

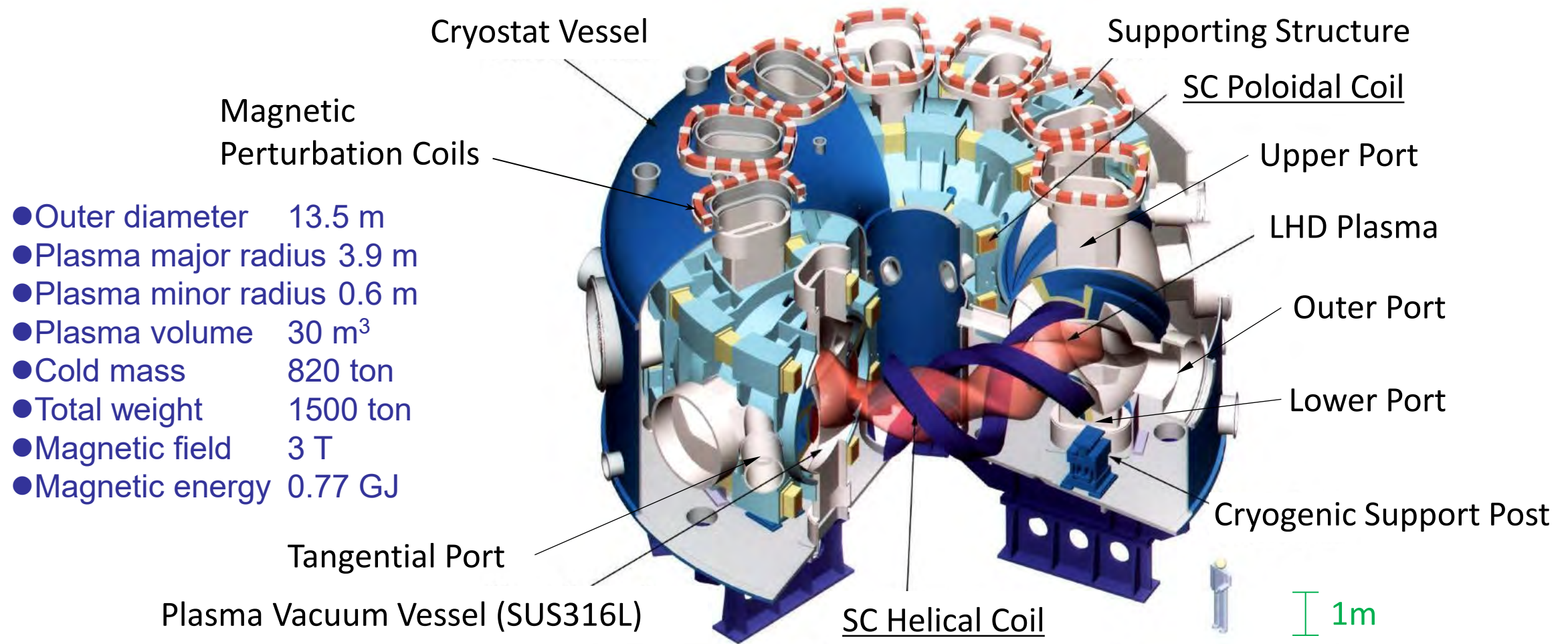
大型ヘリカル装置(LHD)における長時間放電伸長のための プラズマ可視画像の観測

庄司 主^{1,2}、笠原 寛史¹、関 哲夫¹、關 良輔¹、時谷 政行^{1,2}、田中 宏彦³、増崎 貴^{1,2}、
後藤 基志^{1,2}、LHD実験グループ

¹核融合科学研究所、²総合研究大学院大学、³名古屋大学

- 大型ヘリカル装置(LHD)
- 長時間放電時のプラズマ監視のための可視カメラシステム
- LHDにおけるICRF加熱による長時間放電実験の歴史
- 長時間放電停止時における可視カメラによる画像計測
- まとめ（次世代プラズマ閉じ込め装置への提言）

大型ヘリカル装置 (LHD)

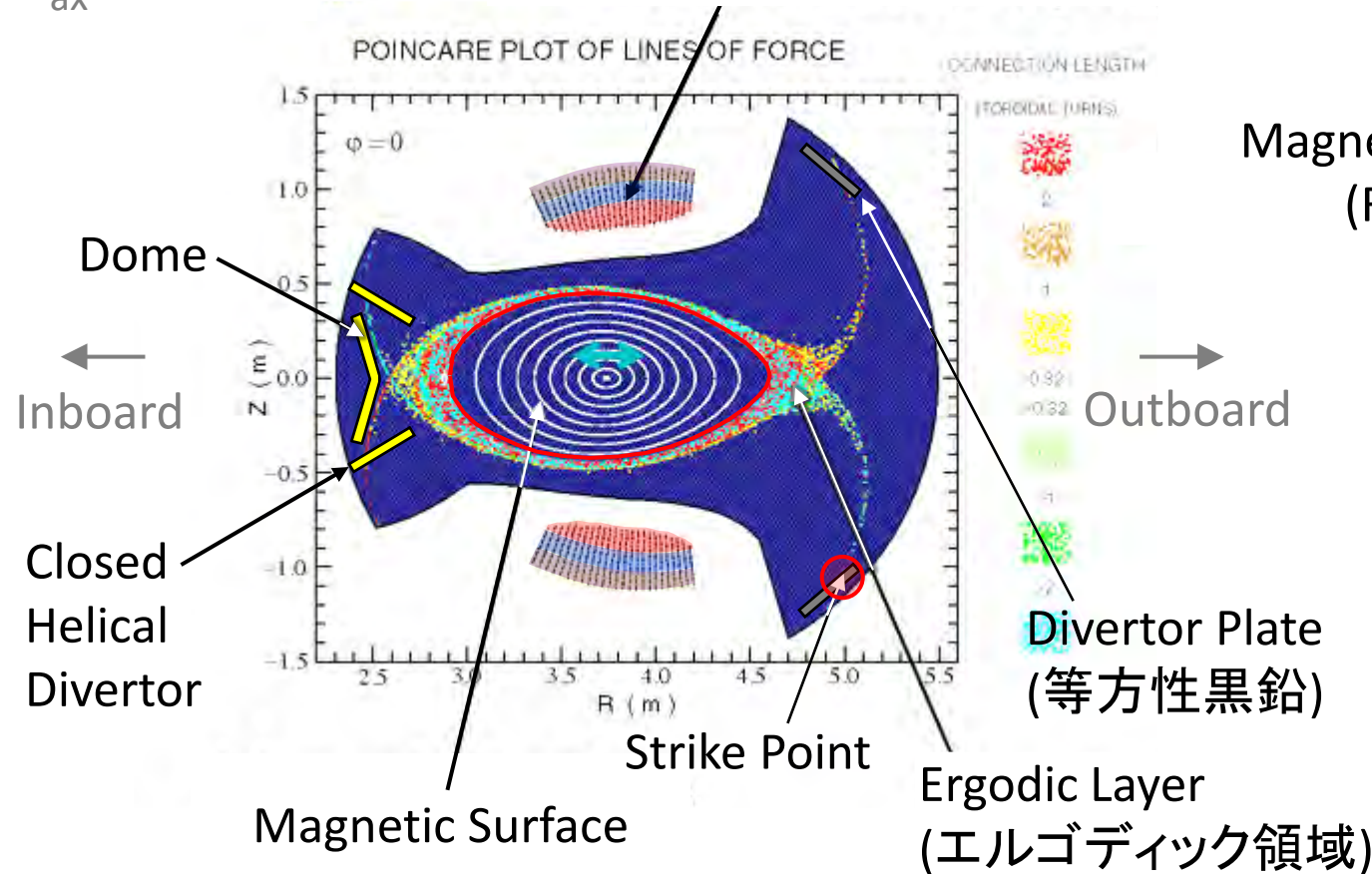


The Large Helical Device (LHD) is among the largest helical/stellarator-type plasma confinement systems. Its magnetic configuration is generated by two external superconducting coil sets—helical and poloidal coils—without relying on a toroidal plasma current. This feature enables inherently steady-state, long-duration plasma operation.

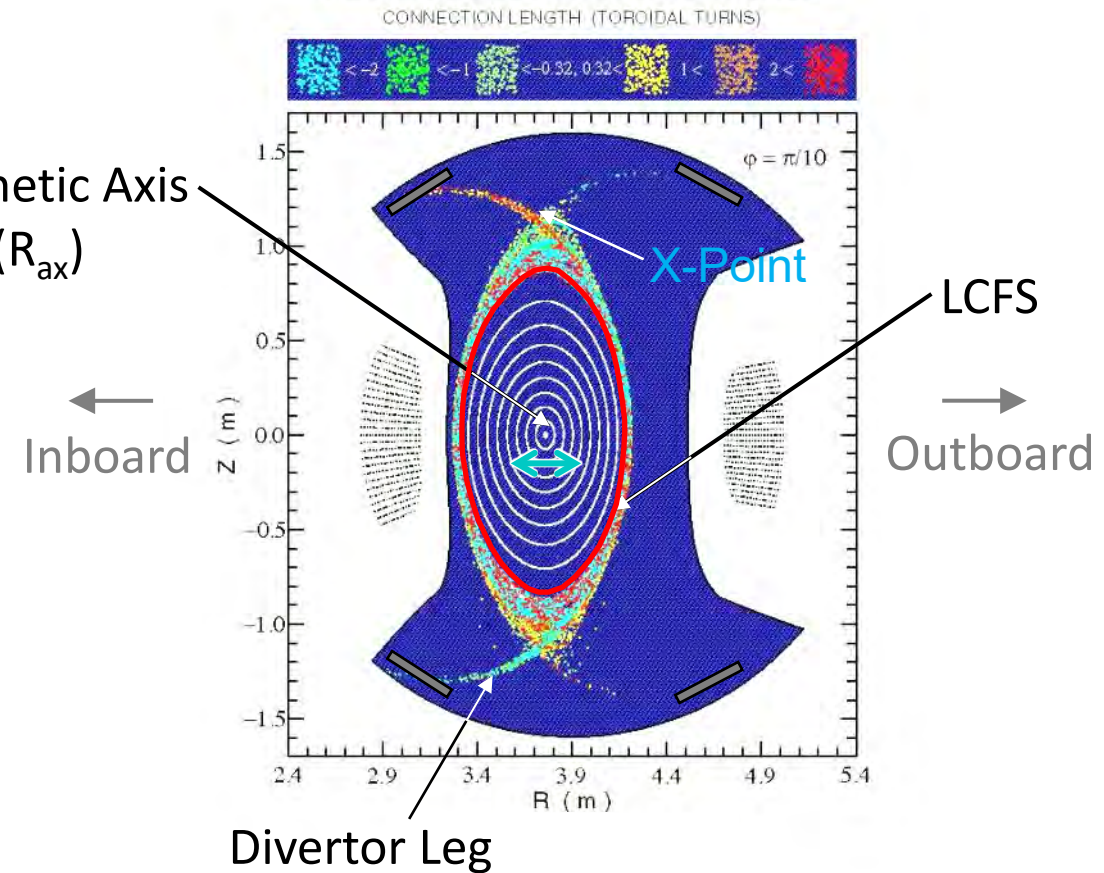
LHDのプラズマ閉じ込め磁場配位

$$R_{ax}=3.75 \text{ m}$$

Helical Coil (3 layers)



Magnetic Axis (R_{ax})



An ergodic layer is formed around the last closed flux surface (LCFS). Four bundled magnetic field lines (divertor legs) deviate from the ergodic layer at two X-points, which connect to divertor plates (isotopic graphite carbon) at strike points. The PFCs for the closed helical divertor have been installed on the inboard side of the torus.

長時間放電実験のためのプラズマ加熱装置(ICH&ECH)

FAIT antennas

(Port 4.5)

Field-aligned
Transforming

$\eta_{\text{heat}} \sim 80 \%$

HAS antennas

(Port 3.5)

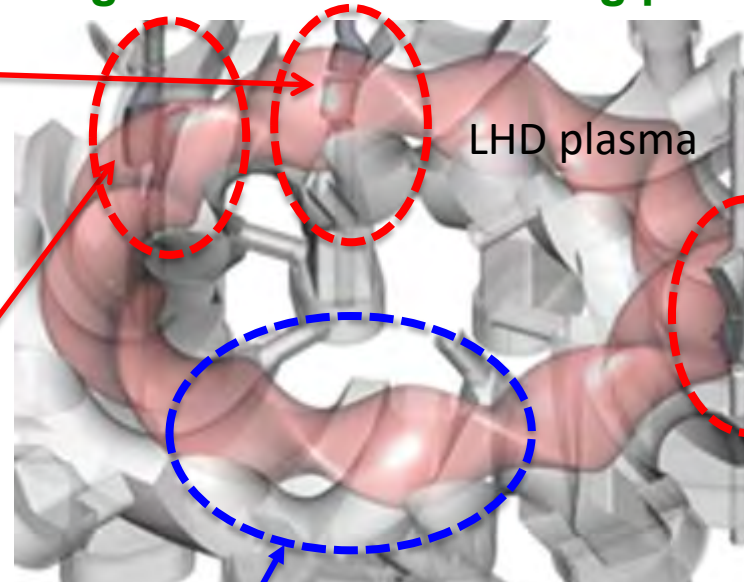
Field-aligned
Large wavenumber

$\eta_{\text{heat}} \sim 90 \%$

Carbon limiter



The total heating capacity of ICH has been upgraded to 3 MW, with 6 transmission lines.
Three kinds of ICRF antennas (HAS, FAIT, PA)
Local heat load was mitigated by distributing the total ICRF heating power.

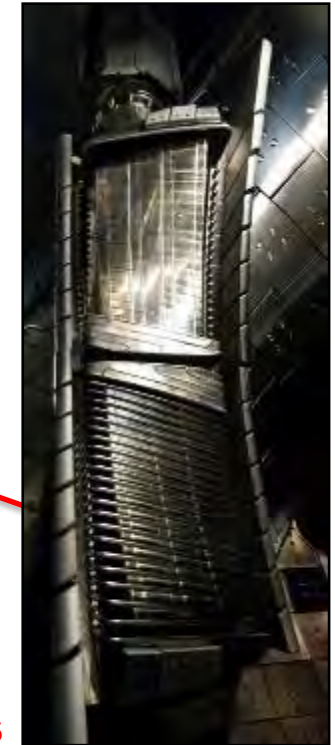


Core-electron heating sources at 77 and 154 GHz were assembled.
Total heating power of ECH upgraded to 0.54MW. (82.7, 84, 77, 154GHz)

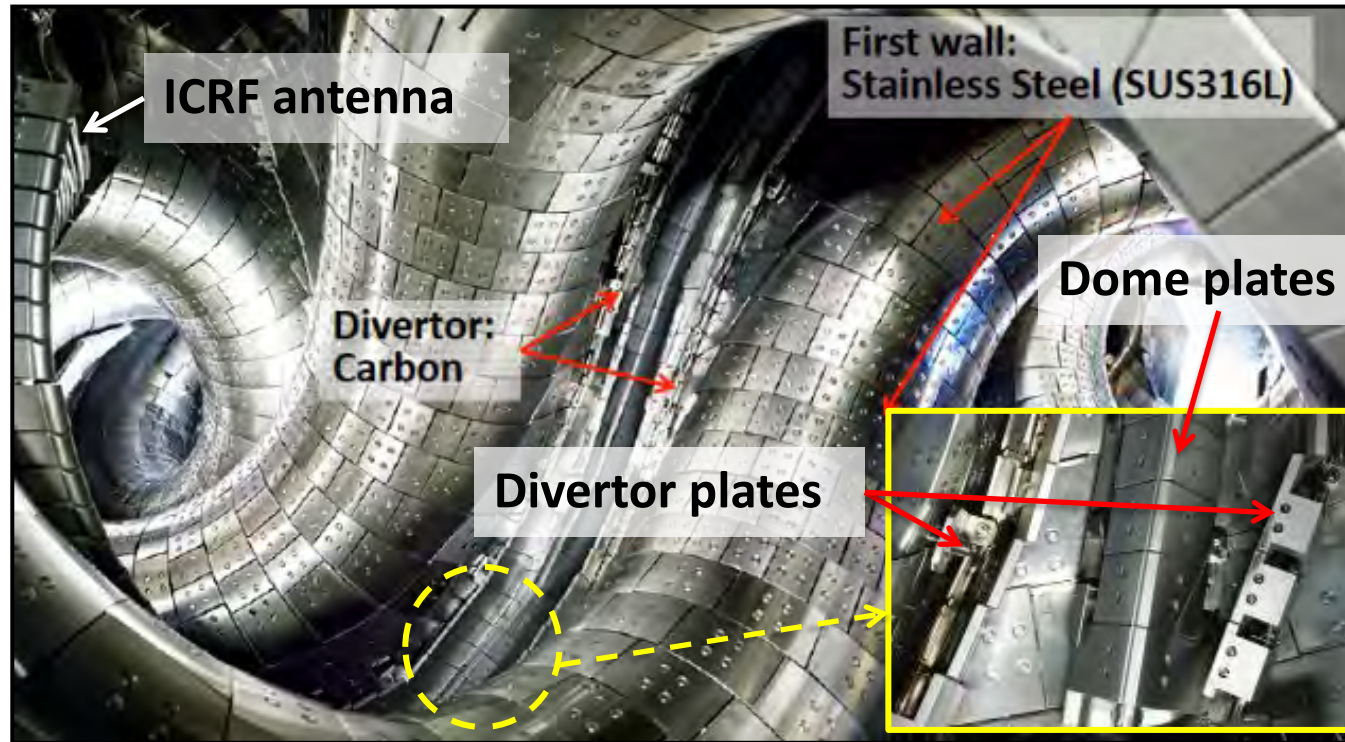
PA antennas

(Port 7.5)

Large antenna coupling with Faraday shield ($\eta_{\text{heat}} 70 \%$) and without Faraday shield ($\eta_{\text{heat}} \sim 60 \%$)



長時間放電実験のためのプラズマ対向機器



Typical device parameters:

Volume:

Inside vessel $\sim 210 \text{ m}^3$

Plasma $\sim 30 \text{ m}^3$

($R_{ax} \sim 3.9 \text{ m}$, $a \sim 0.6 \text{ m}$)

Surface:

PFCs $\sim 780 \text{ m}^2$

Vacuum vessel $\sim 730 \text{ m}^2$ (SUS316L)

Divertor plates $\sim 50 \text{ m}^2$ (Graphite)

Achieved plasma parameters:

$T_i \sim 10.3 \text{ keV}$ ($n_e \sim 1.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)

$T_e \sim 19.8 \text{ keV}$ ($n_e \sim 0.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)

$n_e \sim 1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ($T_i \sim T_e \sim 0.26 \text{ keV}$)

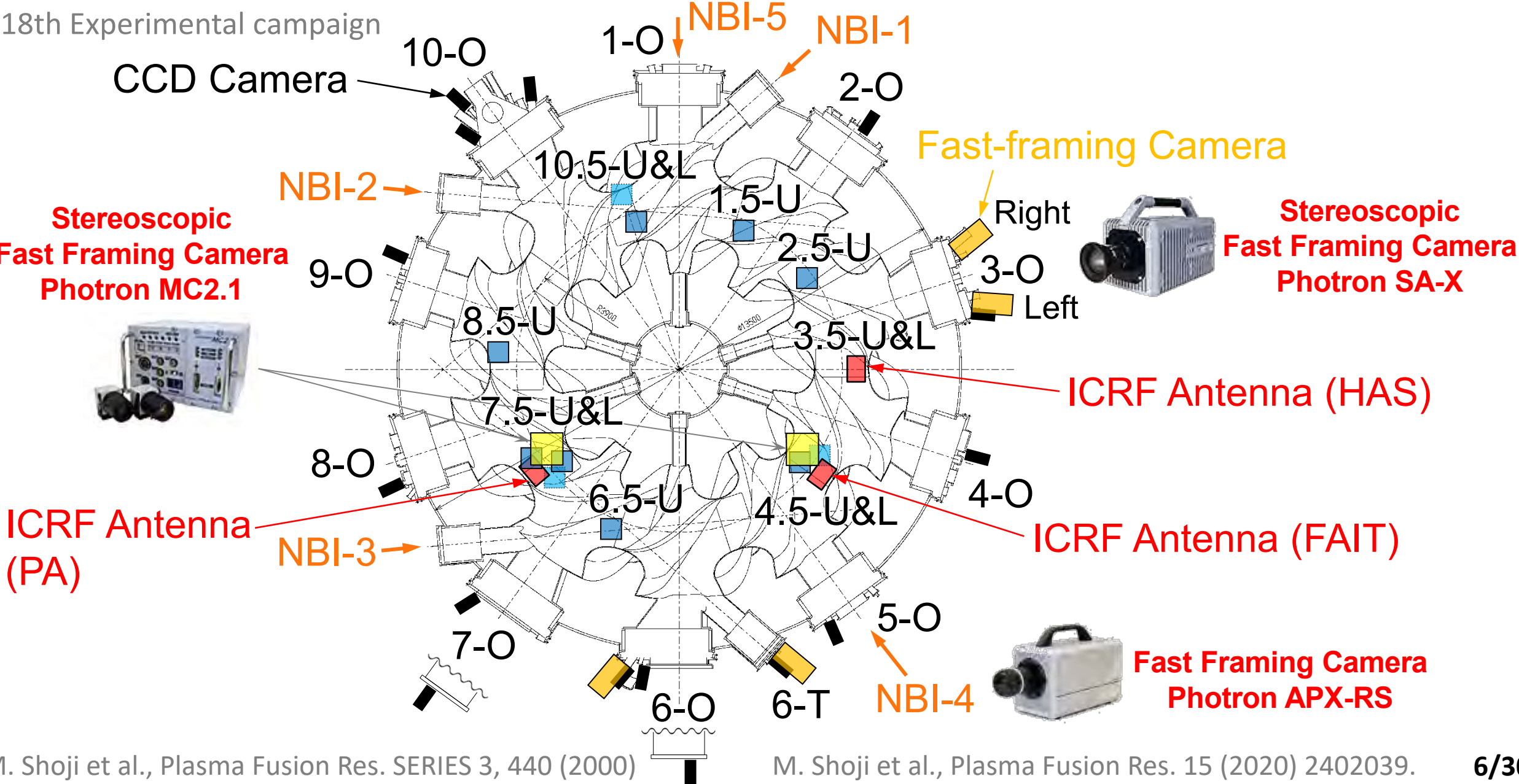
$\beta \sim 5.1 \%$ (0.425 T), 4.1 % (1 T)

$\tau_d \sim 54 \text{ min}$ (0.5 MW, $n_e \sim 0.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) in FY 2005

48 min (1.2 MW, $n_e \sim 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) in FY 2013

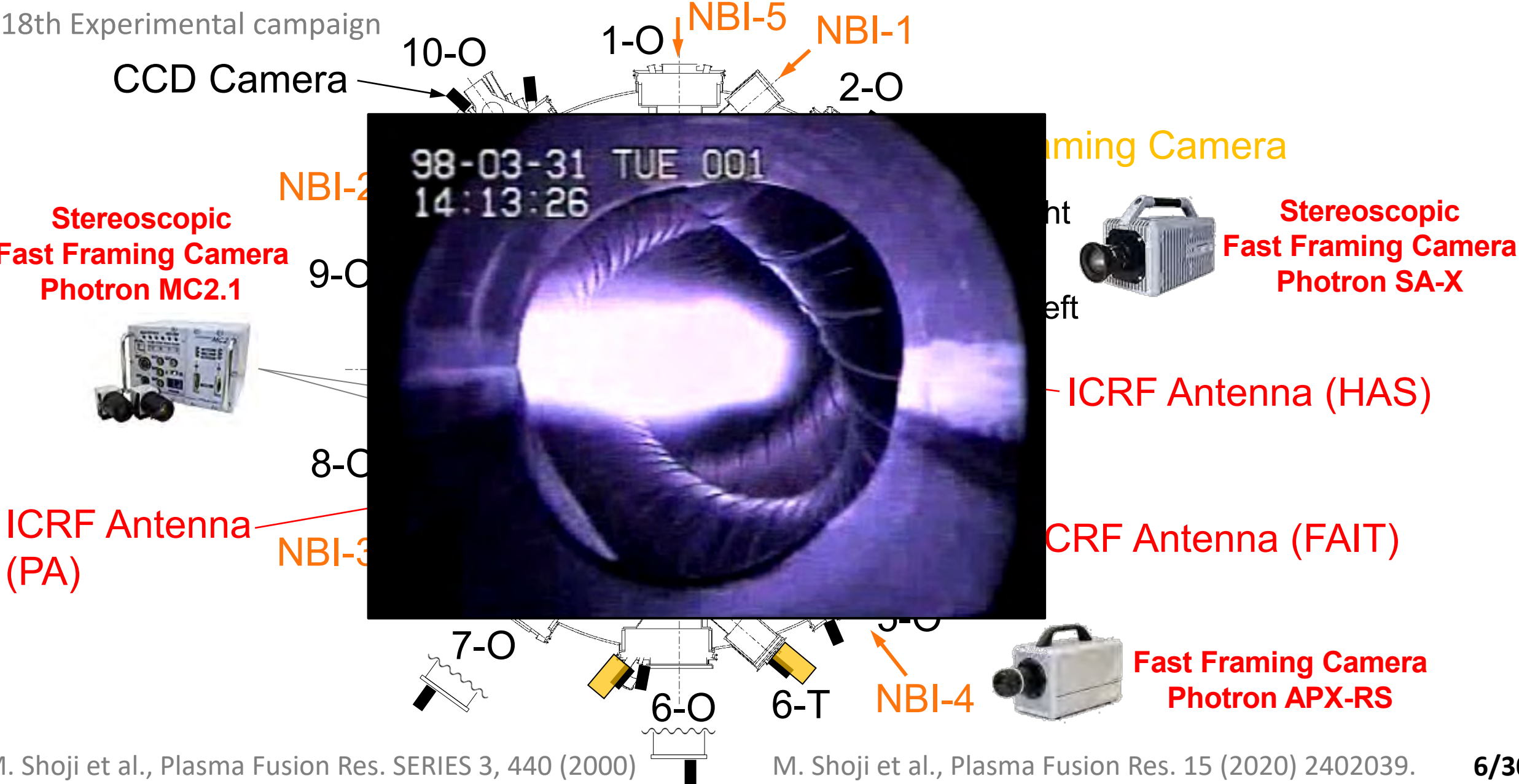
長時間放電実験時のプラズマ監視用CCDカメラ/高速カメラ群

18th Experimental campaign



長時間放電実験時のプラズマ監視用CCDカメラ/高速カメラ群

18th Experimental campaign



長時間放電実験時のプラズマ監視用CCDカメラ/高速カメラ群

18th Experiment

CCD Camera

Stereoscopic
Fast Framing Camera
Photron MC2



ICRF Antenna
(PA)



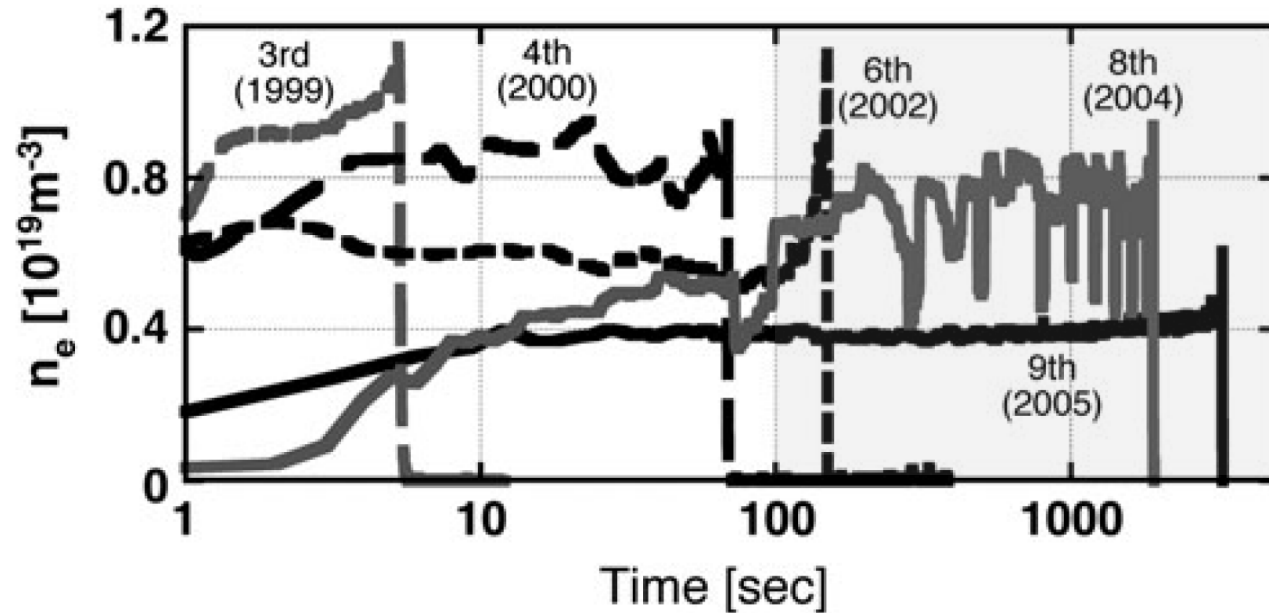
Camera
Stereoscopic
Fast Framing Camera
Photron SA-X

Antenna (HAS)

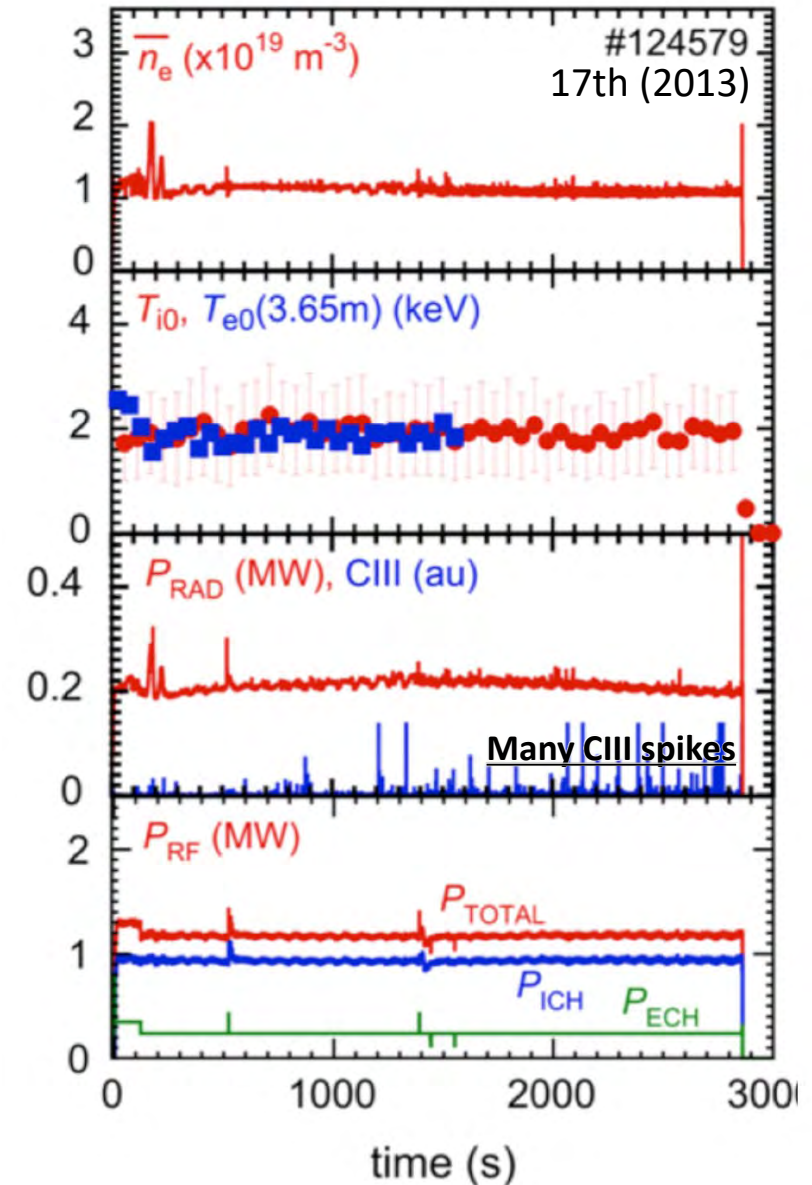
Antenna (FAIT)

Framing Camera
Photron APX-RS

LHDにおけるICRF加熱長時間放電実験の歴史

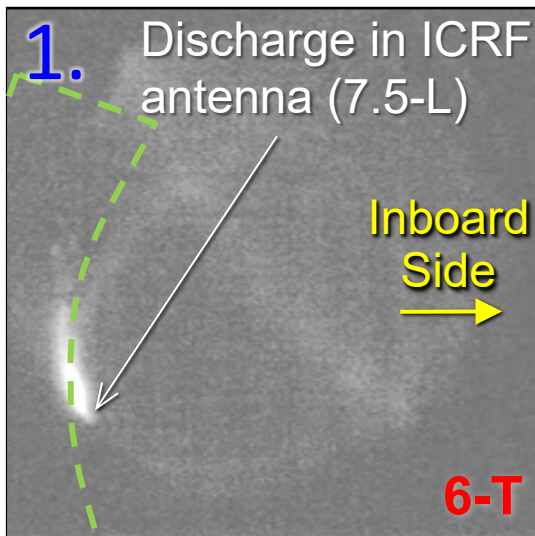


During the early experimental campaigns before FY 2000, ICRF-heated long-pulse discharges were interrupted due to the termination of plasma heating power caused by issues with the ICRF wave transmitter. Since subsequent campaigns (after FY 2000), long-pulse discharges have been interrupted by other plasma operational issues.



長時間放電の定常維持を妨げる主な4つの事象

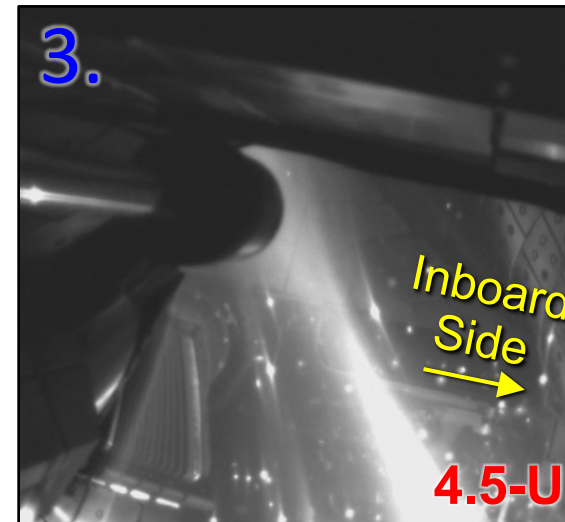
1. ICRFアンテナ内部での放電を伴う鉄を主成分としたダスト粒子の放出とプラズマ加熱パワーの出力停止
2. ダイバータ板の局所的な過熱を伴う制御不能なプラズマ密度の上昇
3. ダイバータ部で剥離した炭素を主成分としたダスト粒子のプラズマ中への侵入
4. 真空容器壁面上での閃光を伴う鉄を主成分としたダスト粒子の放出



M. Shoji et al., Plasma and Fusion Res. 10 (2015) 3402040.



M. Shoji et al., IEEE Transactions on Plasma Science, 33(2) (2005) 440.



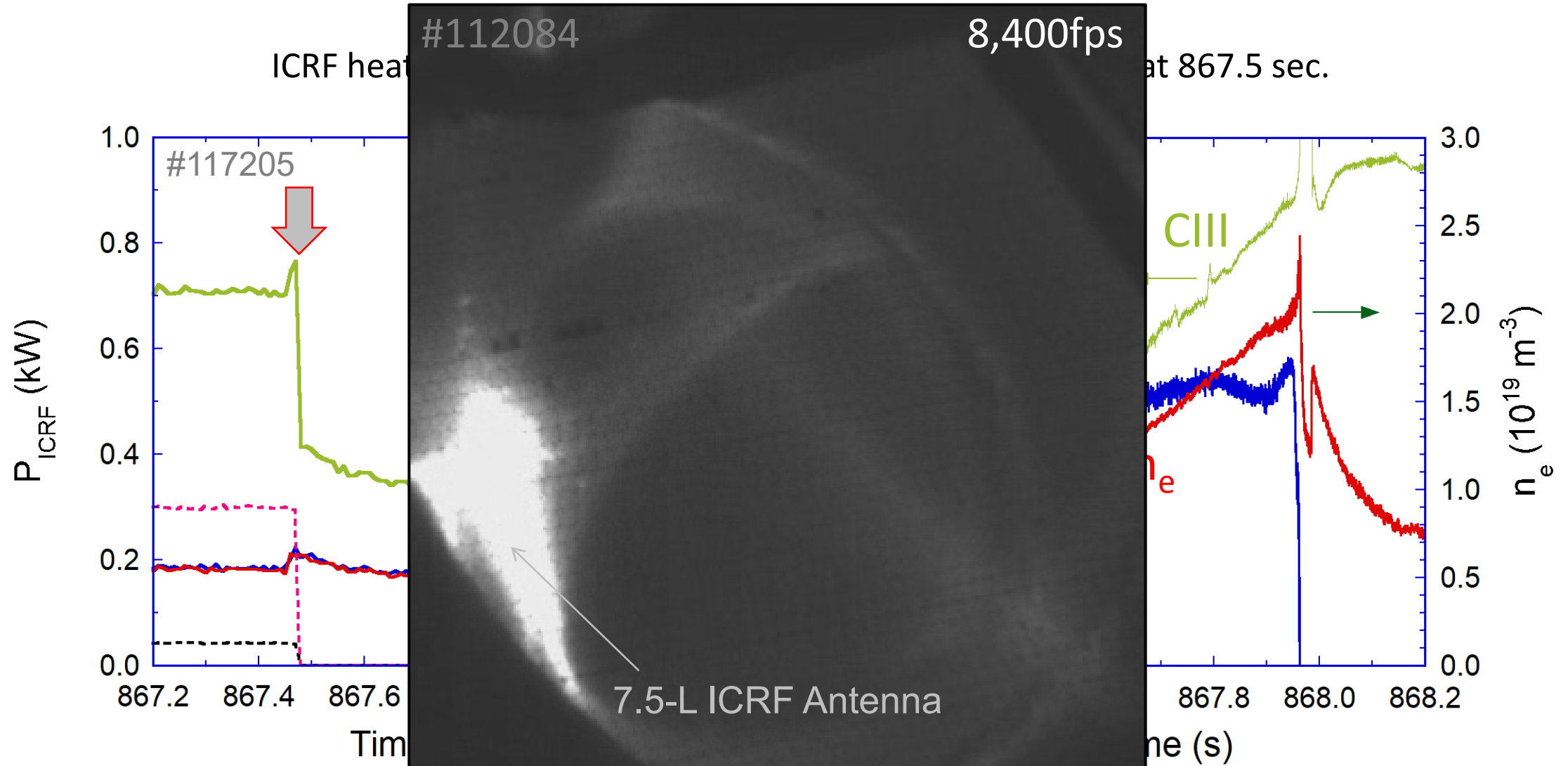
M. Shoji et al., Nucl. Fusion 55 (2015) 053014.



K. Saito et al., J. Nucl. Mater. 363-365 (2007) 1323.

1. ICRFアンテナ内部での放電を伴う鉄を主成分としたダスト粒子の放出とプラズマ加熱パワーの出力停止

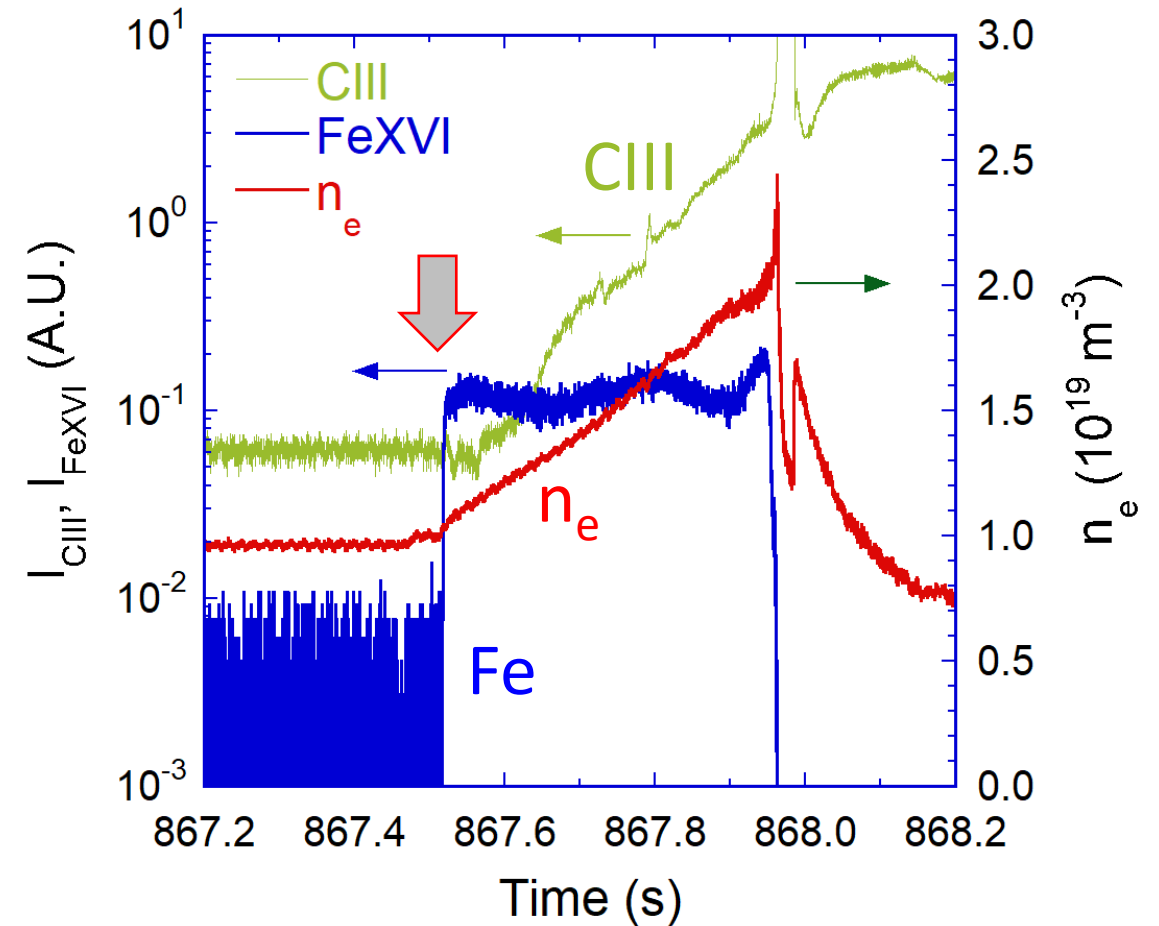
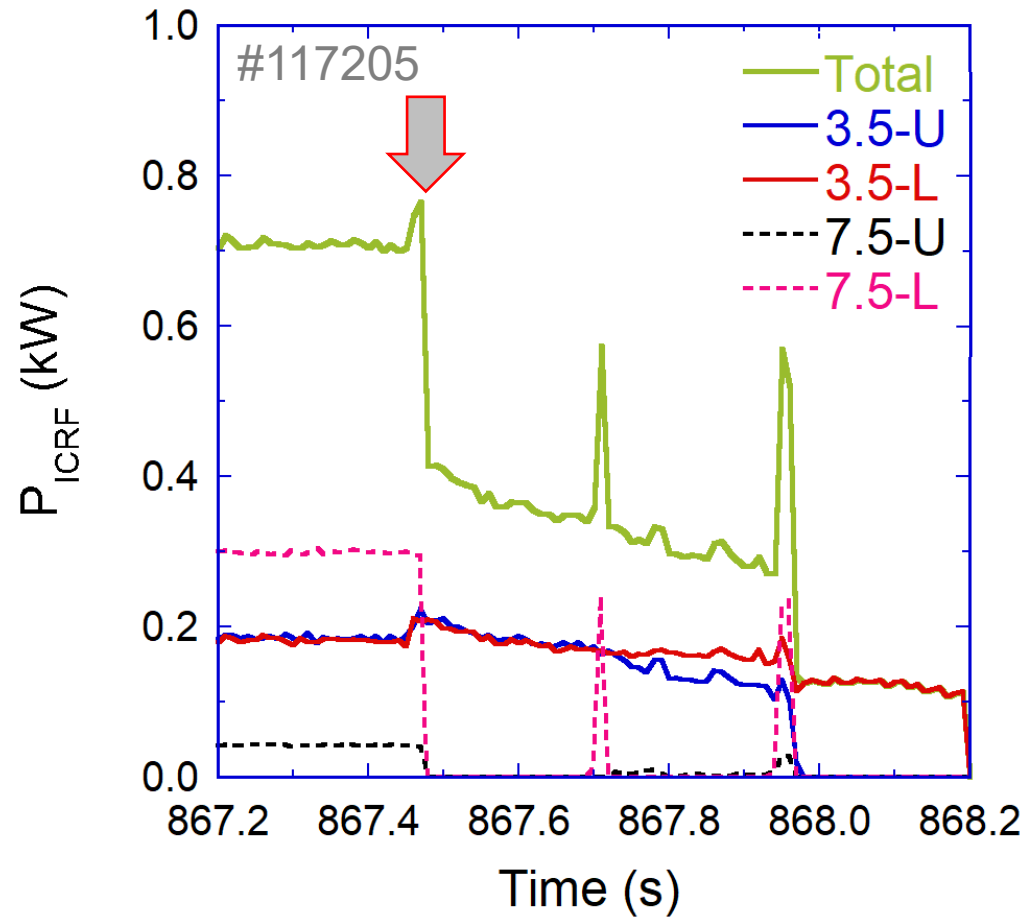
ICRF加熱パワーの中断によって長時間放電が停止



M. Shoji et al., Plasma and Fusion Res. 10 (2015) 3402040.

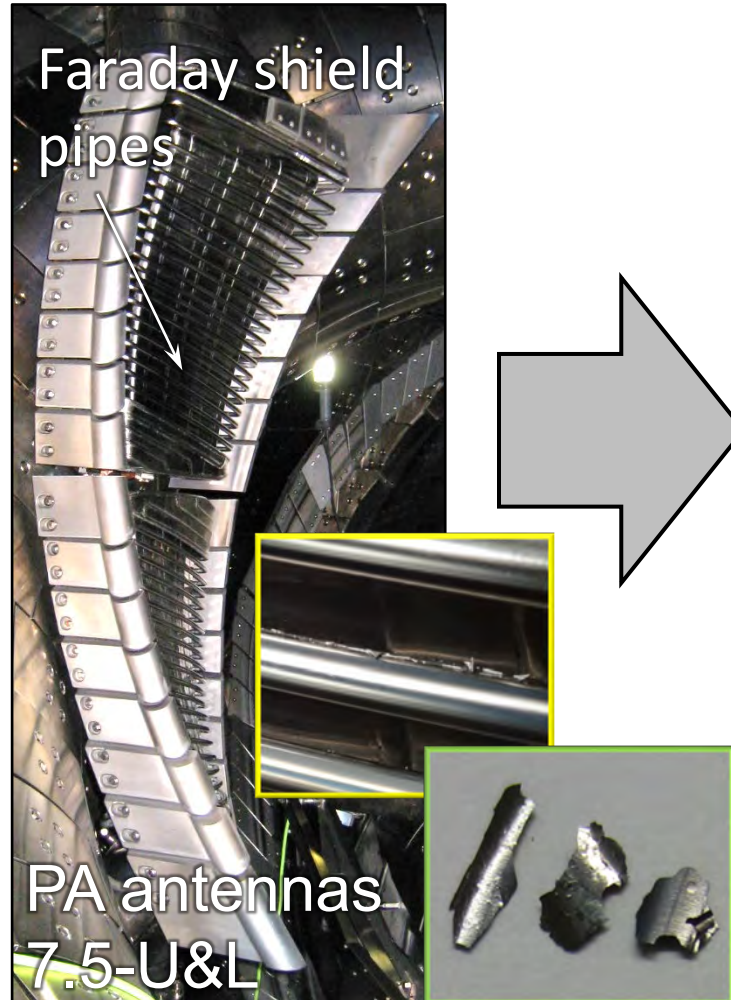
ICRF加熱パワーの中断によって長時間放電が停止

ICRF heating power from 7.5-U&L antennas was stopped at 867.5 sec.

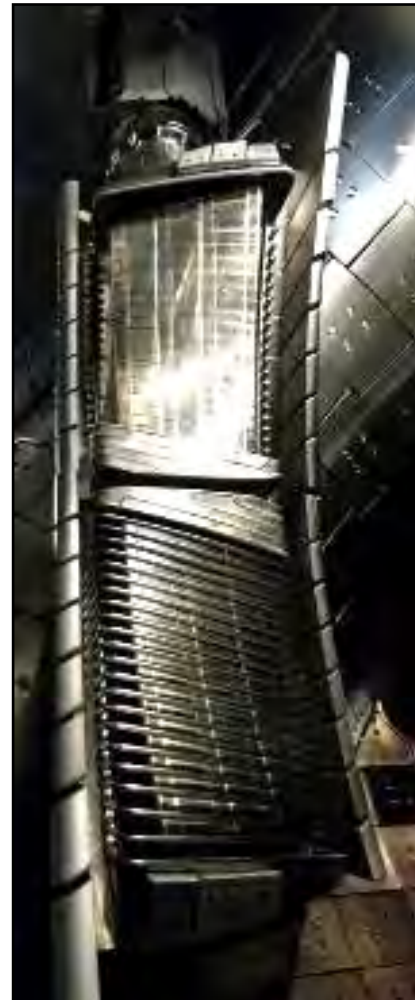


ICRFアンテナ(7.5-U&L)のファラデーシールドの撤去によって、 アンテナ内部で発生する放電の抑制に成功

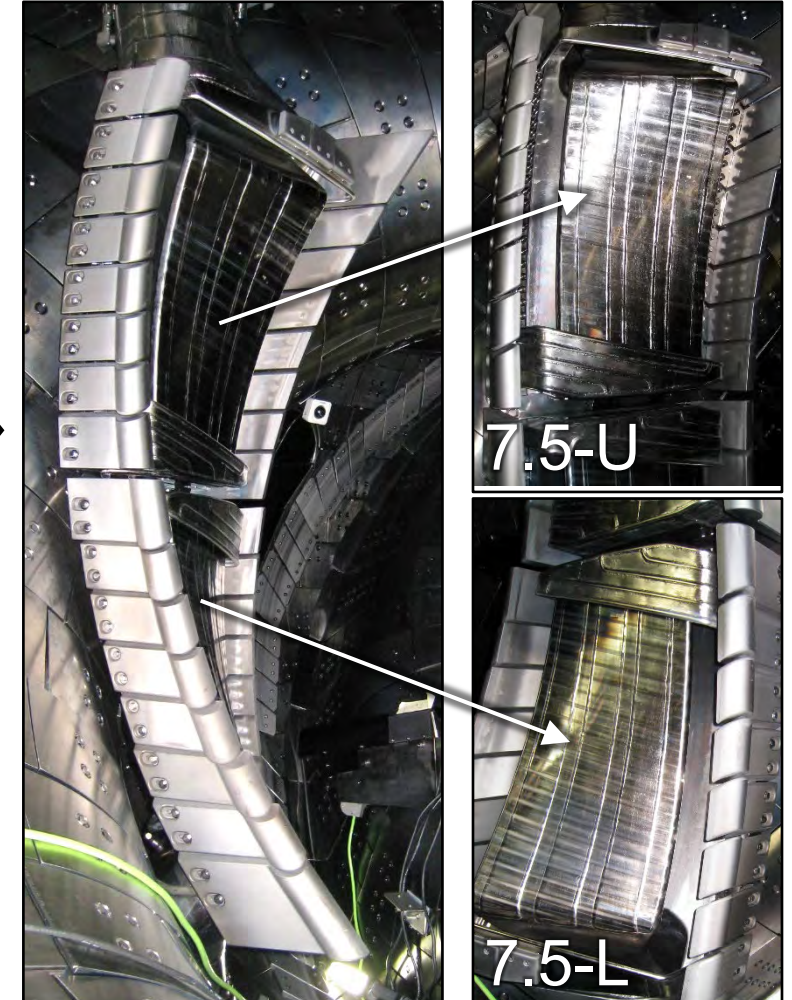
FY 2012 (16th Cycle)



FY 2013 (17th Cycle)

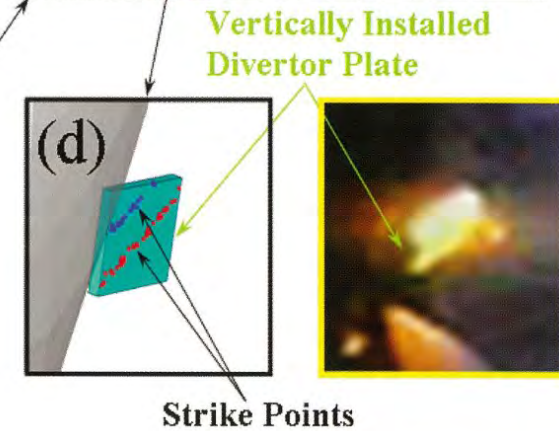
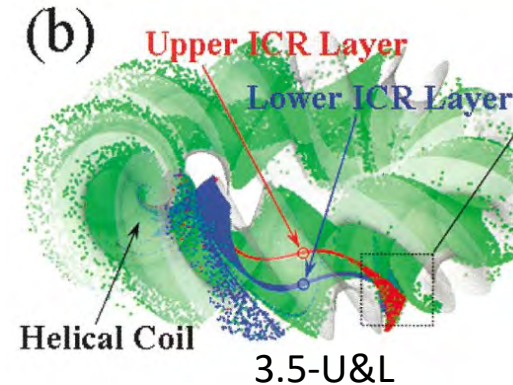
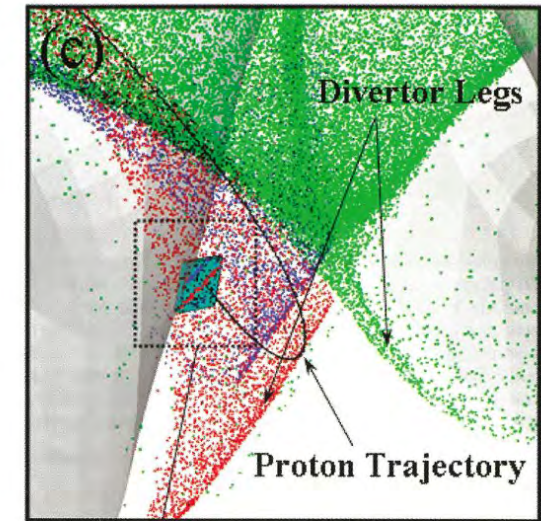
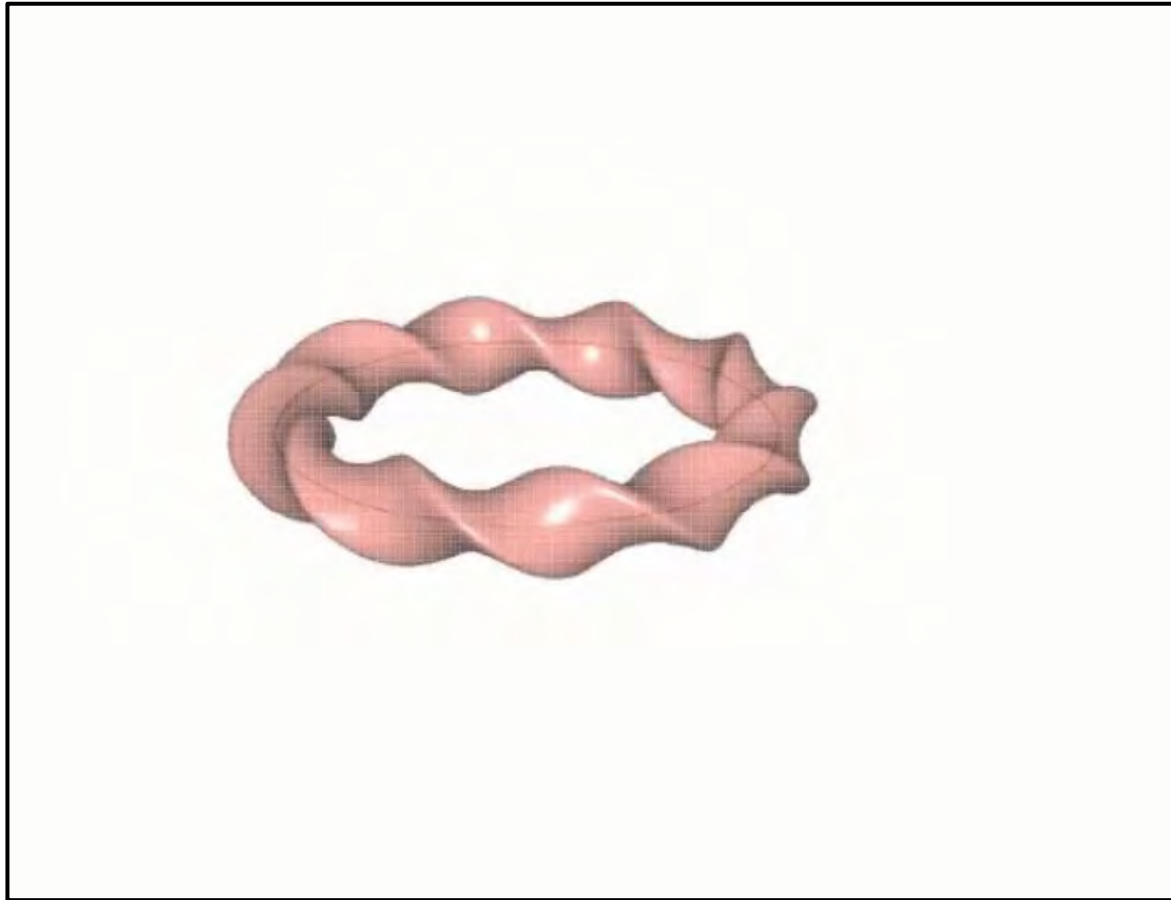


FY 2014 (18th Cycle)



2. ダイバータ板の局所的な過熱を伴う制御不能なプラズマ 密度の上昇

長時間放電中にICRFによって加速された高エネルギーイオンによってダイバータ板上にホットスポットが生成

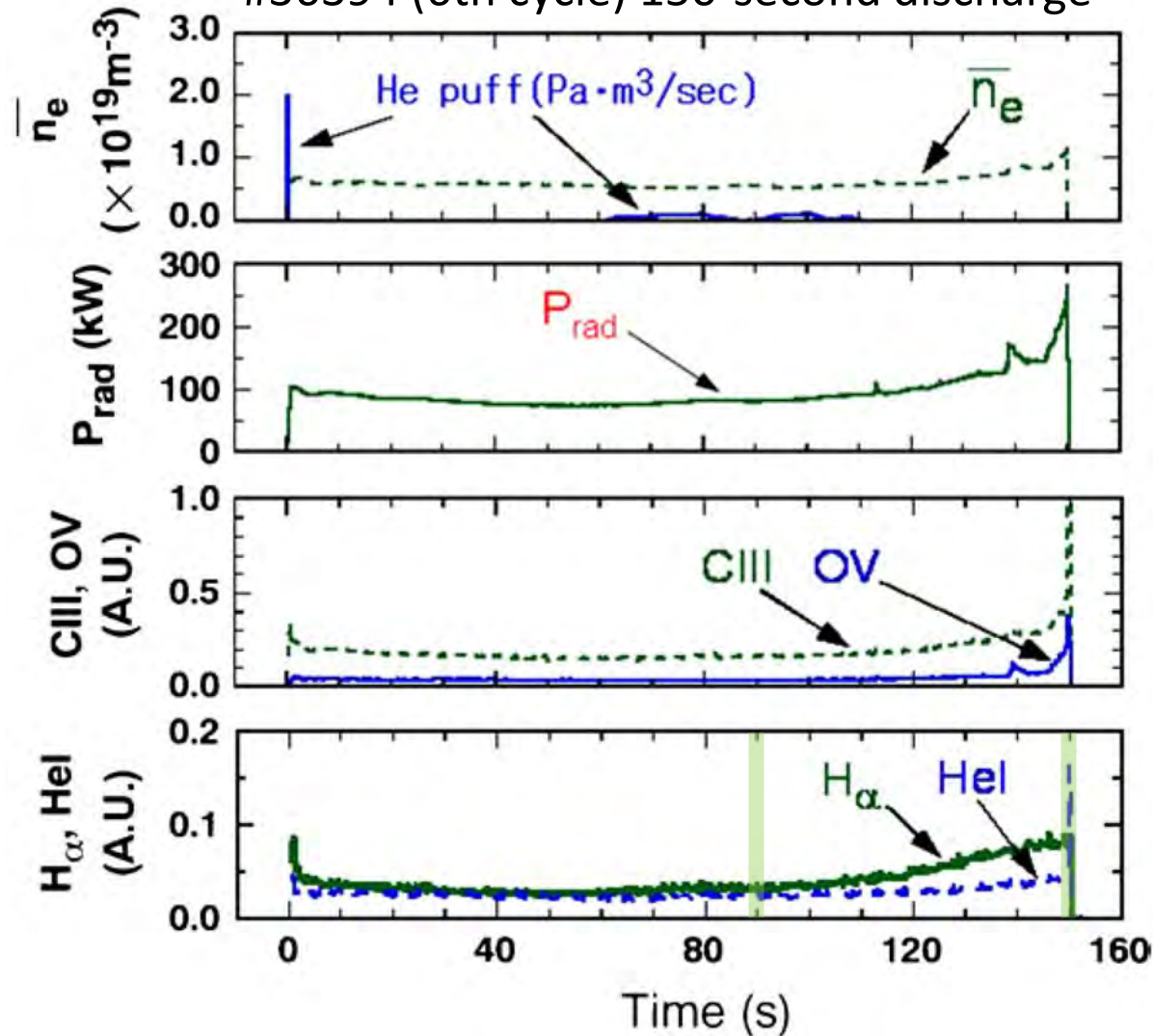


M. Shoji et al., J. Nucl. Mater. 337-339 (2005) 186.

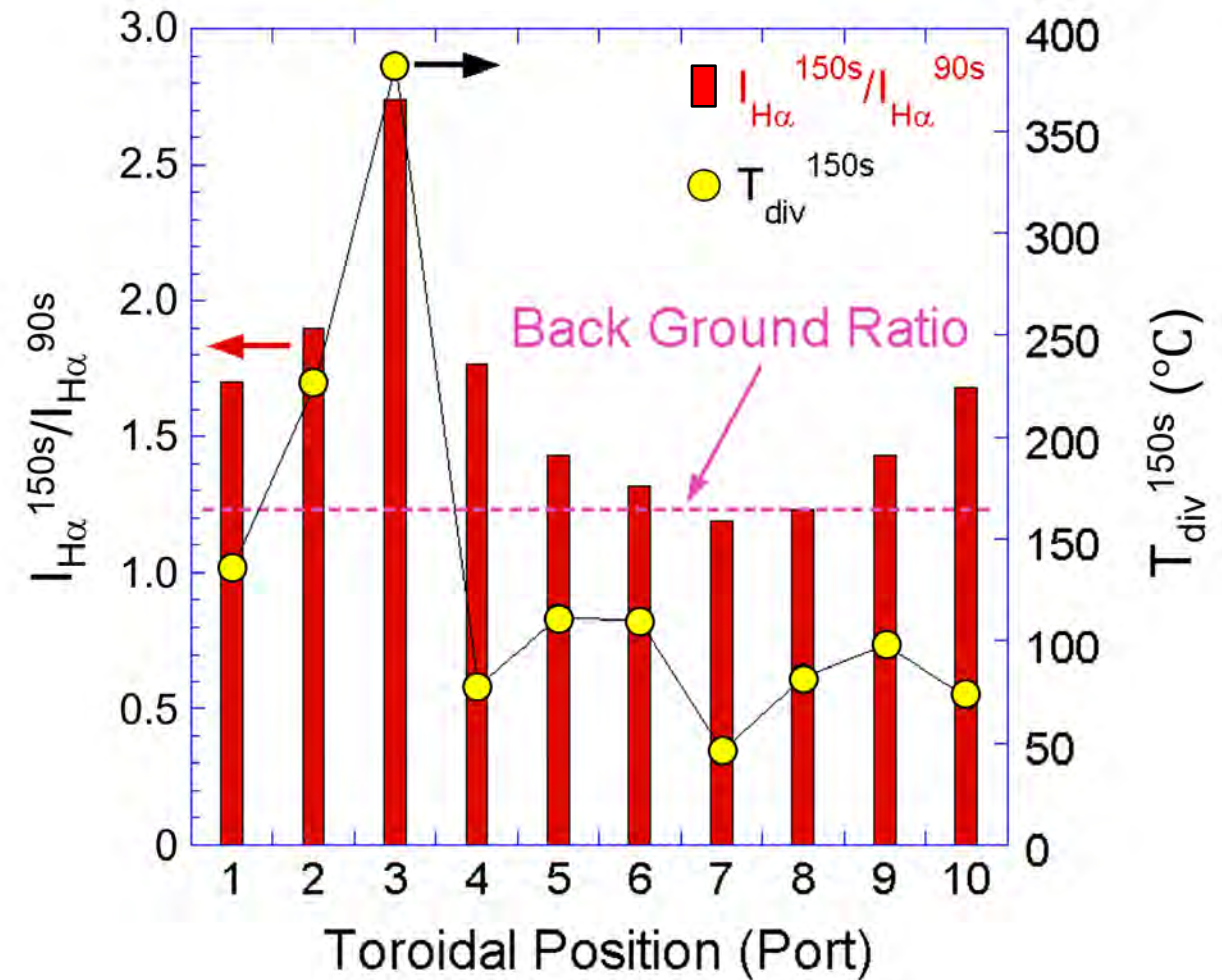
M. Shoji et al., IEEE Transactions on Plasma Science, 33(2) (2005) 440.

局所的な H_α 線強度の増加を伴うプラズマ密度の上昇を観測

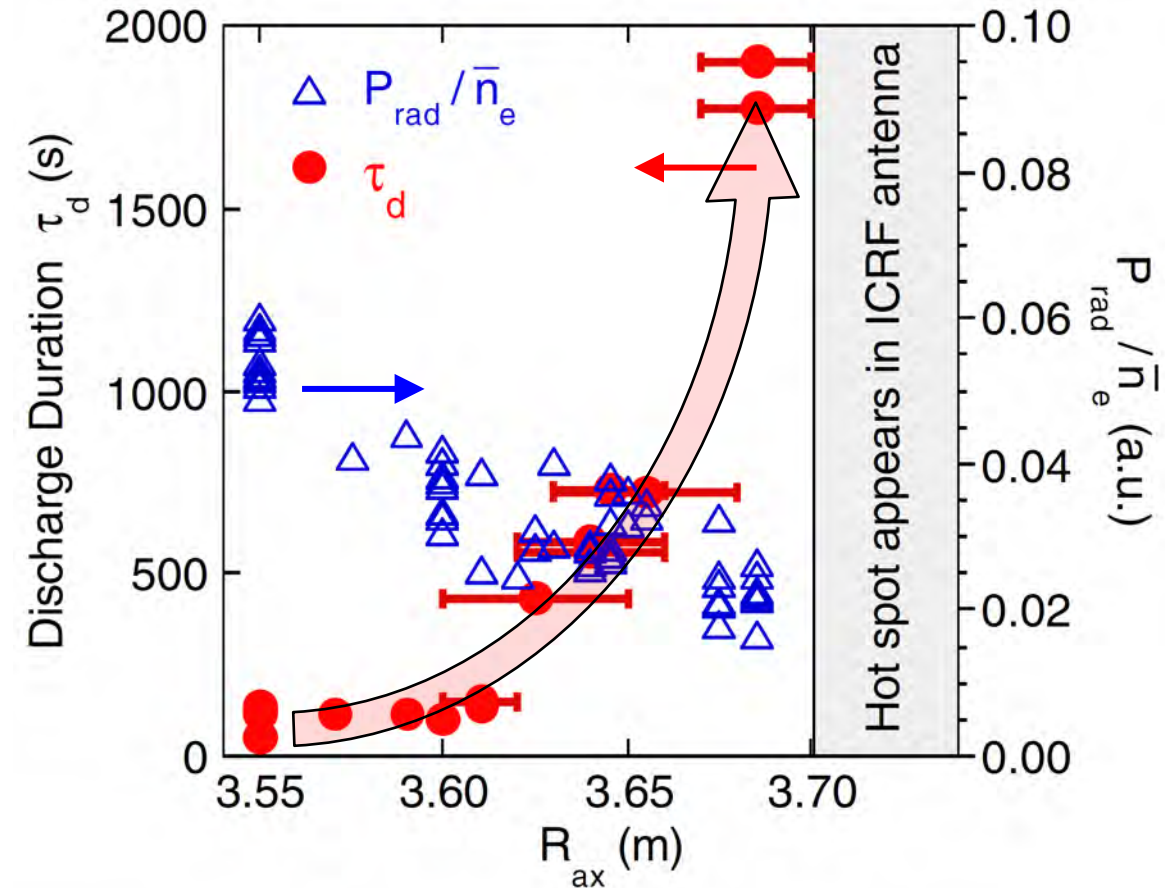
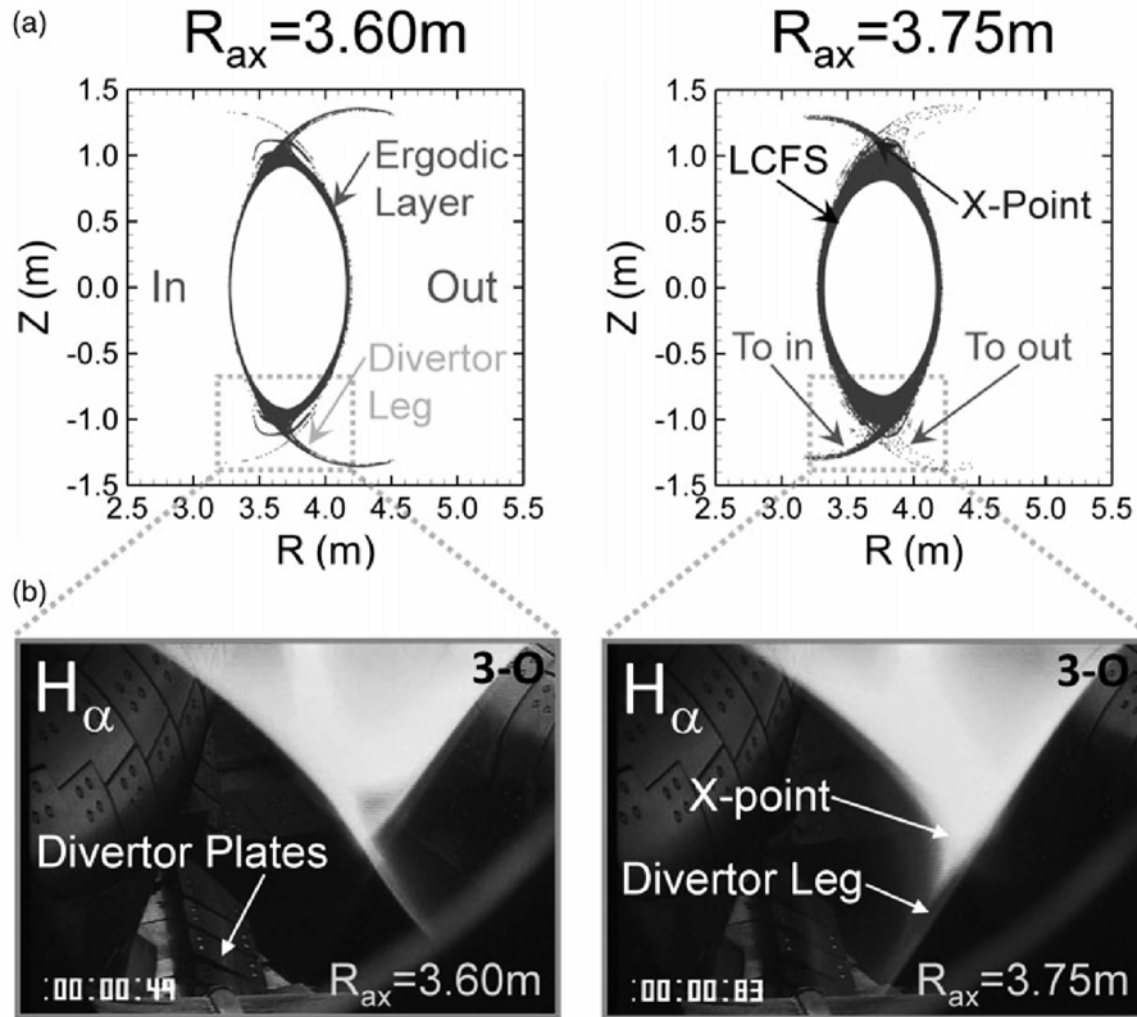
#36394 (6th cycle) 150-second discharge



Observation



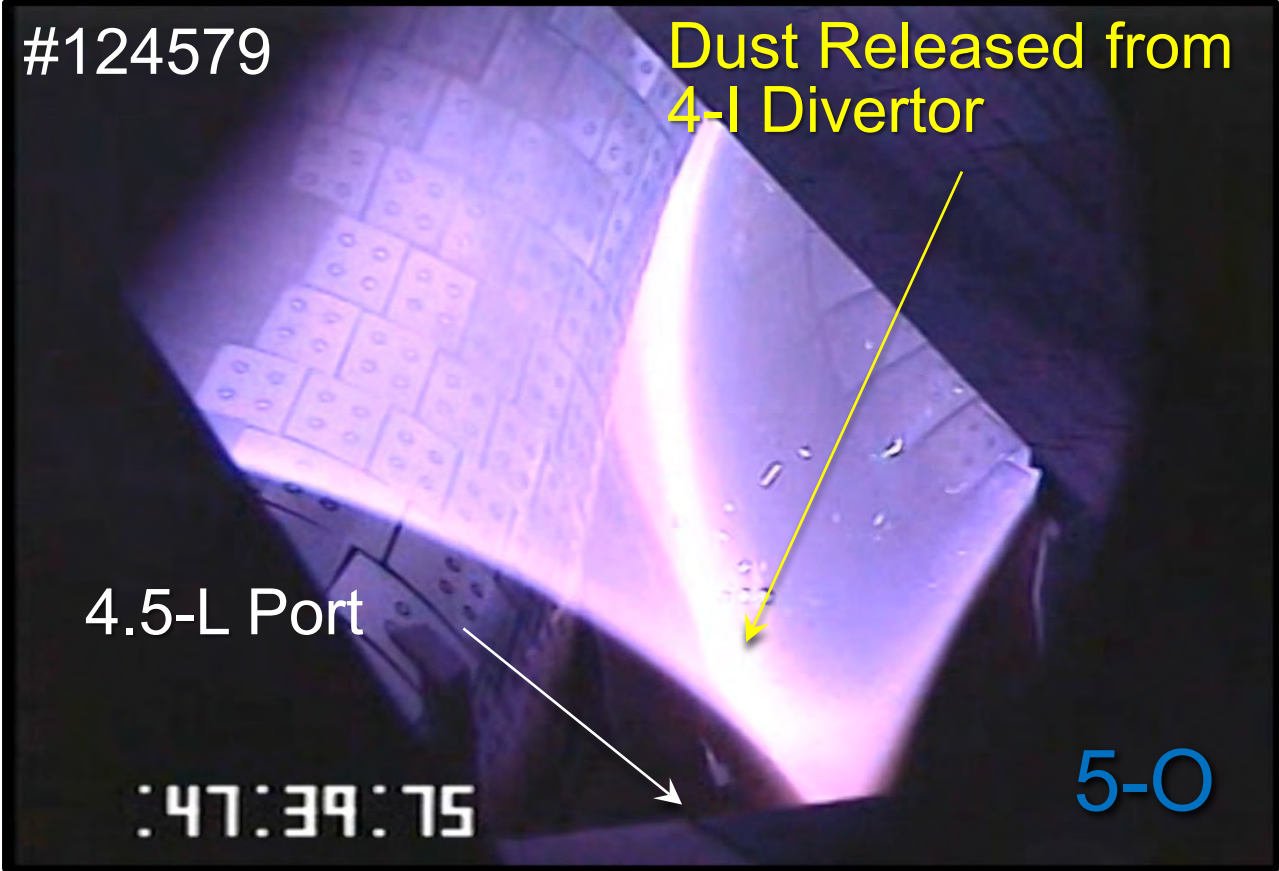
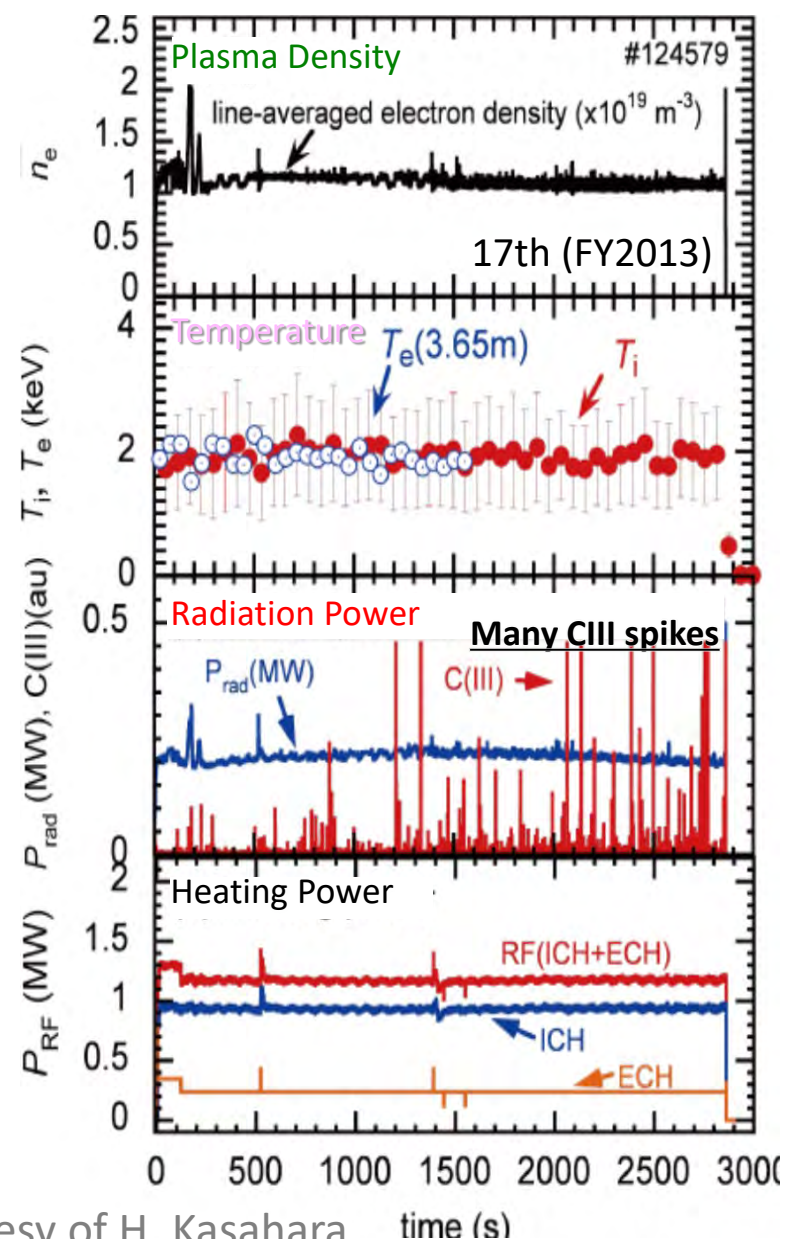
長時間放電中の磁気軸位置の掃引によってダイバータ板上の熱負荷の分散と放電時間の伸張に成功



Y. Nakamura et al., Nucl. Fusion 46 (2006) 714.

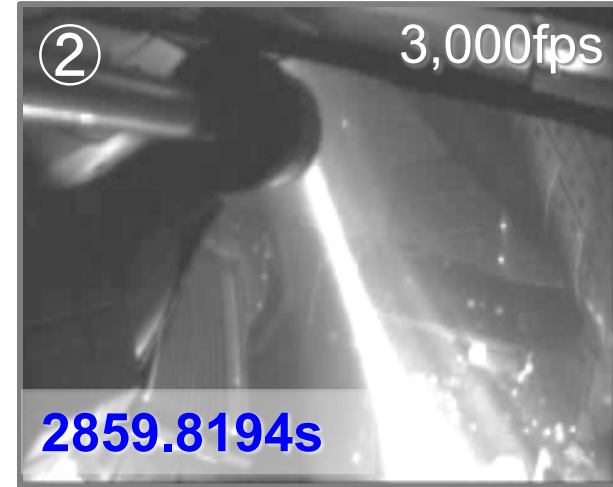
3. ダイバータ部で剥離した炭素を主成分としたダスト粒子 のプラズマ中への流入

ダイバータ部からのダスト粒子の放出によって長時間放電が停止



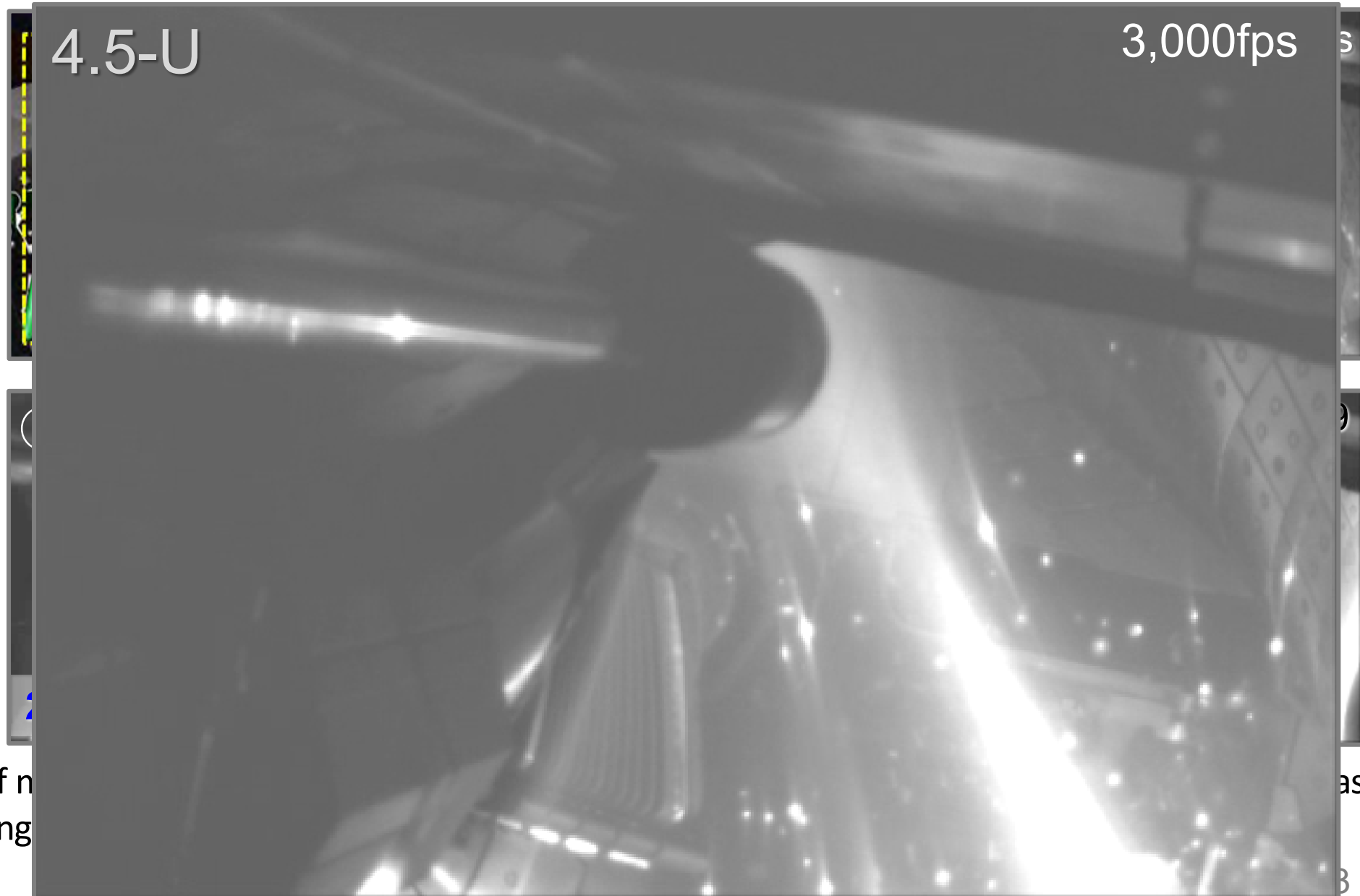
A CCD camera viewing a lower divertor region detected the release of large amounts of dust particles from a divertor region (4-I) near a lower port (4.5-L) with spark discharges.

大量のダスト粒子がダイバータ部から放出されたことによって 長時間放電が停止



The release of many dust particles from a lower divertor region (4.5-L) in the inboard side of the torus was observed with the fast-framing camera just before the plasma termination.

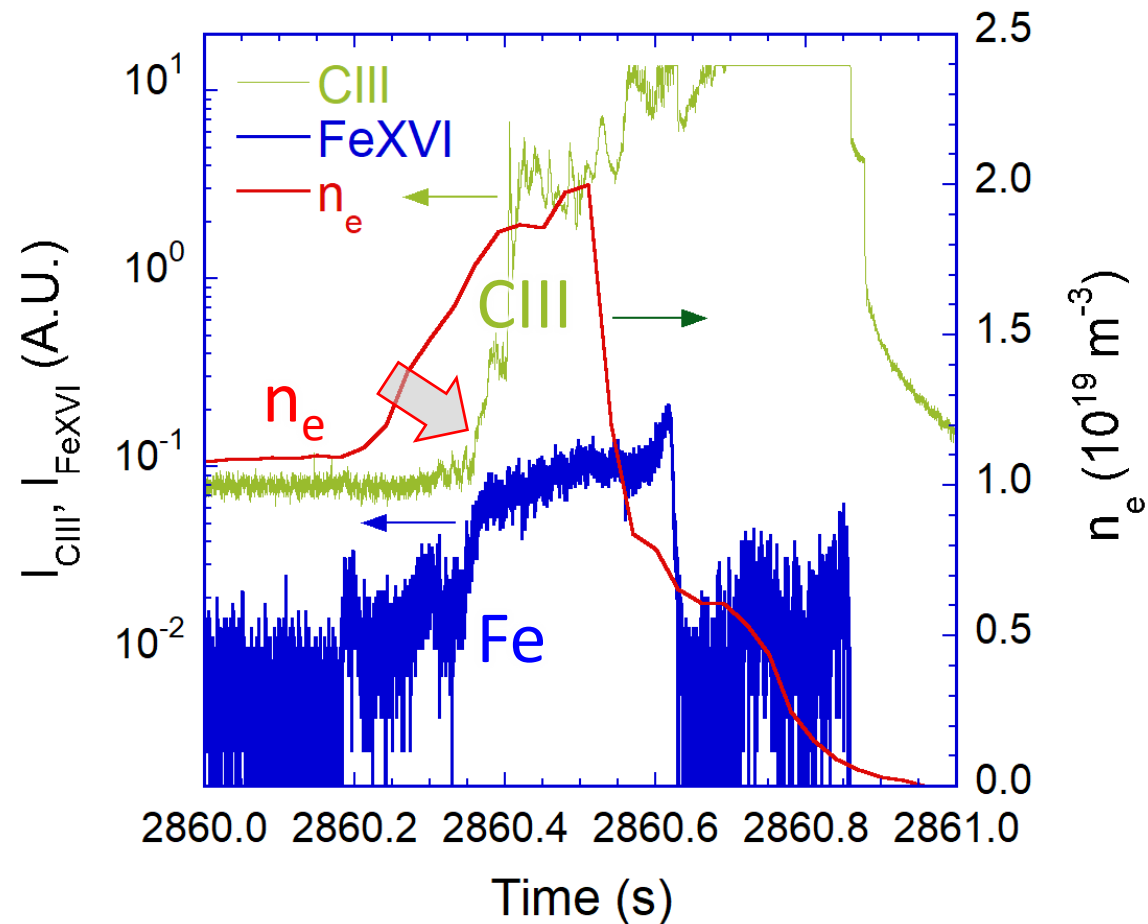
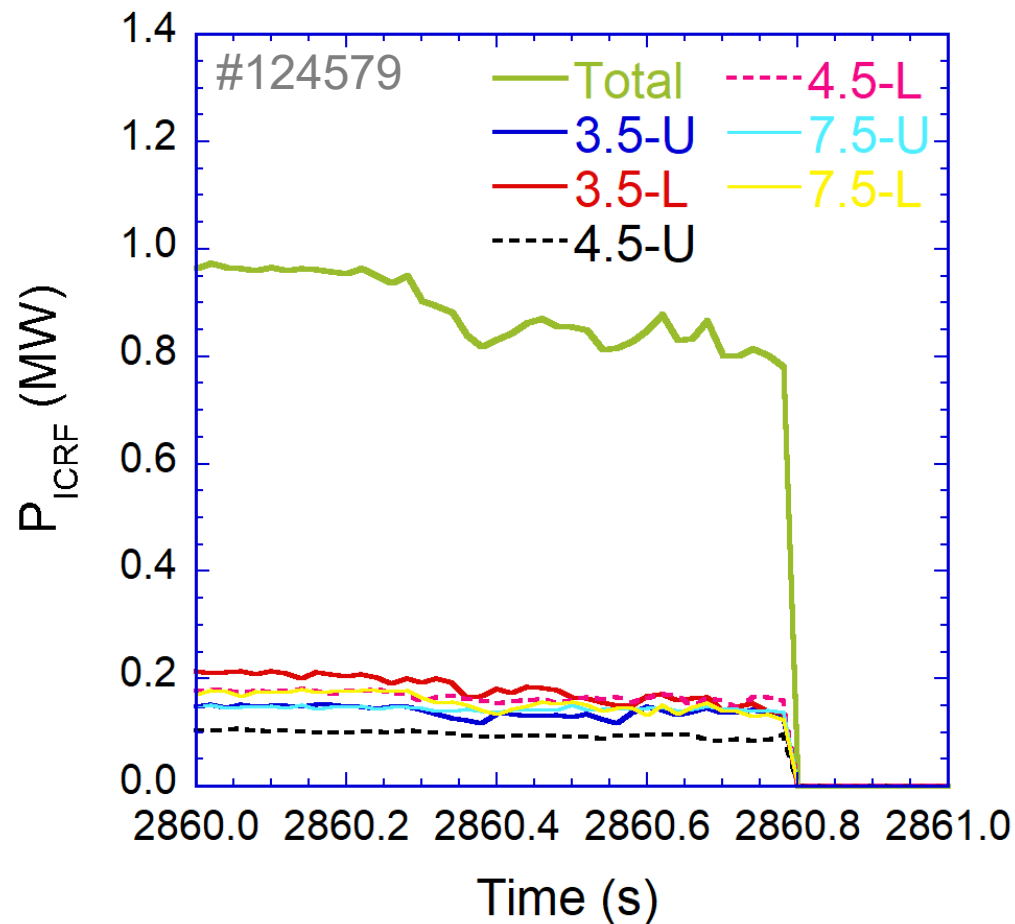
大量のダスト粒子がダイバータ部から放出されたことによって 長時間放電が停止



The release of n
the fast-framing

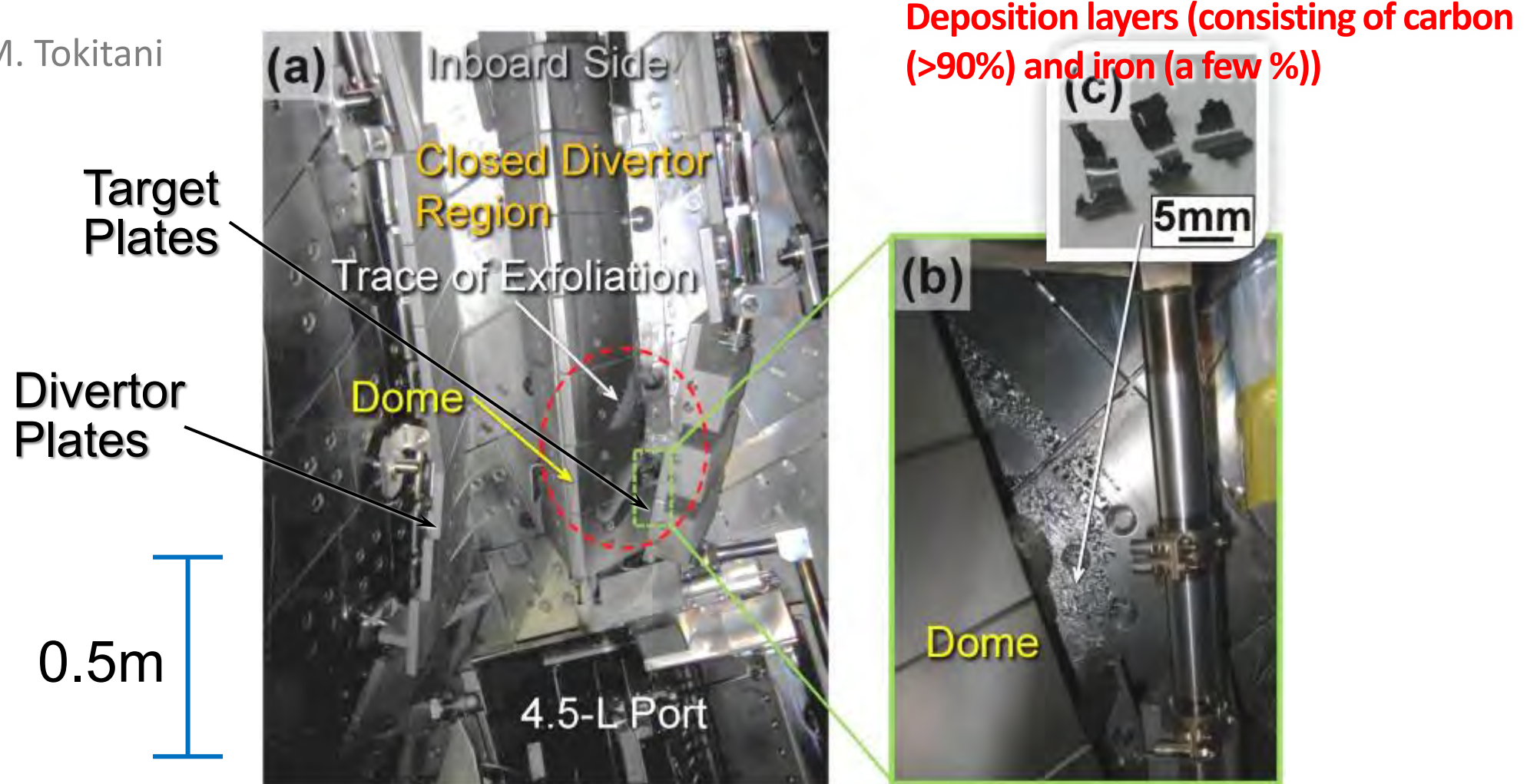
as observed with

炭素イオンの発光強度の顕著な増加によって長時間放電が停止



実験終了後にダイバータ部において供堆積層の剥離痕を観測

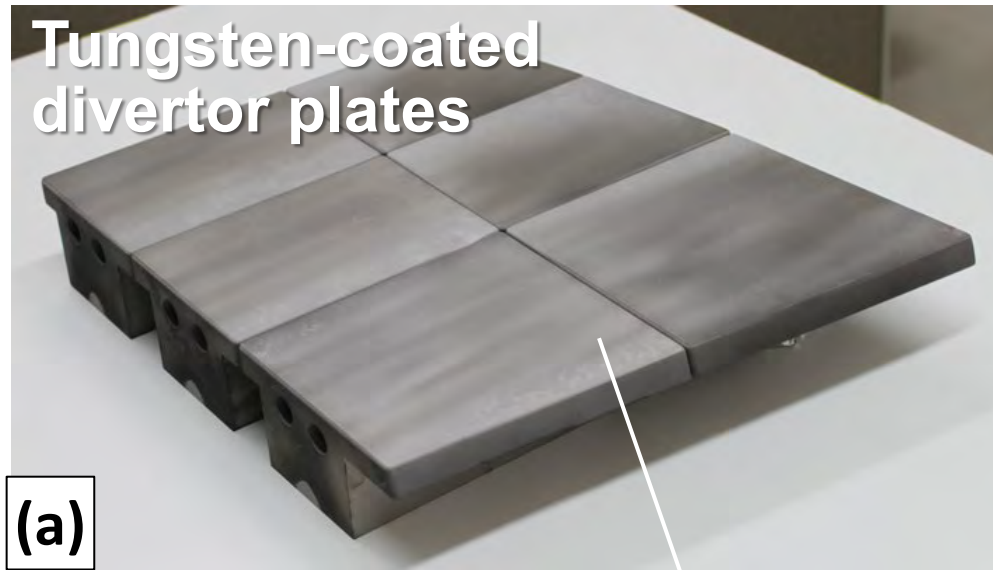
Courtesy of M. Tokitani



Exfoliated deposition layers were found on dome plates, and large sized dust particles (>1mm) were collected on the vacuum vessel which is directly faced to target plates in the closed helical divertor region.

タングステン被覆ダイバータ板の設置によって堆積層の抑制に成功

FY 2012



The VPS-Tungsten plate is quite effective for reducing the mixed-material deposition layers.

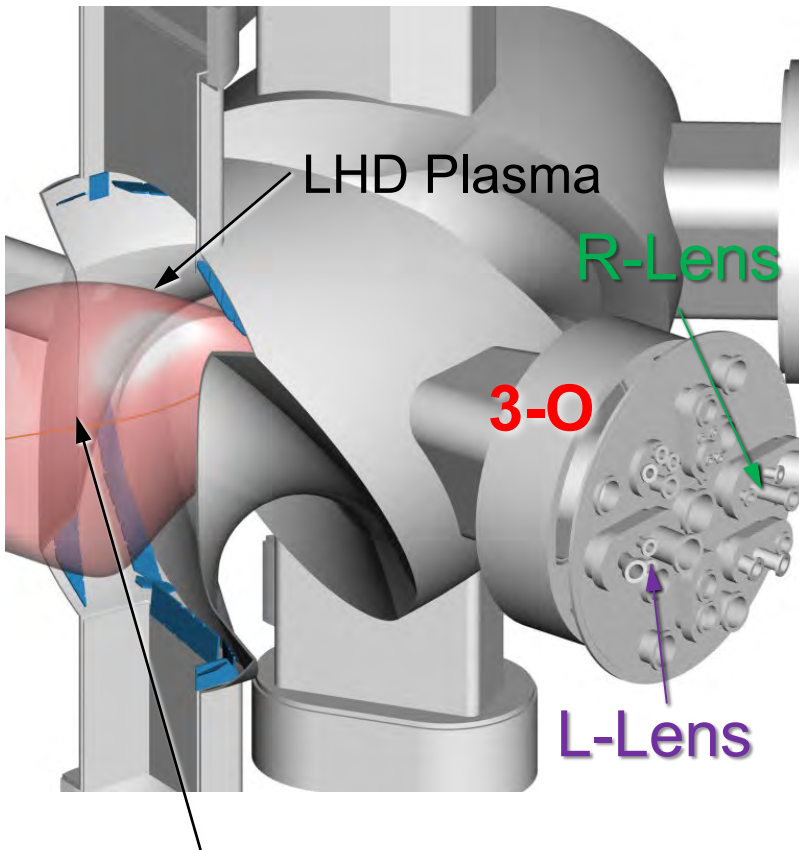
→ It can contribute to extending the duration of long pulse discharges.



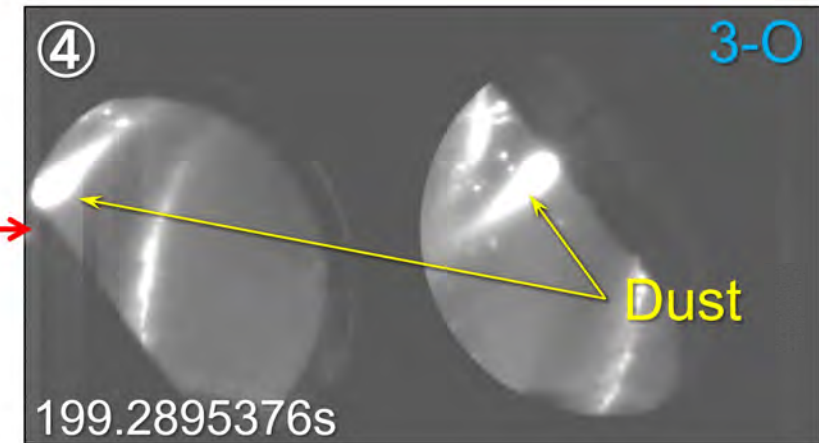
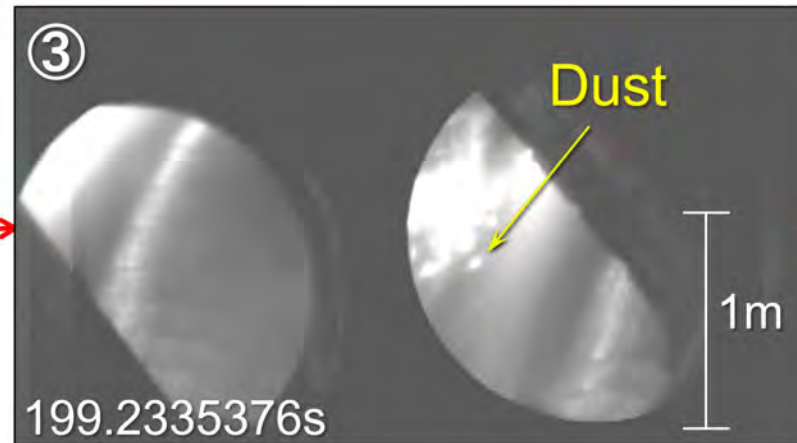
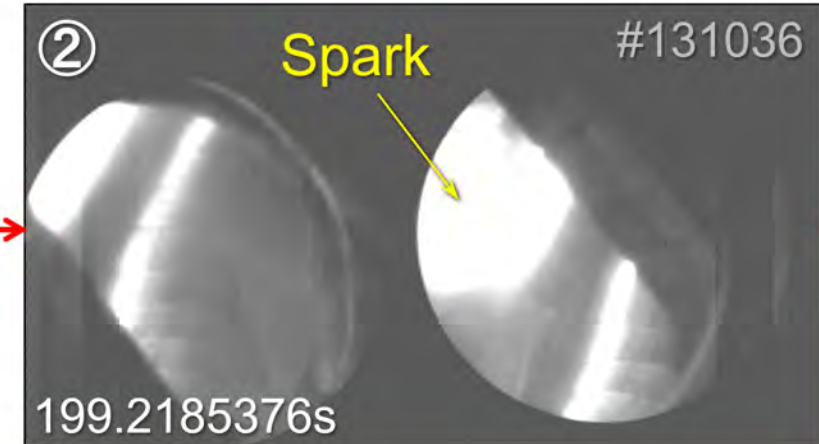
4. 真空容器壁面上での閃光を伴う鉄を主成分としたダスト 粒子の放出

真空容器壁面上での閃光を伴うダスト粒子の放出によって長時間放電が停止

Stereoscopic fast-framing camera



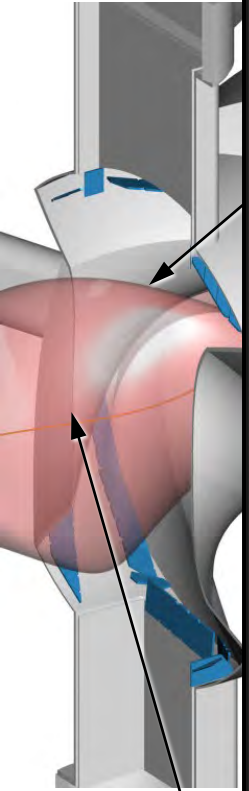
Helical Coil Can



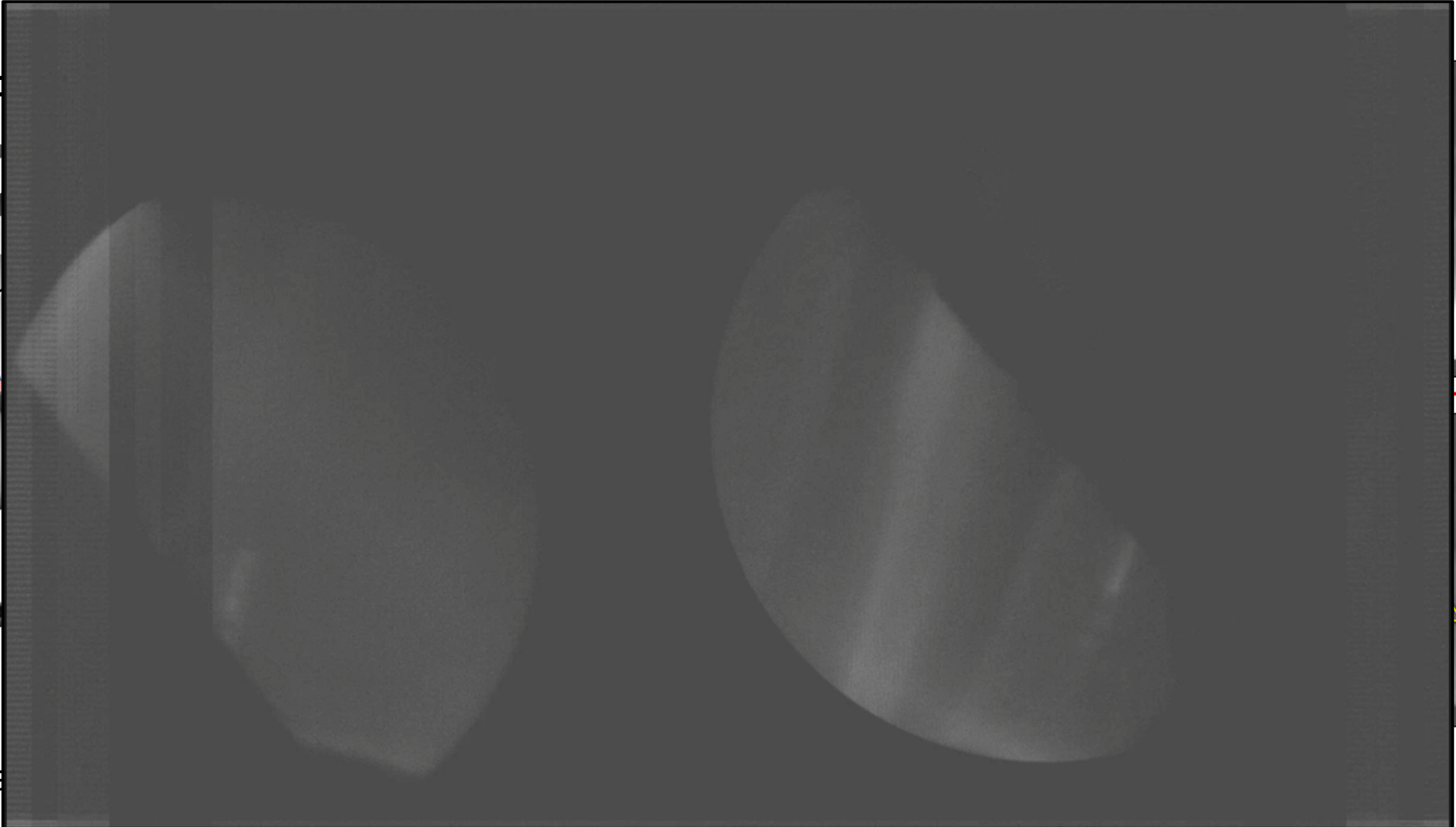
M. Shoji et al., Plasma and Fusion Res. 11 (2016) 2402056.

真空容器壁面上での閃光を伴うダスト粒子の放出によって長時間放電が停止

Stereosco



Helica



#131036

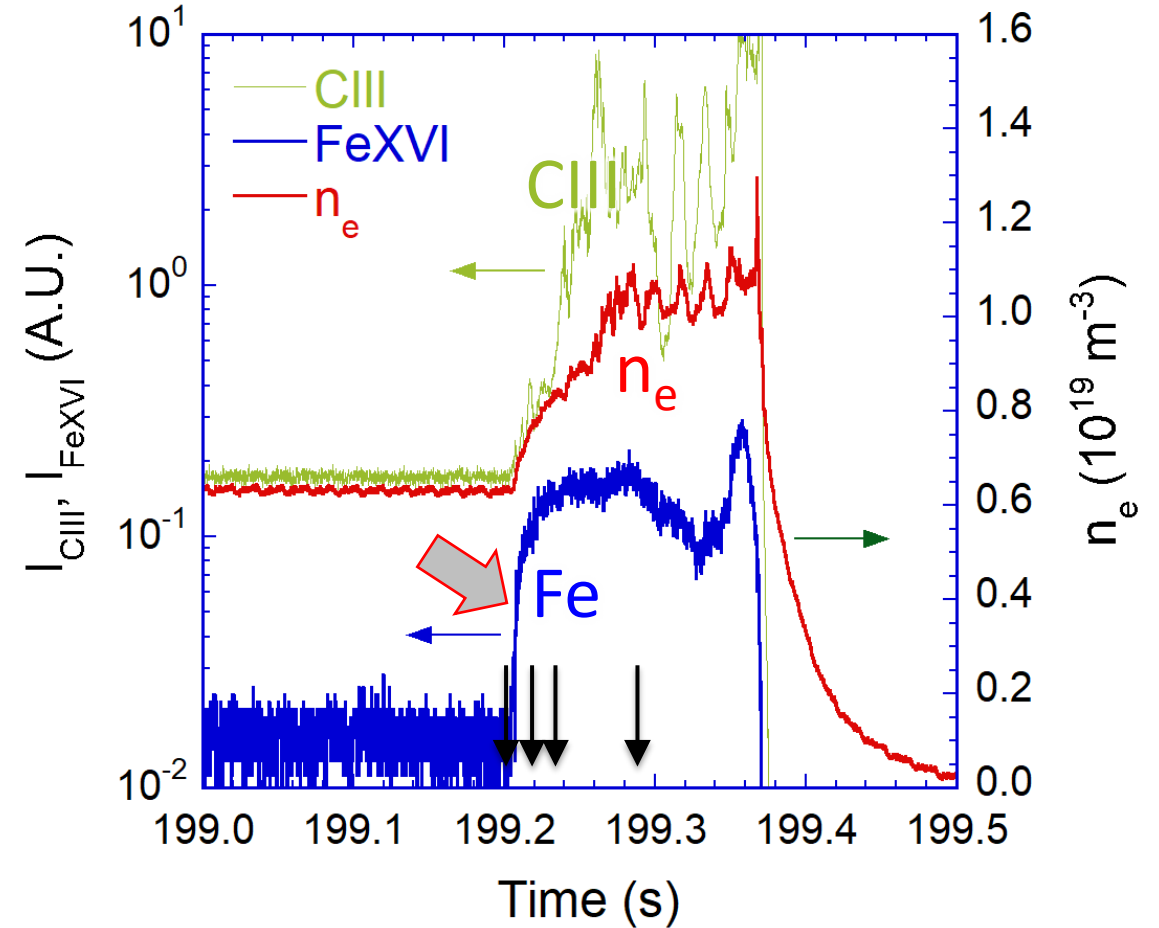
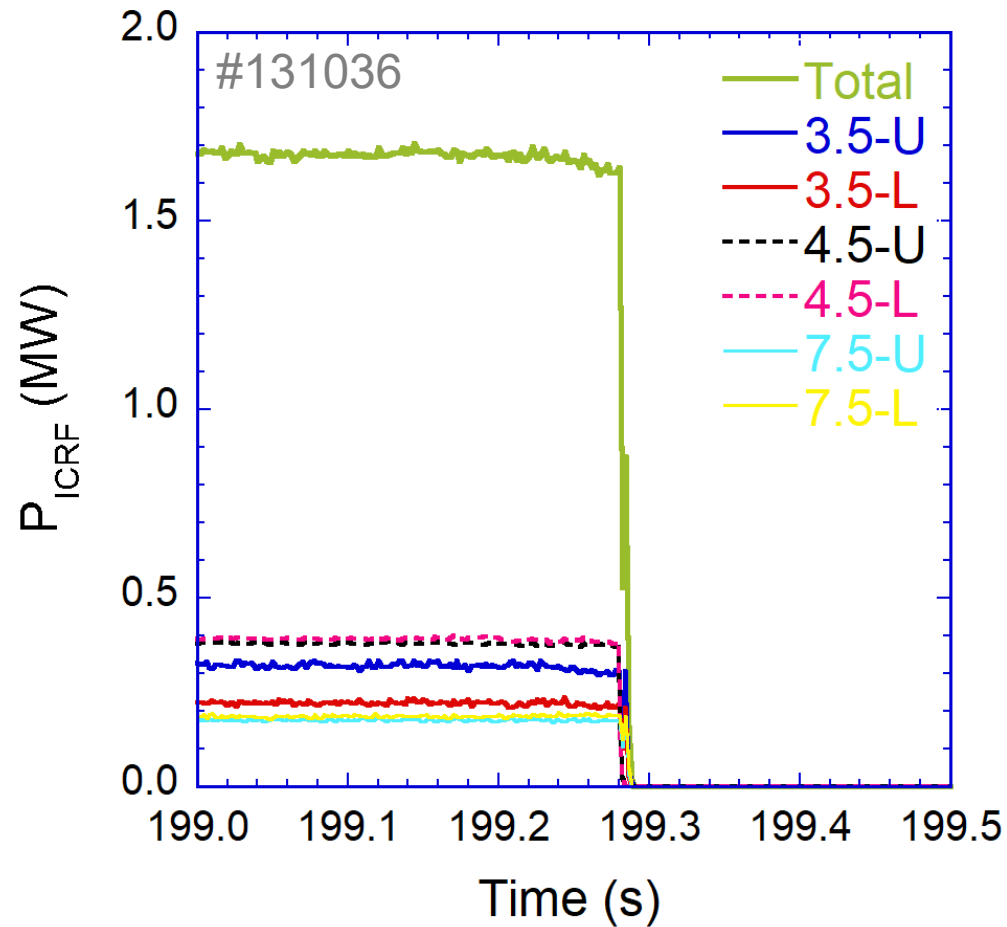


3-O



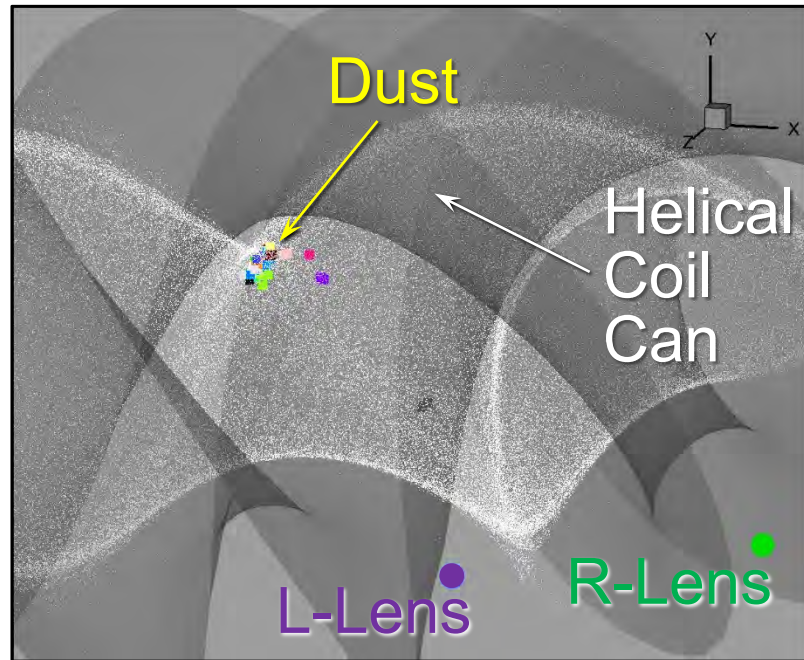
Dust

鉄イオンの発光の顕著な増加によって長時間放電が停止

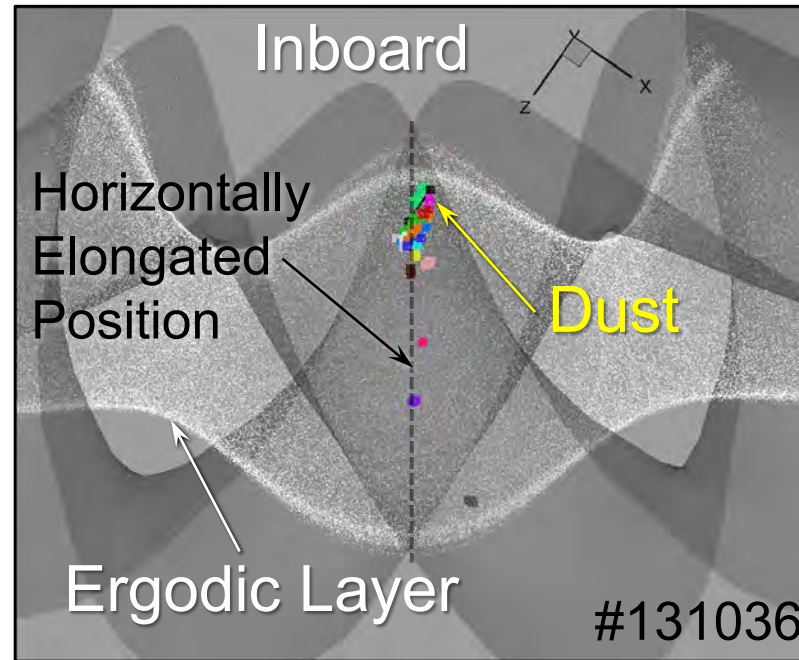


ステレオ視高速カメラによってダスト粒子のプラズマ中への流入 による長時間放電の停止を観測

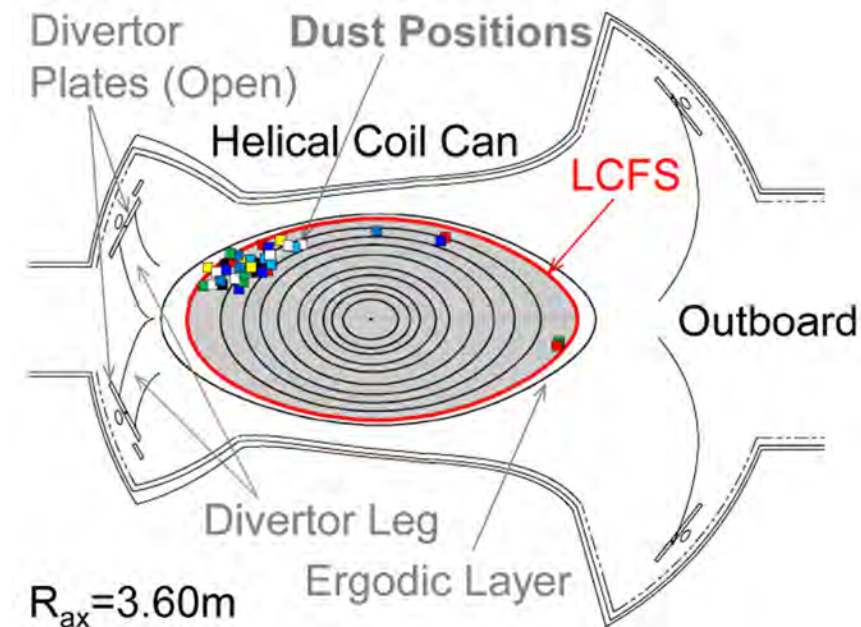
Tangential view



Top view

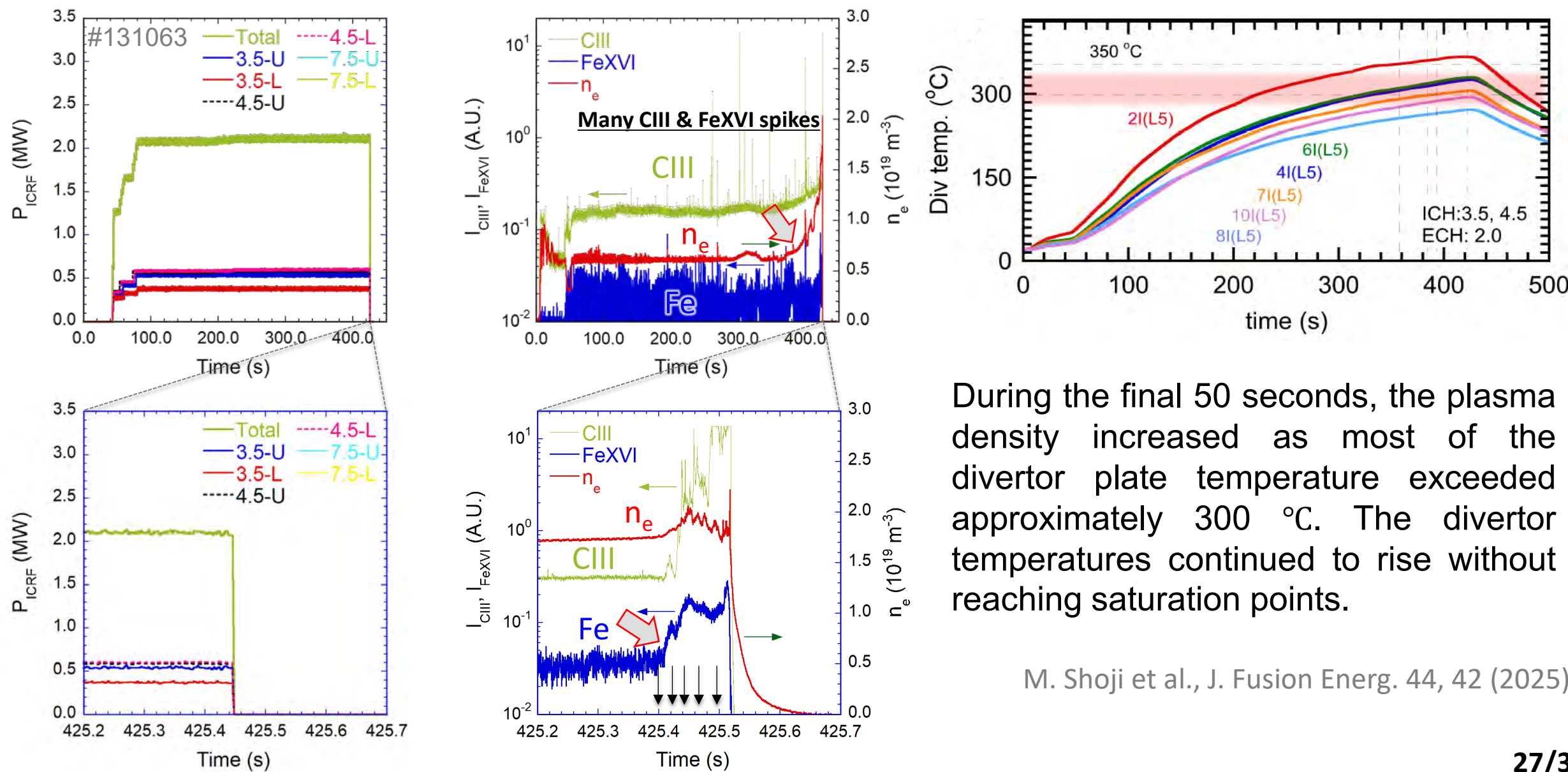


Poloidal cross section



高ICRF加熱パワー長時間放電実験時におけるプラズマ 放電の停止

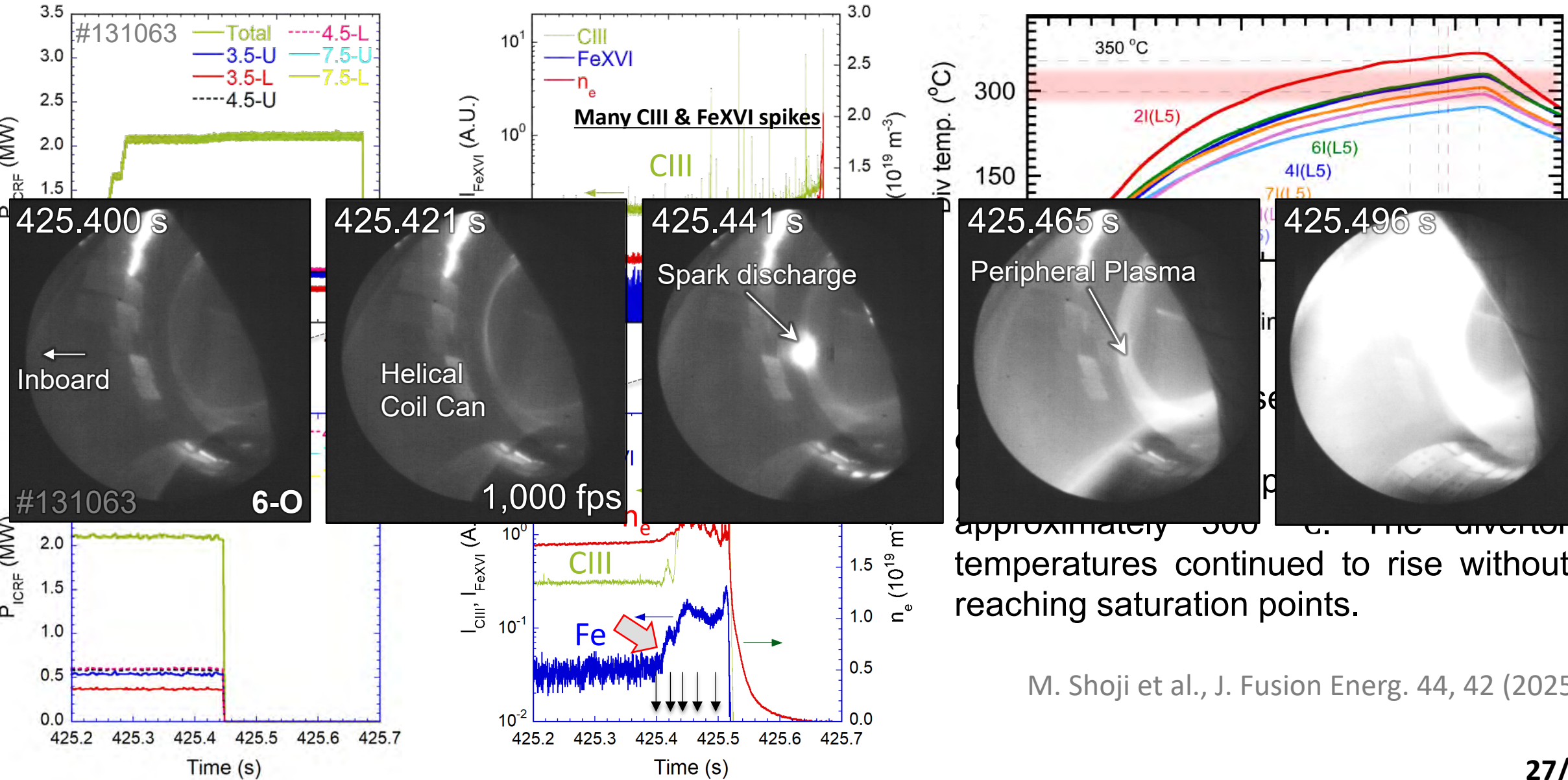
高ICRF加熱パワー長時間放電がプラズマ密度の上昇と真空容器壁面からの鉄ダスト粒子の流入によって停止



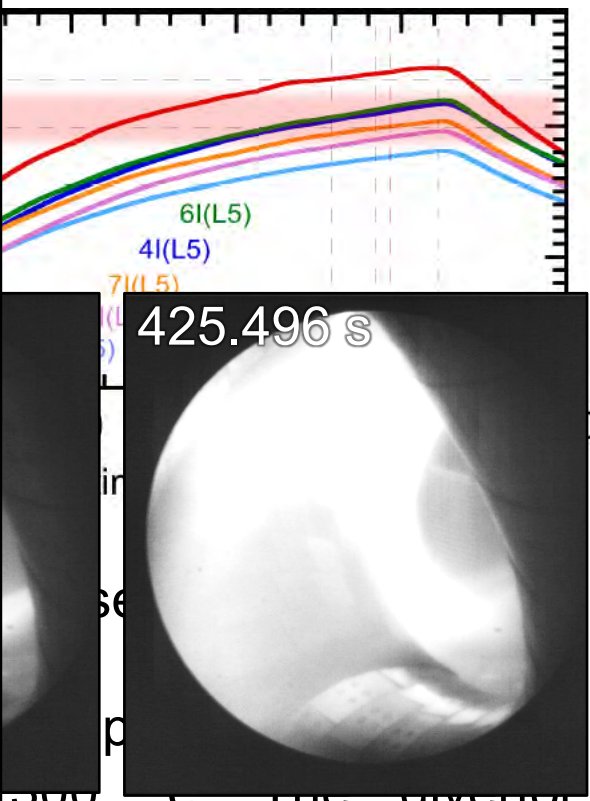
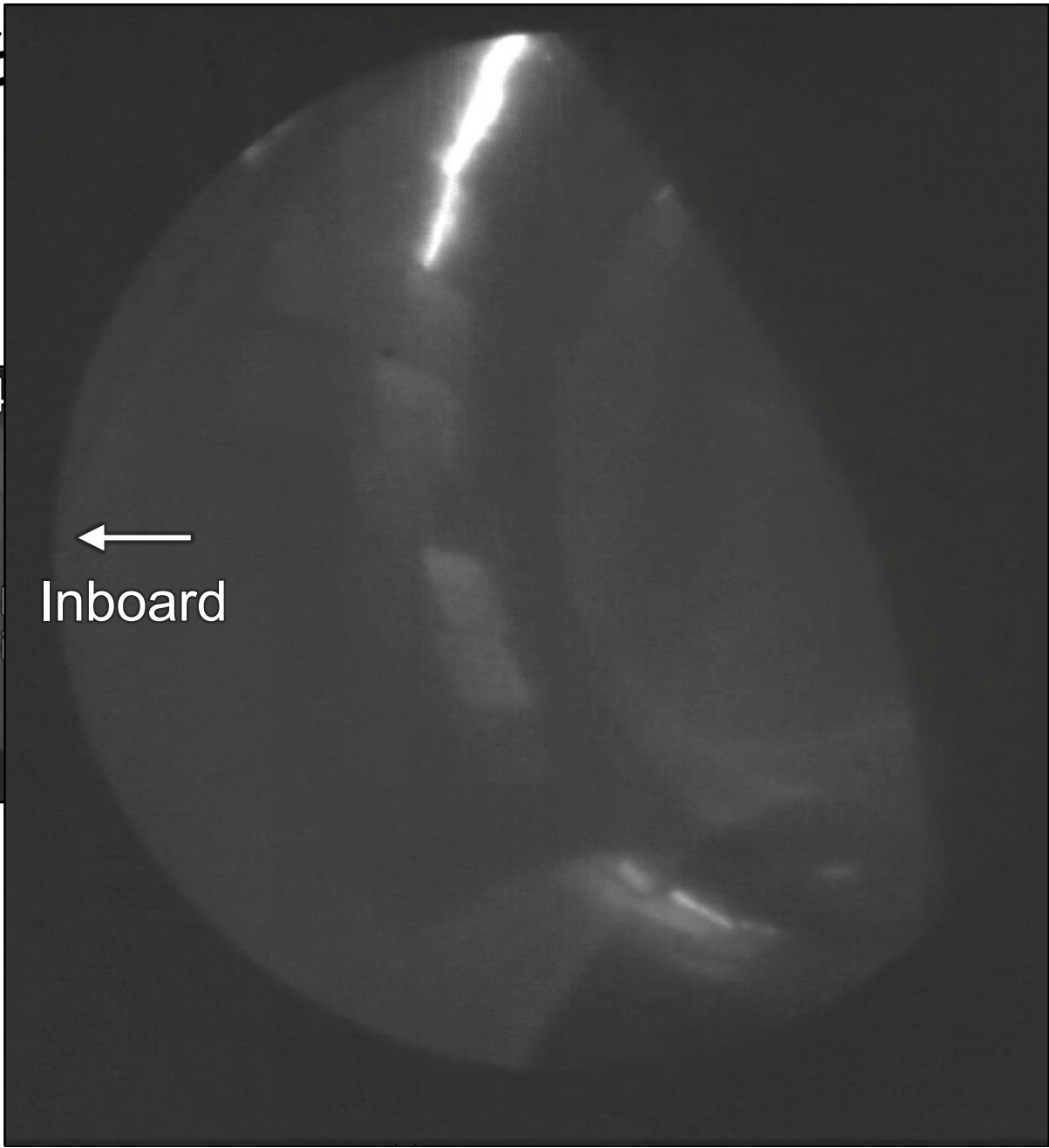
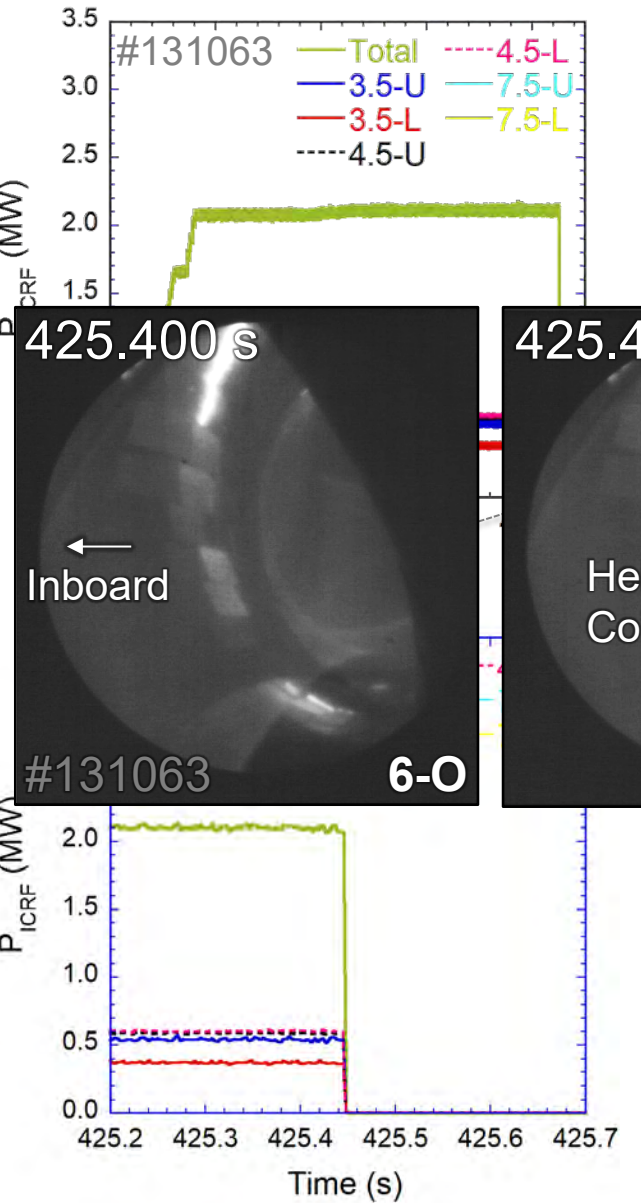
During the final 50 seconds, the plasma density increased as most of the divertor plate temperature exceeded approximately 300 $^{\circ}\text{C}$. The divertor temperatures continued to rise without reaching saturation points.

M. Shoji et al., J. Fusion Energ. 44, 42 (2025)

高ICRF加熱パワー長時間放電がプラズマ密度の上昇と真空容器壁面からの鉄ダスト粒子の流入によって停止



高ICRF加熱パワー長時間放電がプラズマ密度の上昇と真空容器壁面から停止



continued to rise without
tion points.

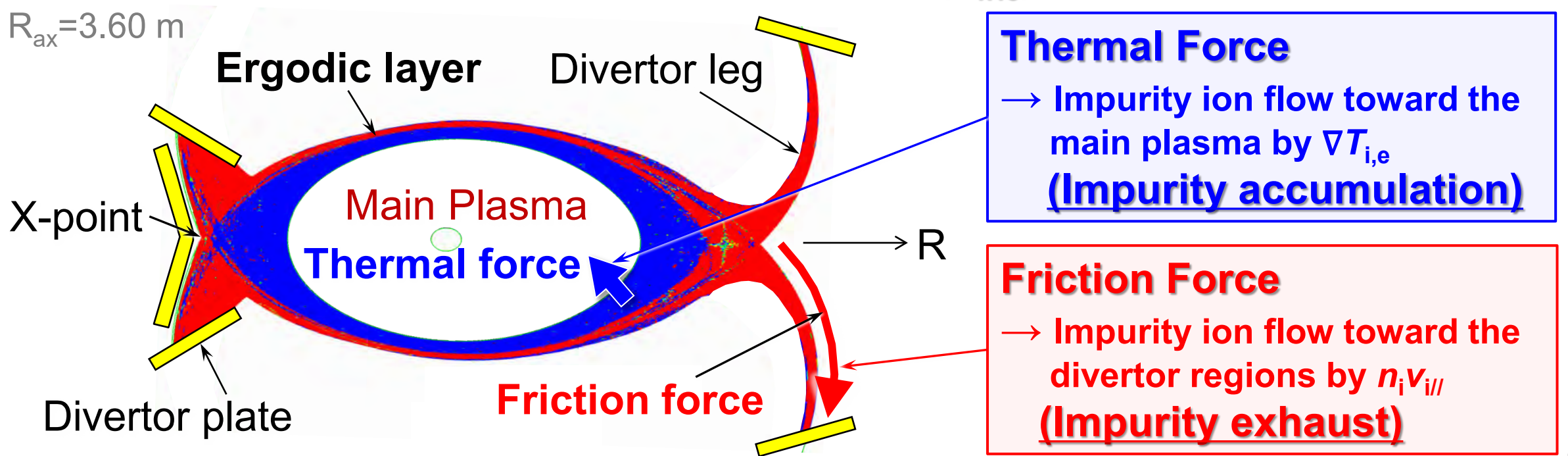
, J. Fusion Energ. 44, 42 (2025)

プラズマ周辺部(エルゴディック領域)の不純物イオンの輸送は 摩擦力と温度勾配力のバランスによって決定される

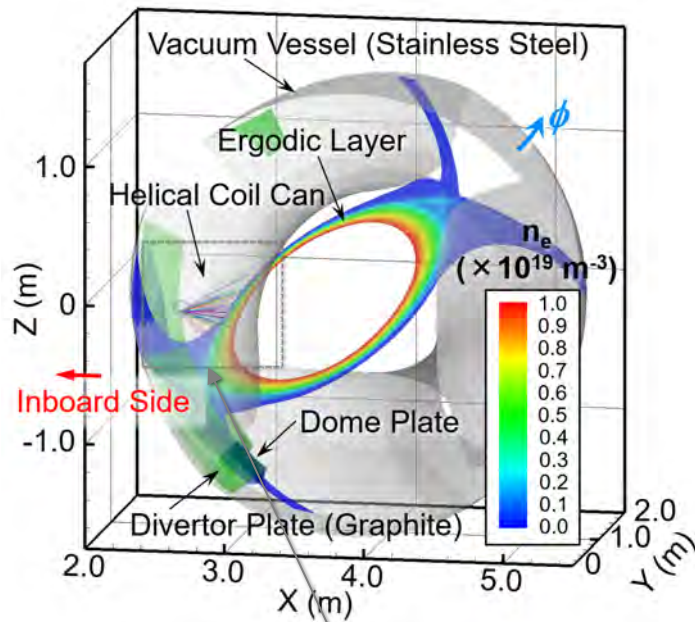
・Parallel momentum balance equation on impurity ions

$$m \frac{\partial v_{||}}{\partial t} = \underbrace{-\frac{1}{n} \frac{\partial nT}{\partial s}}_{\text{Impurity Ion Pressure Gradient Force}} + \underbrace{ZeE_{||}}_{\text{Parallel Electric Field Force}} + \underbrace{m \frac{v_{i||} - v_{||}}{\tau_s}}_{\text{Friction Force (F}_{\text{fric}})} + \underbrace{0.71Z^2 \frac{\partial T_e}{\partial s}}_{\text{Electron Thermal Force}} + \underbrace{2.6Z^2 \frac{\partial T_i}{\partial s}}_{\text{Ion Thermal Force}}$$

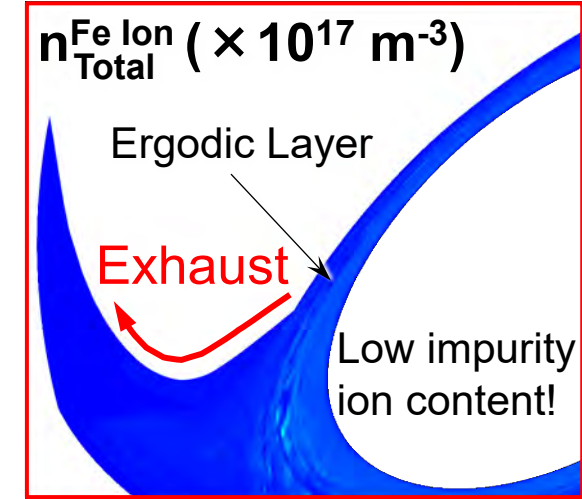
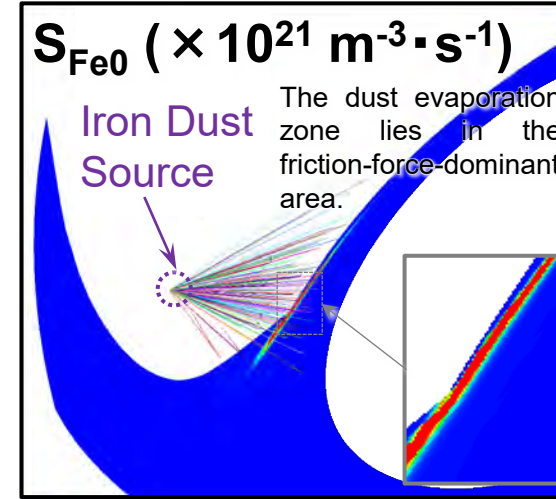
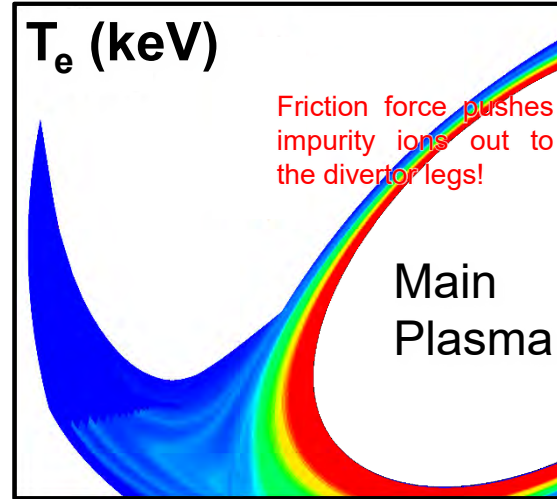
Friction Force (F_{fric}) **Thermal Force (F_{term})**



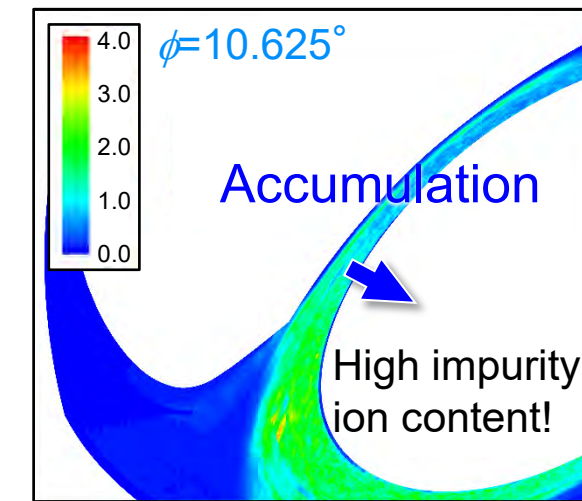
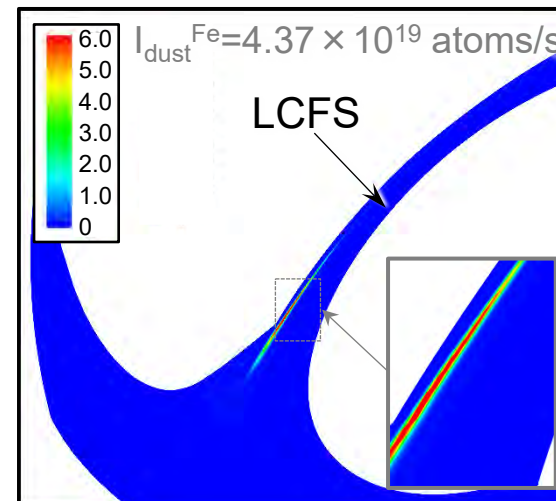
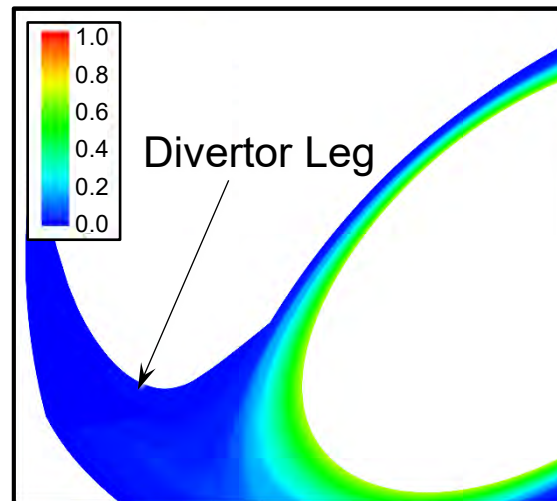
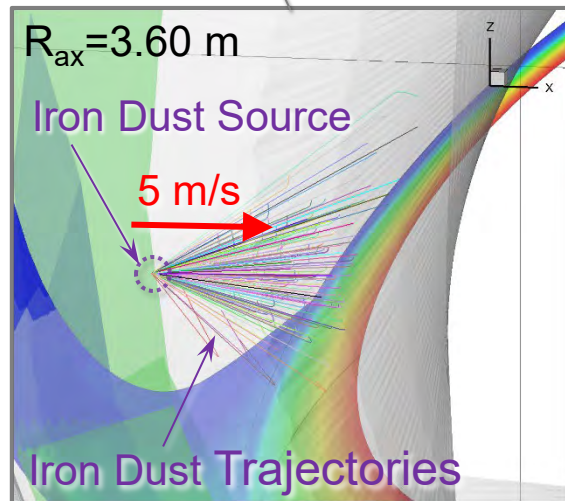
真空容器壁面からの鉄ダスト粒子の影響を抑制するにはエルゴ ディック領域の外縁部で高い電子温度を維持することが有効



Lower plasma density ($n_e^{\text{LCFS}} = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $P_{\text{LCFS}} = 16 \text{ MW}$)

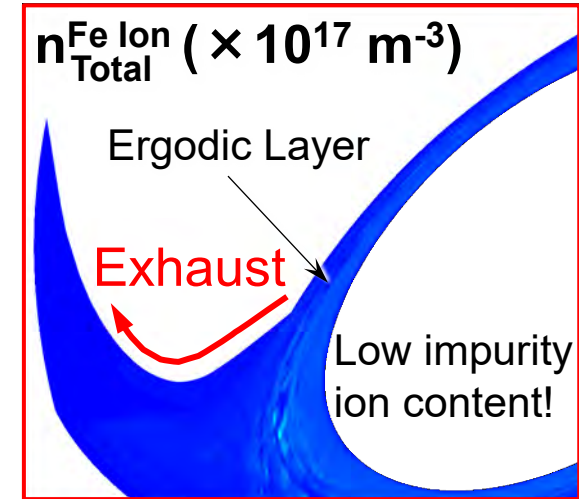
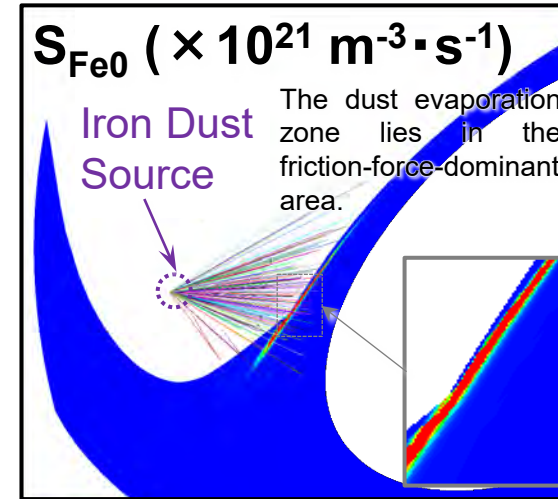
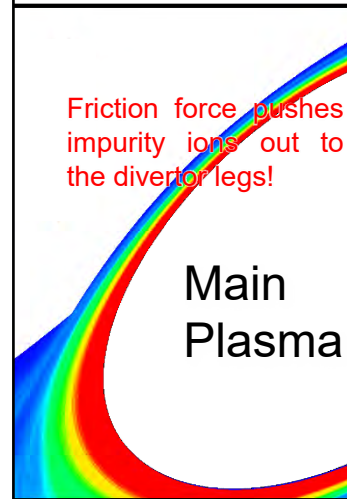


Higher plasma density ($n_e^{\text{LCFS}} = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $P_{\text{LCFS}} = 16 \text{ MW}$)

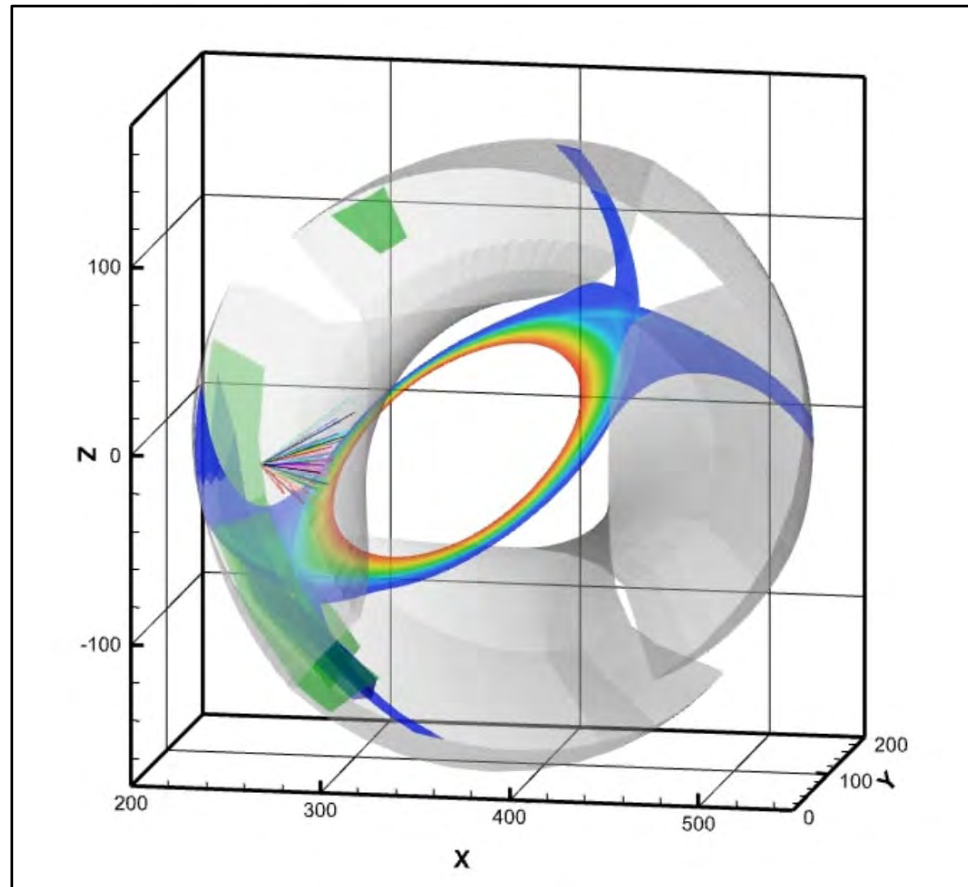
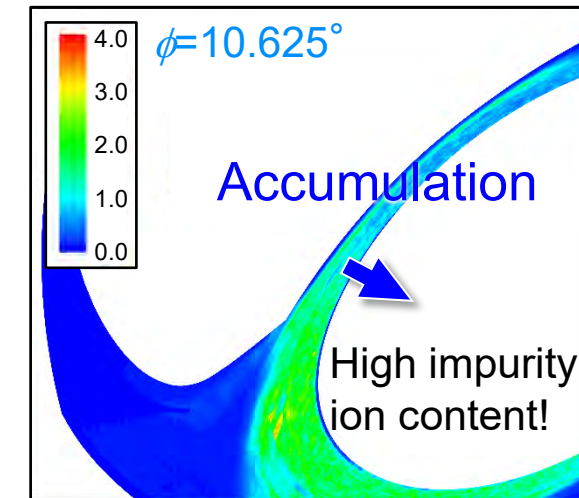
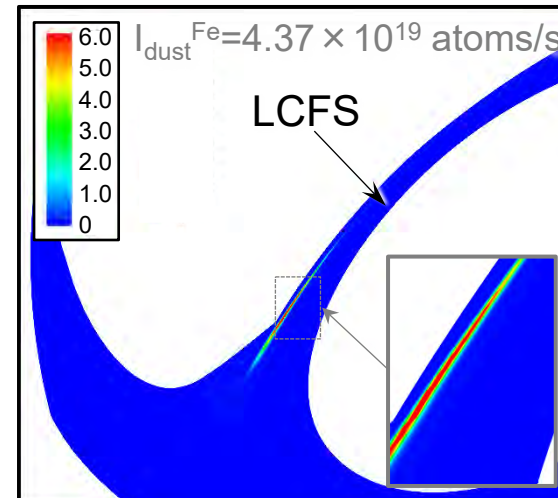
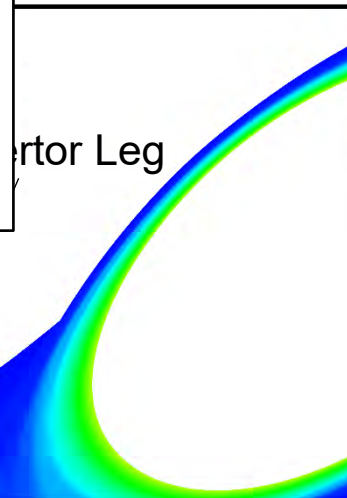


真空容器壁面からの鉄ダスト粒子の影響を抑制するにはエルゴ ディック領域の外縁部で高い電子温度を維持することが有効

Lower plasma density ($n_e^{\text{LCFS}} = 1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $P_{\text{LCFS}} = 16 \text{ MW}$)



Higher plasma density ($n_e^{\text{LCFS}} = 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $P_{\text{LCFS}} = 16 \text{ MW}$)



まとめ

- 多数の可視カメラによるプラズマの監視によって、LHDにおけるプラズマの維持時間の伸張に貢献するとともに、放電の維持を妨げる以下の4つの事象を明らかにした。

1. ICRFアンテナ内部での放電を伴う鉄を主成分としたダスト粒子の放出とプラズマ加熱パワーの出力停止

→ファラデーシールド無しICRFアンテナの開発

2. ダイバータ板の局所的な過熱を伴う制御不能なプラズマ密度の上昇

→プラズマ放電中の磁気軸位置の掃引によるダイバータ板上の熱負荷の分散

3. ダイバータ部で剥離した炭素を主成分としたダスト粒子のプラズマ中への放出

→タングステン被覆ダイバータ板の設置による堆積層の形成の抑制

4. プラズマ対向壁面上での閃光を伴う鉄を主成分としたダスト粒子の放出

- シミュレーションによる解析の結果、エルゴディック領域はプラズマ対向壁面上から放出されるダスト粒子に対して主プラズマを保護する役割があることが示された。ただし、エルゴディック領域の外縁部で高い電子温度を維持する必要がある。

→長時間放電中におけるプラズマ対向壁面からのダスト粒子の放出は不可避。次世代の装置ではその影響を抑制する有効な対策とその詳細な解析が必要不可欠。