

Heat flux & Disruption (session 6-10) 概要 第18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25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

第3回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター会合

第1回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター会合

平成25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「磁化プラズマ中の壁不純物粒子挙動とプラズマ特性への影響」会合

平成25年8月29-30日 つくばサイエンスインフォメーションセンター

18th ITPA SOL & Divertor Physics TG meeting (Hefei) 1 2

- 3月19-22日の4日間、中国科学院プラズマ物理研究所(合肥)で開催、合計87名の参加：中(60), 欧(13), 米(5), 日(4), 韓(2)およびITER機構(3). **プラ核学会誌6月号参照**
- 中国から60名の参加があり、中国各地の研究機関や大学から核融合以外の分野(材料工学やプロセスプラズマ関係など)の若い研究者も多く参加していた。
- ITER機構から依頼された物理課題：(1)プラズマ輸送と定常及びパルス熱負荷の評価・制御, (2) タングステンのプラズマ対向特性全般, (3)ベリリウム第一壁およびタングステン・ダイバータ材の損耗堆積・水素蓄積・ダストを総合的に検討
- ITER機構からの「開始からフルタングステンダイバータ」提案について意見がまとめられた**
- ITER機構の代表者より、ITER日本国内機関(JAEA)が製作した炭素-タングステン・ダイバータ実規模プロトタイプユニットに関する熱負荷試験(最大20MW/m², 10秒間を800サイクル)がエフレモフ研究所で本年実施され、**大きなプラズマ熱負荷が予想されるタングステン部分についても成功したことが報告され、ITPA参加の研究者からも高く評価された。**



タングステン・ベリリウムへの
リテンション

ダスト関係：
JET-CとILWのダスト生成量
(生成率の定義法?)

JET-ILWでのダイバータ
及び第一壁での状況

Session 1: Update on EAST			
9:10	0:25	H. Guo	Long pulse operation by active PWI control on EAST
Session 2: Retention (Chair K. Schmid)			
9:35	0:05	K. Schmid	Introduction
9:40	0:20	R. Doerner (M. Baldwin)	Update of TMAP modeling of release from Be codeposits
10:00	0:20	S. Krasheninnikov	Broadband trapping in co-deposits
10:20	0:20	G. De Temmerman (Yehven Zayachuk)	Damage creation under high flux plasmas and the influence on D retention
10:40	0:20		Discussion
11:00	0:20	Coffee/Tea break	
Session 3: Dust (Chair R. Doerner)			
11:20	0:05	R. Doerner	Introduction
11:25	0:20	S. Krasheninnikov (Roman Smirnov)	Modeling of tungsten droplet transport with DUSTT/UEDGE
11:45	0:20	Yongliang Li	Influence of surface roughness on dust production
12:05	0:20	R. A. Pitts	Migration to dust conversion factors from JET all-C
12:25	0:20		Discussion
12:45	1:30	Lunch	
Session 4: Migration (Chair V. Philipps)			
14:15	0:05	V. Philipps	Introduction
14:20	0:20	S. Brezinsek	First views of deposition patterns on JET ILW + plans for post-mortem analysis
14:40	0:20	K. Schmid (K. Krieger)	Benchmarking WALLDYN on JET-ILW Be migration experiments
15:00	0:30	K. Schmid	Application of WALLDYN for the assessment of ITER wall life-time and fuel retention
15:30	0:20	R. A. Pitts	EAST MAPES migration experiment
15:50	0:20	M. Rubel	WF6 injection experiments
16:10	0:20		Discussion
16:30	0:20	Coffee/Tea break	
Session 5: Fuel retention, migration, dust R&D (Chair R. Doerner)			
16:50	0:30	R. Doerner	Discussion

DIII-DでのSOL熱流束分布と
EASTでのダイバータ熱負荷分布
の評価

内側リミター配位(立ち上げ)に
おける熱負荷分布スケール
(分布幅と第一壁での広がり)

ELM熱流データ(JET-ILW/AUG)

非接触ダイバータの実験データ
ベースとモデリング検討

Session 6: Divertor SOL widths (Chair A. Leonard)			
Start	Duration	Speaker	Topic/Title
17:20	0:05	A. Leonard	Introduction
17:25	0:20	L. Wang	Divertor heat flux widths in EAST
17:45	0:20	A. Leonard	DIII-D tests of stability controlling SS heat flux widths
18:05	0:20		Discussion
Session 7: Limiter SOL widths (Chair R. A. Pitts)			
8:30	0:05	R. A. Pitts	Introduction
8:35	0:20	J. Horacek	Final conclusion on limiter start-up width database
8:55	0:20	J. Horacek	Tests of ITER limiter heat loading on COMPASS
9:15	0:20	J. Coenen	Be limiter power handling and melting in JET
9:35	0:20	R. J. Goldston	Theoretical explanations for narrow heat flux layers near a LCFS
9:55	0:20		Discussion
10:15	0:20	Coffee/Tea break	
Session 8: ELM heat fluxes (Chair J. Coenen)			
10:35	0:05	J. Coenen	Introduction
10:40	0:20	T. Eich	ELM heat load studies in full-metal JET and AUG
11:00	0:20	C. Skinner	ELM heat flux widths on NSTX
11:20	0:20		Discussion
11:40	0:45	EAST Tour	
12:25	1:25	Lunch	
Session 9: Heat flux R&D (Chair A. Leonard)			
13:50	0:30		Discussion
Session 10: Detachment (Chair R. Neu)			
14:20	0:05	R. Neu	Introduction
14:25	0:20	M. Wischmeier	Progress in understanding detachment
14:45	0:20	A. Kukushkin	SOLPS4.3 - EDGE2D/Eirene detachment benchmark on JET
15:05	0:20	C. Skinner	Detachment studies on NSTX
15:25	0:20	Y. Chen	SOLPS modelling of radiative divertor plasma operation on EAST
15:45	0:20		Discussion

高熱負荷に対するタングステン損傷

Session 11: Tungsten damage under heat fluxes (Chair R. A. Pitts)

16:25	0:05	R. A. Pitts	Introduction
16:30	0:20	J. Linke	Summary on risks and issues of stationary and repeated-pulsed heat loadings
16:50	0:20	G. De Temmerman	Impact of plasma exposure on surface damage of tungsten by transient heat pulse
17:10	0:20	Y. Yuan	Effect of high heat fluxes on tungsten properties
17:30	0:20	J. Yu/R. Doerner	Sacrificial Be layer on plasma-exposed W
17:50	0:20	G. De Temmerman	Effect of ELM-induced melting in terms of layer stability and power handling
18:10	0:20		Discussion

MD-PWIモデリング

Session 12: Molecular dynamics (Chair Y. Ueda)

9:00	0:05	Y. Ueda	Introduction
9:05	0:20	S. Krashenninikov	On the scaling laws of the helium cluster dynamics and implications for "fuzz" and nano-bubble formations
9:25	0:20	G. H. Lu	Growth mechanism of hydrogen blisters in tungsten
9:45	0:20		Discussion

Session 13: Tungsten R&D (Chair Y. Ueda)

10:05	0:30	Y. Ueda	Discussion
10:35	0:20	Coffee/Tea break	

Session 14: W technology development (Chair J. Linke)

10:55	0:05	J. Linke	Introduction
11:00	0:20	G. Luo	Progress of ITER-like W/Cu divertor for EAST/R & D of new grades of tungsten materials for ITER and beyond
11:20	0:20	R. A. Pitts (for IO Divertor Section)	High heat flux tests on JA-DA ITER divertor full-scale prototypes
11:40	0:20		Discussion

タングステンダイバータ工学・試験 (EAST & ITER: JA-DA)

- 運転開始後10年間にわたり「フルタングステン・ダイバータ」で行うITER機構の提案に関して、
- (Session15) 定常及びパルス熱負荷によるタングステン対向材に関する評価(代表: Coenen),
 - (Session16) トリチウムの容器内への蓄積・除去およびダストの評価(代表: Tsitrone),
 - (Session17) 水素同位体及びヘリウムプラズマ照射によるタングステンの表面変化やベリリウムとの合金化による影響の評価(代表: 上田),
 - (Session18) ダイバータ運転やプラズマへの蓄積・制御, コンディショニングなどの評価(代表: Brezinsek), が総括

SOL width, Divertor heat flux, Detachment sessions (6-10) 6

以前の検討にプラスして新たなデータベースのまとめが発表された

DIII-DでのSOL熱流束分布と
EASTでのダイバータ熱負荷分布
の評価

内側リミター配位(立ち上げ)に
おける熱負荷分布スケール
(分布幅と第一壁での広がり)

ELM熱流データ(JET-ILW/AUG)

非接触ダイバータの実験データ
とモデリング検討(AUG&JET)

Session 6: Divertor SOL widths (Chair A. Leonard)			
Start	Duration	Speaker	Topic/Title
17:20	0:05	A. Leonard	Introduction
17:25	0:20	L. Wang	Divertor heat flux widths in EAST
17:45	0:20	A. Leonard	DIII-D tests of stability controlling SS heat flux widths
18:05	0:20		Discussion
Session 7: Limiter SOL widths (Chair R. A. Pitts)			
8:30	0:05	R. A. Pitts	Introduction
8:35	0:20	J. Horacek	Final conclusion on limiter start-up width database
8:55	0:20	J. Horacek	Tests of ITER limiter heat loading on COMPASS
9:15	0:20	J. Coenen	Be limiter power handling and melting in JET
9:35	0:20	R. J. Goldston	Theoretical explanations for narrow heat flux layers near a LCFS
9:55	0:20		Discussion
10:15	0:20		Coffee/Tea break
Session 8: ELM heat fluxes (Chair J. Coenen)			
10:35	0:05	J. Coenen	Introduction
10:40	0:20	T. Eich	ELM heat load studies in full-metal JET and AUG
11:00	0:20	C. Skinner	ELM heat flux widths on NSTX
11:20	0:20		Discussion
11:40	0:45		EAST Tour
12:25	1:25		Lunch
Session 9: Heat flux R&D (Chair A. Leonard)			
13:50	0:30		Discussion
Session 10: Detachment (Chair R. Neu)			
14:20	0:05	R. Neu	Introduction
14:25	0:20	M. Wischmeier	Progress in understanding detachment
14:45	0:20	A. Kukushkin	SOLPS4.3 - EDGE2D/Eirene detachment benchmark on JET
15:05	0:20	C. Skinner	Detachment studies on NSTX
15:25	0:20	Y. Chen	SOLPS modelling of radiative divertor plasma operation on EAST
15:45	0:20		Discussion

ダイバータでの熱負荷分布の理解にはSOLの熱流束分布 ($q_{||}$) の理解が必要
 ⇒ セパトリクス-SOLでの分布とMHD不安定性解析により、熱流束分布が決まる機構を理解

- ・ トムソン散乱 (赤道面) +CXRS (Ti分布) によるELM間での計測データを解析
- ・ +-1cm程度の幅で各種のフィットを試みる ⇒ 勾配の評価に敏感

パラメータスキャン:

$I_p = 0.5 - 1.5 \text{ MA}$, $\delta_{up} = 0.1 - 0.4$,

$P_{NB} = 1.5 - 8.5 \text{ MW}$

⇒ I_p 依存性 ($\lambda_q = 4 \rightarrow 2 \text{ mm}$ へ減少) は

Eickスケール同様強い

δ_{up} & P_{NB} 依存性も考えられる

$$q_{||} = \frac{P_{SOL}}{4\pi\lambda_q R [B_\theta/B_\phi]_{OMP}}$$

- Two parallel transport models

Low Collisionality: $q_{||,flux} = an_e T_e \sqrt{\frac{T_e}{m_e}}$

$$\lambda_{q,flux} = \left(\frac{1}{\lambda_{ne}} + \frac{3/2}{\lambda_{Te}} \right)^{-1}$$

High Collisionality: $q_{||,cond} = \frac{2\kappa T_e^{7/2}}{7L_{||}}$

$$\lambda_{q,cond} = \frac{2}{7} \lambda_{Te}$$

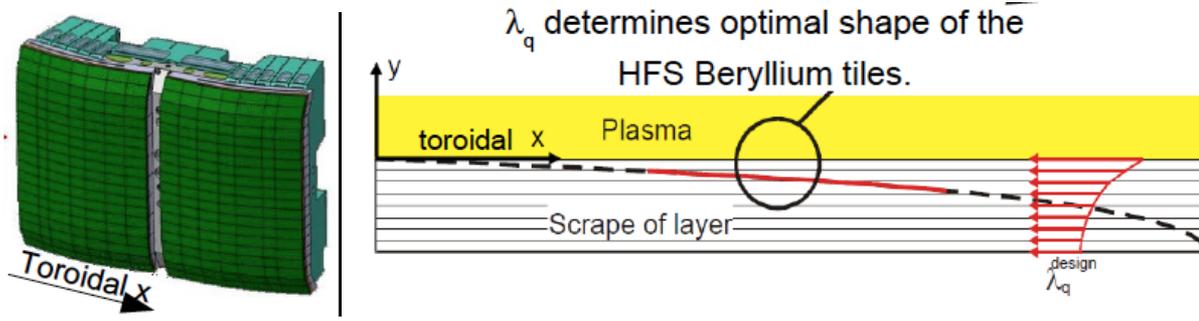
n_e, T_e, P_e とその勾配についてフィッティングによる傾向を検討 (省略)

セパトリクスやSOLではイオン温度とその勾配が総プラズマ圧力に寄与

ブートストラップ電流の寄与を入れたバルニグ不安定解析 (高n) では、セパトリクス付近の勾配は1st 安定化の限界により決まる (低磁場側に局在)

⇒ I_p 以外の δ_{up} , P_{NB} 依存性についても傾向を説明可能

ITERの高磁場側ブランケットの形状設計からの要請



ToreSupraからは入力パワーによる依存則が報告:
データベースはダイバータでのスケージングでは分散

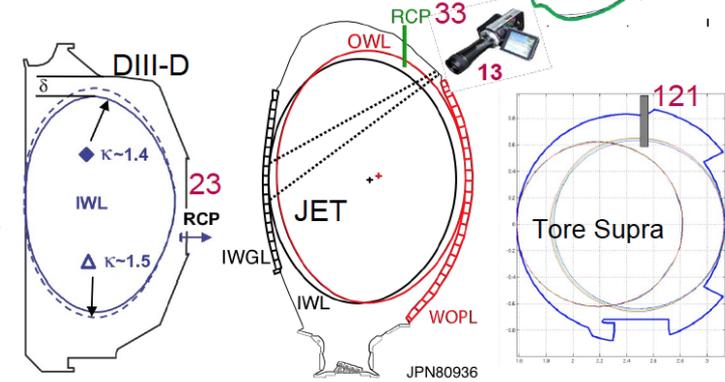
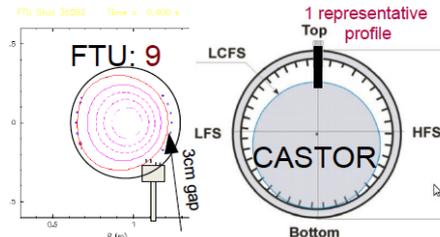
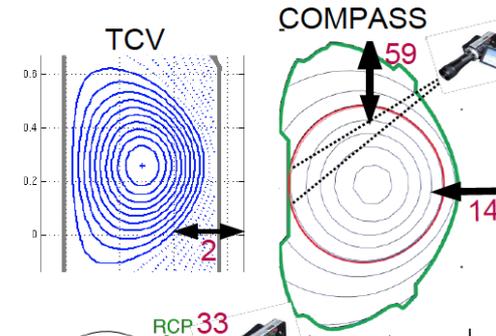
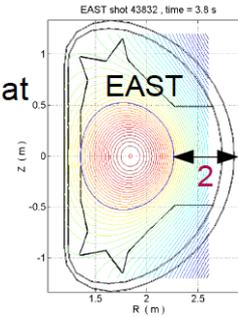
リミター運転でのスケージングを検討

TS: $\lambda_q = \left(1 \pm \frac{1}{10}\right) 0.025 P_{\Omega}^{-0.7}$

ITER $\lambda_q \propto R_0^2 P_{SOL}^{-0.8} n_e^{0.9} q_{95}^{0.5} Z_{eff}^{0.6}$

ITER physics basis, Nuclear Fusion 39 2391 (1999)

1. Perform plasma limited at HFS
2. Measure λ_q , mapped to outboard midplane, using reciprocating probe (IR camera)
3. $\lambda_q \sim f(R_0, B_0, I_p, P_{\Omega}, \dots)$
4. predict λ_q^{ITER}



最もdiviationが小さいフィット(上段中)で行った場合 7.5MAで50mm程度と思われる

・フィットに使用したデータは主にプローブ測定を基本

・JETなどのIRTVではセパトリクス近く(<10mm)で急勾配を観測

ITER scenario	2.5MA	5.0MA	7.5MA
Most credible λ_q [mm]= $=5100(P_{tot}/N)^{-0.37}(a/R)^{0.77}\kappa^{-1.1}$	73	49	44
Mean of 12 most credible scalings λ_q [mm]	83±18	60±11	52±7

・磁場・電流方向を4通り変え、角度による熱負荷の違いイオン・電子側の非対称性などを検討(OH放電)

・角度による熱負荷の違い:

下流での拡散の増加する効果(Funnel effect)はなく、10°板のほうが熱負荷は増加

・非対称性: 電子側の方が熱負荷大 さらに、PS-flowの寄与も考えられる

・基本的には単純な熱負荷モデルで設計可能

セパトリクス付近での熱流増加は指摘 $\text{short } 5\text{mm} < \lambda_q^{\text{near}} < 8\text{mm} \text{ and } \lambda_q^{\text{far}} > 20\text{mm}$

JET-ILWにおける高磁場側第一壁の損傷報告:

8X: 920Cで溶融が発生することを観測 ⇒ 900Cのインターロックは適切
トロイダル非対称性に対処必要、 $J \times B$ により上方向にギャップを越え輸送、
リミター頂点付近で熱流束が急に増加

JET-ILWではペDESTALのエネルギーがCダイバータ(JET-C)と比較して減少
(高密度、不純物ガスパフ時は同レベルに達する): $I_p = 1.3\text{--}3\text{MA}$

報告1: AUG DIV-I(open) DIV-II(semi-close) JETでの Eick scaleのS-parameterの考察
(ガスパフ無しで接触ダイバータ) ⇒ 閉型が進むにつれ増加(0.5 → 2mm)

報告2: Sep密度増加(0.5→ $1.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)によるSの増加の評価(SOLPS): 10倍程度に増加

報告3: N₂ seeding (Lモード)におけるAUGとJET-ILWとの比較(以下は計算結果のみ)

- ・両者中程度の密度での放射損失割合は50-60% (Expとほぼ一致)
- ・JETの場合のみ高放射パワー解が収束
- ・少ないN₂パフ(1/2-1/10)で高放射損失領域に達する
- ・それに従い重水素パフを減少
- ・ドリフト効果の導入は放射損失、非対称性が増加(実験に近づく)

報告4: 非接触ダイバータの理解 高磁場側のダイバータで揺動の発生(PSIでも報告)

- ・高安全係数では低密度でも発生(揺動周期は同じ)
- ・加熱方法(NB/ECH)によらず発生
- ・ I_p/B_t が低いときは、低密度でも発生

報告5: 内側ダイバータでの非接触モデリング ⇒ 揺動輸送の増加が寄与(IAEAでも報告)

報告6: HモードでのN₂パフ実験のシミュレーションを開始
AUGで非接触を安定得る最も有効な方法

JET C vs ILW でのLモードでの密度増加実験モデリング

- ・上流エッジプラズマは測定を再現するよう χ , Dを変化
- ・スパッタリング率は放射損失分布を再現するよう設定
- ・AMD A&Mデータの導入:弾性散乱の寄与⇒Lower Is
- ・Be/Wについては放射損失分布が合わないせいか、ダイバータ計算結果を出していない

報告1:ダイバータでの粒子束分布(熱流束分布も同様)

EDGE2Dの方がSOLPSよりも大きくなる

報告2:SOLPSとEDGE2D同様の傾向を示す

- ・roll-overはSOLPSの方が高密度で発生(Total Pradは同程度)
- ・形状効果は同様な傾向:
 - 内側ダイバータ(垂直)ではストライク点から非接触していく
 - 外側ダイバータ(水平に近い)では(広い領域で)同時に非接触になる