

GAMMA10/PDX

D-module内ガス入射における 不純物輸送実験時の分光計測

筑波大学 プラズマ研究センター

清水啓太

1. 研究の背景・目的
2. 実験装置・計測機器
3. 実験結果・考察
4. まとめ

研究の背景

核融合装置の課題

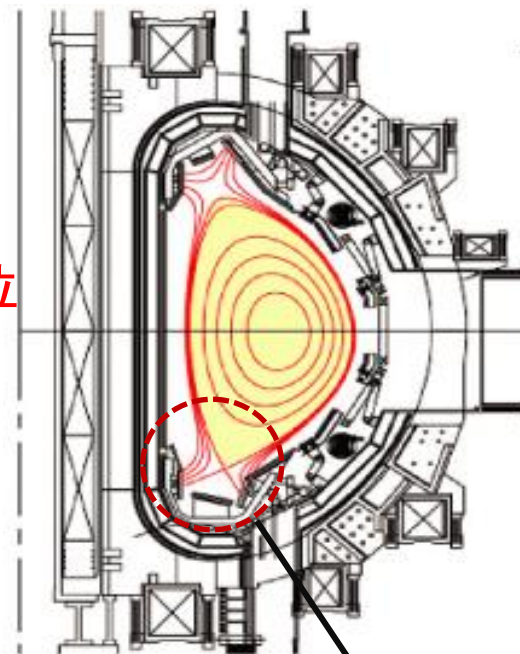
- 核融合装置において高温プラズマを生成した際に以下のような問題点が考えられる。
- 磁場の閉じ込めから逃れた粒子が真空容器の内壁に接触
- 真空容器内壁が溶解、蒸発し、不純物が発生
- 不純物がプラズマの中心に侵入し、プラズマの温度が低下

その解決策として...



ダイバータ磁場配位

[トカマク装置の断面図]



開いた磁力線構造を作り出し、炉心から流れ出た境界層プラズマをダイバータ板に導く磁場配位(ダイバータ磁場配位)

しかし、ダイバータ板に対しての局所的な熱負荷が問題になるダイバータ領域
→熱負荷をいかに低減させるかを考える必要がある。

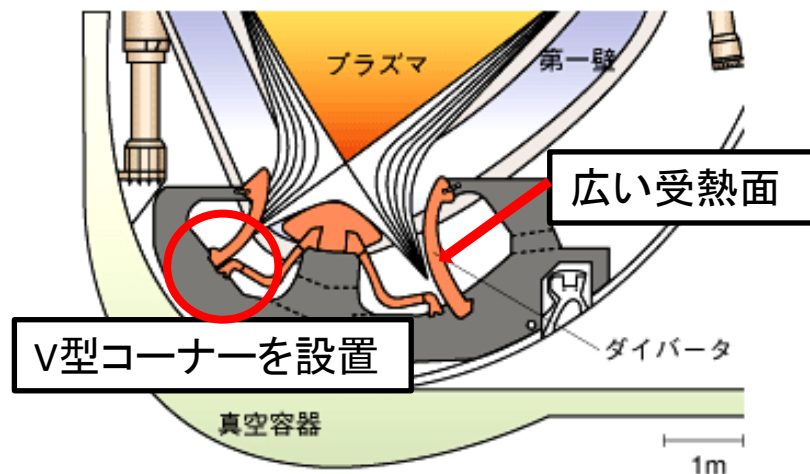
研究の背景

ダイバータの課題

- 熱負荷低減・・・プラズマ粒子や不純物がダイバータ板に一極集中してしまうことにより多大な熱負荷がかかる。

熱負荷低減方法として

- ダイバータの深さと傾斜を増加させ、広い面積で受熱
- ロングレッグダイバータによる、イオン輸送や放射負荷の減少
- V型のコーナーを設置し、リサイクリングの増加
- 不純物ガス入射による**非接触プラズマの形成**



研究の背景

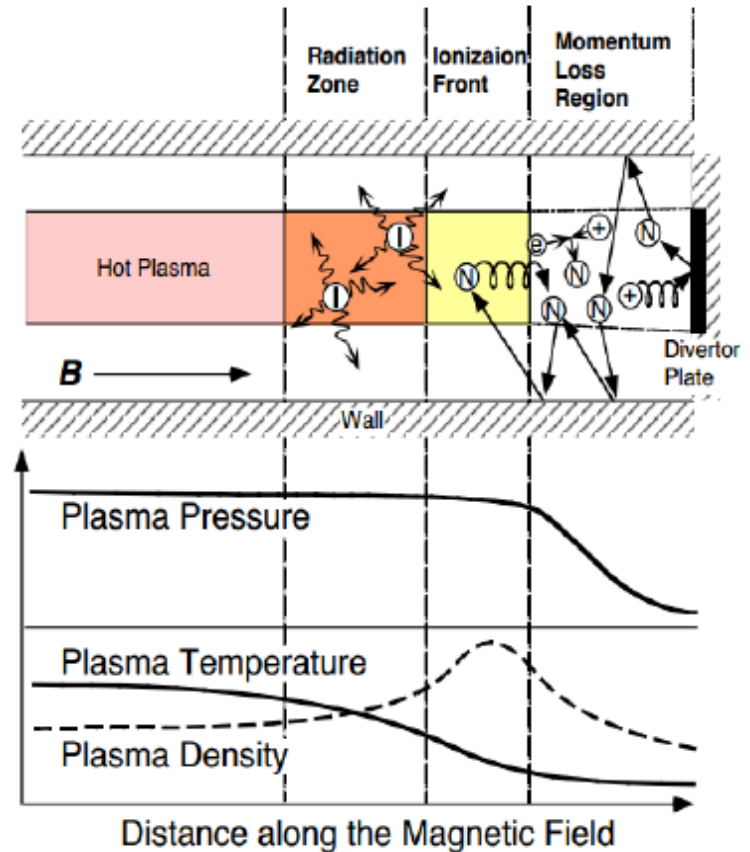
非接触プラズマとは、プラズマが冷却され再結合過程が促進し、プラズマがダイバータ前面で消失する状態のこと。

放射領域：入射した不純物粒子との相互作用でプラズマの温度が下がる。

電離フロント：中性粒子が電離され密度は高くなるが、エネルギーを失いプラズマの温度は低下する。

再結合領域：荷電交換、電子イオンエネルギー緩和でプラズマは急速に冷却。プラズマの再結合によりプラズマは消失。

ダイバータにプラズマが届かない**非接触状態**により、**熱負荷は低減**。



非接触プラズマの形成に向け、ダイバータ領域での**不純物制御**が重要となる。

研究の背景

不純物制御の必要性

- 不純物が炉心プラズマに侵入すると、プラズマを冷却し、核融合反応の進行を妨げる。

背景プラズマによる不純物遮蔽により、不純物をダイバータ領域に留め、炉心への混入を防ぐ。



炉心プラズマ性能の維持

ガス入射により、ダイバータ領域における放射冷却を増大させ、ダイバータ板への熱負荷を下げる。



非接触プラズマ性能の向上

プラズマ中における不純物制御の理解は、非接触プラズマ性能の向上や、炉心プラズマ性能の維持のため、必須の課題となっている。

研究の目的

不純物制御の理解は、非接触プラズマ性能の向上や、炉心プラズマ性能の維持のため、必須の課題である。

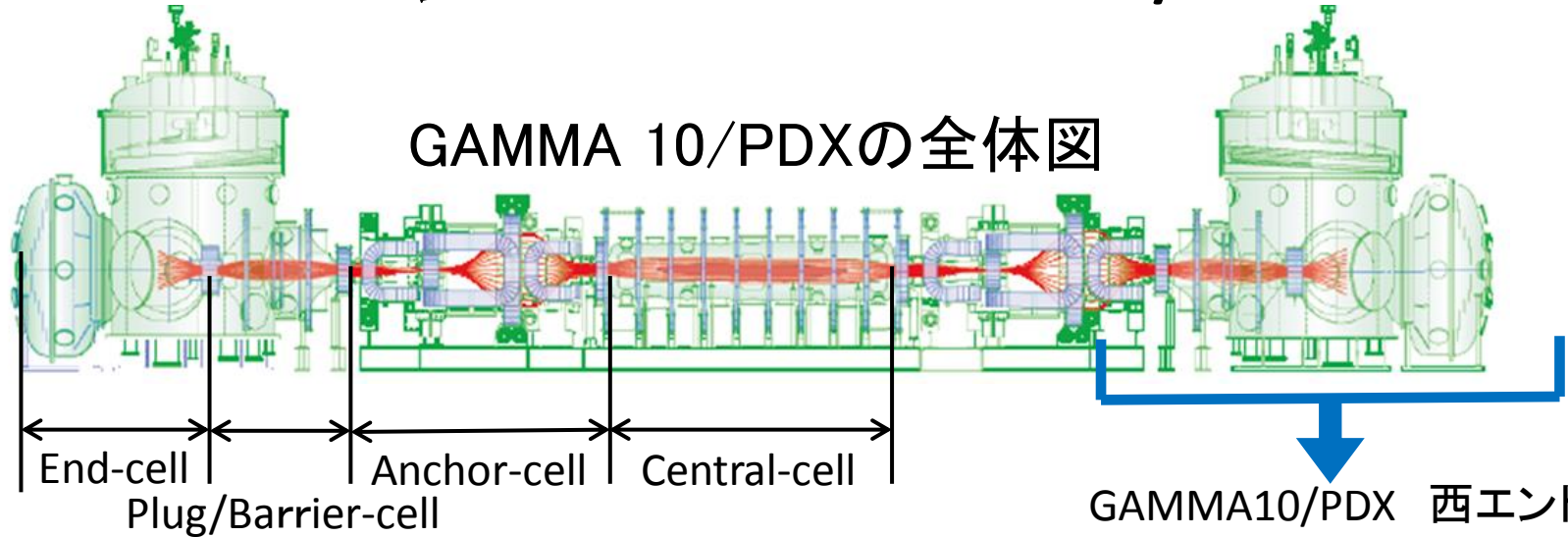
本研究の目的は、

D-module (ダイバータ模擬実験モジュール) へ非接触プラズマの形成に向けたガス入射実験を行い、下流(エンド部)、上流(プラグ/バリア部)における同時分光計測により、D-module内へ入射した不純物ガスの挙動解析することで、プラズマ中における不純物輸送の物理的機構を明らかにすることである。

実験内容

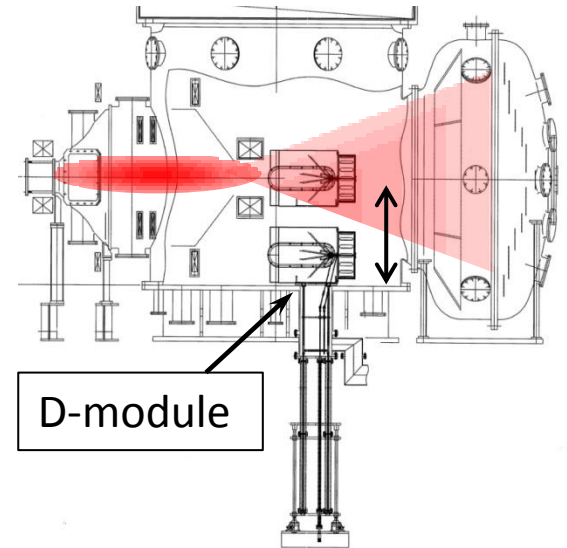
- 入射開始時間を変えてのArガス入射実験
- 異なる3種類のガス入射実験
- ArガスとH₂ガスの重畳入射実験

実験装置：GAMMA 10/PDX



GAMMA 10/PDX概要

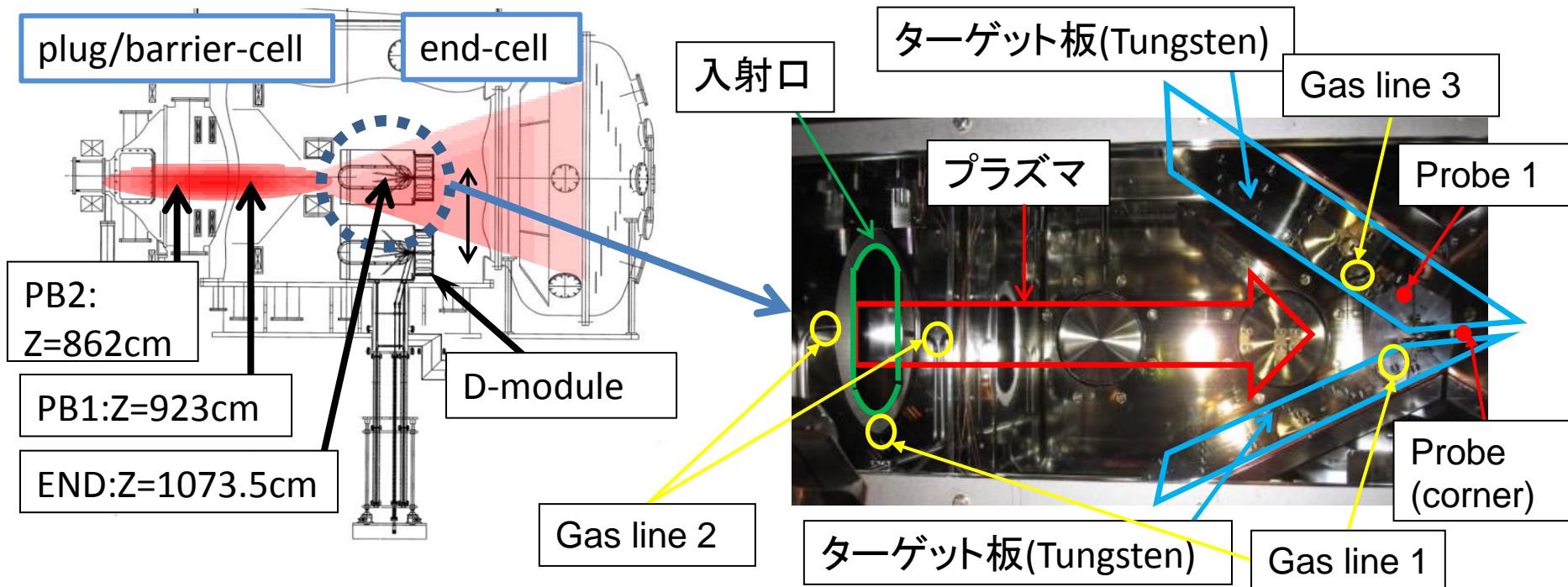
- RF加熱により水素プラズマがCentral-cellに生成。
- プラズマ加熱装置
 - 電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)
 - 高周波イオン加熱(ICRF)
 - 中性粒子ビーム入射加熱(NBI)
- 開放端磁場配位が形成されるため、プラズマはEnd-cellへ流出する。
 - 流出時のイオン温度(T_i) 100~400 eV
 - 流出時の電子温度(T_e) 30 eV



2012年度より、西エンド部にD-moduleを設置

実験装置：D-module

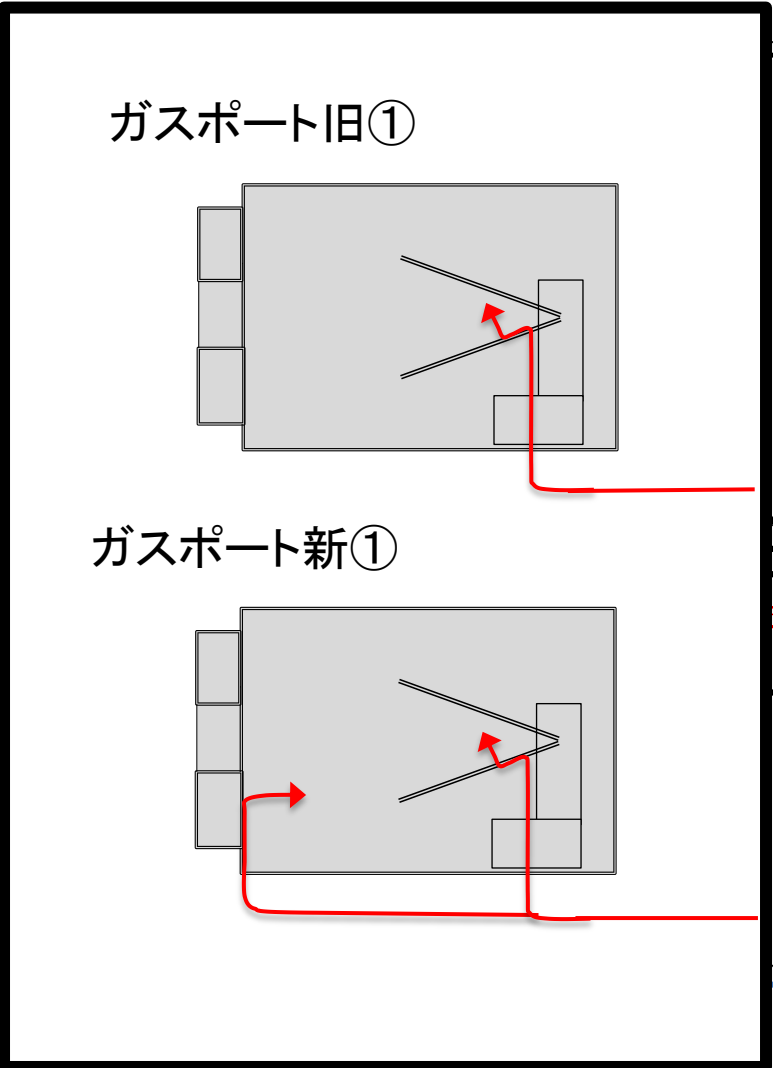
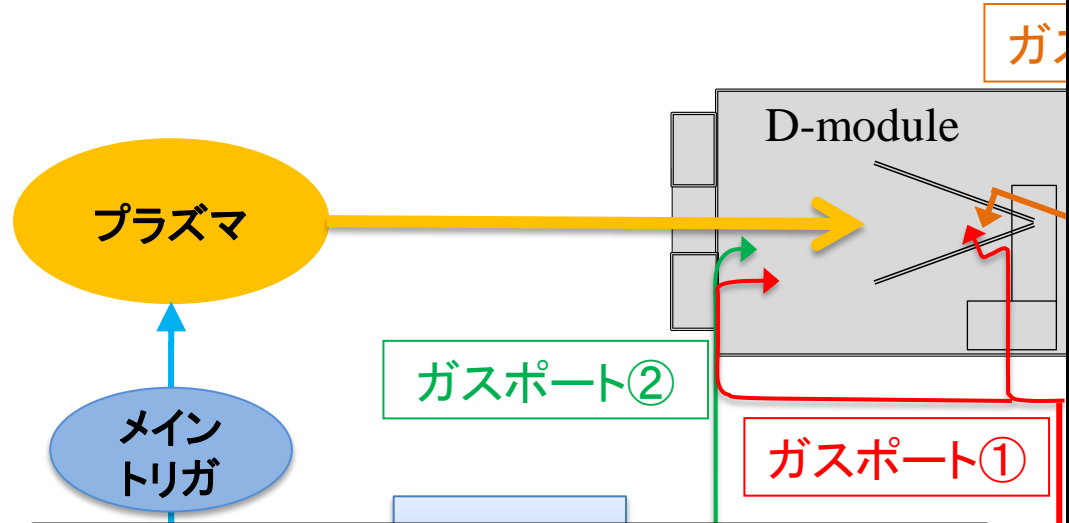
D-module(ダイバータ模擬実験モジュール)とは、閉ダイバータを模擬した実験装置である。プラズマはモジュール入射口より入射され、タングステン製のV字ターゲットへ照射される。



- V字ターゲットは角度調整が可能(15 ~ 80°)である。
- 本実験においては、45°に固定して実験を行った。
- 分光計測範囲はプラグ/バリア部まで拡張された。

実験装置：D-module

- 本研究において、D-module内の3箇所

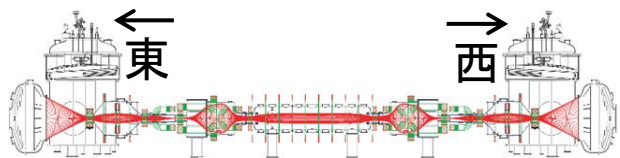


2015年度より、ガスポート①が改造され、2か所から入射できるようになった。
本研究では、改造される前のものをガスポート旧①とし、改造後のものをガスポート新①とした。

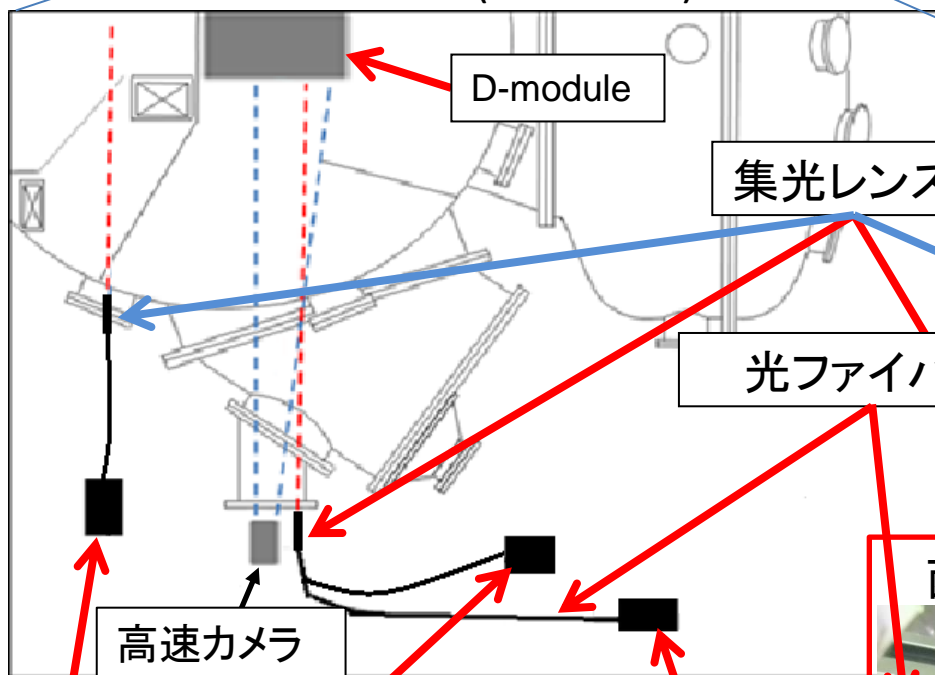
及び各バルブの開放時間(入射幅)でガス入射タイミングを決定した。

の圧力(プレナム圧)を入射ガス圧の基準としている。

計測機器：分光システム



平面図(北側半面)



D-module

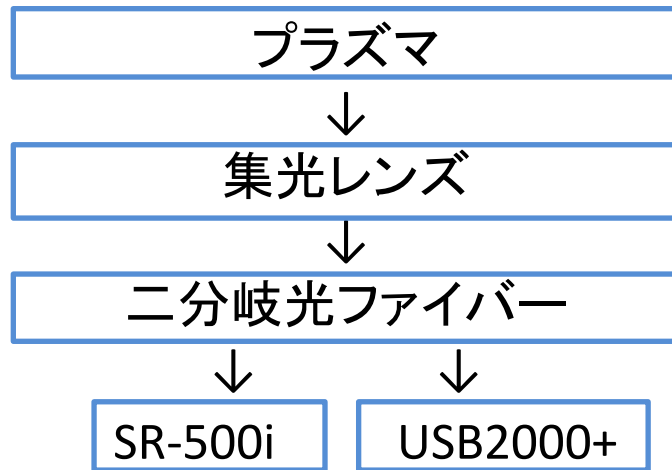
集光レンズ

光ファイバー

高速カメラ

分光器USB2000+

分光器SR-500i



プラズマ

集光レンズ

二分岐光ファイバー

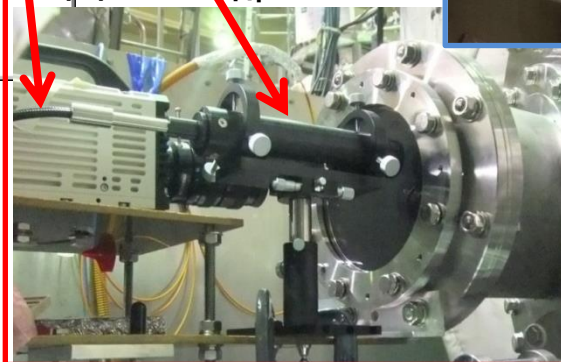
SR-500i

USB2000+

西プラグ/バリア部



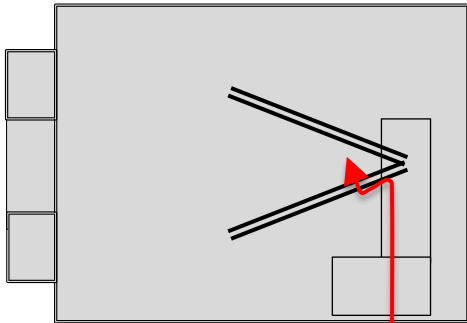
西エンド部



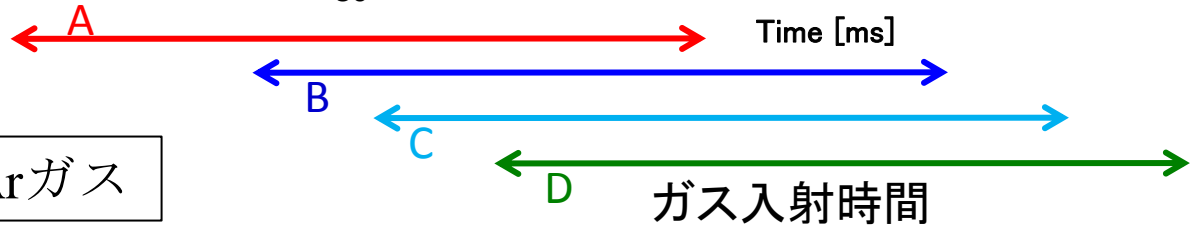
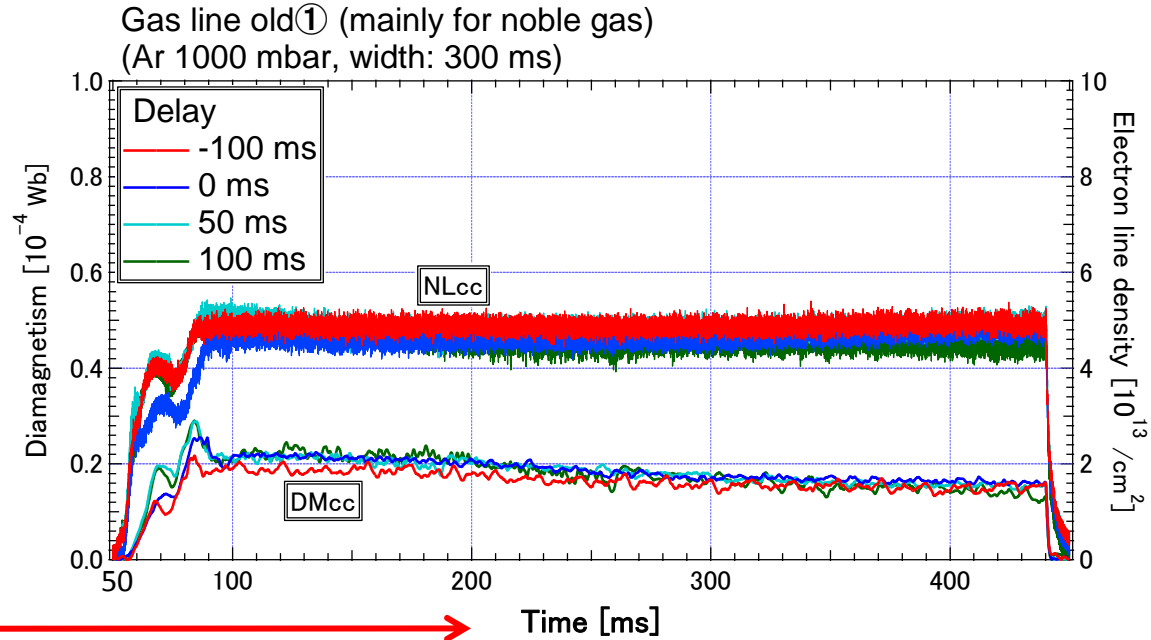
Arガス入射開始時間の変化による不純物の挙動

ガスポート旧①へ入射開始時間を変えて、Arガスを入射した。

ターゲット板: 45°



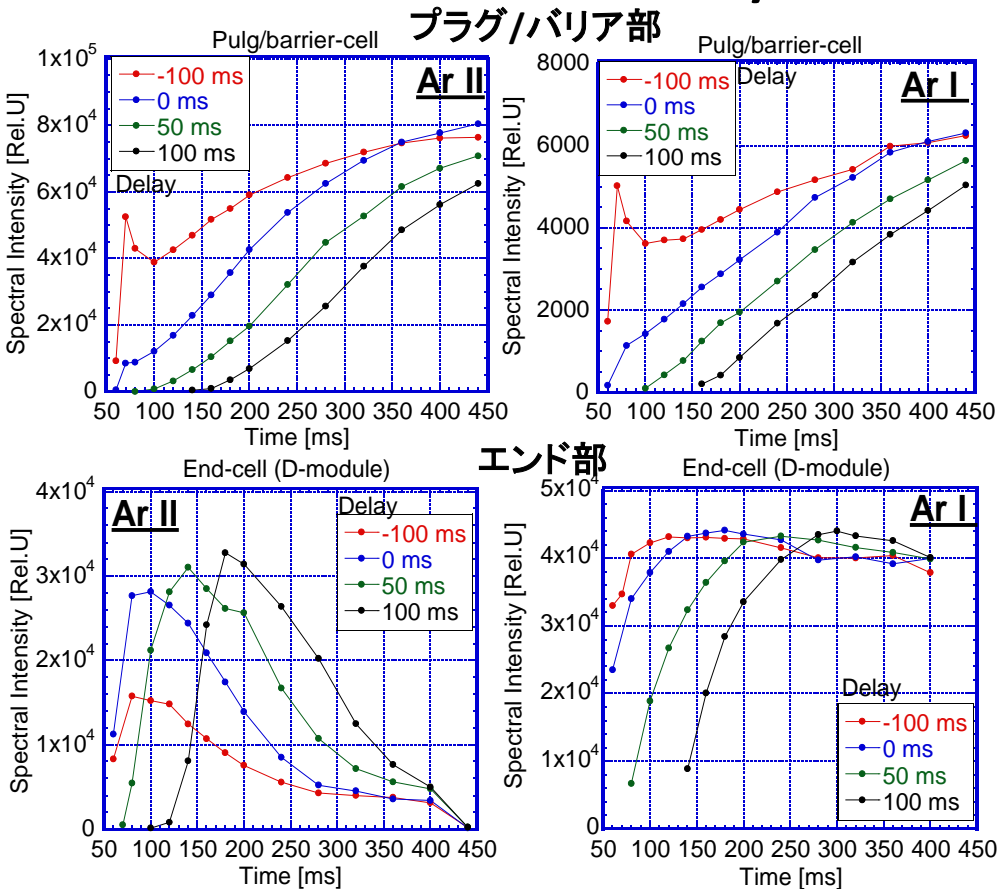
Arガス



Gases		Gas line 旧①		
		Plenum pressure	Delay	Width
		[mbar]	[ms]	[ms]
Ar	A	1000	-100	300
	B	1000	0	300
	C	1000	50	300
	D	1000	100	300

プラズマ点火時間は50-450 [ms]
 エンド部D-module内 (下流) 及び、プラグ/バリア部 (上流) における不純物の挙動の比較を行った。

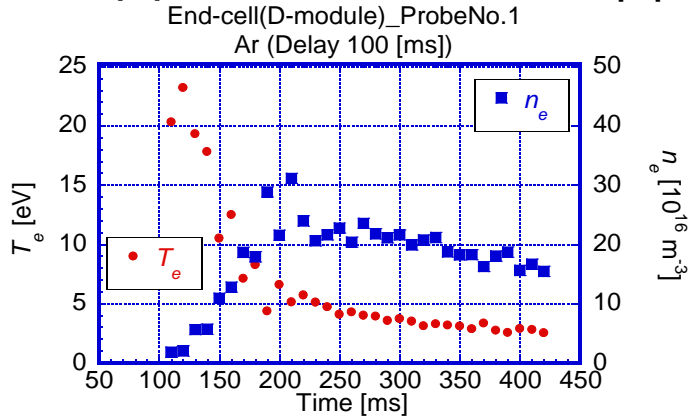
Arガス入射Delay依存性による不純物の挙動



- プラグバリア部では、Ar I,II共に単調に増加している。
 - プラズマ点火後にD-module内に入射したArがプラグバリア部に流れしてきたことが示される。
- エンド部では、Ar IIは、入射と共に増加し、飽和する傾向が見られた。
- Ar IIは、入射と共に増加し始め、その後減少している。
 - Arの電離の抑制が確認される。
- 電子温度はガス入射と共に減少、電子密度は入射と共に増加し、その後減少している



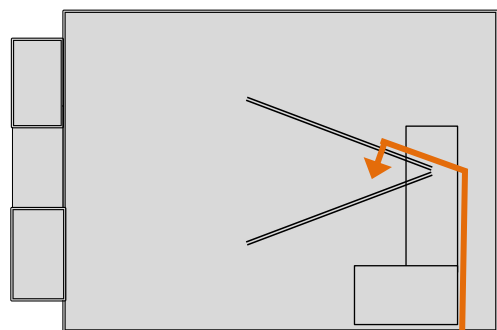
D-module内に入射されたArガスが、プラグ/バリア部へと輸送されていること示唆する発光が確認された。プラグバリア部では、Arの電離が進行し、エンド部では、Arイオンの再結合が進行していることが推察される。



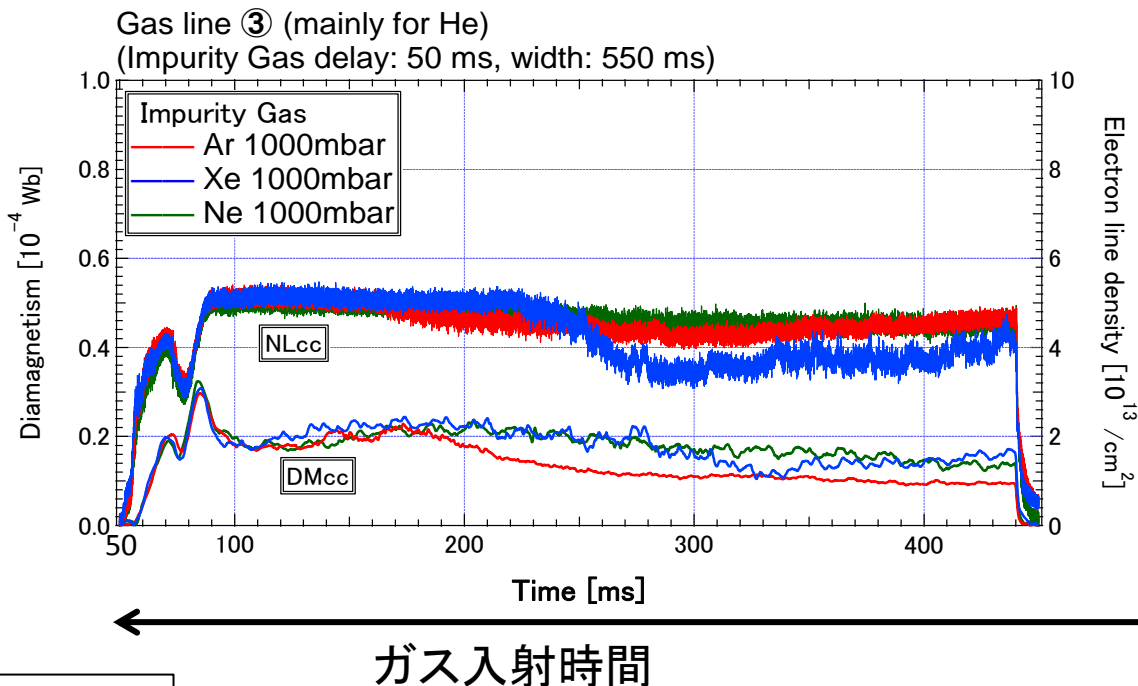
異なる3種類のガス入射実験による不純物の挙動

ガスポート③へAr,Xe,Ne
ガスを入射し、それぞれの
差異を調べた。

ターゲット板: 45°



Ar,Xe,Neガス



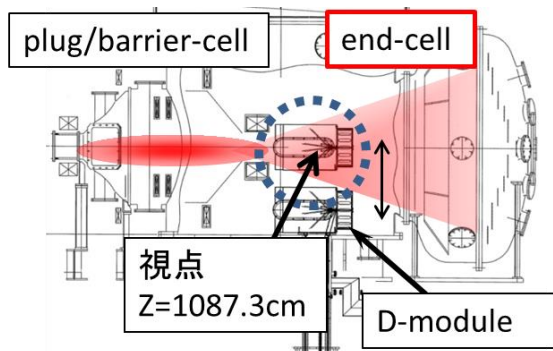
Gas line ③			
Gases	pressure	Delay	Width
	[mbar]	[ms]	[ms]
Ar	1000	50	550
Xe	1000	50	550
Ne	1000	50	550

プラズマ点火時間は50-450 [ms]

プラズマ点火と同時に、
D-module内にガス入射
を行い、それぞれの挙
動を調べた。

異なる3種類のガス入射実験による不純物の挙動

(エンド部)



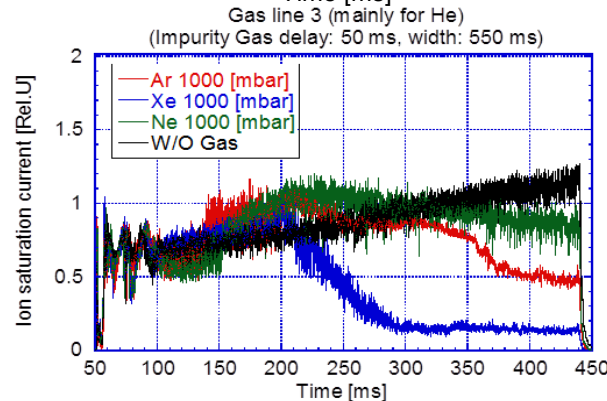
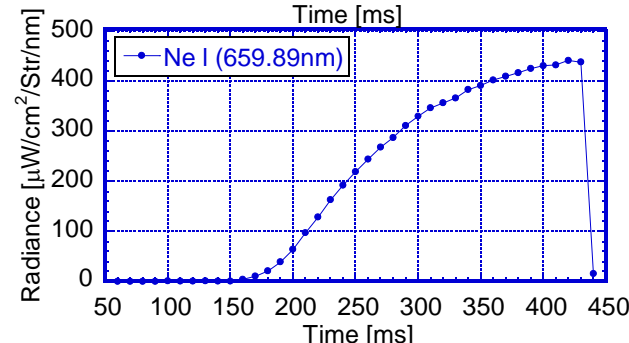
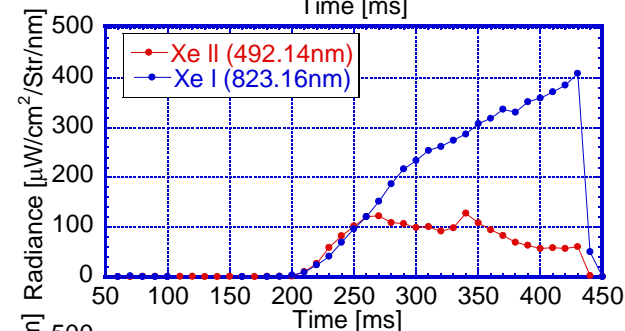
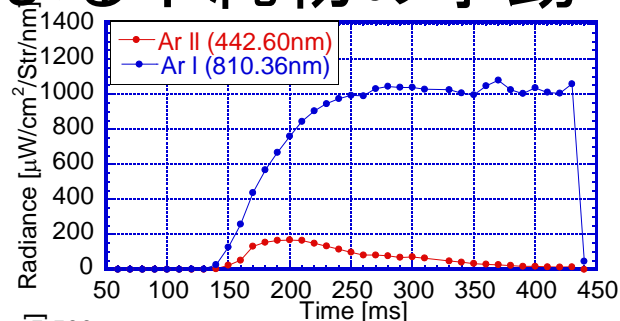
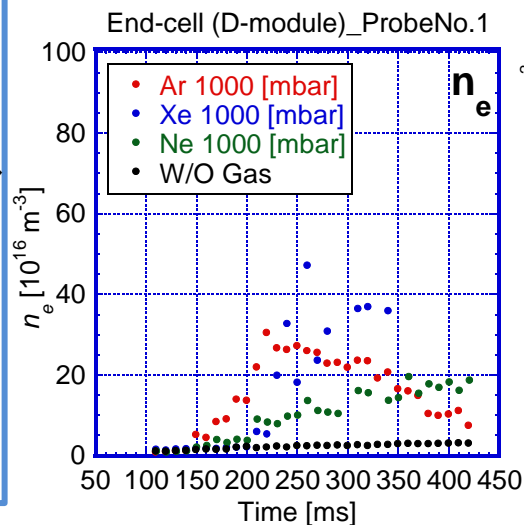
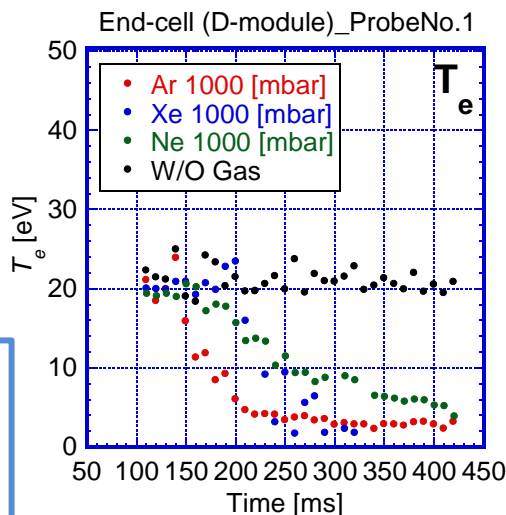
電子密度上昇、電子温度低下、発光開始時間共に、Xeガスが一番時間応答性が遅い。

➤ ガスのコンダクタンスや粘性によるもの

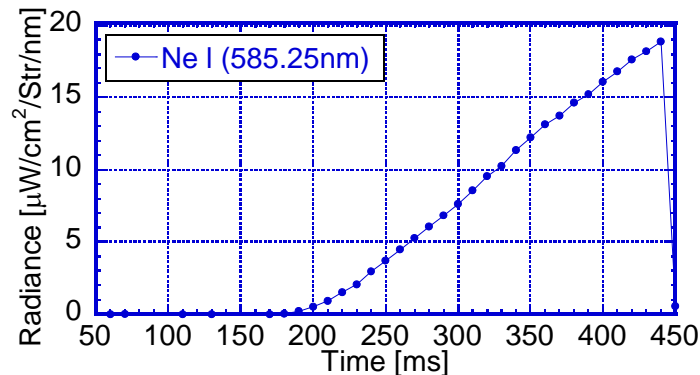
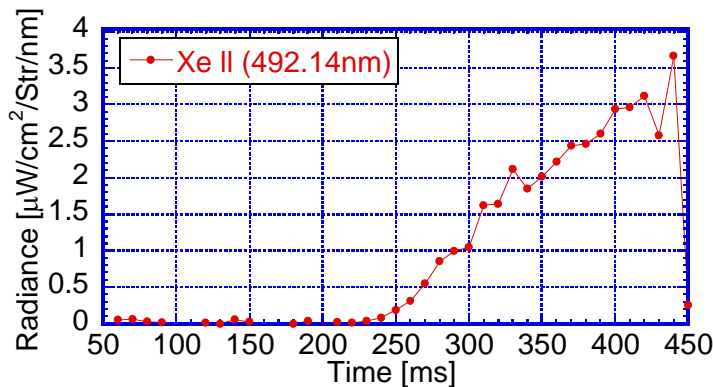
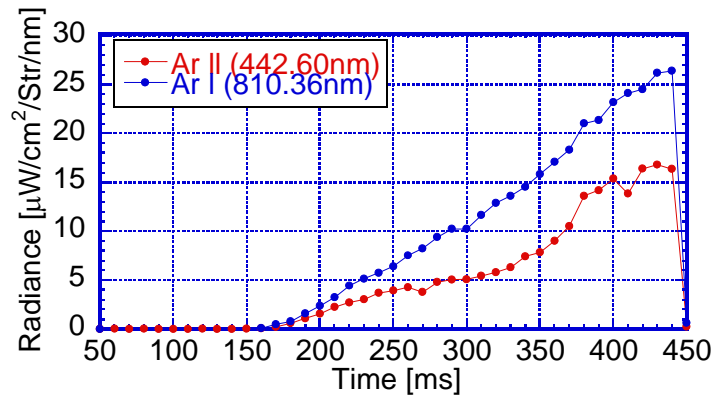
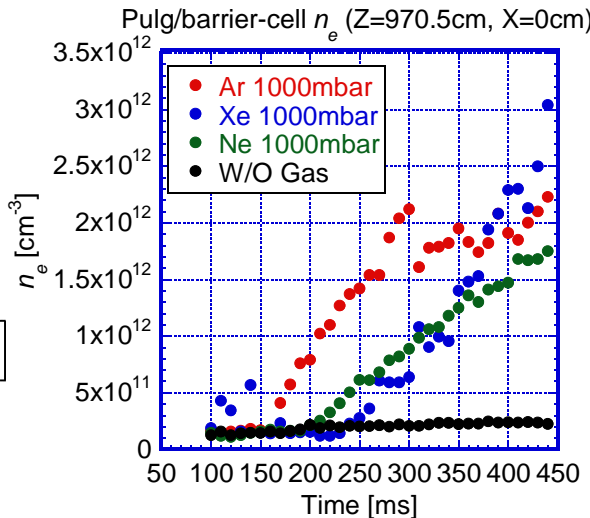
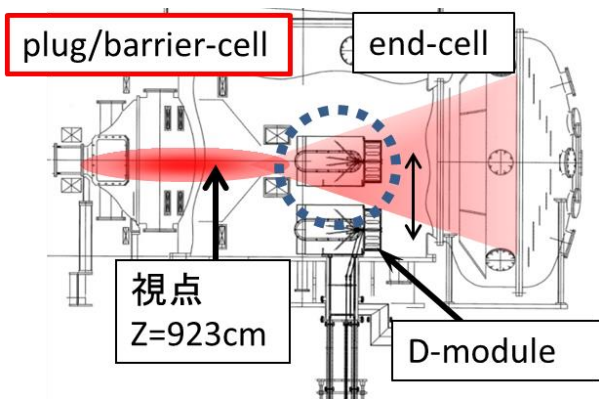
電子温度低下、 I_{i-sat} 減少から、Xeガスが最も冷却効果が大い。

➤ Xeは、励起や電離などが低い電子温度においても起こりやすいため

Xeガス入射時の T_e, n_e ($t=350$ [ms]以降)が測定できていなかった。



異なる3種類のガス入射実験による不純物の挙動 (プラグ/バリア部)

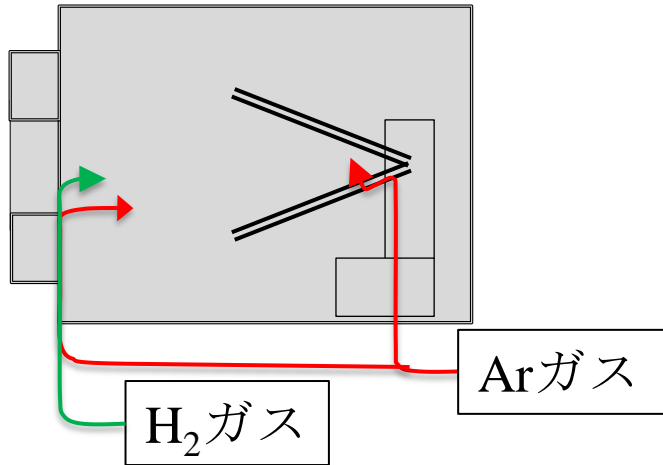


- Neガス入射では、Neイオンの発光(Ne II)が観測されていないので、電離の進行が極めて弱い可能性がある。
- これはNeのイオン化エネルギー(21.6 [eV])が Ar(15.8 [eV])やXe(12.1 [eV])と比べて高いため Xeガス、Neガスは、Arガス入射と比べてプラグ/バリア部での電子密度上昇が遅い。
 - Xeガスは、エンド部でも同様の描像であり、ガスのコンダクタンスや粘性によるものが考えられる。
 - Neガスは、イオン化の進行が極めて弱いために、中性原子のまま磁力線に捕らわれずに輸送された。

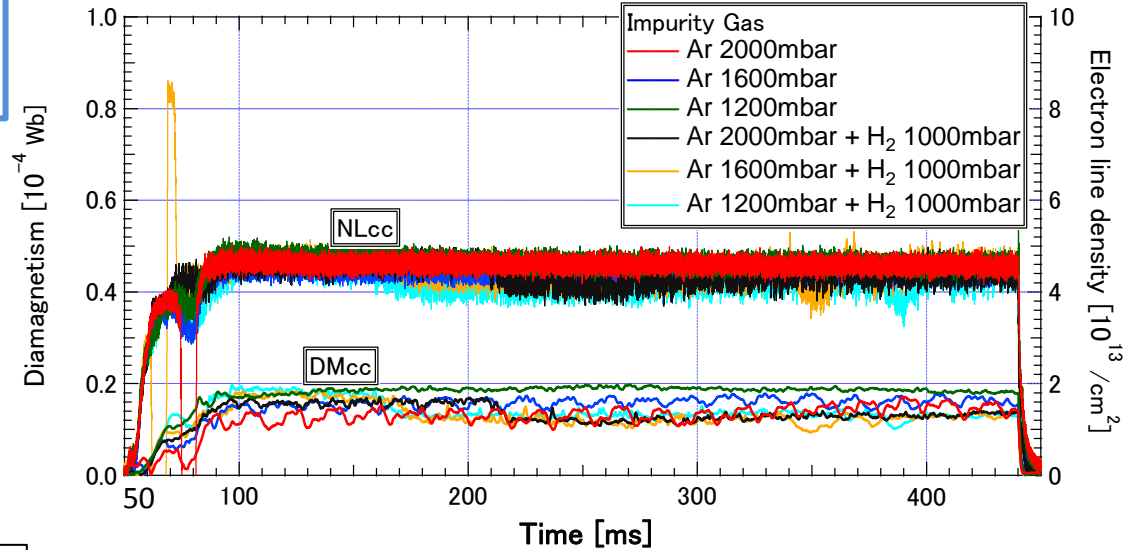
ArガスとH₂ガスの重畳入射による不純物の挙動

ガスポート新①へArガスを、ガスポート②へH₂ガスを入射した。

ターゲット板: 45°



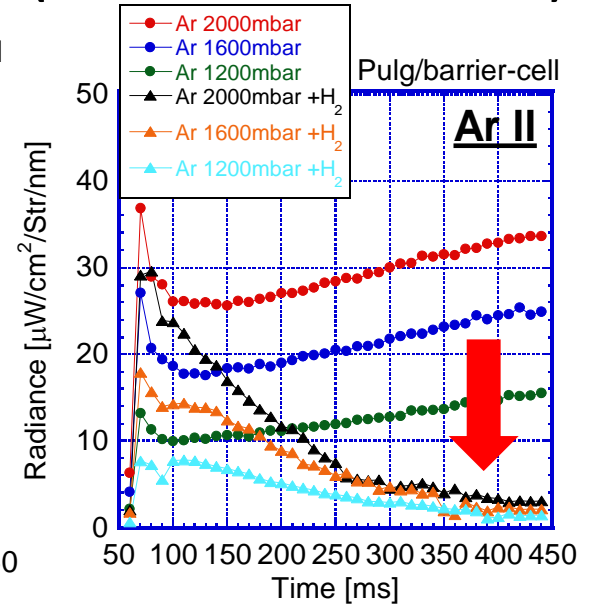
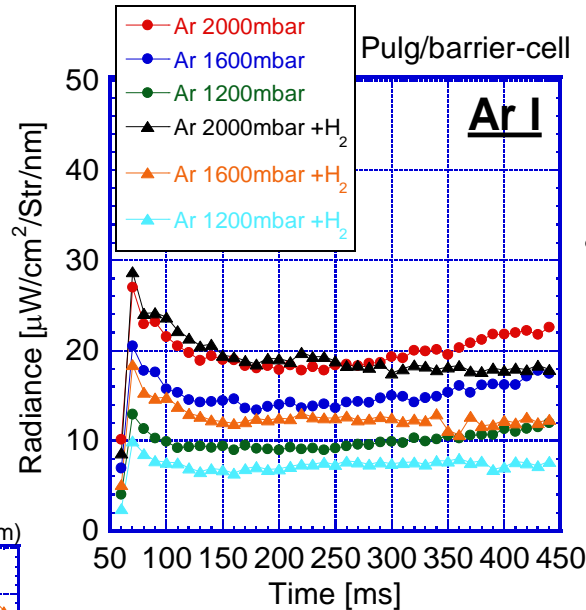
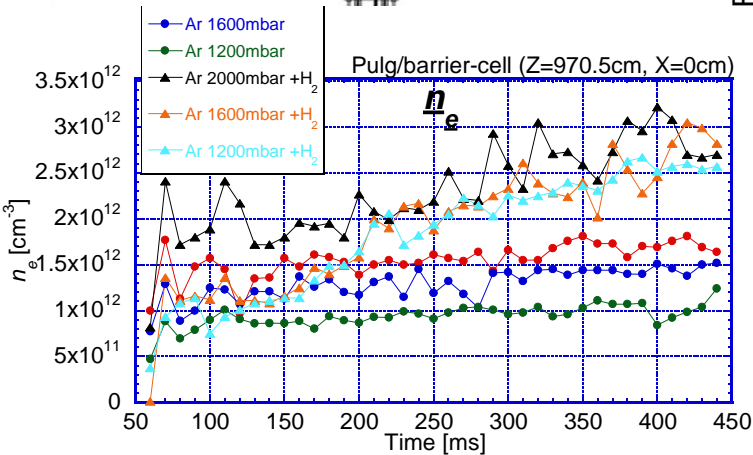
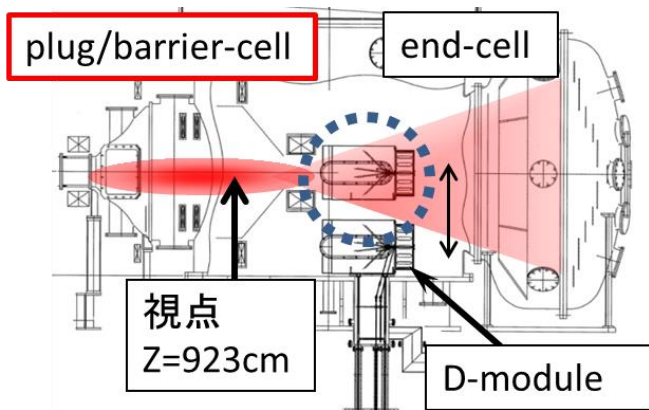
Gas line new① (mainly for noble gas)
(Ar delay: -1000 ms, width: 700 ms)
Gas line ② (mainly for H₂)
(H₂ delay: 0 ms, width: 450 ms)



プラズマ点火時間は50-450 [ms]

shot	Port (Gas line ②)				Port (Gas line new①)			
	Gases	pressure	Delay	Width	Gases	pressure	Delay	Width
		[mbar]	[ms]	[ms]		[mbar]	[ms]	[ms]
Only Ar	-				Ar	1200, 1600, 2000	-1000	700
Ar + H ₂	H ₂	1000	0	450	Ar	1200, 1600, 2000	-1000	700

ArとH₂の重畳入射による不純物の挙動 (プラグ/バリア部)



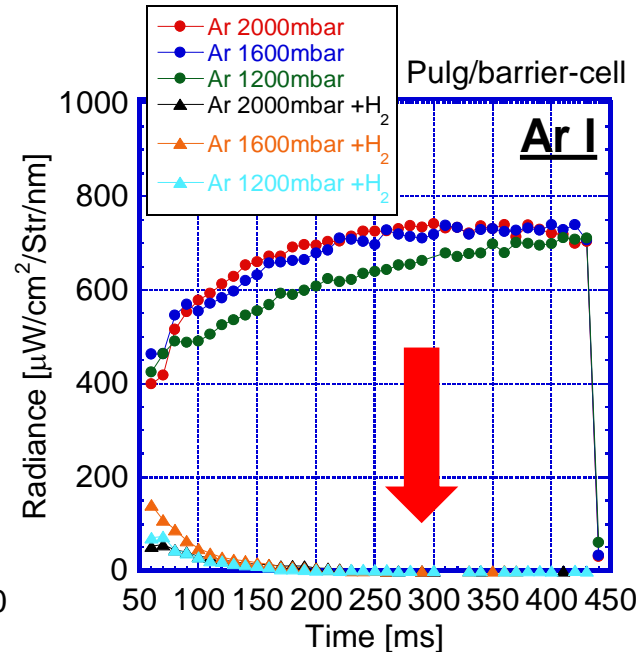
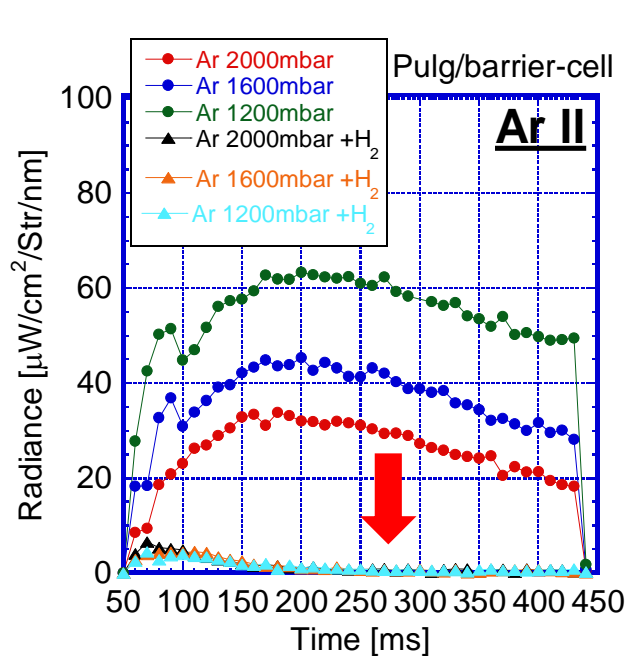
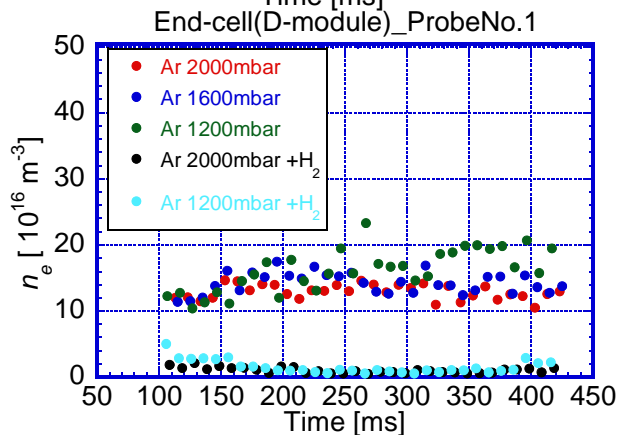
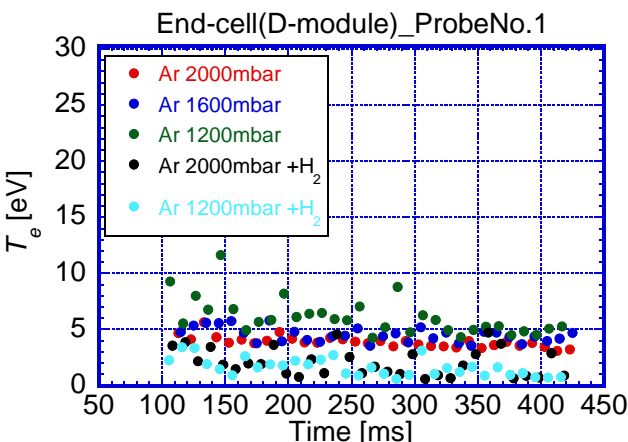
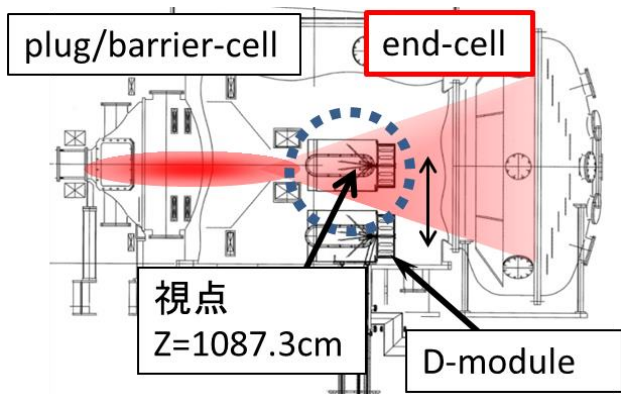
- H₂ガスを重畳入射にさせることで、プラグ/バリア部での**密度が増加**。
- H₂ガスを重畳入射にさせることで、Ar IIの**発光強度の減少**。

プラグ/バリア部におけるプラズマの密度が増加し、背景プラズマの不純物遮蔽効果により、Ar IIのセントラル部方向への輸送が低減された可能性が考えられる。



今後、電子温度を測定し、より詳細な考察を行う必要がある。

ArとH₂の重畳入射による不純物の挙動 (エンド部)

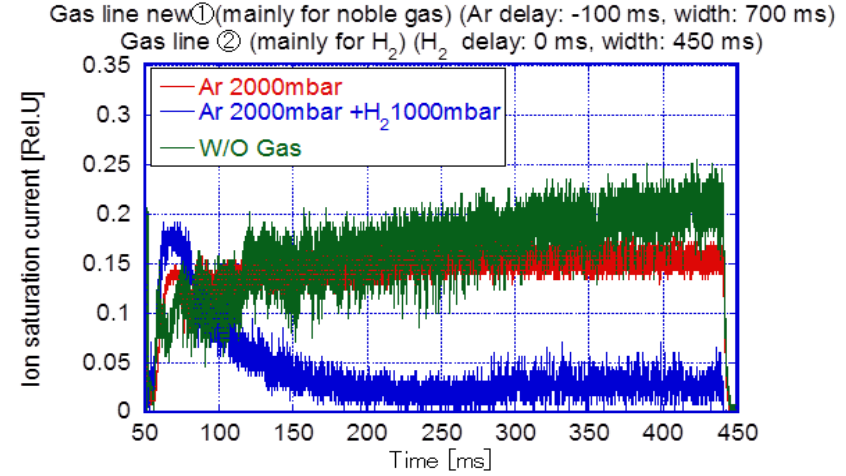
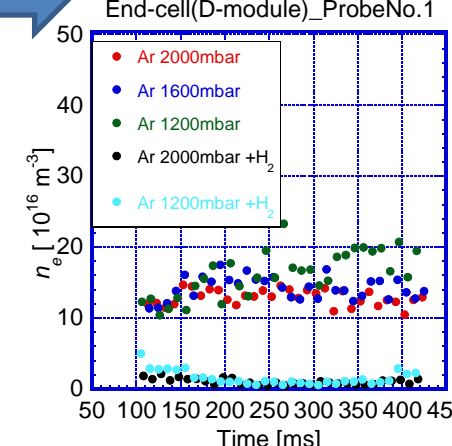
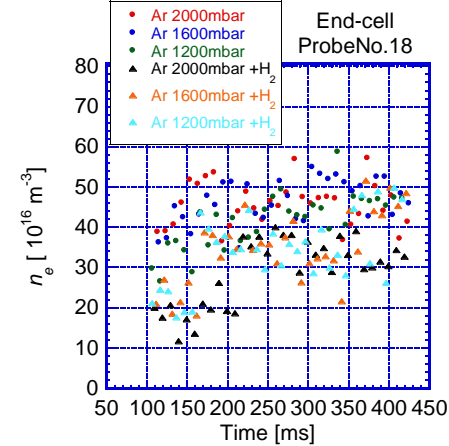
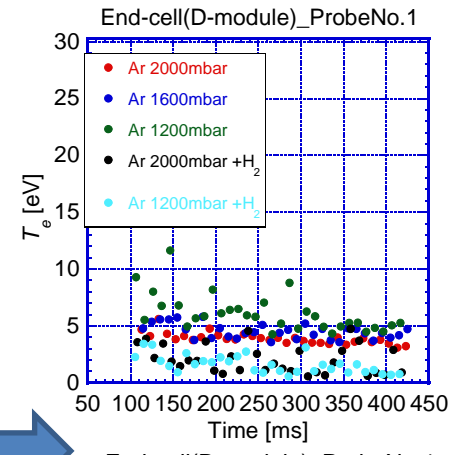
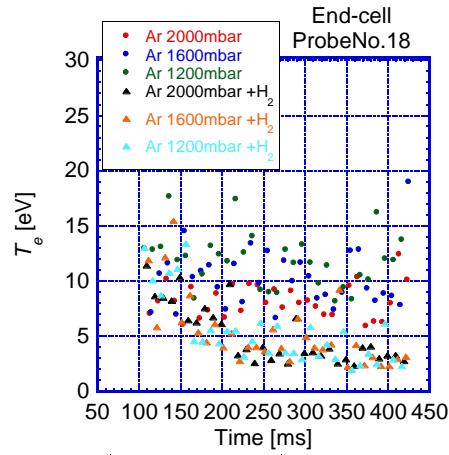
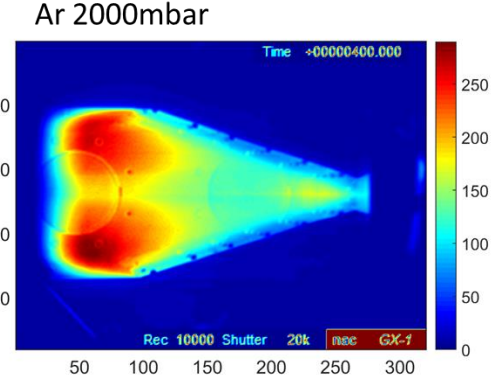
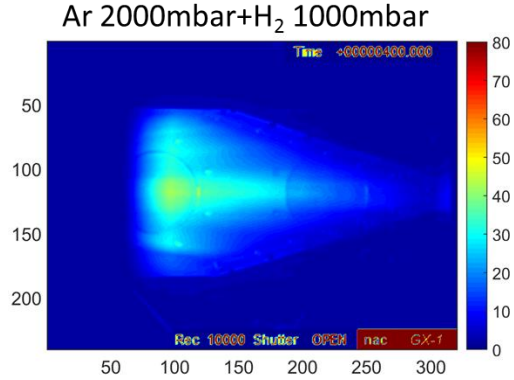
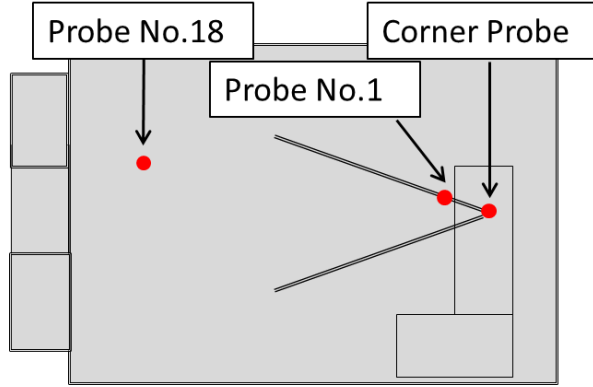


- H₂ガスを重畳入射にさせることで、Ar II、Ar Iの発光強度の減少。
- H₂ガスを重畳入射にさせることで、エンド部の電子密度、電子密度の低下。



非接触プラズマの形成が示唆される

ArとH₂の重畳入射による不純物の挙動 (エンド部)



非接触プラズマの形成が示される

まとめ・今後の課題

まとめ

- 分光計測のスペクトルや電子密度の上昇から、D-module内に入射された不純物ガスがプラグ/バリア部へと輸送されていることが確認された。
- 不純物ガス入射において、分子量や粘性の違いによる到達速度の違いが認められた。一方、電子密度上昇や電子温度とイオン飽和電流の減少効果により、Xeガスが最も冷却効果が高いことが認められた。
- H₂ガスとArガスの重畳入射により、プラグ/バリア部におけるAr IIの発光が大幅に減少していることが確認された。
- 一方、エンド部では、H₂ガスとArガスの重畳入射により、非接触プラズマが形成と矛盾しない結果が示された。

今後の課題

- GAMMA 10/PDXにおいて、Z軸上の分光測定範囲を広げ、D-module内に入射された不純物ガスの挙動解析を、アンカー部、セントラル部へと広げて調べていく。
- 電子温度計測やシミュレーション等を用いて、より詳細に不純物の挙動を解析していく。

御清聴ありがとうございました。