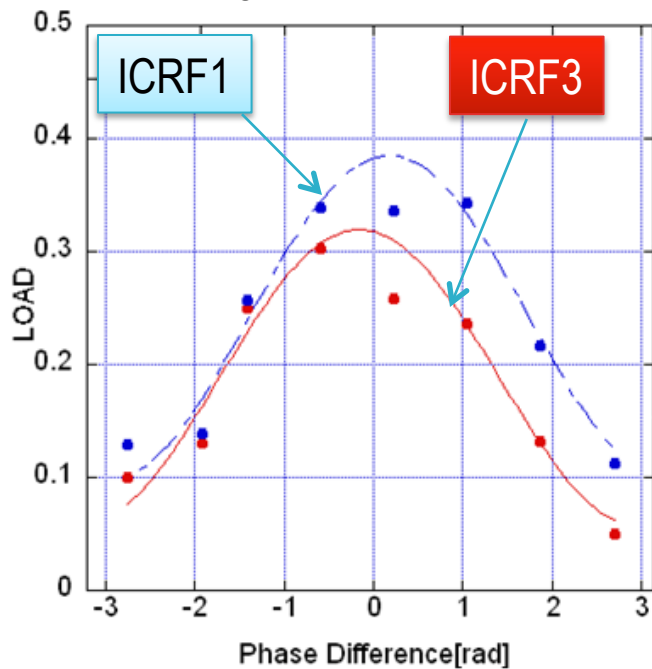
観測結果:

1. セントラルとアンカー部の線密度上昇
2. アンカー部の計測器 (Secondary electron detector) に高エネルギーイオンの増加を示唆する測定結果

Loadingで見積もる位相差と波動伝搬の関係2



Loadingの位相差依存性



- 位相差 $\sim\pi$ の時,
両方のloadingが共に最低
→ アンテナ間に定在波が形成されていると推測される.

観測結果:

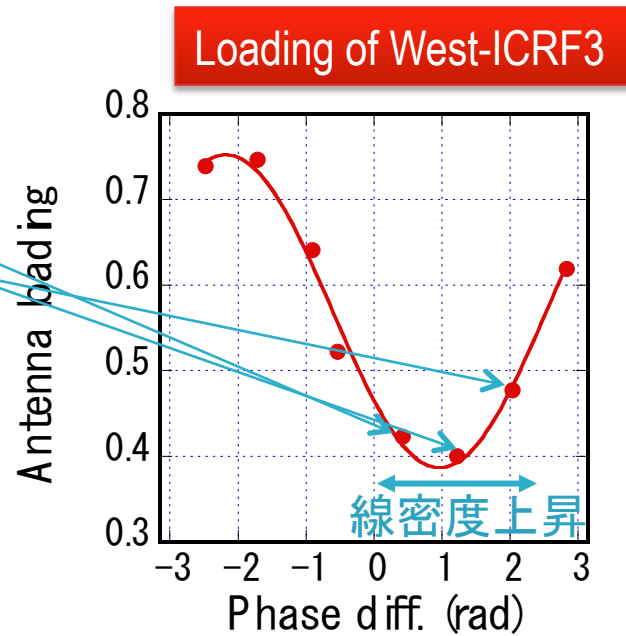
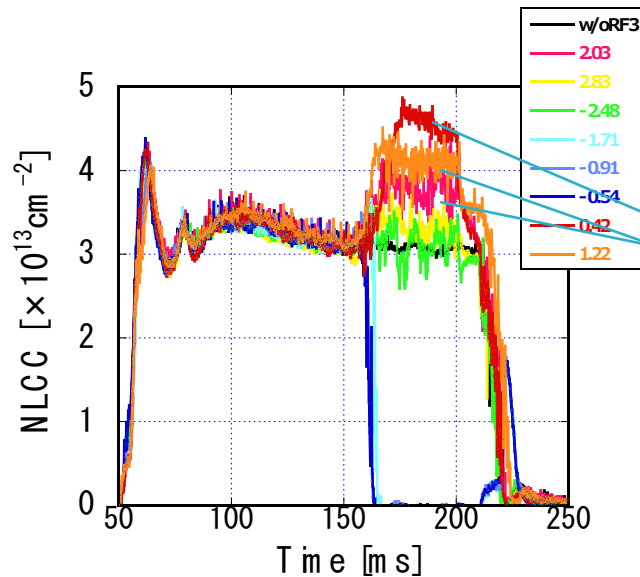
1. コア部の電子温度上昇

電子加熱が起きた機構は不明であり, 今後アンカ一部の計測器を拡充する予定.



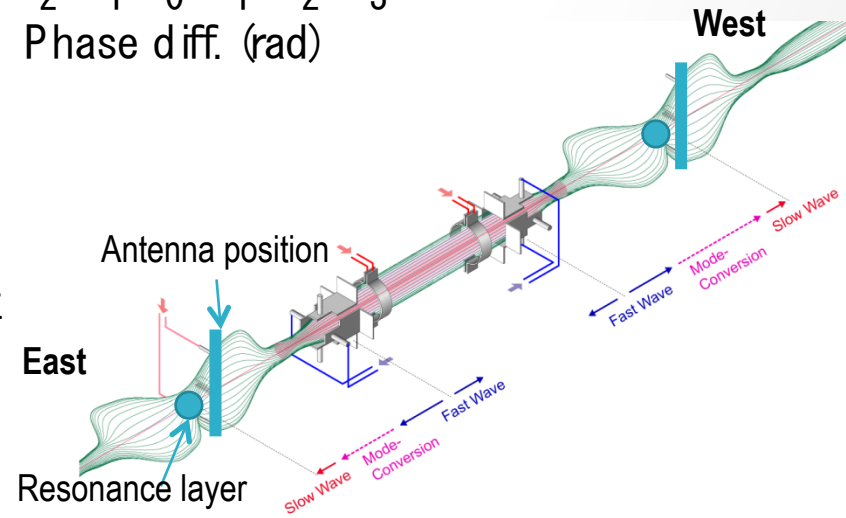
西側アンカー実験で得られた異なる位相関係

西側のType-IIIと Elliptic-arcアンテナを用いて同様の波動干渉実験を実施した。



- セントラル密度が上昇するときのloadingは東側とは逆で低い(アンテナ間に定在波).

→ 共鳴層側へのパワー注入が密度上昇に重要であることを示唆している？

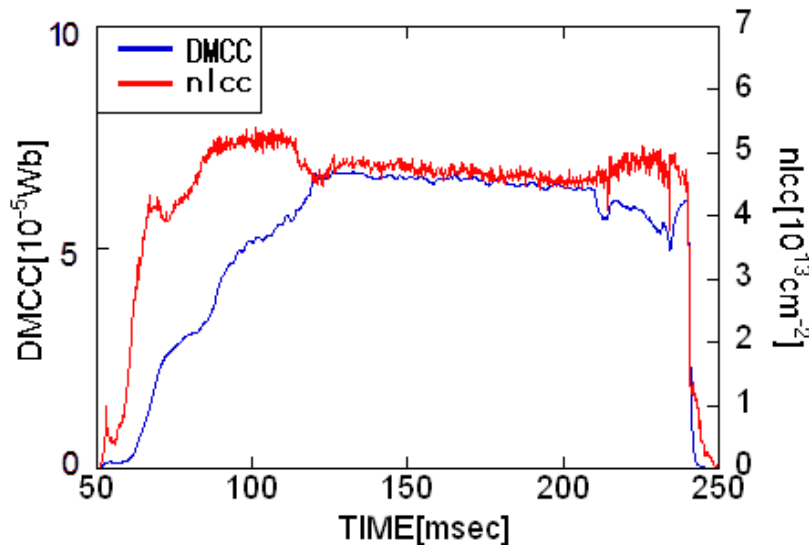


片側ICRF1系統を用いたプラズマ生成に成功



A-divertor計画では、片側のアンカー部(極小磁場配位)が磁気ダイバータ配位へ置換されるため、残る片側の極小磁場によるMHD安定性の確保のみで、現在と同等のプラズマを達成できるかを判断することが重要である。

→ 片側のICRF1(アンカー加熱を担う)を使わないという模擬実験を実施した。



- 線密度はほぼ典型値を達成.
- セントラルの反磁性量は典型値の8割程度.

積極的な波動干渉手法によりアンカー加熱を強化することで、比較的高いプラズマパラメータを有するプラズマの生成、維持に初めて成功した。

まとめ



GAMMA10(PDX)におけるダイバータ模擬実験で必要とされるアンカー加熱の強化、プラズマパラメータの拡張及び制御性の獲得を目的として、二つのICRF関連実験を行った。

1. アンカー一部加熱用に設置されていた片側bar-typeを両側elliptic arcsに改造

- Antenna loading ($P_{\text{net}} / P_{\text{in}}$)が <20%から >60%へ大幅に改善された。
- アンカー一部反磁性量に明瞭な増加が観測され、複雑な磁場形状(極小磁場配位)を有するアンカー一部における直接的なプラズマ加熱が実証された。

2. 軸方向に離れた二つのアンテナを用いた波動干渉実験

- アンテナ間の位相差により様々な影響が得られ、放電領域が拡張された。
 - 顕著な密度増加 → 端損失粒子束の増加によりE-divertor研究に有用
 - 片側ICRF加熱システムのみによるプラズマ生成 → A-divertor実現へのステップ
 - 電子加熱 → 未解明の加熱機構. 今後の課題
- 東側と西側の共鳴層とアンテナ位置の差異から、密度上昇に対する共鳴層側への波動伝搬の重要性が示唆された。