

Confinement Improvement in RFP using PPCD

PPCDによる逆磁場ピンチ(RFP)の 閉じ込め向上実験

- 電流分布制御により閉じ込め向上を実現 —
- 手法 : Pulsed Poloidal Current Drive (PPCD) —

産業技術総合研究所 : 八木康之、小口治久、平野洋一、島田寿男、榊田創、関根重幸

U. Wisconsin : B. E. Chapman, J.S. Sarff

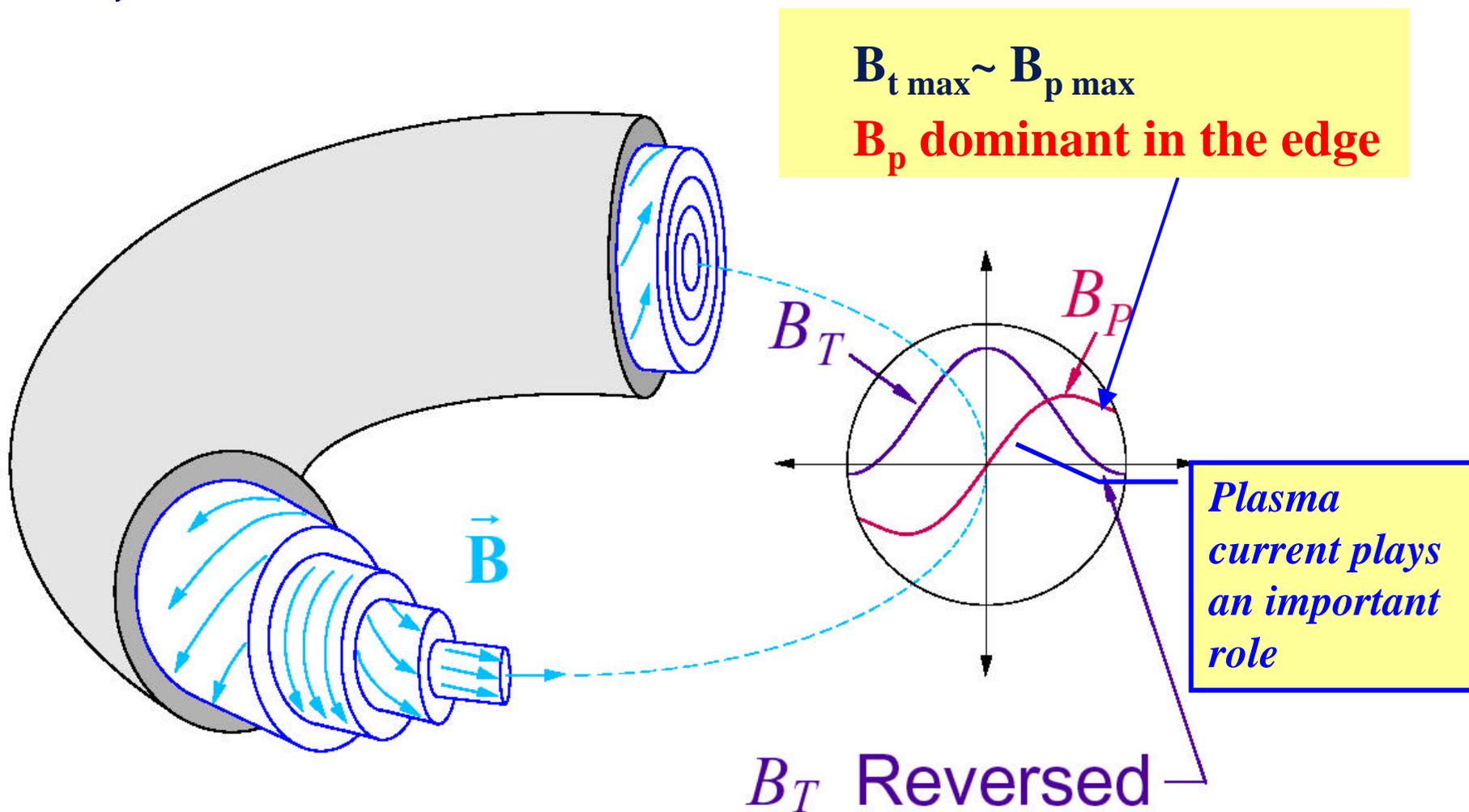
UCLA : D. L. Brower

内容

1. 標準RFPとPPCDの基本原理
2. PPCDの運転方法
3. TPE-RX (AIST)におけるPPCD実験
4. MST (U. Wisc.) におけるPPCD実験 (電流密度計測)
5. PPCD実験データベースが示す2つの傾向
6. まとめ

RFPは弱いトロイダル磁場と強い磁気シアーが特徴

By courtesy of J S. Sarff, MST

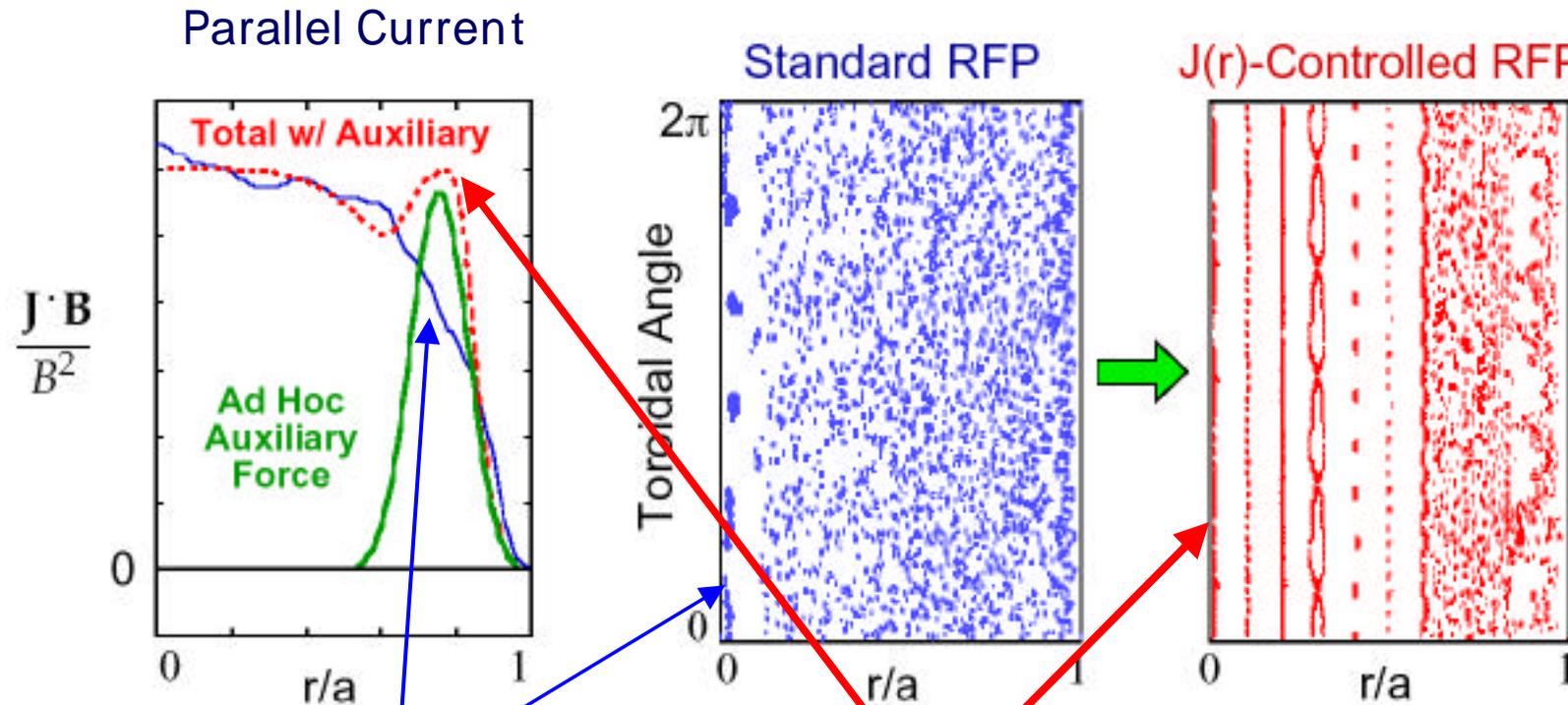


電流分布制御で磁力線のstochasticity減少

RFPにおける電流分布制御効果

By courtesy of J.S. Sarff, C. R. Sovinec, et al., MST

Poincare Plots of Magnetic Field Lines

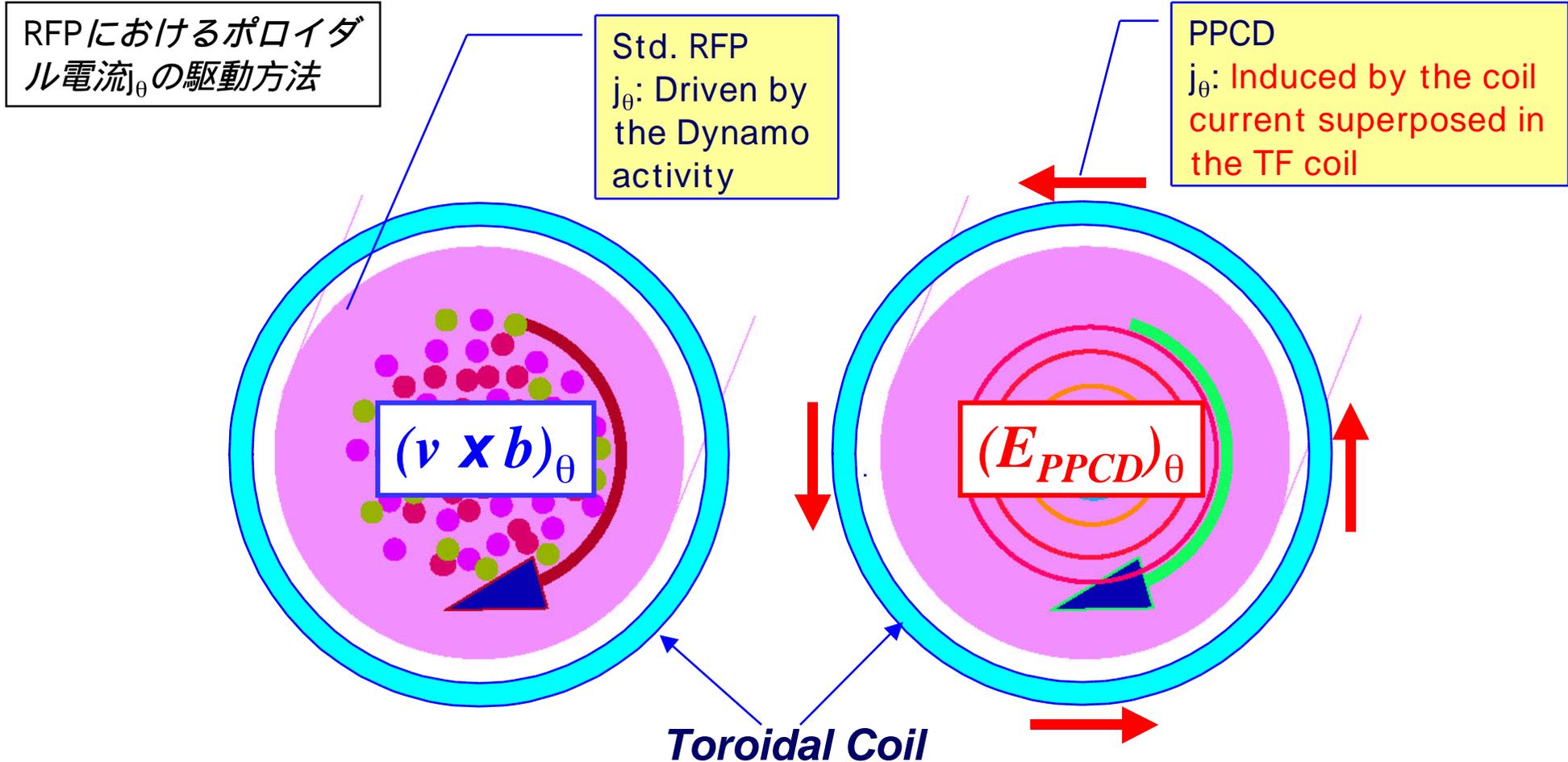


Standard RFP
(Tearing Insta. dominates)

Current Control (\Rightarrow PPCD)

Stochasticity Reduces

PPCD運転はトロイダル磁場を過渡的に深くする

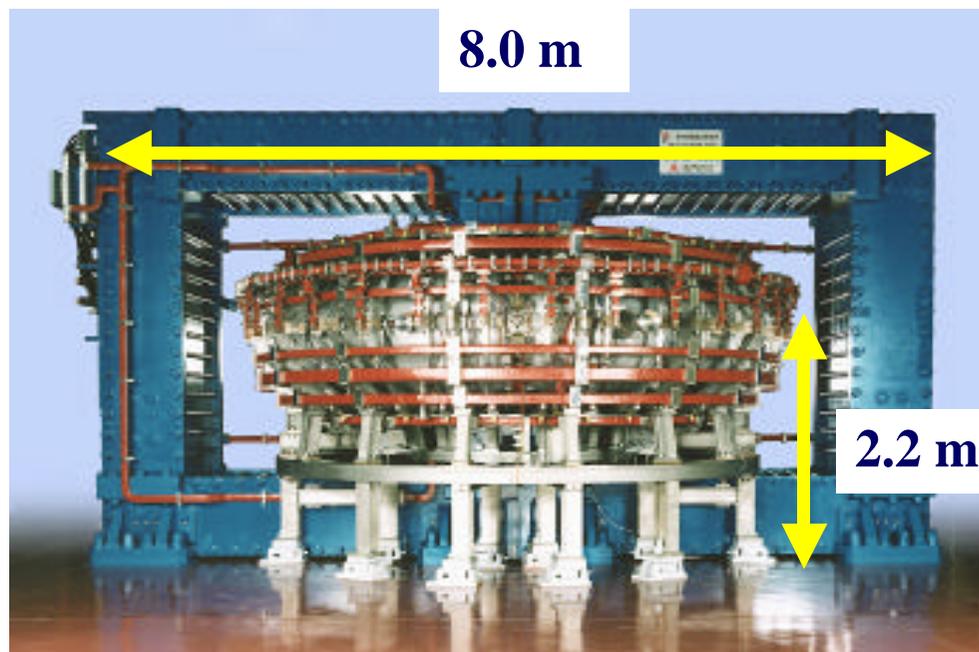


PPCD => First Experiment in MST (U. Wisc.)

産総研 TPE-RX装置：中型、1MA

TPE-RX

TPE-RX



世界三大RFPの一つ
 1998年よりRFP 実験開始
 GOAL:RFP閉じ込めの理解
 と向上

$$R/a = 1.72/0.45 \text{ m}$$

$$I_p = 0.5 \text{ MA (設計 :1MA)}$$

$$\tau_d = 0.1 \text{ s}$$

標準RFPの閉じ込め性能

$$T_{e0} < 0.7 \text{ keV}$$

$$T_i < 0.5 \text{ keV}$$

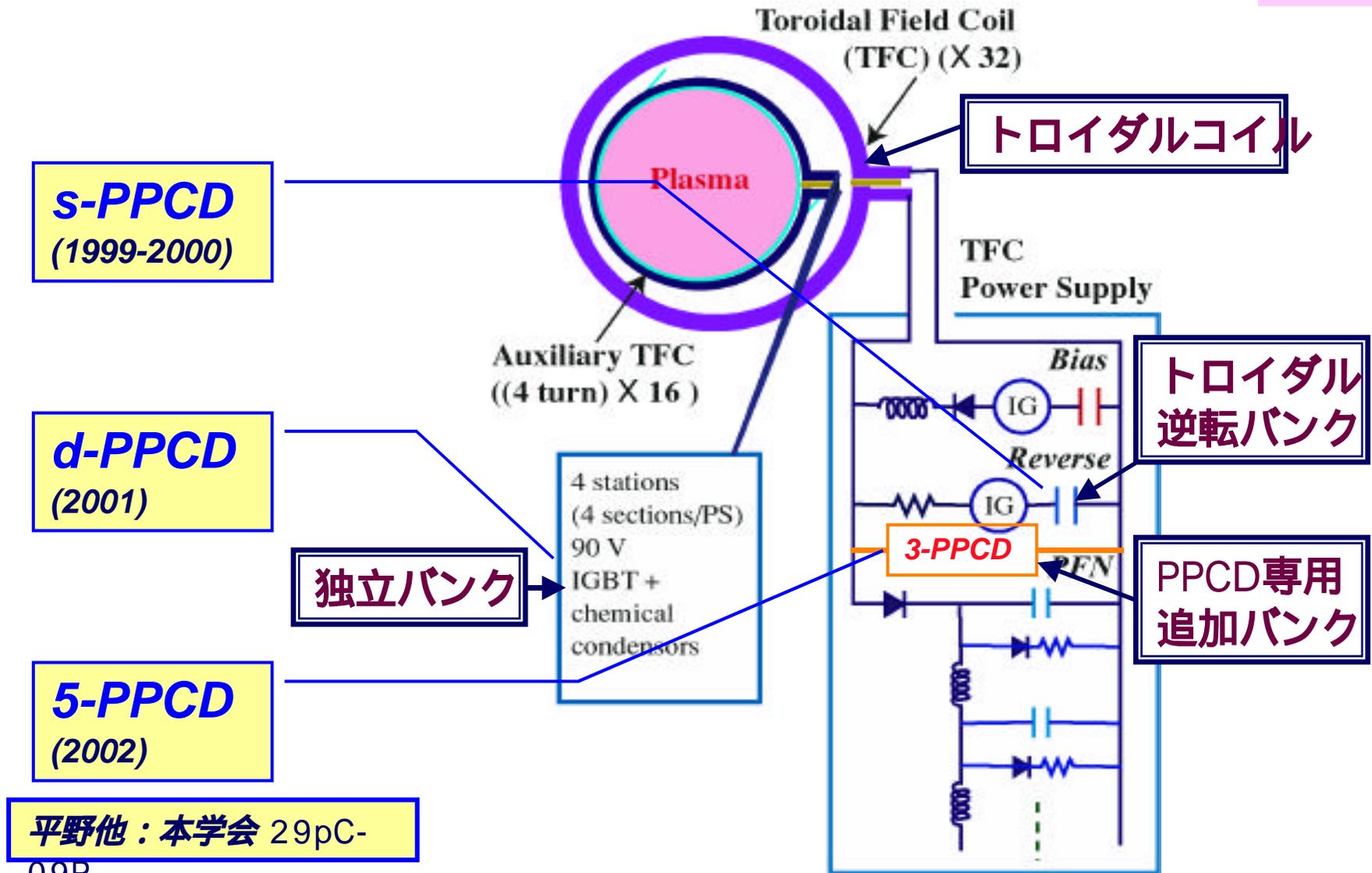
$$n_{el} < 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

$$\beta_p < 20 \%$$

$$\tau_E < 2 \text{ ms}$$

TPE-RXでPPCD を段階的に増強

TPE-RX



閉じ込めはs-PPCD < d-PPCD < 5-PPCDの順で良い

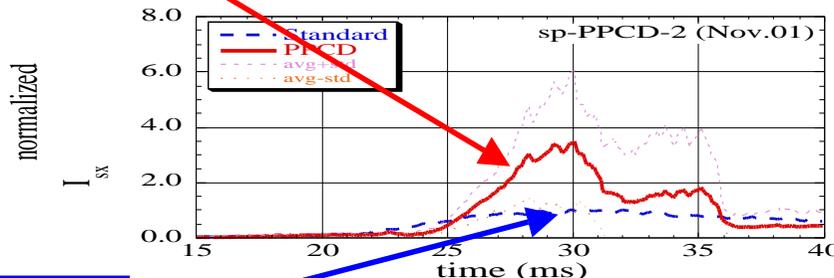
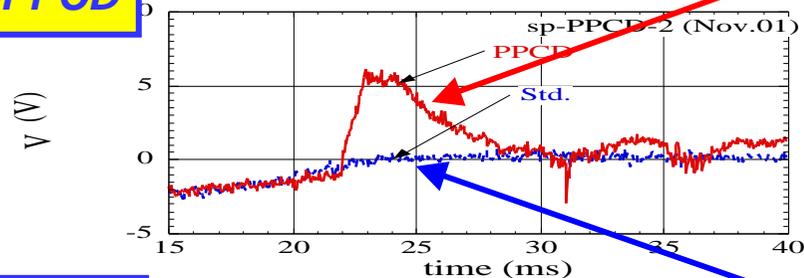
TPE-RX

Poloidal Voltage

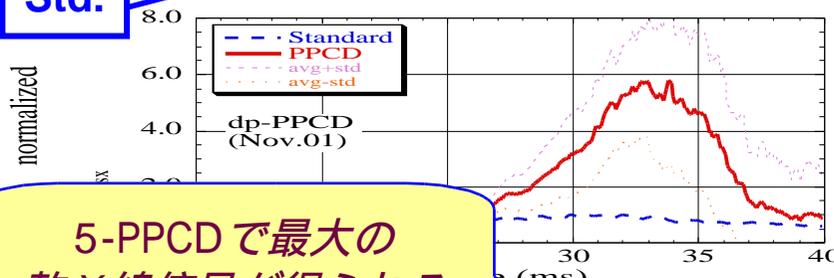
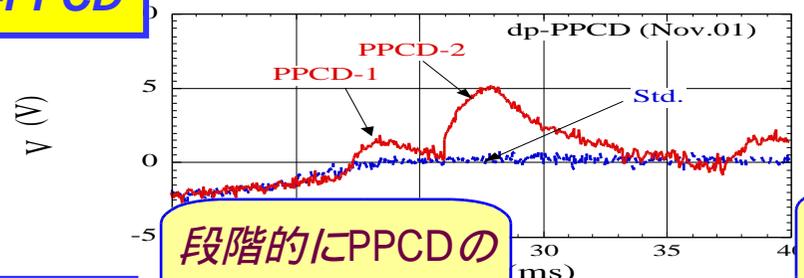
PPCD

Soft X-ray Signal

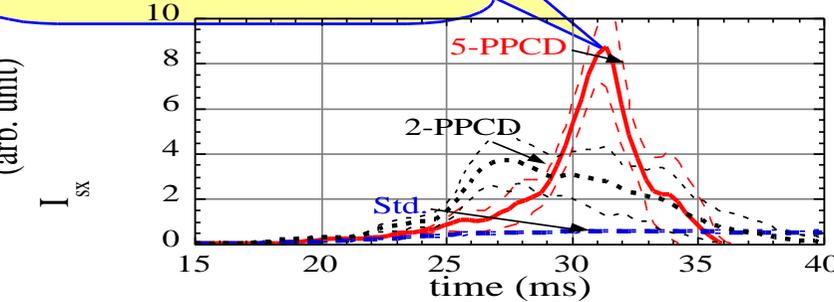
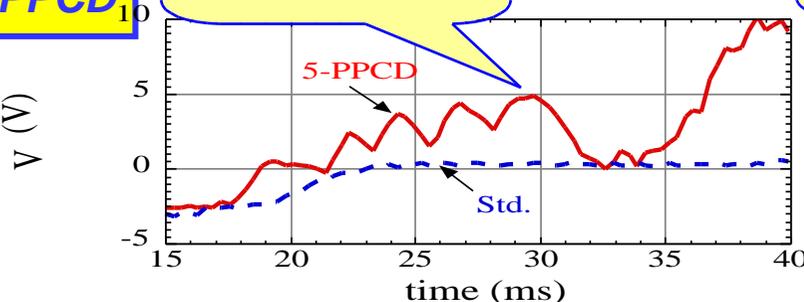
s-PPCD



d-PPCD



5-PPCD

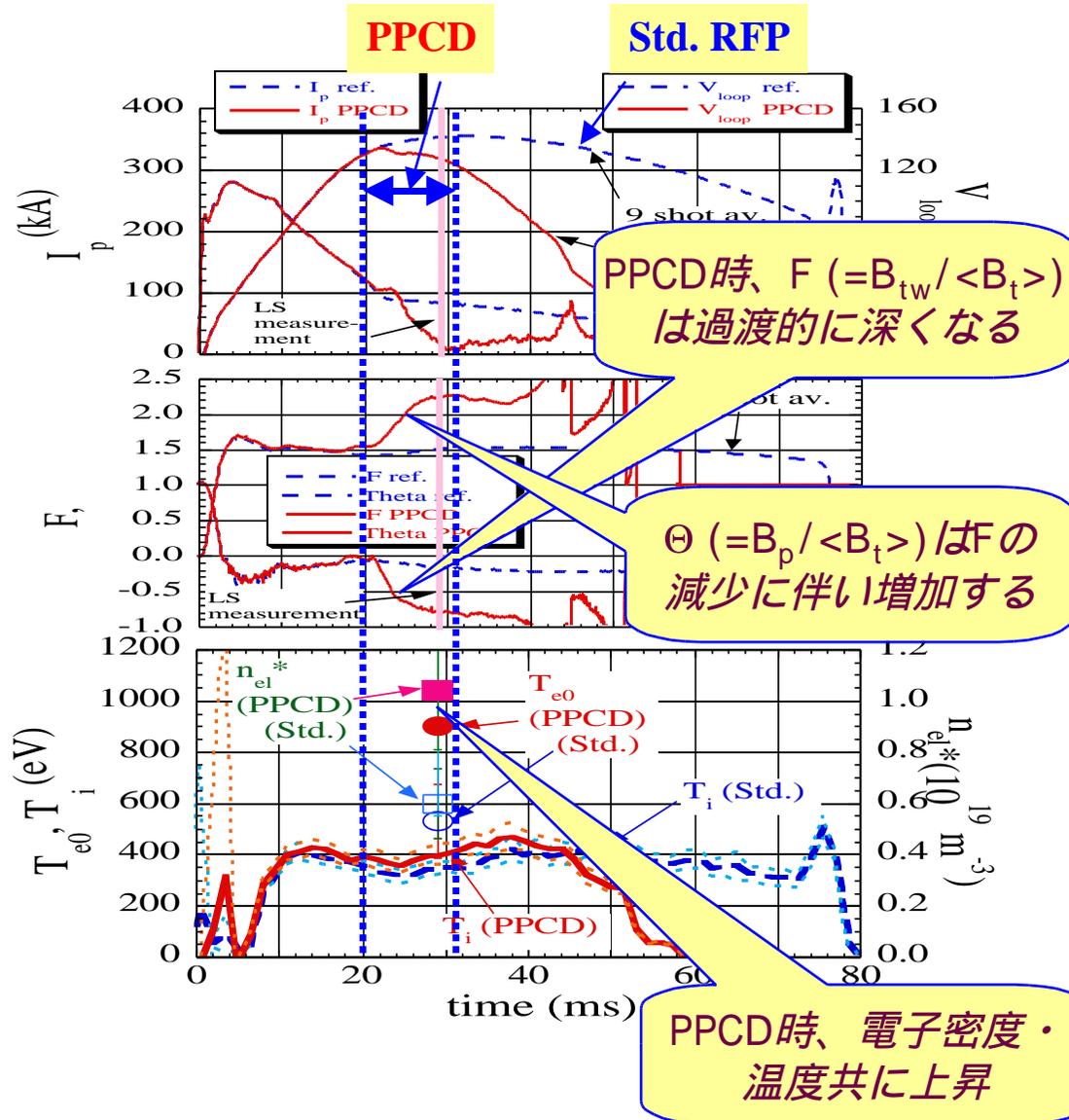


段階的にPPCDの時間幅が長くなる

5-PPCDで最大の軟X線信号が得られる

d-PPCDで τ_E が5倍に向上

TPE-RX



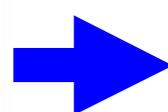
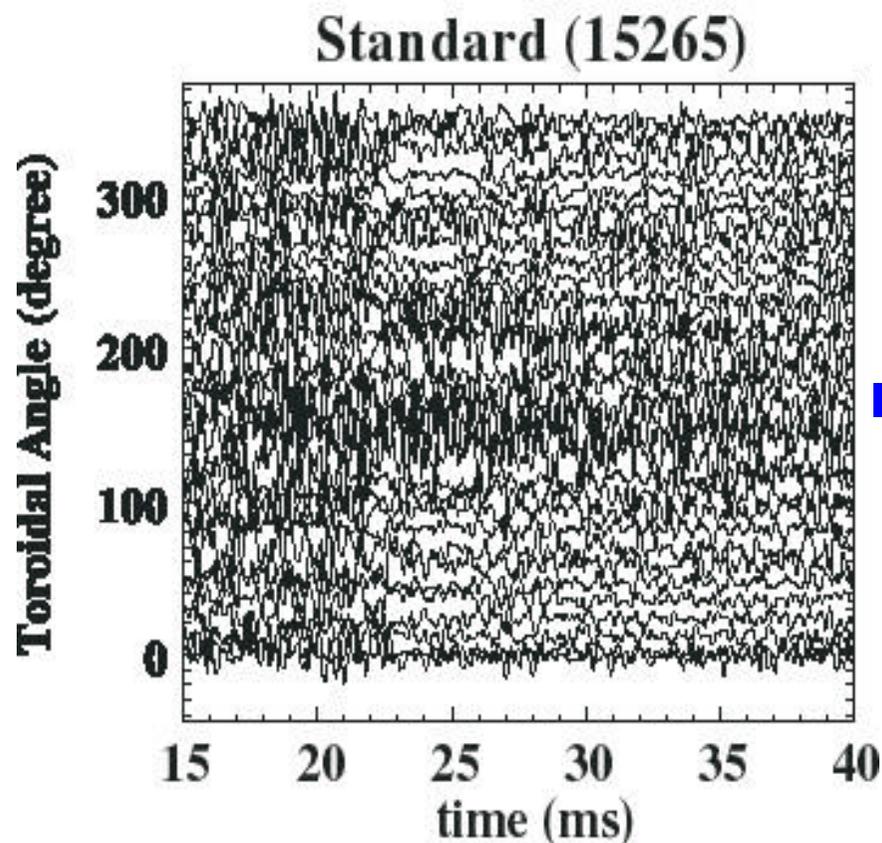
- d-PPCDで閉じ込めを計測。 τ_E が約5倍に増加。

TPE-RX	Standard	d-PPCD	
I_p (MA)	0.35	0.32	
Max./F/	0.15	0.80	
Max. Θ	1.51	2.24	
T_{e0} (eV)	530	900	(x 1.7)
T_i (eV)	340	390	(x 1.2)
n_{el}^* ($10^{19}/m^3$)	0.6	1.0	(x 1.8)
β_p (%)	6	12	(x 2)
τ_E (ms)	0.7	3.5	(x 5)

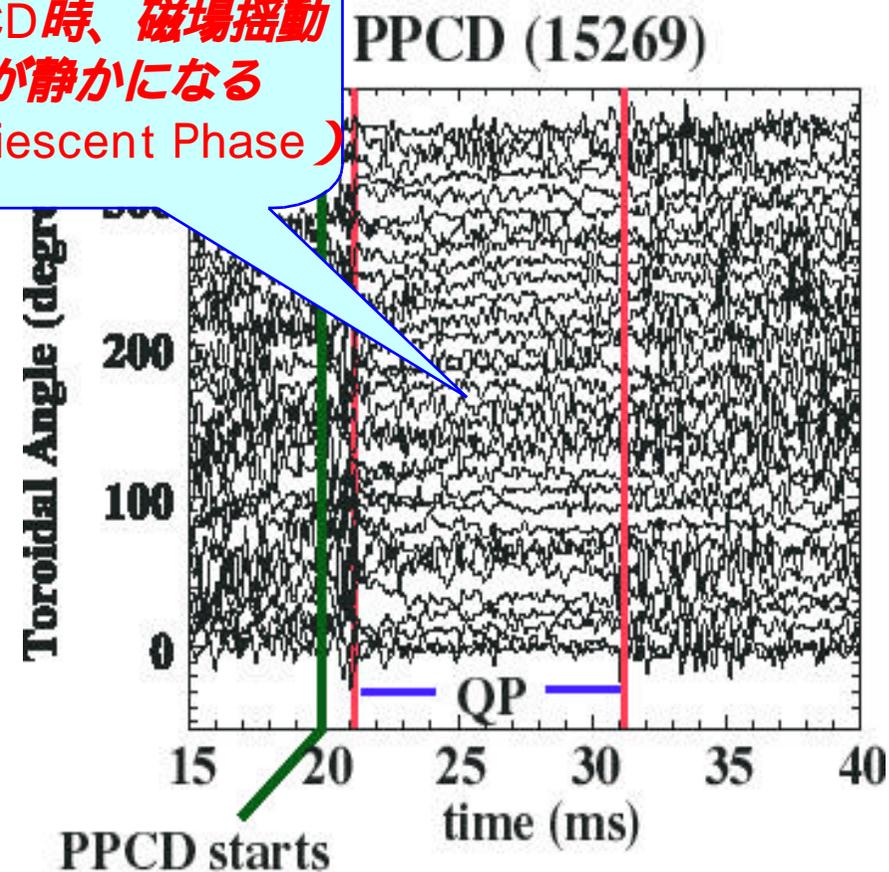
PPCD時磁場揺動が減少する

TPE-RX

径方向磁場分布の時間変化を比較



PPCD時、磁場揺動
が静かになる
(Quiescent Phase)

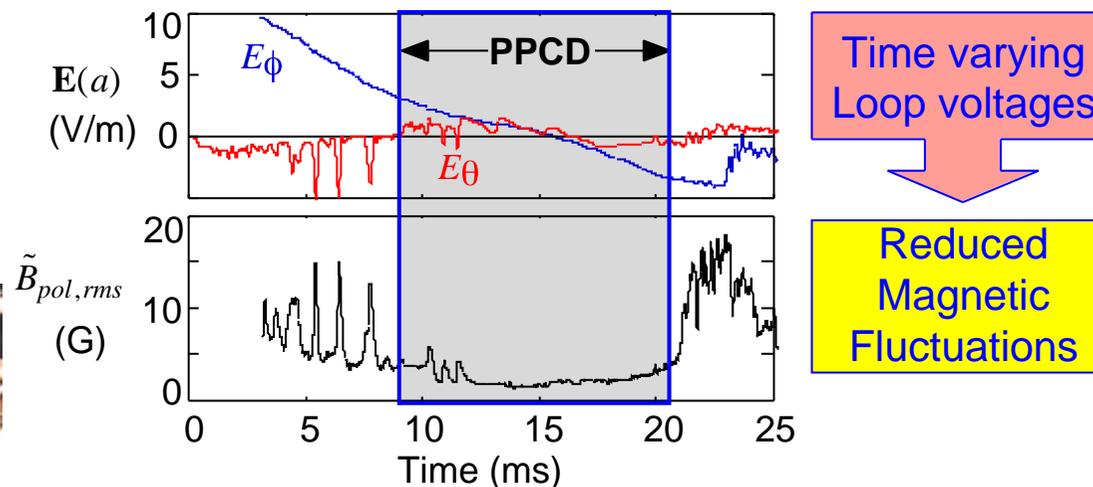
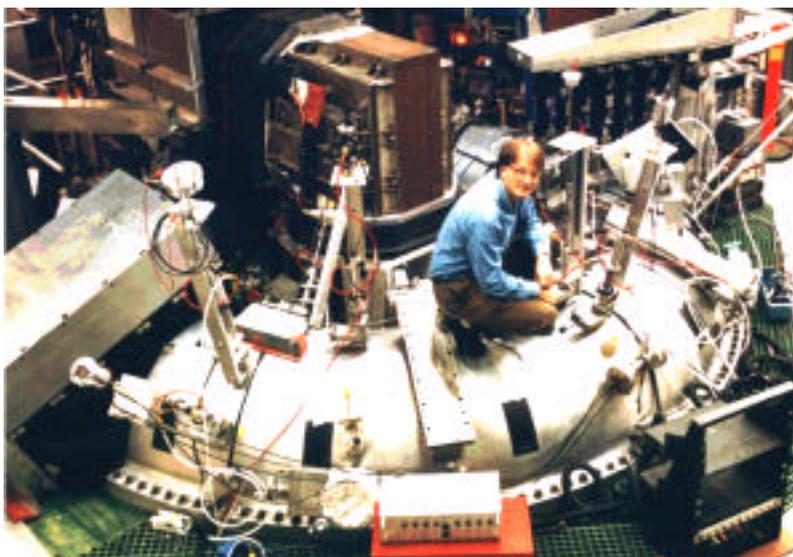


MSTで $\tau_E=10ms$ (10倍向上)達成

MST

Madison Symmetric Torus (MST)

U. Wisconsin, Madison, U.S.A.

 $R = 1.5 \text{ m}, a = 0.5 \text{ m}, I = 0.5 \text{ MA}$


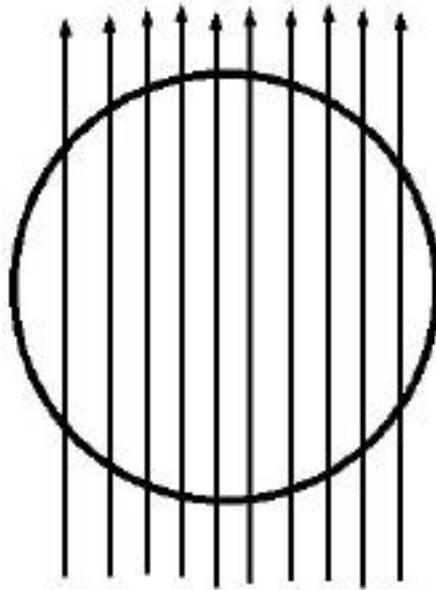
MST	Standard	5-PPCD	
I_p (MA)	0.21	0.21	
T_{e0} (eV)	200	600	(x 3)
n_{el}^* ($10^{19}/m^3$)	0.8	0.7	(x 0.9)
β_p (%)	9	18	(x 2)
τ_E (ms)	1	10	(x 10)

By courtesy of J S. Sarff, MST
 B. E. Chapman, et al., Phys. Rev. Lett. 87,
 205001 (2001)

MSTでPPCD時の電流分布を実測

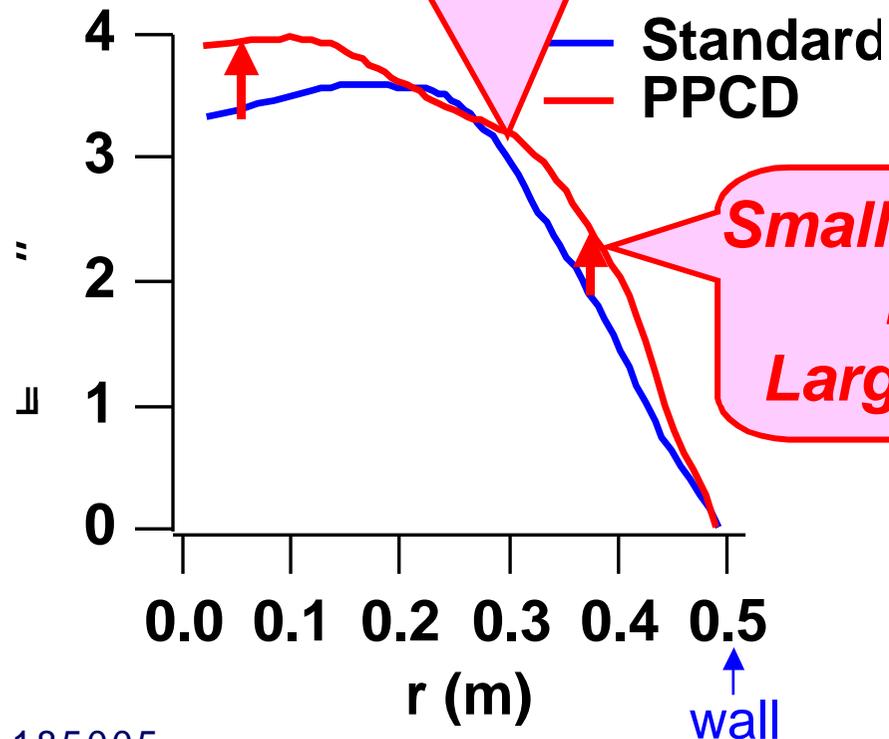
MST

Faraday Rotation Measurement in MST



$$= c_F n_e B_z dz$$

$J_{//}/B$ increases in the edge and the center



Small change but Large effect

By courtesy of D. L. Brower, UCLA
 D. L. Brower, et al., Phys. Rev. Lett. 88, 185005
 (2002)

6 ケースのPPCD実験のまとめ

PPCD運転条件と諸量の変化率

	MST [1]	MST [2]	MST [3]	RFX [4]	TPE-RX [5]	TPE-RX [6]
パルス数	1	4	5	5	1	2
パルス幅	5	7	11	10	5	10 (ms)
Max. E_{θ}	1.6	2.0	1.5-1.8	2.2	2.1	1.8 (V/m)
Max./F/	0.48	0.5	0.4	0.5	0.26	0.81
Max. Θ	1.98	2.5	3.7	3.5	1.62	2.14
I_p			0.21	0.80	0.30	0.35 (MA)
T_{e0}			3.0-5.0	1.75	1.34	1.7
T_i 変化率	1.24		1.0	(T_i)	1.16	1.2
n_{el} 変化率	1.0	1.5	1.0	0.9-1.0	1.40	1.8
db^2 変化率	0.56	0.28	0.06-0.25	0.30	0.6-0.7	0.5
τ_p 変化率	1.7	5	8	-	1.7	-
β_p 変化率	1.0	1.5	1.6	1.2	1.9	2
τ_E 変化率	2.2	5	10	2.4	1.7 	5

TPE-RXでも電源増強により向上率増加

MSTで最大の τ_E 向上率

[1] J. S. Sarff et al., PRL 72 (1994) 3670.

[2] J. S. Sarff et al., PRL 78 (1997) 62.

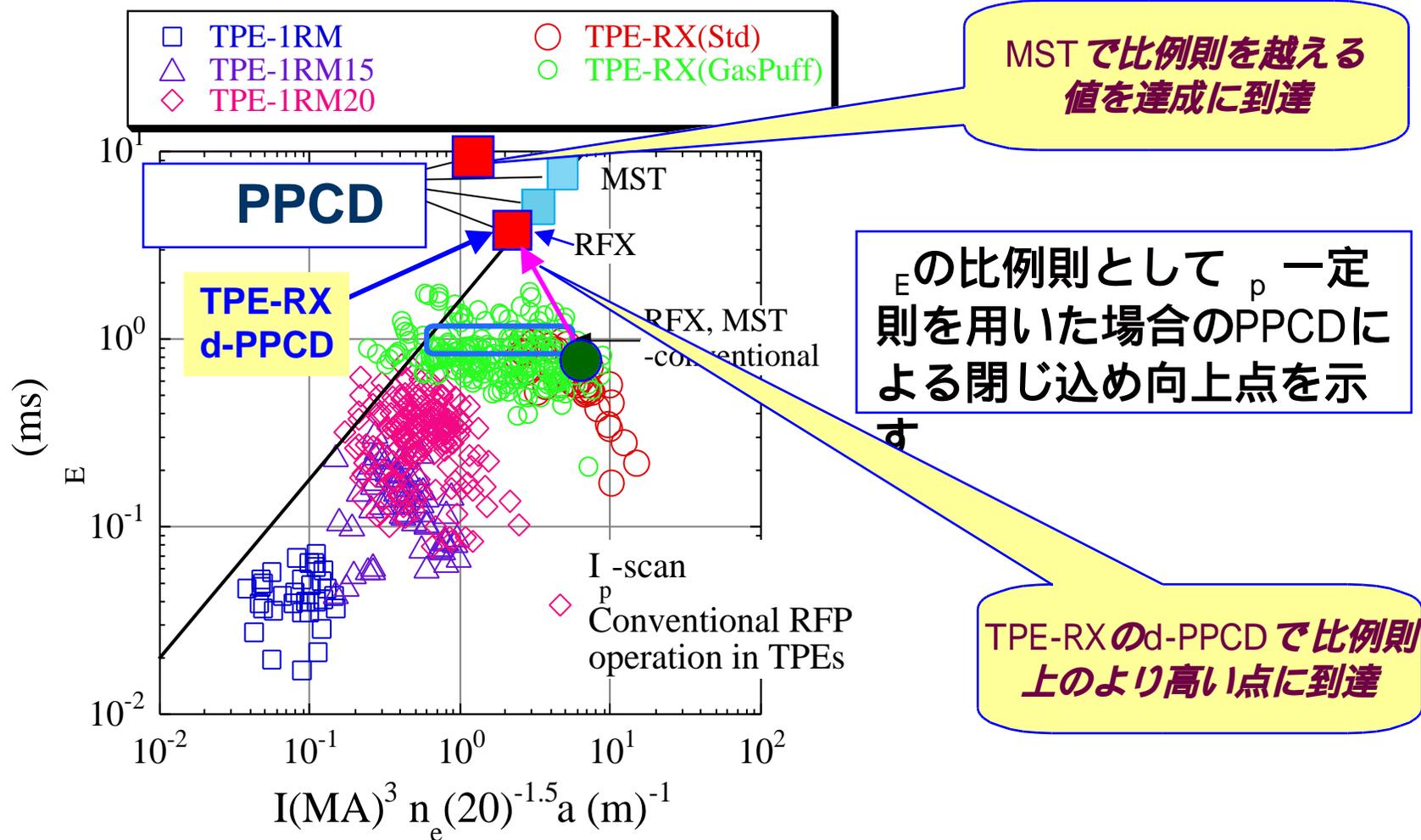
[3] B. E. Chapman et al., PRL 87 (2001) 205001.

[4] R. Bartiromo et al., PRL 82 (1999) 1462.

[5] Y. Yagi et al., PPCF 44 (2002) 335.

[6] Y. Yagi et al., to be submitted

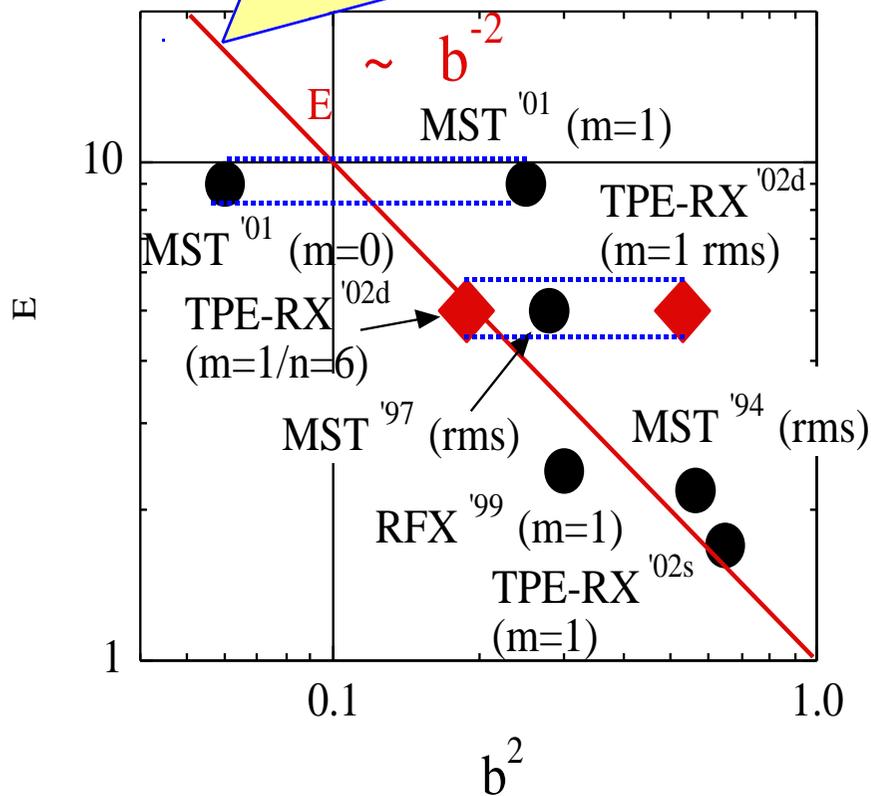
PPCDで閉じ込め比例則上明確に向上



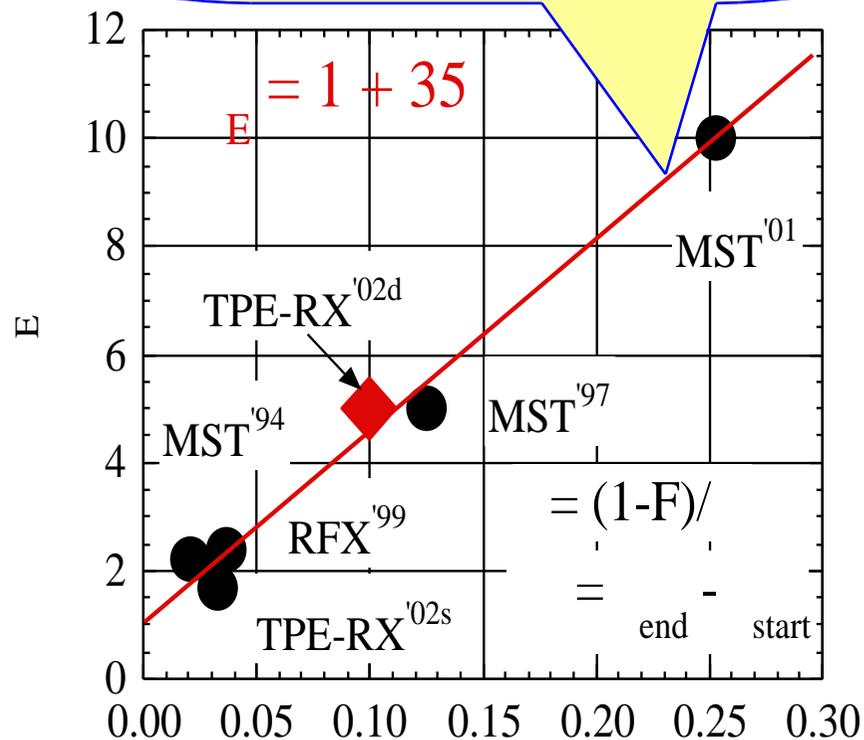
PPCDデータベースに2つの傾向有り

6 ケースのPPCD実験結果から E の向上率に関する二つの傾向が抽出できる

(1) 磁場揺動の二乗の減少率が大きいほど τ_E の向上率は大きい



(2) 駆動されるポロイダル電流の値が大きいほど τ_E の向上率は大きい



まとめ

逆磁場ピンチにおいてPPCDによる電流分布制御により閉じ込めが向上することをTPE-RX, MST等を例に紹介

1. PPCDは電流分布制御で、より高い閉じ込めを得る手法
2. TPE-RXのd-PPCDで τ_E の5倍増(3.5 ms)を実現
3. MSTで τ_E の10倍増(10 ms)を実現
4. MSTでPPCDによる電流分布の変化を実測
5. τ_E の向上は、 δb^2 が小さく、 I_θ が大きい程、大きい
6. 同様の効果をRF等による電流駆動で期待できる