

GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験に おけるプラズマ高密度化の研究

若手研究会 in 那珂研究所 2013/03/05

筑波大学 プラズマ研究センター

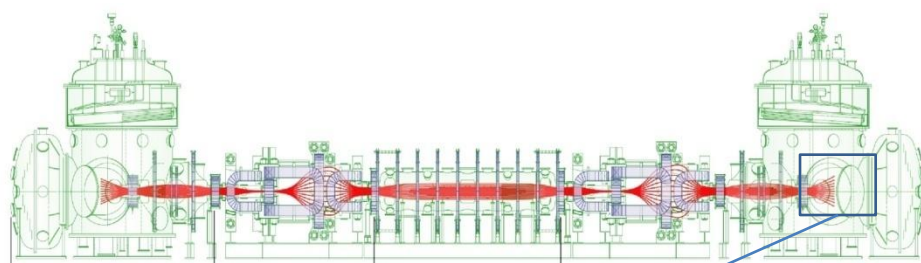
市村和也, 中嶋洋輔, GAMMA 10 Gr.

1. 研究背景・目的
2. 実験装置
3. エンド部イオン流の計測
4. 実験と結果
5. 考察
6. まとめ

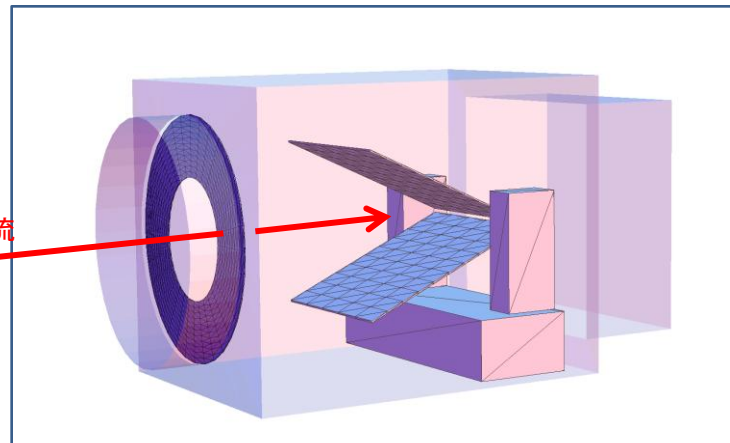
研究背景・目的

研究目的:

GAMMA 10/PDXにおけるダイバータ模擬実験に向け、
エンド部(D-モジュール)プラズマ密度を向上させる。



GAMMA 10全体図



D-モジュール構造図

GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬実験

西エンド部内に、昇降式のダイバータ模擬実験モジュール(D-モジュール)を設置。



開放端磁場構造により、エンド部へと損失してくるプラズマを利用したダイバータ領域プラズマ物理の研究。

エンド部におけるプラズマパラメータ:

イオン温度 100~400 eV

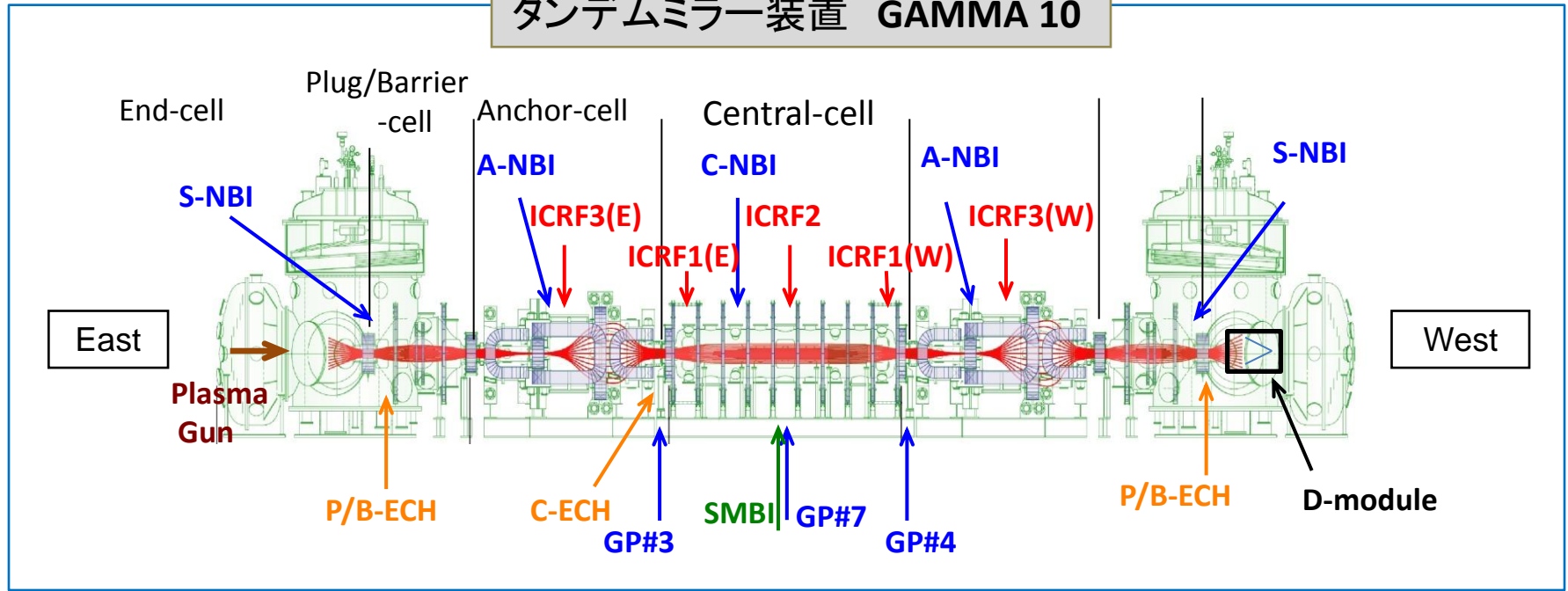
電子温度 20~50 eV

電子密度 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$

電子密度を $10^{17} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度まで増加させることで、トカマクSOL~ダイバータプラズマに近いパラメータを目指す。

実験装置

タンデムミラー装置 GAMMA 10



GAMMA 10 性能

装置全長:	27 m
磁場 B_{Max} :	3 Tesla
ICRF 加熱:	500 kW × 4
ECH 加熱:	400 kW × 3, 200 kW × 2
NBI 加熱:	1.5 MW × 4, 2.7 MW × 2
コア部電子密度 N_e :	~ 10^{18} m^{-3}
コア部イオン温度 T_i :	~10 keV
コア部電子温度 T_e :	~100 eV
プラズマ持続時間 T_d :	~0.4 sec

GAMMA 10の特徴

- ・ 大型装置である
- ・ 複数のミラー部位を持つ
- ・ イオン温度 \gg 電子温度
- ・ 閉じ込め電位の生成

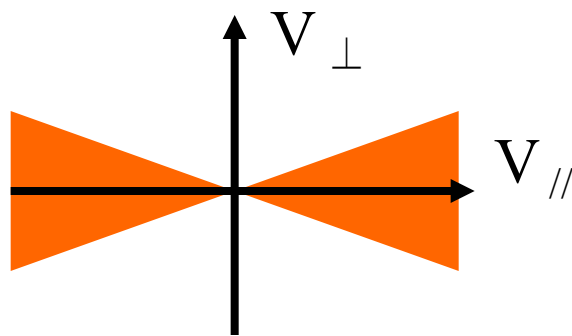


エンド部高密度化を目指して...

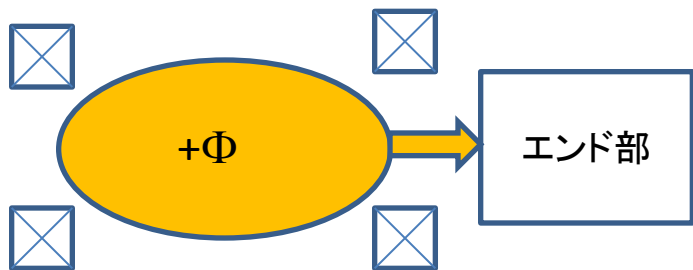
- ・ コア部密度をさらに上昇させる
- ・ エンド部への輸送を促進する

エンド部イオン流の計測

ミラー装置における端損失プラズマ



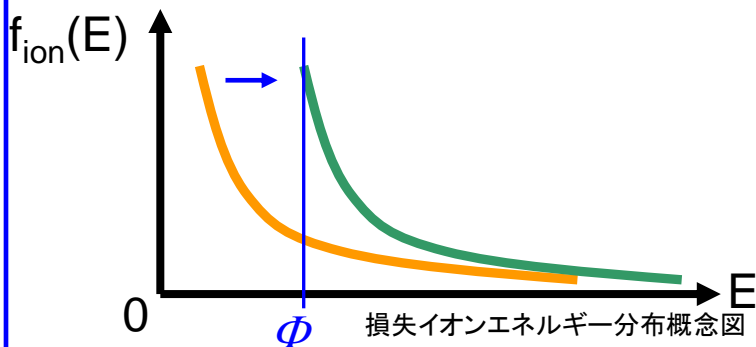
ロスコーン概念図



ミラー内のポテンシャルによるイオン加速

- 衝突などにより、プラズマ粒子がロスコーン内へ移動
 - ロスコーン(損失領域)内の粒子はミラー閉じ込めを受けず、磁力線方向(エンド部)へと損失
- 電子の損失速度 \gg イオンの損失速度
 - イオンが取り残され、プラズマと容器壁に電位差(プラズマ電位 Φ)が生まれる。
- 損失したイオンはプラズマ電位によって加速される
 - エンド部におけるイオンのエネルギー分布は、電位の分だけシフトする。

$$f_{ion}(E) = A \cdot \exp\left(\frac{-(E - e\Phi)}{T}\right)$$

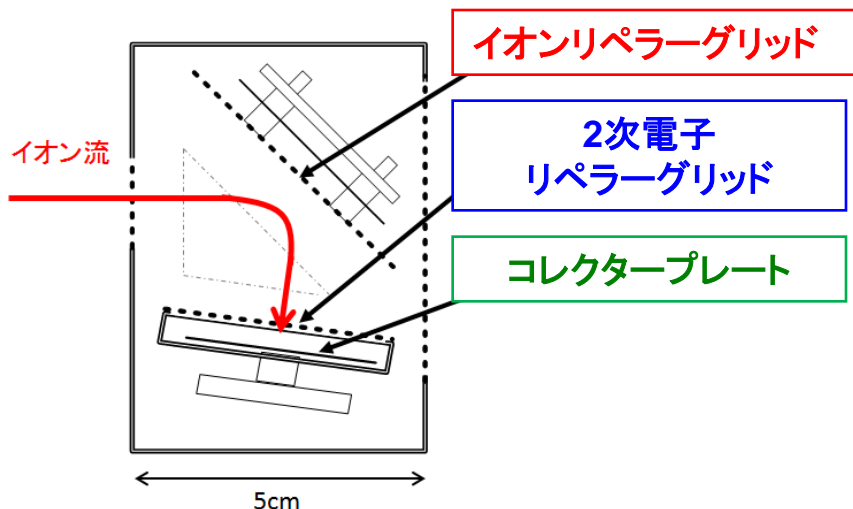


損失イオンエネルギー分布概念図

エンド部イオン流の計測

ELIEAによる計測

ELIEA装置模式図



ELIEAによるイオン流計測の方法

イオンリペラーグリッドに正のイオンリペラー電圧 (V_{IR}) を印加

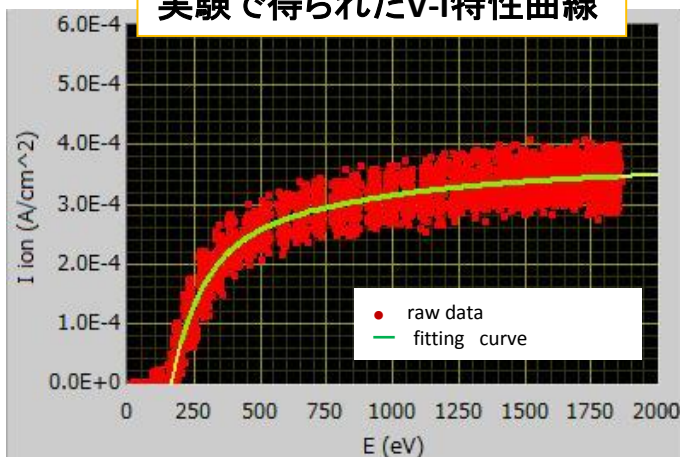
リペラー電圧を乗り越えられなかったイオンはイオンリペラーグリッドによって反射され、コレクタープレートへ導かれる

コレクタープレート上で、イオンは電流として検出される。

リペラー電圧を変化(掃引)することで、イオン電流とリペラー電圧のV-I特性を得る。

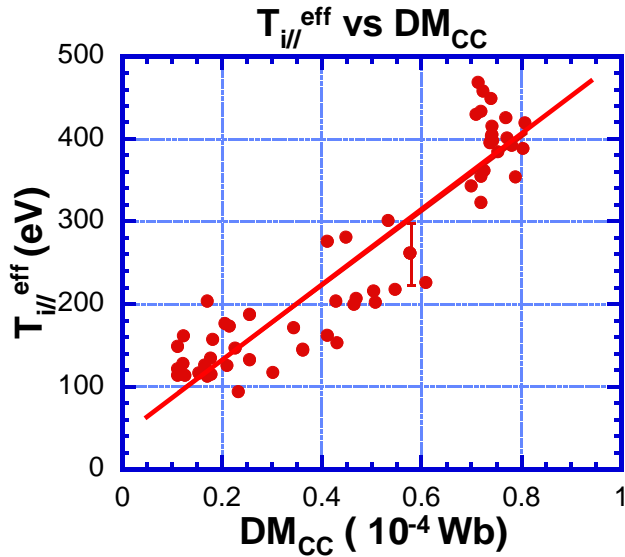
V-I特性から、イオン流のエネルギー分布(イオン温度)、電流密度を分析。

実験で得られたV-I特性曲線



実験と結果

エンド部イオン流とセントラル部プラズマの関係

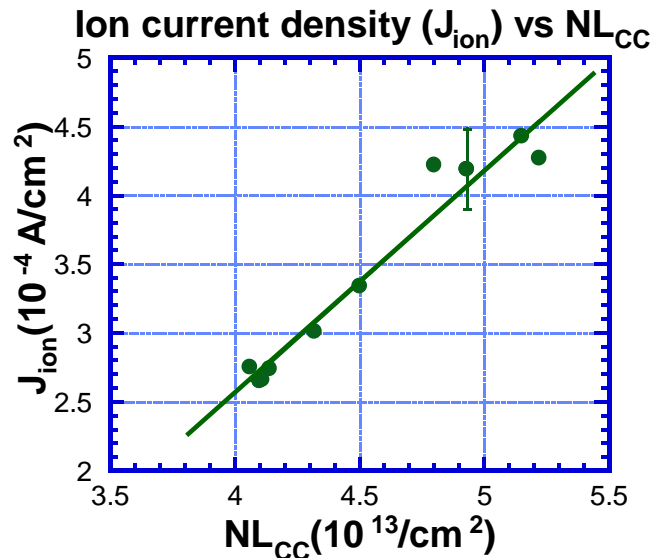


標準的なプラズマショット (ICRF1,2のみの加熱) において、イオン温度、電流密度とセントラル部プラズマの蓄積エネルギー (DM_{CC})、電子線密度 (NL_{CC}) 依存性を調べた

典型的な条件でのパラメータとしては、イオン温度400eV、イオン電流密度0.4mA/cm²であった。

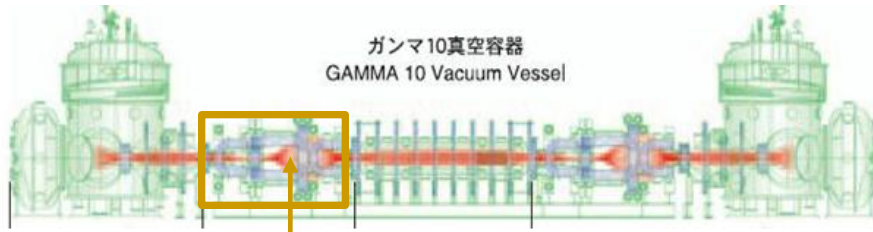
イオン温度: セントラル部反磁性量の増加でイオン温度上昇。

イオン電流密度: セントラル部密度が増加でイオン電流量増加。



エンド部イオン流の電流密度は、セントラル部プラズマの電子線密度とほぼ比例関係している。

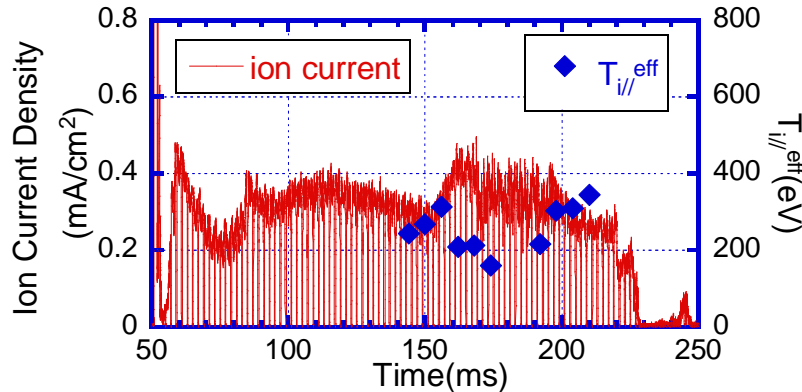
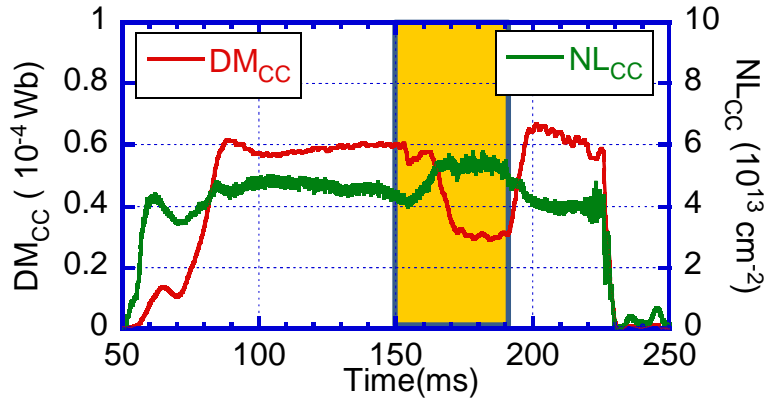
実験と結果



ICRF3

東アンカー部ICRF(RF3)重畳

東側アンカー部においてICRFによる加熱を行い、セントラル部プラズマ状態を改善させることでイオン電流密度の増加を目指す

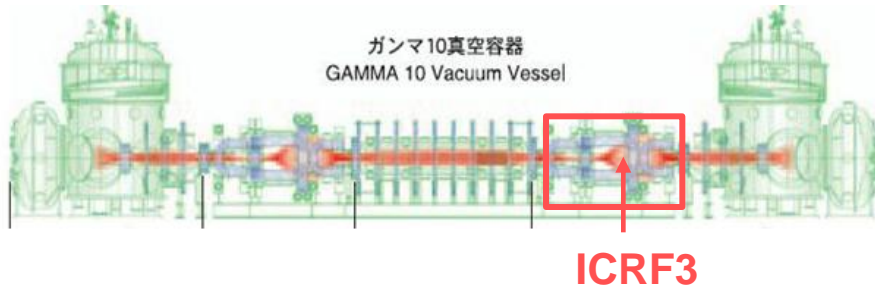


- ・セントラル部プラズマの密度が上昇
- ・セントラル部プラズマのエネルギーが減少

- ・エンド部イオン流の電流密度が増加
- ・エンド部イオン流のイオン温度が低下の傾向

イオン電流 vs NLスケーリングに従う、イオン電流の増加。

実験と結果



西アンカー部ICRF(RF3)重畳

西側アンカー部へのICRF加熱。

東側とは磁場との位置関係が異なっている



セントラル部への影響は小さいが、

エンド部電流密度への効果は大きい。

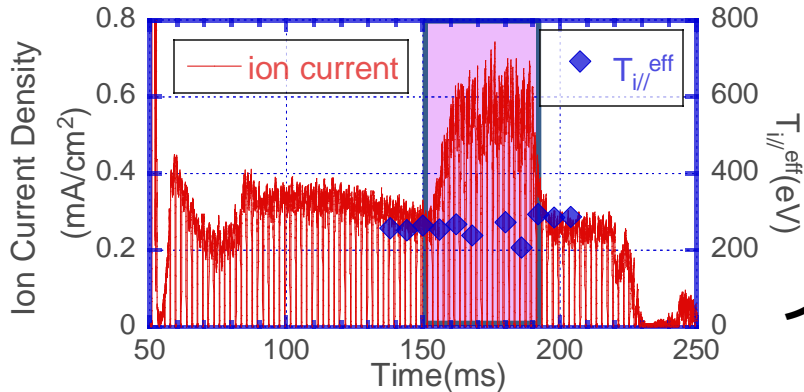
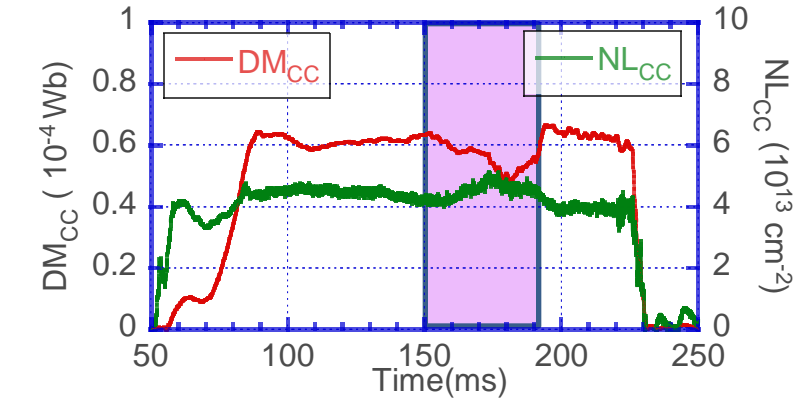
また、イオン温度はほとんど影響を受けていない。



従来の傾向(J_{ion} vs NL_{CC})と比較すると、

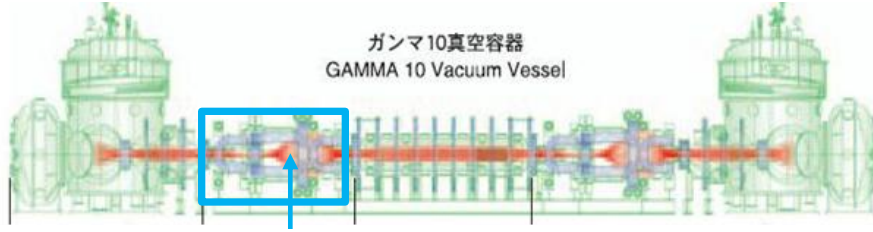
セントラル部プラズマの変化に対して

エンド部イオン流の変化が顕著(~2倍)である。



イオン電流 vs NLでみられたイオン電流の増加に加えて、他の効果の寄与が考えられる。

実験と結果

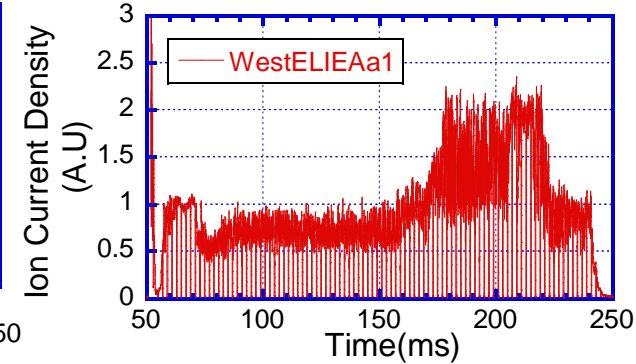
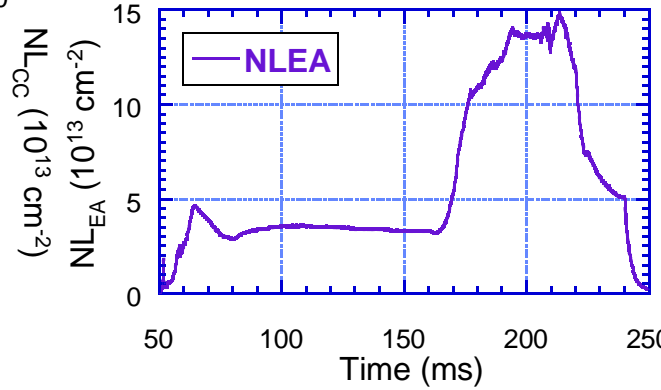
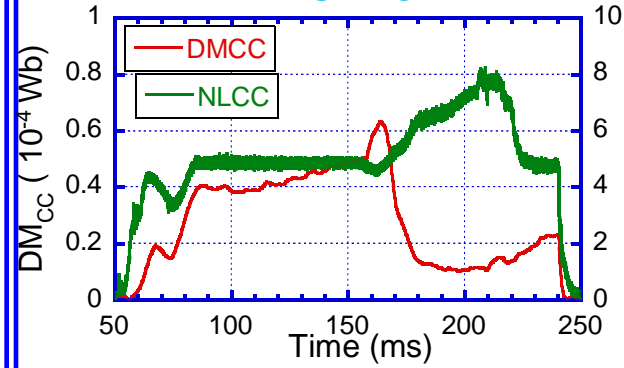


東アンカー部RF3+ガスパフ重畳

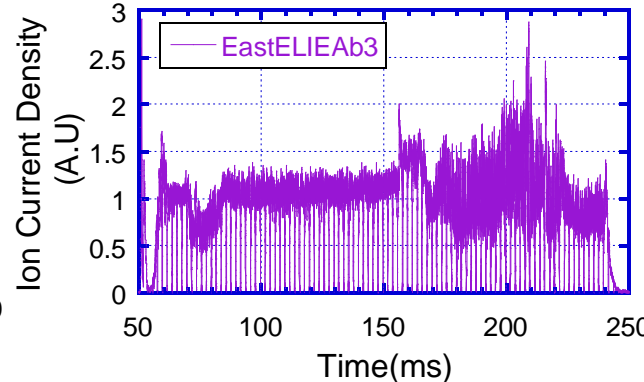
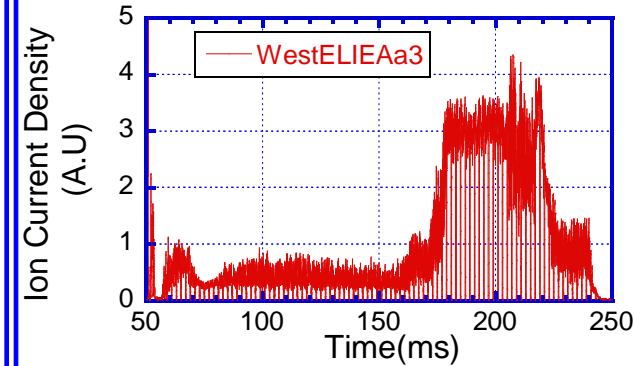
ICRF加熱と同時に、

アンカー部へガスパフによる粒子供給を行った。

ICRF3



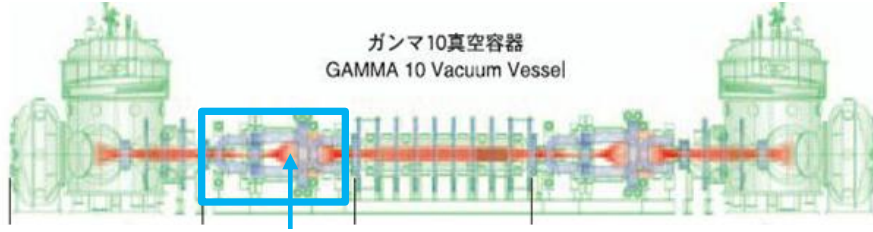
東アンカー部では電子線密度が3倍以上に上昇。セントラル部NL, エンド部フラックスも約2倍となった。



西エンドでは、径方向に外側のチャンネルで顕著なイオンフラックスの増加が見られた。

東エンドでは、加熱に伴い径方向外側のイオンフラックスがやや減少している。

実験と結果



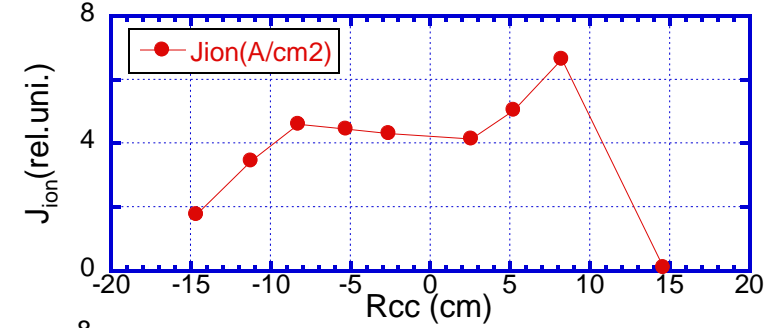
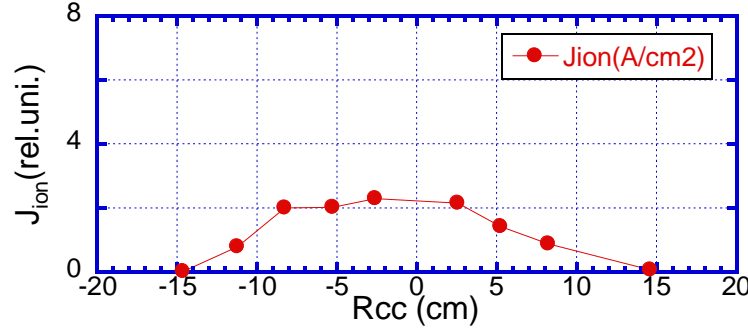
東アンカー部RF3+ガスパフ重畳

ICRF3

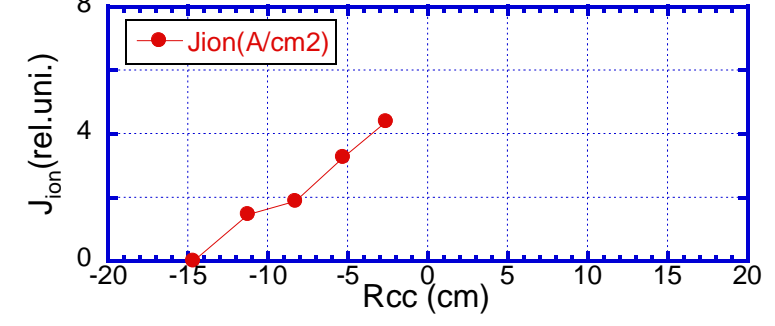
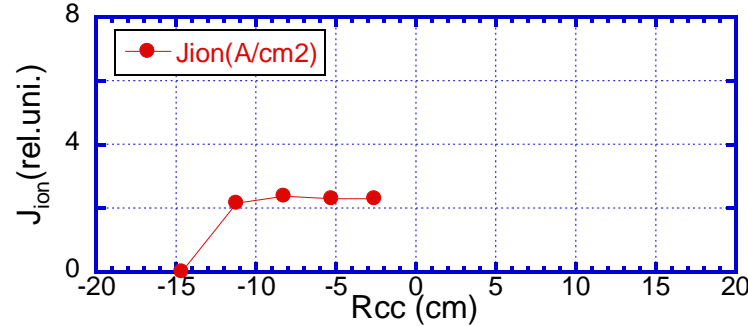
加熱印加前

加熱印加中

西エンド



東エンド



東西ELIEAの各チャンネル(西10ch、東5ch)を用いて、イオン電流密度の径方向分布を比較した。加熱中、西エンド部ではホローな、径方向外側にピークを持つイオンフラックスの分布が見られた。東エンド部では逆に、フラックスが周辺部で減少、中央部で増加し、分布がピーキングしていることがわかった。

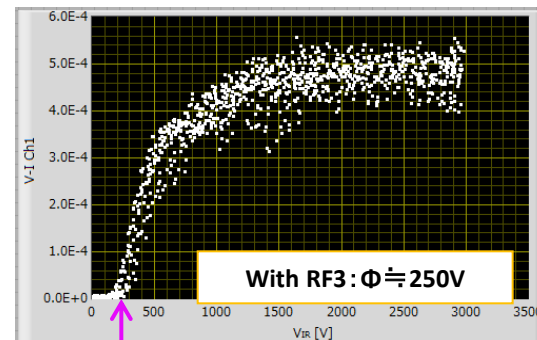
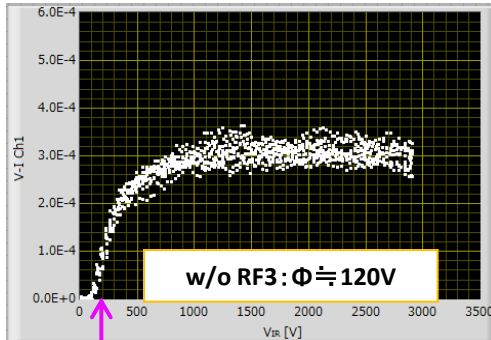
考察

東アンカー一部ICRF(RF3)重畳

RF3の加熱によって各セルのNLが上昇し、フラックスもNLと同様の割合で上昇していた。RF3によってプラズマ密度が上昇したことが、フラックス上昇の主な原因と考えられる。

西アンカー一部ICRF(RF3)重畳

加熱による各セルのNL上昇(約20~30%増)と比べ、フラックスの上昇が顕著(約2倍)であった。加熱による密度上昇に加えて、プラズマ電位の変化やAIC波動の励起など、イオンの損失を促す機構が働いたと考えられる。



西エンド部ELIEAによって測定したV-I曲線では、RF3によってプラズマ電位が上昇していることが確認された。

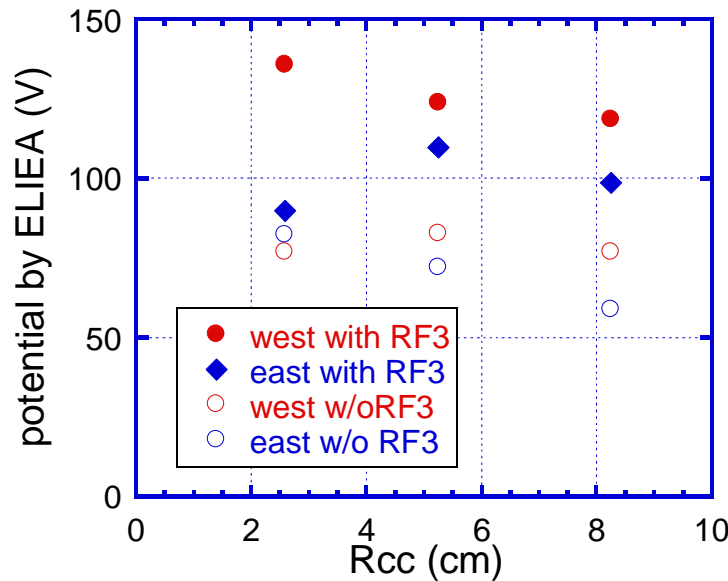
考察

東アンカー一部RF3+ガスパフ重畳

加熱によって東アンカー部の電子線密度が大きく上昇し、3倍以上の値となった。このとき西エンド部のイオンフラックスは軸上で約2倍、周辺部でおよそ6倍以上に増加した。



加熱と同時にガスパフによる粒子供給を行ったため、密度の増加はガスの届きやすい周辺部で強くなったと考えられる。



加熱あり・なしのプラズマにおいて、ELIEAによるプラズマ電位の径方向分布について調べた。

東エンド部側において、中央チャンネルの電位はRF3加熱中においてもほとんど上昇していない。

アンカー一部中心を加熱するよう、粒子供給や加熱を最適化することで、軸上においてもフラックスを増加できる可能性。

まとめ

1. GAMMA 10/PDXエンド部における端損失イオン流の高密度化には、コア部プラズマの密度上昇に加え、加熱による電位変化やAIC波動など、フラックス増大の効果が寄与する。
2. アンカー部へのICRF加熱(RF3)を用いてイオン電流密度を通常運転時の2倍に高めることに成功した。また、ガスパフによる粒子供給を併用することでさらにイオンフラックスを上昇させる結果が得られたが、効果はプラズマ周辺部側で強く、周辺部への効果は中心部への効果の約3倍であった。
3. ダイバータ模擬に向け、装置中心軸上で十分な密度上昇を得るためには、粒子供給法などを検討する必要があると考えられる。