

球状トカマク TST-2 における低域混成波を用いた非誘導プラズマ立ち上げ

辻井直人、矢嶋悟、高瀬雄一、江尻晶、富樫央、吉田裕亮、
高橋航、戸井田和弥、山崎響、北山明親、佐藤暁斗、
武井悠稀、田尻芳之、松本直希、Benedikt Roidl

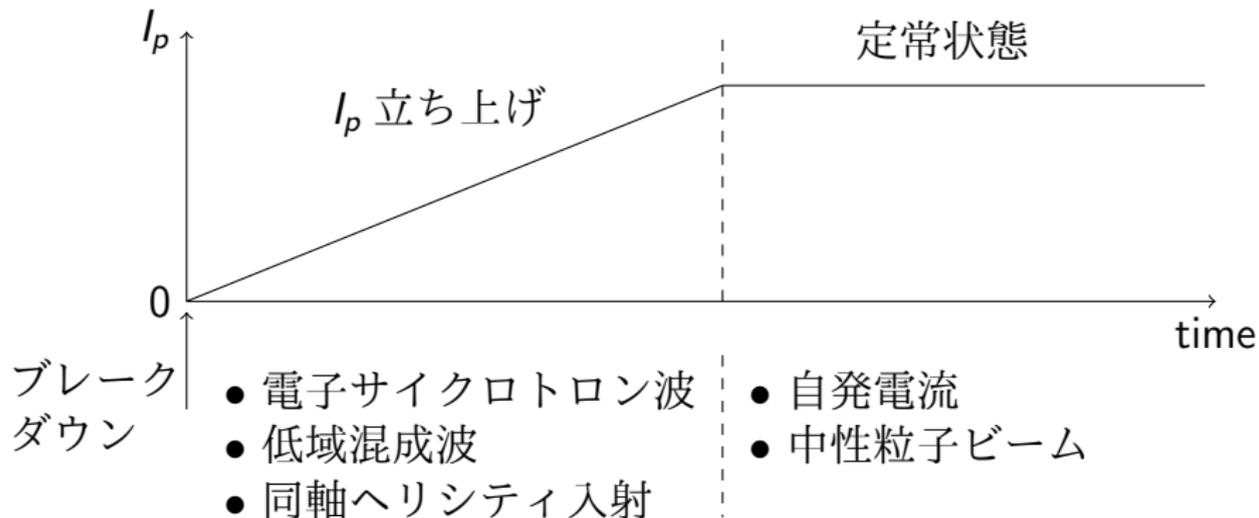
東京大学

第 20 回 QST 若手研究会 / 2017 年 3 月 6-8 日



球状トカマクにより効率の良い核融合炉を実現するためには、中心ソレノイドを除去する必要がある

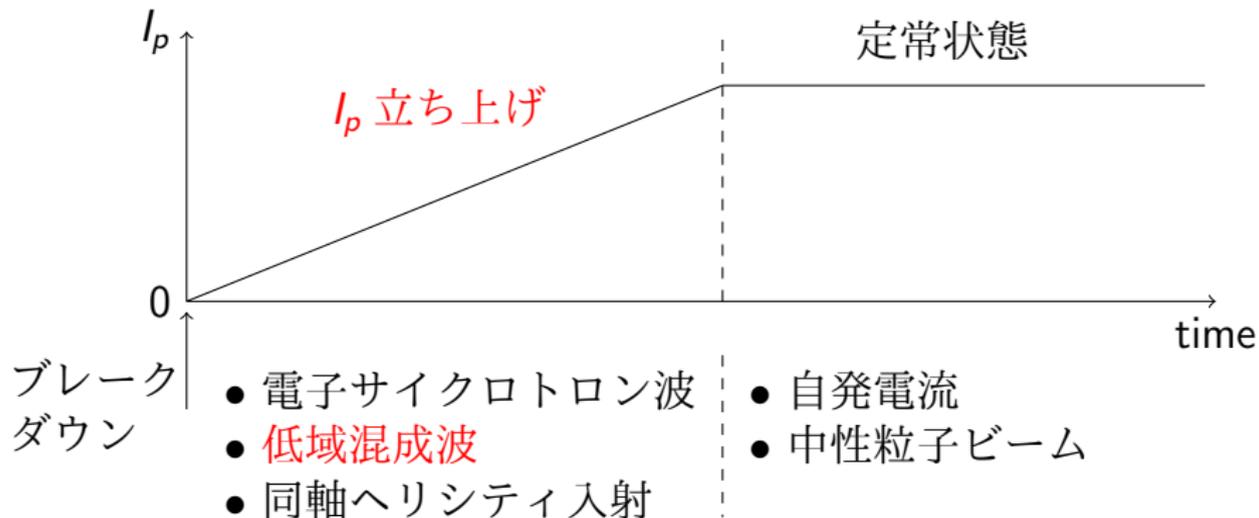
球状トカマク (Spherical Tokamak, ST) の非誘導運転シナリオ



- 低域混成 (Lower-Hybrid, LH) 波は高い電流駆動効率をもつ
 - LH 立ち上げは JT-60U において実証済 [Shiraiwa 2004]
- TST-2 で ST への有効性を評価

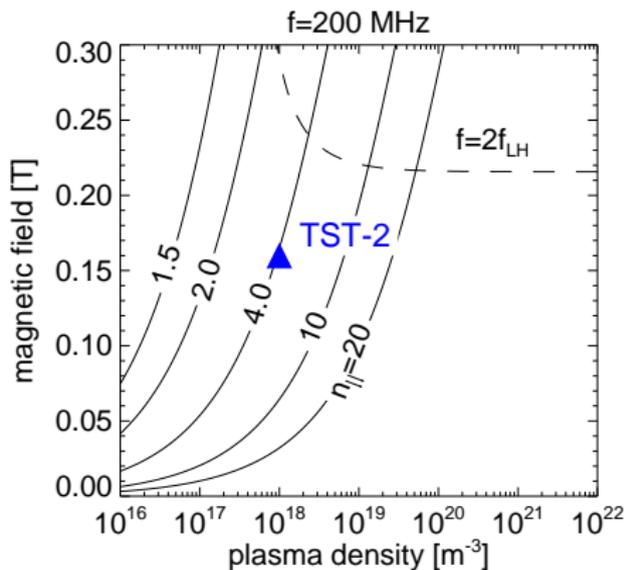
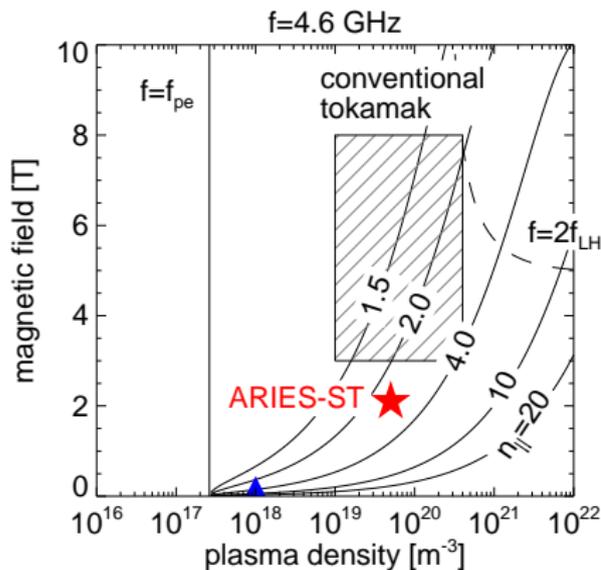
球状トカマクにより効率の良い核融合炉を実現するためには、中心ソレノイドを除去する必要がある

球状トカマク (Spherical Tokamak, ST) の非誘導運転シナリオ



- 低域混成 (Lower-Hybrid, LH) 波は高い電流駆動効率をもつ
 - LH 立ち上げは JT-60U において実証済 [Shiraiwa 2004]
- TST-2 で ST への有効性を評価

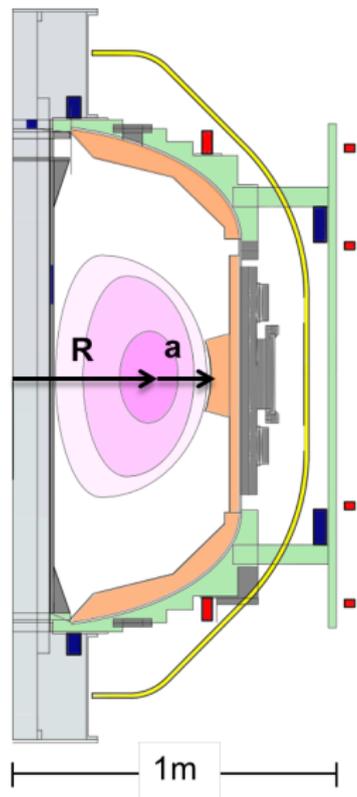
実証炉クラスではSTでも2Tの磁場があるため、 $n_{\parallel} = 3$ のLH波で効率の良い電流駆動が可能



- TST-2 の磁場は最大で 0.16 T (電源の容量で制限)
- $10^{18} m^{-3}$ にアクセスするには $n_{\parallel} > 4$ は必要

- ① TST-2 装置
- ② 外側入射 LH アンテナを用いたプラズマ電流立ち上げ
- ③ 上側入射 LH アンテナを用いたプラズマ電流立ち上げ

TST-2 装置



- $R_0 = 0.36 \text{ m}$

- $a = 0.23 \text{ m}$

RF 立ち上げ

- $B_t < 0.16 \text{ T}$

- 放電時間 $\sim 80 \text{ ms}$

- $\bar{n}_e < 10^{18} \text{ m}^{-3}$

- $I_p < 25 \text{ kA}$

- RF 400 kW @ 200 MHz

誘導 (OH) 立ち上げ

- $B_t < 0.3 \text{ T}$

- 放電時間 $\sim 20 \text{ ms}$

- $\bar{n}_e < 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

- $I_p < 120 \text{ kA}$

LH 入射用に2台の静電結合型進行波アンテナが外側(低磁場赤道面)と上側に設置されている

外側入射

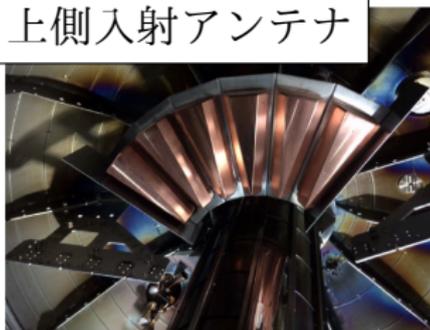
- n_{\parallel} はダウンシフト
- 従来型

上側入射

- n_{\parallel} はアップシフト
- 密度限界の上昇
駆動効率は?

入射位置	電力 (kW)	周波数 (MHz)
外側	200	200.1
上側	100	200.1

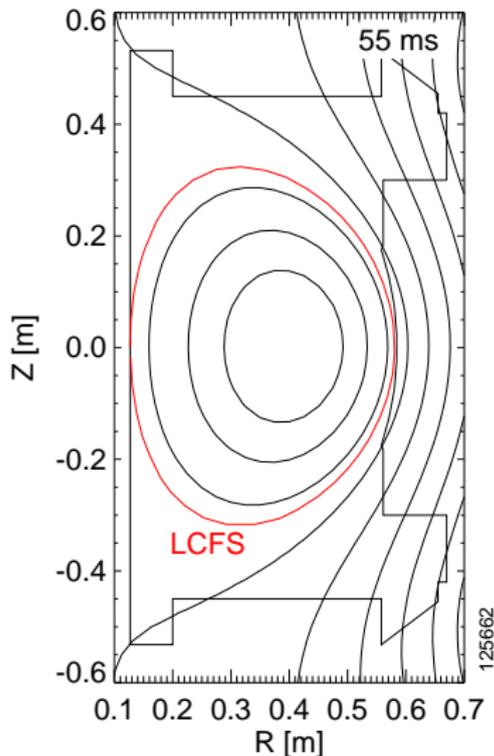
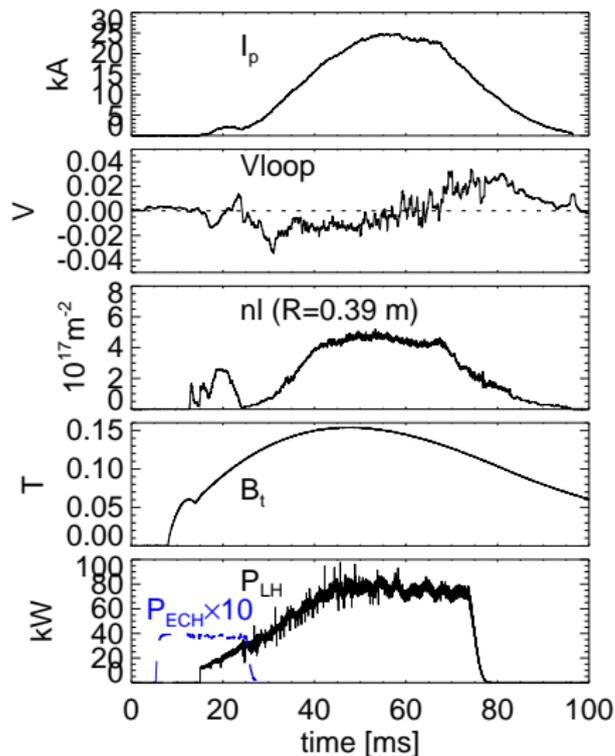
上側入射アンテナ



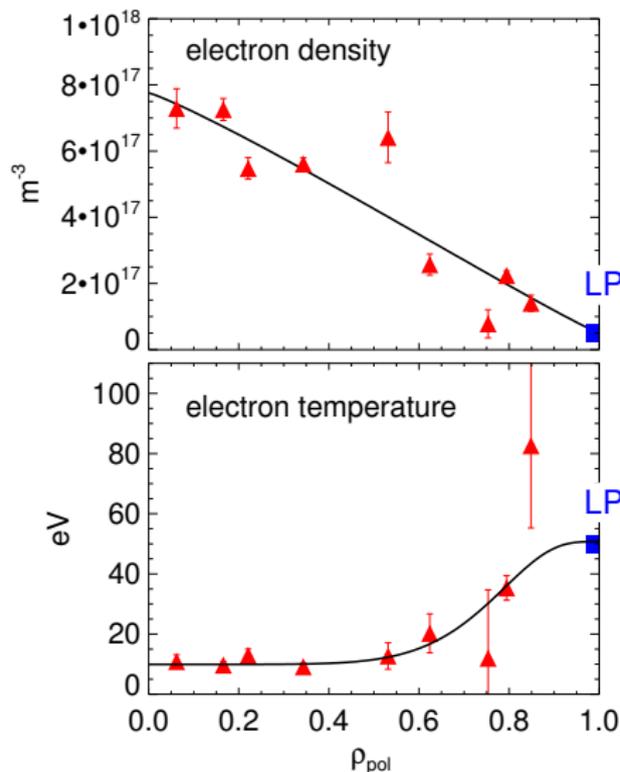
外側入射アンテナ



LH波を用いて現在25 kAまでの非誘導プラズマ立ち上げに成功している



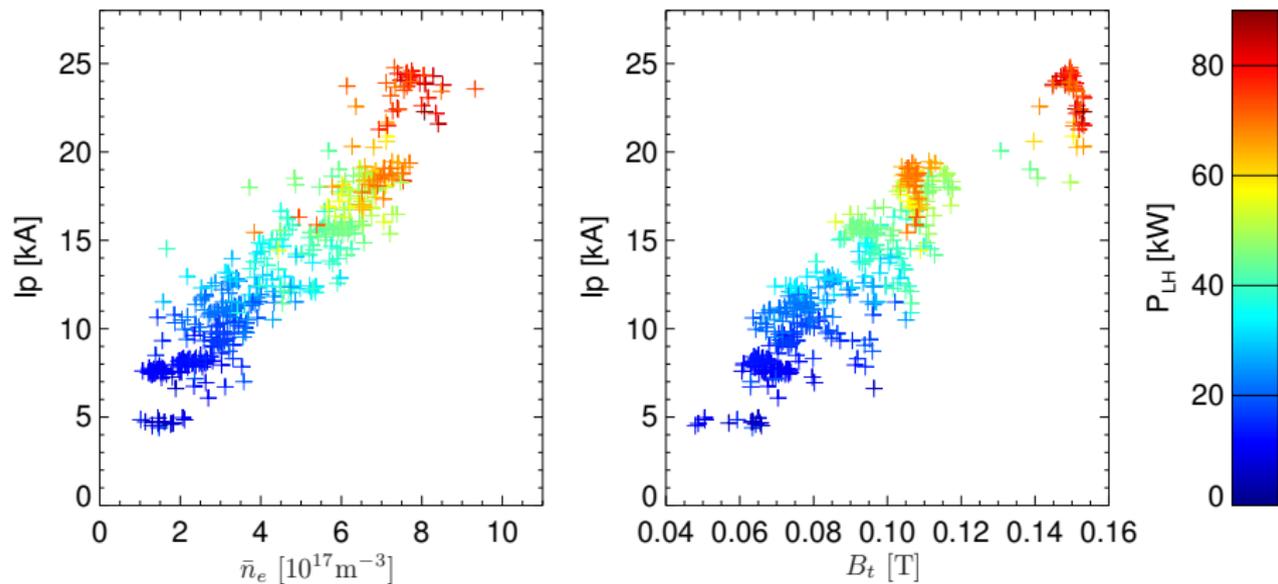
トムソン散乱計測によると、電子温度はホローな分布
をしている



- プラズマ中心は比較的低温
(cf. OH プラズマ: 300 eV)
- 衝突による減衰
> ランダウ減衰
- 吸収は $r/a > 0.6$

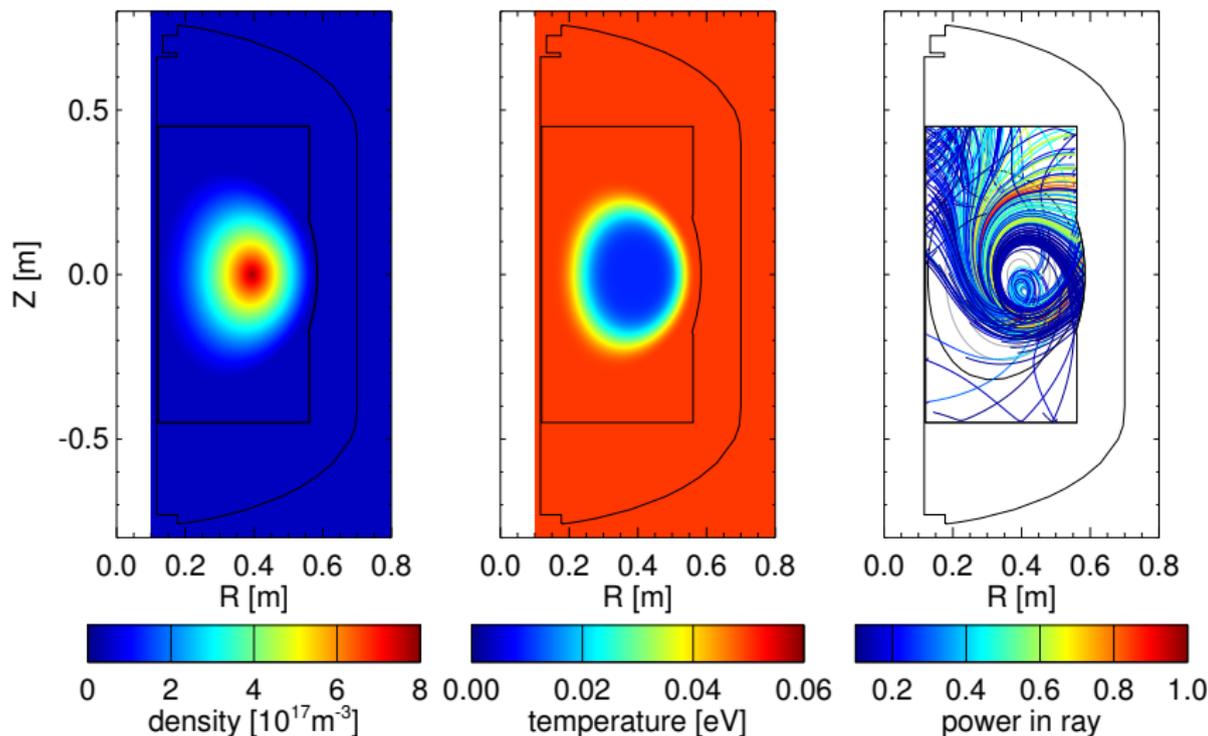
H. Togashi

プラズマ電流の増加とともに密度も増加させなければ
ならないことが分かった



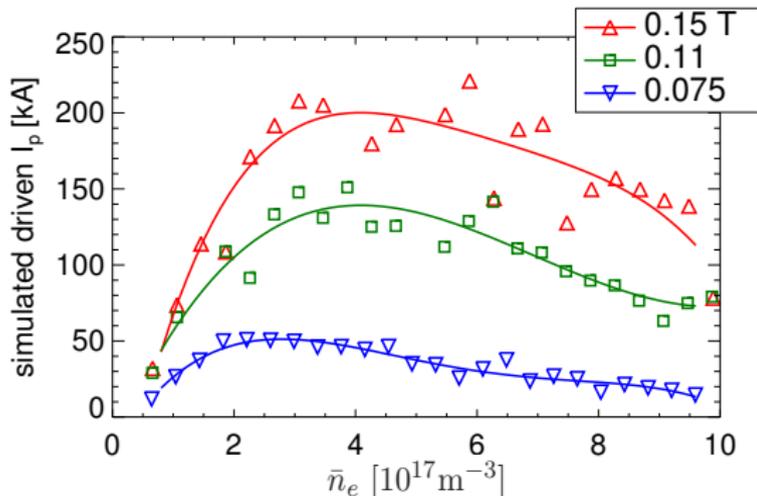
- 固定磁場下では駆動可能な電流には最大値が存在する
- 外側入射の場合、最大磁場 0.16 T で 25 kA が限界

LH 電流駆動の評価には光線追跡/軌道平均 フォッカー・プランク計算*を用いた



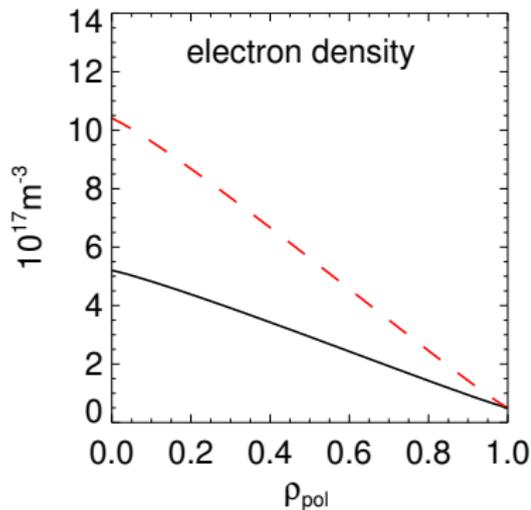
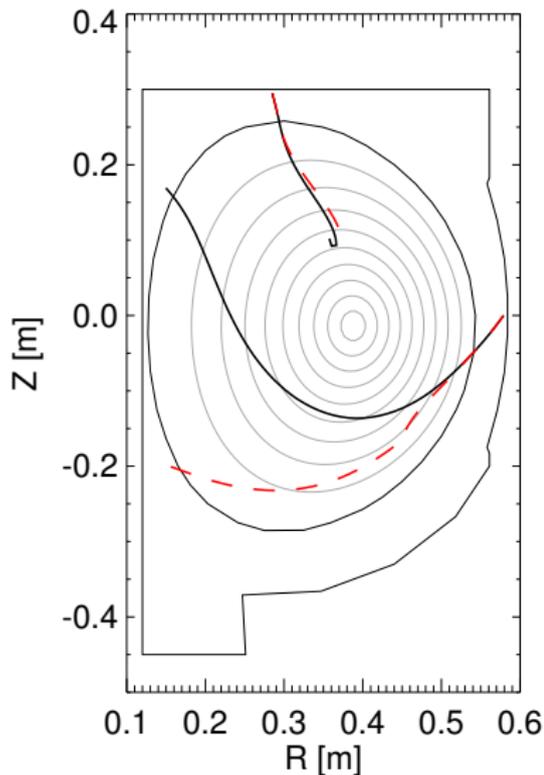
*GENRAY/CQL3D [Smirnov 1994, Harvey 1992]

数値計算でも電流駆動には最適な密度が存在する

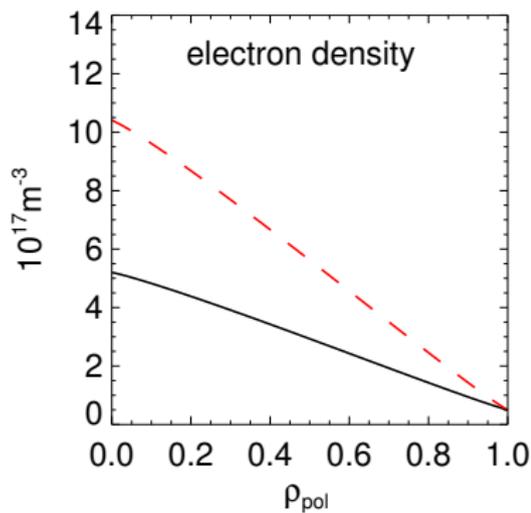
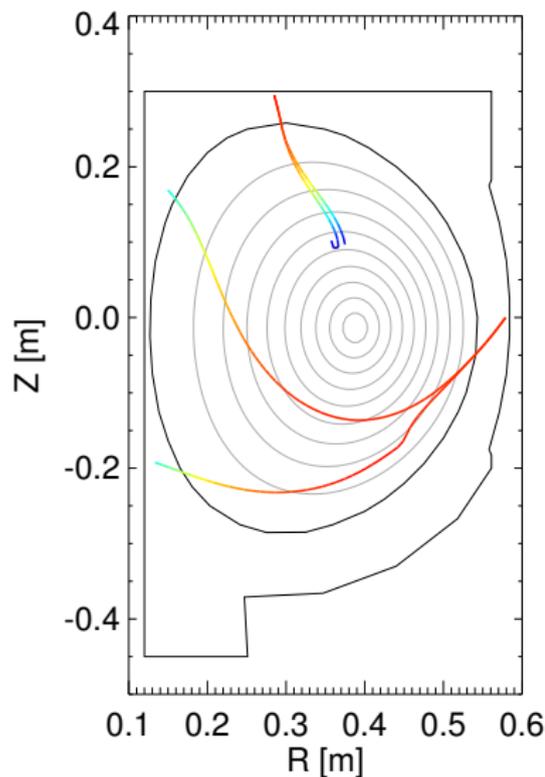


- 低密度: 電流のキャリア (電子) が少ない
- 高密度: 波がプラズマ内部に到達できない
- B_t を増加させると最適密度、 I_p ともに上昇する
- I_p の絶対値は 5-10 倍過大評価されている
→ 0 軌道幅が問題?

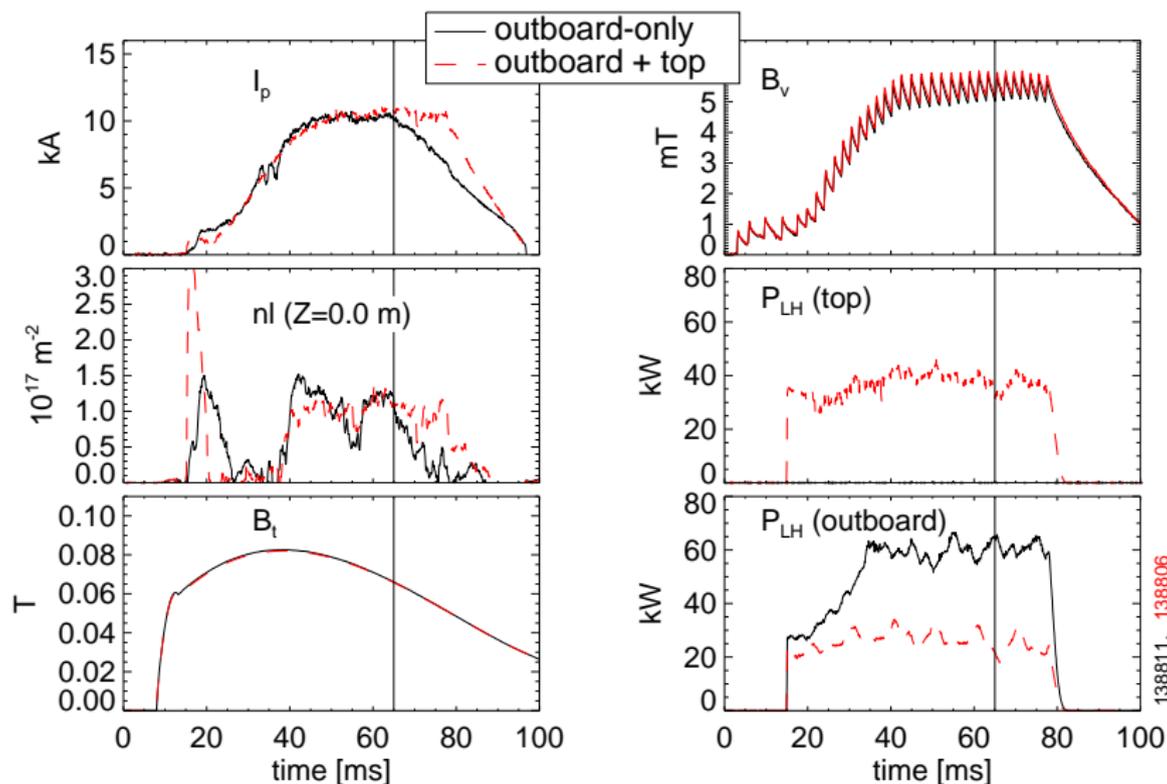
上側入射では n_{\parallel} アップシフトのため、外側入射に比べて LH 波の軌跡の密度依存性が弱い



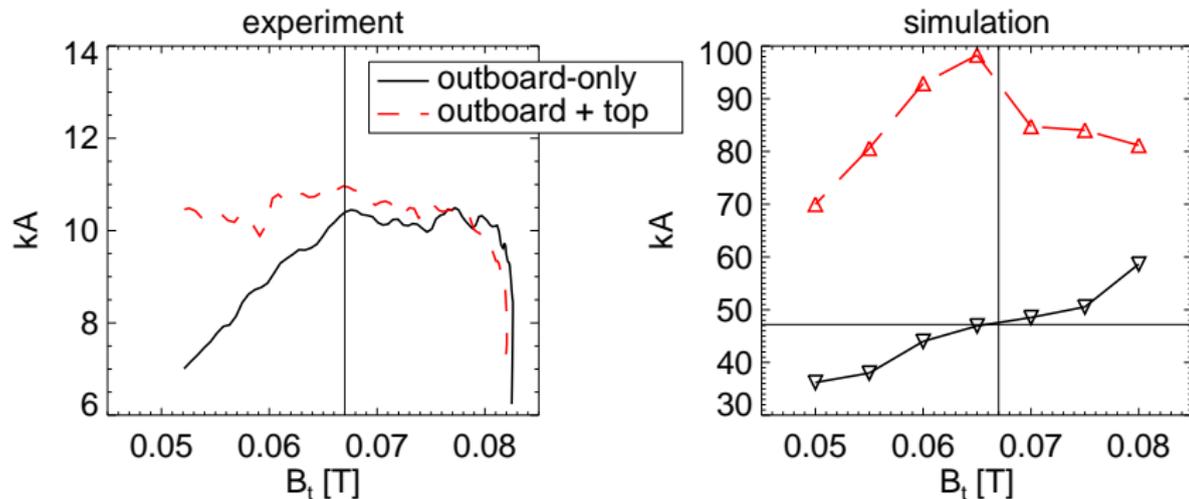
上側入射では n_{\parallel} アップシフトのため、外側入射に比べて LH 波の軌跡の密度依存性が弱い



上側入射を行った放電では密度限界の上昇が確認された



数値計算においても、上側入射を用いることで 駆動電流が上昇した



- 外側入射のみの場合、臨界磁場での駆動電流の計算値は 47 kA
- 上側入射を用いると、駆動電流の計算値は常に >47 kA
- 駆動電流の絶対値は 5 倍程過大評価されている

球状トカマクにおいても、LH電流駆動によるプラズマ立ち上げが可能である

- 非常に密度の低い領域での運転になるため、電流キャリア(電子)密度不足が問題となる
- 電流を増加させるには密度を増加させる必要があるため、近接性条件から磁場を増加させることが必須
- (実証炉クラスの磁場では問題なし?)
- 上側入射アンテナを用いることで、密度限界が上昇した
- 数値計算は定性的には実験結果と一致
- 計算された駆動電流は実験で観測された値の5-10倍

今後の展望

- 上側入射アンテナによる立ち上げの最適化
- シミュレーションにおける電流値の過大評価の原因の追求: マイクロ波散乱、偏光計、HXRアレー、有限軌道幅モデル

球状トカマクにおいても、LH電流駆動によるプラズマ立ち上げが可能である

- 非常に密度の低い領域での運転になるため、電流キャリア(電子)密度不足が問題となる
- 電流を増加させるには密度を増加させる必要があるため、近接性条件から磁場を増加させることが必須
- (実証炉クラスの磁場では問題なし?)
- 上側入射アンテナを用いることで、密度限界が上昇した
- 数値計算は定性的には実験結果と一致
- 計算された駆動電流は実験で観測された値の5-10倍

今後の展望

- 上側入射アンテナによる立ち上げの最適化
- シミュレーションにおける電流値の過大評価の原因の追求: マイクロ波散乱、偏光計、HXRアレー、有限軌道幅モデル

球状トカマクにおいても、LH電流駆動によるプラズマ立ち上げが可能である

- 非常に密度の低い領域での運転になるため、電流キャリア(電子)密度不足が問題となる
- 電流を増加させるには密度を増加させる必要があるため、近接性条件から磁場を増加させることが必須
- (実証炉クラスの磁場では問題なし?)
- 上側入射アンテナを用いることで、密度限界が上昇した
- 数値計算は定性的には実験結果と一致
- 計算された駆動電流は実験で観測された値の5-10倍

今後の展望

- 上側入射アンテナによる立ち上げの最適化
- シミュレーションにおける電流値の過大評価の原因の追求: マイクロ波散乱、偏光計、HXRアレー、有限軌道幅モデル

球状トカマクにおいても、LH電流駆動によるプラズマ立ち上げが可能である

- 非常に密度の低い領域での運転になるため、電流キャリア(電子)密度不足が問題となる
- 電流を増加させるには密度を増加させる必要があるため、近接性条件から磁場を増加させることが必須
- (実証炉クラスの磁場では問題なし?)
- 上側入射アンテナを用いることで、密度限界が上昇した
- 数値計算は定性的には実験結果と一致
- 計算された駆動電流は実験で観測された値の5-10倍

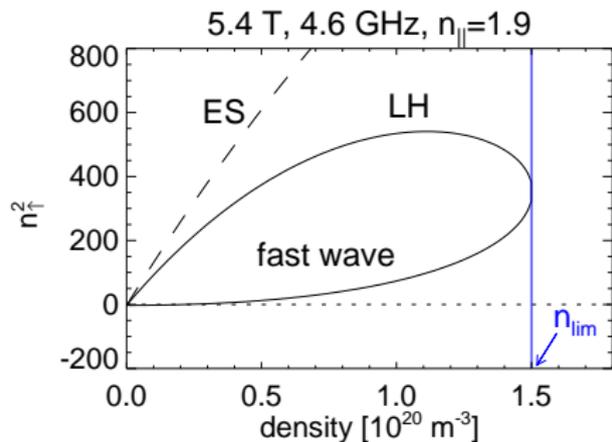
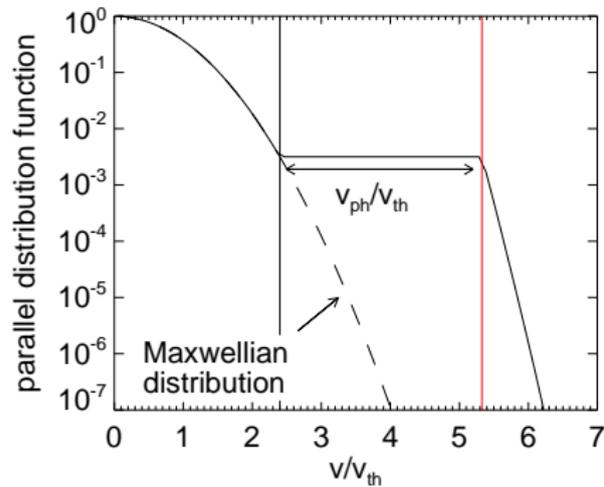
今後の展望

- 上側入射アンテナによる立ち上げの最適化
- シミュレーションにおける電流値の過大評価の原因の追求: マイクロ波散乱、偏光計、HXRアレー、有限軌道幅モデル

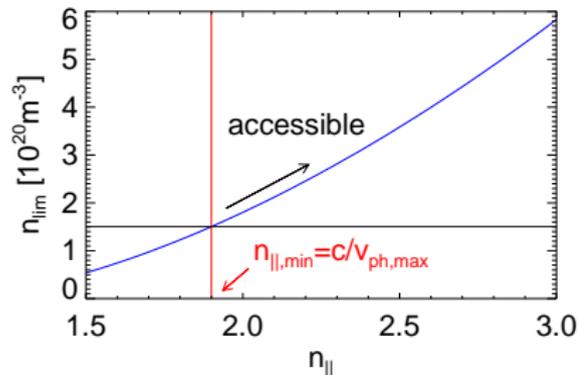
- This work was supported by
 - ▶ JSPS KAKENHI Grant numbers 15K18303, and 21226021
 - ▶ NIFS Collaboration Research Program NIFSKOCR001, and NIFS12KUTR078
- This work used
 - ▶ MIT Plasma Science and Fusion Center Theory Group parallel computational cluster Loki
- Work at General Atomics is supported by US DoE contract DE-AC03-97ER-54411

- S. Shiraiwa, et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 035001 (2004)
- S. Tsuda, et al., *Plasma Fusion Res.* **10**, 02064 (2015)
- A.P. Smirnov, et al., *Bull. Amer. Phys. Soc.* Vol. 39, No. 7, p. 1626, Abstract 4R11 (1994)
- R.W. Harvey, and M.G. McCoy, Proceedings of the IAEA Technical Committee Meeting on Simulation and Modeling of Thermonuclear Plasmas, Montreal, Canada, 1992
- J.C. Wright, et al., *Phys. Plasmas* **16**, 072502 (2009)

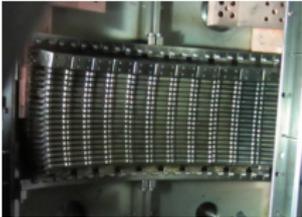
LH波はランダウ減衰により磁力線方向に電子を加速



- $2-3 \times v_{th}$ から $v_{ph,max}$ で電子を加速
- $v_{ph,max}$ は近接性により制限
- 高密度では $v_{ph,max}$ が低下

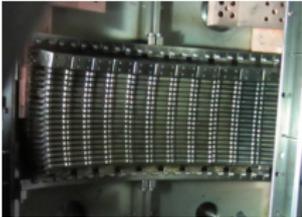


これまでに3タイプのLHアンテナを制作・試験した

	誘導結合コムライン (ICC)	導波管列 (Grill)	静電結合コムライン (CCC)
			
エレメント数	11	4	13, 6
n_{\parallel}	7	3-9	6.0, 4.7
電力 (FW)	200 kW	<100 kW	200 kW
偏光	poloidal	toroidal	toroidal
カップリング	40 %	40-50 %	100 %

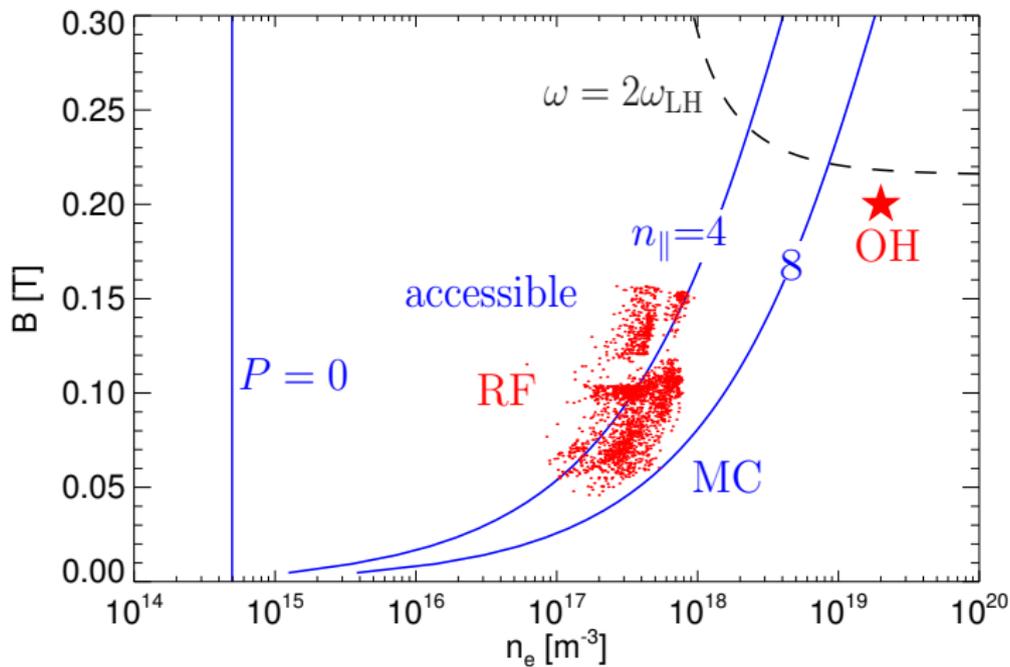
- CCC アンテナにより最も多くの電力をプラズマに入射できた
- 現在 CCC アンテナは2台設置されている

これまでに3タイプのLHアンテナを制作・試験した

	誘導結合コムライン (ICC)	導波管列 (Grill)	静電結合コムライン (CCC)
			
エレメント数	11	4	13, 6
n_{\parallel}	7	3-9	6.0, 4.7
電力 (FW)	200 kW	<100 kW	200 kW
偏光	poloidal	toroidal	toroidal
カップリング	40 %	40-50 %	100 %

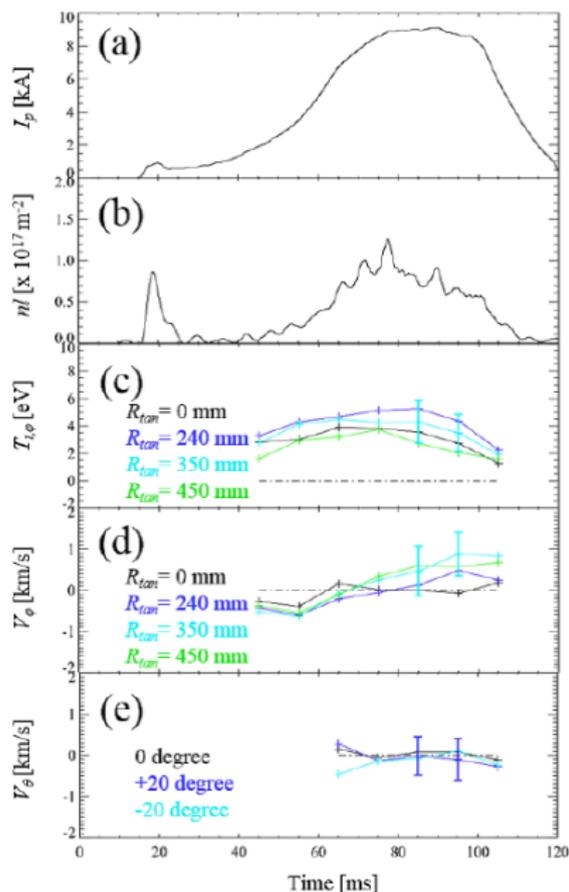
- CCC アンテナにより最も多くの電力をプラズマに入射できた
- 現在 CCC アンテナは2台設置されている

LH波の密度限界のため線平均電子密度は $< 10^{18} \text{ m}^{-3}$

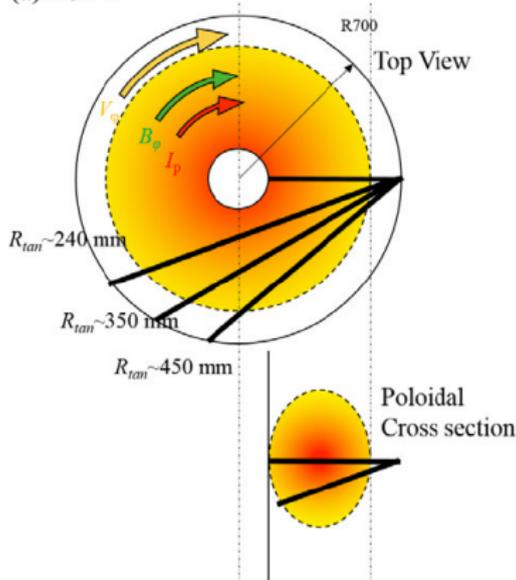


- 現在の電源では $B_t < 0.16$
- パラメトリック崩壊不安定性: $\omega < 2\omega_{\text{LH}}$

CIII 放射の分光からトロイダルフローは小さい



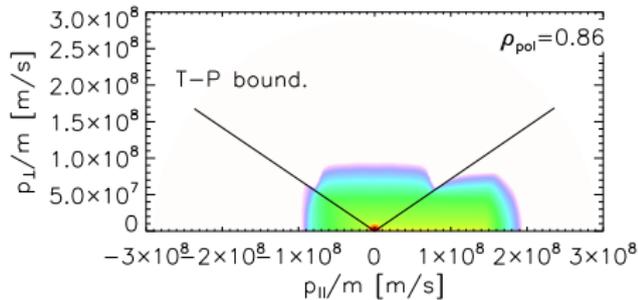
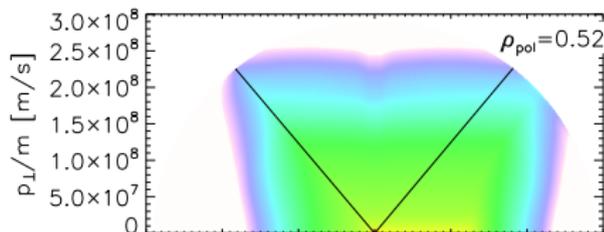
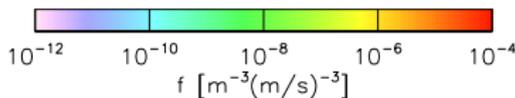
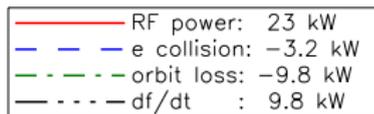
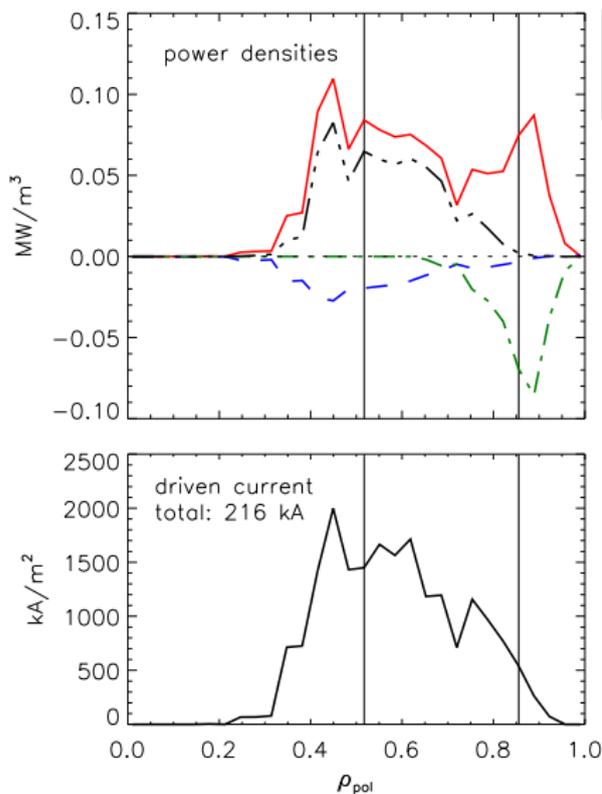
(a) TST-2



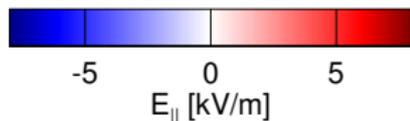
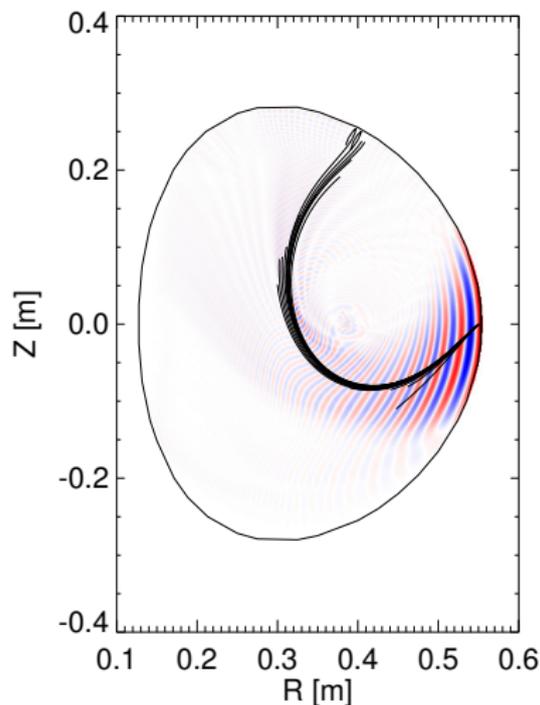
- $T_i = 4$ eV
- $V_i < 1$ km/s

[Tsuda 2015]

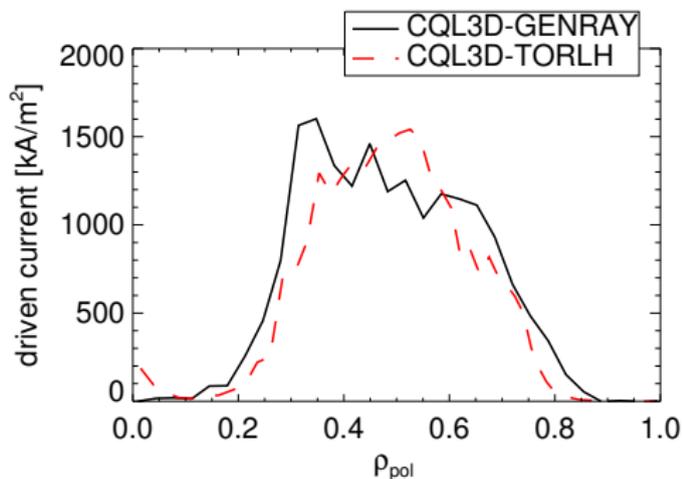
$\rho_{pol} > 0.7$ において生成される高速電子は現在のパラメータでは良く閉じ込めることができない



全波計算*による予測は光線追跡と近い



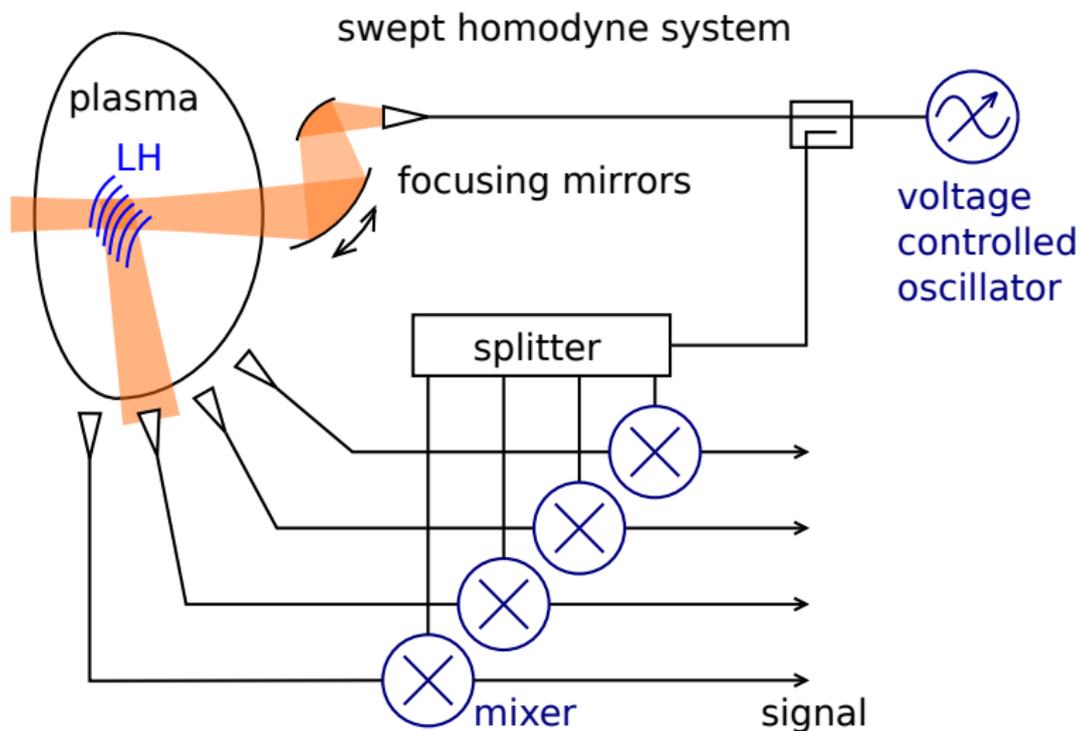
Radial current density profile



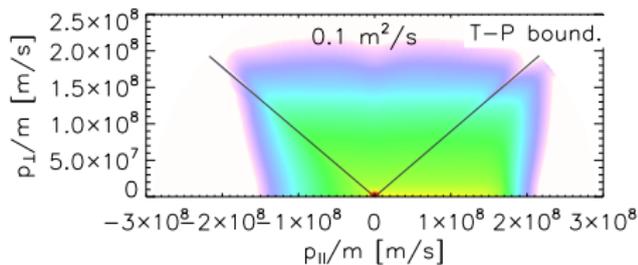
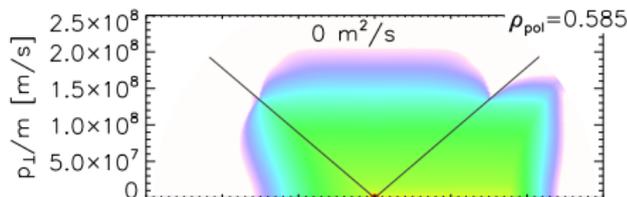
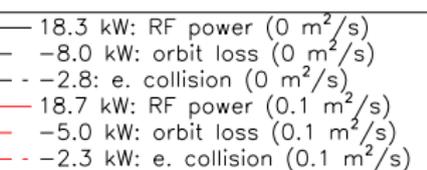
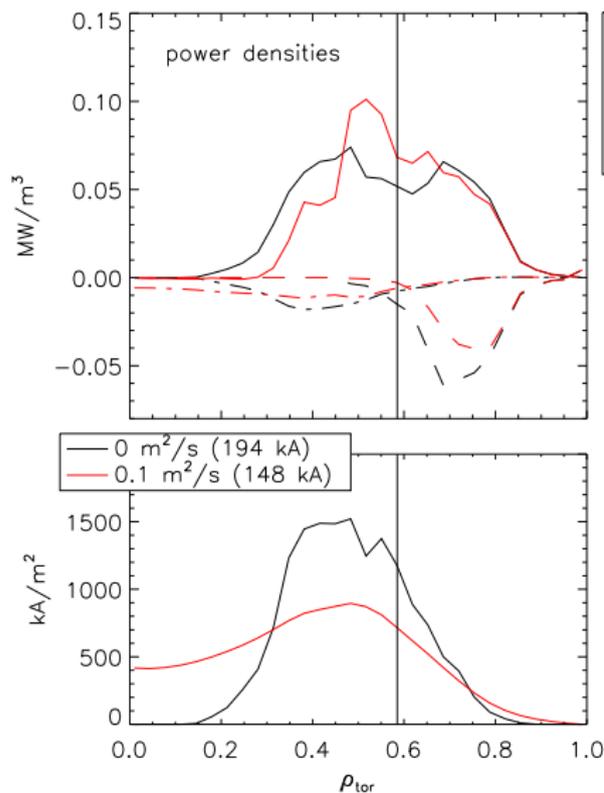
- 全波効果は実験との差異の原因ではない
- 有限軌道幅効果が必要

*TORLH [Wright 2009]

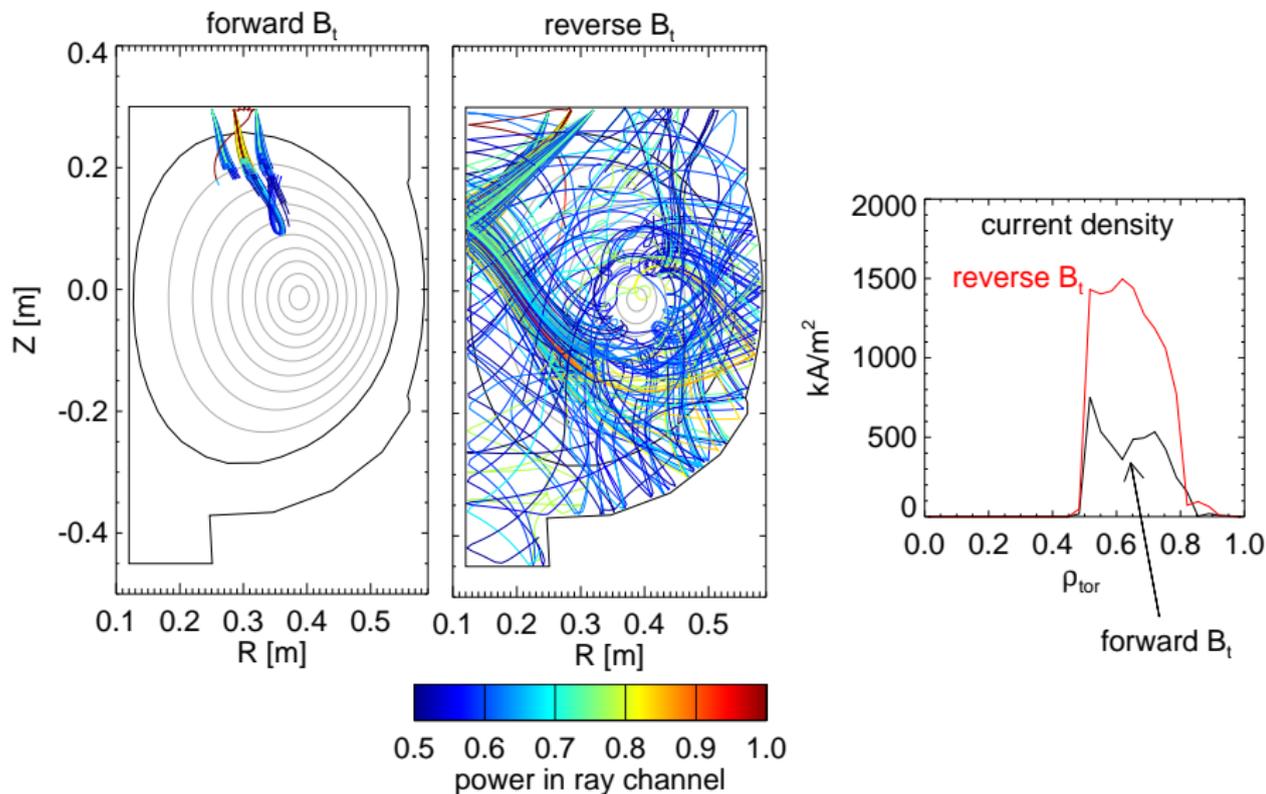
プラズマ内部の LH 波を直接計測できるマイクロ波散乱計が開発中である



系方向輸送により、電流ホールは無くなり、 全駆動電流は減少する

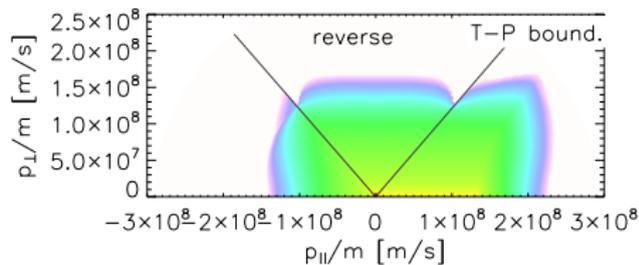
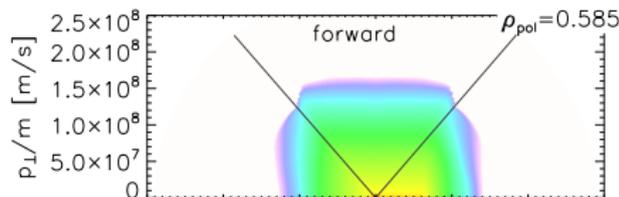
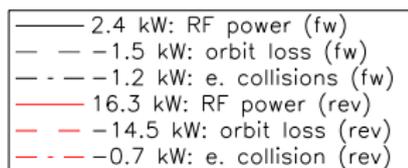
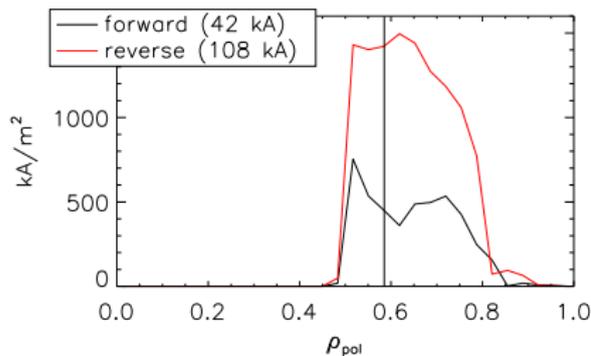
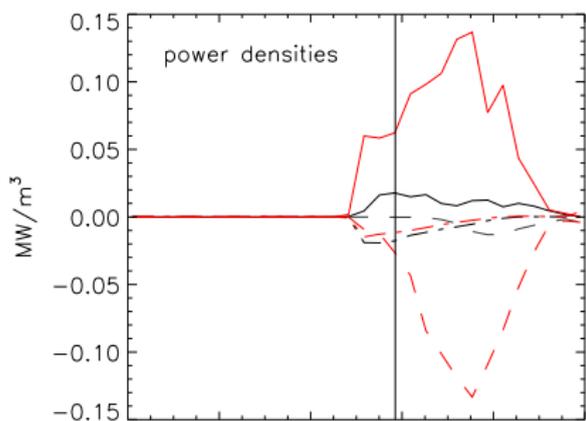


下側入射では、より高磁場領域で電流駆動ができる

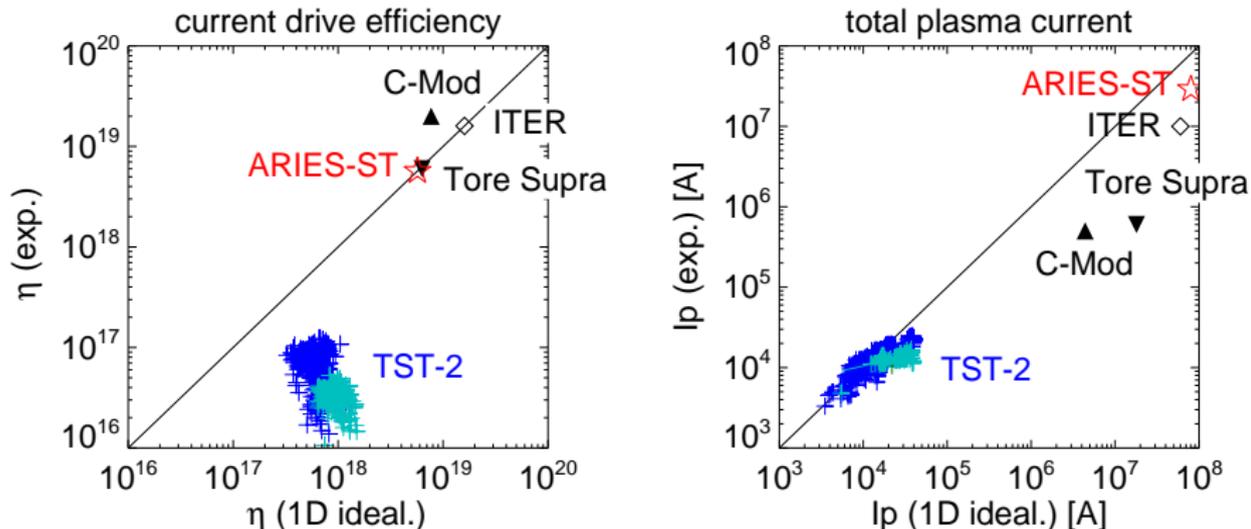


- 計算はトロイダル磁場反転

下側入射で理論的には駆動電流が増加する可能性がある

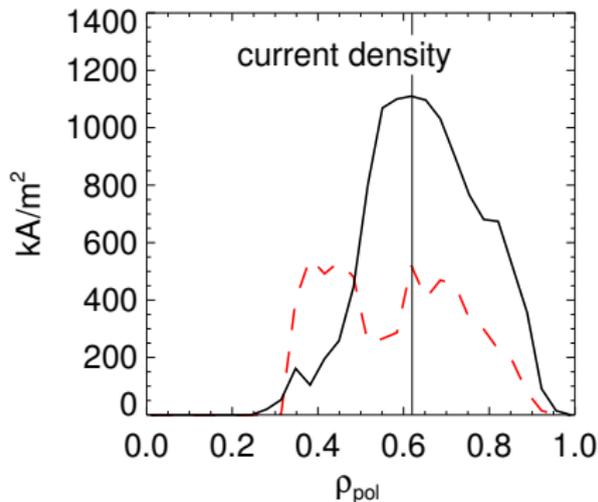
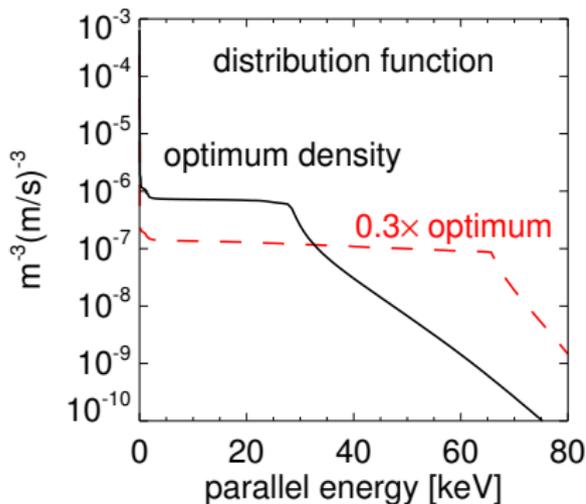


核融合炉へのスケージング



- 1D ideal.: 速度空間1次元のみの解析
- ARIES-ST ($B_{t0} = 2.1$ T) には十分適用可能
- TST-2では磁場が低いため理論値は $\sim 10^{18}$ A/m²/W
- 実験ではさらに1桁低い – 駆動電流が飽和している

For densities much below the accessibility limit, the fast electron plateau level is proportional to the bulk density



- Current is carried entirely by fast electrons
- Current drive is saturated with sufficient RF power
- High v_{ph} parts of the spectrum are accessible at lower density

Rays diffract and the driven current profile shifts radially outward as the density approaches the accessibility limit

