

TST-2球状トカマク装置

内容

- トカマクと球状トカマク
- TST-2装置
- 典型的なパラメータ
- 波動物理
- 真空排気系とガス供給系
- 磁場生成コイルと典型的な波形
- 形状制御実験
- プラズマ着火
- 自発的球状トカマク配位形成
- 交流CS運転

トマカク型プラズマ生成装置

●磁場中での荷電粒子はローレンツ力 $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ により、磁力線に巻き付くサイクロトロン運動をする。

->これにより、プラズマは磁力線に垂直方向には閉じ込められるが、磁力線方向には自由に動ける。

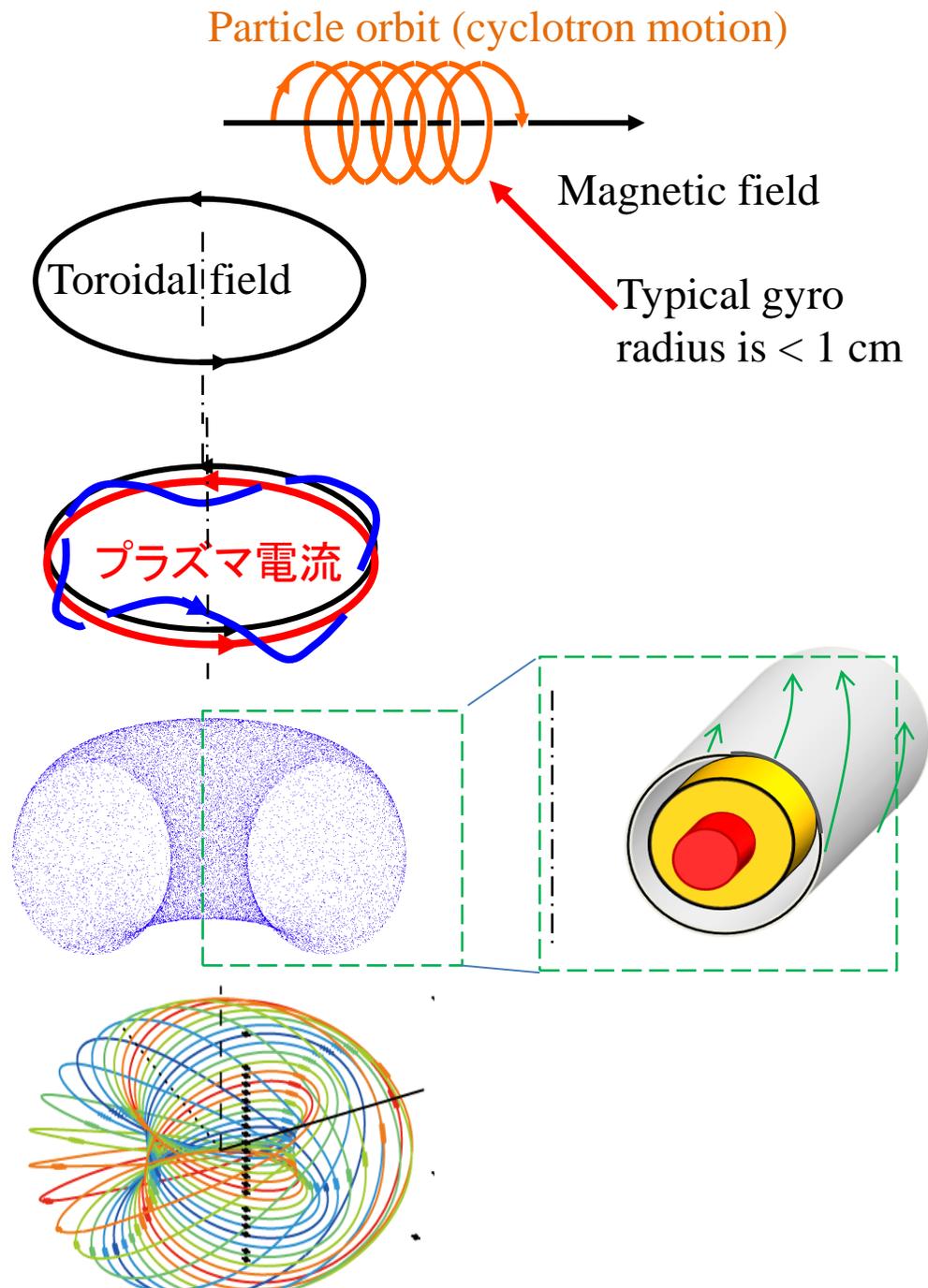
●そこで、磁力線をループ(環状)にすることで、プラズマを完全に閉じ込めることができる？

-> 半分正解。ドリフトの効果で、プラズマが外側に逃げるので、これを防ぐためには、磁力線をねじる必要がある。

●ループ状の磁力線に沿って電流を流すことで、磁力線をひねる。

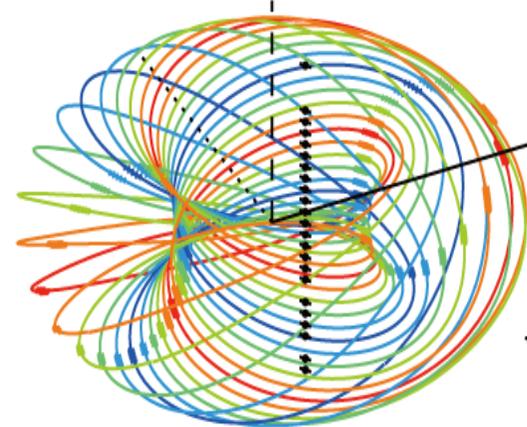
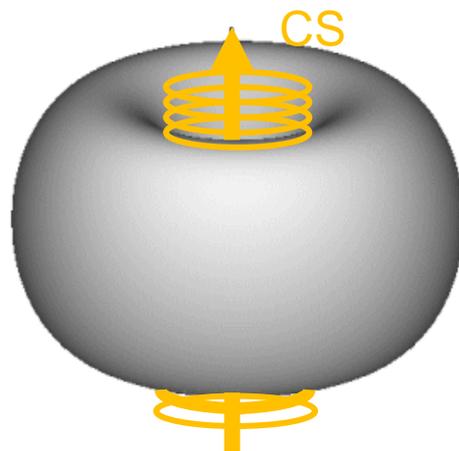
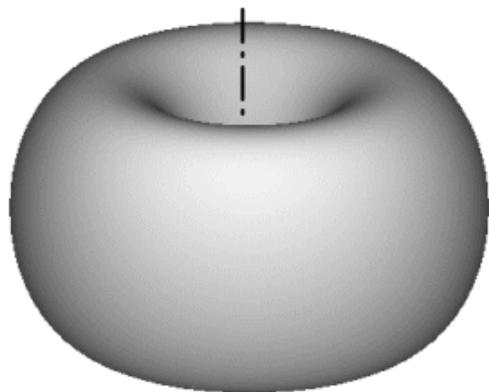
プラズマの形状はドーナツ型(トーラス型)となり、トーラス表面上に磁力線がある。

強いループ状の磁場と電流で高温プラズマを安定に効率よく生成するのがトマカク型の装置



プラズマの形状はトーラス状

サイズと形状は大半径、小半径、楕円度で表される



Magnetic fields imbedded in plasma

トロイダル方向

対称軸

ポロイダル方向

R: 大半径

a: 小半径

Sizes

大半径: R

小半径: a

アスペクト比: R/a

楕円度 $k=b/a$

アスペクト比= R/a
楕円度= b/a

Vacuum Vessel

Toroidal coil

Poloildal coil

plasma

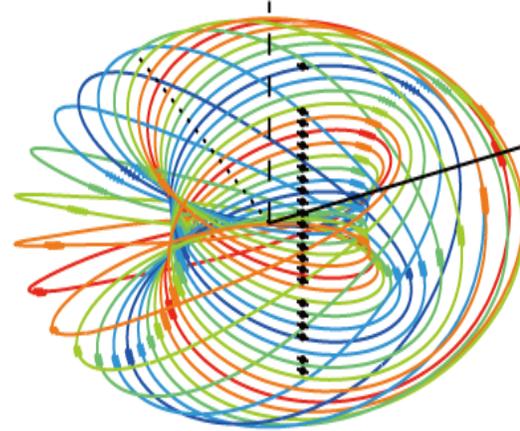
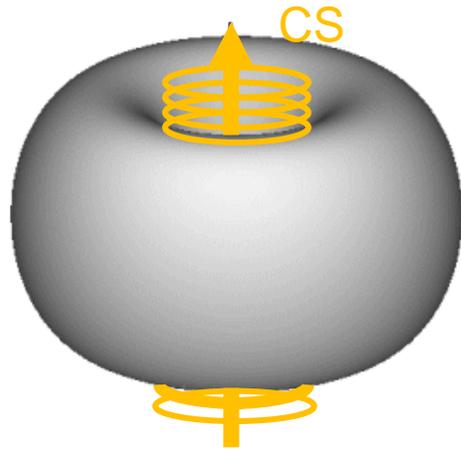
Center solenoid (CS)

Horizontal (field) coil

TST-2

Note: center stack=central part (CS+TF+VV)

球状トマカク Spherical tokamak (ST)



球状トマカクは、規格化圧力

$\beta \equiv p / \frac{B^2}{2\mu_0}$ が高くても安定だという特徴がある。

核融合出力密度 $\propto p^2$

$$p_f \propto p^2 (= n^2 T^2) \propto \beta^2 \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right)^2$$

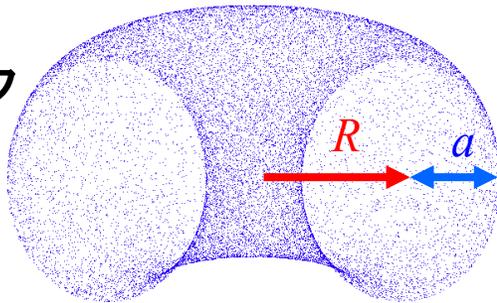
であり、比較的弱い磁場（これは装置の小型化につながる）で核融合エネルギーを実用化できることを意味する。

球状トマカクは小型核融合炉の実現という魅力がある。一方、中心部のスペースが狭く、CSの除去が課題。すなわち非誘導電流駆動が課題。

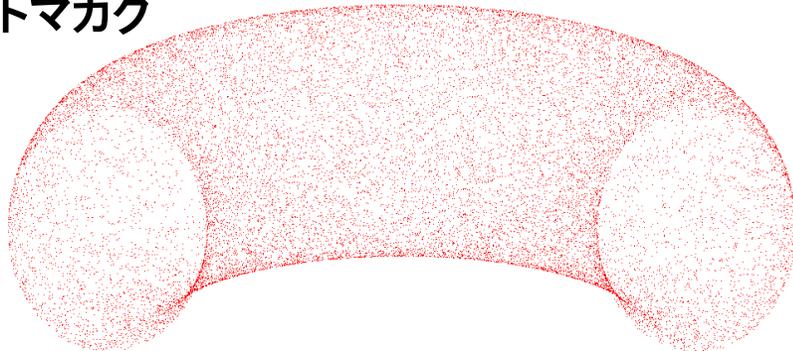
磁場が弱くても、体積が大きく、閉じ込めが良いので、小型装置でも高温プラズマの生成が可能という実験上の魅力がある。

球状トマカク

アスペクト比: $R/a < \text{約} 2$



従来型トマカク

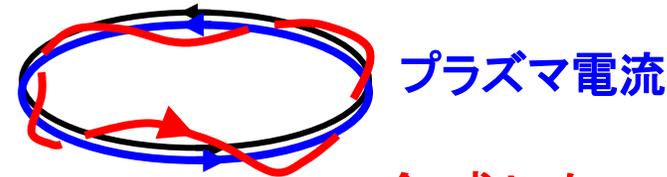


電流駆動は、トカマク、特に球状トマカクにとって、最重要課題

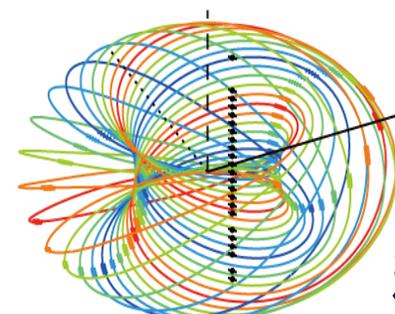
トマカク型配位

- 外部トロイダル磁場
- 誘導または非誘導電流駆動

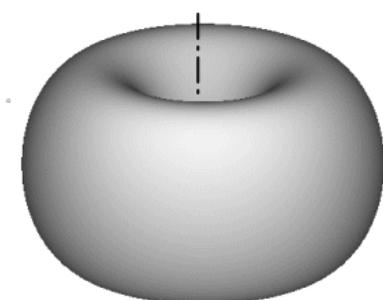
外部トロイダル磁場



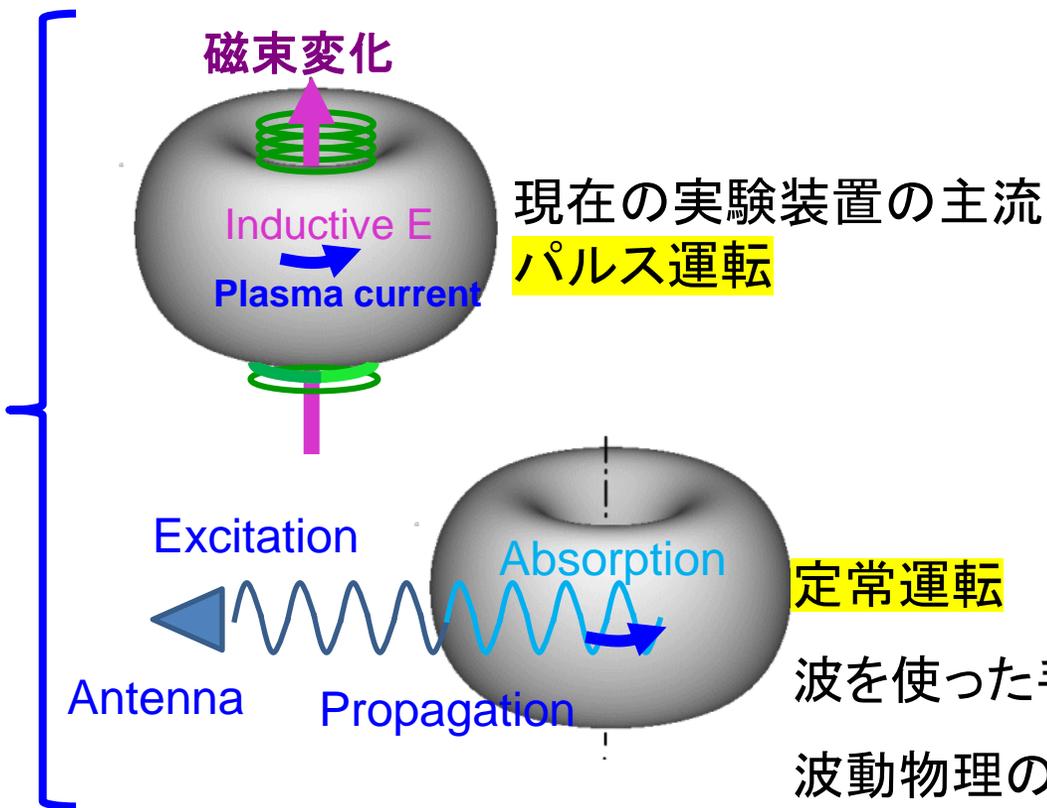
合成した磁場



磁力線で編んだかごでトーラス状のプラズマを保持する。

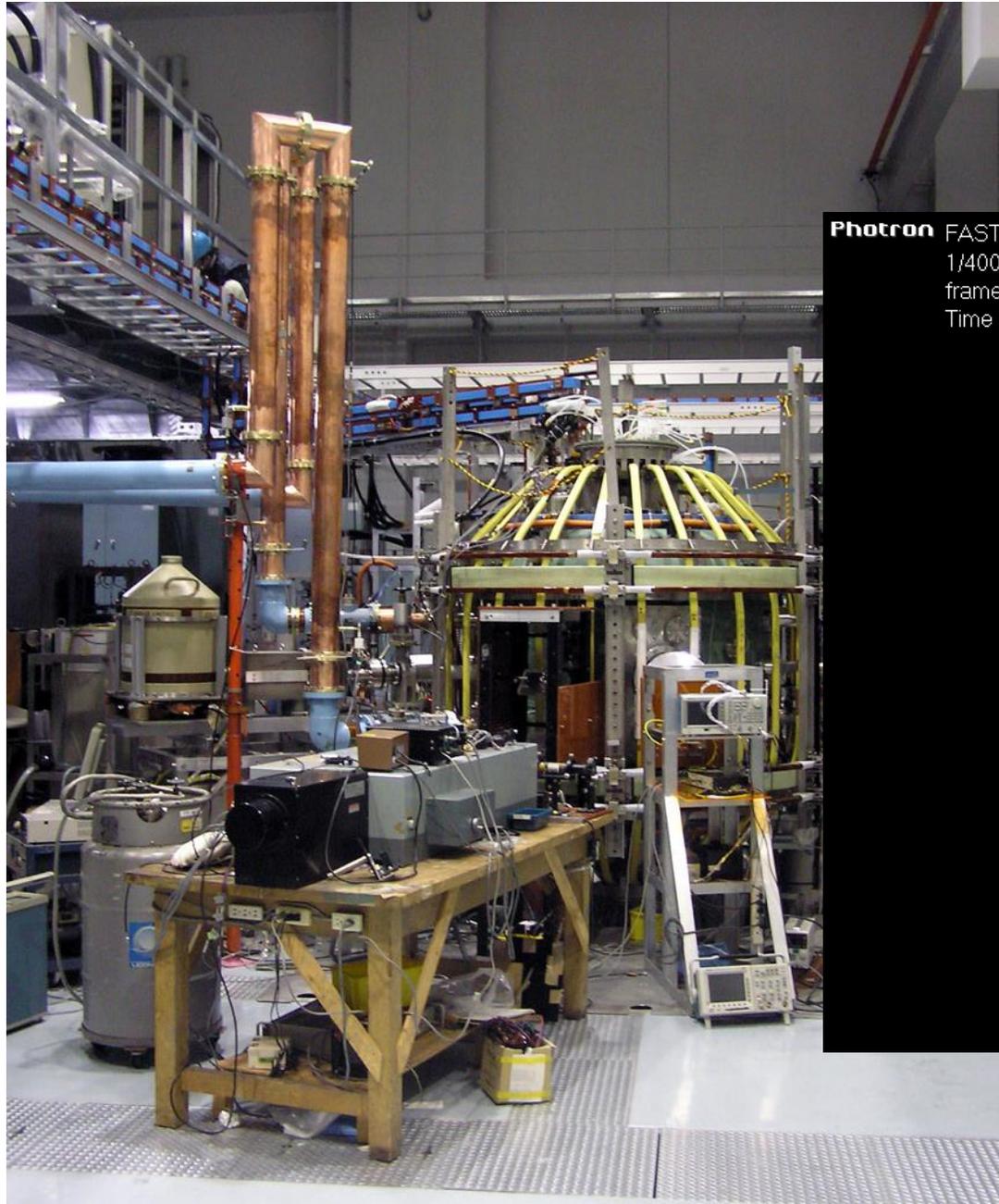


電流駆動法



TST-2球状トマカク装置@東京大学柏キャンパス

東京大学 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻
江尻晶・辻井直人研



Photron FASTCAM-512PCI model 32K
1/4000 sec
frame : 1
Time : 13:36

512 x 512
+0.0 ms

2000 fps
Start
Date : 2016/12/24

TST-2装置の諸元(高周波駆動/誘導駆動)

大半径: ~0.36 m

小半径: ~0.23 m

トロイダル磁場: < 0.3 T

プラズマ電流: 25 kA/120 kA

放電時間: 0.1 s/ 0.025 s

電子温度: 10 eV/ 400 eV

電子密度: $>1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} / < 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

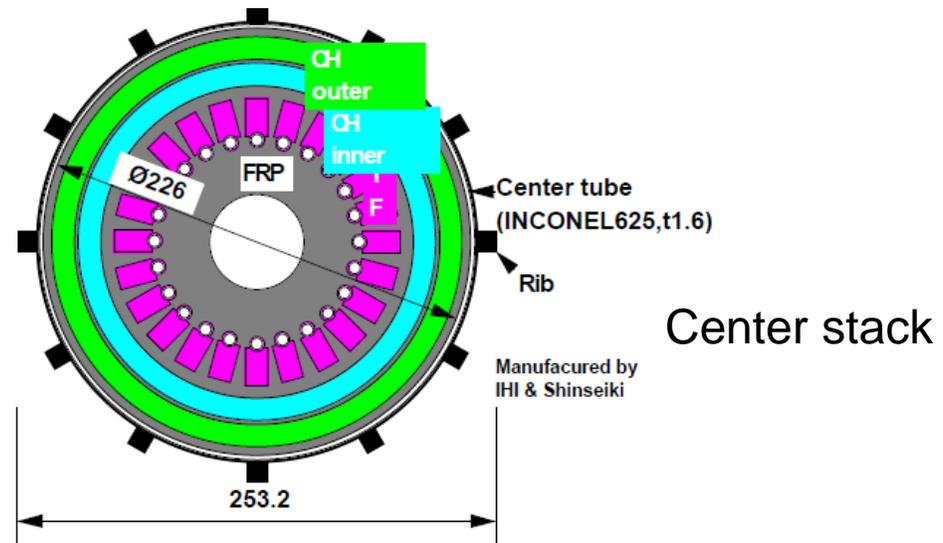
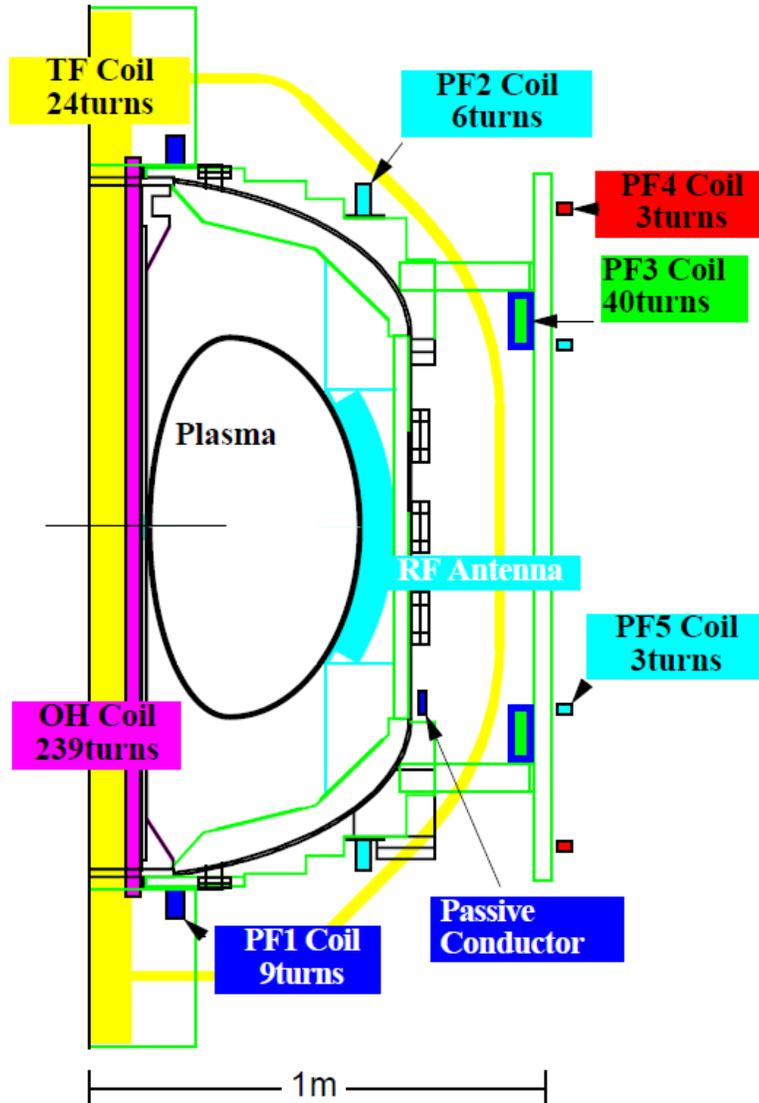
種々の高周波源

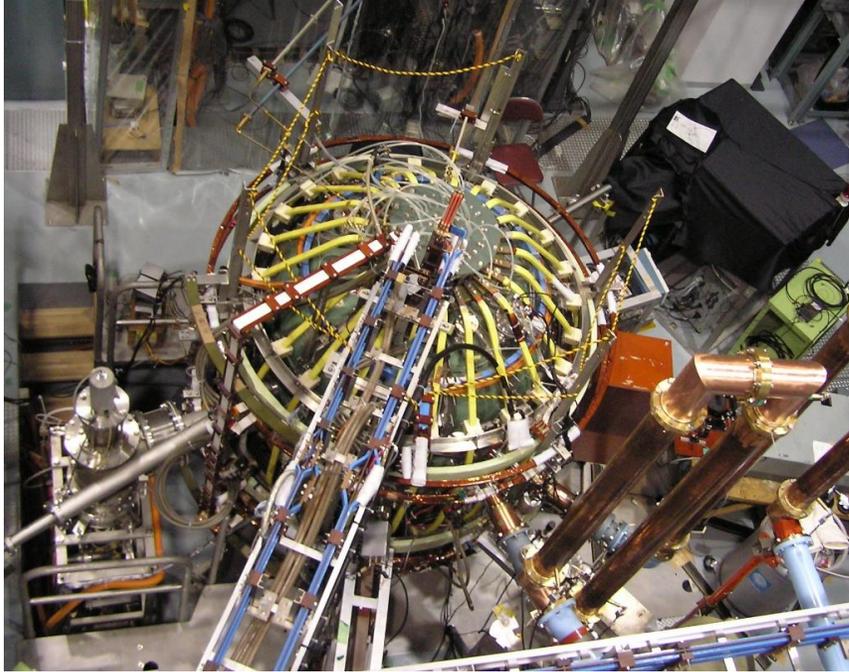
ECH: 2.45 GHz/5 kW, 8.2 GHz/ < 20 kW

HHFW: 21 MHz/ < 400 kW

LHW: 200 MHz/ < 400 kW

Coils and Parameters of TST-2





研究テーマ

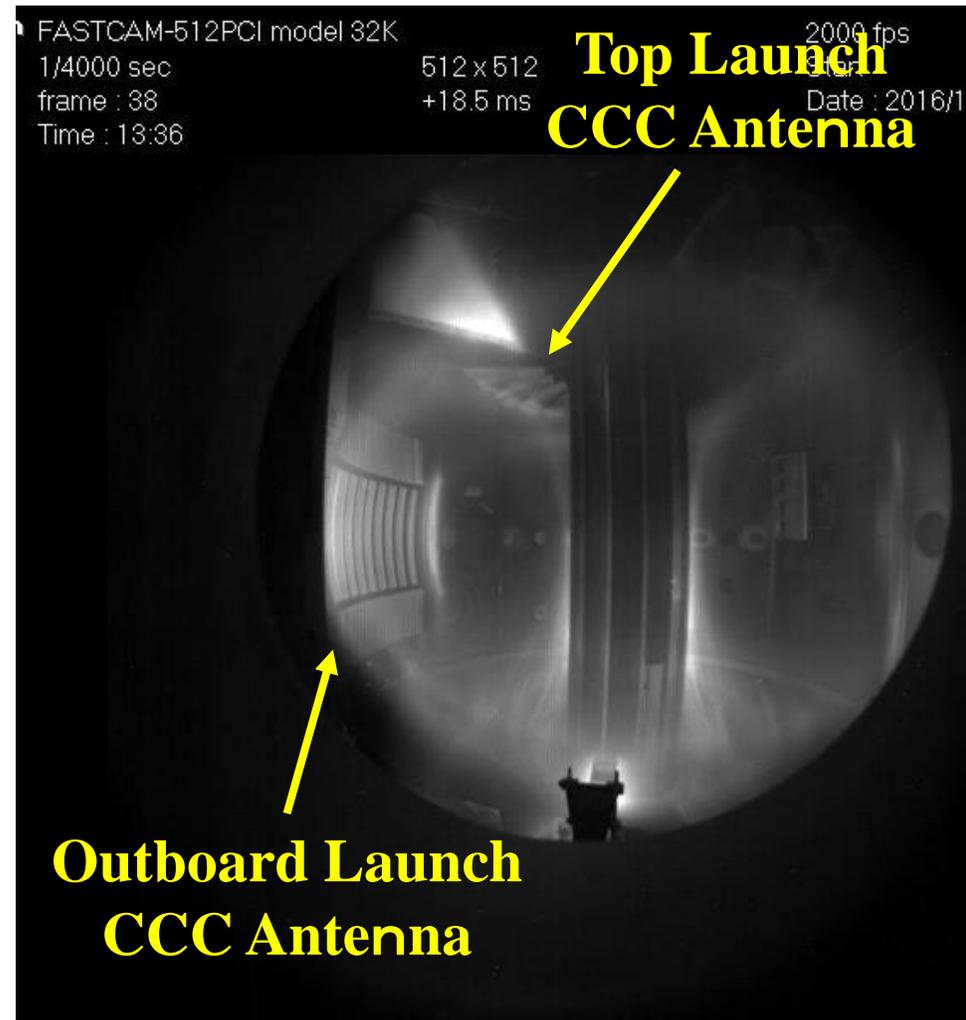
高周波電流駆動

高エネルギー電子の振る舞い

プラズマ計測手法の開発

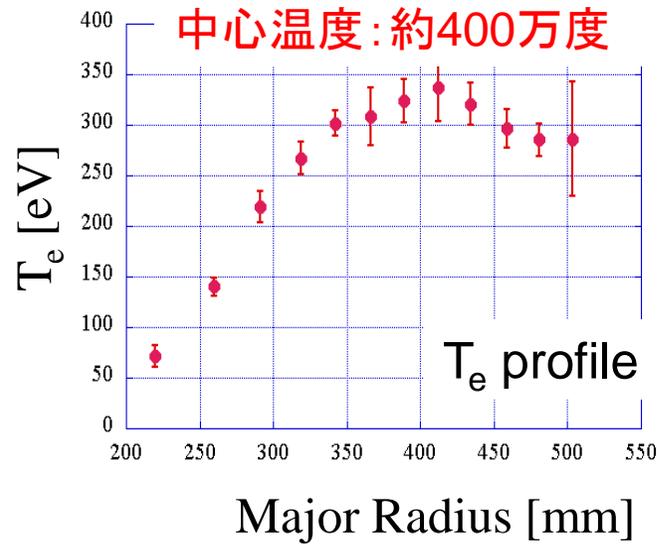
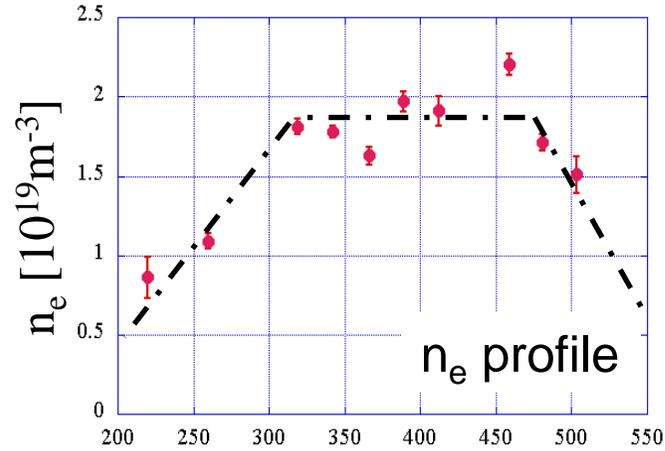
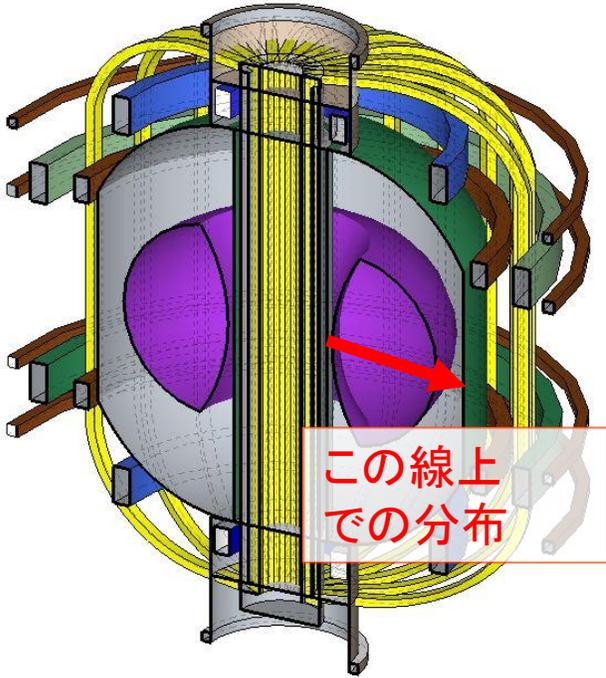
不安定性・乱流

4 RF units of 200 kW/200 MHz



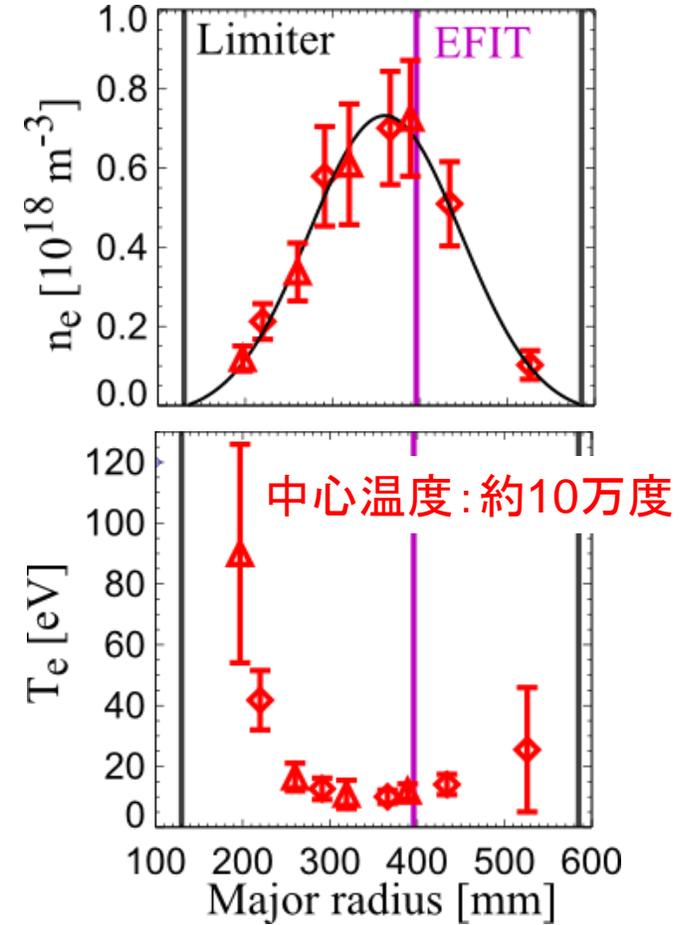
典型的な密度、温度分布

誘導で生成したプラズマ



J. Hiratsuka, et al.

波で生成したプラズマ

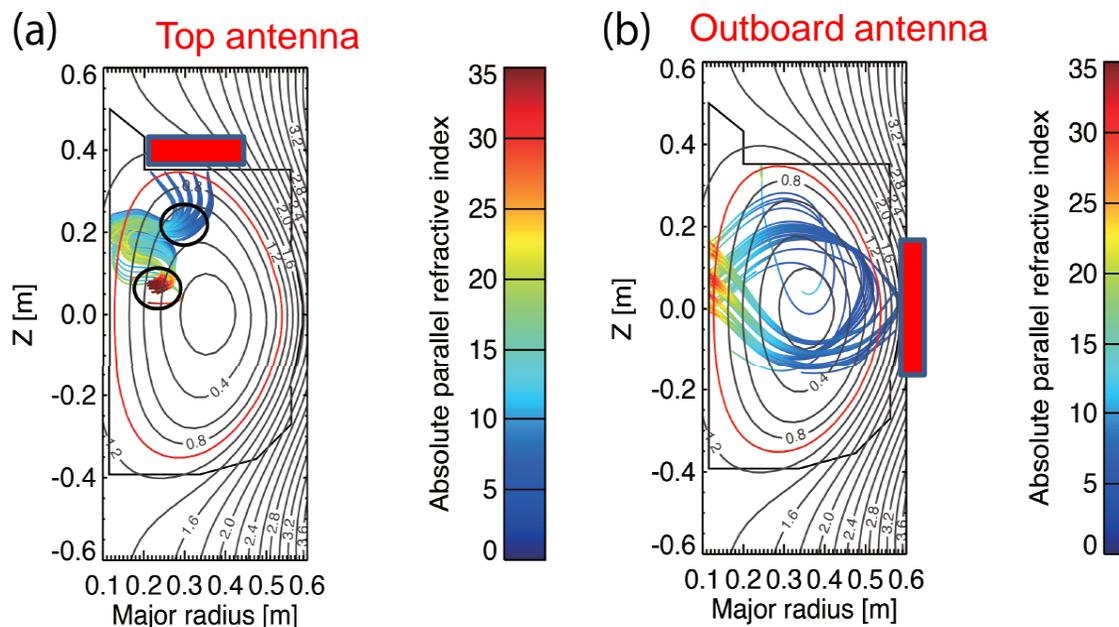
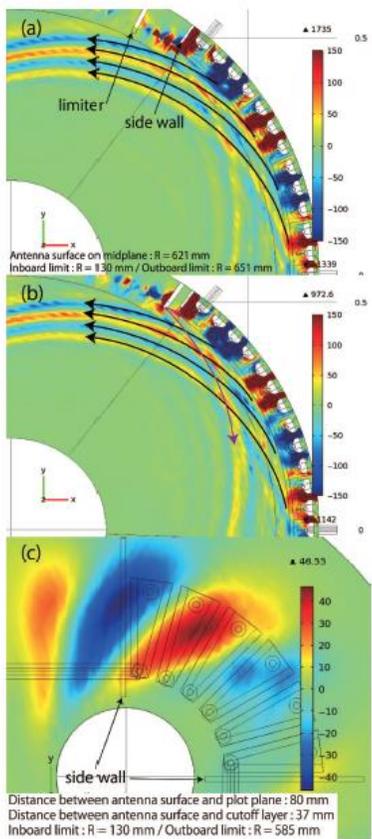


H. Togashi, et al.

波動物理

加熱・電流駆動

Prediction by ray tracing + Fokker Planck solver



S. Yajima, et al., Plasma Fusion Research 13 3402114 (2018)

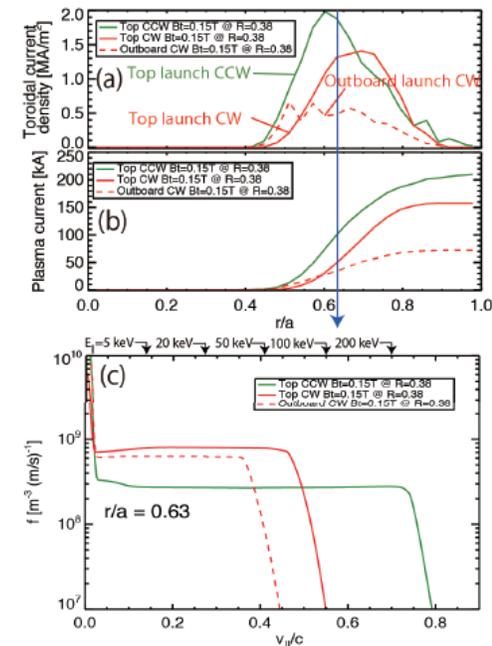
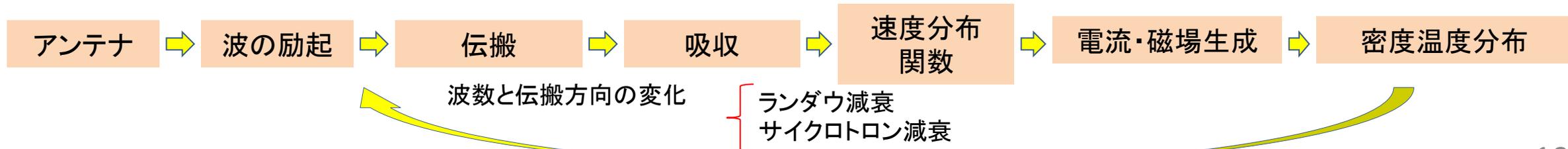
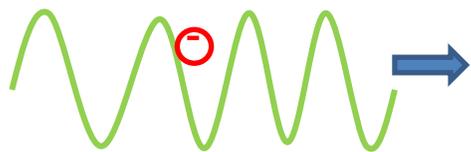


Fig. 4 (a) Plasma current density profile and (b) integrated plasma current, and (c) parallel electron velocity distribution function $f(v_{\parallel}/c)$ at $r/a = 0.63$ obtained by GENRAY/CQL3D [8]. Note that v_{\parallel}/c corresponds to $1/N_{\parallel}$.



加熱・電流駆動のための様々なアンテナ

travelling wave is necessary

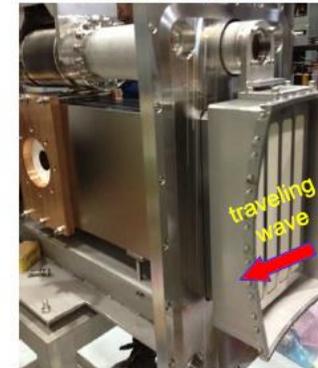


Antennas in the past

Inductively-Coupled Compline (ICC) Antenna



Grill Antenna

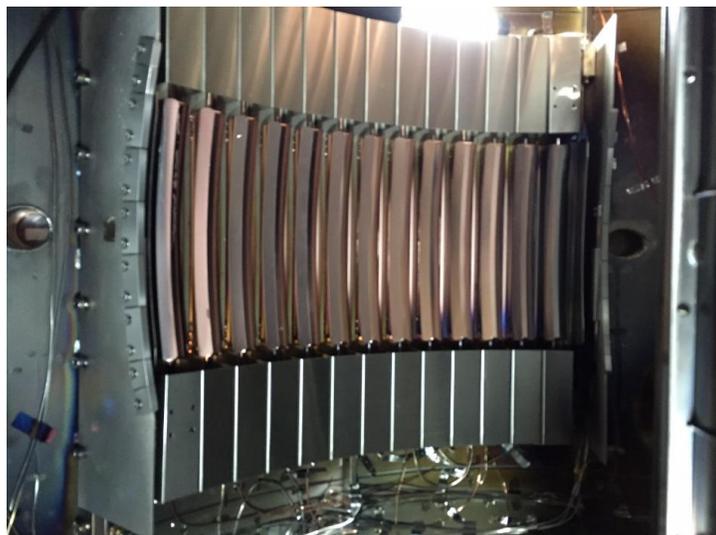


Present antennas

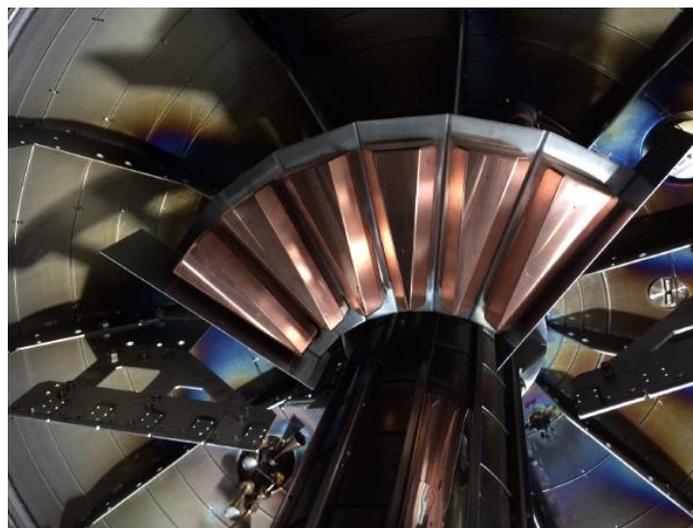
Capacitively coupled compline (CCC) antennas and a finline antenna

- Traveling SW is excited directly
- Sharp $n_{||}$ spectrum & high directivity

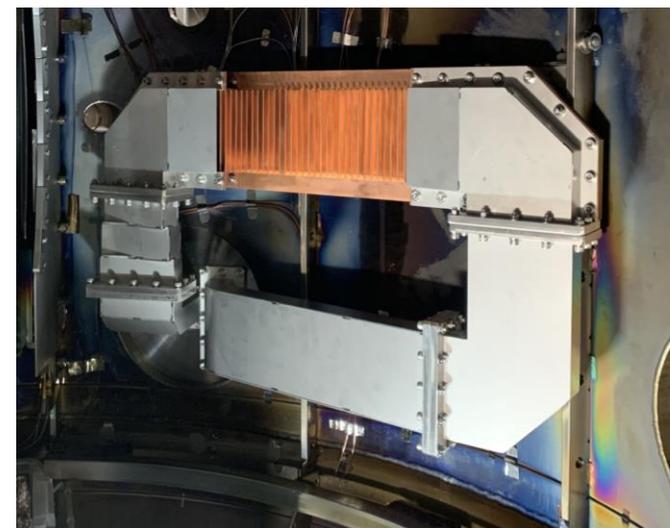
Developed in collaboration with C.P. Moeller (GA, US)



Outboard launch (200 MHz)

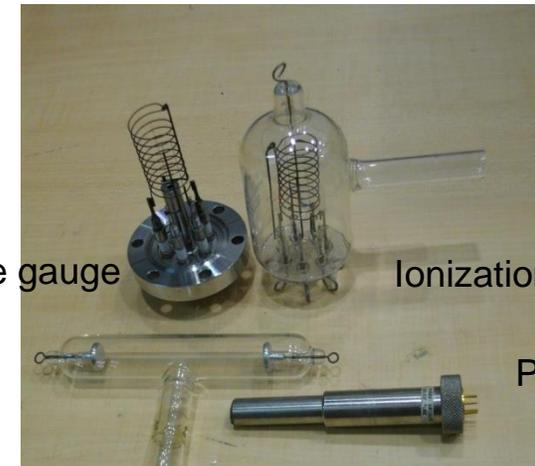
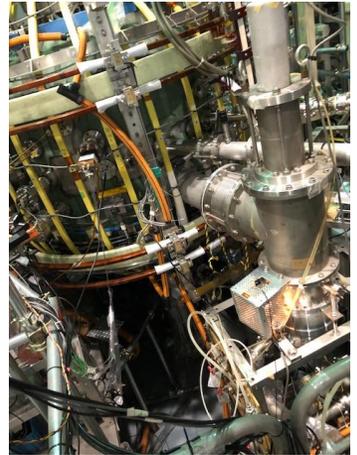
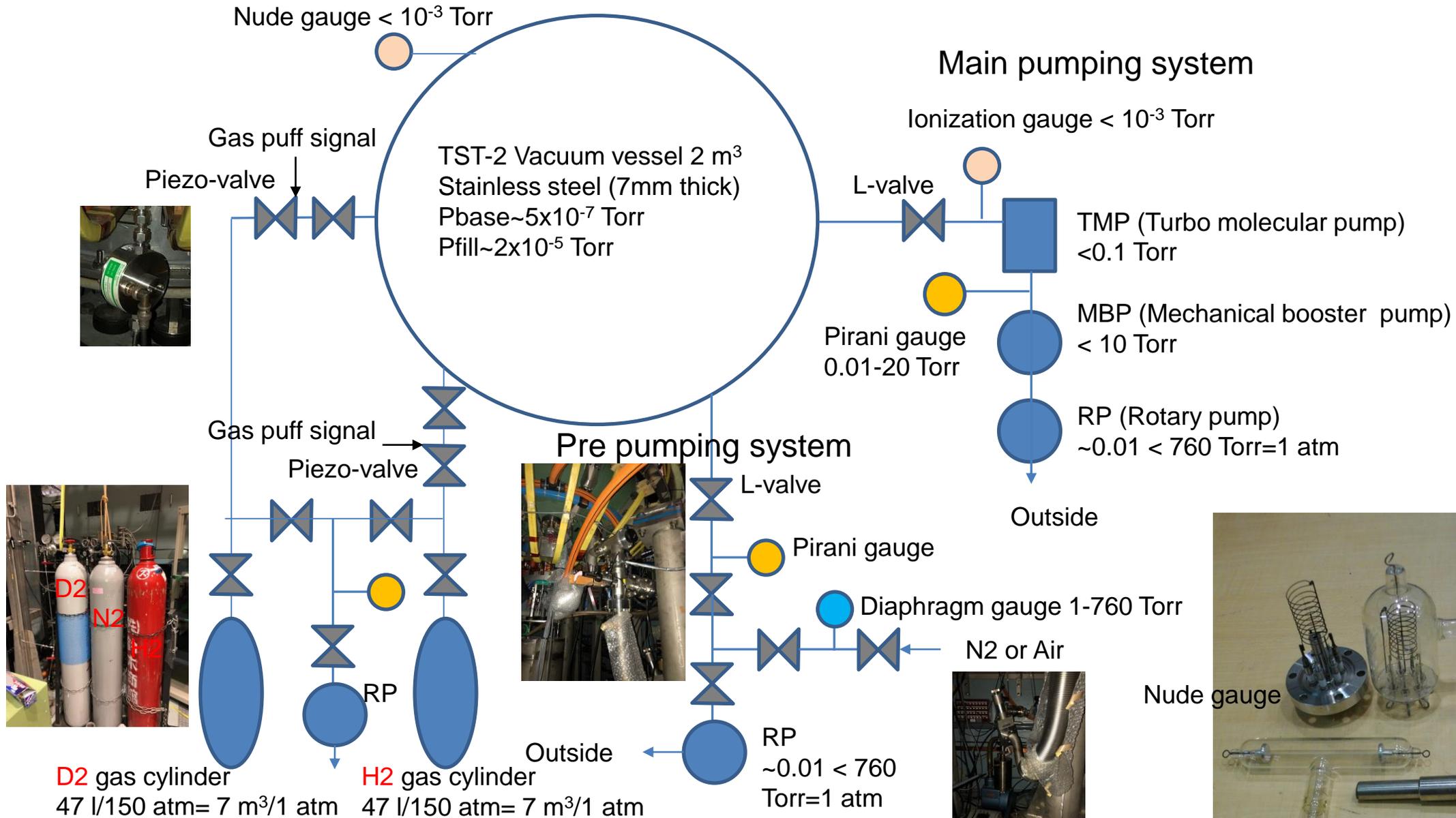


Top-launch (200 MHz)

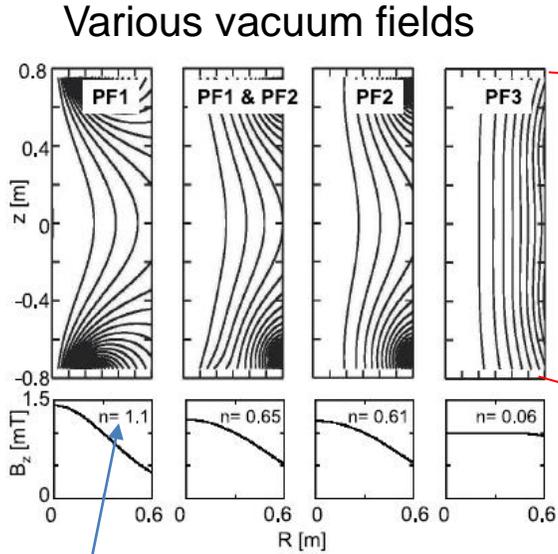


Outboard-launch (2450 MHz)

真空排気系、ガス供給系

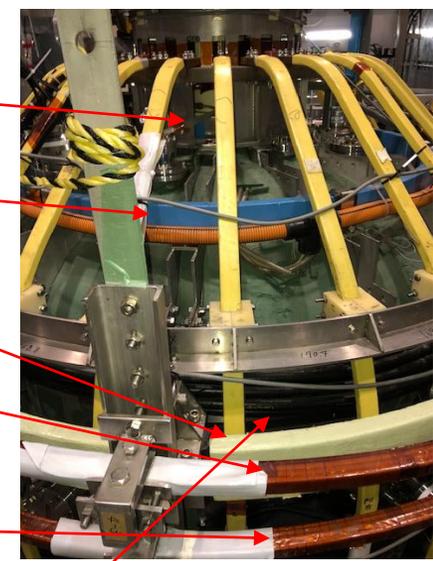
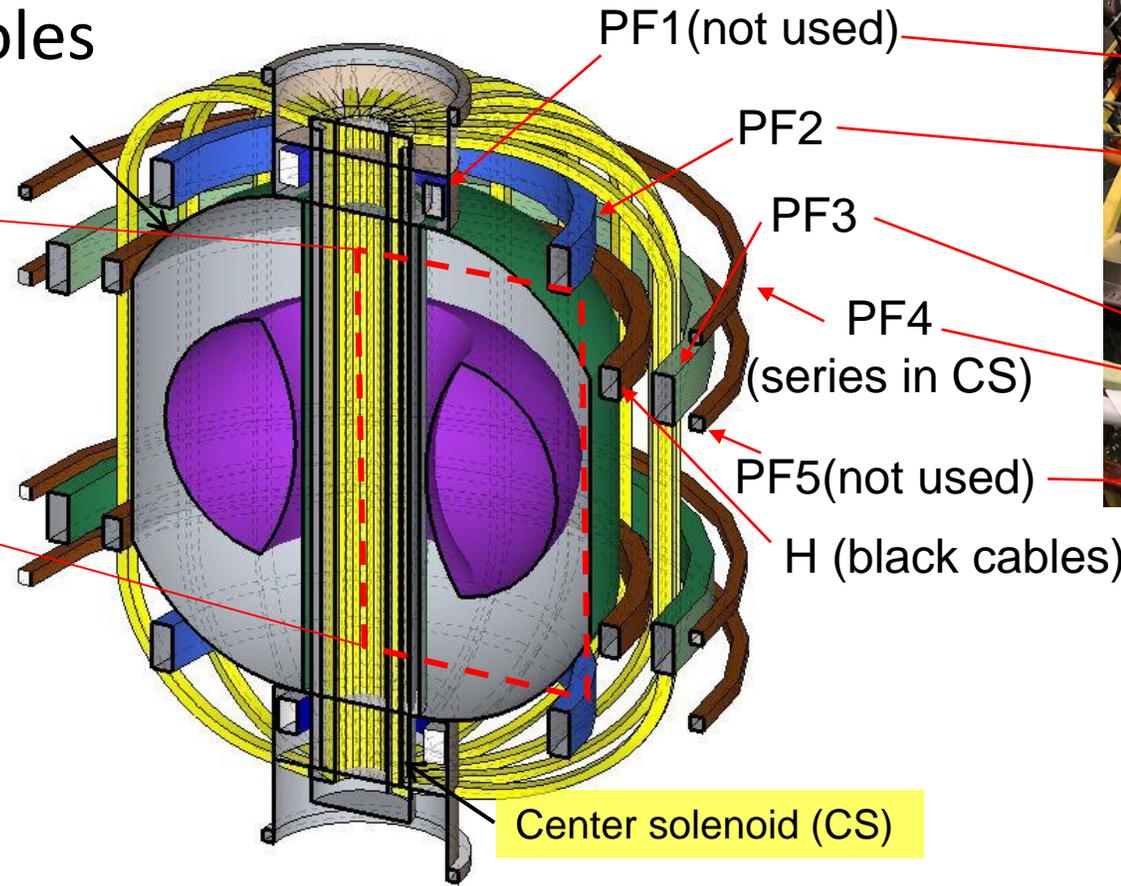


TST-2 coils and their roles

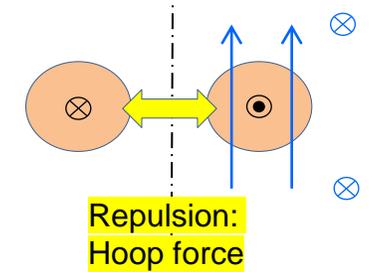


$$n_{index} \equiv -\frac{\partial B_z}{\partial R} \frac{R}{B_z}$$

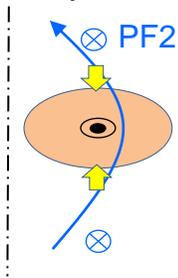
measure of the shaping and vertical stability



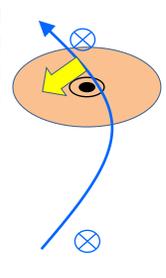
Main role of PF



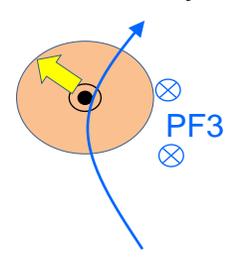
Vertical compress



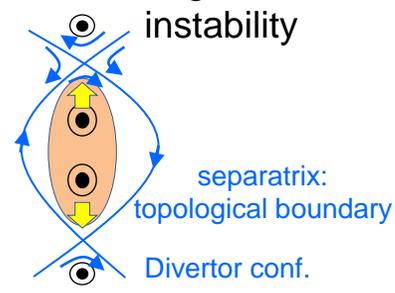
Vertical stability



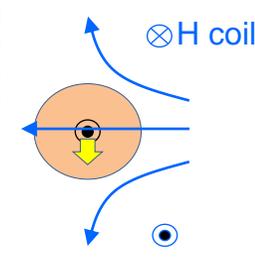
Vertical instability



Vertical elongation, instability

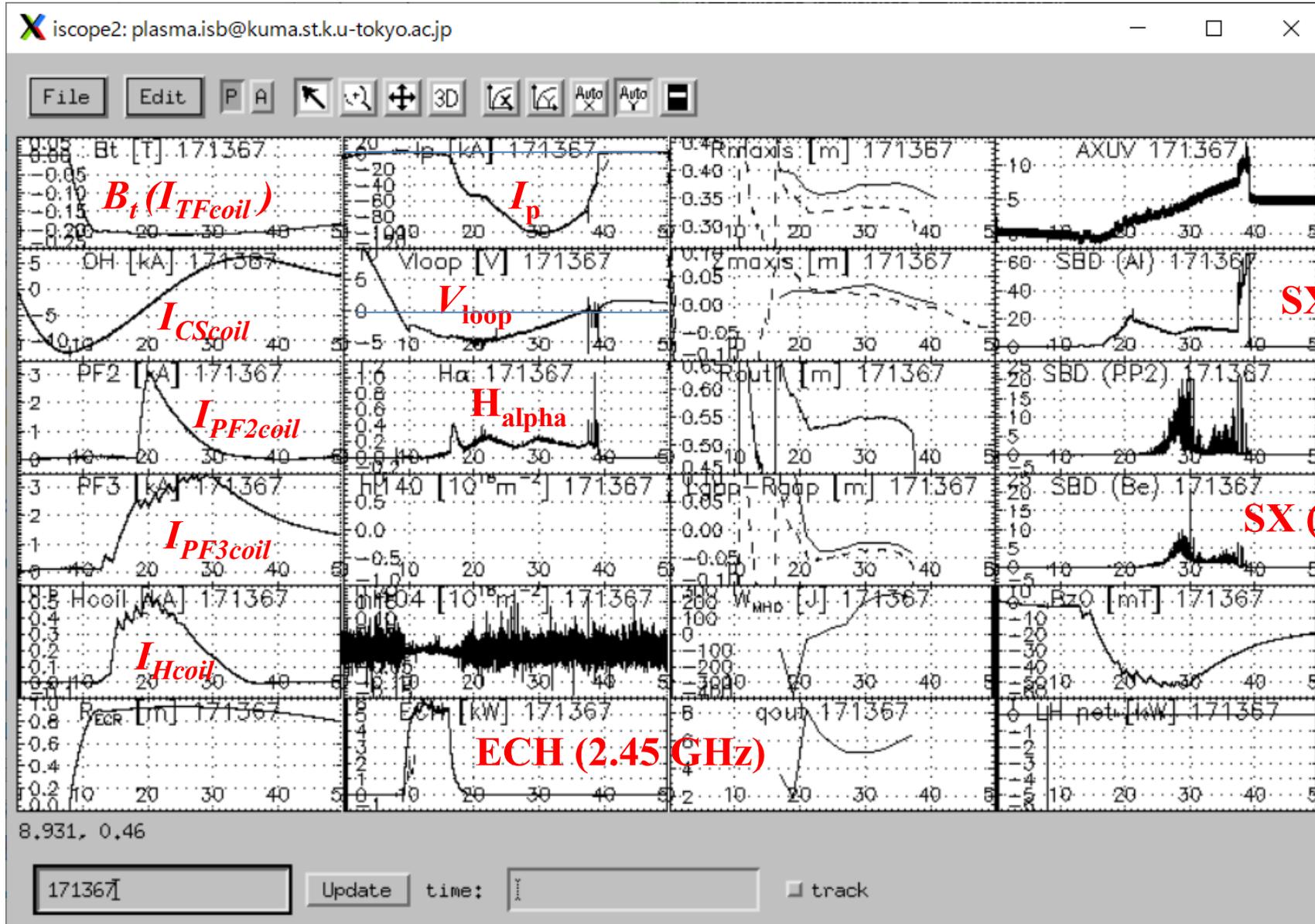


Vertical shift

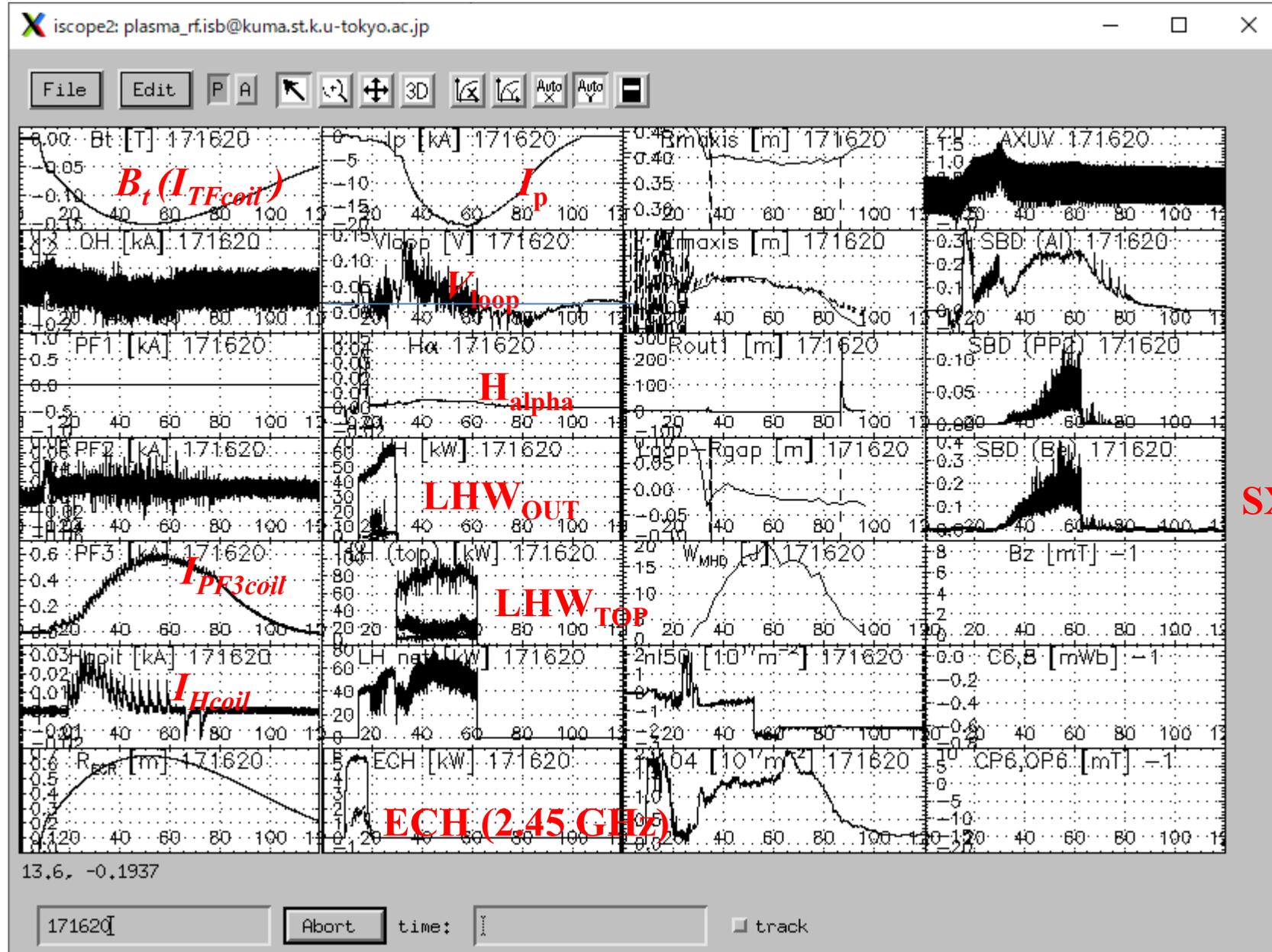


Equilibrium in tokamak represents mainly the force balance between the outward hoop force and the inward force by the external vertical field

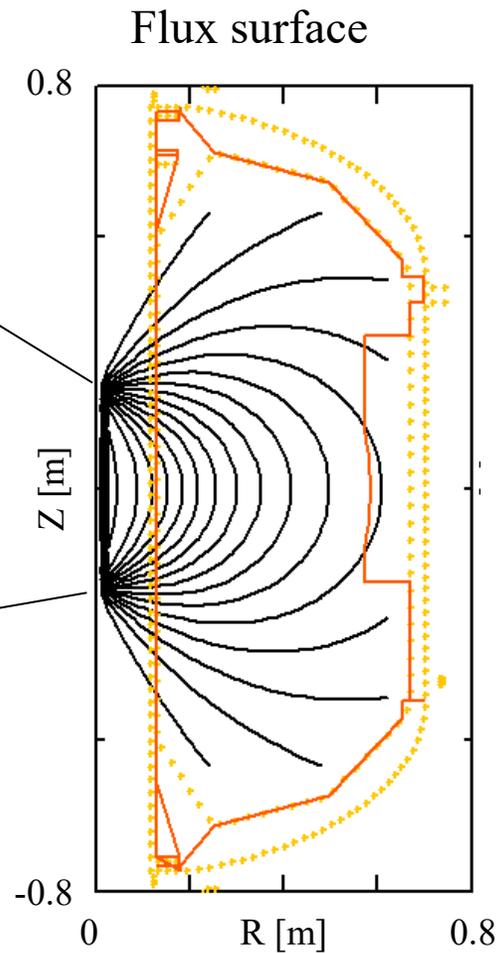
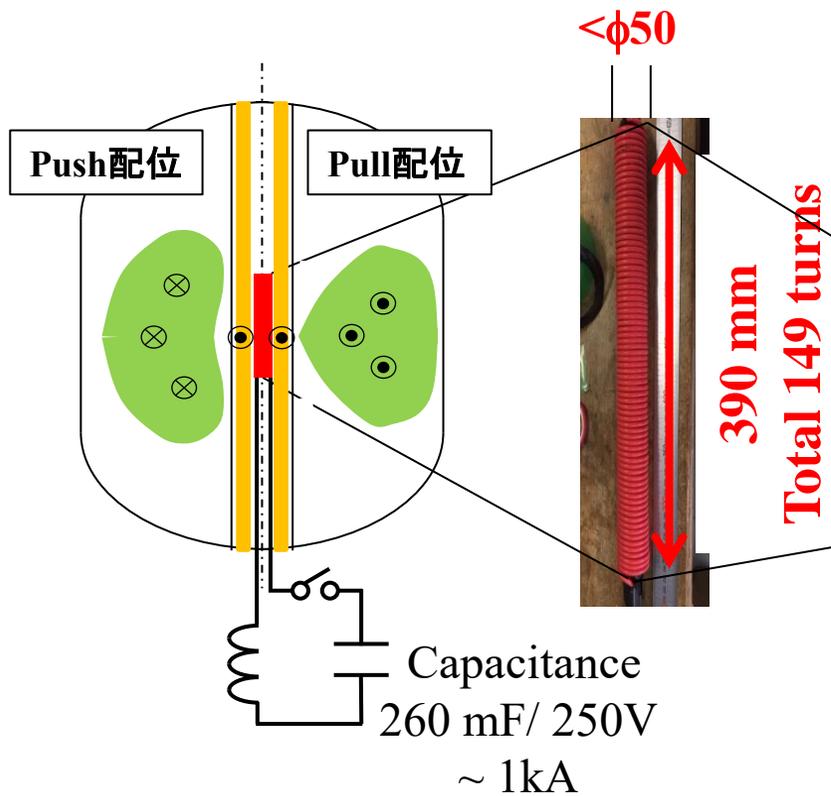
誘導で生成したプラズマの波形



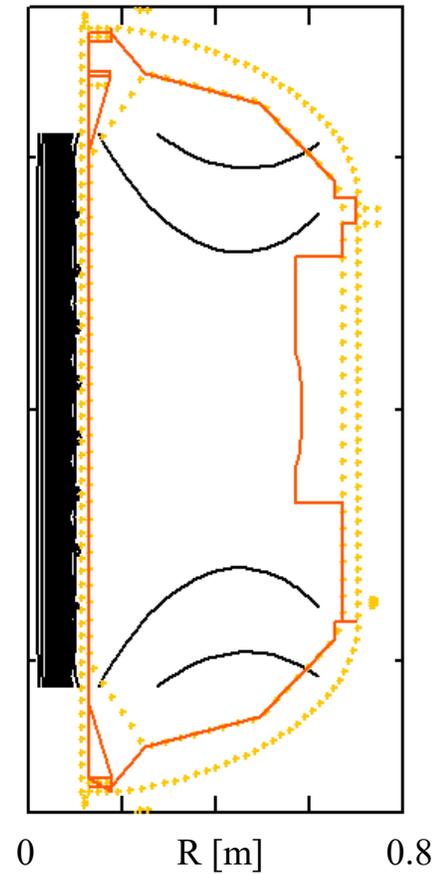
波で生成したプラズマの波形



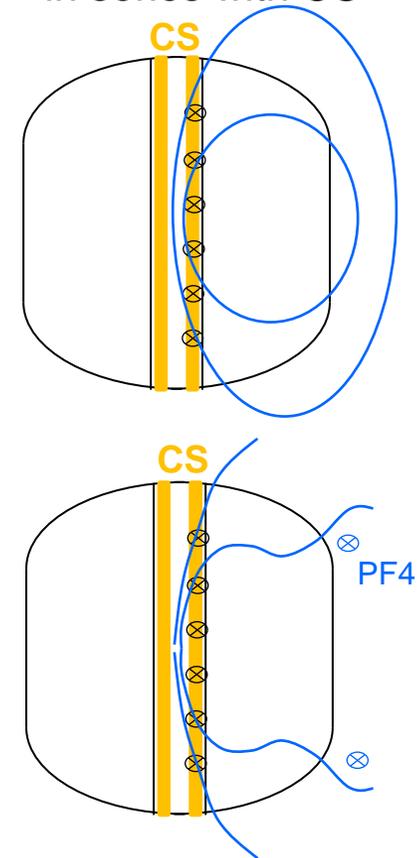
トラス中心部小型コイルを用いた形状制御実験



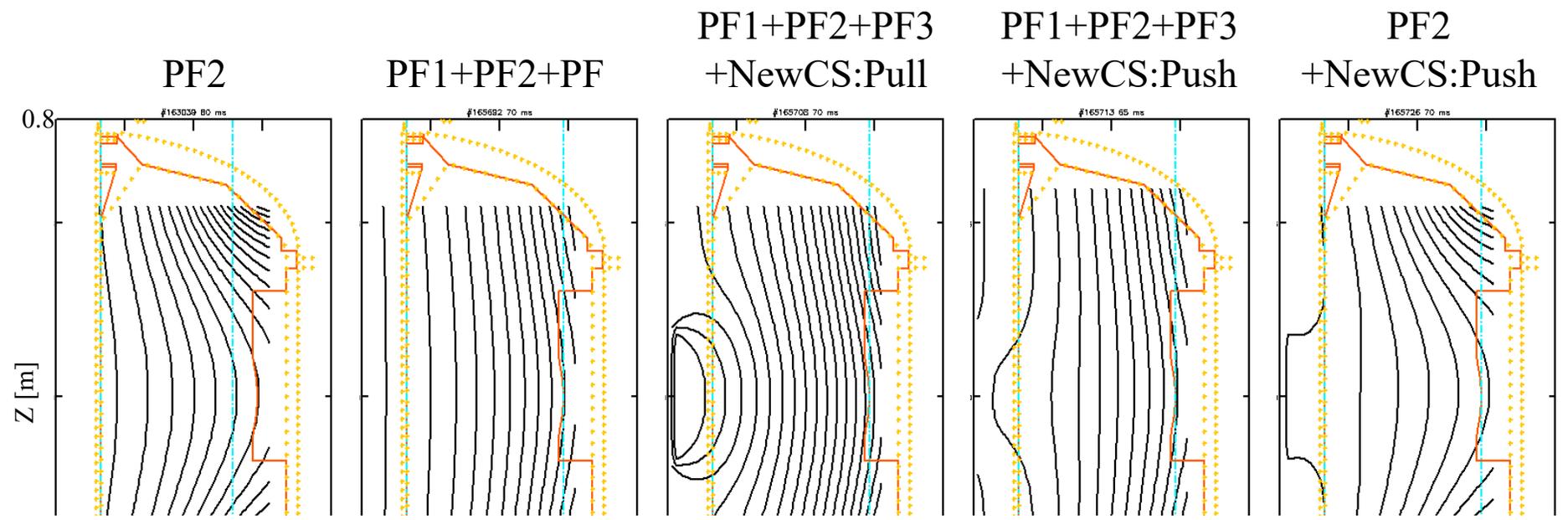
Cf.
Flux surface by the
normal Ohmic coil



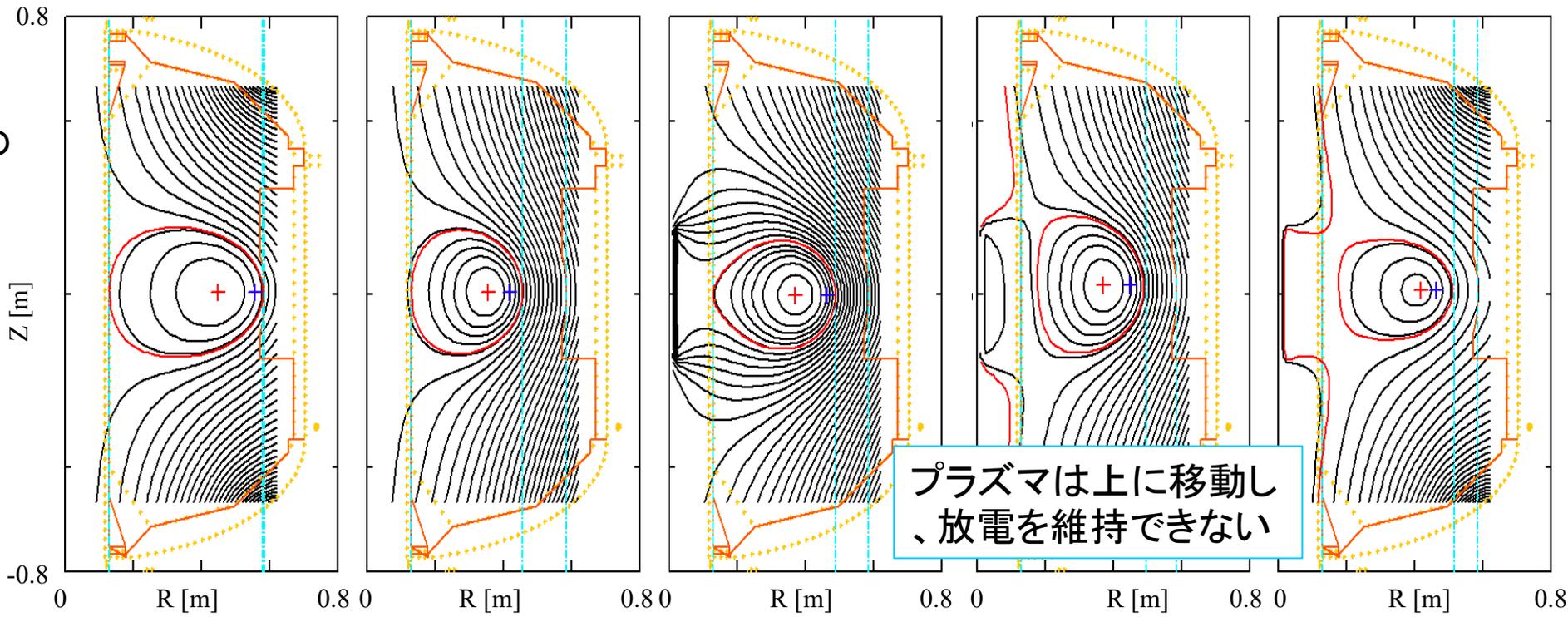
The role of PF4 connected
in series with CS



外部コイル磁場



プラズマを含めた磁場



プラズマは上に移動し、放電を維持できない

トマカクにおけるプラズマ着火

プラズマ生成の初期段階には以下の3つがある。これら、またはこれらの一部を着火と呼ぶ。

1. 予備電離: 密度をあるレベルまで増大させる
2. プラズマ電流生成とトマカク配位の形成
-> 閉じ込め、加熱効率の増大
3. バーンスルー: 電子温度10-50 eVの範囲は、イオン化の途中段階であり、放射冷却が大きく、プラズマ生成初期の加熱パワーが不十分な時間帯で、この範囲を乗り越えることをバーンスルー(イオン化の完了)と呼ぶ。

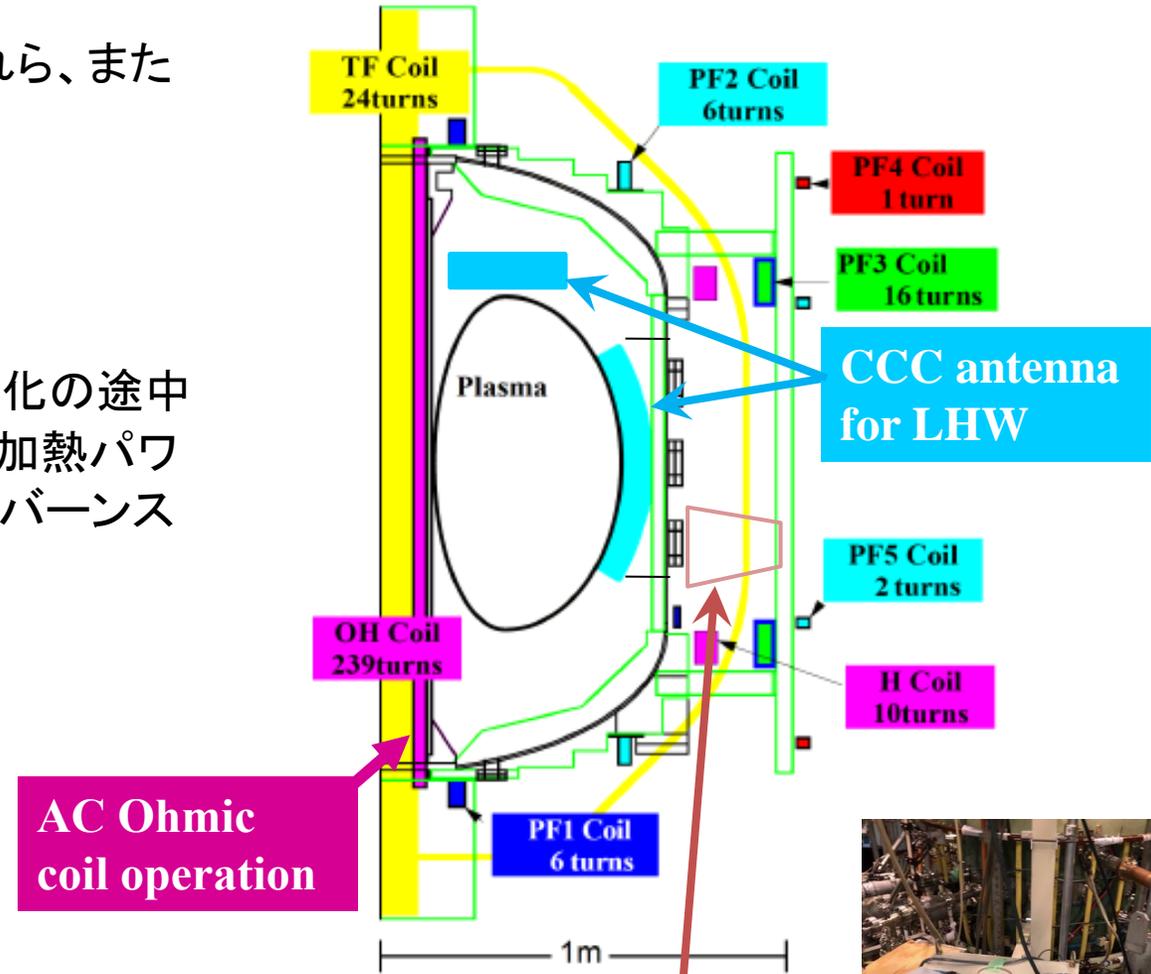
着火に以下の3種類がある

- 誘導電場のみによる着火
- 電子加熱を援用した誘導電場着火
- 非誘導高周波着火

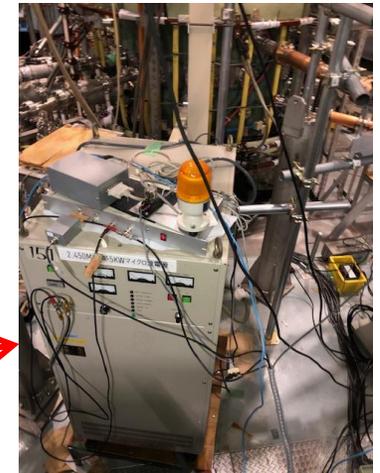
非誘導もしくは、小型CS誘導着火は

- トーラス中心部のスペースの有効活用、コスト削減の点で
- 大型超伝導装置では、高い誘導電場を印可できないので魅力的である。

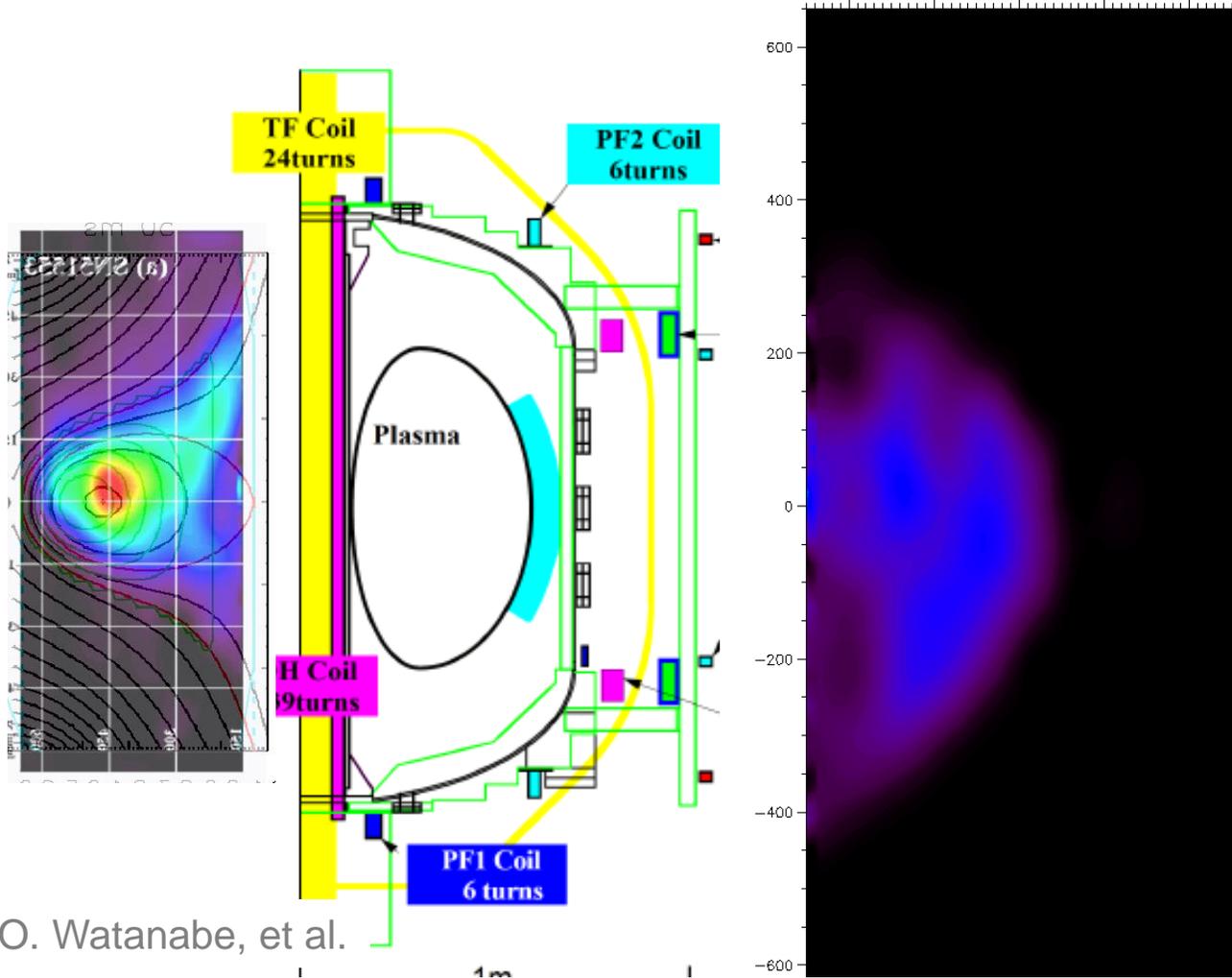
< 0.4 V/m in ITER



X/O-mode horn for ECH
2.45 GHz, Up to 5 kW
using magnetron

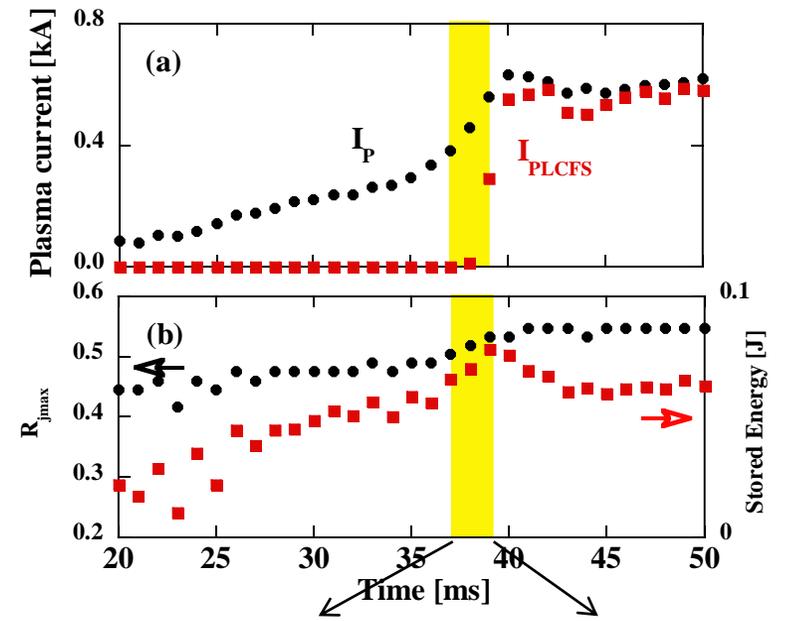


非誘導着火、配位形成の例 (電子加熱による自己組織化)

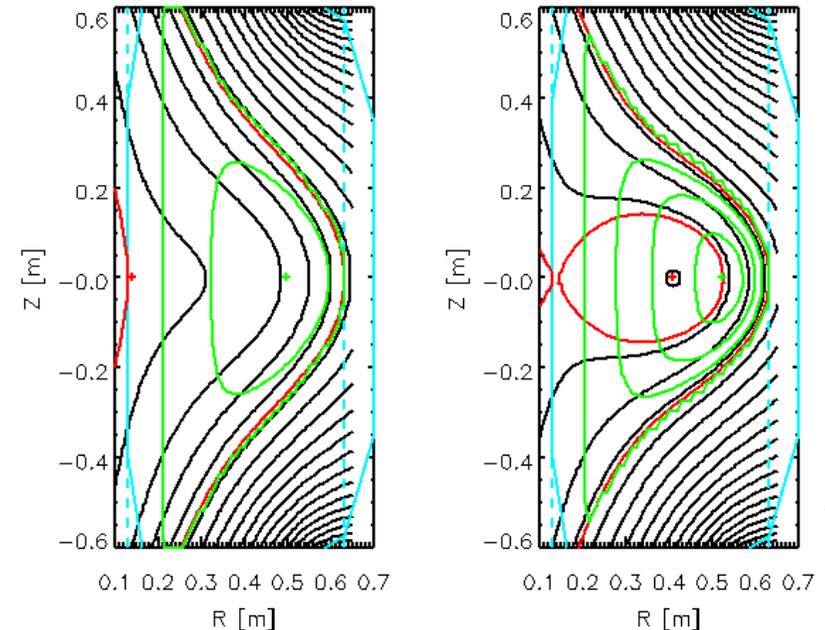


O. Watanabe, et al.

対称加熱で、非対称な電流が駆動され、閉じた磁気面をもつトカマク配位が自発的に形成される

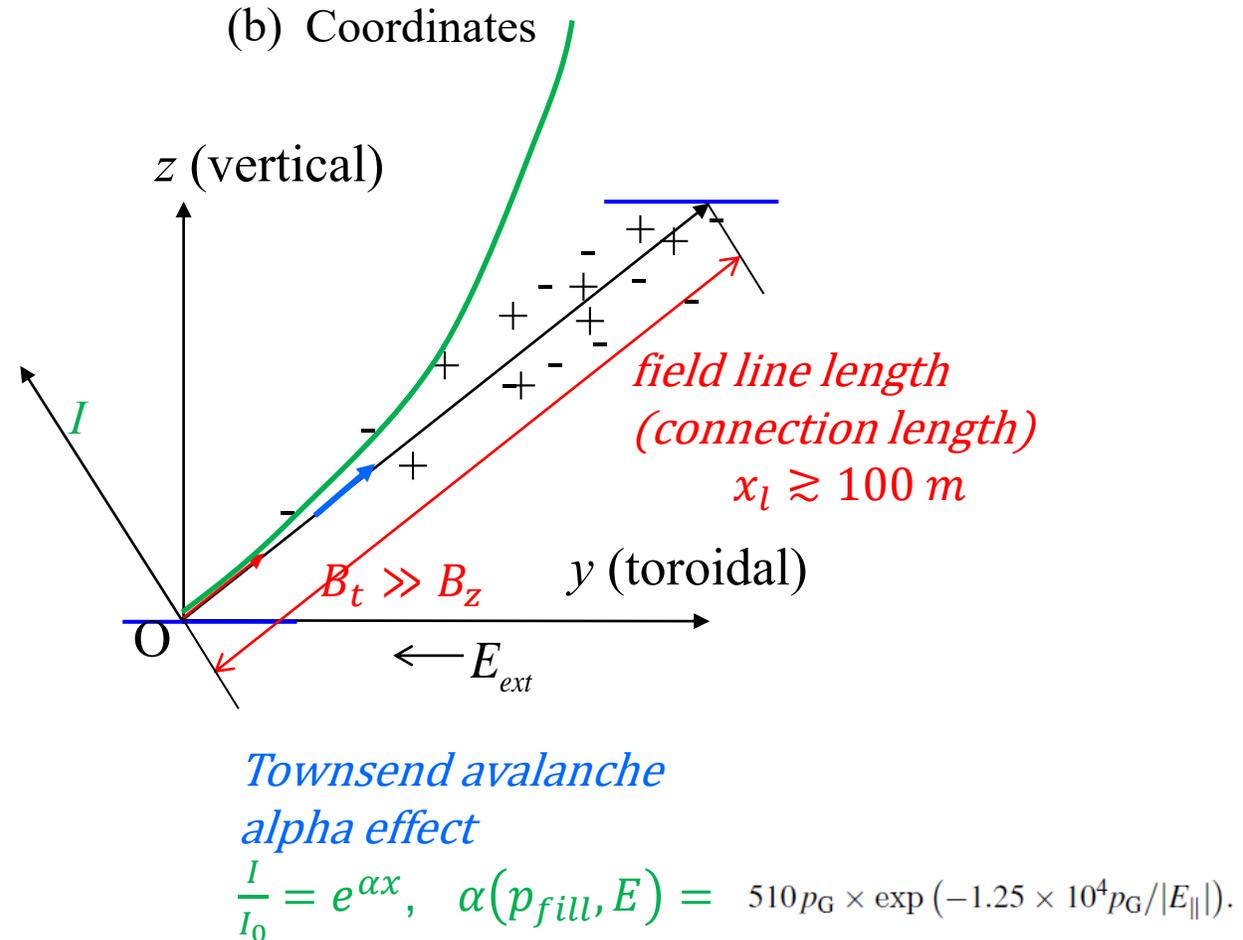
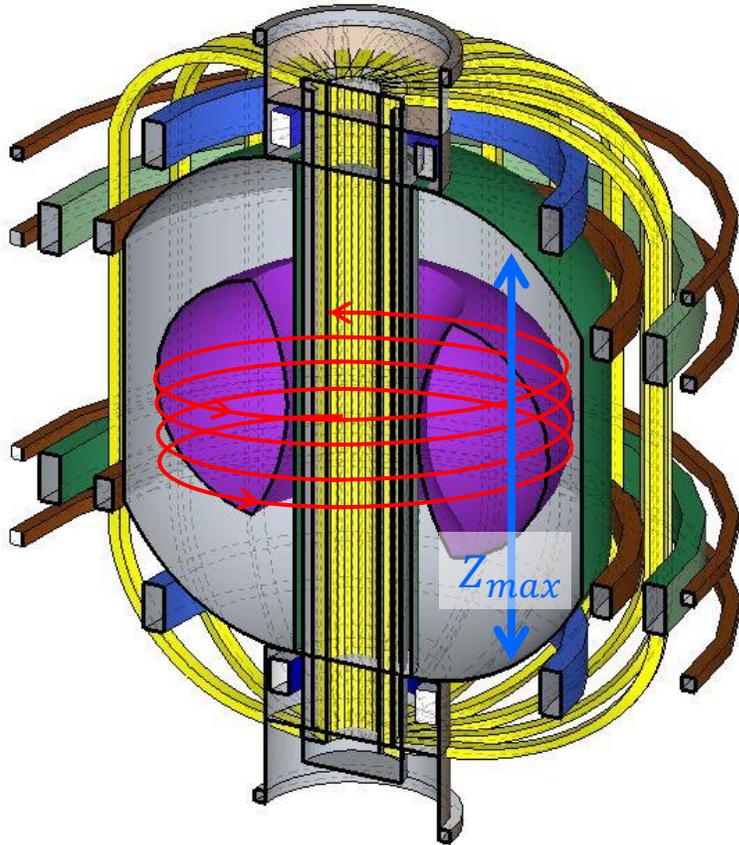


Just before and after the initial closed flux surface formation
37 ms 39 ms



A. Ejiri, et al.

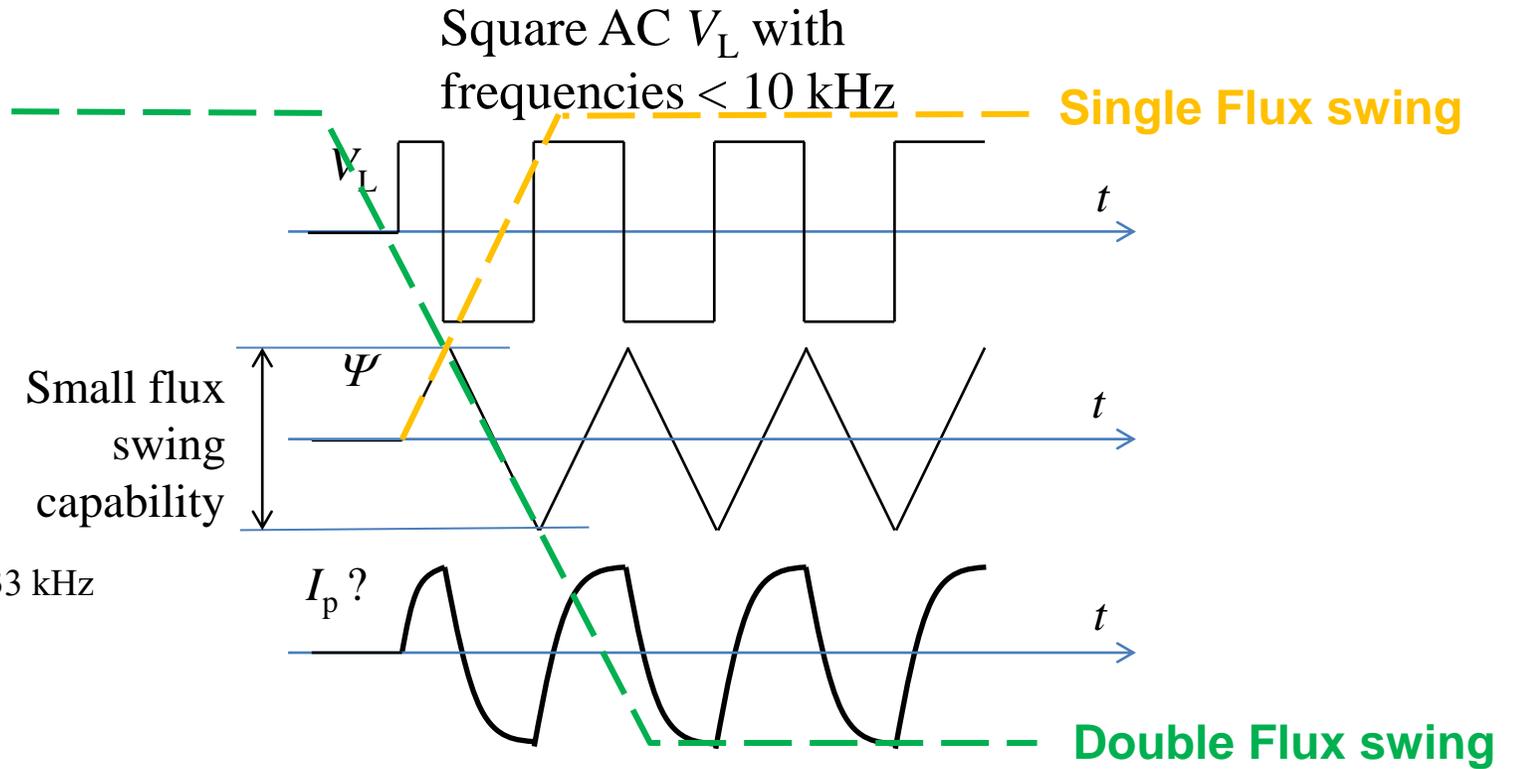
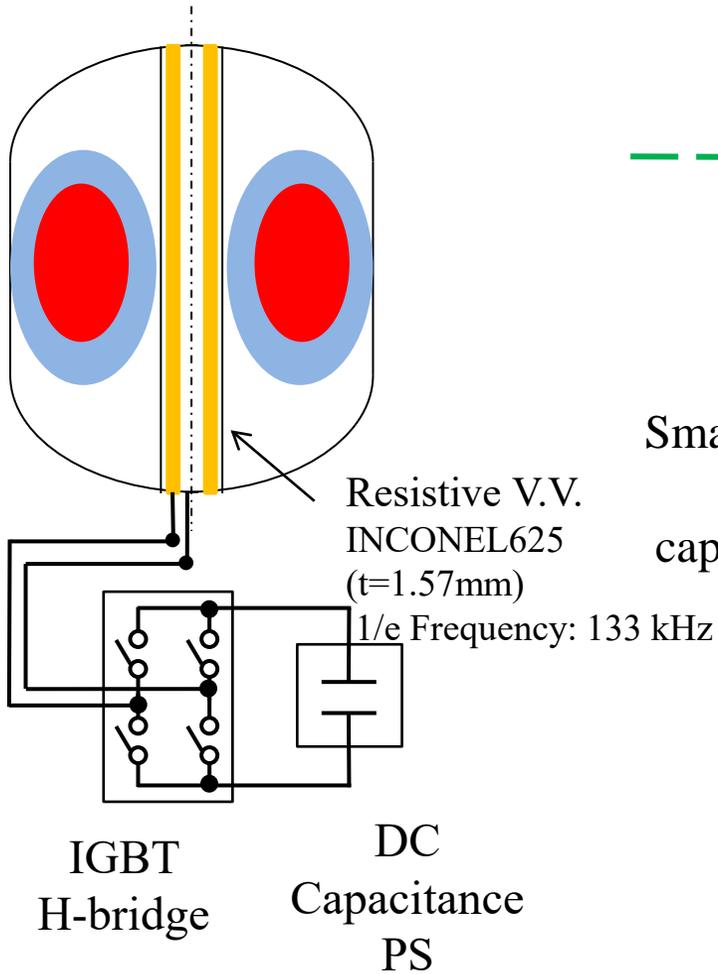
誘導予備電離の精密な研究



通常の誘導予備電離は、ポロイダル磁場がゼロに近く、純トロイダル磁場が有利とされている。実際には、微小なポロイダル磁場が存在し、磁力線長は有限である(1000 m)程度。このように長い磁力線で何が起きているかを精密に実験した例、有限磁力線の効果を正しく取り入れた理論はなかった。

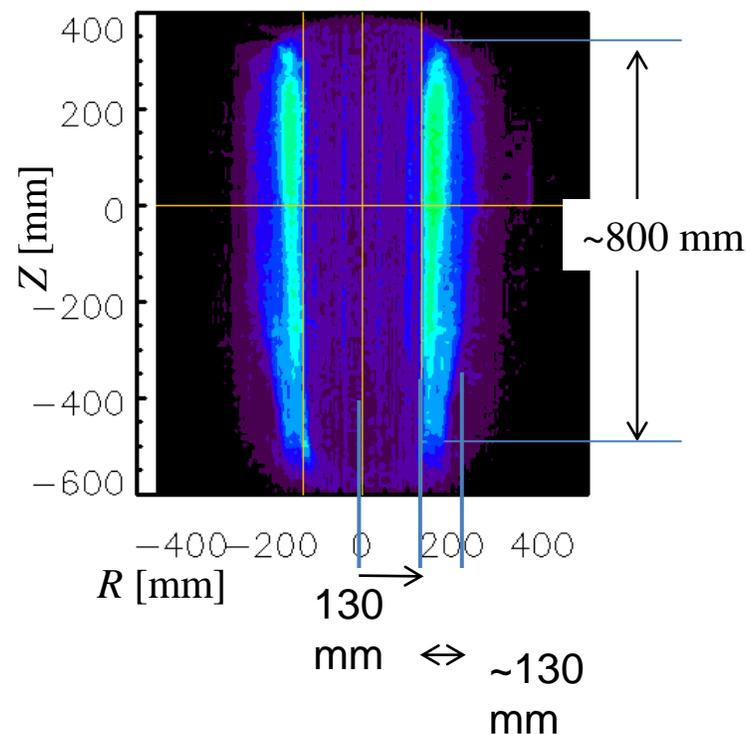
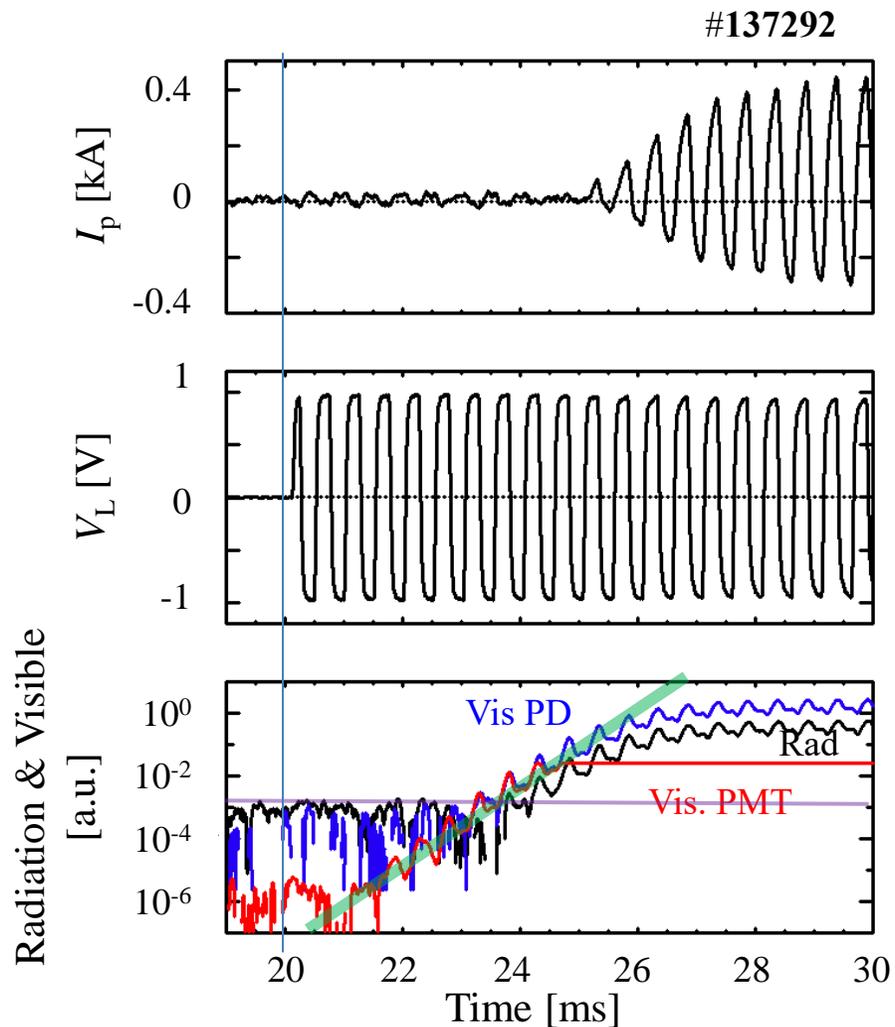
交流CS運転法

- 小さな磁束(小さなCS)で予備電離が可能
- 予備電離の精密実験が可能



交流CS運転法による予備電離の実証

交流誘導電場を印可後しばらくしてから、交流電流が立ち上がる。
電場印加直後から発光(密度に比例)が指数的に6桁にわたって成長すること発見



精密発光測定により
予備電離の物理の詳細が明らかになった。