

QUEST10年の歩み

高温プラズマ工学研究センター

- これまでの実績（数値指標）
- QUEST計画の概要
- これまでの経緯
- 電流立ち上げ研究の成果
- 長時間運転研究の成果
- SOLでの粒子・熱輸送・流れに関する成果
- これまでの達成状況

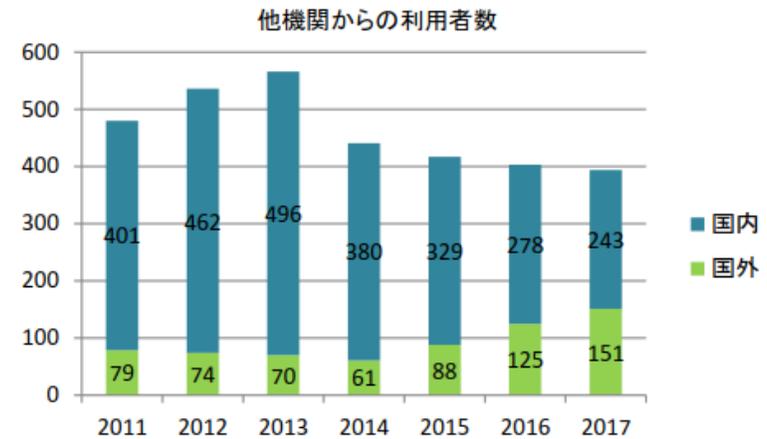
高温プラズマカ学研究中心及び高温プラズマ理工学研究中心の体制

高温プラズマカ学研究セン

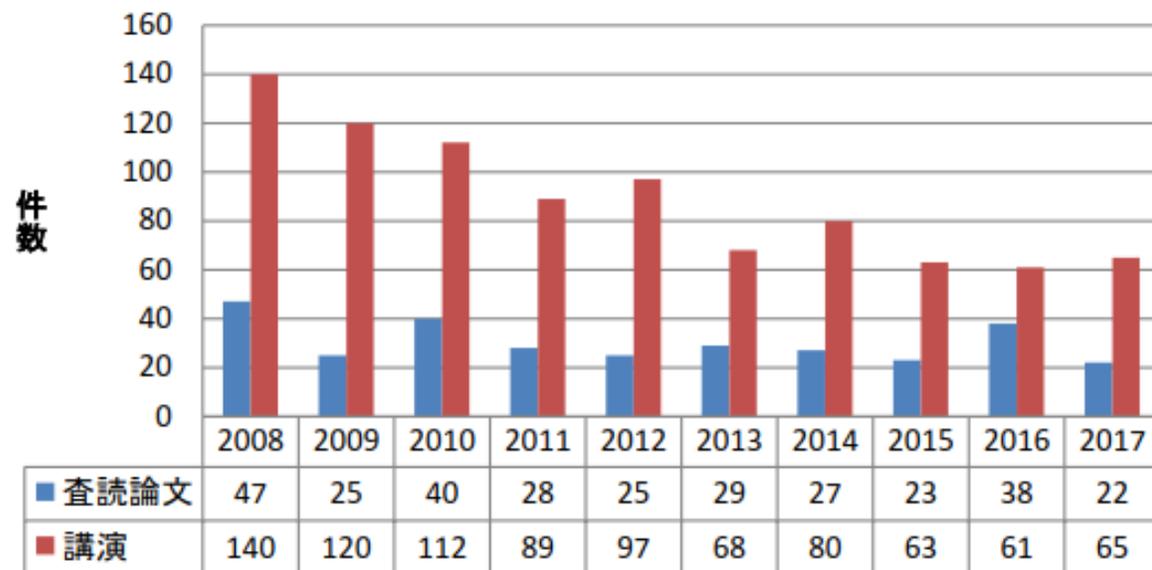
高温プラズマ理工学研究セン

高温プラズマカ学研究中心	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	高温プラズマ理工学研究センター	2017	2018								
高温プラズマ理工学	佐藤教授 退職		藤澤教授 異動								定常プラズマ理工学										
	坂本准教授 異動		永島准教授								永島准教授										
高温プラズマ計測学	関子教授 退職				出射教授						定常プラズマ加熱	出射教授									
	出射准教授											池添准教授									
高温プラズマ制御学	花田教授										定常プラズマ制御学	花田教授									
	上瀧准教授 異動											恩地助教									
高温プラズマ壁相互作用	中村教授 退職										高温プラズマ壁相互作用										
	徳永准教授											徳永准教授									
	長谷川助教											長谷川助教									
高温プラズマ材料理工学	吉田教授 (2015~協力研究員)								稲垣教授		周辺プラズマ・炉材料理工学	稲垣教授									
	渡邊准教授											渡邊准教授									
高温プラズマ診断									藤澤教授		高温プラズマ計測	藤澤教授									
客員教授・准教授	永田 正義	兵庫県立大学				2005~2007					客員教授・准教授	小野 雅之	Princeton Plasma Physics Laboratory				2017~				
	清水 勝宏	日本原子力研究開発機構				2006~2009						Roger Raman	University of Washington (准教授)				2017~				
	竹入 康彦	核融合科学研究所				2007~2009															
	福山 淳	京都大学				2008~2010															
	御手洗 修	東海大学				2008~2010															
	菊池 満	日本原子力研究開発機構				2010~2011															
	東井 和夫	核融合科学研究所				2010~2011															
	上田 良夫	大阪大学				2011~2012															
	江尻 晶	東京大学(准教授)				2011~2012															
	藤田 隆明	日本原子力研究開発機構				2012															
	久保 伸	核融合科学研究所				2012~2015															
	畑山 明聖	慶応義塾大学				2013~2015															
	大野 哲晴	名古屋大学				2013~2015															
	井手 俊介	日本原子力研究開発機構				2013~2015															
	諫山 明彦	量子科学技術研究開発機構				2016~															
	坂本 隆一	核融合科学研究所				2016~															
	筒井 広明	東京工業大学 (准教授)				2016~															
	假家 強	筑波大学(准教授)				2016~															

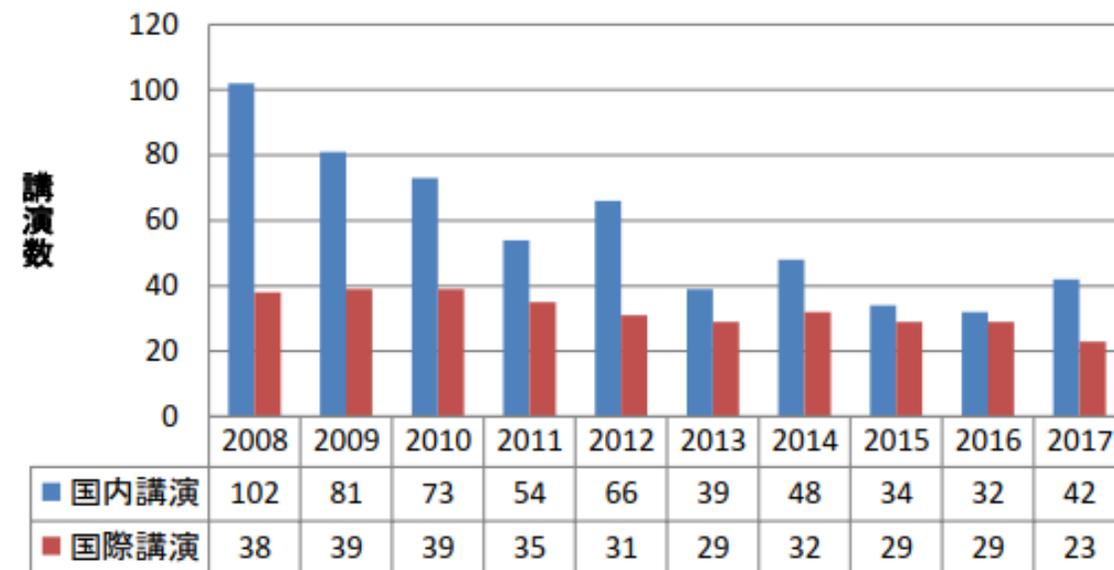
共同研究件数・共同利用者数の状況



査読論文・講演数



国内講演・国際講演

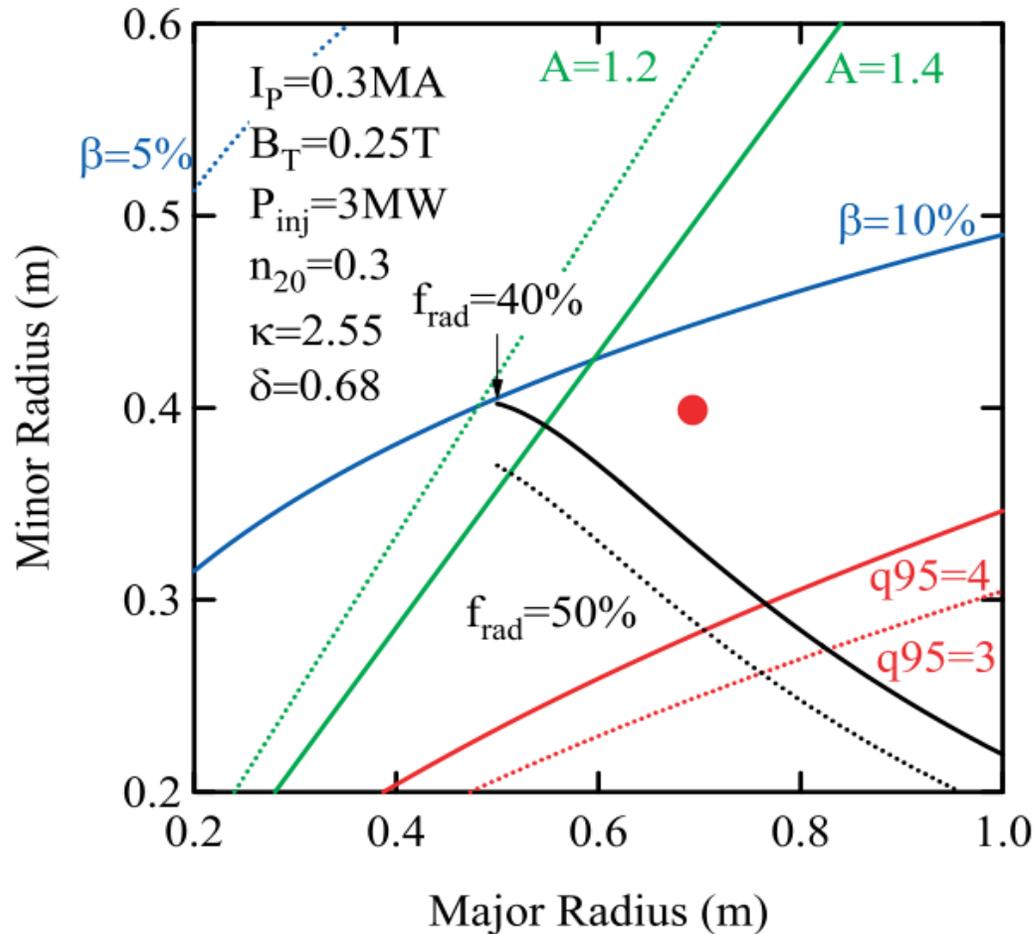


単位:千円

予算の推移



QUEST計画の概要

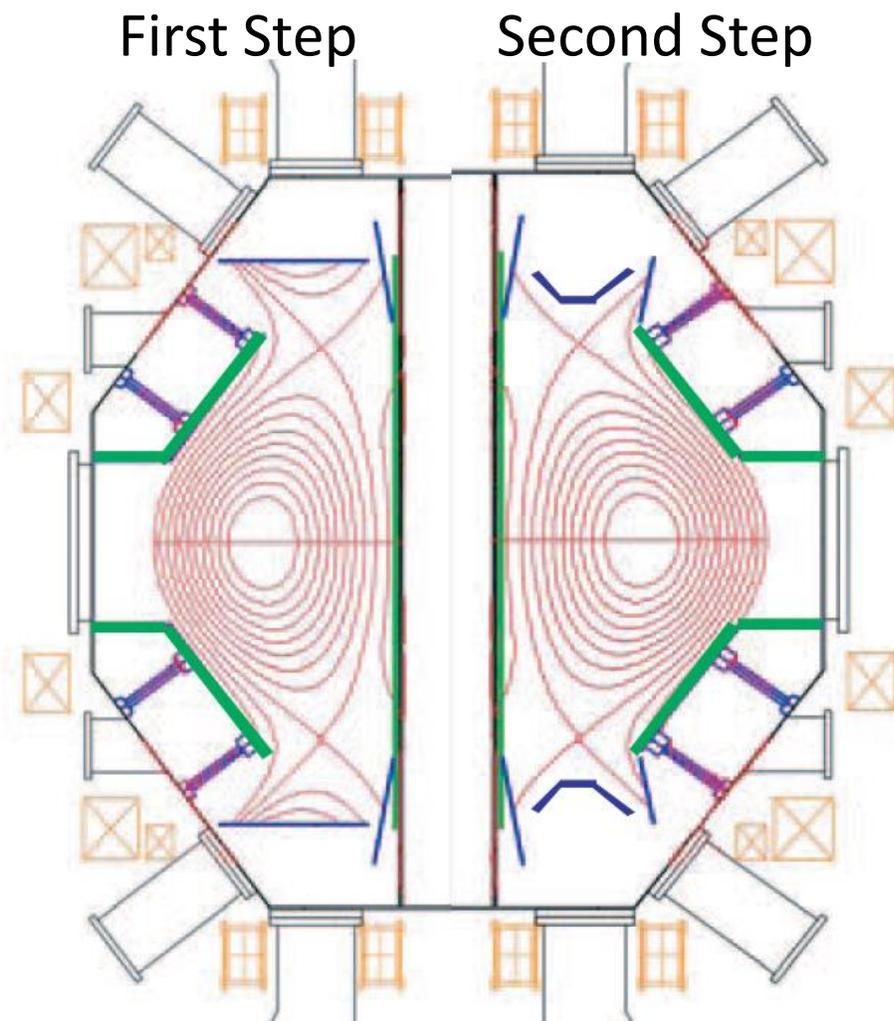


	Phase I	Phase II		Phase III
	Steady	Pulse	Steady	Steady
R (m)	0.68			
a (m)	0.4			
B_T (T)	0.25	0.5	0.25	0.25
I_P (kA)	20	300	100	300
P_{RF} (MW)	0.45	1	1	1
P_{NBI} (MW)	—	2	—	4*

- The specific purpose in phase I is:
 - (1) To examine the steady state current drive and the generation of closed flux configuration by electron Bernstein wave (EBW) current drive (CD).
- The purposes in Phase II are:
 - (1) To comprehensively establish recycling control based on control of wall temperature, and advanced wall control under high plasma performance.
 - (2) To improve diverter concepts and to establish the way of controlling particles and heat loads during long duration operation.
 - (3) To obtain relatively high β (10 %) under high elongated plasma shape and additional heating power in short pulse discharge up to 1 s.

Plasma and Fusion Research Volume 5, S1007
(2010) K.Hanada et al. Scopus citation 45

QUEST計画の概要：ダイバータ計画



First Step: Hot wall + Flat divertor

基盤研究 (S) : H.Zushi 2011-2016

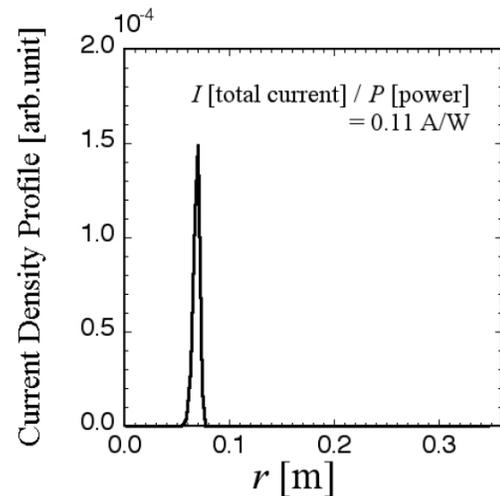
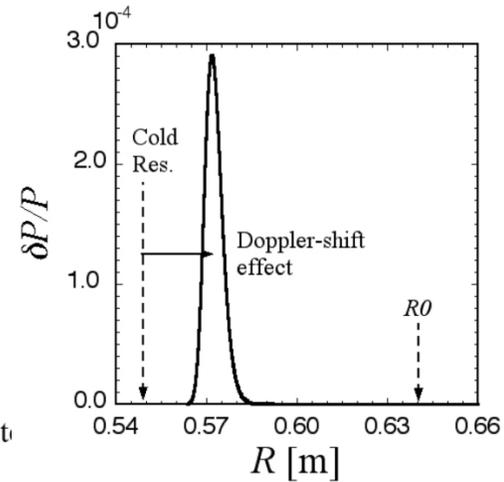
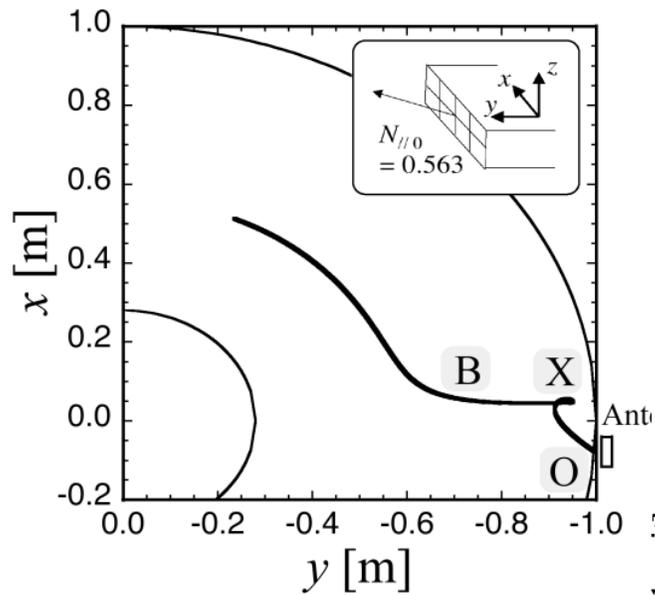
基盤研究 (A) : K.Hanada 2016-2019

Second Step: Hot wall + Closed divertor

Schematic view of the plan of the installation of the first wall on QUEST is shown. Left half of the figure illustrates the situation of the first step (the flat divertor plates and HTW). Right half shows the second step (the closed divertor). HTW is shown by green lines. The wall of the center part (high field side) does not heat actively, but passively due to the radiation from the wall.

閉ダイバータ化の前にSOL流発生機構や中性粒子圧縮を評価する必要がある。金属壁（タングステン）を採用し、壁温を制御できるプラズマ対向壁（高温壁）を設置

QUEST計画の概要：電流駆動（EBWCD）



- O-X-B: **0.11 A/W: 1MW ~ 100kA**
1MW CW injection

An example of wave trajectory at the toroidal cross section in the O-X-B conversion scenario at the QUEST [16]. Incident O-wave from low field side reflects at the plasma cut-off and converts to X-mode. X-wave meets UHR and converts to B-wave.

ダイバータ研究やNBI入射に備えるためにカットオフを超えた高密度化をEBWH/EBWCDで実現する。目標値を100kA、 $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ （プラズマカットオフの4倍）とした。

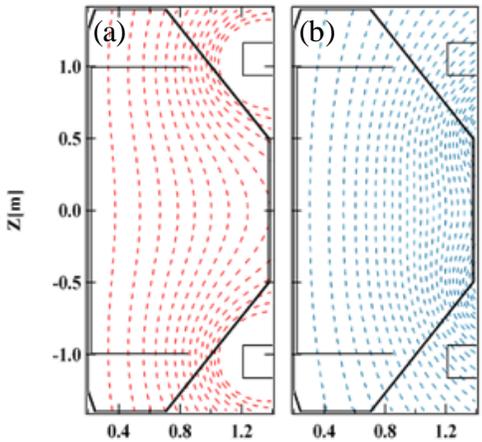
H. Idei et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 8 (2009) 1104

K.Hanada et al. Plasma and Fusion Research Volume 5, S1007 (2010) Scopus citation 45

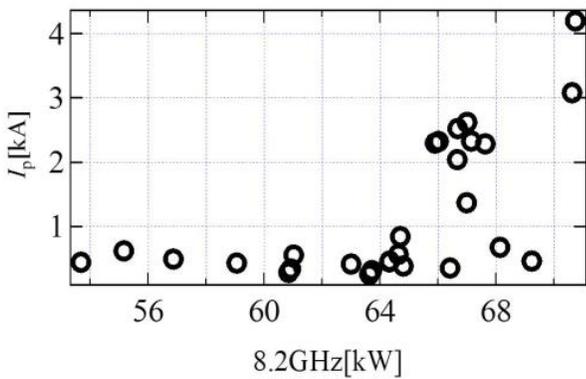
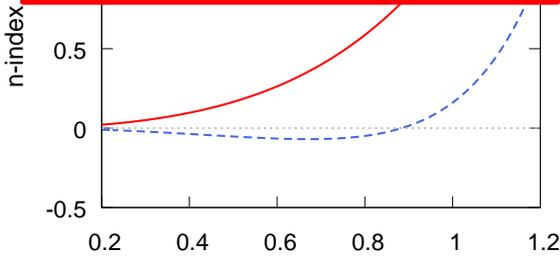
QUEST計画の学術的意義

- ST炉を目指すうえで、OHなしでの電流立ち上げは可能か？
RF電流駆動（LATE、TST-2で実績あり）
- NBI入射につながる高密度化は可能か？
EBWH/CD（TST-2@K, LATEで実績あり）
原型炉規模に適応可能な条件 $a/\lambda_{RF} \gg 1, (\nabla n/n)^{-1}$ が実現可能か？
- 定常化（目指すべき定常状態とはどのような状態か？）
完全な定常は？（非平衡開放系での定常？）
周期を繰り返す状態→1年間（炉のミッション）
- 定常化を決める時定数は何か？何が決めるのか？
 τ_A （MHD） / τ_E （エネルギー輸送） / τ_P （粒子輸送） / $\tau_{L/R}$ （平衡） / 未知？
- 熱・粒子を制御するためのSOL
SOL流の制御法(ダイバータバイアス、パフ&ポンプ)
巨大なP/Rに対応できるダイバータ(SF, Super-X)

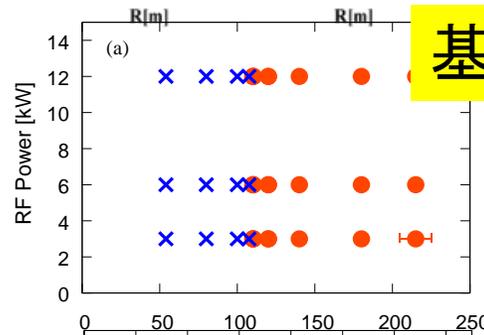
プラズマ着火の研究



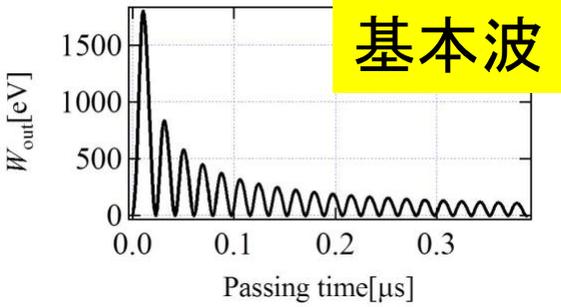
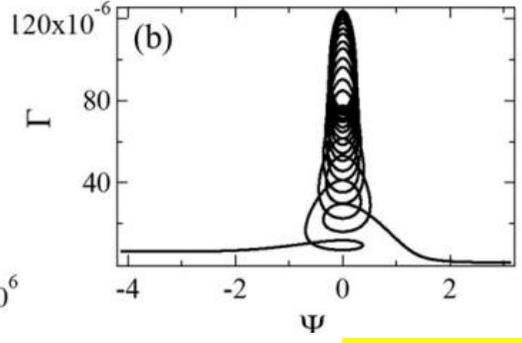
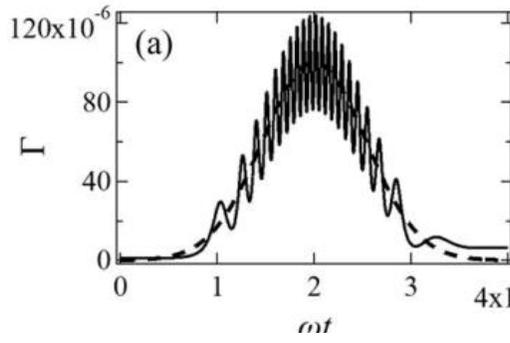
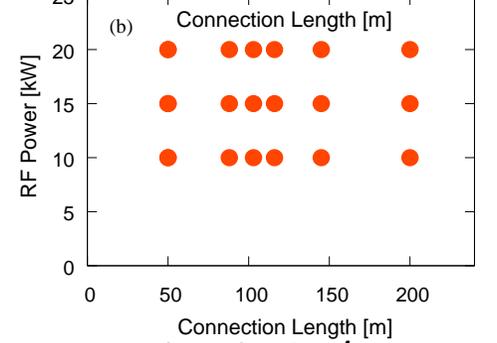
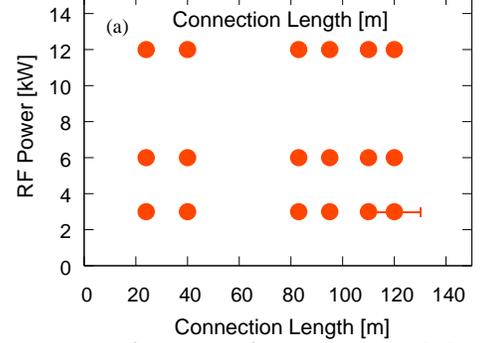
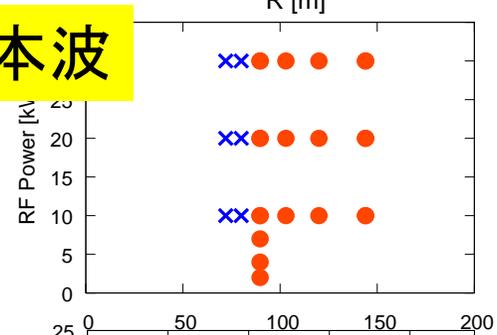
正のn-indexでは
着火は容易



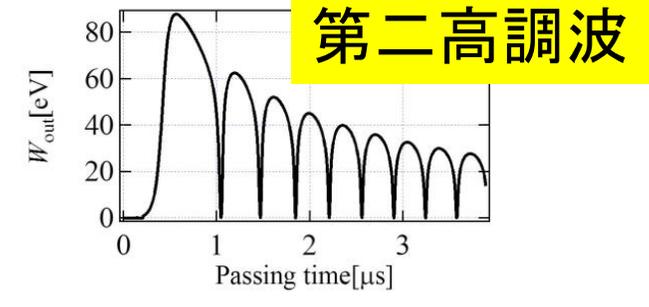
第二高調波の場合には
電子が低温から加速されにくいため
パワーが必要となる。



基本波



基本波



第二高調波

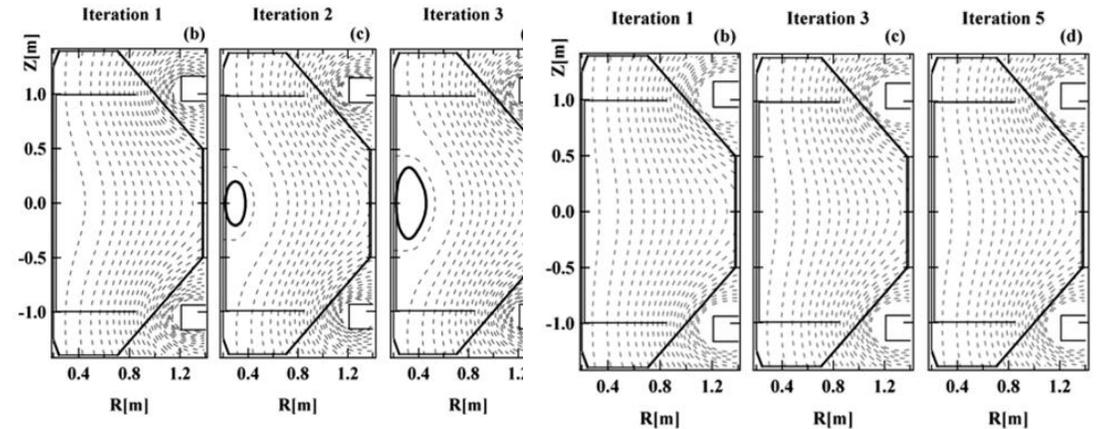
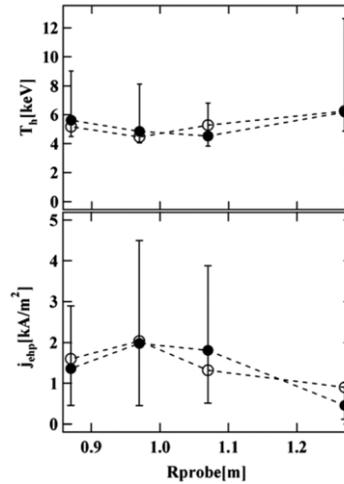
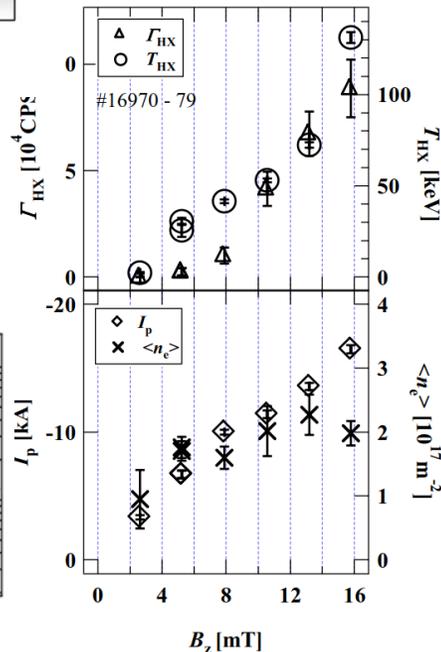
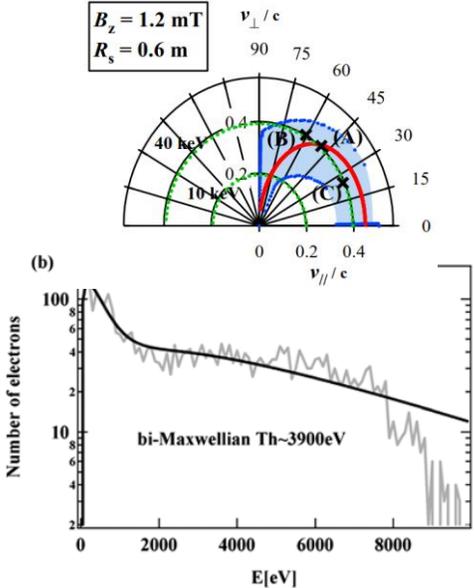
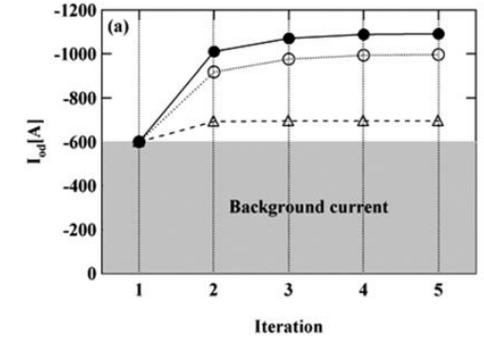
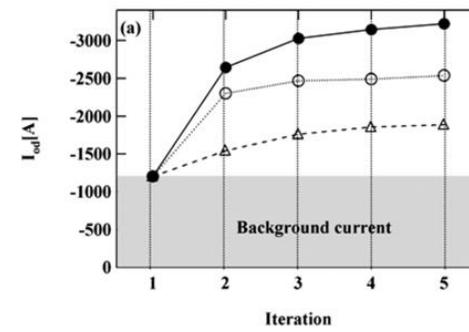
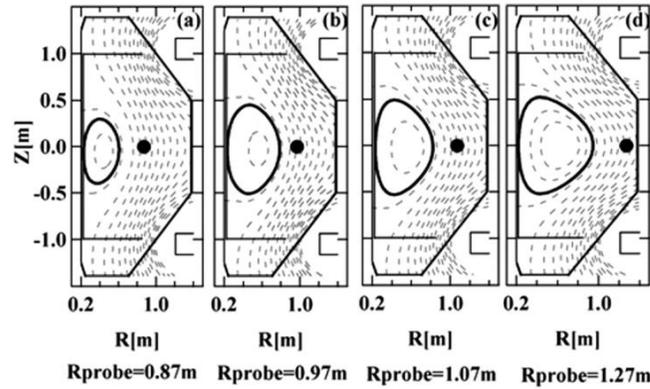
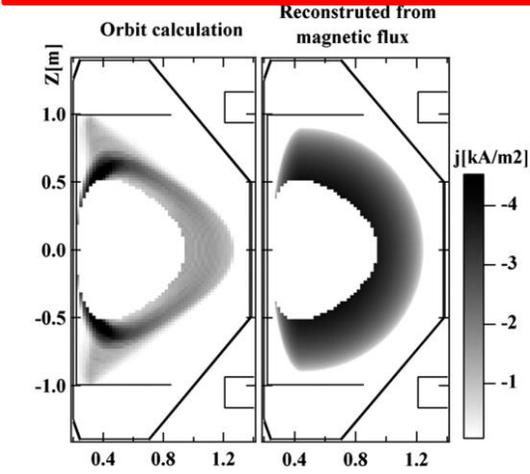


閉磁気面形成機構に関する研究

軌道電流は電場に加速された高速電子が担う

リミタ挿入で計算と一致して磁気面が変化。

軌道電流だけでは閉磁気面は形成されない。
圧力駆動電流が1 kA程度必要。



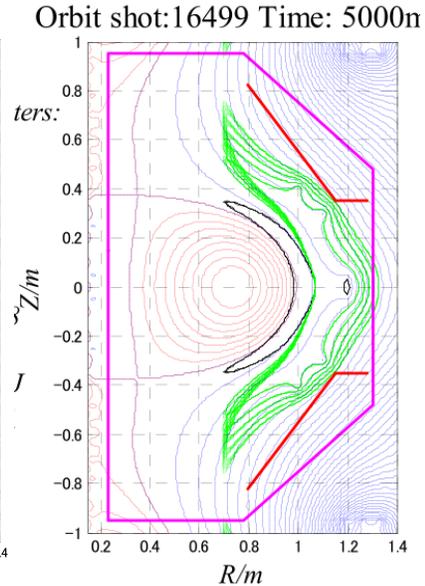
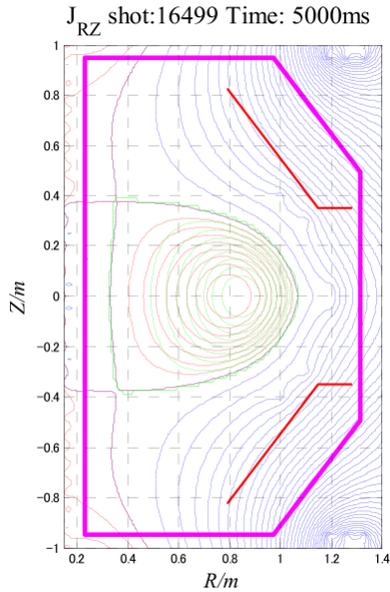
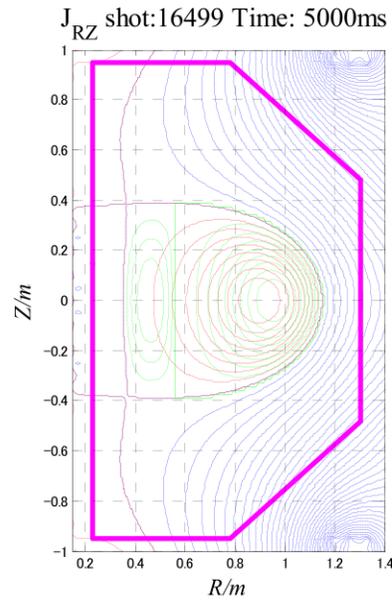
Ishiguro et al. PoP 19, 062508 (2012) citation 15

Ishiguro et al. J. of Phys.: 511 (2014) 012041

Hanada et al. PST 13 307 (2011) citation 23

Tashima et al. NF 54 (2014) 023010 citation 18

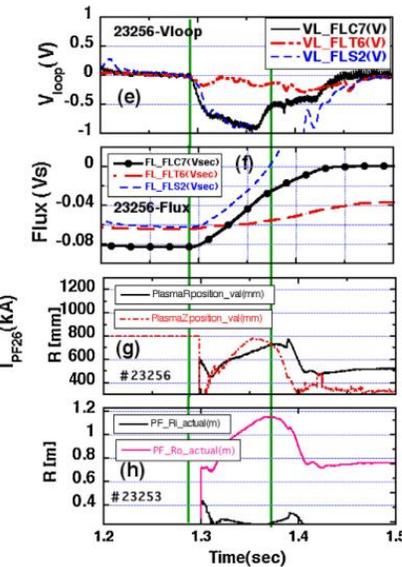
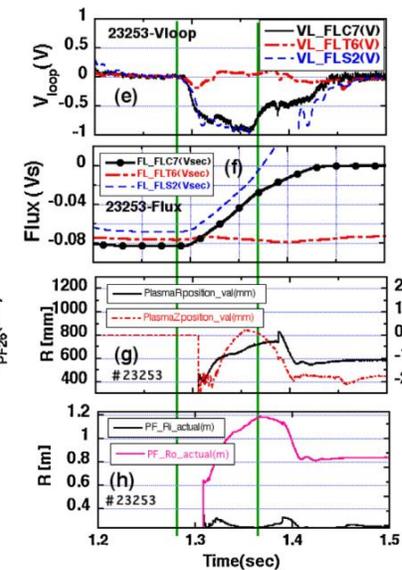
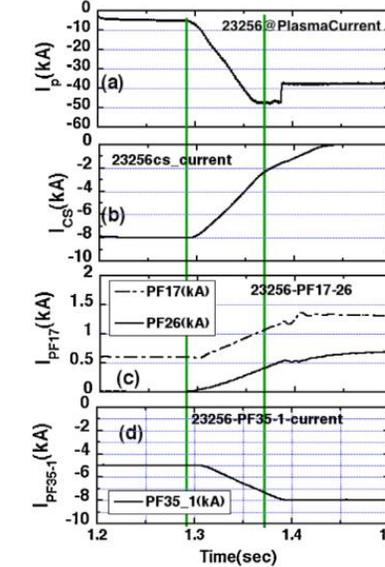
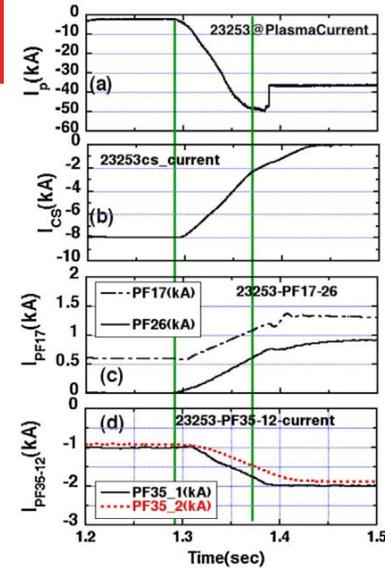
平衡配位に関する研究



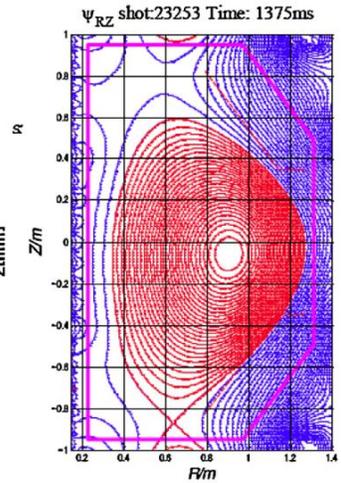
閉磁気面内だけを電流が流れていると仮定した場合

開磁気面内に仮想コイルを設置して計算した場合

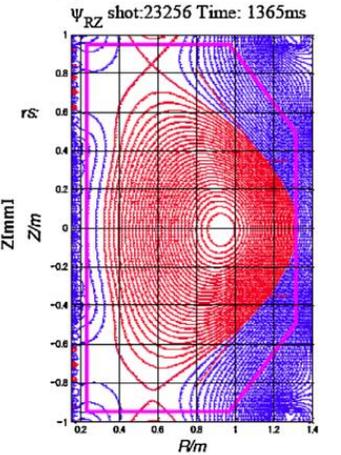
開磁気面内に高速電子が存在して閉軌道を持つ電子による電流を仮定した場合



Outer divertor coil



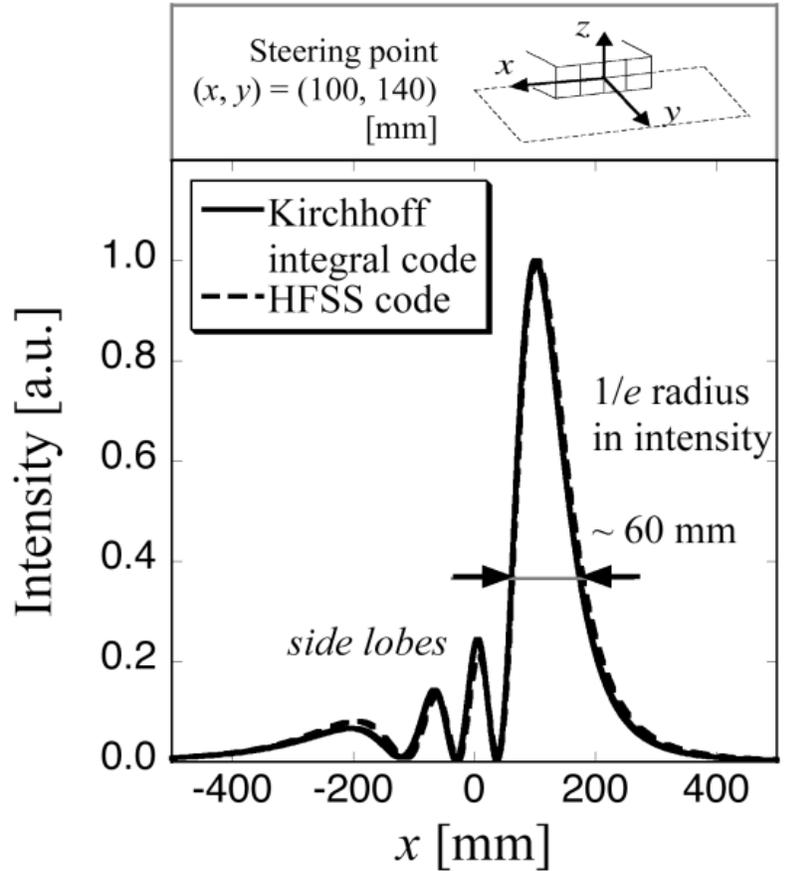
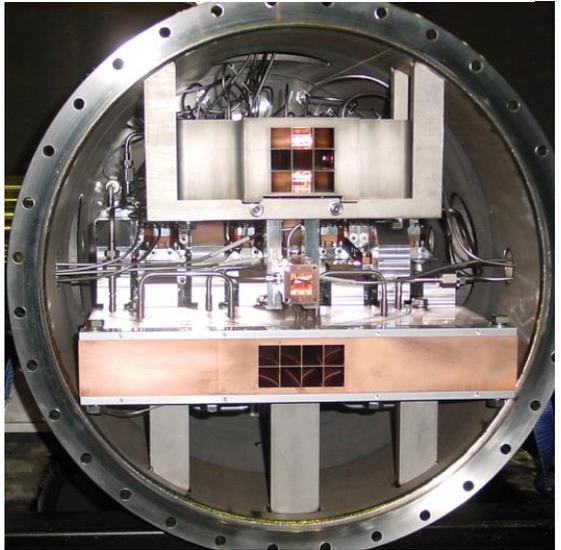
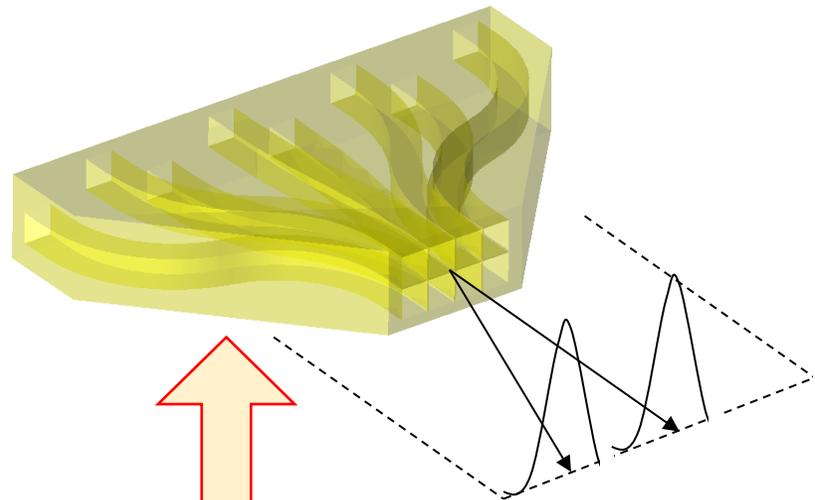
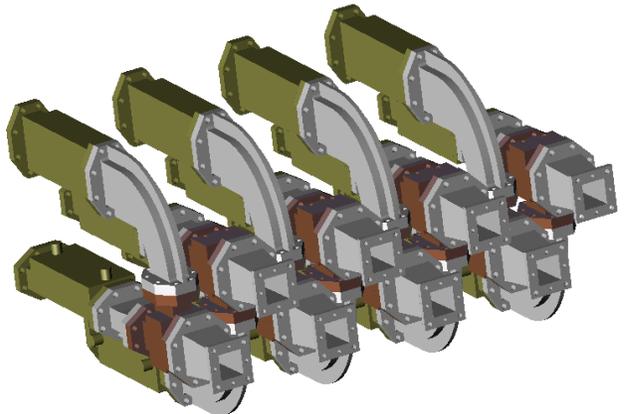
Inner divertor coil



K. Nakamura et al. / Fusion Engineering and Design 123 (2017) 532–534

O. Mitarai et al., Fusion Engineering and Design 109–111 (2016) 1365–1370

入射RF技術の進展 Phased Array



H. Idei et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 8 (2009) 1104

Klystron管の故障により、トカマク実験はあまり実施されず
2機のみ購入2017年度：QUEST実験推進会議の決定

28GHz システムの開発と電流駆動

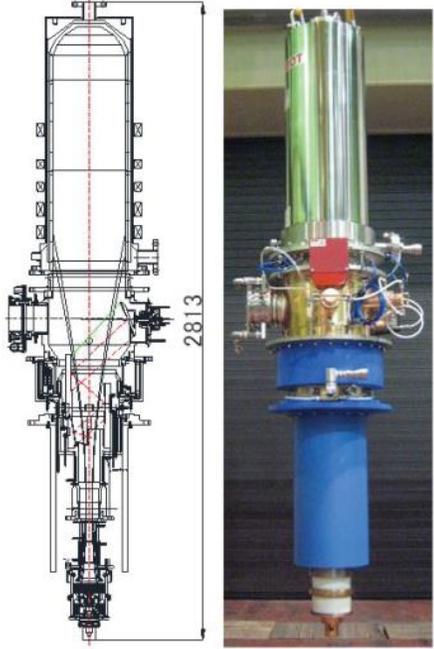
筑波大学

九州大学

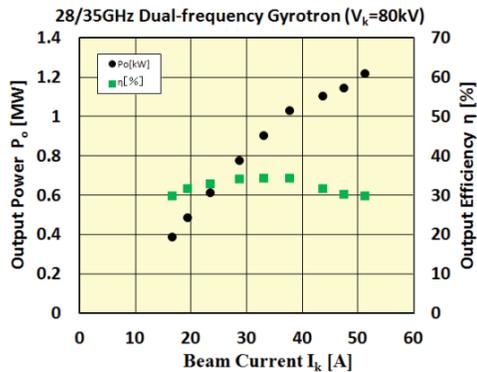
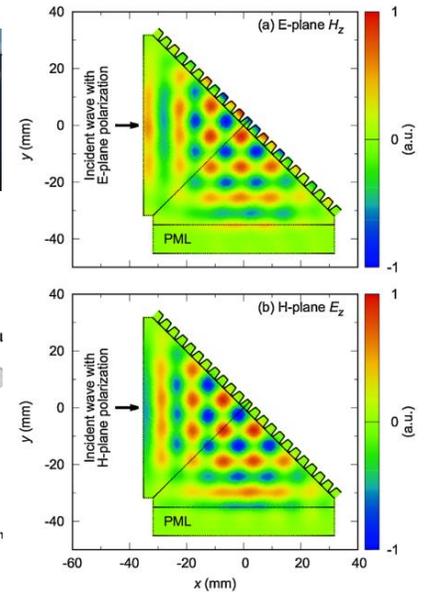
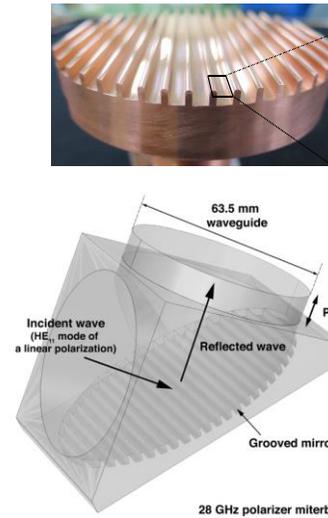
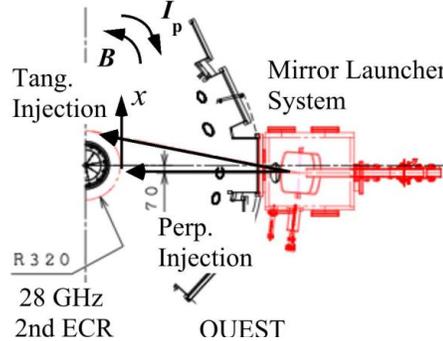
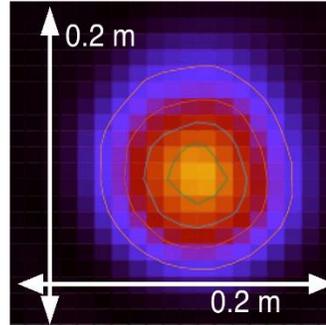
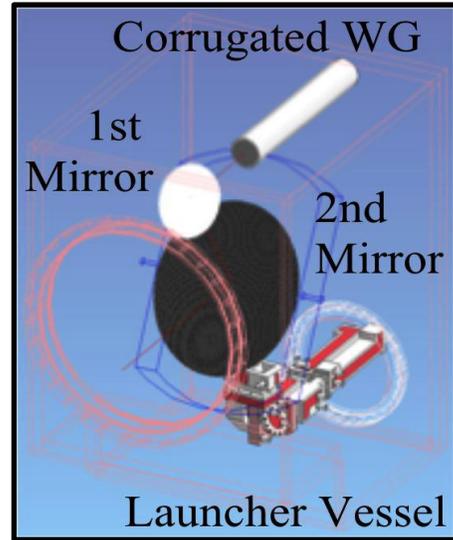
NIFS

$N_{//}$ 制御と集束化

偏波制御

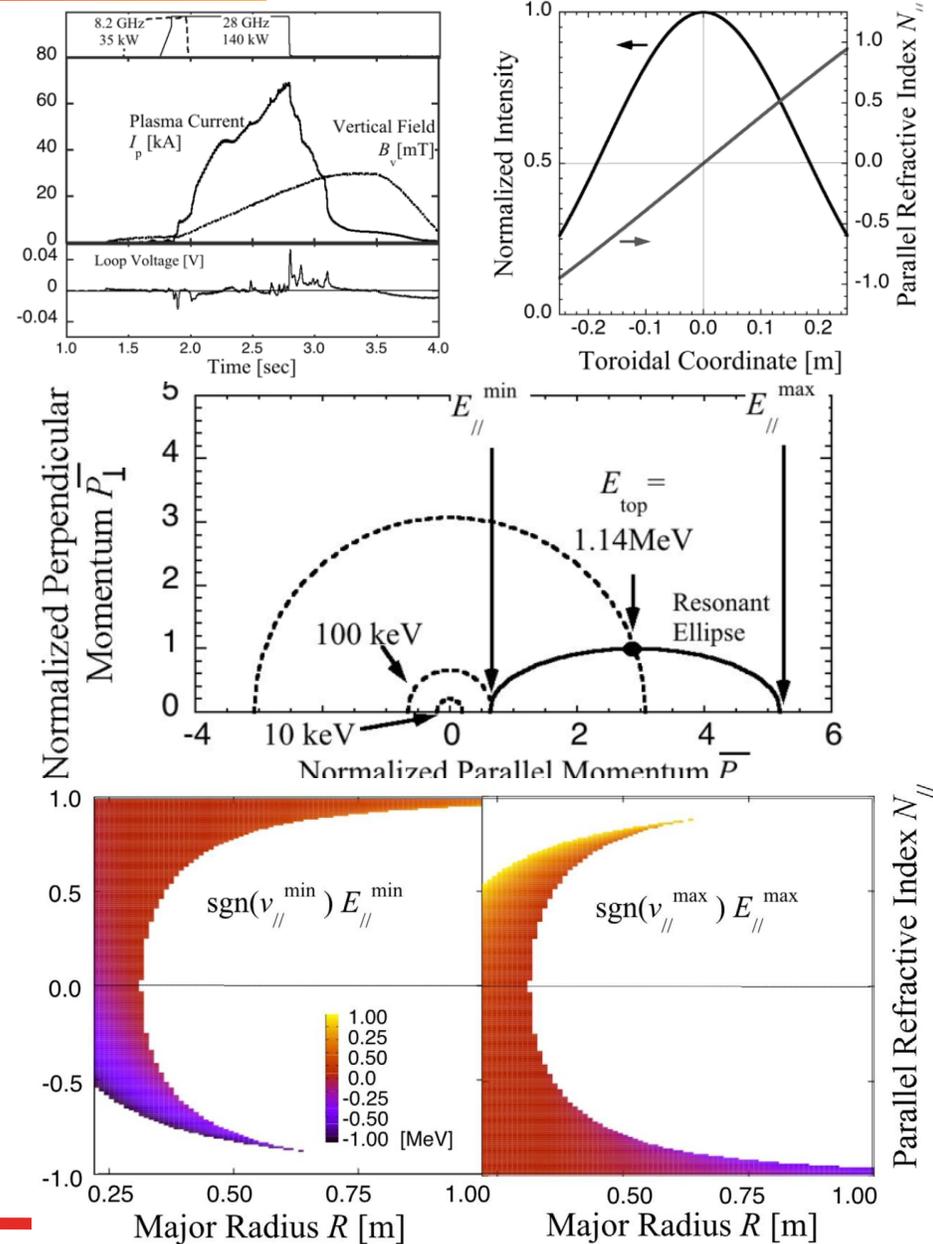
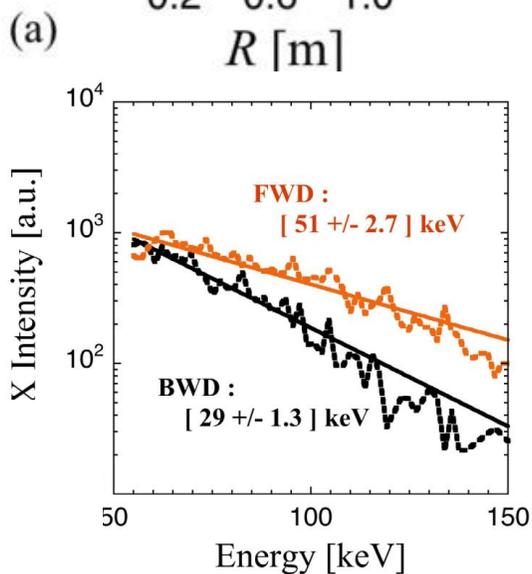
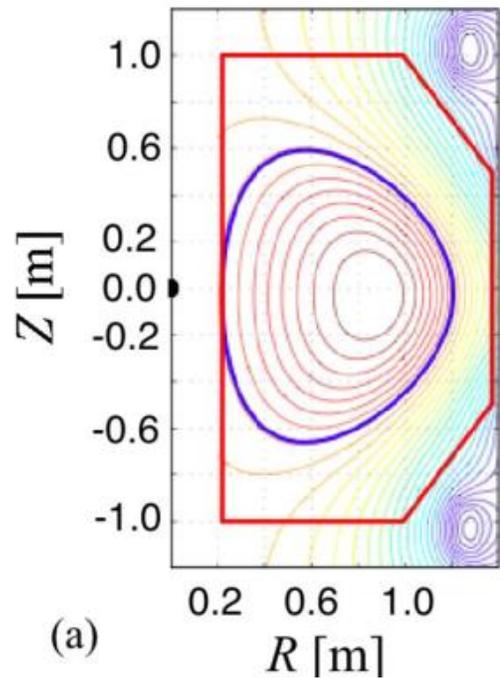
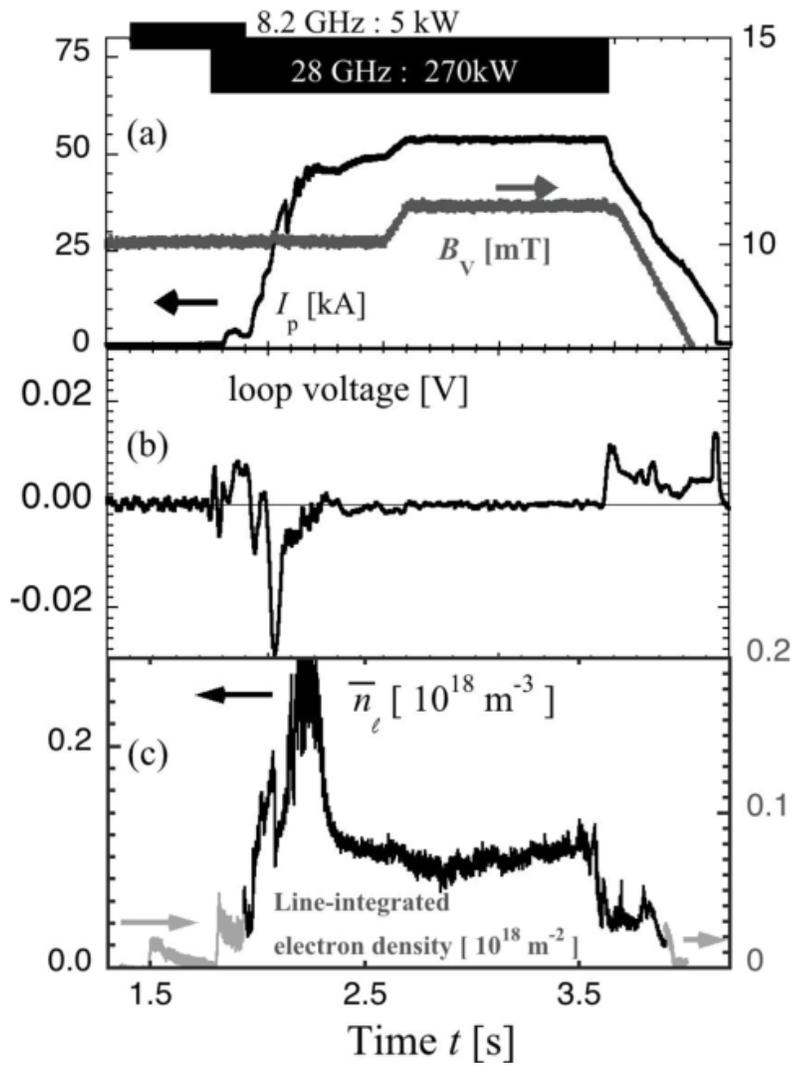


(a) (b)



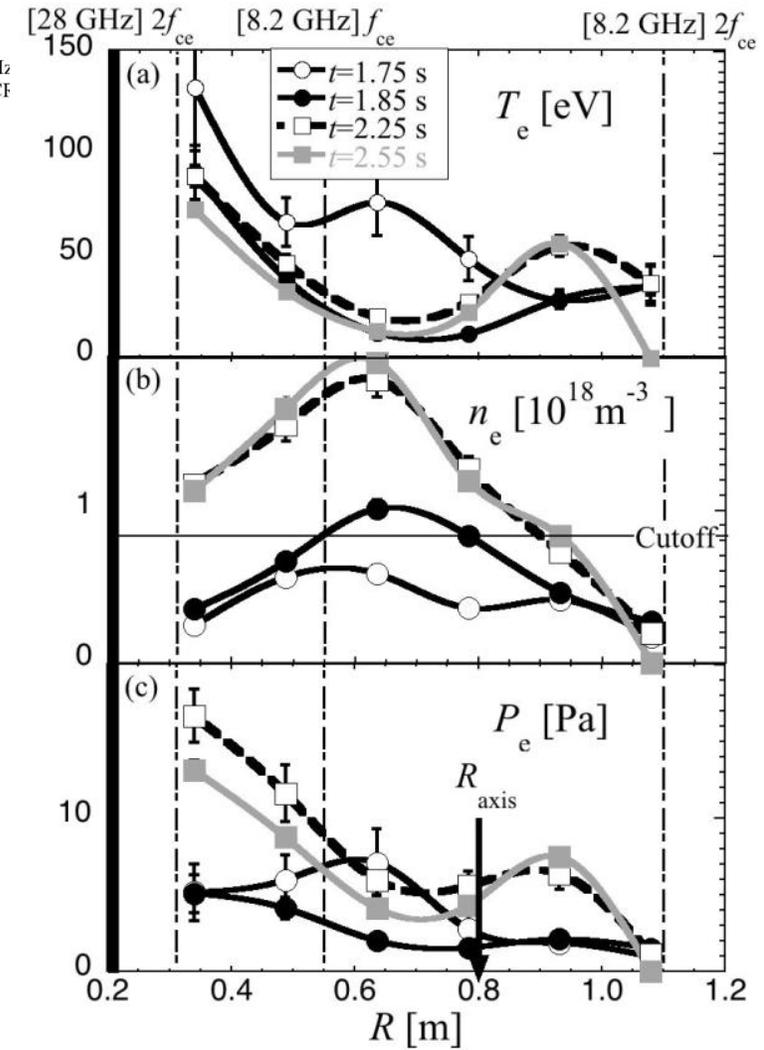
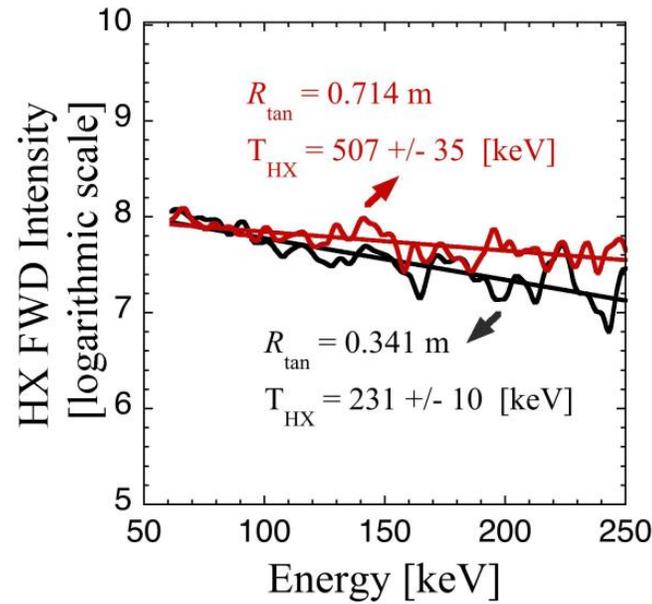
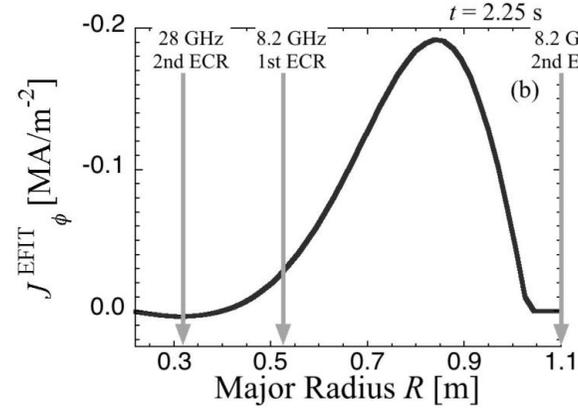
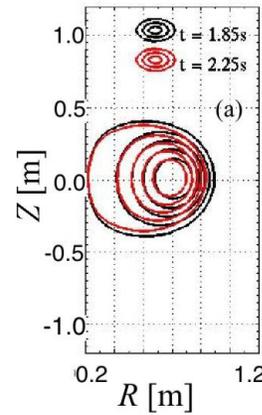
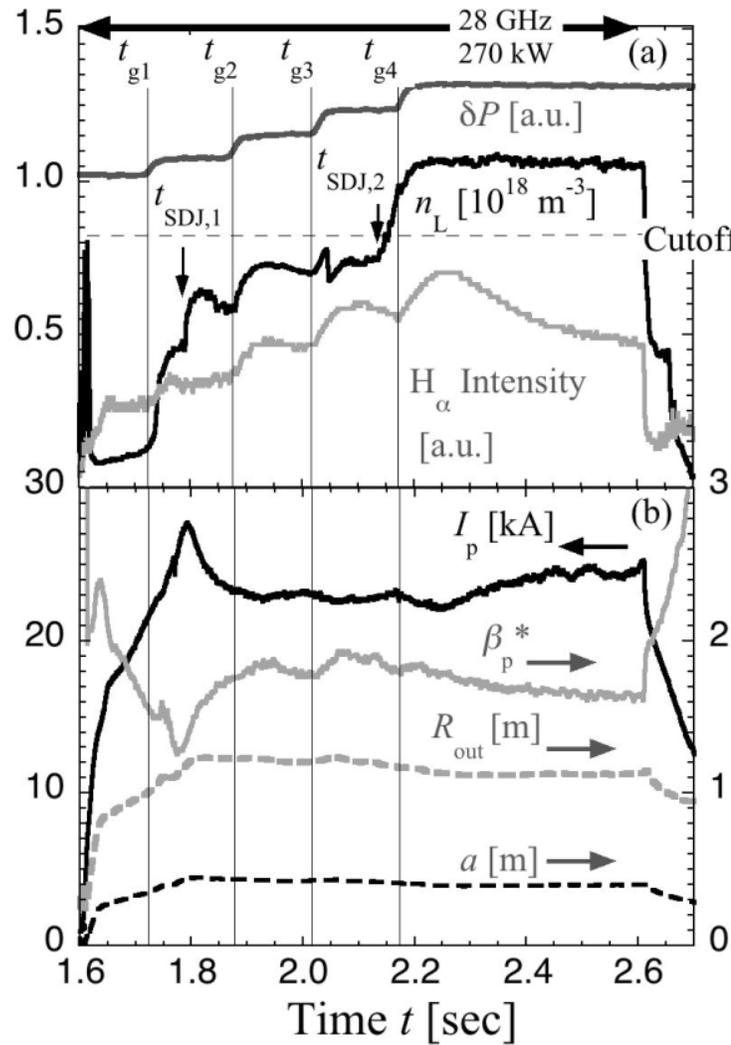
Karia et al. AIP Conference Proceedings 1771, 030020 (2016)
 Karia et al. Fusion Science and Technology, 68:1, 147-151 (2015)
 Karia et al. Nucl. Fusion 55 (2015) 093009
 R,Minami et al. Nucl. Fusion 53 (2013) 063003
 Toru Ii Tsujimura et al. Fusion Engineering and Design 114 (2017) 97–101
 H. Idei et al. IAEA2016 EX/P4-50

第二高調波ECCDによるプラズマ電流の立ち上げ



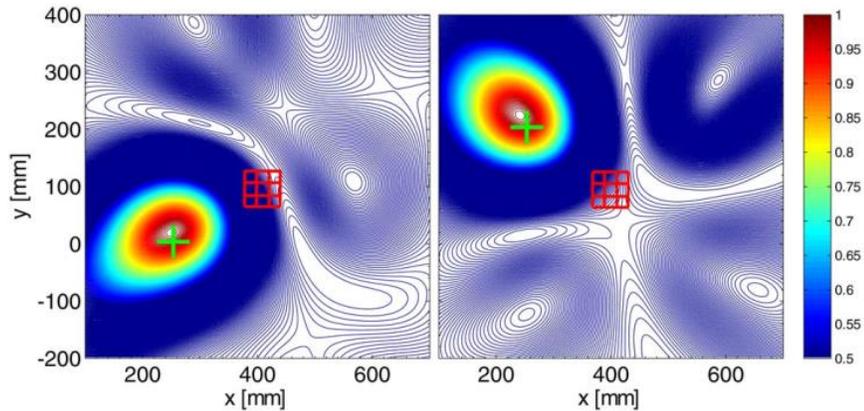
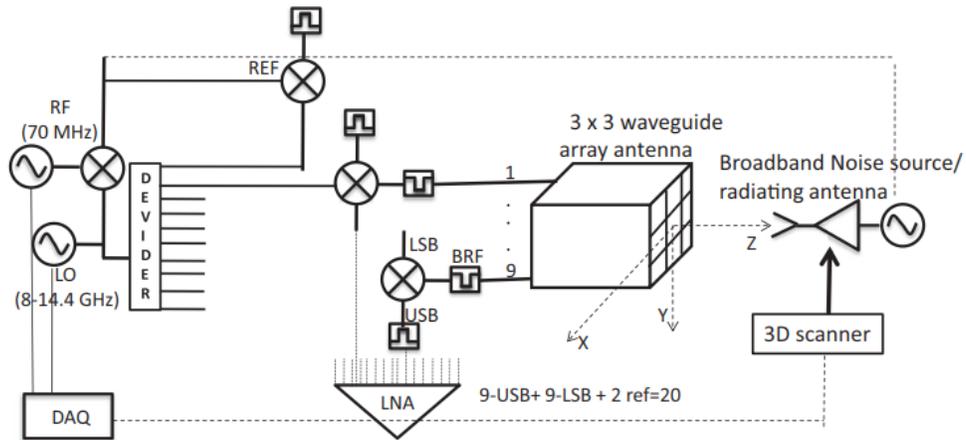
H. Idei et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 126045
 Y. Takase et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 102005
 H. Idei et al. IAEA2016 EX/P4-50

EBWHの実験結果



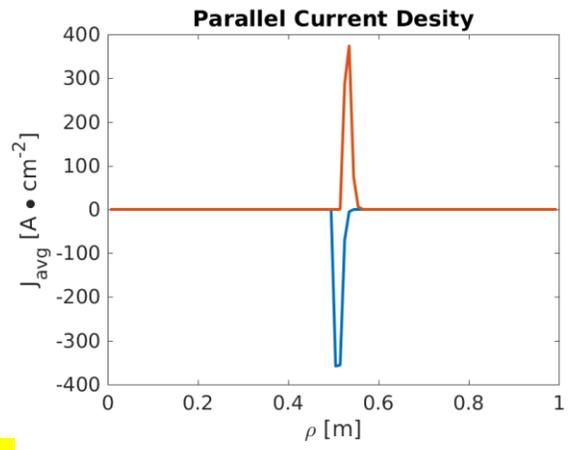
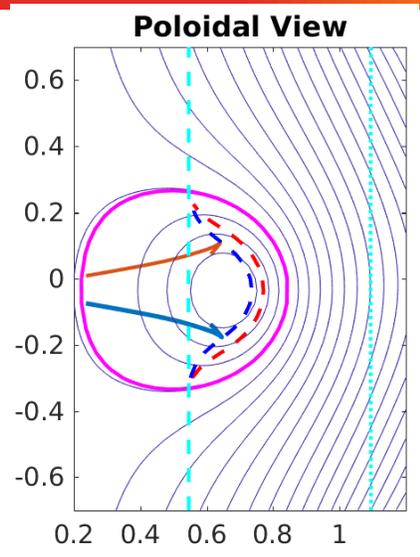
EBWH/EBWCDへの準備研究

O-X-Bの逆過程でプラズマからのEBE輻射を観測して入射を制御

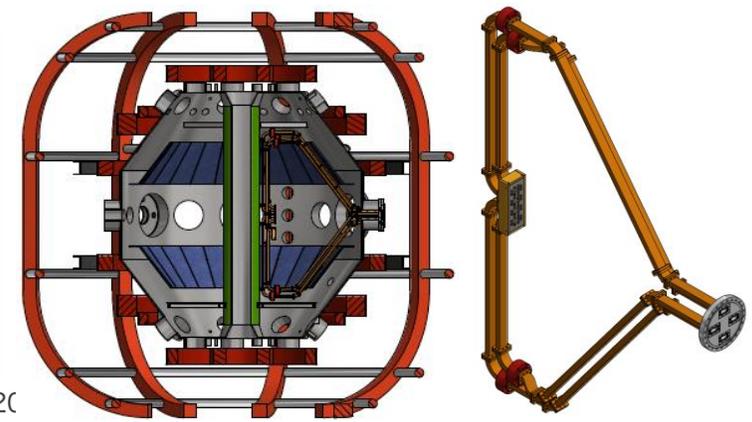
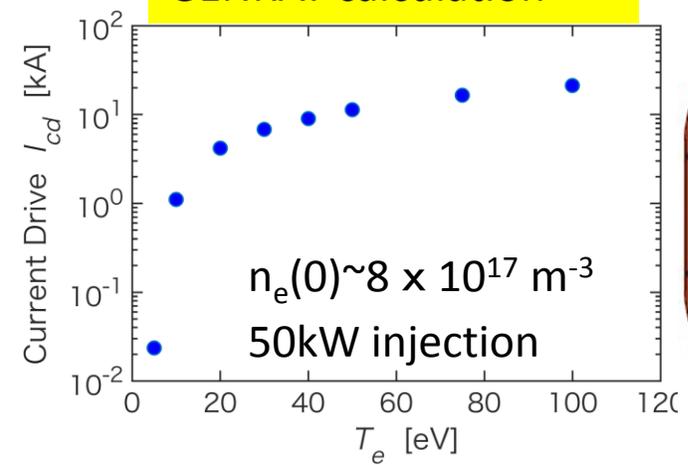


H. Idei *et al.*, JINST **11** C04010 (2016)
 Mishra *et al.* Rev. Sci. Instrum. **85**, 11E808 (2014)

高磁場入射によるX-B



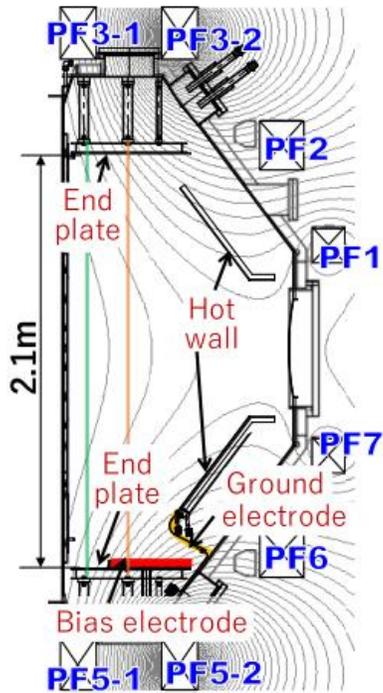
GENRAY calculation



R. Yoneda *et al.* PFR accepted in 2018



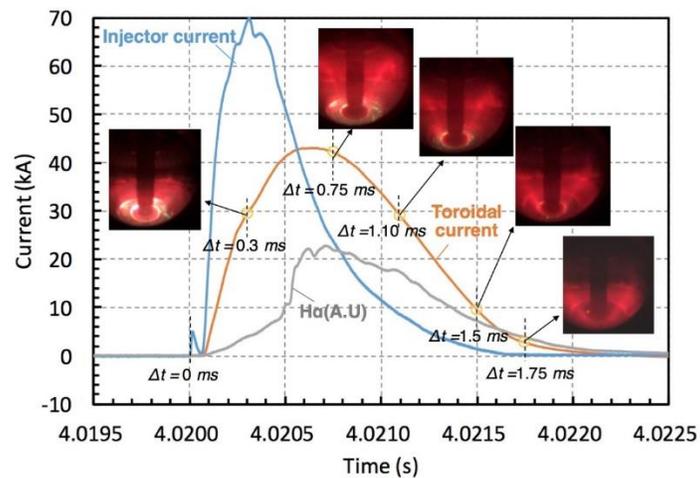
国際共同研究：新たな電流立ち上げ法（CHI）の導



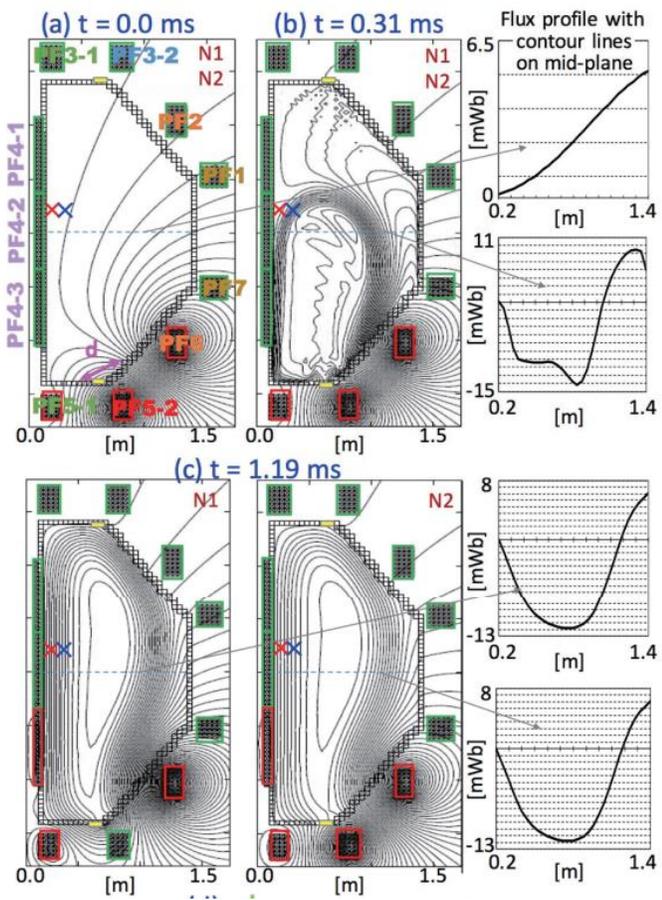
QUEST型電極実験では入射電流が0でも残存電流が存在。



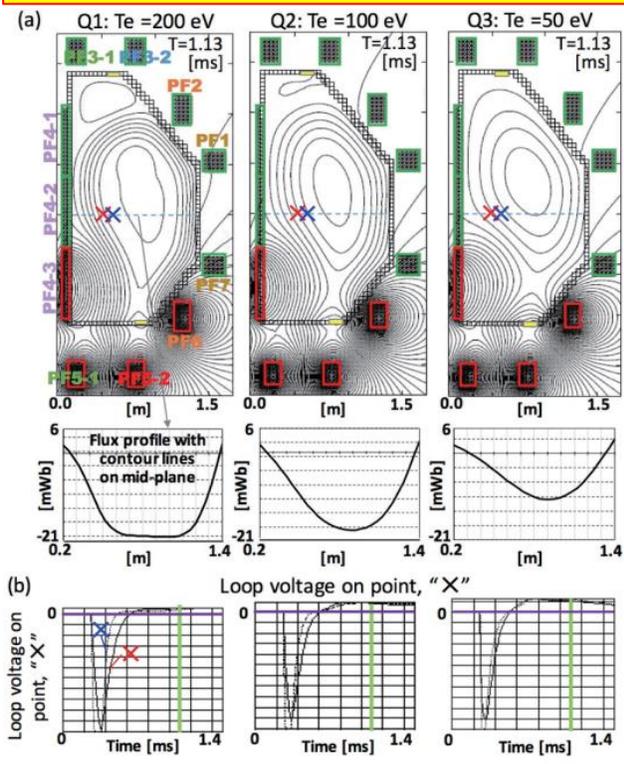
QUEST shot #35976



QUEST型電極でもCFSの形成は可能



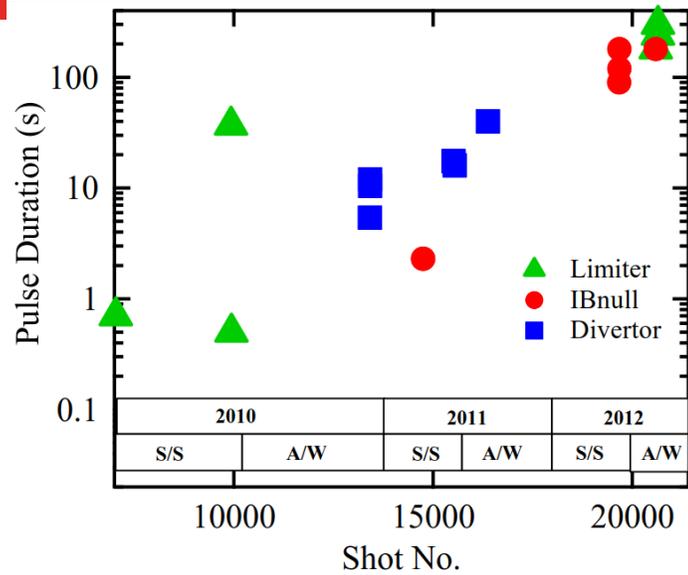
電子温度が低い方が磁気再結合が起こりやすい。



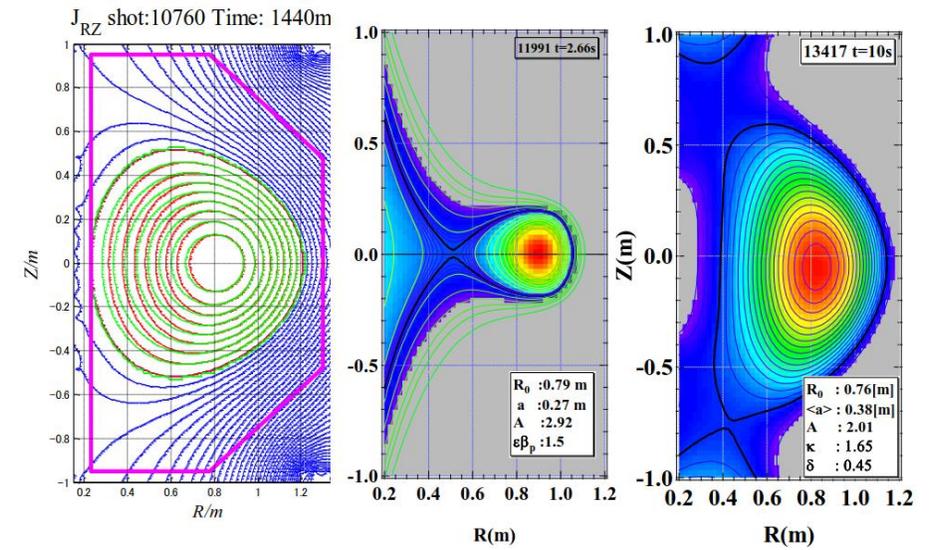
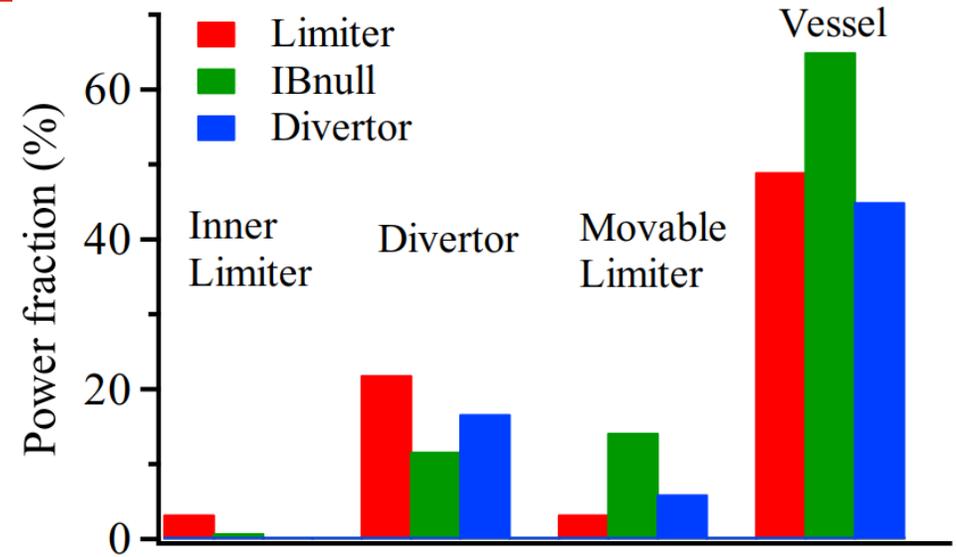
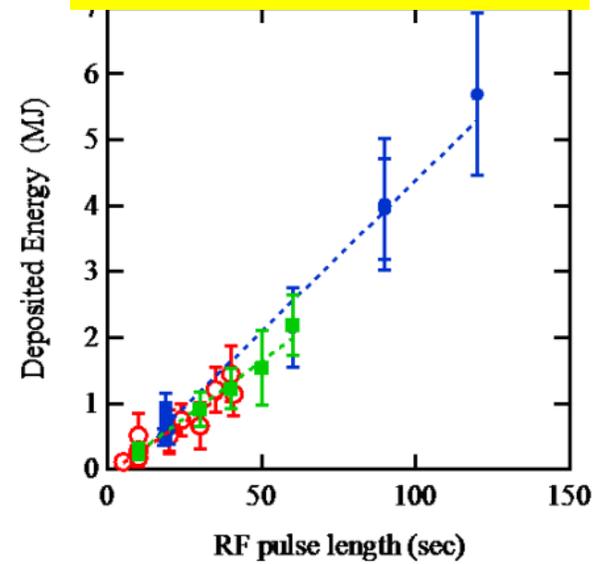
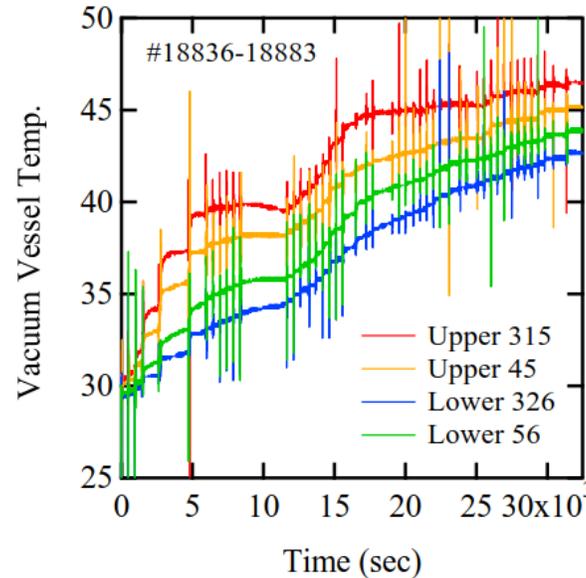
K.Kuroda et al. Plasma and Fusion Research: Rapid Communications Volume 12, 1202020 (2017)

K.Kurodo et al. Plasma and Fusion Research: Volume 13, 3402059 (2018)

パワーバランスに関する研究



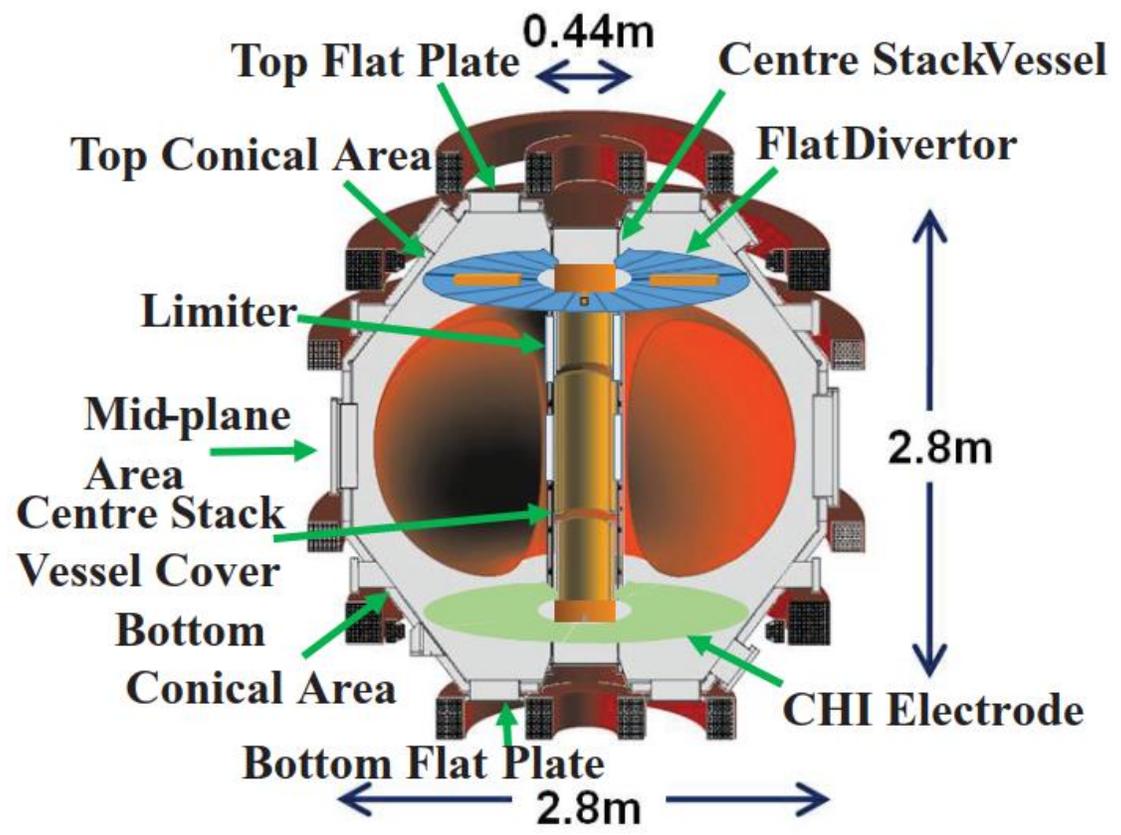
~50% of Pin



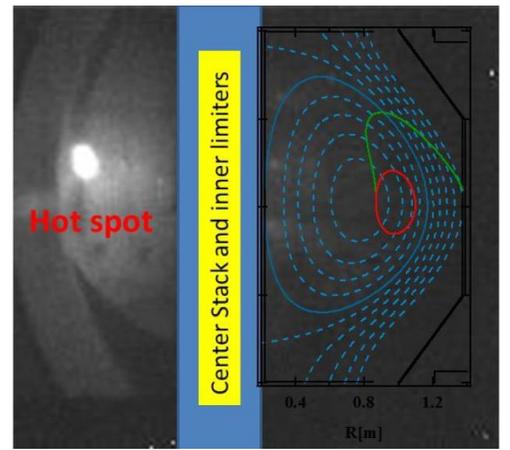
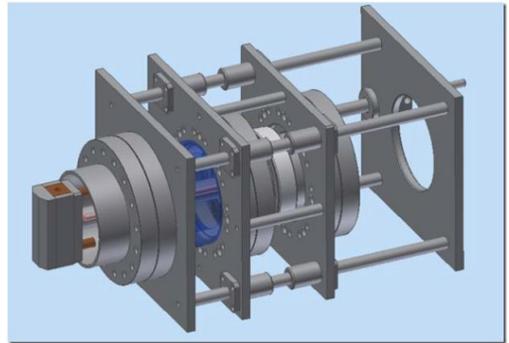
K. Hanada et al 2016 Plasma Sci. Technol. 18 1069



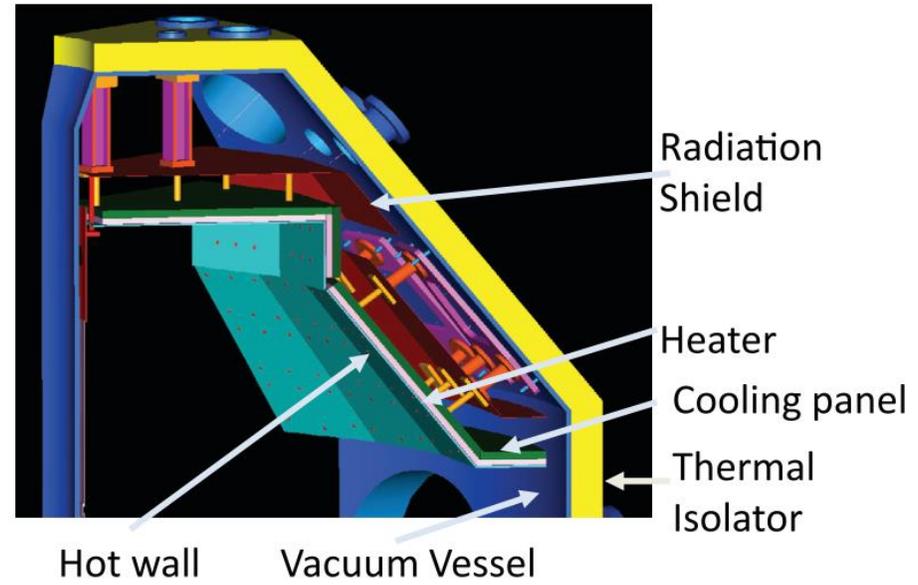
水冷リミタと高温壁の導入(2014A/W: operated since 2015)



水冷リミタ for power balance

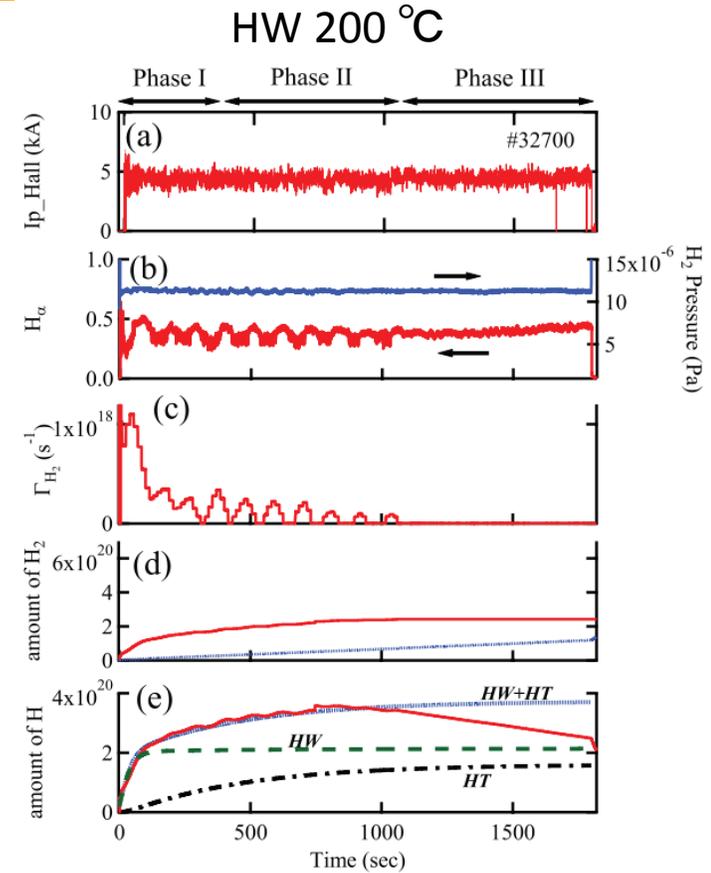
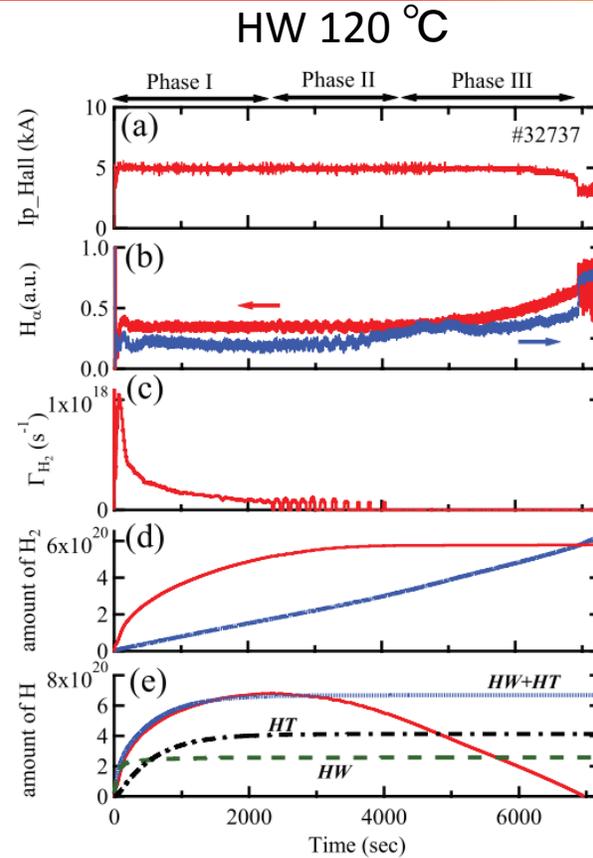
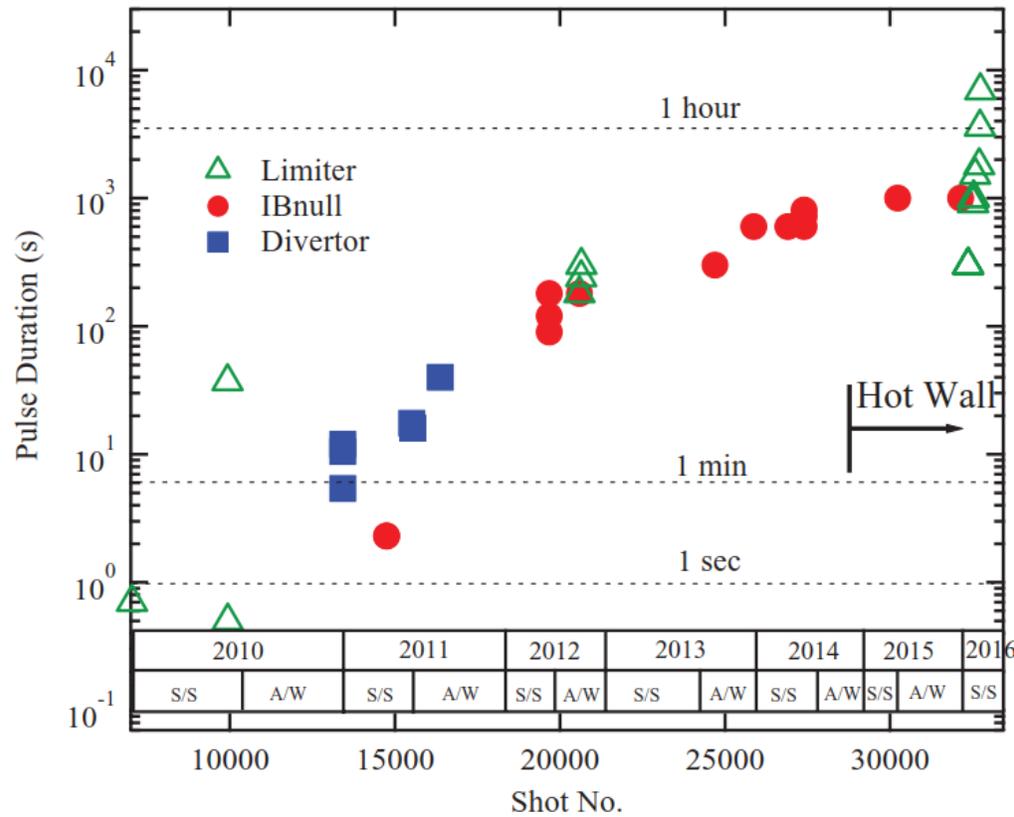


高温壁 for particle balance



K. Hanada et al Nucl. Fusion 57 (2017) 126061
 Y. Takase et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 102005

長時間放電の進展



$$\frac{d(H_W + H_T)}{dt} = \Gamma_{\text{imp}} S - \frac{k}{S d_R^2} H_W^2$$

$$\frac{dH_T}{dt} = \alpha H_W \left(1 - \frac{H_T}{H_T^0} \right) - \gamma H_T$$

水素バリアモデル

K. Hanada et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 126061

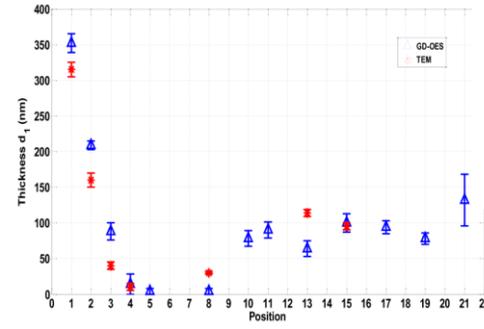
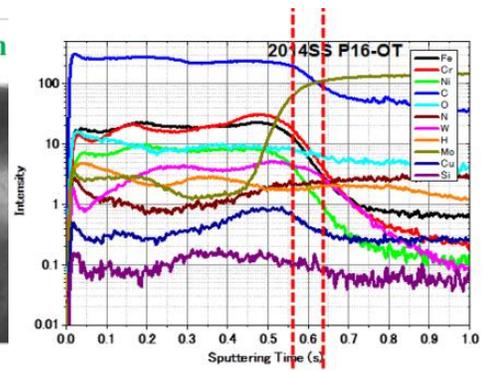
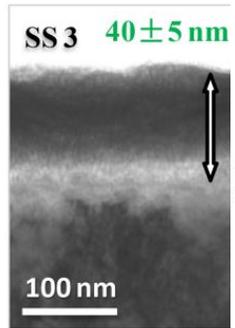
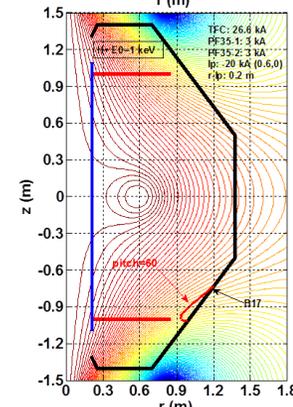
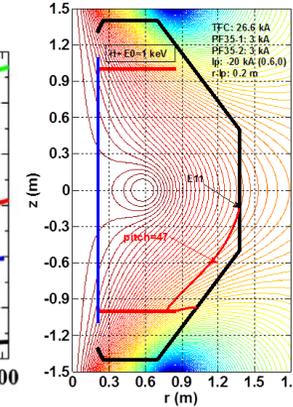
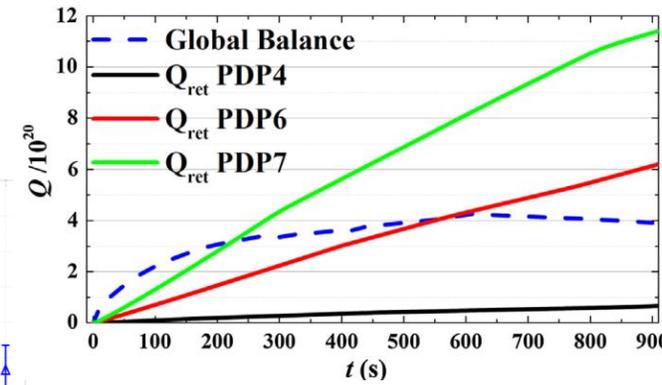
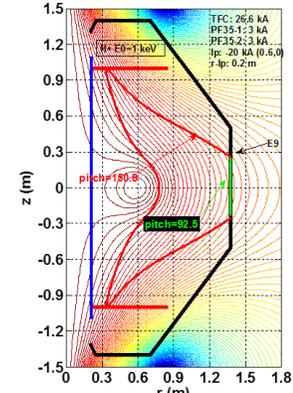
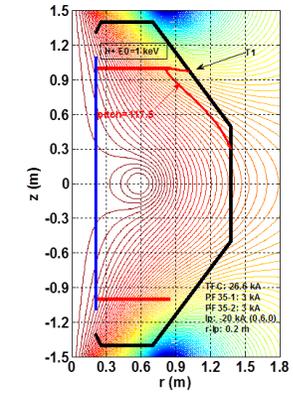
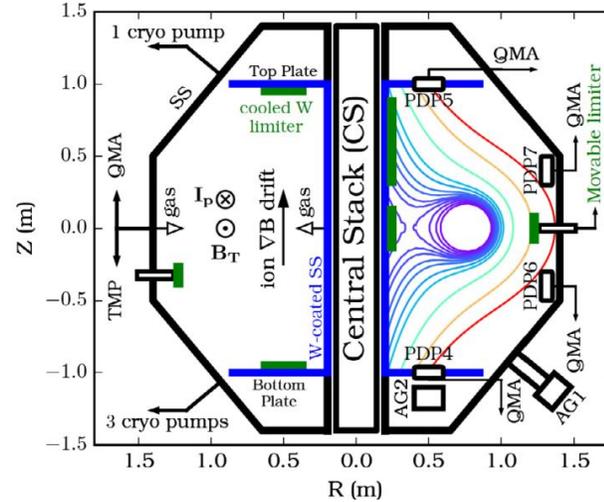
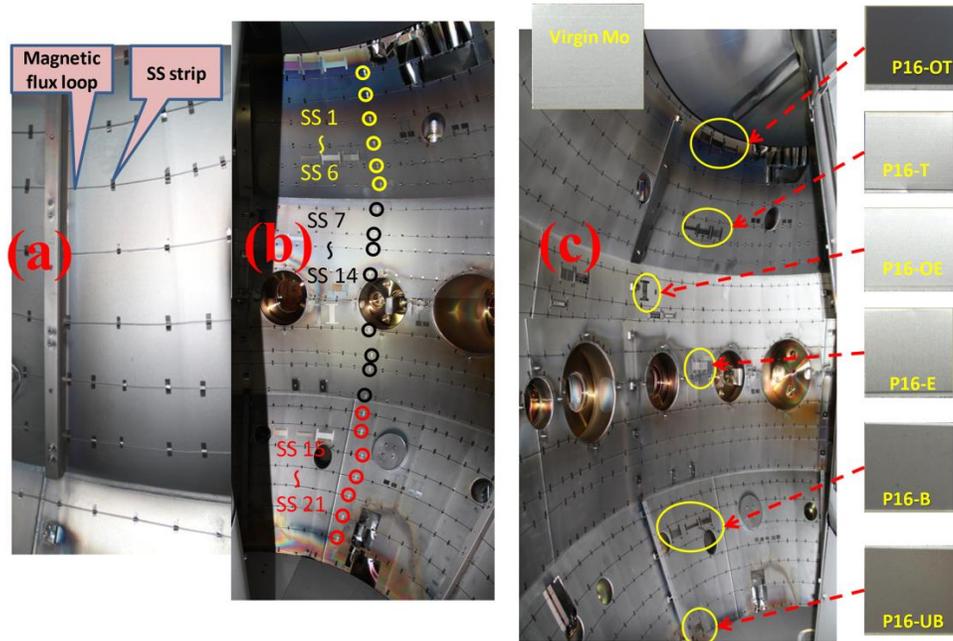
Y. Takase et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 102005



壁面の微視的観測と再堆積層の形成

再堆積層の膜厚は上下非対称で数十nm

弱磁場側で原子束は上下非対称

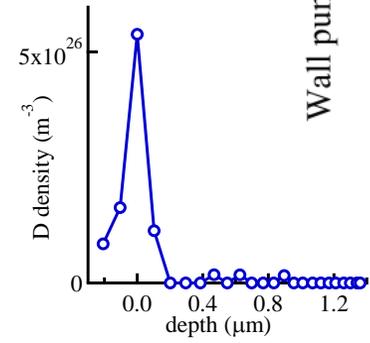
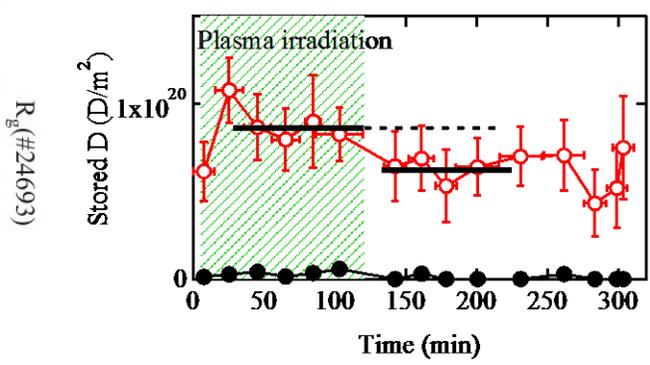
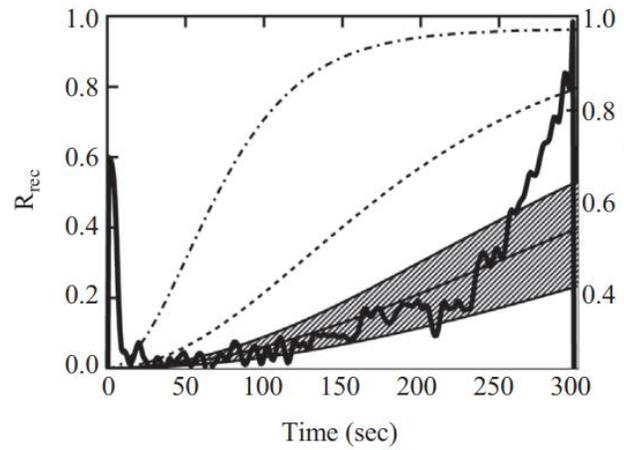
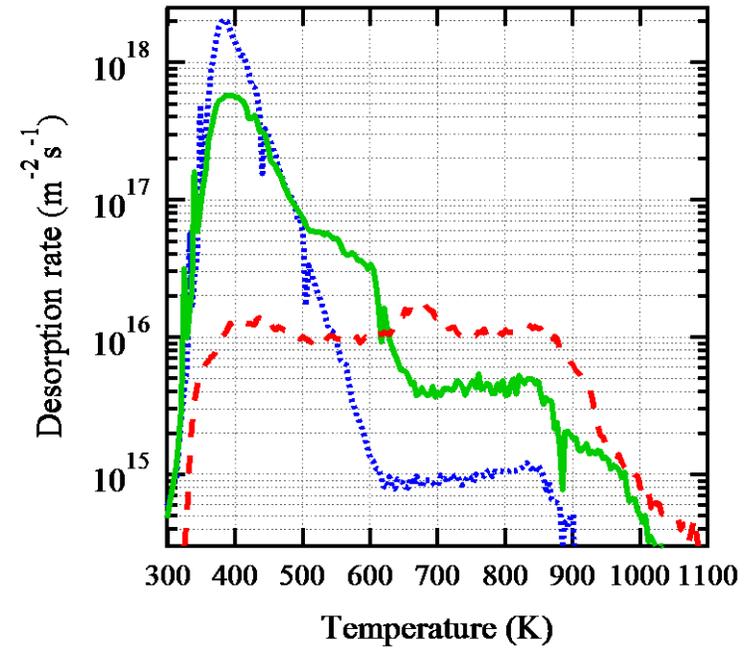
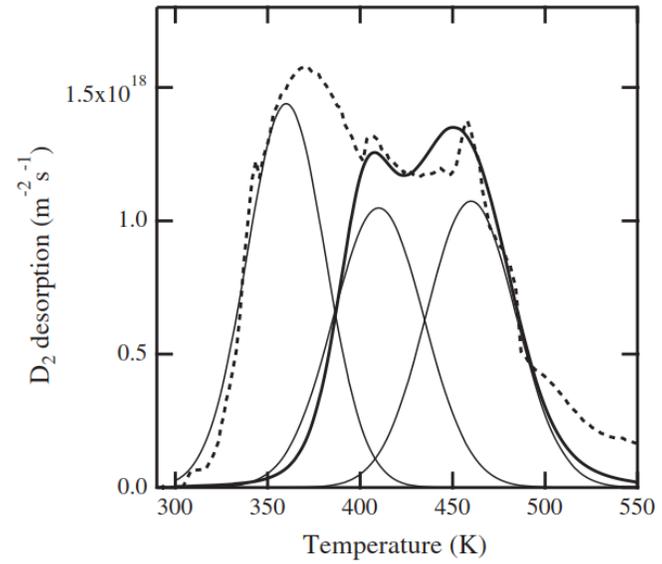


A. Kuzmin et al. / Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 1087–1090
Z.Wang Dr. thesis (2017)

Wang et al. Rev. Sci. Instrum. 88, 093502 (2017)

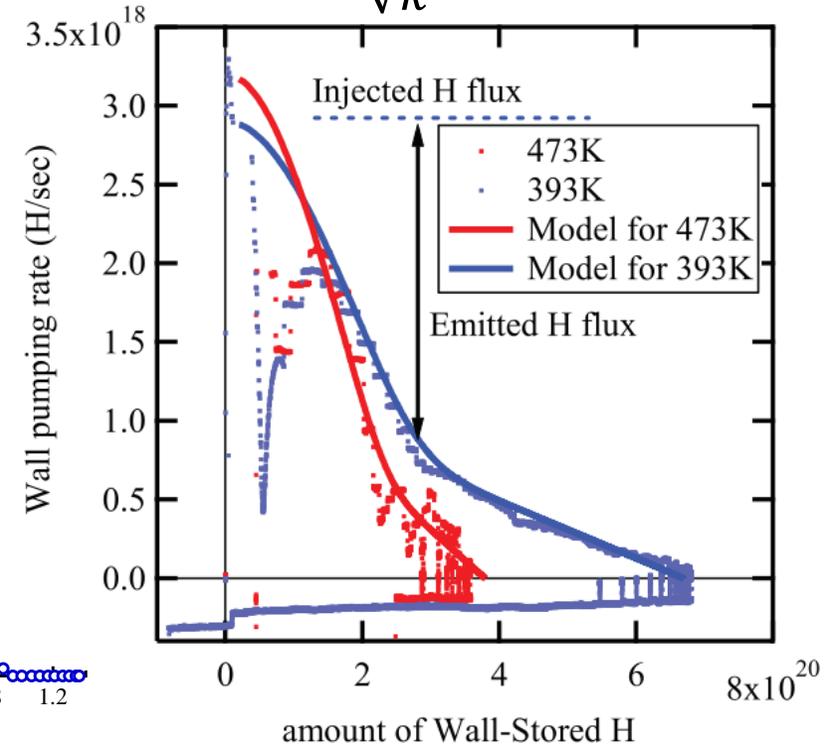
微視的観測と粒子バランスをつなぐ研究

再堆積層の役割を解明



水素バリアモデルの提唱と新たな時定数の発見

$$N_w(t) = \frac{\sqrt{\Gamma_{in}}}{\sqrt{k}} \tanh \sqrt{\Gamma_{in} k t}$$

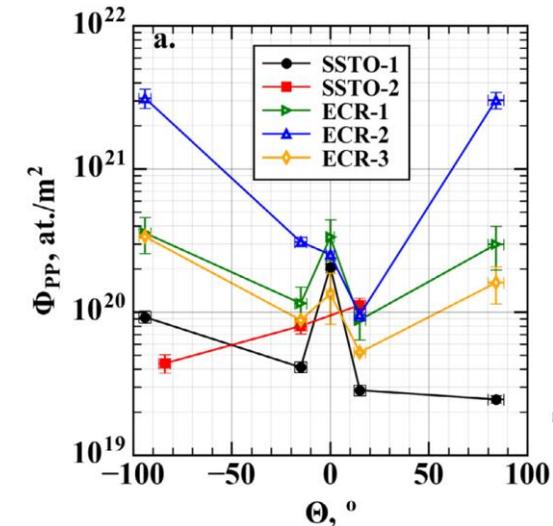
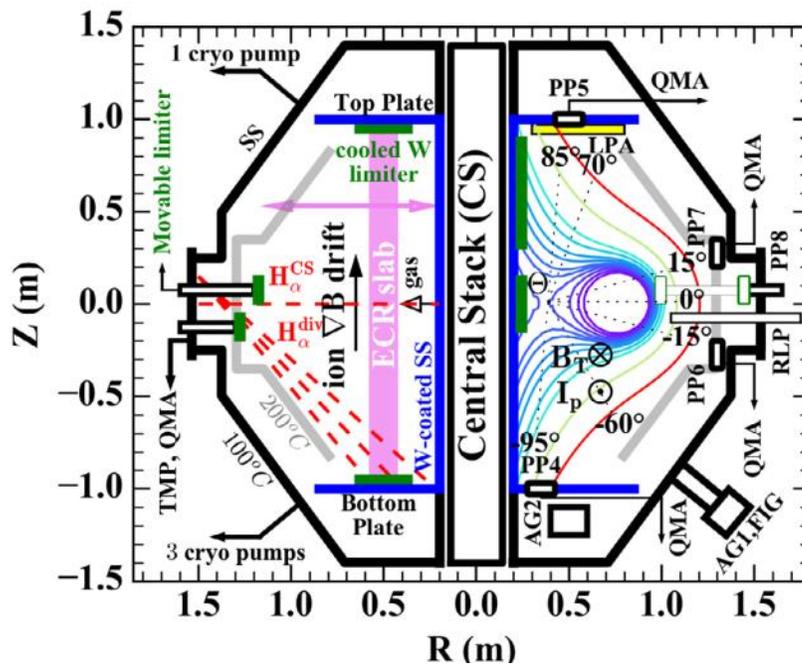
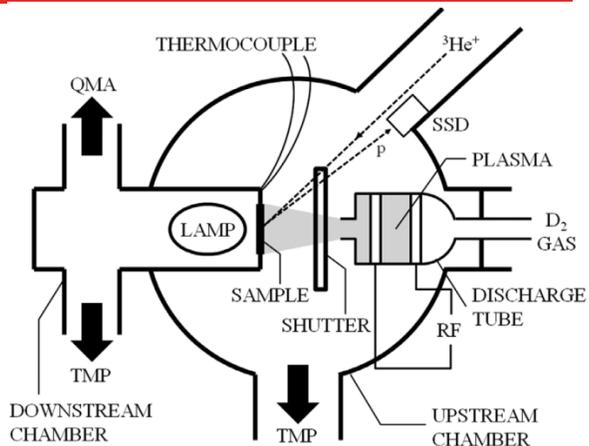
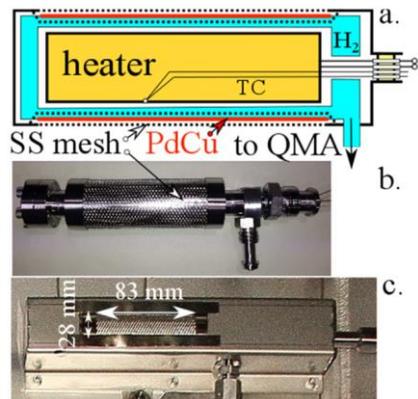


K. Hanada et al. / Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 1084–1086

K. Hanada et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 126061

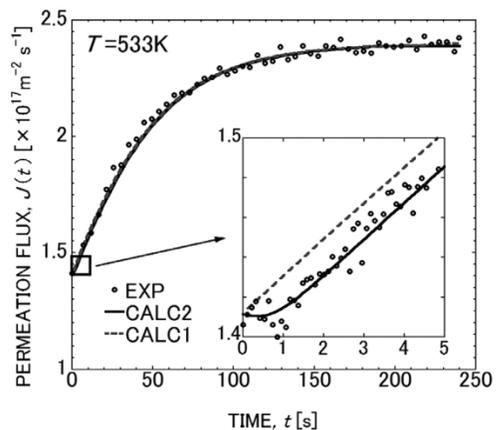
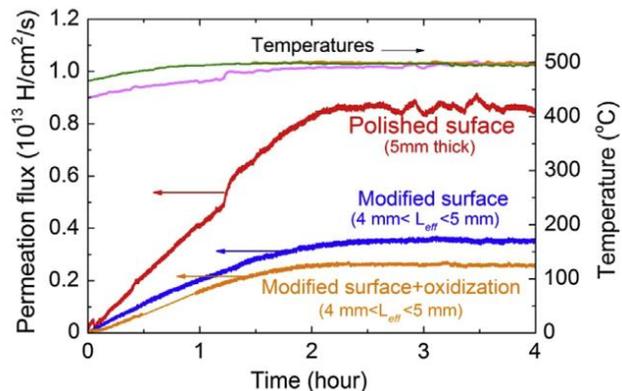


計測技術(原子束計測)の進展



Parameters of the discharges.

Name	T ^{HW} , °C	P _{RF} , kW	f _{RF} , GHz	I _p , kA	n _e ·l, m ⁻²	R _{res} , m	τ _d , s	shots
SSTO-1	200	30	8.2	8–10	<10 ¹⁷	0.286	< 1000	30,169–30,172
SSTO-2	–	50	8.2	16.6	1.2 × 10 ¹⁷	0.286	< 900	27,394–27,396
ECR-1	200	30	8.2	–	3 × 10 ¹⁷	0.382	300	30,160–30,165
ECR-2	200	1&11	2.45&8.2	–	<10 ¹⁷	0.365 – 1.100	900	32,244–32,250
ECR-3	200	25	8.2	–	<10 ¹⁷	0.327	200	30,959–30,967



H. Zhou et al. / Journal of Nuclear Materials 463 (2015) 1066–1070

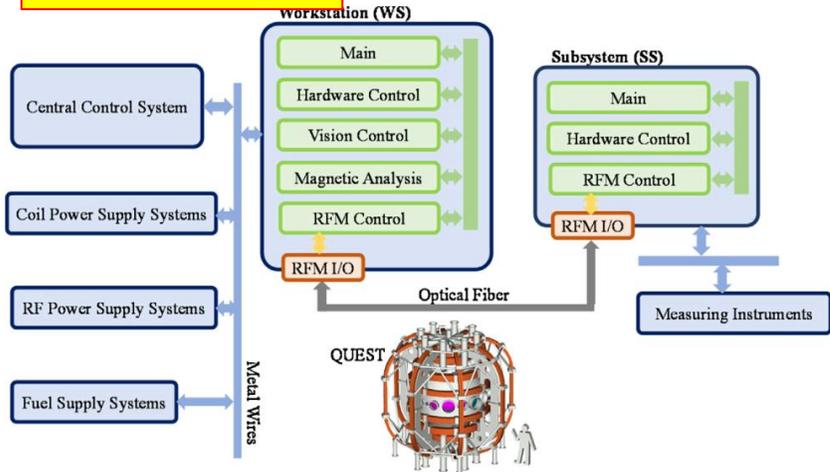
M. Onaka et al. / Nuclear Materials and Energy 9 (2016) 104–108

A. Kuzmin et al. / Nuclear Materials and Energy 12 (2017) 627–632

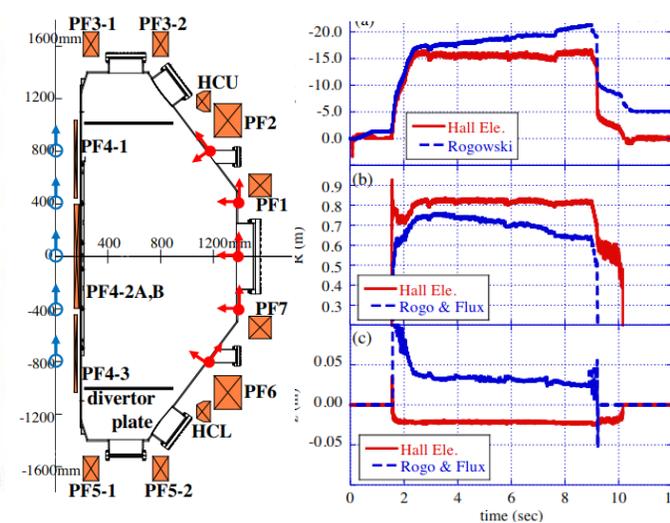
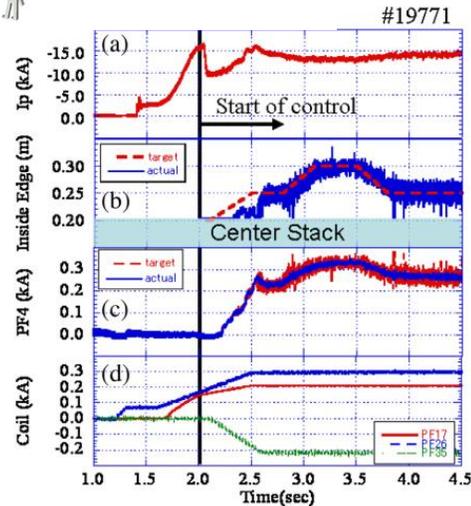
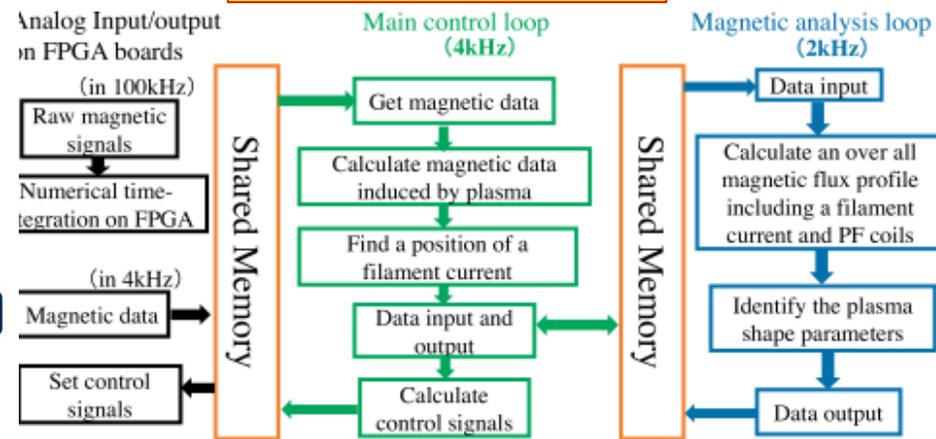
A. Kuzmin et al. Vacuum 129 (2016) 178

長時間運転の制御技術の進展

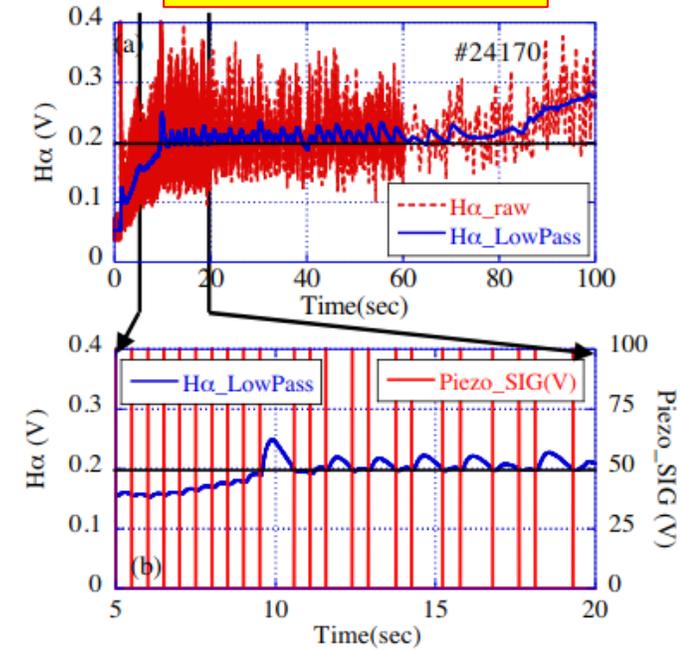
Total control



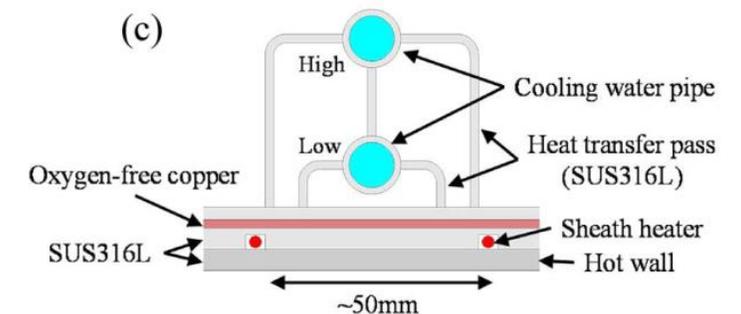
Magnetics control



Fueling control



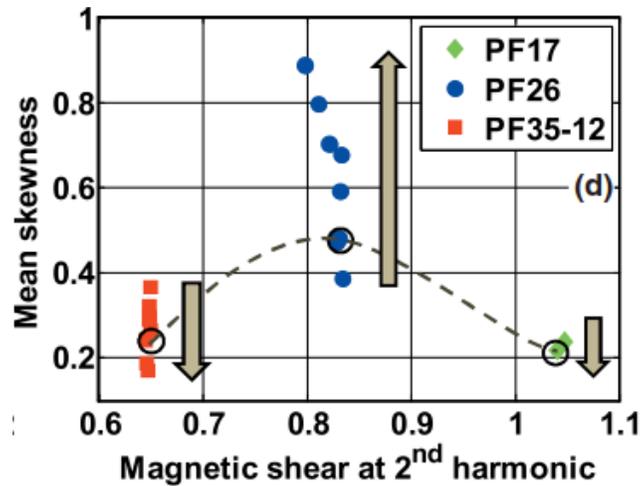
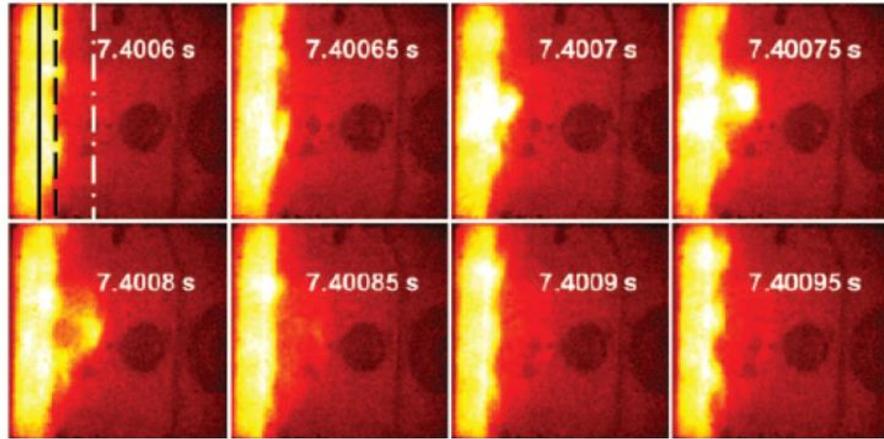
Wall Temp. control



- M. Hasegawa et al. Fusion Engineering and Design 88 (2013) 1074–1077
- M. Hasegawa et al. Fusion Engineering and Design 96–97 (2015) 629–632
- M. Hasegawa et al. Fusion Engineering and Design 112 (2016) 699–702
- M. Hasegawa et al. Fusion Engineering and Design 129 (2018) 202–206

Blob発生機構と制御

Slab plasma

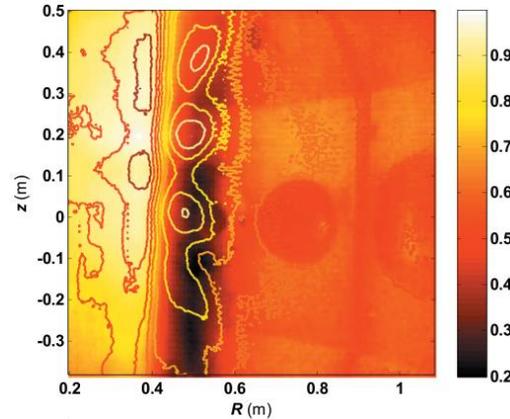
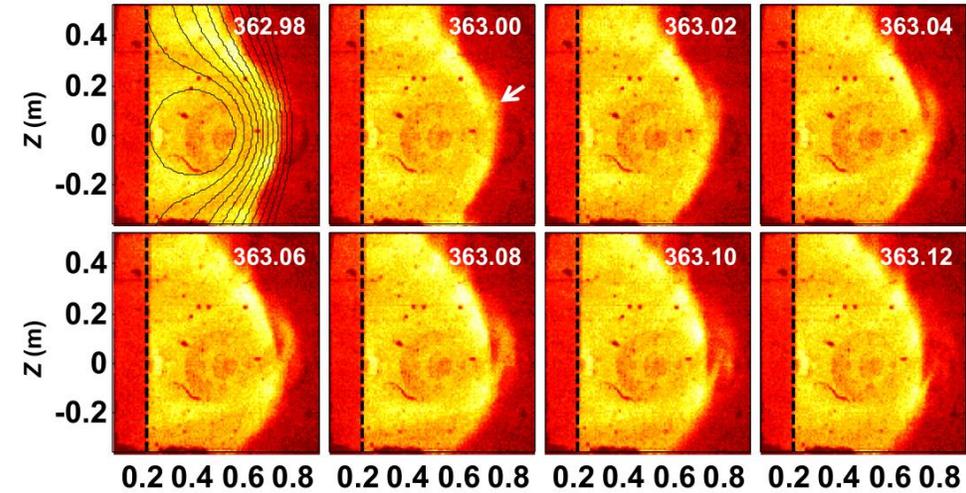


Blobの尖頭度は磁場で調整が可能

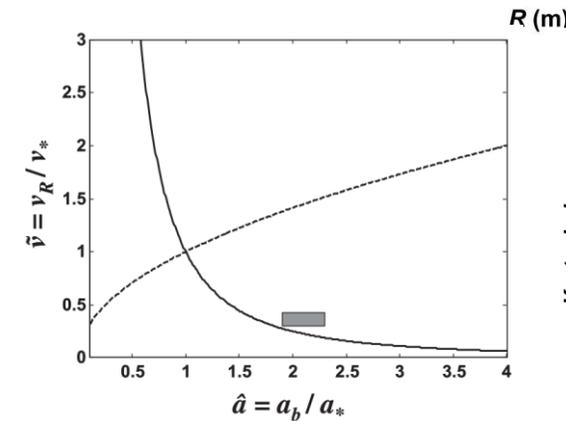


Banerjee et al. Rev. Sci. Instrum. 83, 10E524 (2012)

OH plasma

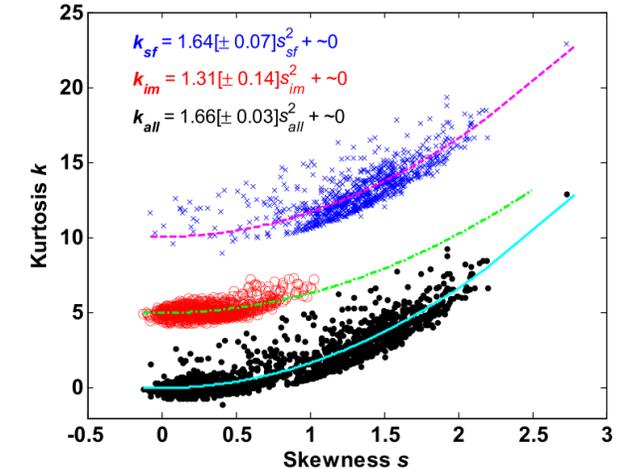


Blobの発生領域と伝搬領域では相関が悪い



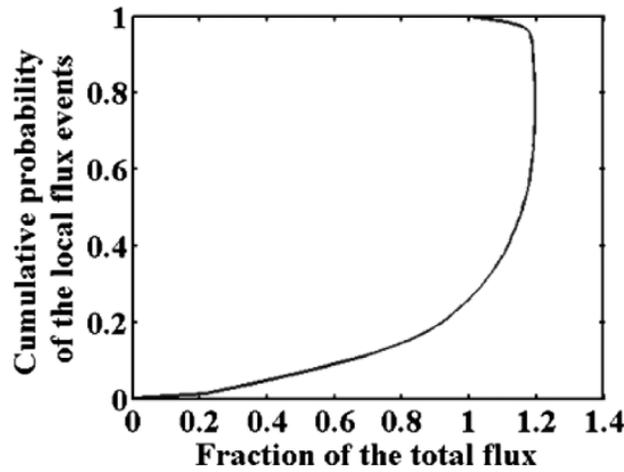
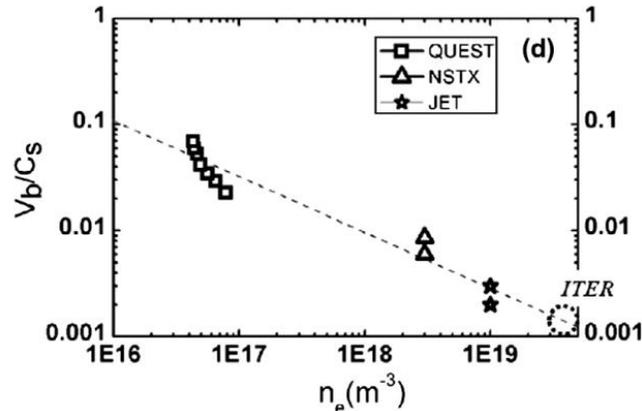
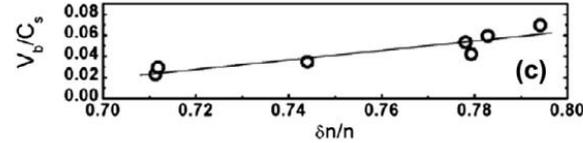
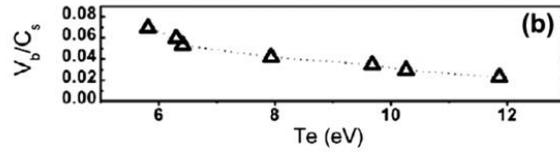
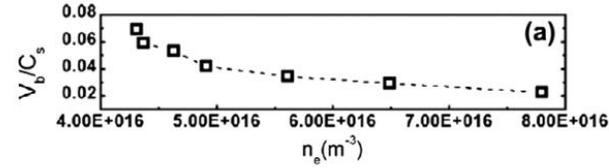
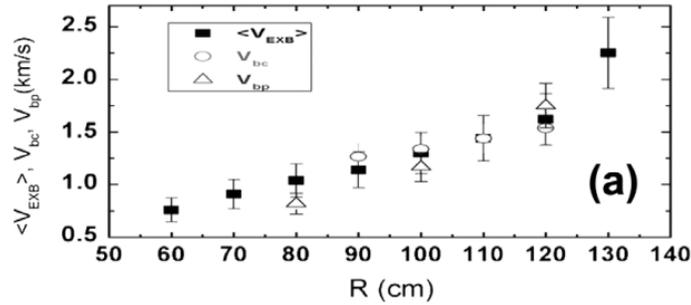
QUESTのBlobはSheath connected limit 領域近傍で発生

Banerjee et al. Phys. Plasmas 21, 072311 (2014)



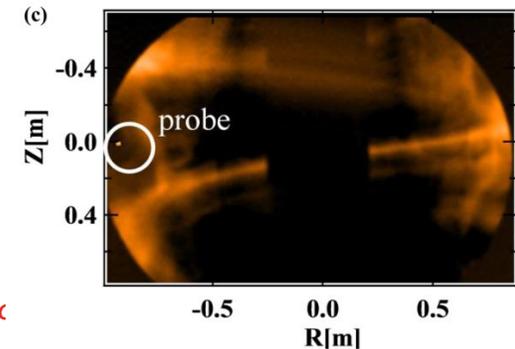
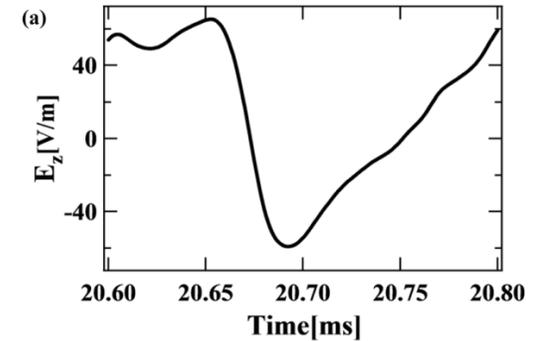
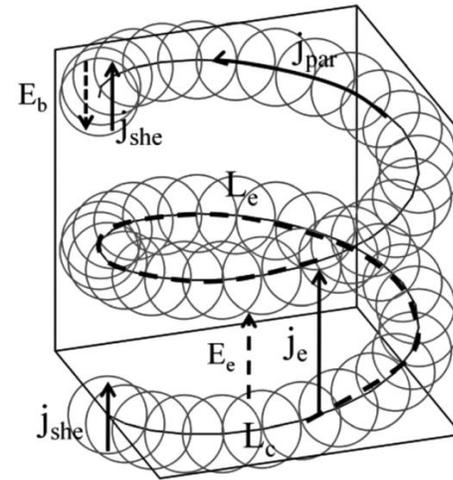
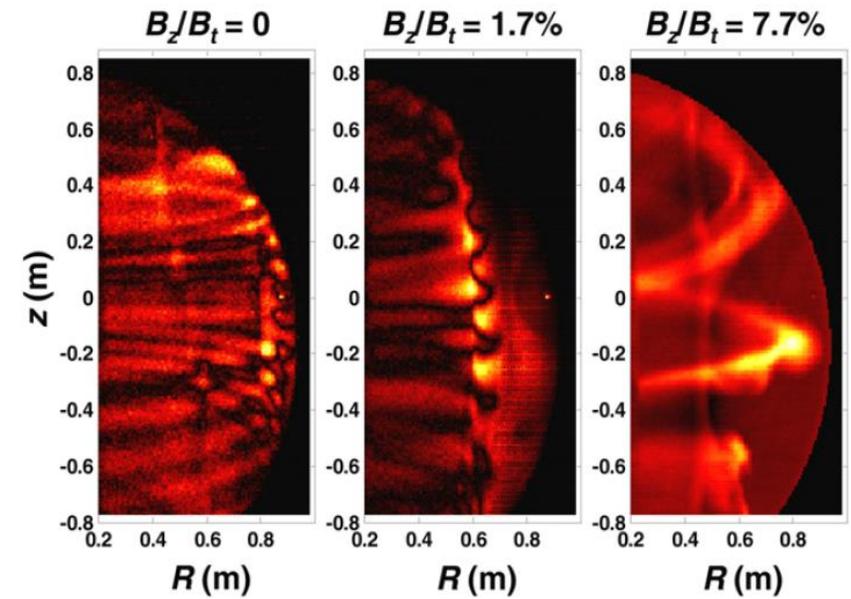
QUESTのBlobはStochastic forceで駆動。

Blobによる粒子輸送



発生頻度の少ない大振幅のBlob(10%)が60%以上の粒子輸送を担っている。

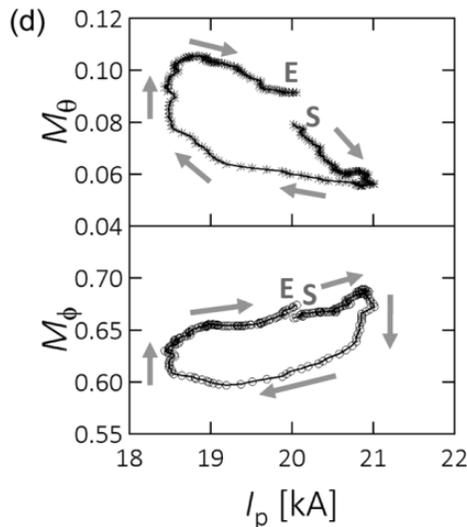
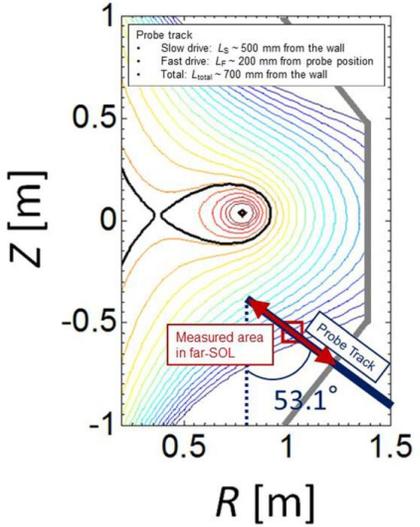
ITERでのBlob (V_b)による粒子輸送は、磁力線方向 (C_s) が優位となる。



Advanced Fusio

SOL流制御につながる研究

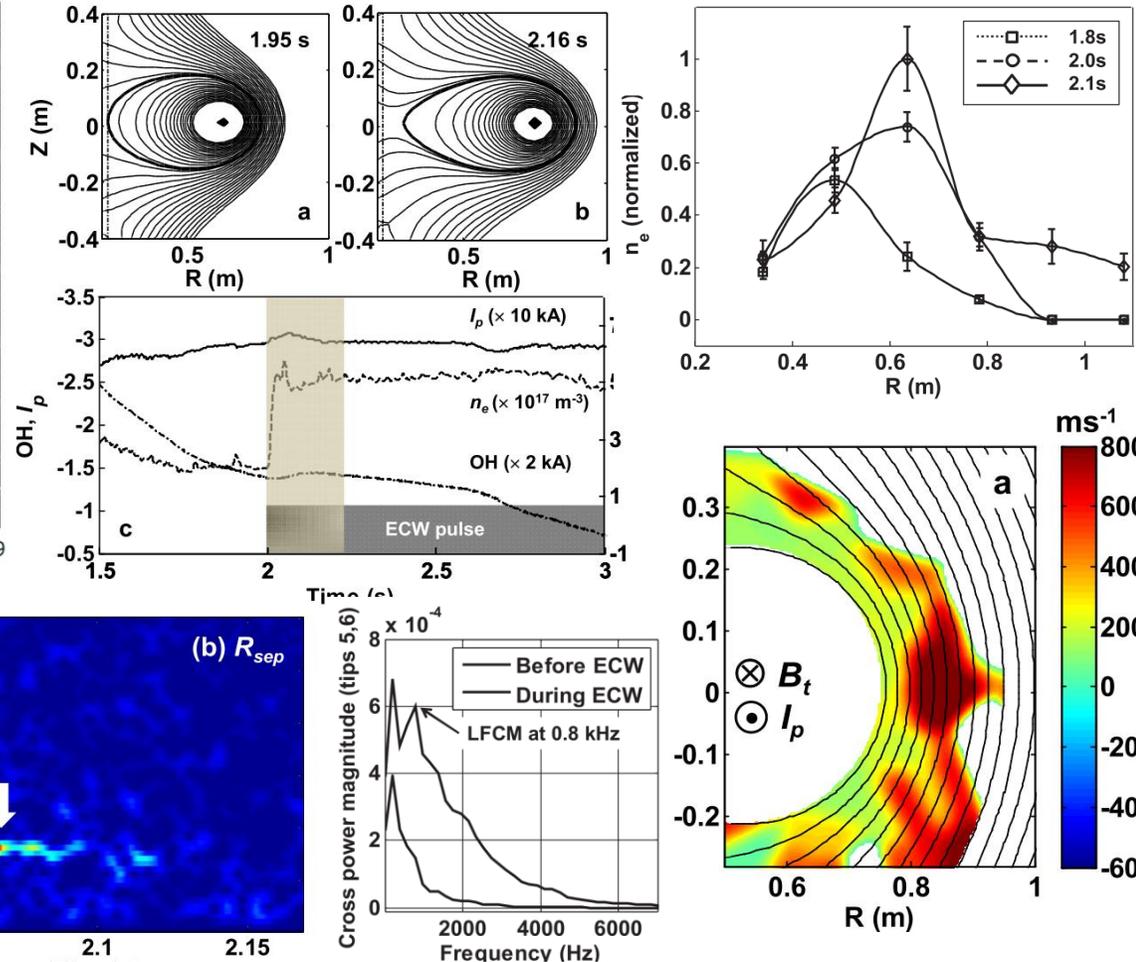
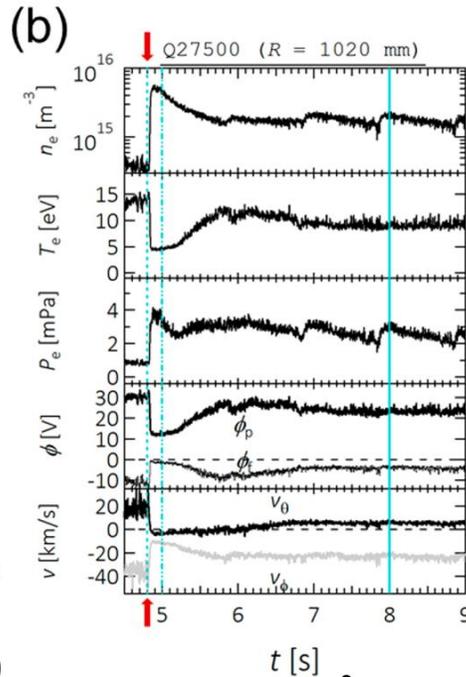
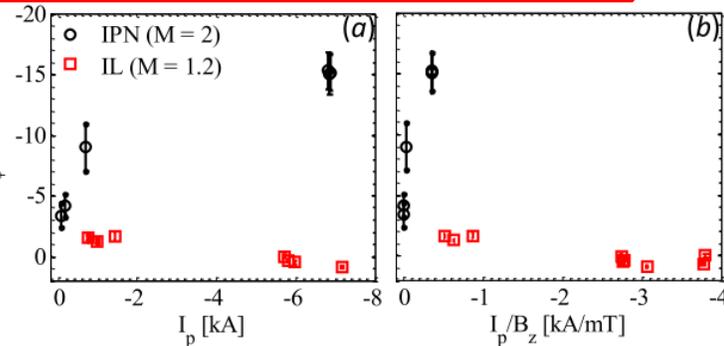
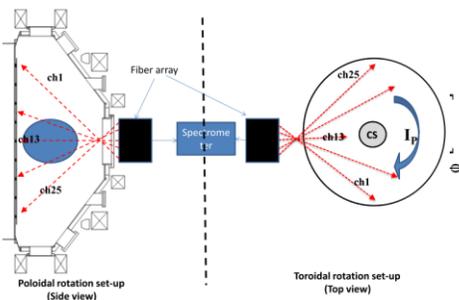
RFプラズマでのプラズマ電流, ガスパフとプラズマSOL流



Onchi et al. Phys. Plasmas 22, 082513 (2015)

Onchi et al. Plasma Phys. Control. Fusion 58 (2016) 115004

磁場配位によるコアプラズマ回転の違い



Banerjee et al. Phys. Plasmas 23, 082507 (2016)

Mishra et al. EPJ Web of Conferences 87 02012 (2015)

Advanced Fusion Research Center

これまでの研究の達成度とまとめ

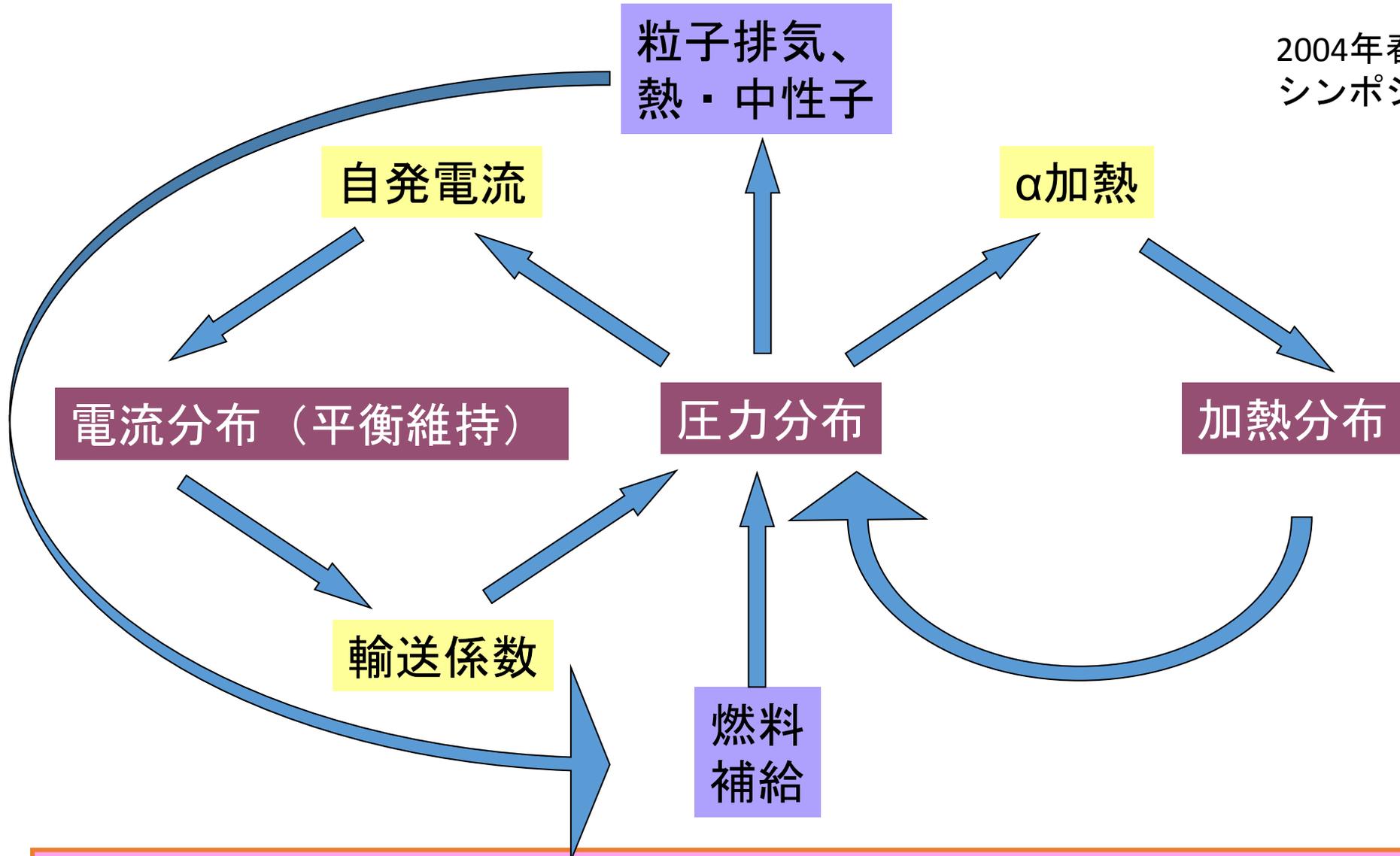
課題	目標値	達成度	展望	適用
プラズマ生成	RFのみによるプラズマ生成	80%	第二高調波によるプラズマ生成	ITER JT-60SA
プラズマ電流立ち上げ	100kA	86%	最適化 (N//、偏波)	OHなしST
高密度化	$4 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$	125%	コアプラズマでの粒子輸送	NBI入射への接続
長時間化	5時間16分	40%	統合制御	将来の炉の条件での長時間化
学術的課題	目標	達成度	展望	適用
EBWH/CD	モード変換の理解と制御	10%	28GHz ECCD, OH, CHIとの組み合わせ	モード変換の物理
時定数	定常化を決める時定数	50%	固体物理とプラズマ物理の連携	水素の振る舞いの理解
SOL流制御、ダイバータ	中性粒子圧縮	10%	制御パラメータの発見	プラズマ流れ、回転制御



10年間ありがとうございました。
今後もよろしくお願いいたします。

定常自立の解は存在するのか？

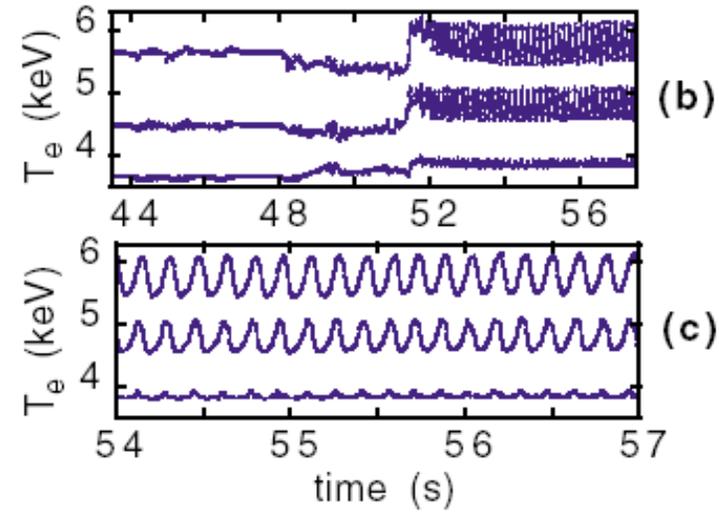
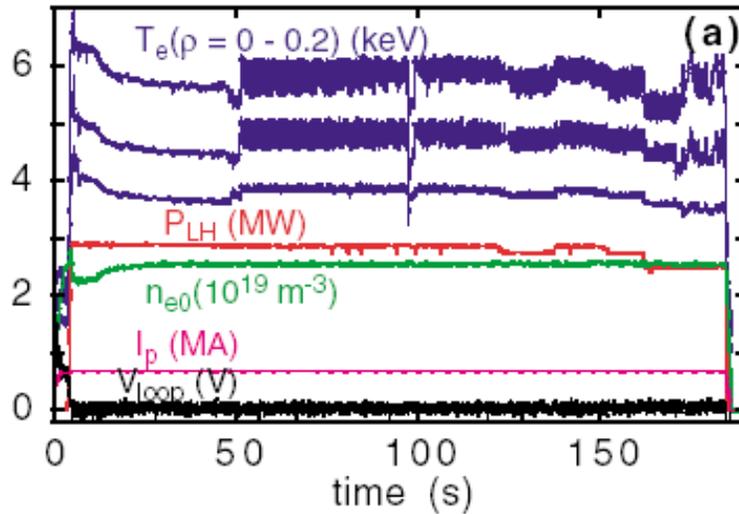
2004年春物理学会
シンポジウム



自律性の性質と外界との相互作用を調べる必要がある。

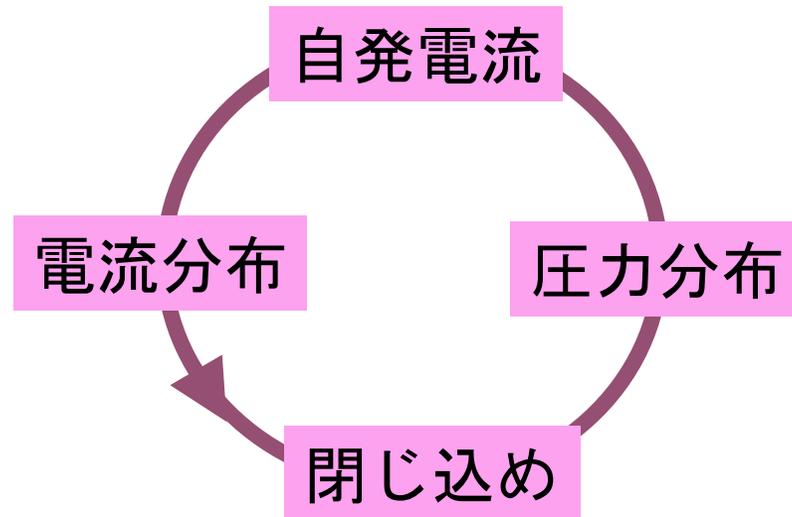
自律ループの定常性 1 (TS)

2004年春物理学会
シンポジウム



Predator-Prey System

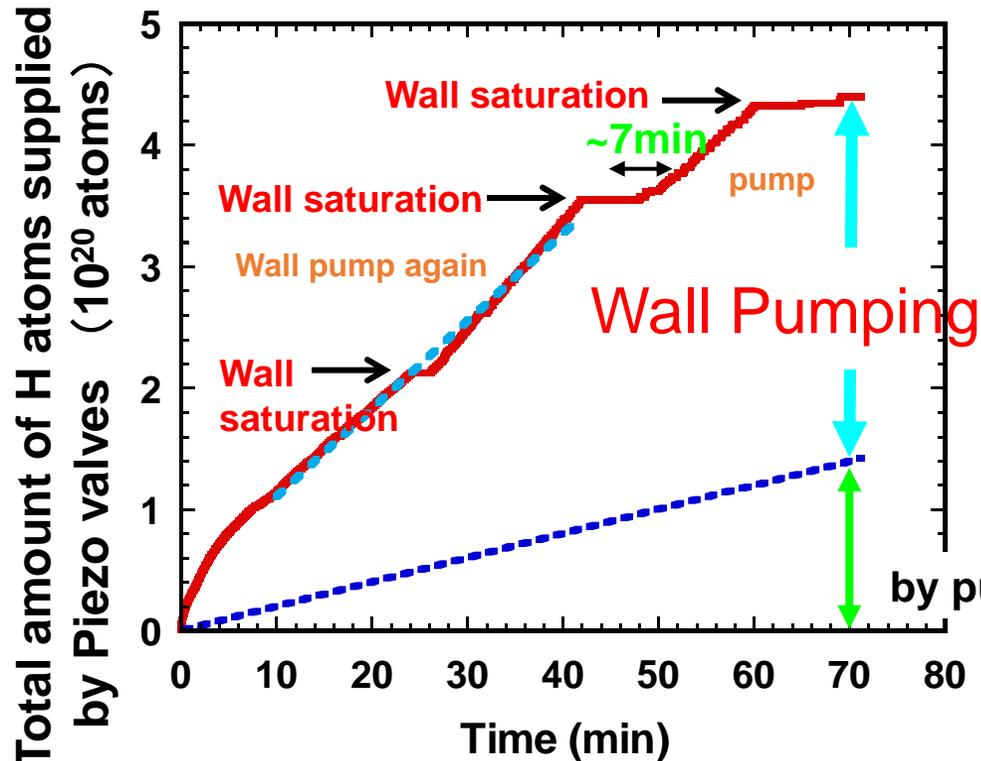
$$\frac{dT_e}{dt} = \nu_T T_e (1 - \alpha j) \quad \frac{dj}{dt} = -\nu_j j (1 - \beta T_e)$$



自律ループの定常性 2

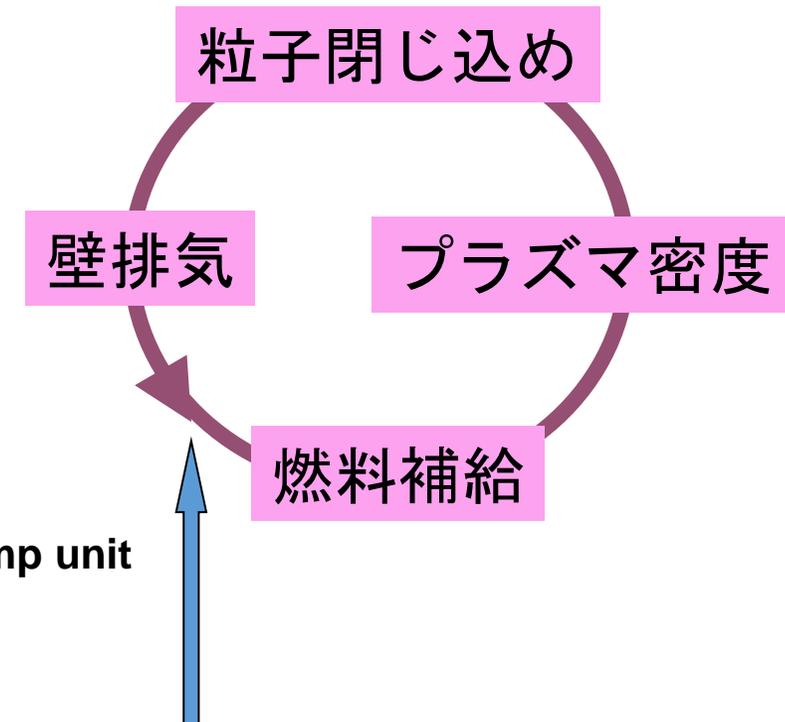
壁排気の非線形振動 (TRIAM-1M)

2004年春物理学会
シンポジウム



Wall pumping rate

$$\sim 1.5 \times 10^{16} \text{ atoms m}^{-2}\text{sec}^{-1}$$



再度燃料補給が再開できた
理由は共堆積

粒子バランスを支配するリサイクル粒子

リサイクル率 0

リサイクル率 1.01

中性粒子圧力に依存
表面吸着数が圧力に比例

$$\begin{cases} \frac{dn_n}{dt} = \nu_{fuel} (1 - \alpha_{CX} n_n n_i) \\ \frac{dn_i}{dt} = -\frac{1}{\tau_p} n_i (1 - \beta_{ion} n_n) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dn_n}{dt} = \nu_{fuel} \left(\frac{R_e}{\tau_p} n_i - \alpha_{CX} n_n n_i \right) \\ \frac{dn_i}{dt} = -\frac{1}{\tau_p} n_i (1 - \beta_{ion} n_n) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dn_n}{dt} = \nu_{fuel} n_n (1 - \alpha_{CX} n_i) \\ \frac{dn_i}{dt} = -\frac{1}{\tau_p} n_i (1 - \beta_{ion} n_n) \end{cases}$$

