



LHD実験からの長時間放電 研究への展望

2018年7月20日 9:00 ~ 18:00

応用力学研究所2階会議室

核融合科学研究所

笠原 寛史

はじめに

1. プラズマ研究の取り巻く装置サイズと研究課題の現状 (導入)
2. **Large Helical Device(LHD)** を用いたプラズマ研究
 - 達成値・同位体効果への挑戦
 - 長時間プラズマ放電実証へむけた挑戦
 - 今後の長時間放電に求められる課題とは (私見)
3. まとめ

プラズマ研究の取り巻く装置サイズと研究課題の現状

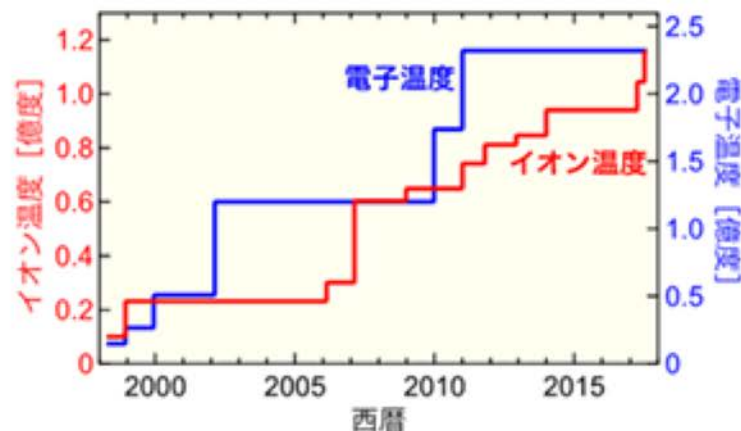
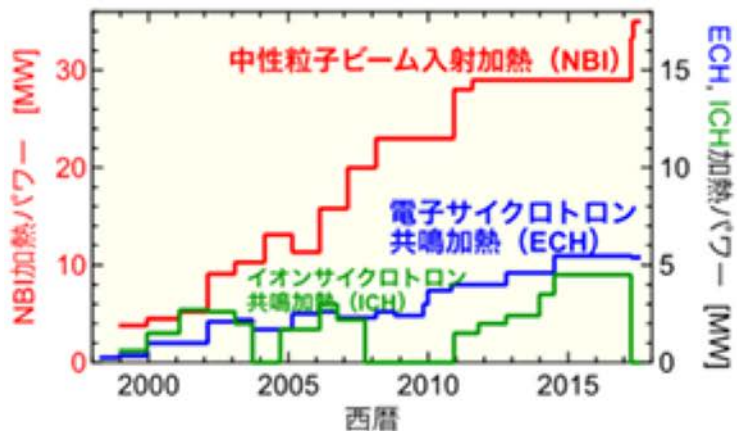
	小型	中型	大型	(実証炉)	商業炉
三重積(密度×温度×閉じ込め時間)	低い ($10^{18}\text{m}^{-3}\times$ 数百eVx 数ms) →	高い ($10^{19}\text{m}^{-3}\times$ 数keVx数 十ms) →	燃烧 ($6\times 10^{19}\text{m}^{-3}\times$ 数十 keVx数百ms) →	自己燃烧 ($10^{20}\text{m}^{-3}\times$ 数十 keVx数s) →	自己燃烧 $10^{20}\text{m}^{-3}\times$ 数十 keVx数s) ~ x1
加熱	ジュール加熱, RF	ジュール加熱, RF, NBI	ジュール加熱, 大電力RF,大電 力NBI	大電力RF,大電 力NBI?	大電力RF,大電 力NBI?
燃料	D, H, He	D, H, He	D, H, He	D, H, T	D, T
放電時間	数百ms	数秒~数千秒	数百~数千秒	総合試験・実証、	コスト運用
研究焦点	物理現象理解	物理現象の理 解・ 新技術の検 証	物理現象の理 解・ コンセプト および工学実証	総合試験・実証、 燃料サイクル	コスト運用
重要課題	学術探究	技術の検証	実証炉を見通す 情報収集	トリチウム生成	メンテナンスコ スト(頻度)

Large Helical Device (LHD)の現状 (1)

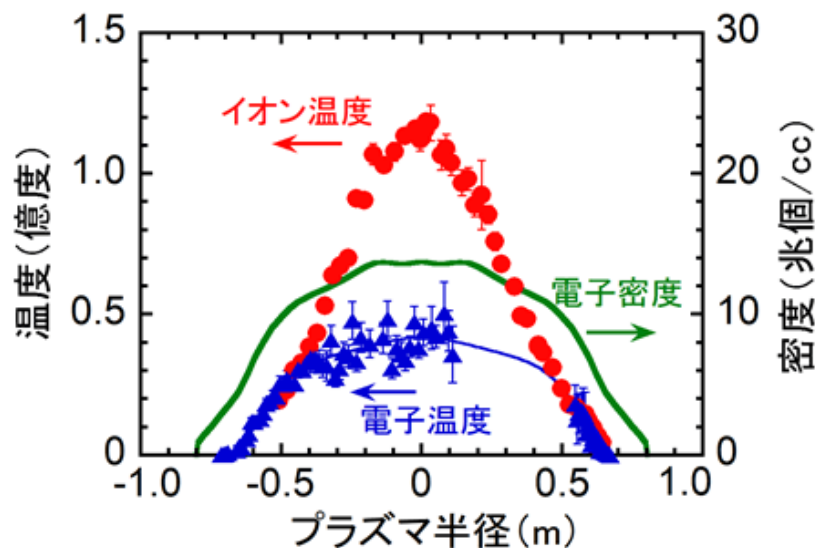
プラズマ性能	LHD達成値	LHD最終目標	核融合炉設計条件 目安
イオン温度	10 keV ($1.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	10 keV ($2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	10keV以上 10^{20}m^{-3} 以上 閉じ込め時間1秒以上
電子温度	20keV ($2 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$), 10keV ($1.6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	10keV ($2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)	
密度	$1.2 \times 10^{21} \text{m}^{-3}$ (0.3keV)	$4 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ (1.3keV)	
ベータ値	5.1% (0.425T), 4.1% (1T)	5% (1-2T)	5%以上 (5T)
定常運転	54min (0.5MW), 48min (1.2MW)	1hour (3MW)	定常(1年)

ヘリカル型融合炉で予定している運転温度10keVは既に到達
高密度化および熱緩和への研究課題が残されている。

Large Helical Device (LHD)の現状 (2)

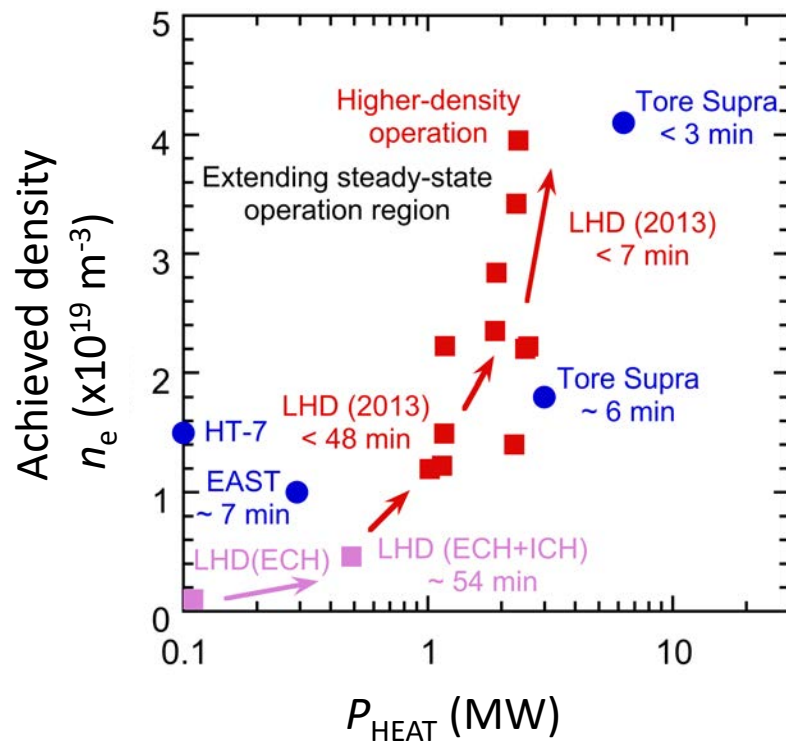
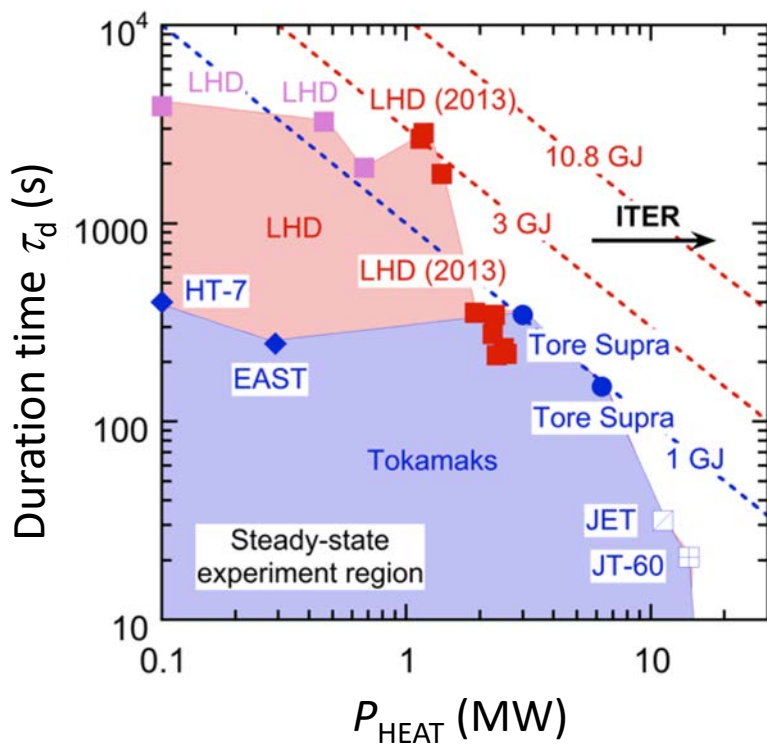


重水素放電で得られた分布



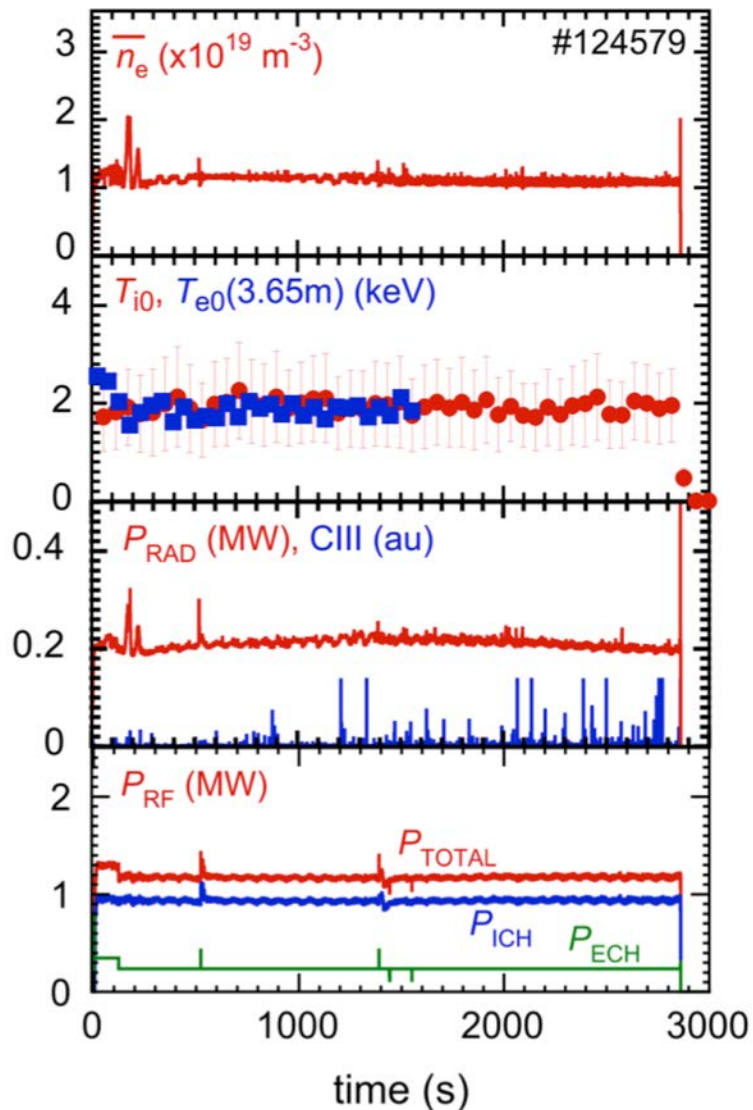
- ヘリカル・ステラレータのISS04スケーリング(通常放電)はトカマクのH-modeスケーリングとは非常に良い一致を示す。
- 高イオン温度達成時には現状ではイオンと電子が熱的に緩和されていない。
- 水素放電時に比べて、電子密度分布はフラットで、炭素の掃き出しも弱いなどの現象を観測 (同位体効果の検証)

ヘリカルプラズマコンセプトの実証 (長時間放電維持 1)



- 高性能長時間放電 (~ 48 min, 1MW-class)
 $1.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, 2keV, 2859s@1.2MW(ECH+ICH), 3.36GJ
- さらなる高性能化を目指した長時間放電 (> 200 sec, 2MW-class)
 $3.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$, 1.5keV, 345s@2.3MW(ECH+ICH)

ヘリカルプラズマコンセプトの実証 (長時間放電維持 2)



長時間放電時の各種達成パラメータ:

$n_e \sim 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_i \sim T_e \sim 2 \text{ keV}$, $\tau_d \sim 2859 \text{ sec}$,
 $P_{\text{RF}} \sim 1.2 \text{ MW}$ ($P_{\text{ICH}} \sim 0.94 \text{ MW}$, $P_{\text{ECH}} \sim 0.24 \text{ MW}$),
 $W_{\text{heat}} \sim 3.4 \text{ GJ}$, $n_{i0} \tau_E^* T_{i0} \sim 3.5 \times 10^{18} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$

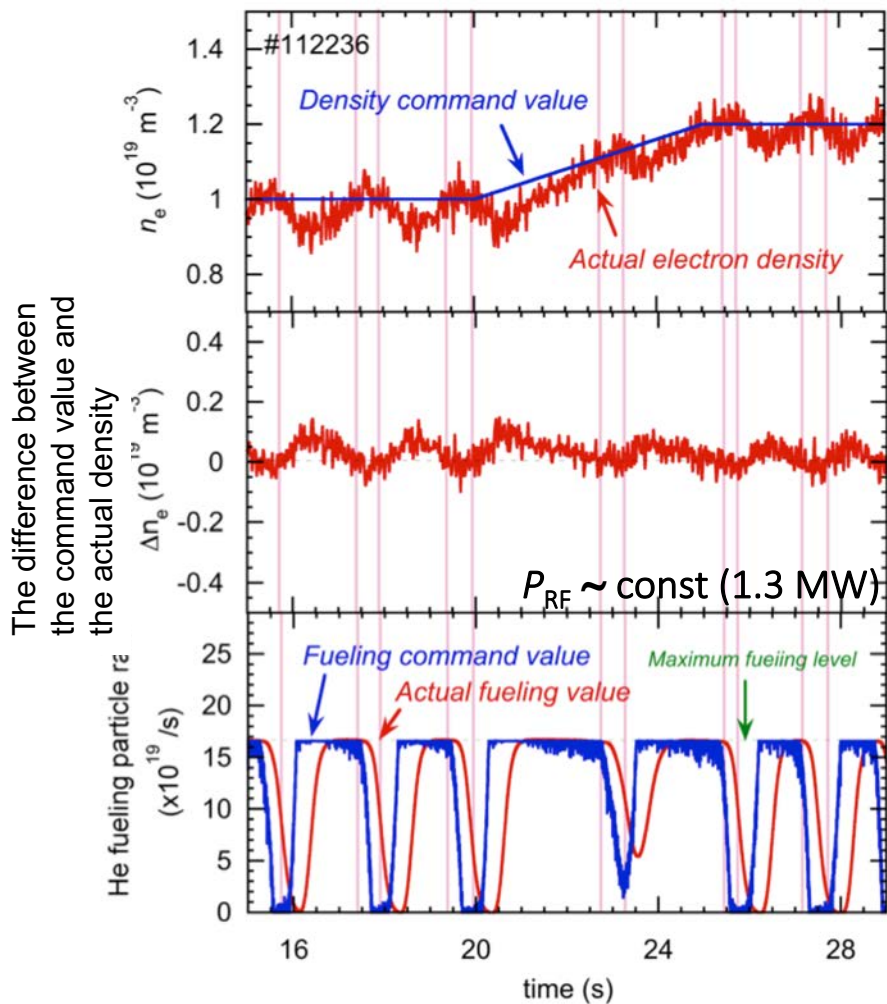
実時間フィードバックによって安定した長時間放電の維持が可能となった

- 安定したプラズマ密度・温度維持
- 不純物の蓄積を無視出来る安定した制動放射
- 安定した大電力RF加熱入力

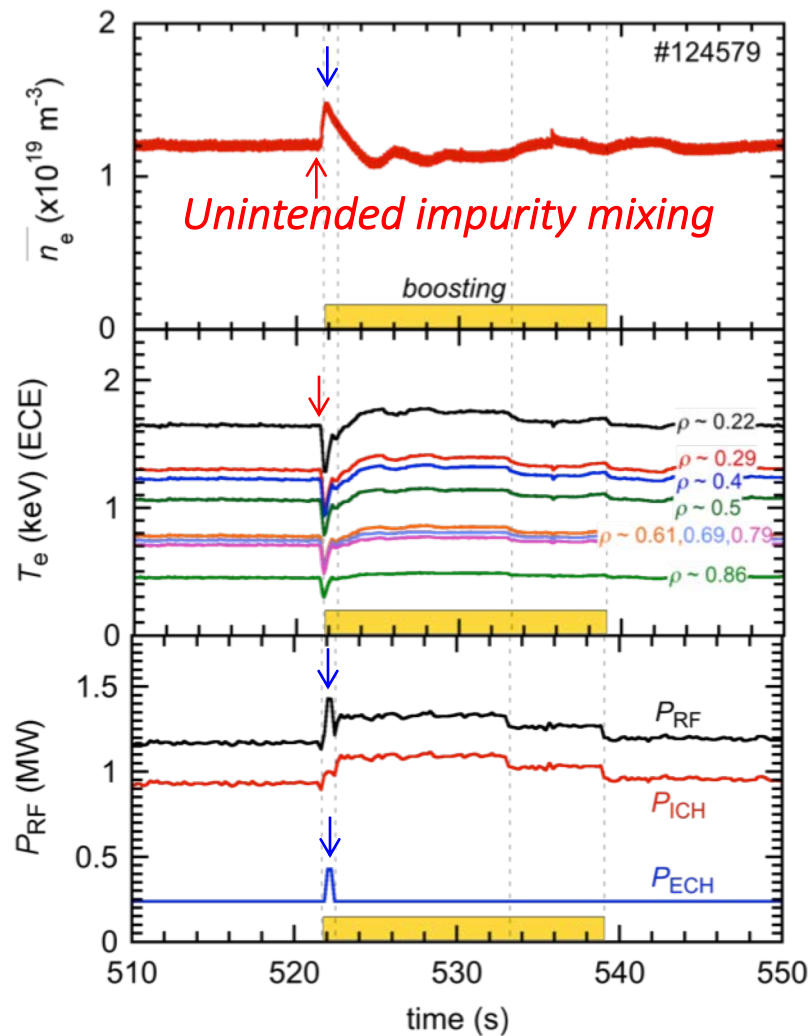
これらの進展により、強固な定常放電の達成が可能となった

ヘリカルプラズマコンセプトの実証 (長時間放電維持 3)

PID制御による適切なガス供給制御



温度低下に対する加熱入力増加

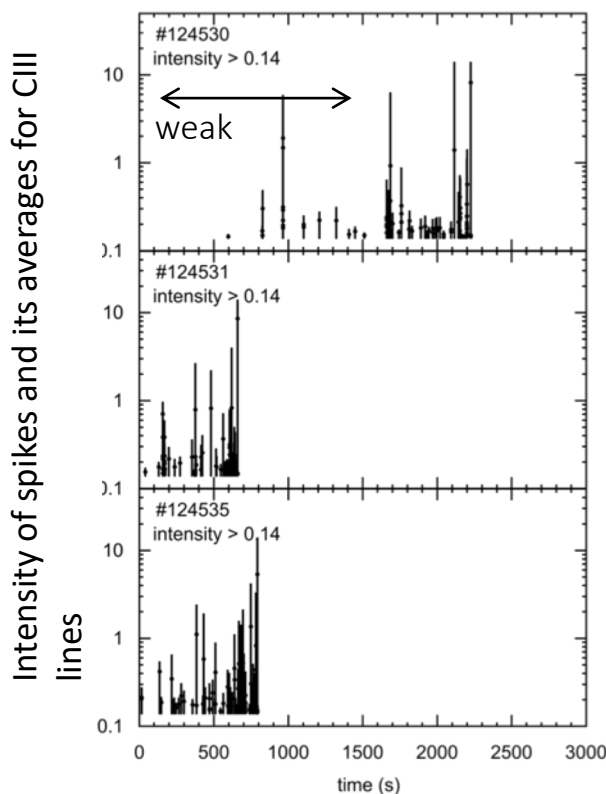


長時間放電で顕著になるプラズマ 周辺部での不純物混入

長時間放電時におけるプラズマ周辺部への不純物混入頻度の変化

短パルスの大電力加熱実験繰り返し直後(~30MW)

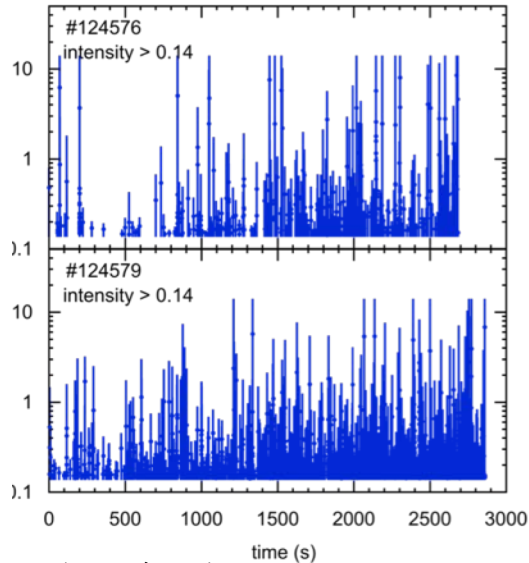
1st day (12/20, Fri)



長時間放電を繰り返すと、顕著な不純物混入が開始する

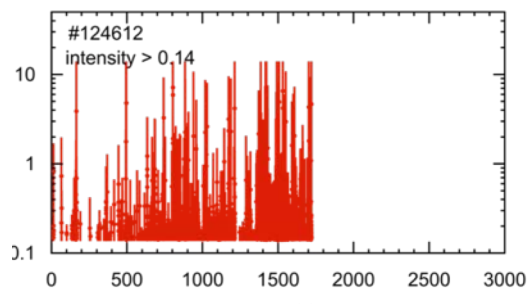
チタンゲッター後、クライオ排気系の再異性後

2nd day (12/24, Tue)

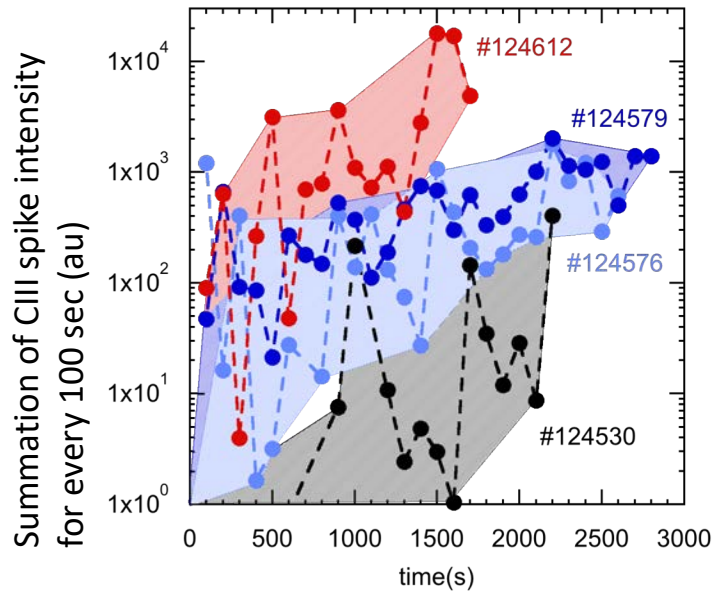


主排気系のみ

3rd day (12/25, Wed)



不純物混入(c)の頻度変化

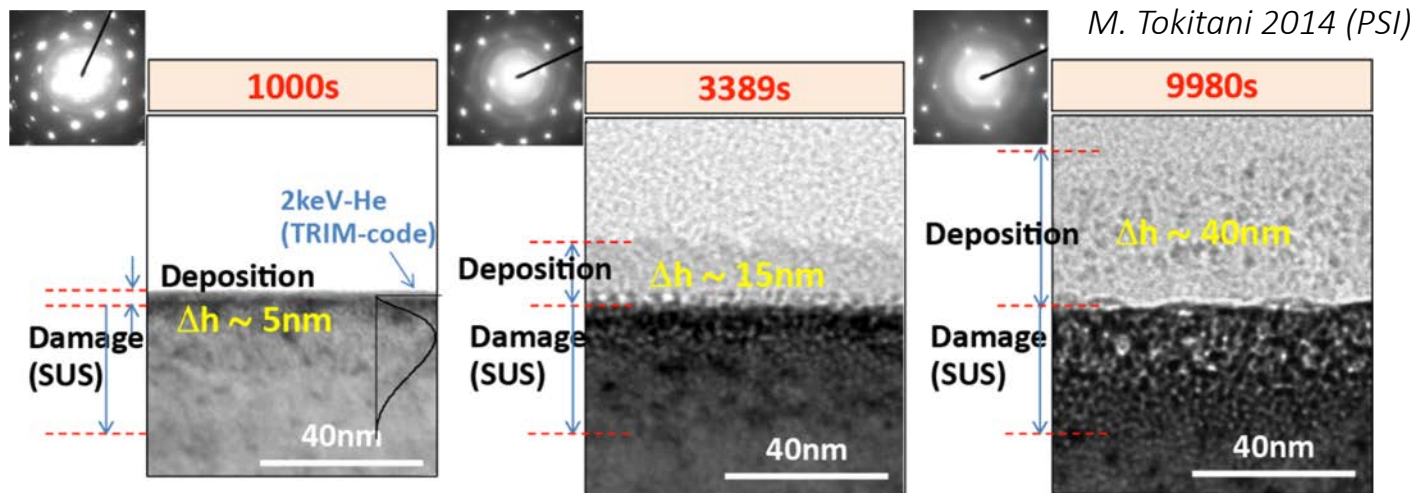
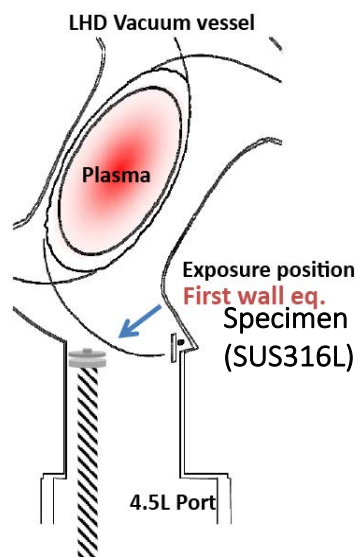


不純物混入と堆積層の厚さには顕著な関係があり、堆積層は容器内において分布を持つ

短パルスの重ねあわせより、長パルスの方が剥離がおき易い傾向にある

長時間放電への試験片暴露による堆積層変化

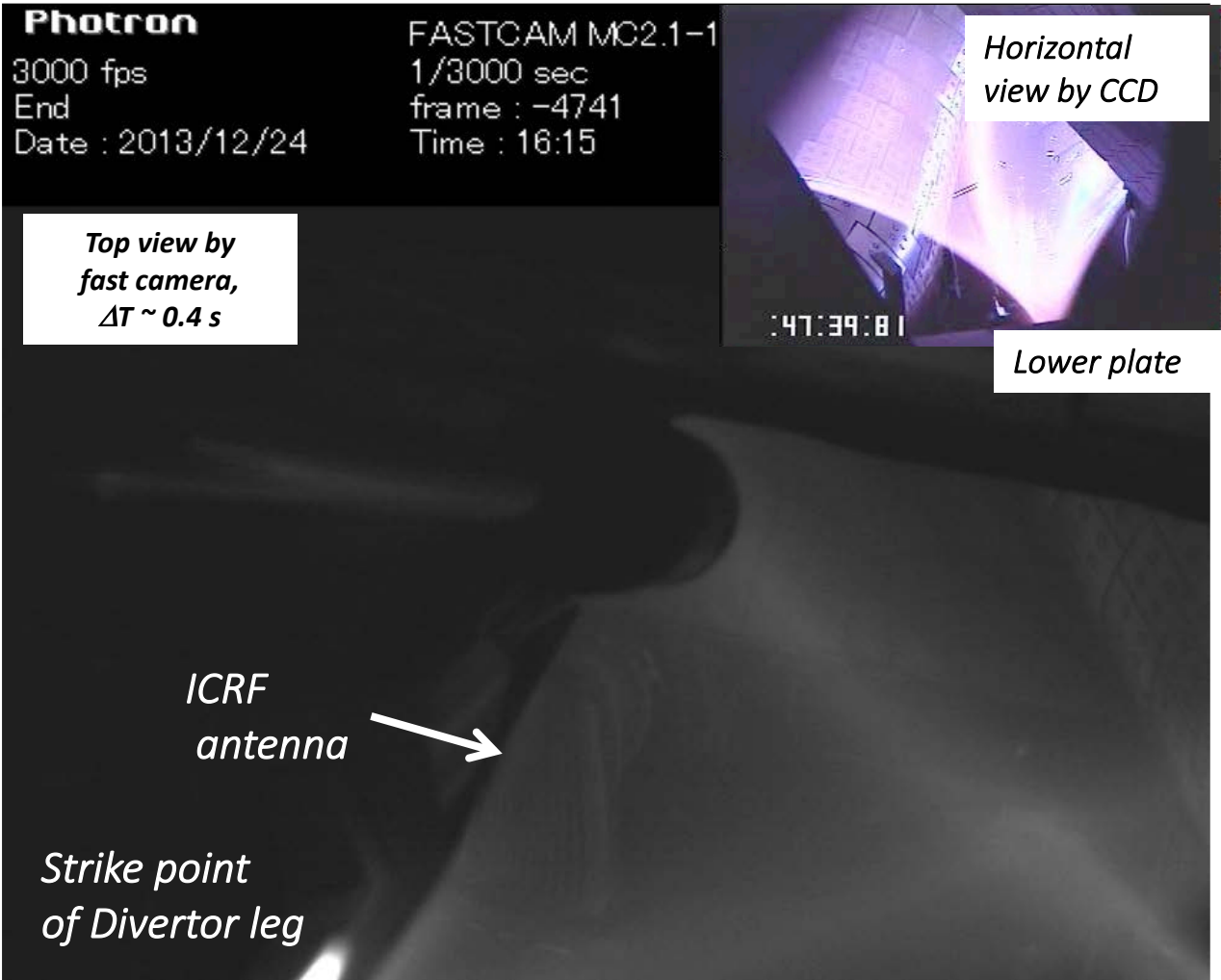
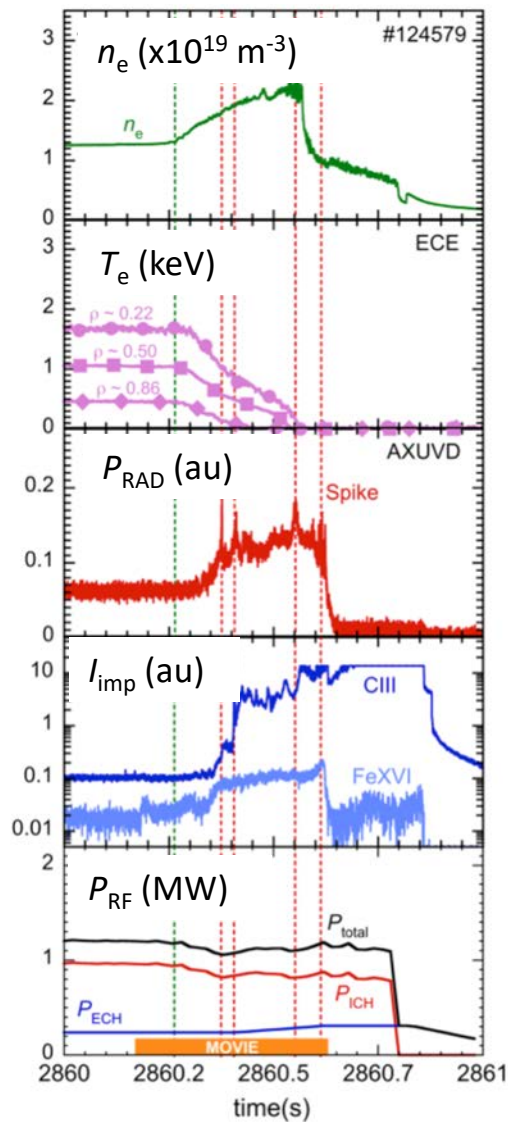
TEM image with long exposure-time for only He SSO.



Exposure time (s)	1000	3389	9980
Thickness (nm)	5	15	40
C ($\times 10^{19}$ atoms/m ²)		260	370 (98%)
Fe ($\times 10^{19}$ atoms/m ²)		3.0	3.8 (1-2%)
Mo ($\times 10^{19}$ atoms/m ²)		0.07	0.23
Desorption ($\times 10^{19}$ He/m ²)	0.63	1.88	10.6 (300-600 K)

RF: 1MW加熱による長時間放電時における試験片での堆積層の成長率は
4 ~ 5 nm/1000s

連続的な剥離混入によるプラズマ冷却



divertor

実験終了後の容器内の強堆積層の剥離

堆積層の剥離は容器内の至る処で観測されている

材料が混在化したアモルファスライクな構造を持つ

ダイバータ周辺部で特に厚い堆積層が観測される

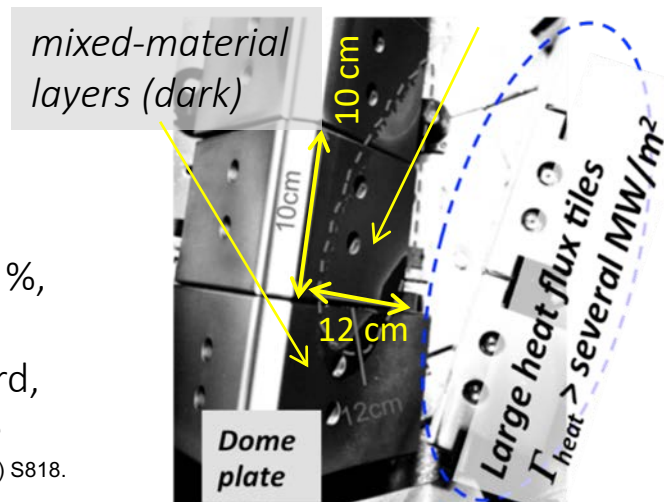
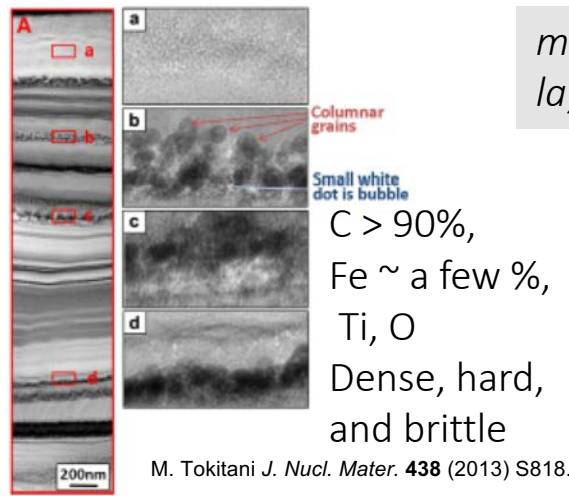
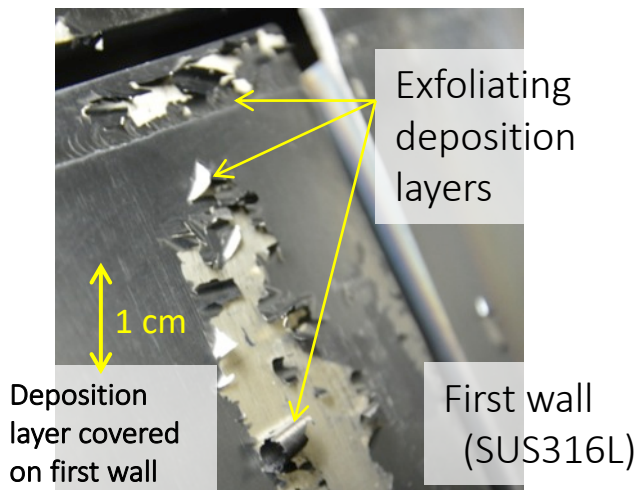
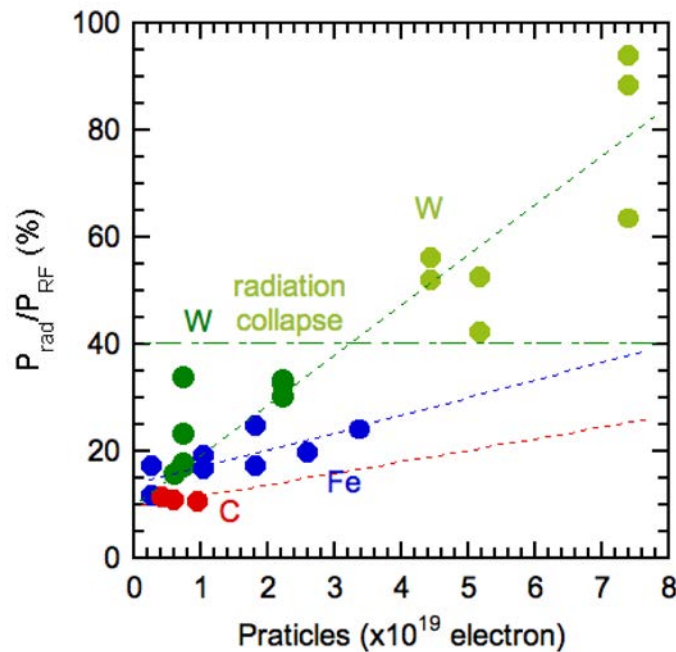


Fig. 3. Right series (a-d): High resolution TEM micrographs corresponding to the small frames in (A).

- 堆積層(MMLs)の主成分は炭素 (>90%)で微量金属として鉄 (~ 数%)が含まれており、密度が高く、硬く脆い構造をもつ。
- 先ほどの定常放電が崩壊した理由は連続的に堆積層が剥離したためであった(~ 10 cm x 12 cm)。破片があるだけでなく、このような定常的な剥離を制御する必要性が将来的には要求される。
- タングステンダイバータを用いた実験でも堆積層は観測されており、放電時間の拡大によりその深刻さが顕現すると思われる。

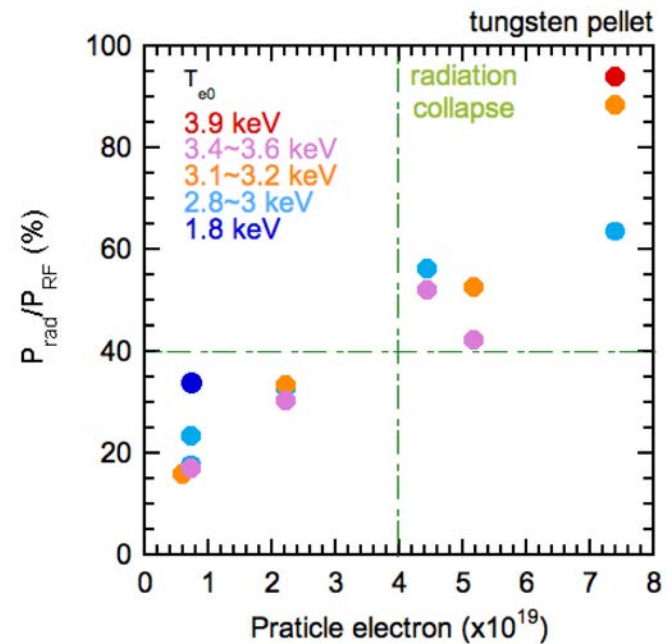
TESPELを用いた不純物混入によるプラズマ維持研究

粒子種による放射量増加の関係
TESPELにより不純物を入射させているため
完全電離しているとして計算



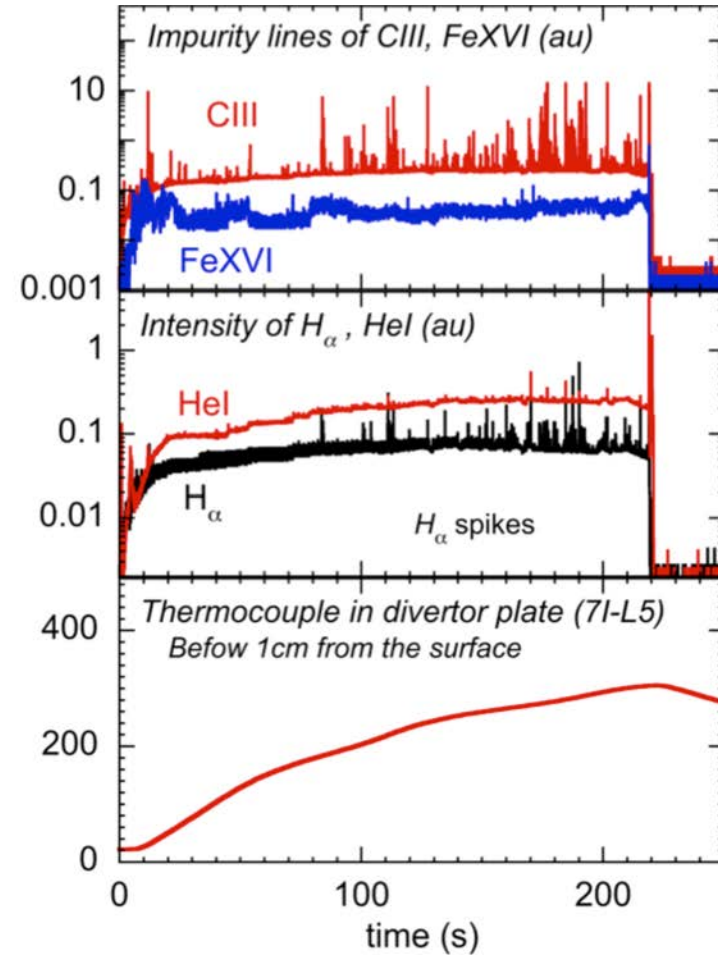
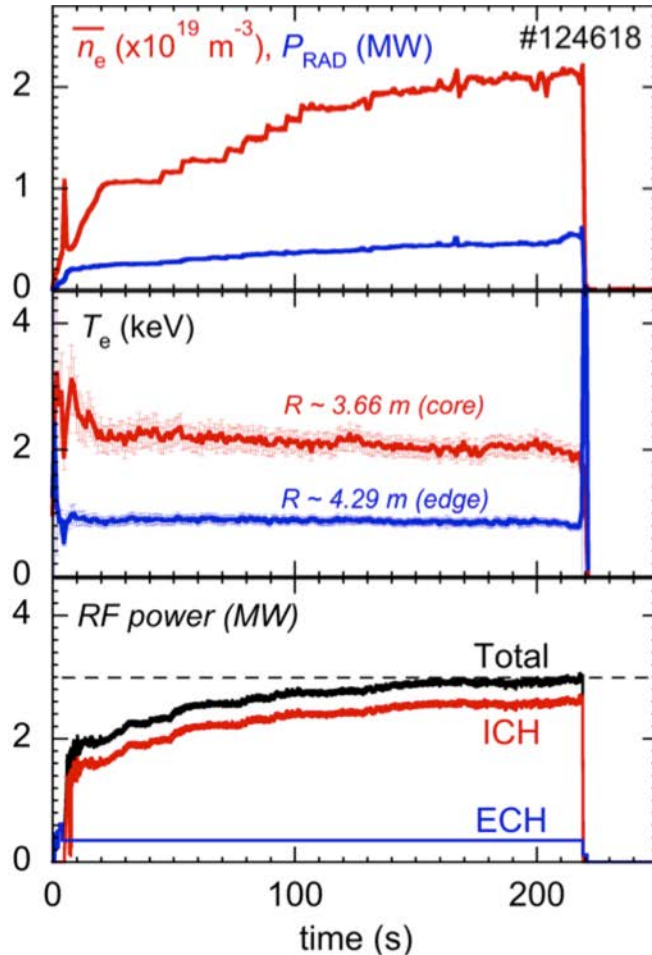
完全電離していないとすると、
high Z材料は放射量がより多くなる
傾向にある

電子温度と放射量増加の関係
将来使用予定であるタングステンにつ
いて比較



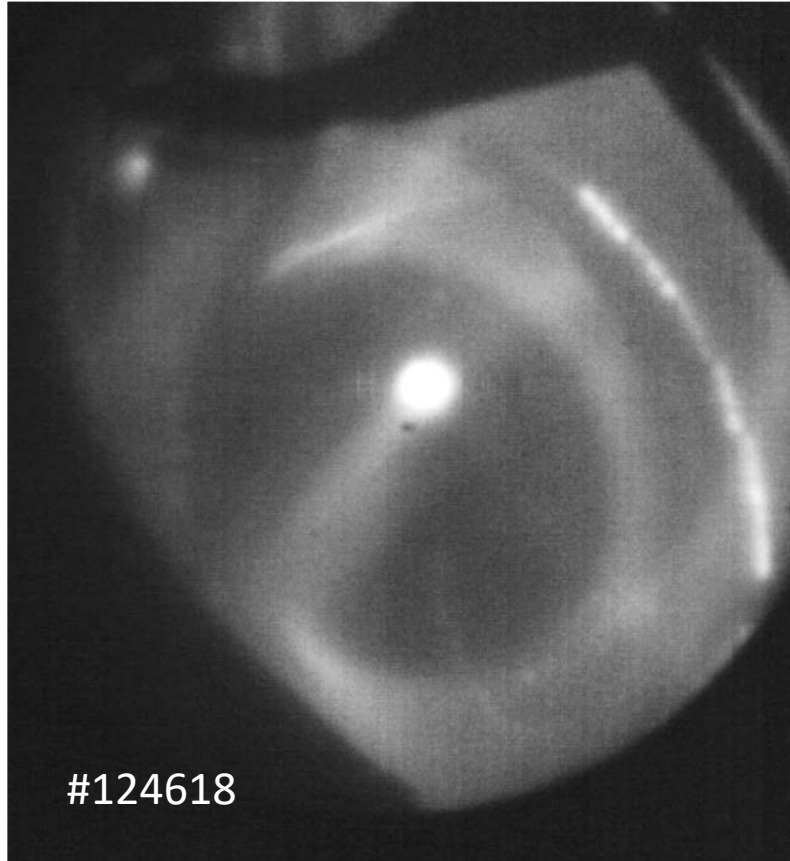
温度に対する依存性は弱く、た
だし低い温度では予想より高い
可能性がある

堆積層が剥がれ始めるとその制御は可能なのか？



一度剥離が始まると、短時間でも剥離するため剥離による不純物混入をどのように制御するのが現実的なのか？

定常加熱入力が増加は魅力的だが



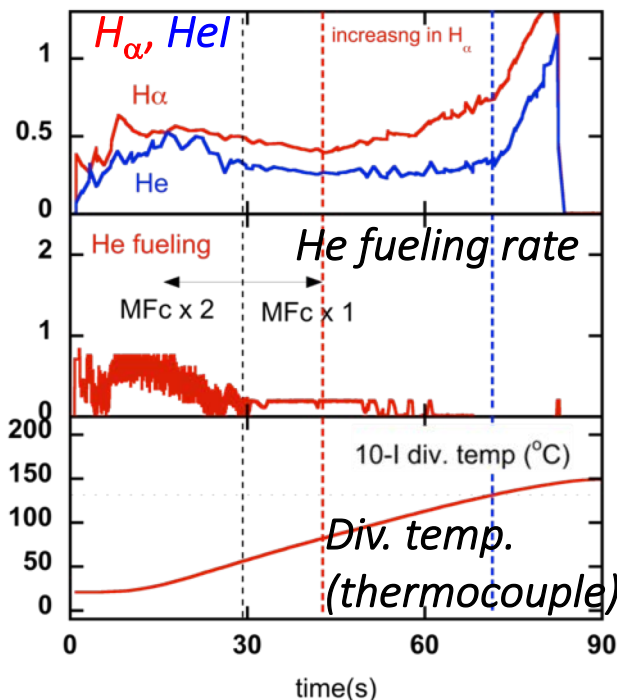
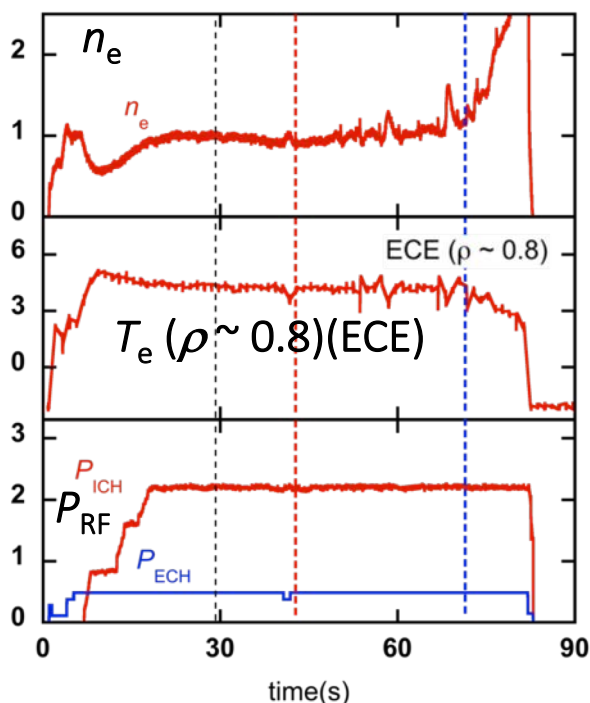
- 大電力(30MW)・短パルスの運転では損傷が認められていなかった、長時間放電により無視出来なくなった。
- 加熱入力を増加(1MW→2~3MW)にすることで、ボルトヘッドが溶損し、液体金属として重力により落下。
- よりシビアな加熱損失の低減制御が要求される。

加熱入力増強はプラズマを非常にタフにするが、その反面工学的な要求や、よりシビアな物理現象の理解が必要となる

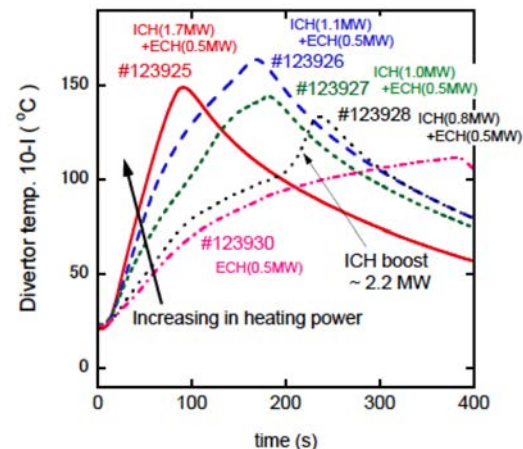
非高温容器装置における定常放電へ向
けた運転の難しさ

定常放電がもたらす堆積層のプラズマ
放電への影響

放電履歴による粒子吸蔵が引き起こす粒子バランスへの影響 1



**Reversed magnetic field configuration*

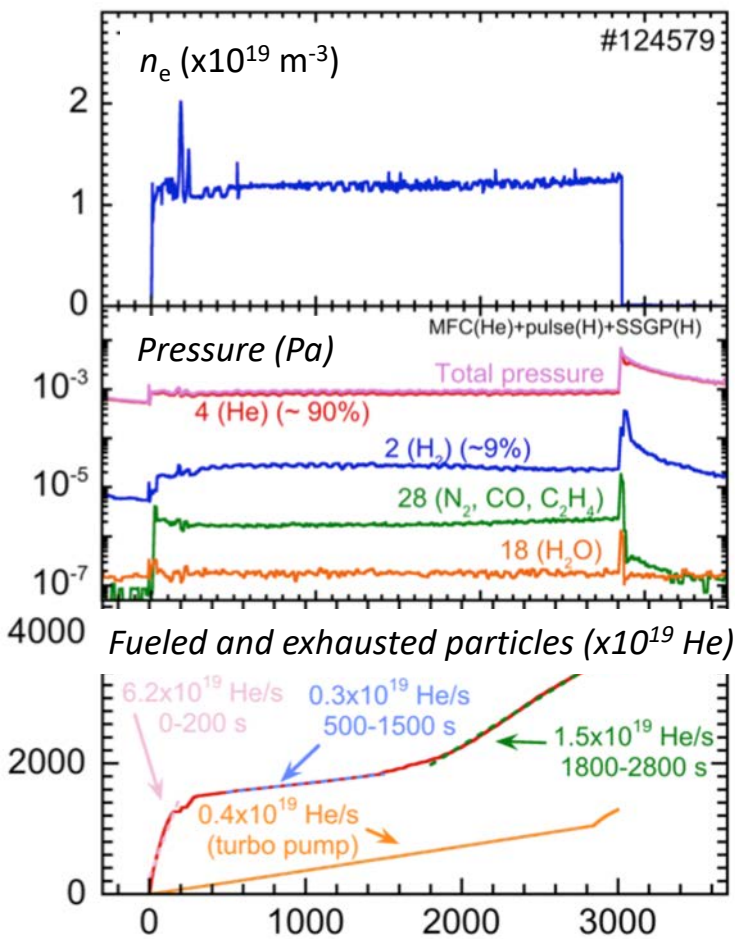


- 温度上昇に伴いダイバータが吸蔵したガスを放電中に放出開始する。水素(40s)の方がヘリウム(70s)より早く放出を開始し、粒子制御を困難にしている。表面温度が 500°C 付近で粒子放出が活発になる。
- 加熱入力を変えると、加熱入力に呼応して放出開始時間が早まる。
- 適したガス供給制御だけでは密度制御が必ずしも達成できない。
高温壁はこの放出を抑えることが可能だと予想される(QUESTに期待)

堆積層成長と粒子バランスへの影響

3種類のガスバランス変化を観測
 6.2 (0-200s), 0.3 (500-1500s), 1.5
 (1800-2800s) ($\times 10^{19}$ He/s).

He particle balances w/wo the effect of the MMLs
Wall-pumping: absorption (>0), desorption (<0)
 (Assumption: MMLs covered 26% of the PFCs.)



Unit: $\times 10^{19}$ He/s	0-200 s	500-1500 s	1800-2800 s
He fueling rate	6.22	0.28	1.48
Wall-pumping fuel – pump(0.4)	5.85	-0.09 (Desorption)	1.11 (Reabsorption)
w/ MMLs (26%)	5.48	-0.46	0.74

- 容器内のHe中性圧力はほぼ一定
- 粒子供給は一度供給と放出が釣り合った後に、再び大量の供給が必要となる。
- 26%の堆積層だけでは吸蔵量を説明出来ない。
- 容器内の堆積層の組成・厚さを精度よく測定する評価法の確立が重要課題。

まとめ ～ 定常放電の研究課題とは何だろうか? ～

- **各種現象の時定数と長時間放電時の時定数との関係の解明**
 - 各種物理現象の理解と飽和時定数
 - 長時間放電時の飽和時定数(定常状態)はどのように決まるか
(小型・中型・大型)
- **長時間維持するために必要な加熱源・炉内機器の開発**
 - 高性能プラズマのための長時間大電力加熱技術の確立
 - 各種熱負荷機器の信頼性向上とその実証
 - メンテナンス頻度削減とコスト緩和戦略の確立
(中型・大型) 大電力・高性能化定常プラズマの実証
- **長時間放電を維持・制御するために必要な技術の開発**
 - 放電維持するために必要な最低機器使用による定常維持化の実証
 - 制御に必要な器機開発とその自動化の対策
(小型・中型・大型)

私がQUESTにおける定常放電研究に期待すること

- **定常高温壁での粒子バランスに関する研究**
基礎物理現象理解へ向けた**多数計測器の同時利用による総合検証**
放電中の変化を計測することが望まれる
- **各種材料による物理・化学特性の違いによる材料間の堆積層特性とその成長速度解明に関する研究**
Wと既に使われている材料間との比較だけではなく、**材料を変更したときの結果を予測する研究**
- **材料開発および高熱流束・高粒子束ダイバータ研究**
実プラズマによる高熱流束・粒子束に耐えうるダイバータ開発
リチウムや流体金属を考慮した**自己再生するダイバータ**に関する基礎研究

大型装置では実施しにくい研究を中心に、精度の高い検証とフィードバック速度の速い研究スタイルで新たなコンセプトの検証を望む