

Heat flux & Disruption (session 8-10) 概要 第16回ITPA SOL・ダイバータ物理グループ会合

朝倉伸幸
日本原子力研究開発機構

平成24年度 ダイバータおよびPWI合同研究会：

第1回プラズマ物理クラスター・スクレープオフ層とダイバータ物理サブクラスター会合

平成24年度第2回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター会合

平成24年度筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム

双方向型共同研究「ガンマ10装置における炉壁材料の損耗・再堆積の研究とそのダイバータ開発戦略における位置づけ」会合

平成24年7月23-24日 筑波大学

SOL width and Disruption sessions

2

今回の主な検討課題は

EU及びUSでの定常(ELM間)熱流束分布幅とITERへの影響

VDE熱負荷およびMGIによる熱負荷緩和効果

8	Follow up on SOL width				Chair R. Pitts
		11:05	0:05	R. Pitts	Introduction
		11:10	0:20	T Eich	EU effort
		11:30	0:20	T Leonard	US effort
		11:50	0:20	B. Lipschultz	Comparison of Eich to US model fits of heat load footprints
		12:10	0:20	A. Kukushkin	Consequences of short SOL widths for ITER divertor power handling
		12:30	1:15	Lunch	
		13:45	0:20	J. Gunn	Follow up on Tore Supra start up experiments
		14:05	0:20	G. Matthews	JET start up experiments
		14:25	0:25	R. Pitts	Discussion
9	Disruptions				Chair R. Pitts
		14:50	0:05	R. Pitts	Introduction
		14:55	0:20	T. Leonard	VDE on DIIIID
		15:15	0:20	B. Lipschultz (tbc)	Non-mitigated VDE divertor heat loads on CMod
		15:35	0:20	M. Lehnen	Preliminary results on VDE in JET
		15:55	0:20	M. Lehnen	Recent results from TEXTOR
		16:15	0:20	Break	
		16:35	0:20	C. Grisolia	The FIRE experiment on TS
		16:55	0:20	W. Fundamenski	MGI in MAST
		17:15	0:20	M. Lehnen	Radiation asymmetries during MGI : status (joint MHD-DivSOL)
		17:35	0:25	R. Pitts	Discussion
10	Heat flux R&D				Chair T. Leonard
		18:00	0:30	T. Leonard	Discussion

SOLでの熱流の分布幅のスケーリング1 (EU)

3

赤外カメラで外側ダイバータ板のELM間の熱流束分布を測定し、SOLでの熱輸送とダイバータ部での熱輸送を分けたモデルによりフィットした ⇒ λ_q, S を導出

- Approach: Numerical fitting of $q(s)$ for the complete target profile ($s_0, q_0, q_{bg}, S, \lambda_q$)
- λ_q : Exponential power fall-off at the divertor entrance

$$q(\bar{s}) = q_0 \cdot \exp\left(-\frac{\bar{s}}{\lambda_q f_x}\right)$$

S: Exponential profile radially diffused along the divertor leg:
convolution with Gaussian of width S

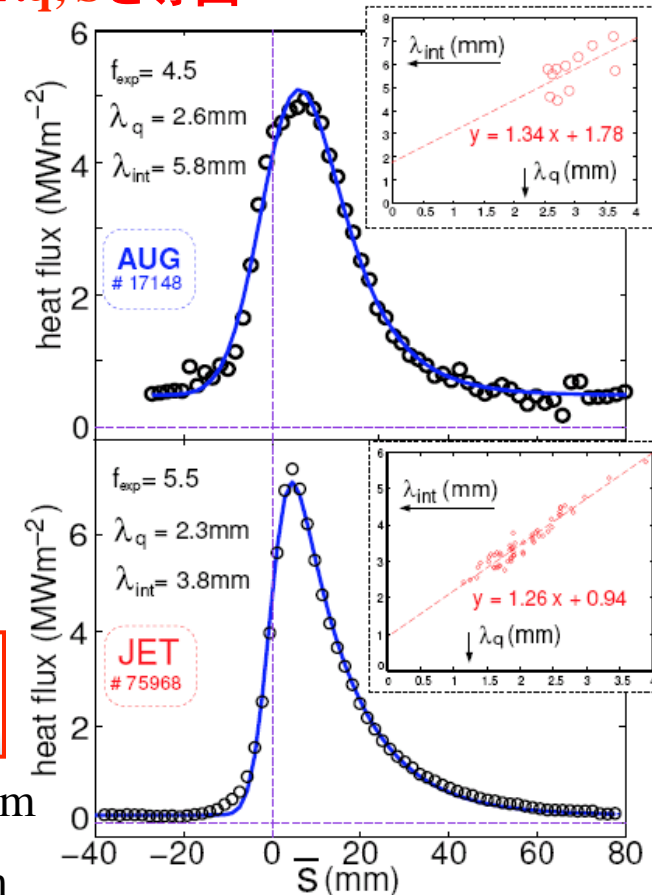
$$q(\bar{s}) = \frac{q_0}{2} \exp\left(\left(\frac{S}{2\lambda_q f_x}\right)^2 - \frac{\bar{s}}{\lambda_q f_x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{S}{2\lambda_q f_x} - \frac{\bar{s}}{S}\right) + q_{BG}$$

JET I_p : 1.5-3.5MA ⇒ λ_q : 3.5 to 1.3mm S: ~1 to ~0.6mm

AUG I_p : 0.8-1.2MA ⇒ λ_q : 4.0 to 2.0mm S: 2.3 to 1.3mm

注) 積分平均による熱流幅スケーリングは数10%程度広がる。
小さいときはベース部分による違いを反映。

$$\lambda_{int} = \frac{\int (q(s) - q_{BG}) ds}{q_{max}} \cdot f_x^{-1}$$



$$\lambda_{int}^{JET} = 1.26 \cdot \lambda_q^{JET} + (0.94 \pm 0.32) \text{ mm}$$

$$\lambda_{int}^{AUG} = 1.34 \cdot \lambda_q^{AUG} + (1.78 \pm 0.68) \text{ mm}$$

SOLでの熱流の分布幅のスケーリング2 (EU)

4

炭素ダイバータで重水素放電、
SOLは低密度(Hモード)で接触
ダイバータ熱負荷分布の λ_q を
スケーリング

Quantity	Unit	JET	AUG	AUG extended*
Btor	T	1.0 - 3.35	2.0-2.4	1.5-2.6
Current	MA	1.0 - 3.5	0.8-0.9	0.8-1.2
Q95	1	2.8 - 5.6	4.5-5.1	3.2-5.7
PNBI	MW	5 - 20	2.5-12.5	2.5-12.5
f_GW	1	0.44-0.85	0.49-0.73	0.37-0.79
Flux expansion	mm	4.9-7.8	4.5-6.8	4.5-7.2
R, a (κ)	m (1)	2.95, 0.95 (1.7)	1.62, 0.51 (1.8)	1.62, 0.51 (1.8)
Discharges (D)	-	56	11	35

サイズスケーリングも導入
(ほぼ依存しない)



$$\lambda_q\text{-ITER} = 0.94\text{mm}$$

Regression parameter	$\lambda_q (mm) = C \cdot B_{tor}^\alpha (T) \cdot q_{cyl}^\beta \cdot P_{SOL}^\gamma (MW)$
AUG* only	$\lambda_q = 0.68 \cdot B_{tor}^{-0.76} \cdot q_{cyl}^{1.29} \cdot P_{SOL}^{0.14}$
JET only	$\lambda_q = 0.70 \cdot B_{tor}^{-0.84} \cdot q_{cyl}^{1.23} \cdot P_{SOL}^{0.14}$

Regression parameter	$\lambda_q (mm) = C \cdot B_{tor}^\alpha (T) \cdot q_{cyl}^\beta \cdot P_{SOL}^\gamma (MW) \cdot R_{geo}^\delta (m)$
AUG + JET	$\lambda_q = 0.73 \cdot B_{tor}^{-0.78} \cdot q_{cyl}^{1.20} \cdot P_{SOL}^{0.10} \cdot R_{geo}^{0.02}$

今後の検討事項:

ダイバータでの輸送効果Sのスケーリングを検討(JETでは0.5-1mm程度(赤道面にマッピング))

- 幾何形状、磁力線長、非接触でのエネルギー散逸の影響?

ITER	R _{geo}	a	B _t	I _p	q _{cyl}	P _{sol}
	m	m	T	MA	1	MW
	6.2	2	5.3	15	2.4	120

SOLでの熱流の分布幅のスケーリング3 (US)

5

炭素ダイバータで重水素放電のデータの λ_q, S をスケーリング

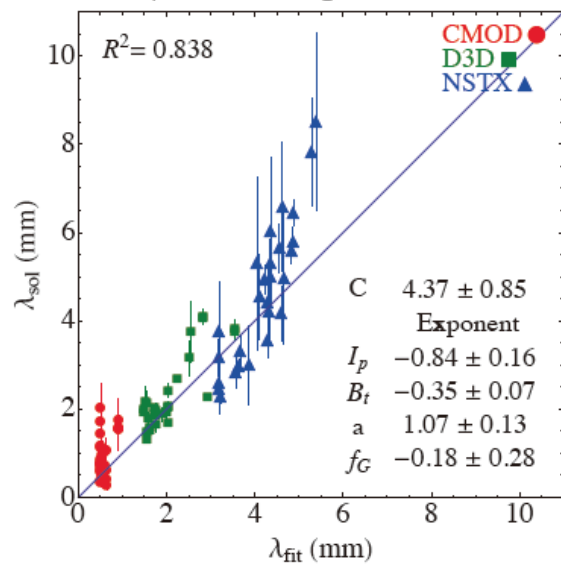
	I_p (MA)	B_t (T)	f_{GW}	a (m)	R (m)	P_{sol} (MW)
Range	3.0 x	14.7 x	3.0 x	2.7 x	2.5 x	9.8 x
CMOD	0.5 - 1.0	4.6 - 6.2	0.3 - 0.7	0.22	0.69	0.6 - 3.0
DIII-D	0.5 - 1.5	1.2 - 2.1	0.4 - 0.6	0.60	1.75	1.2 - 4.5
NSTX	0.6 - 1.2	0.42 - 0.49	0.3 - 0.9	0.60	0.86	2.4 - 5.9

$$q_{\parallel}(s) = \frac{q_{\parallel,0}}{N\sqrt{\pi w_{pvt}^2}} \int_0^{\infty} e^{-(s-s')^2/w_{pvt}^2} e^{-s'/\lambda_{sol}} ds' + q_{bkg}$$

$$\lambda_{eich-int} = \frac{1}{a_{int}} \int_{-\infty}^{\infty} [q_{\parallel}(s) - q_{bkg}] ds \approx \lambda_{sol} + 1.64 w_{pvt}$$

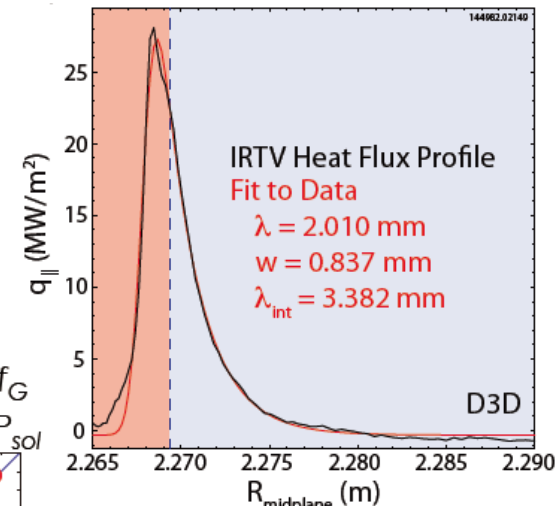
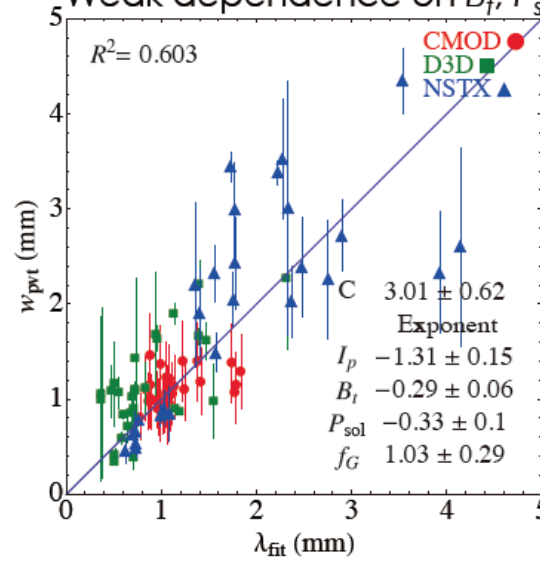
• SOL (λ_{sol})

- Strong dependence on I_p, a
- Weak B_t and no f_G dependence



• Private flux (w_{pvt})

- Strong dependence on I_p, f_G
- Weak dependence on B_t, P_{sol}

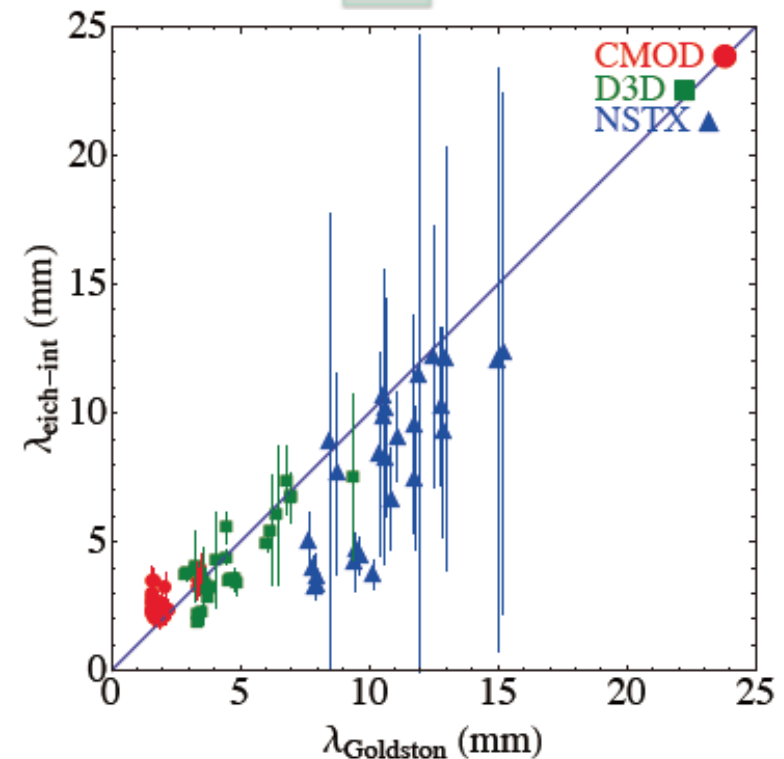
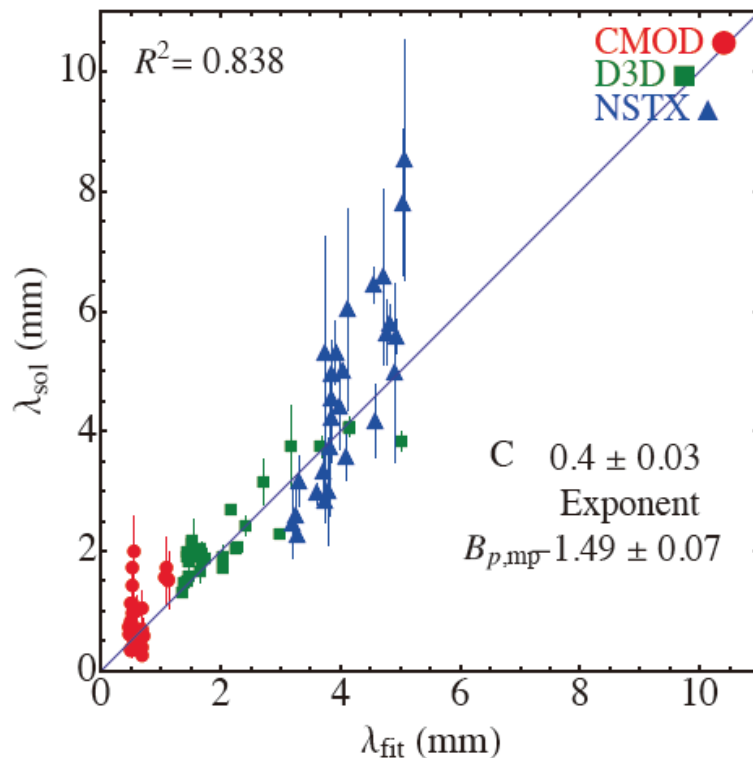


λ_q のスケーリングでは
プラズマ電流と小半径
が支配的

a/I_p 依存性 $\Rightarrow \beta_p$ によるスケーリングを示唆

Goldstoneにより提案されたドリフトを加味した予測モデルとも比較的合う

$$\lambda_{q||, \text{Goldston}} = 5671 \cdot P_{\text{sol}}^{1/8} \frac{(1 + \kappa^2)^{5/8} a^{17/8} B^{1/4}}{I_p^{9/8} R} \left(\frac{2\bar{A}}{1 + \bar{Z}} \right)^{7/16} \left(\frac{Z_{\text{eff}} + 4}{5} \right)^{1/8}$$



DIII-Dでは赤道面でのトムソン散乱測定による $n_e(>5\text{mm})$ $T_e(>5\text{mm})$ $p_e(>4\text{mm})$ 分布からも熱流束分布を評価

pol. gyro-radius ($1/B_p^{\text{mid}}$) に比例する

$$\frac{a^{17/8}}{I_p^{9/8} R} \approx \frac{a^2}{I_p R} = \frac{a}{R} \frac{1}{B_p}$$

ITERでの熱流束分布の影響 1

7

粒子拡散係数及び熱拡散係数を同時に1/2, 1/4に減少

⇒ λ_q は3.5mm → 1.5-2mm → 1.3-1.5mmに減少

ダイバータでのピーク熱負荷は非接触が進めば10 MW/m²以下になる

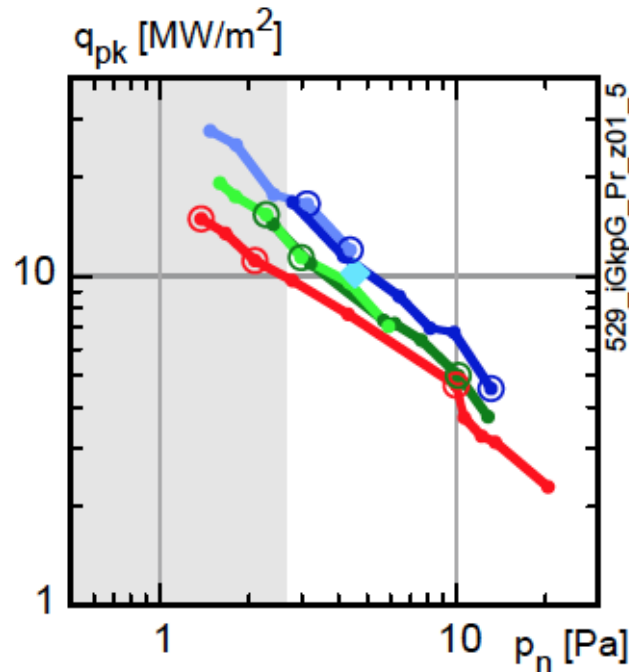
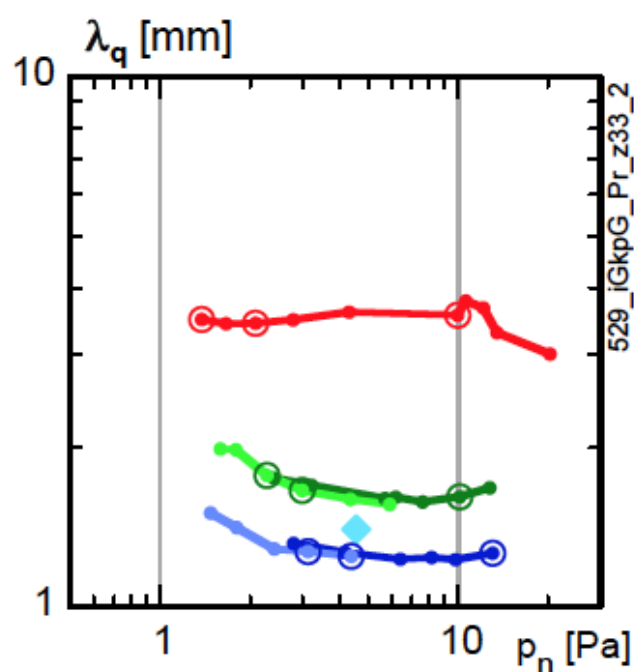
Constant $\perp$ diffusivities, 3 sets

x1: $D_{\perp} = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$, $\chi_{\perp i,e} = 1 \text{ m}^2/\text{s}$

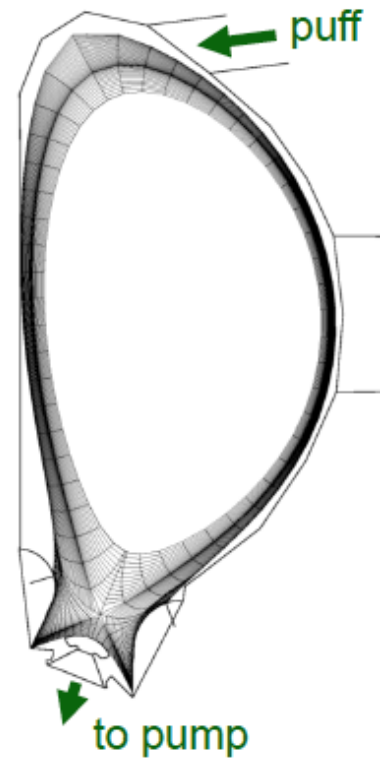
x2: $D_{\perp} = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$, $\chi_{\perp i,e} = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$

x4: $D_{\perp} = 0.075 \text{ m}^2/\text{s}$, $\chi_{\perp i,e} = 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$

Radial grid spacing finer near separatrix for *x2*, *x4*



B2 grid

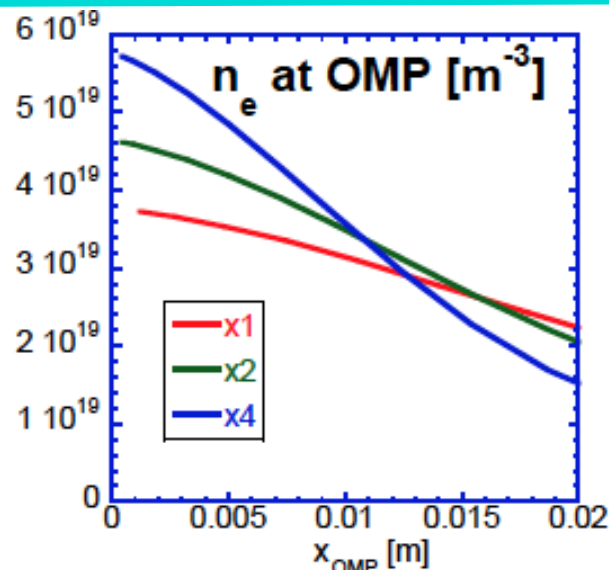
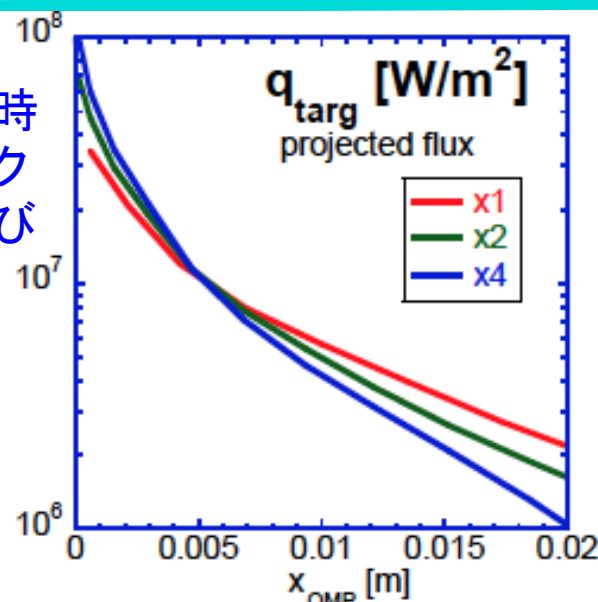


ITERでの熱流束分布の影響 2

8

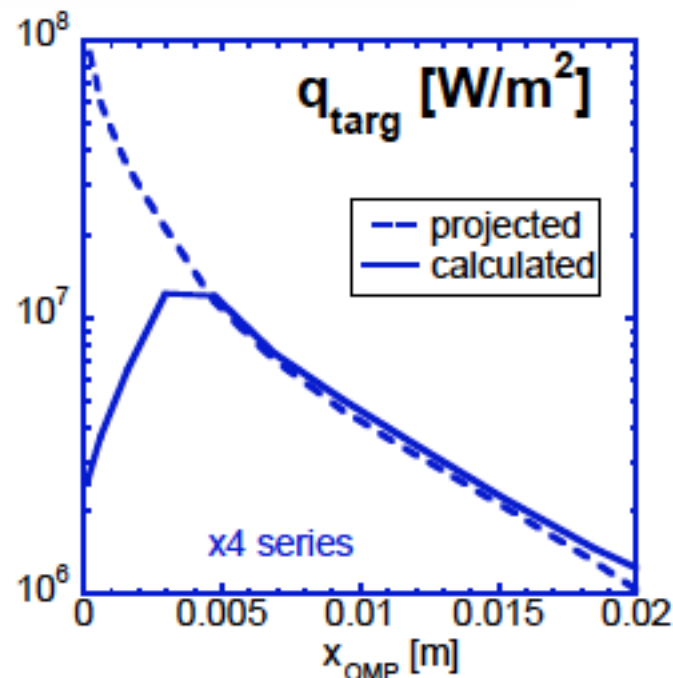
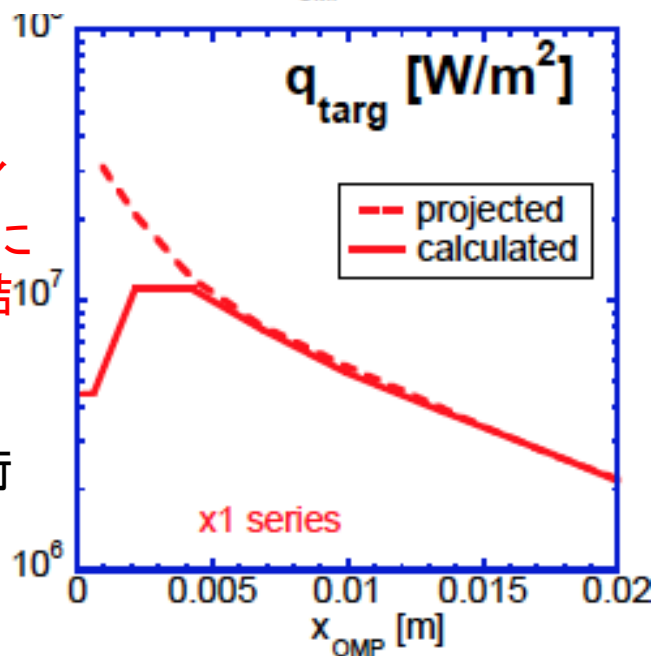
粒子及び熱拡散係数を同時に減少するためセパトリクス付近での熱流束密度及び粒子束密度共に増加

⇒ 上流での密度も増加



ダイバータ上流での熱負荷ピークは増加するが、高サイクリング (P_n) ではダイバータにおけるエネルギーロスと再結合も増加

⇒ ダイバータ板での熱負荷は同程度になる



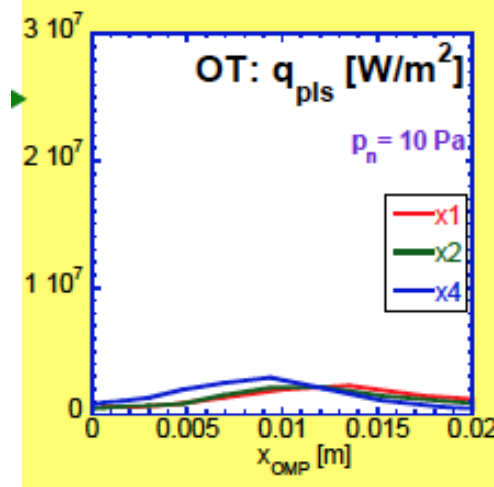
ITERでの熱流束分布の影響 3

9

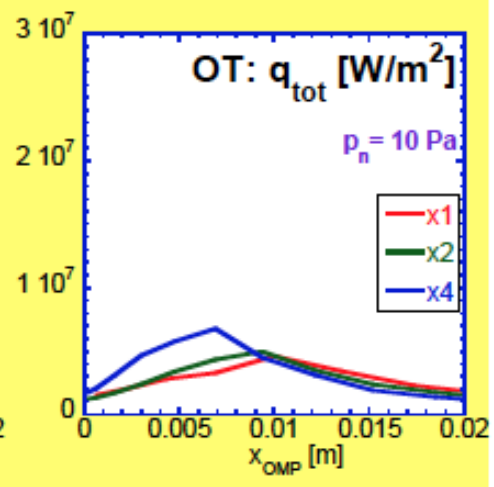
高サイクリング ($P_n=10\text{Pa}$)では、
プラズマによる熱流は低減

⇒ ターゲット付近での放射損失が顕著となり熱負荷ピークが増加(右図)

プラズマによる熱流分布

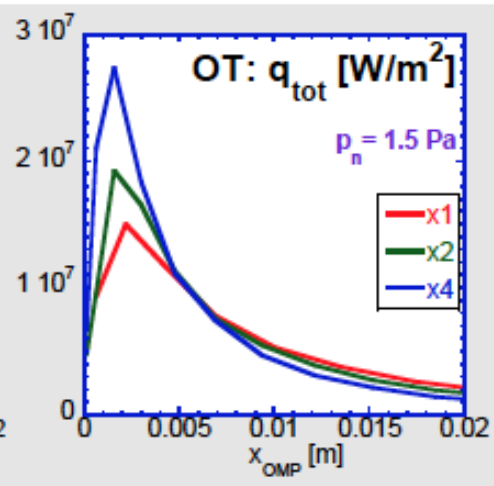
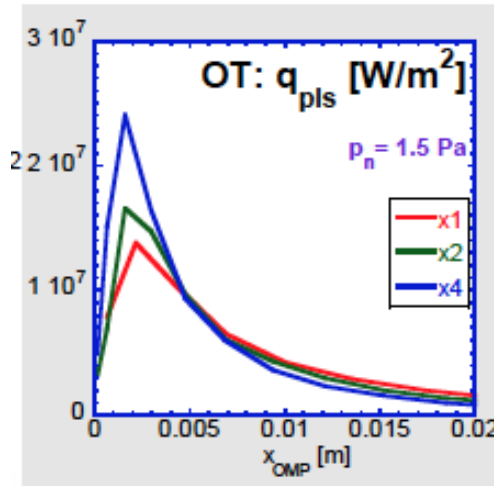


放射熱を入れた熱負荷分布



低サイクリング ($P_n=1.5\text{Pa}$)では、
プラズマによる熱流が顕著

⇒ ピーク熱負荷は
(1/4ケース) 26MW/m^2
(通常) 13MW/m^2



1/4ケースでは、SOLでの(最大)プラズマ圧力勾配がペデスタル部よりも大きくなる！

実験経験とは矛盾するため問題 ⇒ 熱・粒子拡散係数同時変化、拡散係数一様の問題

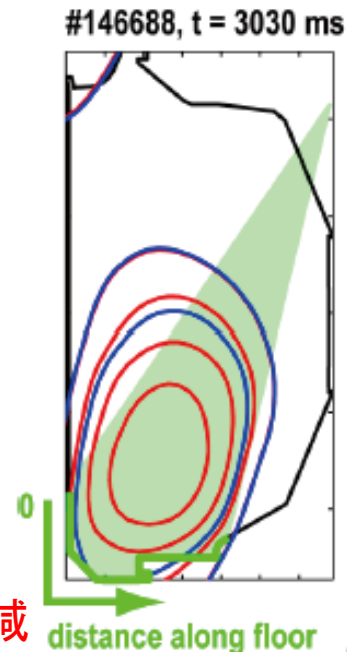
Experiment: ∇p_{SOL} weaker than ∇p_{ped} ⇔ SOLPS: $\nabla p_{\text{SOL}} > \nabla p_{\text{crit}}$ for $\lambda_q \leq 2 \text{ mm}$, $P_{\text{SOL}} = 100 \text{ MW}$

$$\Rightarrow \nabla p_{\text{SOL}} < \frac{\alpha_{\text{bln}} B^2}{2\mu_0 q^2 R} \text{ where } \alpha_{\text{bln}} \sim 1$$

VDEによる第一壁熱負荷と不純物ガスMGI(Massive Gas Injection)実験の報告

DIII-D:

- 通常のVDEは30ms程度の時間スケール:
プラズマが下側内壁と外側バッフルにあたり、
TQで最も大きなピーク熱負荷
⇒ CQ初期で炭素による放射損失がピーク
- VDEの開始からのNe-MGI時刻をスキャン(5-24ms):
下側へのシフトが速くなる
早期入射(<10ms)ほどTQでの熱負荷は低減(プラズマ束は増加)、
CQでの熱負荷は若干低減:
⇒ 約半分程度のダイバータへの熱負荷(プラズマと放射パワー)を低減
Neによる放射損失が増加 ⇒ 第一壁からの炭素の損耗を低減
トロイダル非対称性も低減し、容器に流れる電流の低減により半分以上の $j \times B$ 低減可能



C-MOD:

- 内外ダイバータタイルに、表面TCとカロリメータアレイを設置(2.6ms時間応答)
- VDEおよび溶融したWによるDisruption実験を行う
⇒ 両者とも熱負荷分布は広がり、ダイバータ部よりもバッフル板の方に高い熱負荷:
MGIの方がより大きな熱負荷(Mag. W → plasma Wへ)

JET-ILW:

- ILWでは一般に放射損失が減少し、CQ時間が増加
⇒ 高い温度が維持される
- VDE:** 上側の内側第一壁とダンププレートに接触する
OHでもNBI中でも($W_{rad}/(W_{mag}+W_{th}) < 10\%$)
- Upper dump plate のエッジが溶融

MGIによる緩和(CダイバーとILWとの比較)

- D2入射の場合、放射損失が減少 ⇒ CQ時間が増加(30→80ms)
- Ar+D2 MGIの場合は、同程度まで放射損失が増加
⇒ dump plate への熱負荷低減

C: ($W_{rad}/(W_{mag}+W_{th}) < 80\%$)

ILW: ($W_{rad}/(W_{mag}+W_{th}) < 30\%$)

