

JT-60SAにおけるECCD/NBCD による電流分布制御の検討

矢嶋悟¹、高瀬雄一¹、辻井直人¹、諫山明彦²、若月琢馬²、鈴木隆
博²、井手俊介²

¹東京大学，²量研機構

第20回 QST若手研究会 / 2017年3月6-8日

発表概要

- 研究の目的
- ECH, ECCDの周波数・入射角度依存性
 - シナリオ2での吸収・電流駆動特性
 - シナリオ5-2での吸収・電流駆動特性
- NBを用いた電流分布制御
 - ビームの種類・軌道について
 - シナリオ5-2に類似するプラズマでの電流駆動特性
 - 高BS電流プラズマにおける誘導電流の制御

発表概要

- 研究の目的
- ECH, ECCDの周波数・入射角度依存性
 - シナリオ2での吸収・電流駆動特性
 - シナリオ5での吸収・電流駆動特性
- NBを用いた電流分布制御
 - ビームの種類・軌道について
 - シナリオ5に類似するプラズマでの電流駆動特性
 - 高BS電流プラズマにおける誘導電流の制御

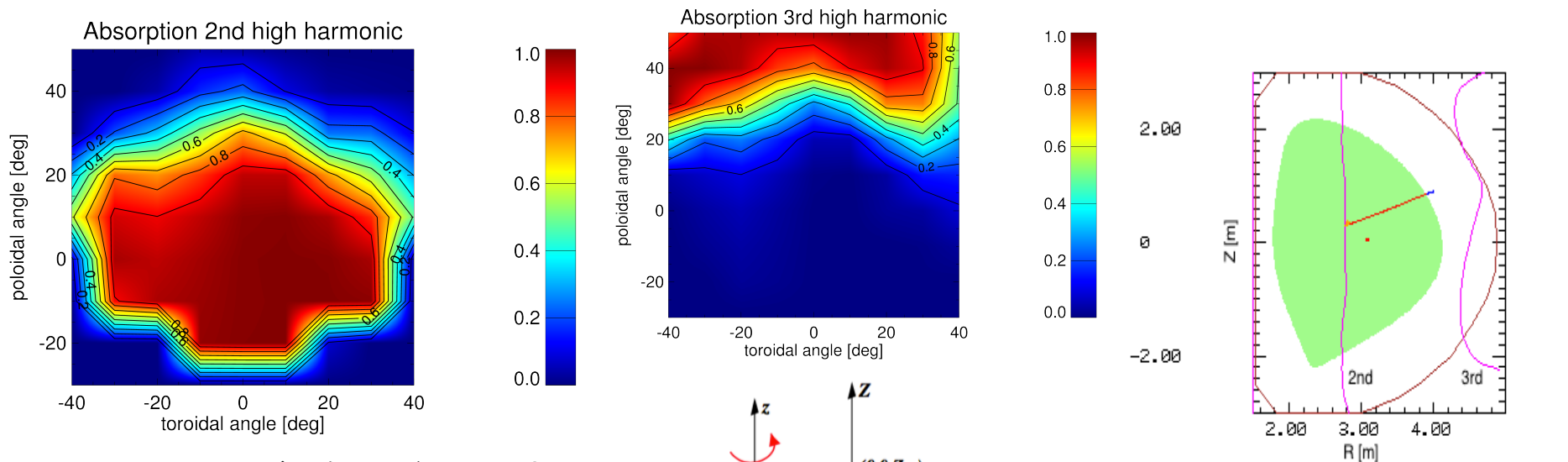
研究の目的

- JT-60SAの研究目標は高規格化ベータプラズマの定常化であり、プラズマの維持のためには中性粒子ビーム(NB)及び電子サイクロトロン波(ECW)を用いた加熱(H)・電流駆動(CD)分布の制御が必須になっている。
- 電子サイクロトロン波(ECW)は可動ミラーの反射により、トロイダル・ポロイダル入射角度の調整ができるよう設計されており、数値計算を用いて将来的に実験データと比較可能な吸収・電流駆動の角度依存性を調べる。(EC-Hamamatsuコード)
- プラズマの位置を調整することで、固定されている中性粒子ビーム(NB)の電流駆動分布を変化させつつ、高ベータ・高自律性トカマクの制御方法を模索する。(非定常TOPICSコード)

発表概要

- 研究の目的
- ECH, ECCDの周波数・入射角度依存性
 - シナリオ2での吸収・電流駆動特性
 - シナリオ5での吸収・電流駆動特性
- NBを用いた電流分布制御
 - ビームの種類・軌道について
 - シナリオ5に類似するプラズマでの電流駆動特性
 - 高BS電流プラズマにおける誘導電流の制御

シナリオ2(トロイダル磁場: 2.25 T)では、138 GHzのECWによる第2高調波吸収が効果的に現れる。



トロイダル角 η_1 が正 \rightarrow 反時計回り
ポロイダル角 η_2 が正 \rightarrow 下向き

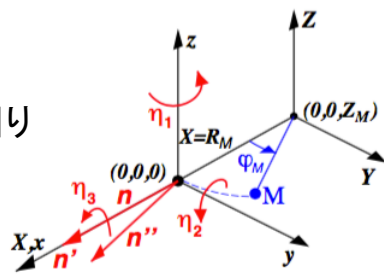
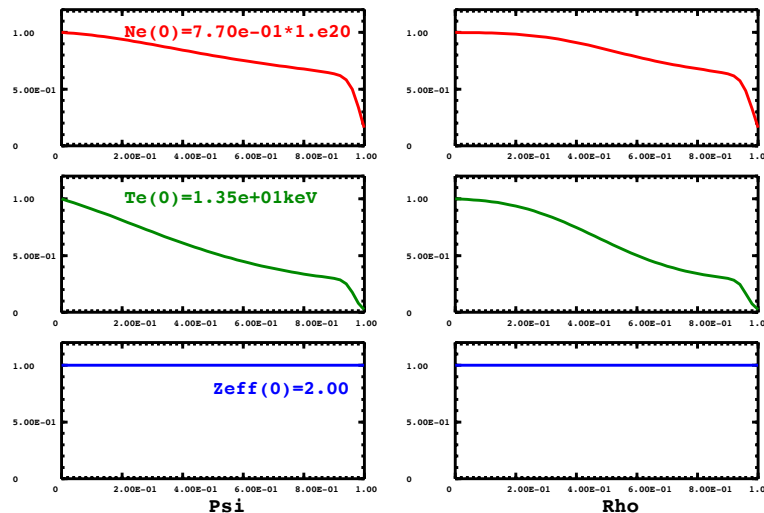


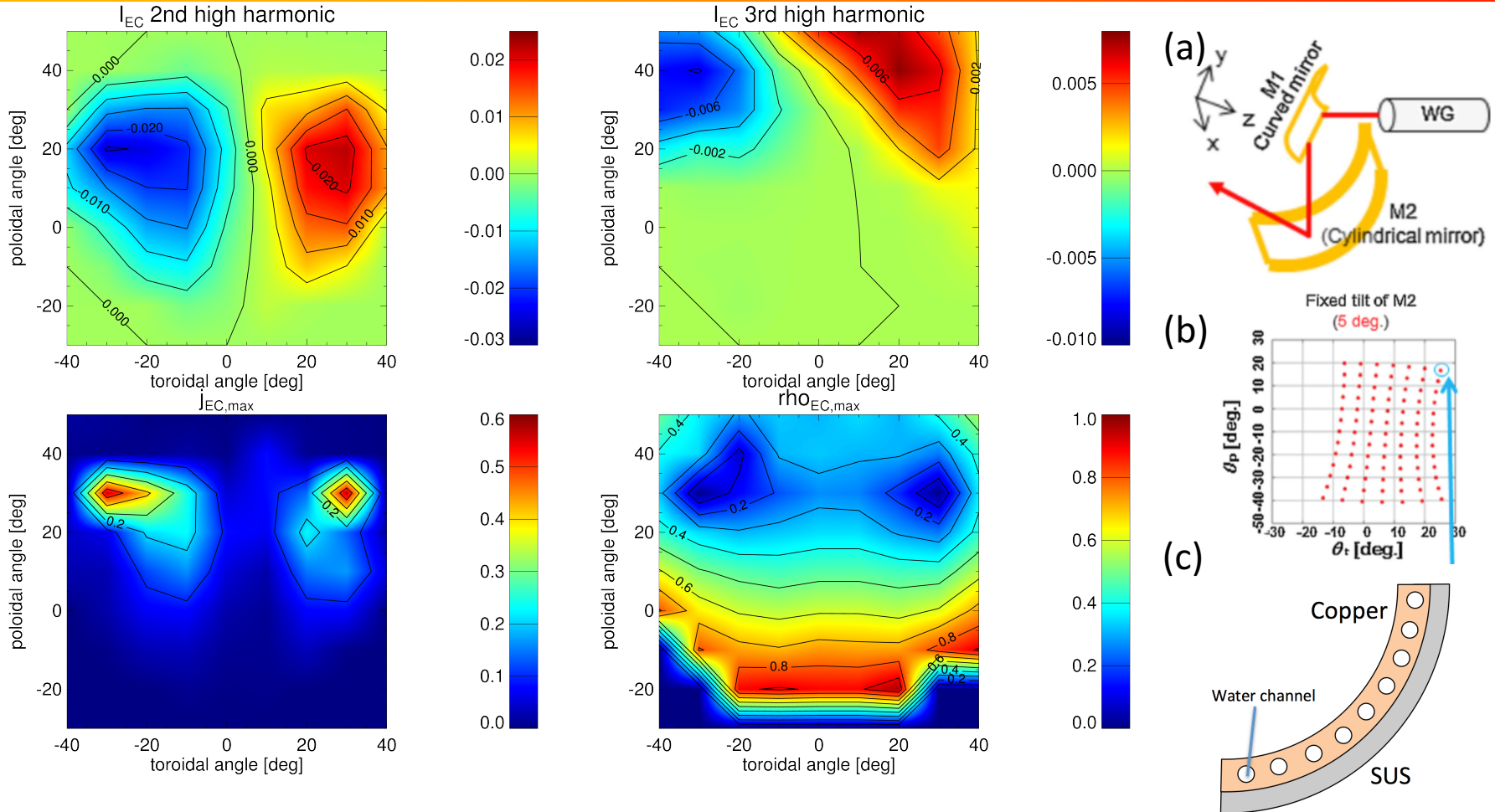
図 A.3 ビーム入射方向:鳥瞰図

<https://www.jt60.naka.qst.go.jp/twiki/bin/view/Code/WebHome/rsrc/Code/WebHome/ECH/ECCD プログラム編 20160318.pdf> より抜粋

- 幅広い磁気面に吸収されるためには、ECHの共鳴面がプラズマ中心に近い必要がある。
- ECWは実際に110 GHzと138 GHzの2周波数が設計されている。



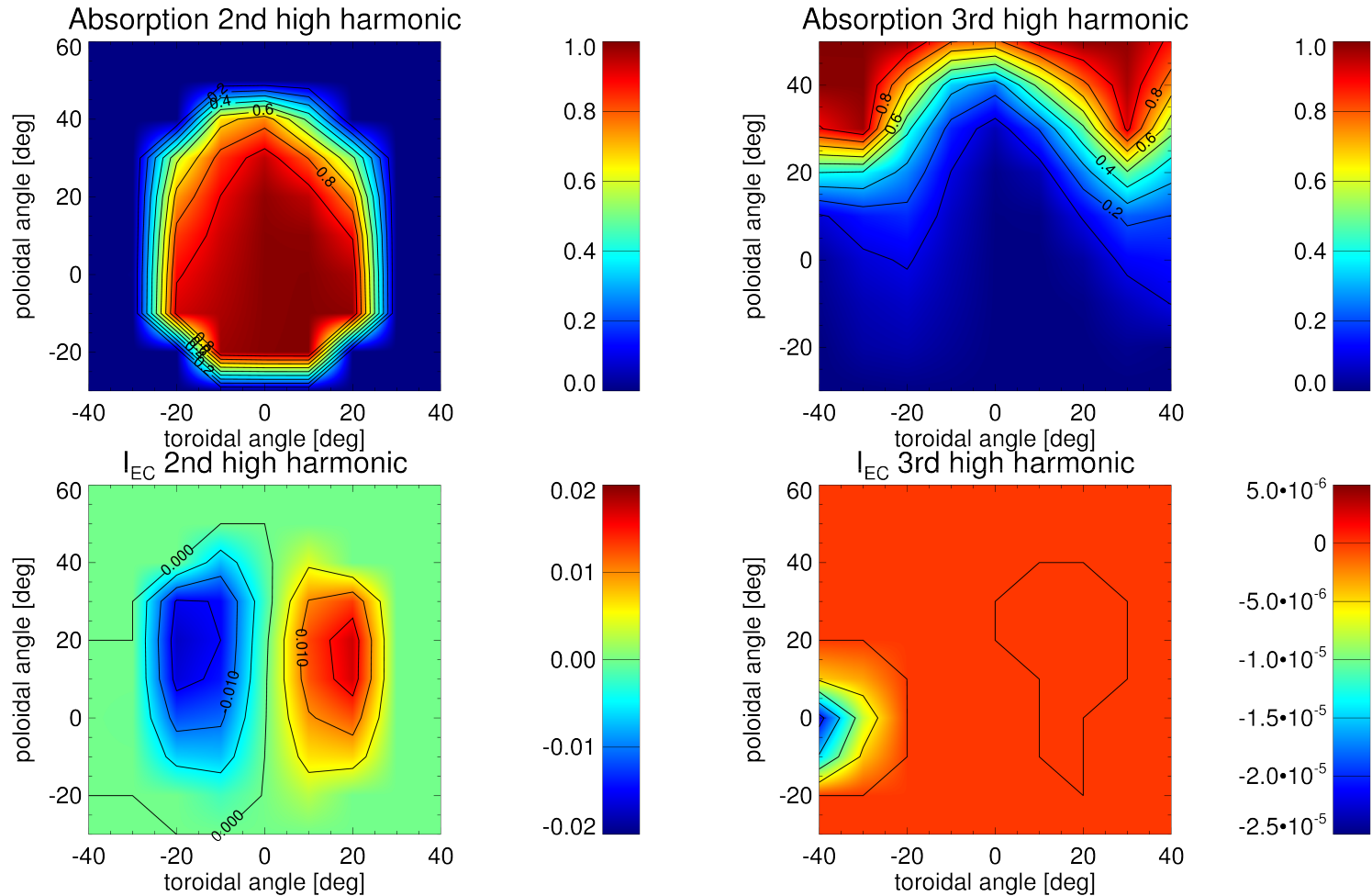
第二高調波共鳴による電流駆動効率の最適な入射角は順方向の電流について $(\theta_t, \theta_p) = (30^\circ, 20^\circ)$ 逆方向電流について $(\theta_t, \theta_p) = (-30^\circ, 20^\circ)$ 。



- ただし、実際のミラーを使った入射については設計上、トロイダル角でおおよそ $-5 \sim +25^\circ$ の範囲での入射が予定されている。

T. Kobayashi et al. / Fusion Engineering and Design
 “Mechanical and quasi-optical design of ECH/ECCD launcher for JT-60SA”より引用 (図(a), (b), (c))

シナリオ5-2(トロイダル磁場: 1.62 T)では、110 GHzのECWによる第2高調波吸収が効果的に現れる。



- 一方高ベータで運転するシナリオ5などは比較的低磁場(1.62 T)になっており、110 GHzの第二高調波が遜色ない吸収・電流駆動特性を持つ。

発表概要

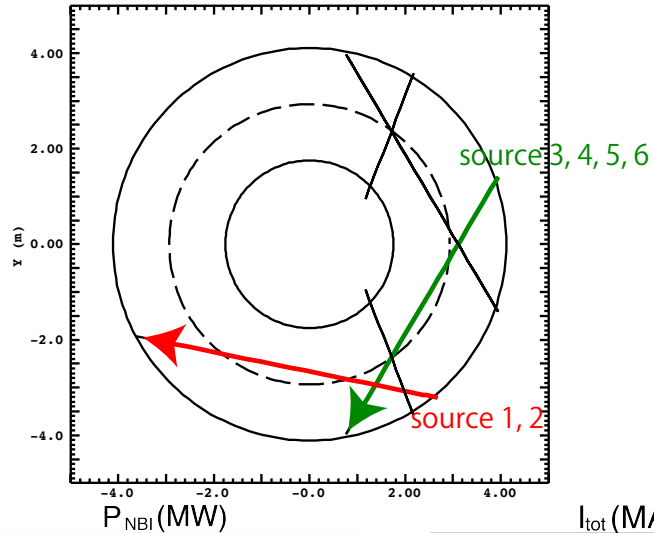
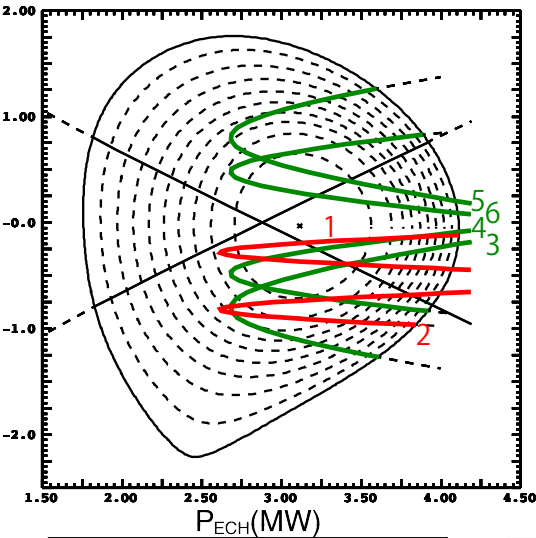
- 研究の目的
- ECH, ECCDの周波数・入射角度依存性
 - シナリオ2での吸収・電流駆動特性
 - シナリオ5-2での吸収・電流駆動特性
- NBを用いた電流分布制御
 - ビームの種類・軌道について
 - シナリオ5-2に類似するプラズマでの電流駆動特性
 - 高BS電流プラズマにおける誘導電流の制御

NBはトロイダル方向に沿った500 keVのN-NB及び85 keVのP-NBを考慮する。

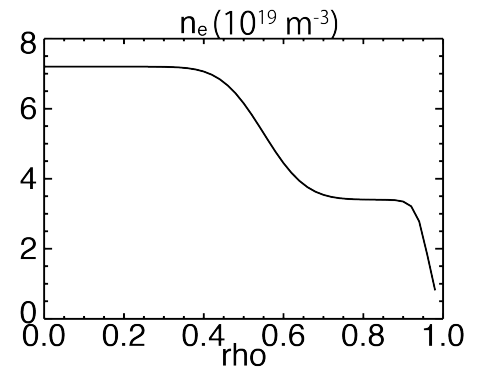
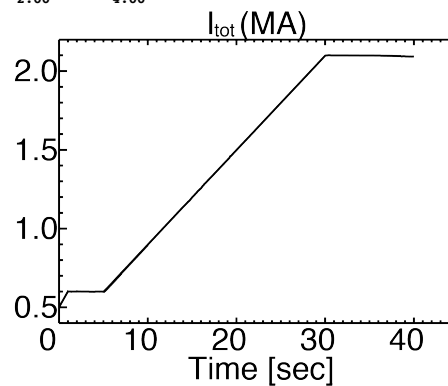
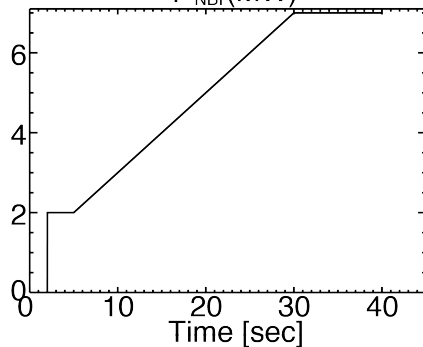
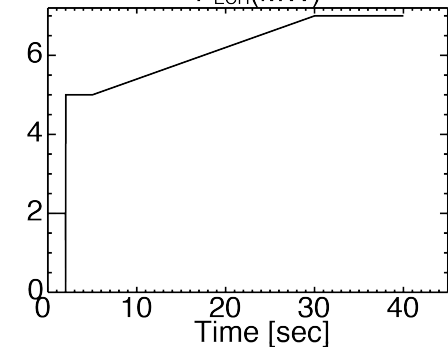
BEAM TRACE

SOURCE 1	: E = 500.00 (keV)	/ X = 26.696 (m)	/ Y = -8.098 (m)	/ Z = 0.591 (m)	/ T1= 11.50 (deg)	/ T2= 2.91 (deg)
SOURCE 2	: E = 500.00 (keV)	/ X = 26.696 (m)	/ Y = -8.098 (m)	/ Z = -1.691 (m)	/ T1= 11.50 (deg)	/ T2= -2.91 (deg)
SOURCE 3	: E = 85.00 (keV)	/ X = 4.723 (m)	/ Y = 2.741 (m)	/ Z = 0.115 (m)	/ T1= -59.50 (deg)	/ T2= 10.90 (deg)
SOURCE 4	: E = 85.00 (keV)	/ X = 4.723 (m)	/ Y = 2.741 (m)	/ Z = 0.115 (m)	/ T1= -59.50 (deg)	/ T2= 7.10 (deg)
SOURCE 5	: E = 85.00 (keV)	/ X = 4.723 (m)	/ Y = 2.741 (m)	/ Z = -0.115 (m)	/ T1= -59.50 (deg)	/ T2= -10.90 (deg)
SOURCE 6	: E = 85.00 (keV)	/ X = 4.723 (m)	/ Y = 2.741 (m)	/ Z = -0.115 (m)	/ T1= -59.50 (deg)	/ T2= -7.10 (deg)

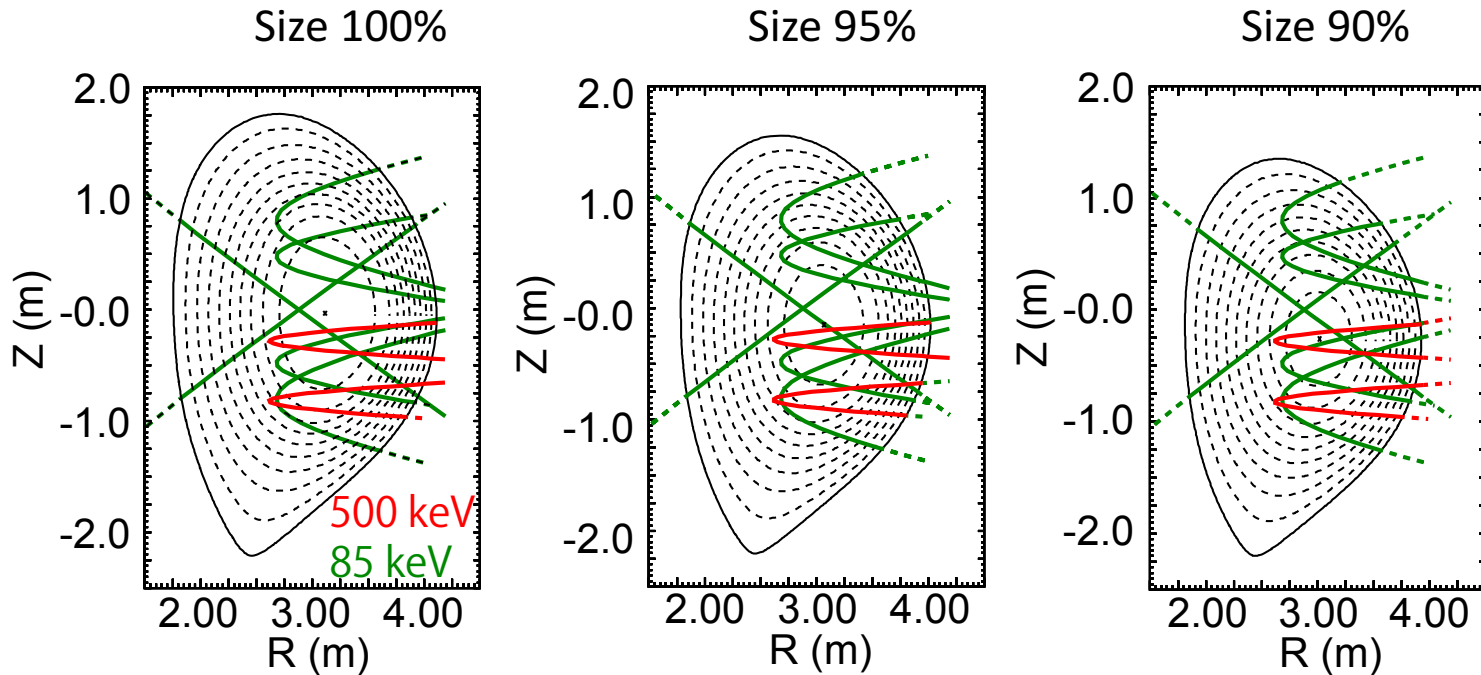
plasma current : clockwise



	ビーム出力
500 keV	2.5 MW / ray
85 keV	0.5 MW / ray
total	7 MW



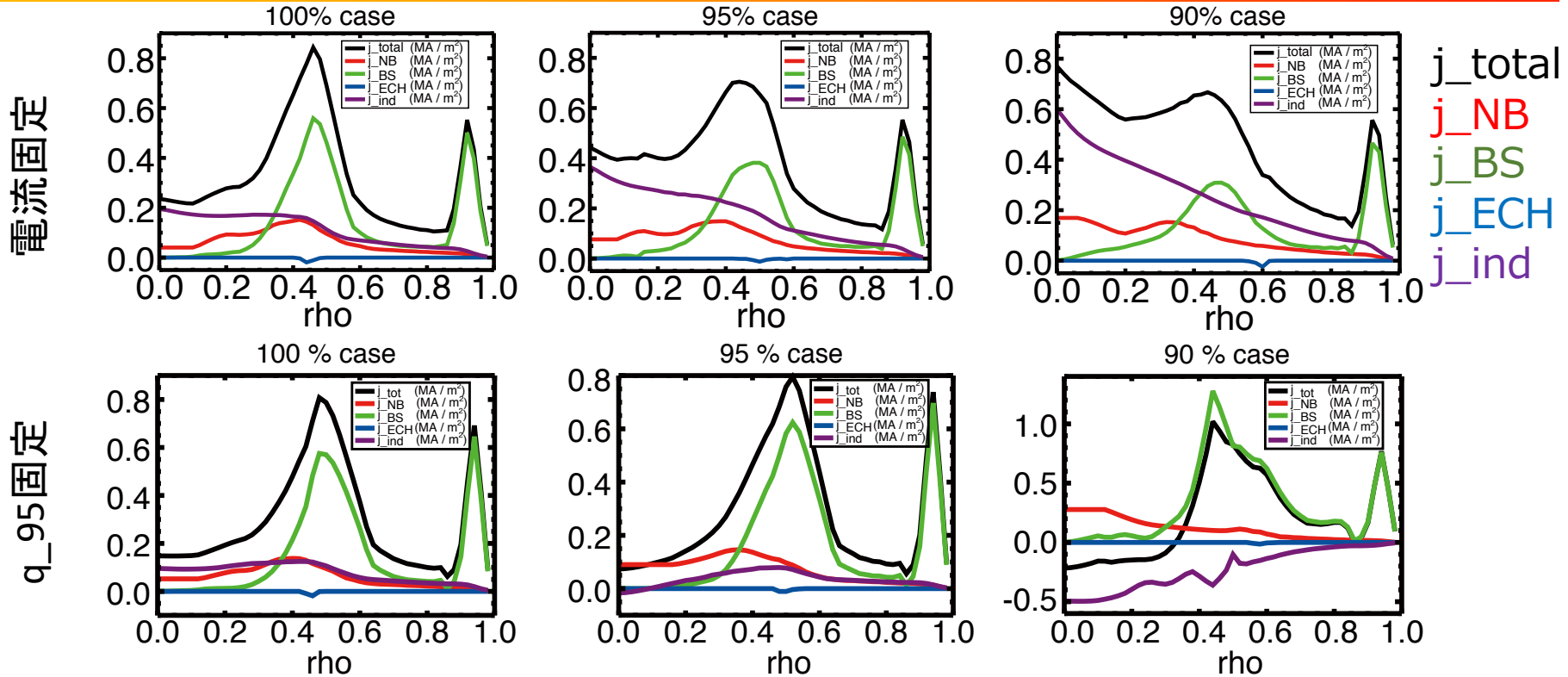
プラズマをヌル点固定で相似に縮小すると、500 keVビームの一つが磁気軸近傍を通過するようになる。



パラメータ(100 % case)	
中心電子温度 [keV]	3.67
中心イオン温度 [keV]	3.32
中心電子密度 [10^{19} m^{-3}]	7.20
プラズマ電流 [MA]	2.10
トロイダル磁場 [T]	1.73
大半径 [m]	2.93
小半径 [m]	1.17
楕円度	1.71

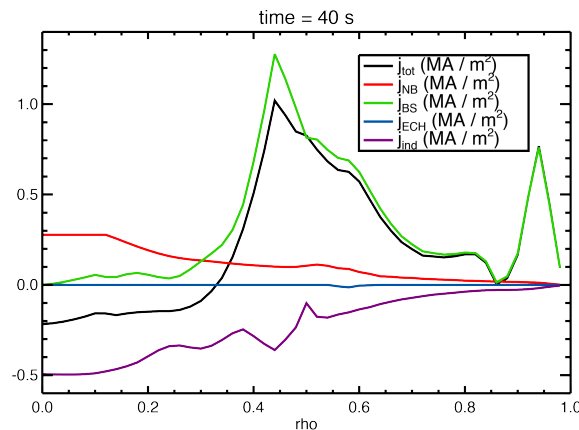
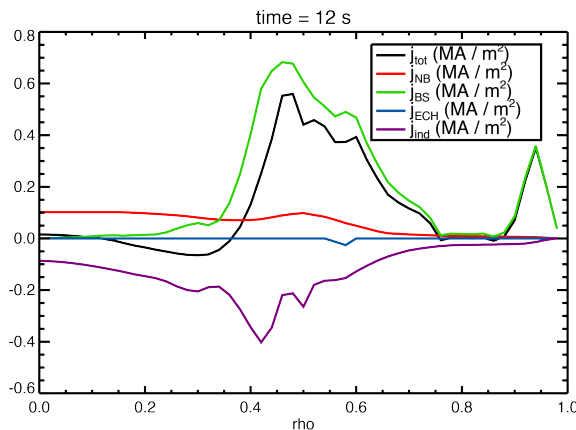
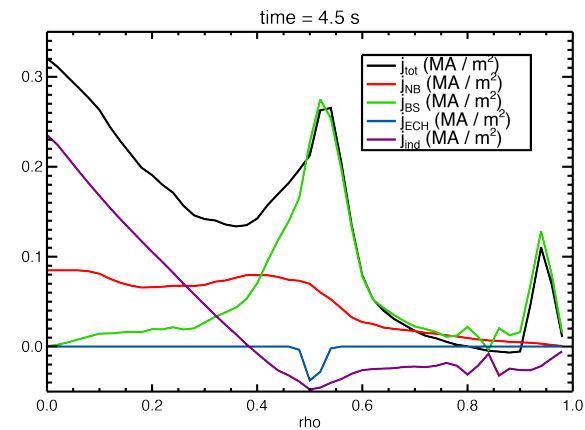
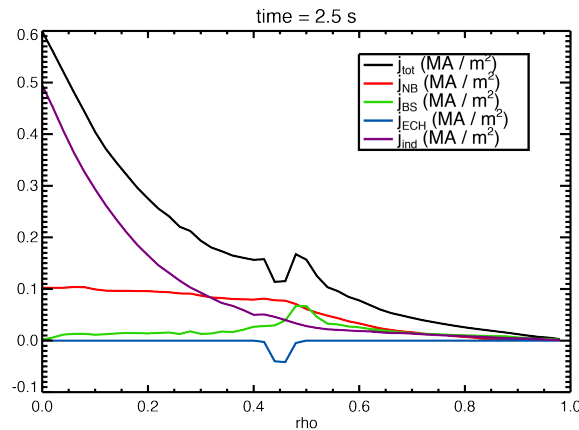
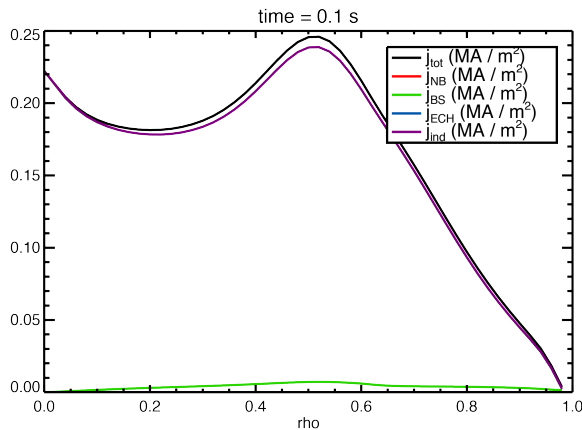
- 完全非誘導立ち上げではNBによる定常的な電流駆動が重要になる。
- NBはECHとは異なり軌跡の自由度がなく、代わりにプラズマ中心位置を移動させることによるq分布の制御が考えられる。

q_95固定でポロイダル断面を縮小すると、局所的なBS電流が負の電流分布をもたらすことが示唆された。



- プラズマを縮小する際に電流を面積に応じて縮小させたもの(q_95固定)では、大きさ90%に縮小した場合にプラズマ中心部($\rho < 0.3$)で電流密度が負になる領域がある。

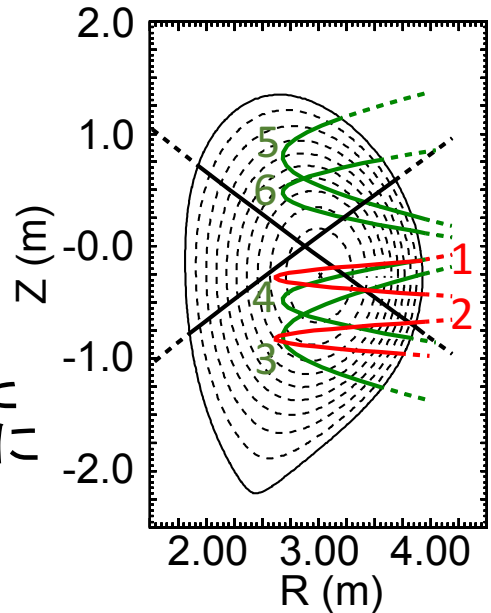
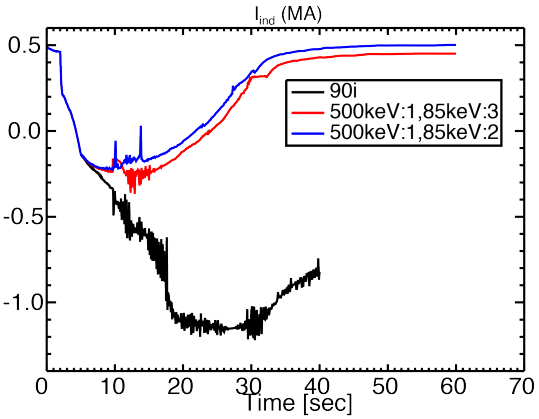
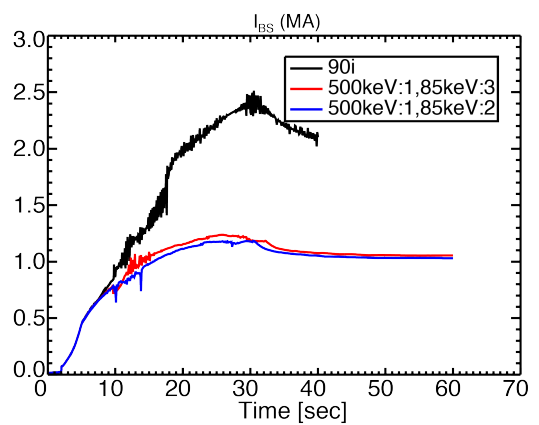
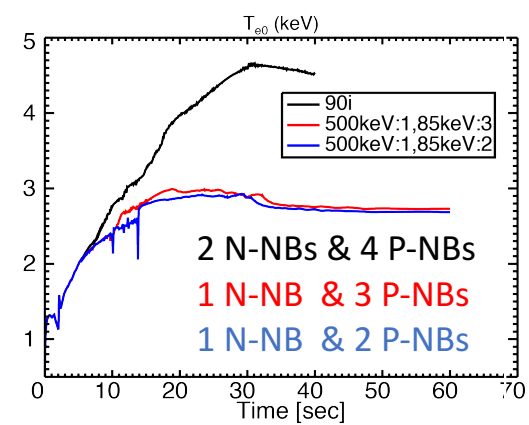
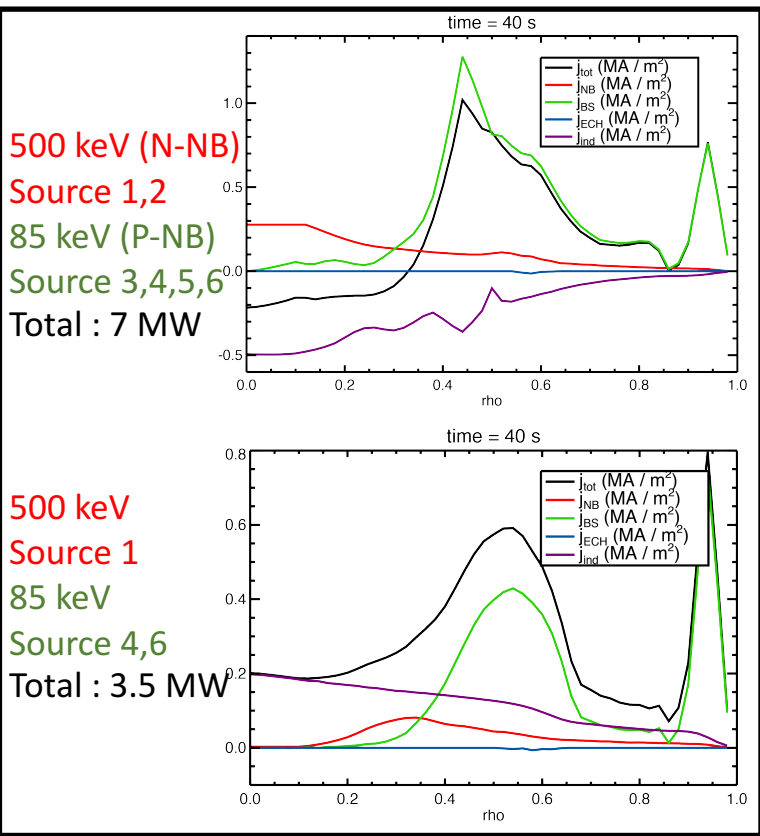
BS電流が大きく立ち上がり始めると、次第に大域的な負の誘導電流が立ち上がる。



j_{total}
j_{NB}
j_{BS}
j_{ECH}
j_{ind}

- 4.5 sに $\rho = 0.8 \sim 0.9$, 12 s以降には $\rho < 0.3$ の領域で合計の電流密度が負になった
- 強い圧力勾配により駆動されるBS電流が過剰に流れていると考えられる。

合計ビームパワーを下げることで、BSによる誘導電流を制御できることが確認された。



- 圧力(温度)勾配が緩和され、過剰なBS電流が流れなくなった結果として誘導電流が q_{95} 固定でも正の値に収束するようになる。

今後の課題

- ECW
 - 高密度領域における屈折の効果
 - ビーム幅を考慮した特性の比較
- NB
 - プラズマ形状等の補正(セパトリクスを固定し、ダイバータへの負荷も適正に保てる状態に近づける。)
 - より高ベータで維持(ビームパワーの増強等)
 - 圧力分布・電流分布制御方法の多様化
- 共通: 他シナリオで想定されるパラメータ(定常/準定常状態)での加熱・電流駆動分布の制御

まとめ

- 高トロイダル磁場のシナリオ2では、ミラーの設計を考慮すると138 GHzのECによる第二高調波吸収が主となっており、シナリオ5ではトロイダル磁場の関係で110 GHzのECが同様の吸収特性を示す。
- ポロイダル断面をヌル点固定で相似に縮小(90 %迄)させ、q分布を有意に変化させることが可能であることを確認した。
- q₉₅固定でポロイダル断面を縮小すると、過剰なBS電流が負の電流分布をもたらすことが示唆された。
- ビームパワーを下げることで、BSによる負の誘導電流を抑制できることが確認された。

謝辞

- Work supported by

トカマク炉心プラズマ共同研究「JT-60SAの加熱
電流駆動特性評価」(H 27 年 - H 28 年)