

逆磁場ピンチ装置TPE-RXにおけるガ スパフによる壁熱負荷軽減

Reduction of Thermal Wall Load by Gas Puffing in the TPE-RX Reversed-Field Pinch Device

産総研：小口治久，八木康之，榊田創，平野洋一，島田壽男，浅井朋彦

AIST: H. Koguchi, Y. Yagi, H. Sakakita, Y. Hirano, T. Shimada, T. Asai

Contents

1. 逆磁場ピンチプラズマ
2. Locked mode (LM)
3. LMによる壁熱負荷の増大
4. D₂ ガスパフ実験
5. ガスパフ実験による壁熱負荷の軽減
6. 考察
7. まとめ

逆磁場ピンチプラズマ

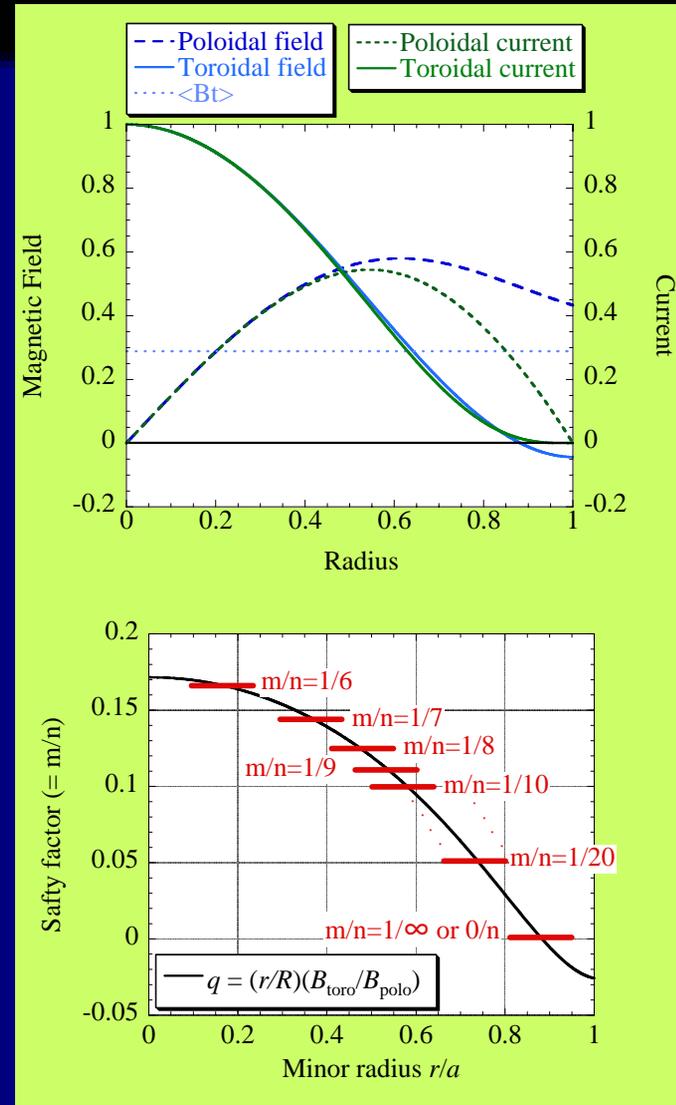
- トロイダル磁場がプラズマの中心部と周辺部で反転している
- 中心部の磁場強度と比べ非常に小さい

TPE-RX: $I_p = 300$ kA

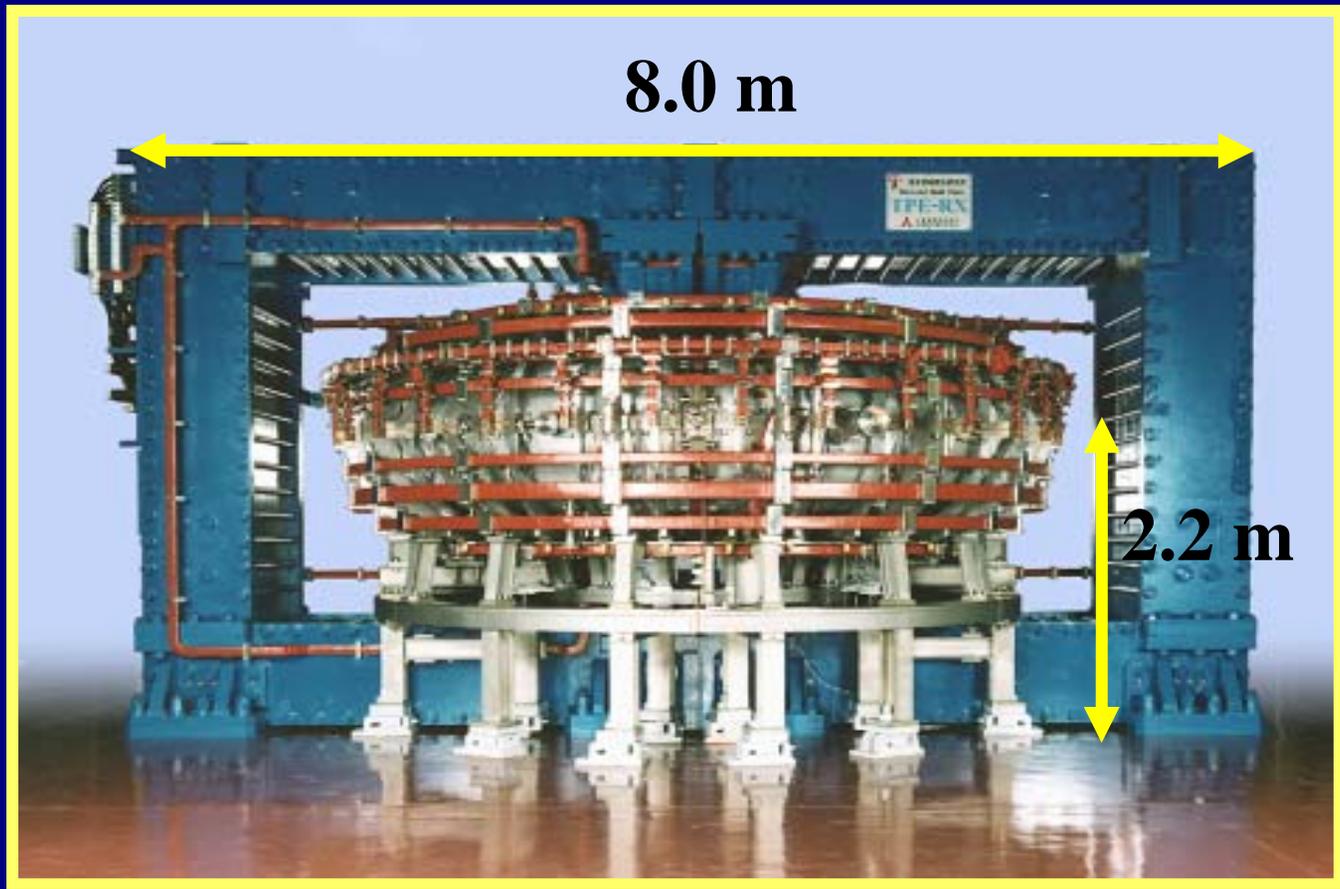
標準放電: 0.02 T程度

特殊な放電: 0.1 T程度

- 磁場利用効率が低い
- 常電導のトロイダルコイルが可能
- テアリングモード $m=1$ の有理面を持つ



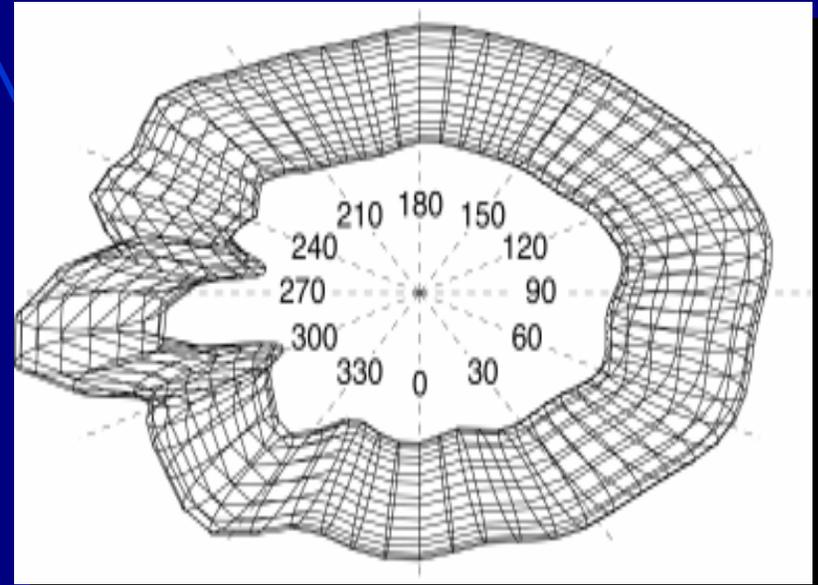
Reversed-Field Pinch (RFP): TPE-RX



$$R/a = 1.72 / 0.45 \text{ m}, I_p = 1 \text{ MA}, \tau_d = 0.1 \text{ s}$$

ロケットモード

- 局在化し定在するロケットモード(LM)
[1]
- テアリング不安定性が原因
- 高電流実験で必ず出現 ($I_p > 300$ kA)
- 低電流 $I_p < 300$ kAで、重水素の充填圧 (p_{DGP}) が充分低ければLMは現れない。
- 電流立ち上げ時に T_e が充分高ければLMの発生は抑えられる。[2]
- $I_p < 250$ kAでは外部印可した $m=0/n=1$ の回転磁場に依ってLMの発生が抑えられる。[3]



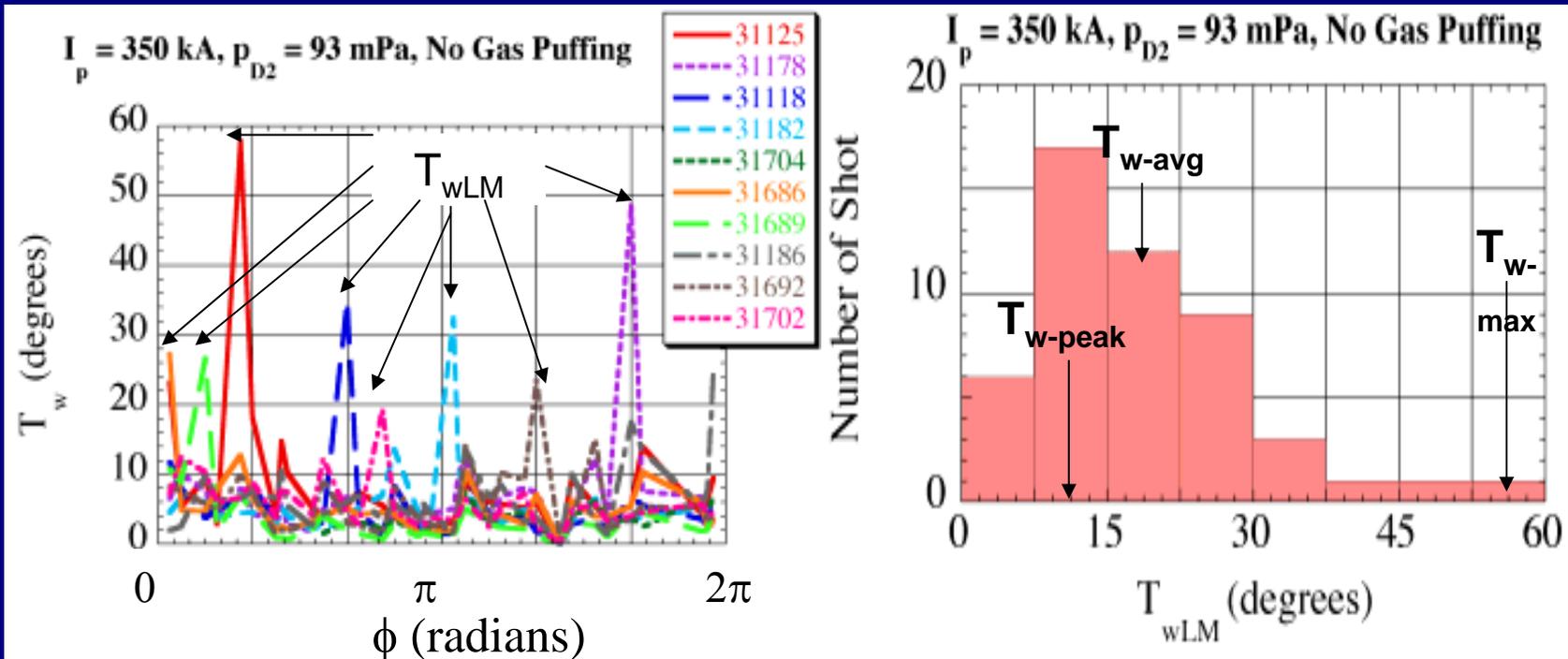
B_r アレイから計算した最外殻磁気面
(30倍に誇張して描画)

[1] Y. Yagi et al., Phys. Plasmas 6 (1999) 3824

[2] Y. Yagi et al., Phys. Plasmas 5 (2001) 1625

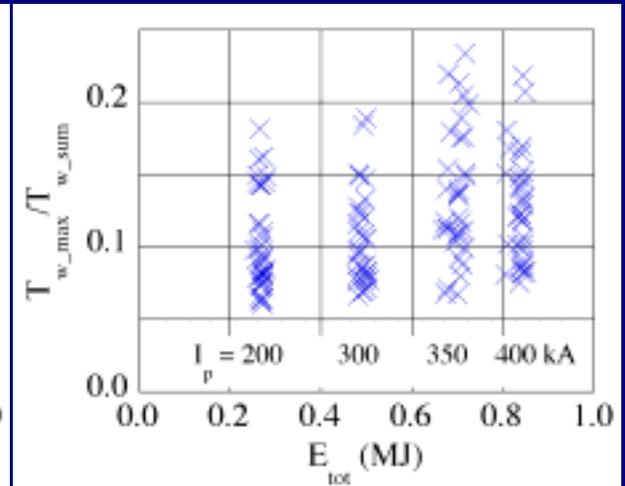
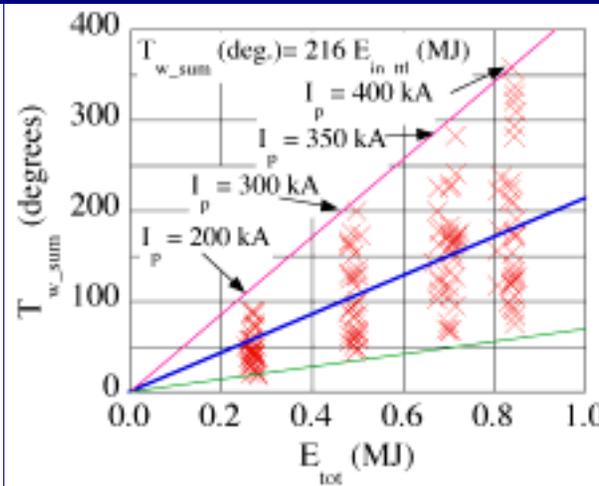
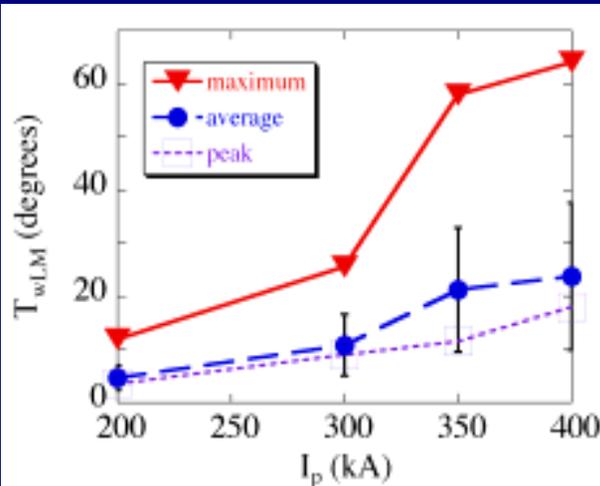
[3] Y. Hirano et al., Jpn. J. Appl. Phys 42 (2003) 5274

LMと壁熱負荷



- thermocouple (TC) arrayで計測した壁温度は LM 位置に最も近い所でピークを持つ [7]
- ピークでの温度 (T_{wLM}) は高温側にテールを持った非対称な分布を持つ

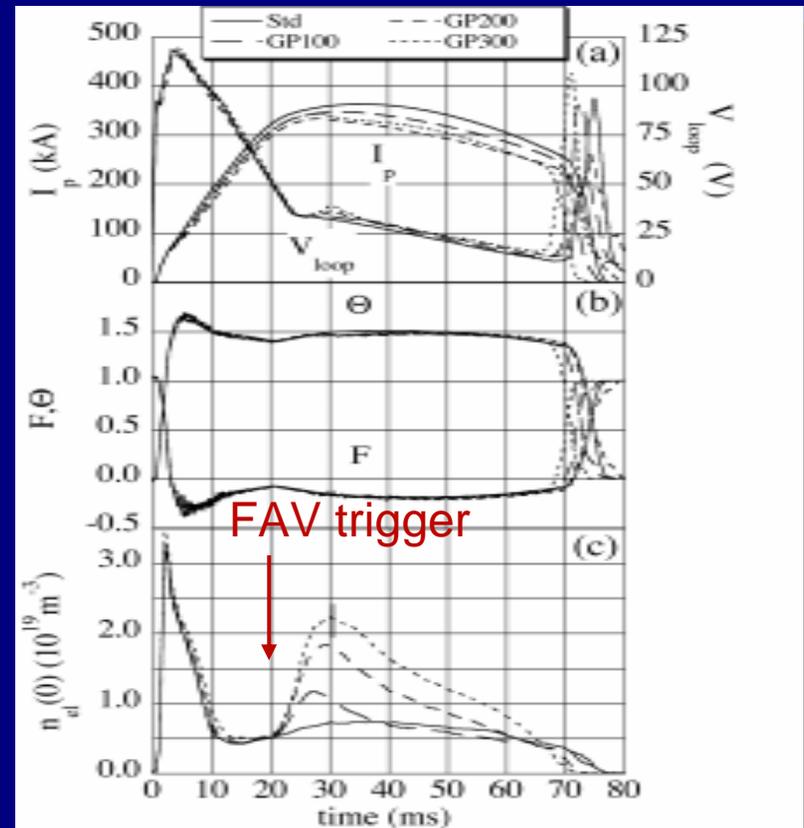
T_{wLM} はプラズマ電流と入射パワーと共に上昇



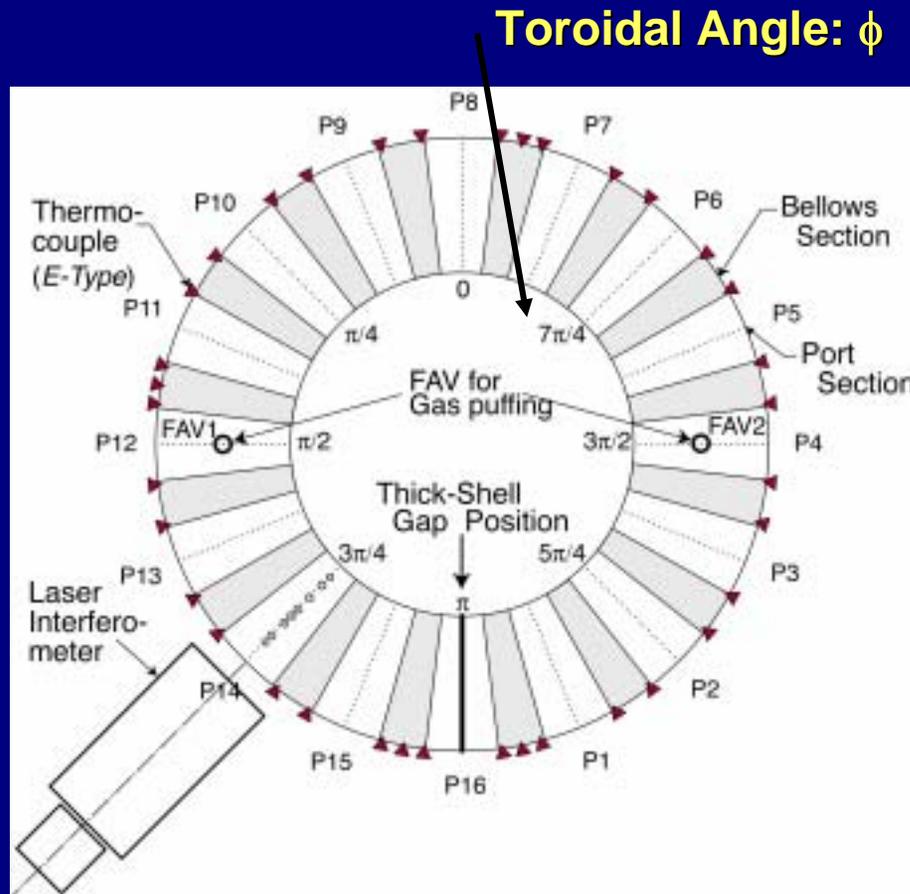
- T_{w-max} , T_{w-avg} , T_{w-peak} は I_p と共に上昇
- プラズマに面した壁温度は $I_p = 400$ kA で 2600°C に達する。
- $\text{Sum}(T_w)$ は全入力エネルギー (E_{tot}) と共に上昇
- $\text{Sum}(T_w) / (T_{w-sum})$ の分散は、電流に依らず E_{tot} との相関が明確ではない。
- $T_{w-max} / T_{w-sum} \leq 0.23$ (peaking factor = 10) は弱い E_{tot} 依存性を持っている。

ガスパフ実験

- トカマク・ダイバータでのガスパフは壁の熱負荷軽減に有効 [8,9]
- TPE-RXでガスパフ実験を行い、その熱負荷に対する効果を調べた。
- Fast Acting Valves (FAVs) 二個をD₂のガスパフに使用。
- FAV (p_{DGP})の流量は最大で 200 Pa m³/s
- 線積分した電子密度 (n_{el})は3倍上昇。



計測系とガスパフ系



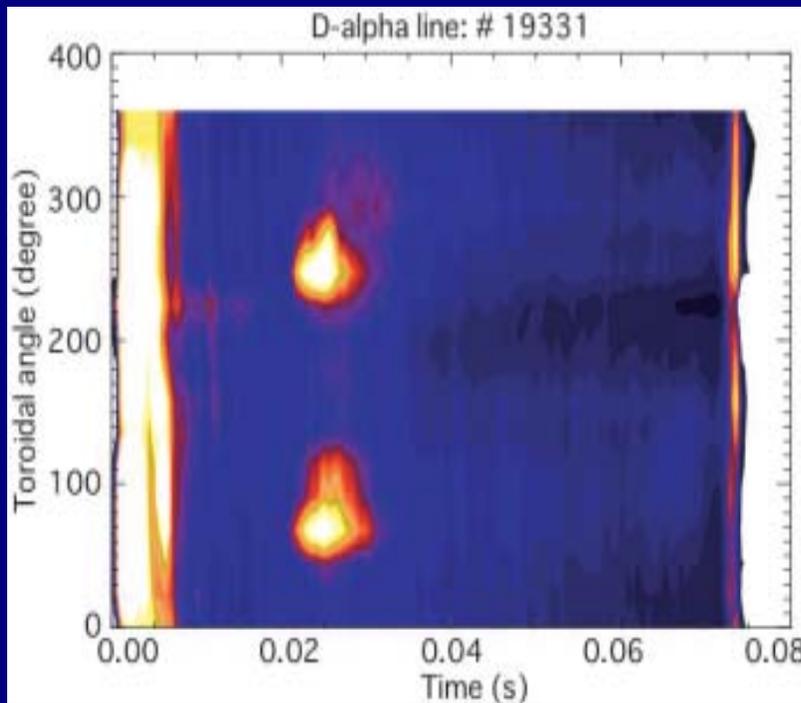
- Overview of diagnostics in TPE-RX [4]
- Vessel Temperature Monitoring System (VTMS) [5]
- Extensive Magnetic Measurement System (EMMS) [6]

[4] Y. Yagi et al., Rev. Sci. Instr. 74 (2003) 1563

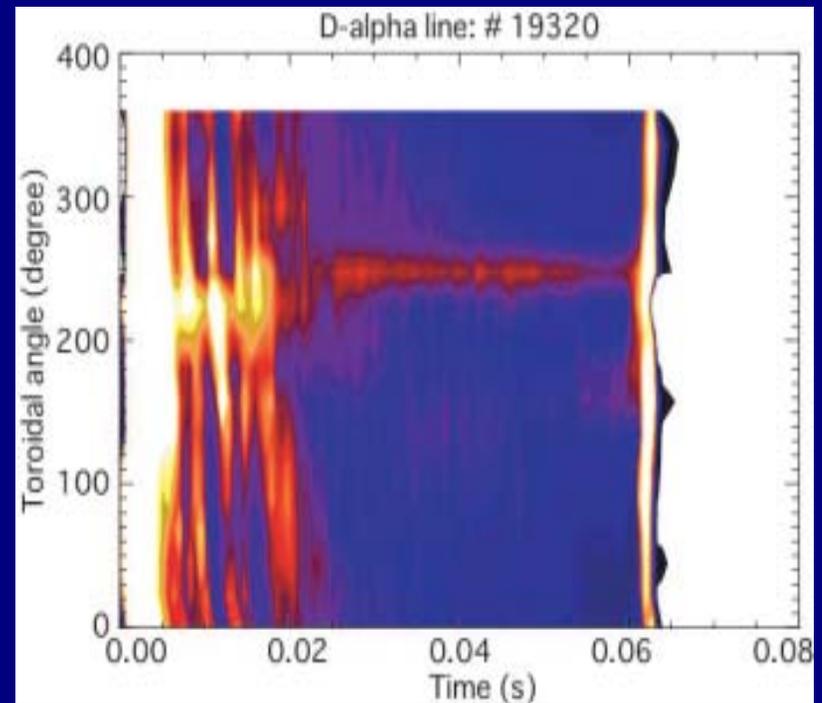
[5] Y. Yagi et al., Fusion Eng. and Design 46 (1999) 65

[6] Y. Yagi et al., Fusion Eng. and Design 46 (1999) 47

D α トロイダルモニター



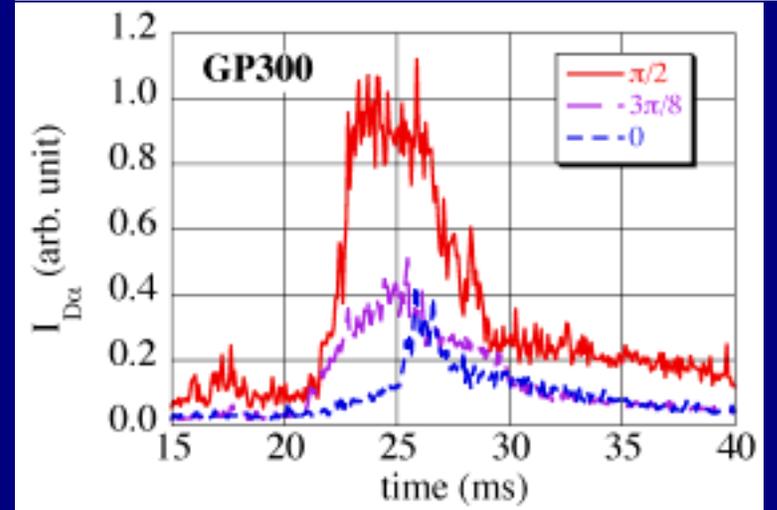
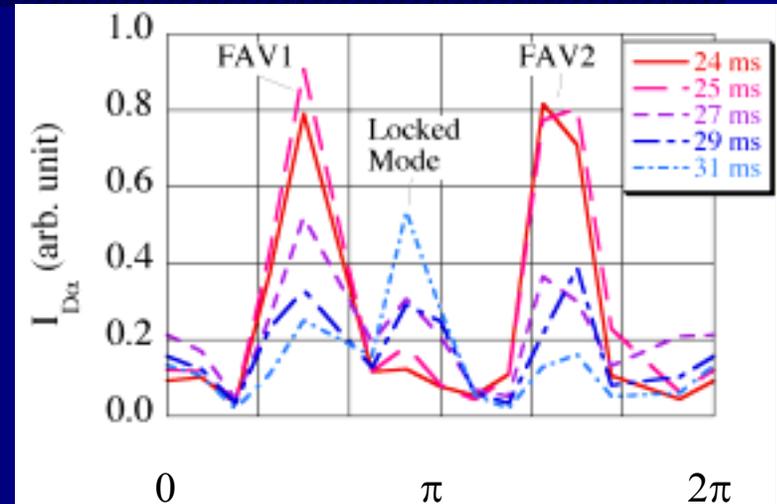
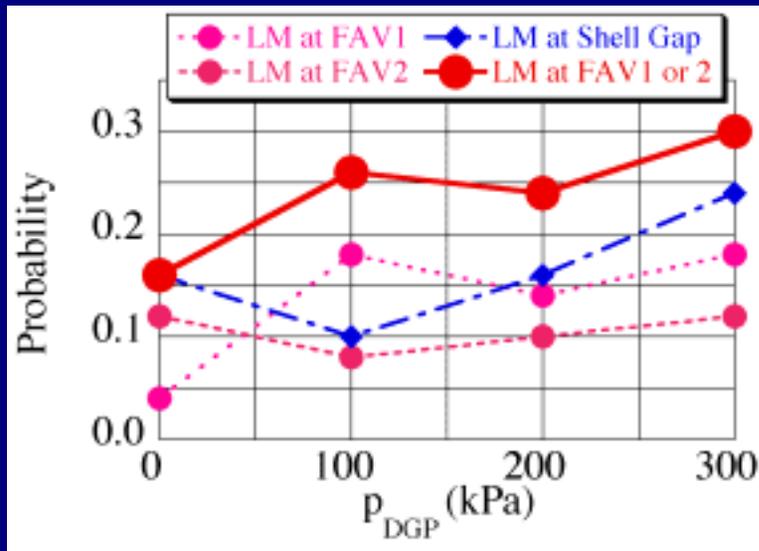
ガスパフ実験



通常放電

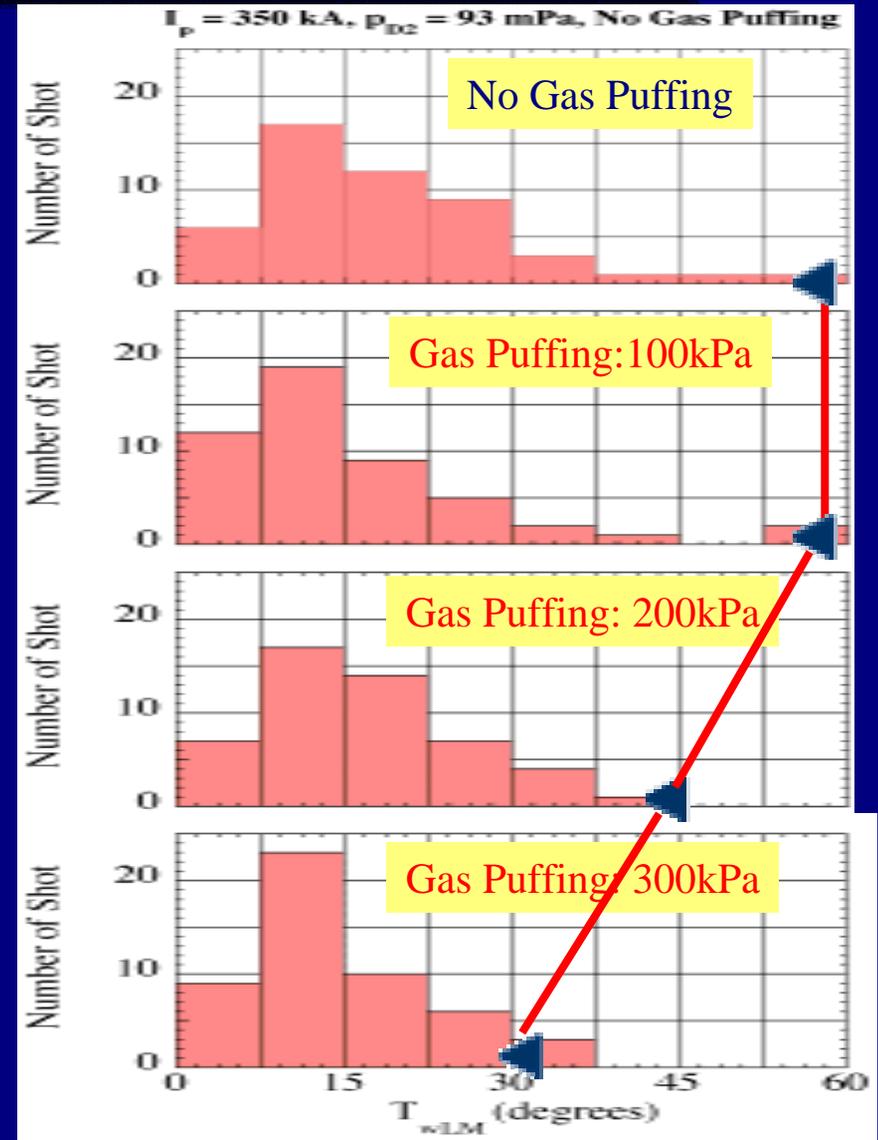
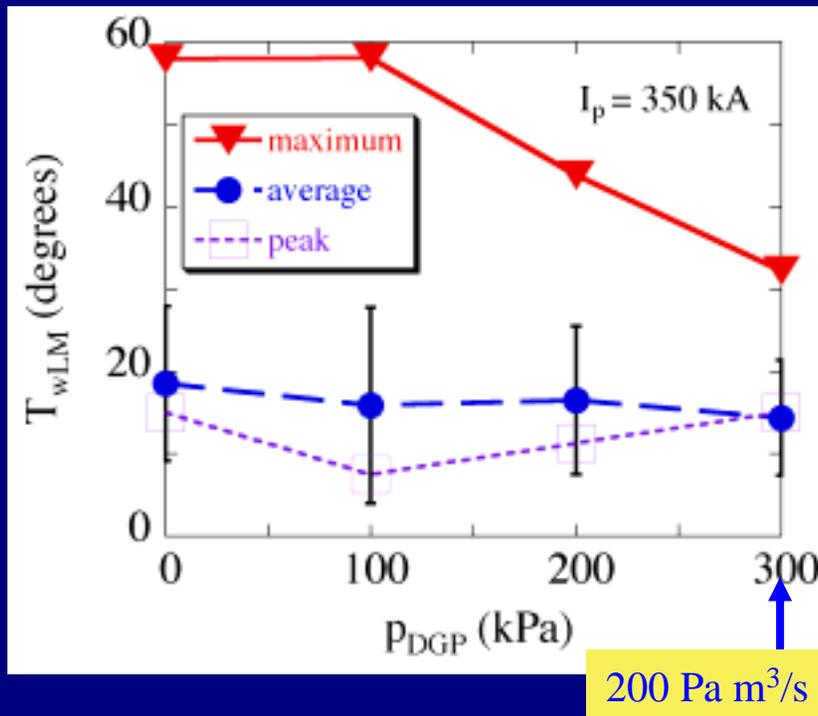
FAV近辺に局在化するD α の発光

- D α (I $_{D\alpha}$) の発光の分布は、FWHM $\sim \pi/3$ radians
- I $_{d\alpha}$ 立ち上がりは3-5ms
- LMはFAV付近に起こりやすくなる。



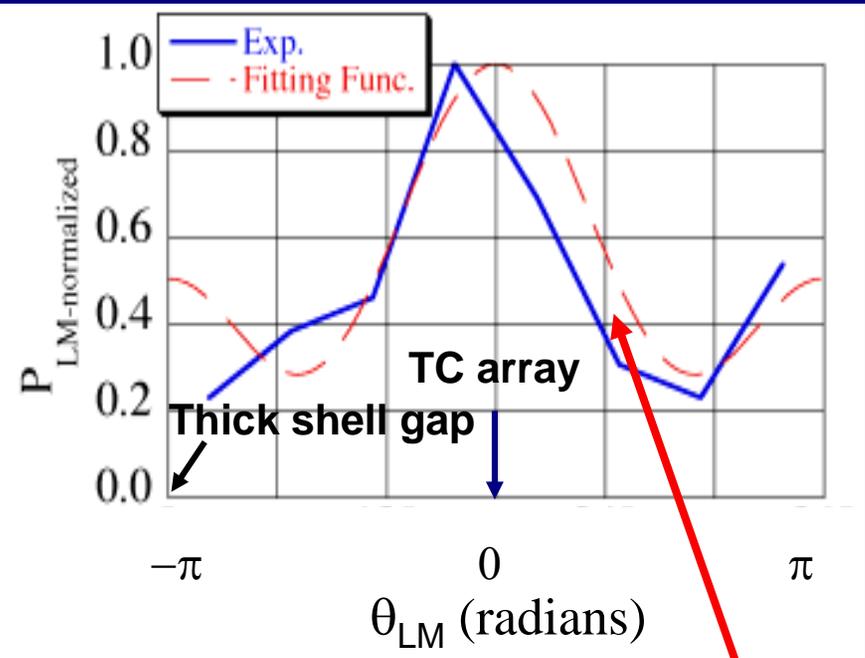
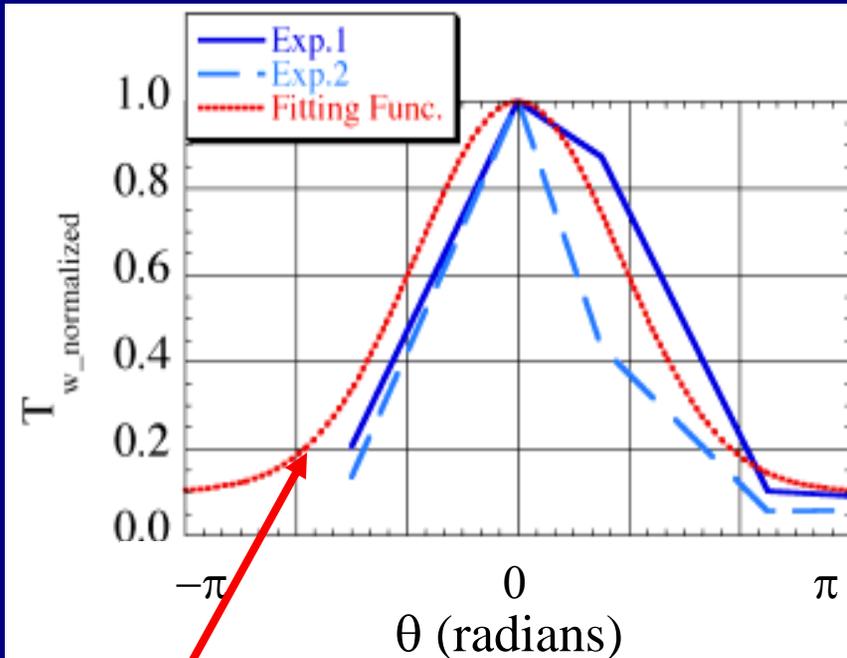
ガスパフにより熱負荷が軽減される

- T_{w-max} は半減する
- T_{w-avg} はほんの少し減少する
- T_{w-max} ロケットモードが熱負荷を増幅させるのに関連している。



Poloidal Distribution of LM

- Wall temperature, T_w , has a FWHM of $2\pi/3$ radian
- LM tends to lock at outboard side of the eq. plane ($\theta = 0$)



$$T_w / T_w^* = \gamma + (1 - \gamma) \exp[-(\theta - \theta_{LM})^2 / (2\Delta\theta_T^2)], \quad \gamma = T_{w0} / T_w^*$$

$$P_{LM} = P_0 \{ \exp[-\theta_{LM}^2 / (2\Delta\theta_{P0}^2)] + \exp[-(\theta_{LM} - 2\pi)^2 / (2\Delta\theta_{P0}^2)] \} + P_\pi \exp[-(\theta_{LM} - \pi)^2 / (2\Delta\theta_{P\pi}^2)]$$

Converted to $0-2\pi$

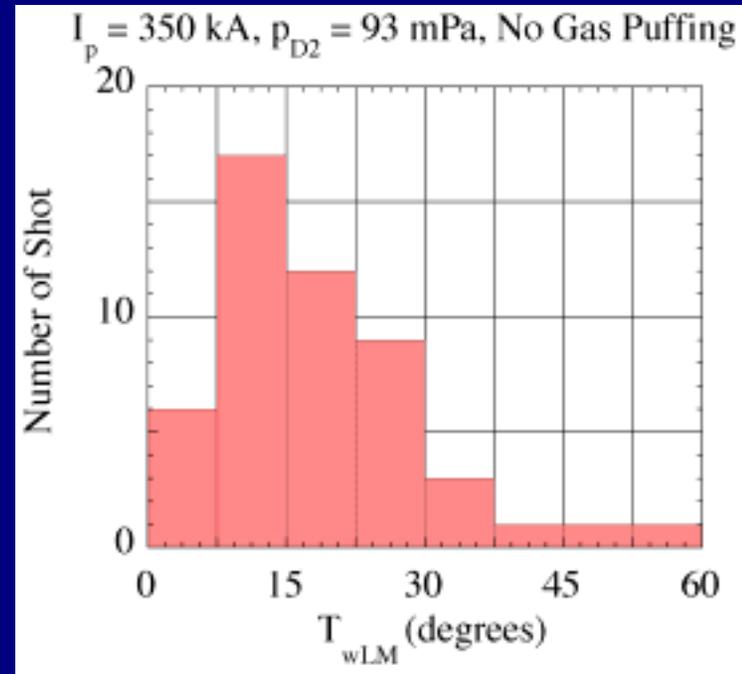
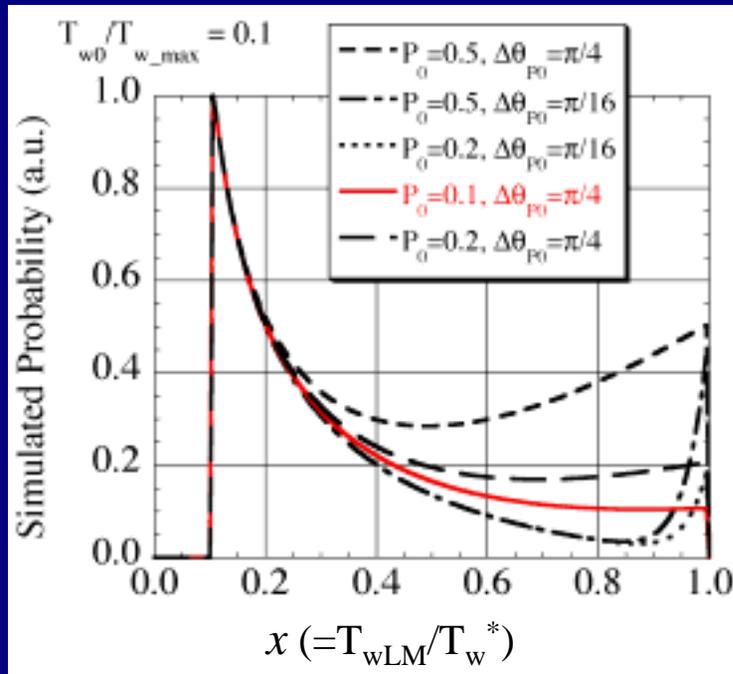
Dispersion of T_{wLM} is inconsistent to the measured poloidal distribution of LM

- Probability that T_{wLM} exists in $\sim T_{wLM} + dT_{wLM}$:

$$P_{LM}[\theta_{LM}(T_{wLM})] = P_0 \{ \exp[-(\Delta\theta_T K(T_{wLM}))^2 / (2\Delta\theta_{P0}^2)] + \exp[-(\Delta\theta_T K(T_{wLM}) - 2\pi)^2 / (2\Delta\theta_{P0}^2)] \} + P_\pi \exp[-(\Delta\theta_T K(T_{wLM}) - \pi)^2 / (2\Delta\theta_{P\pi}^2)],$$

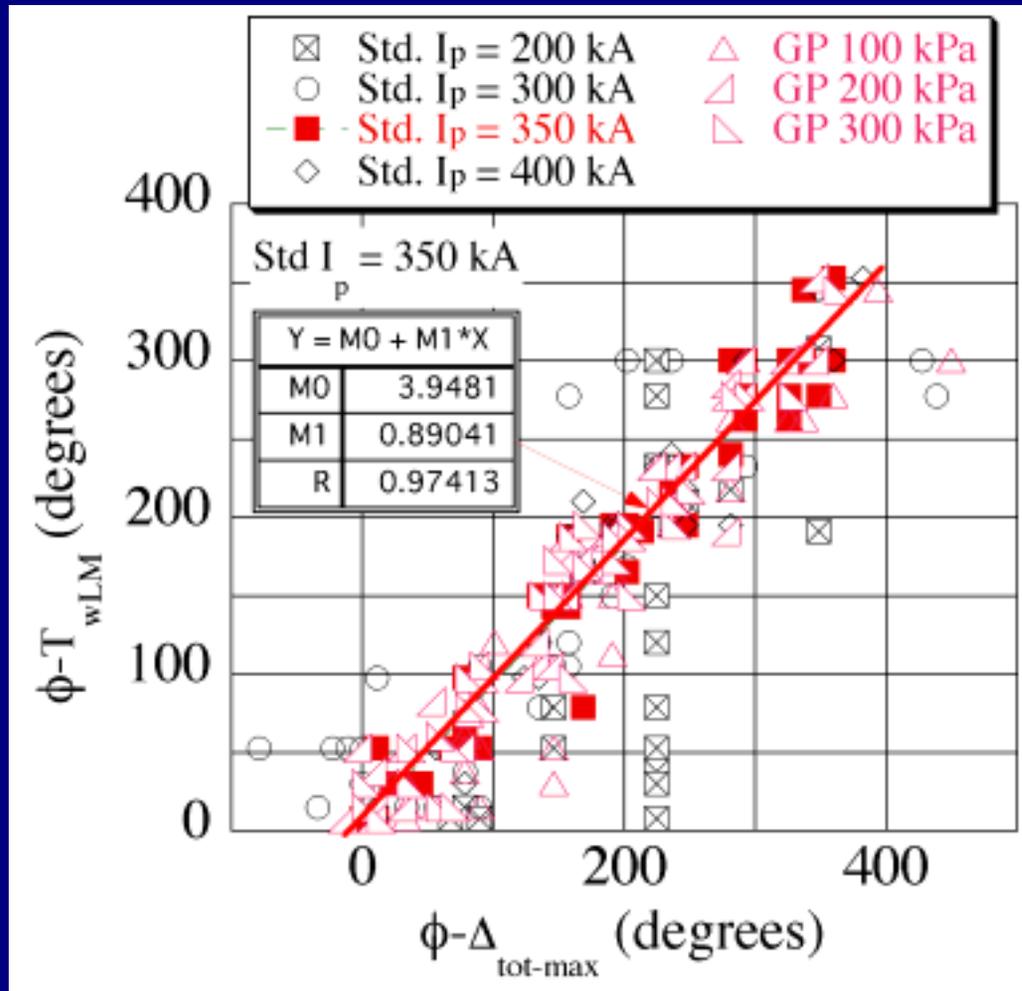
$$K(T_{wLM}) = \{ \ln[(1-\gamma)/(x-\gamma)]^2 \}^{0.5}, \quad x = T_{wLM}/T_w^*$$

- The result agrees if $P_\pi \gg P_0$, but the observation is opposite



Correlation between T_{wLM} and $\Delta_{tot-max}$

- T_{wLM} のトロイダル角度はLCFSの最大のシフト位置と良く相関がある。
 $I_p \geq 350$ kA
- しかし、オフセットがある (4 degrees: 150mm) 計測した T_{wLM} の分散によると考えられる。
- $I_p \leq 300$ kAでは関連が薄くなる。(LMもはっきりとしなくなる)



Summary

■ Locked Mode (LM) 局所的な熱負荷の原因となる

- ◆ peaking factor =10
- ◆ プラズマ対抗面での最大の温度上昇は 2600°C at $I_p = 400 \text{ kA}$
- ◆ 壁温度上昇は I_p と E_{tot} と共に上昇
- ◆ T_{wLM} 葉高温側にTailを持った非対称な分布になる。
- ◆ Dispersion of T_{wLM} の分散は E_{tot} とLM位置でのLCFSとは関連が無い。

■ 流量が $200 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ でのガスパフではLMが起こす熱負荷を半分にする事が出来る。

- ◆ n_{el} は10ms で立ち上がり3倍に上昇する。
- ◆ $I_{\text{d}\alpha}$ は FAV付近でのみ見られ、3-5msで立ち上がる。
- ◆ FAV付近にロックする確率が高くなる。
- ◆ Cause 1: 重水素ガスによる放射損失が変化する。
- ◆ Cause 2: n_{el} の上昇に依る高速電子束の減少

■ それぞれの I_p に於ける T_{wLM} の分散の理由は不明確

- ◆ T_{w} のポロイダル分布は $2\pi/3$ radiansの半値幅を持つ。
- ◆ LM は eq. Planeの外側に集中する
- ◆ T_{wLM} のトロイダル位置はLCFSの最大のシフト位置と少しずれるのが原因か？