

GAMMA 10/PDXにおけるエンド部D-module から上流域に至る不純物挙動の計測

*横土 敬幸(M1)、中嶋 洋輔、M. S. Shahinul、吉本 翼
筑波大学プラズマ研究センター

1. 研究背景・目的
2. 実験装置・計測装置
3. 実験結果・考察
 - 各測定位置におけるスペクトルの比較
 - 追加熱による不純物の挙動解析
4. まとめ・今後の課題

研究背景

核融合装置として、トーラス型が採用されている。

磁場の閉じ込めから逃れた炉心プラズマが炉内壁と接触し、壁との相互作用により、不純物が発生する。

そこで開いた磁力線構造を形成し、境界領域プラズマをダイバータ板に導く、**ダイバータ磁場配位**が考案された。しかし、ダイバータ板には、多大な熱負荷が集中する。

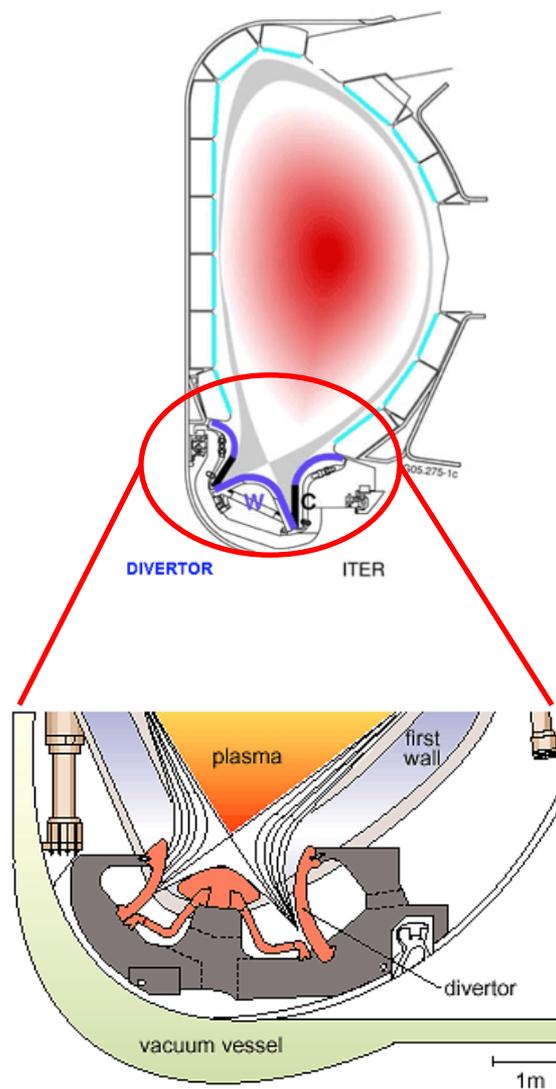
ダイバータへ不純物ガスを入射し、放射冷却を利用することで**非接触プラズマ**を形成することが必要である。

放射冷却の物理や入射した不純物が炉心プラズマへ与える影響への理解が不十分である。

タンデムミラー型装置GAMMA 10/PDXは、エンド部の開いた磁力線構造においてダイバータ磁場配位に似ている。

そこで、GAMMA 10/PDX西エンド部に2012年度より、ダイバータ模擬実験装置(D-module)が設置された。

<http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/ITER/illustrations/divertor.gif>



研究の背景

ダイバータ領域から炉心プラズマへの不純物の輸送を制御するには、不純物イオンに働く力を理解することが求められる。

磁力線方向の不純物イオンに働く力

$$F_{\parallel} = \underbrace{-\frac{1}{n_Z} \frac{\partial P_Z}{\partial s}}_{\text{不純物の圧力勾配}} + \underbrace{ZeE_{\parallel}}_{\text{電界による力}} + \underbrace{\mu_m v_{Zi}(u_i - u_Z)}_{\text{背景プラズマとの摩擦力}} - \underbrace{\alpha_Z \frac{\partial T_e}{\partial s}}_{\text{電子の熱応力}} - \underbrace{\beta_Z \frac{\partial T_i}{\partial s}}_{\text{イオンの熱応力}}$$

不純物の
圧力勾配

電界に
よる力

背景プラズマ
との摩擦力

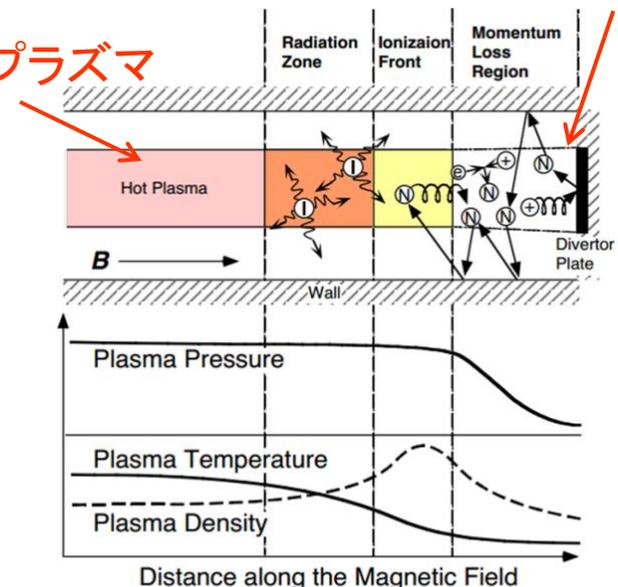
電子の
熱応力

イオンの
熱応力

ダイバータ領域

コアプラズマ

不純物遮蔽とは、圧力勾配、熱応力によって逆流する不純物イオンを背景プラズマによる摩擦力で押さえ込み、炉心プラズマへの不純物混入を遮蔽することである。[1]



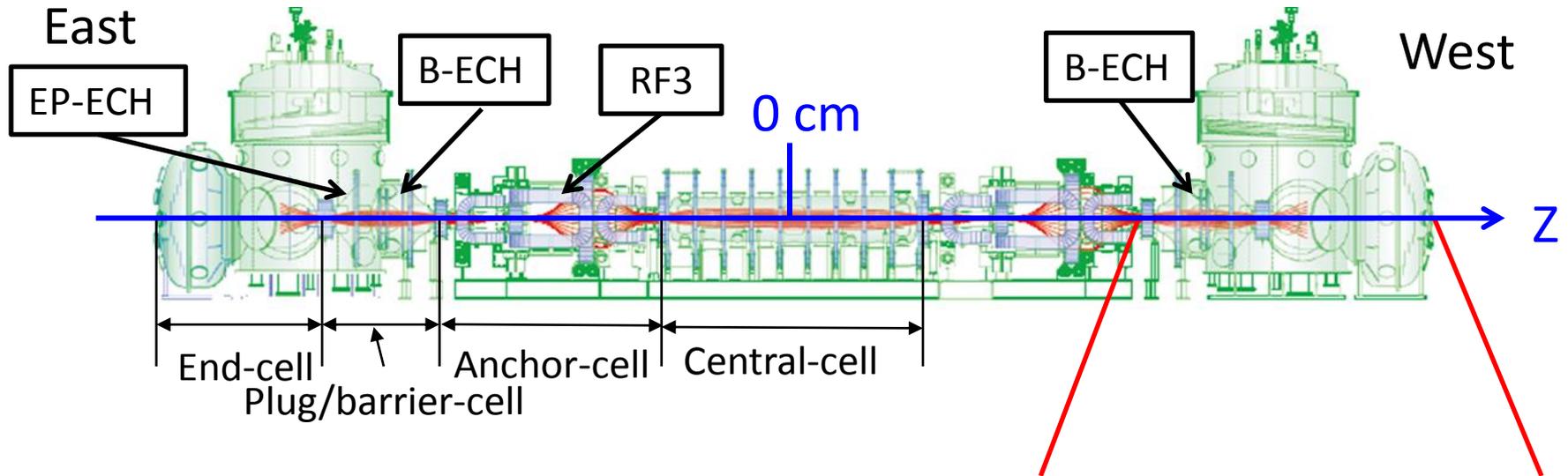
研究の目的

プラズマ中における不純物粒子の挙動を理解することで、炉心プラズマの性能やプラズマ冷却機構の性能を向上させることが出来る。

本研究の目的

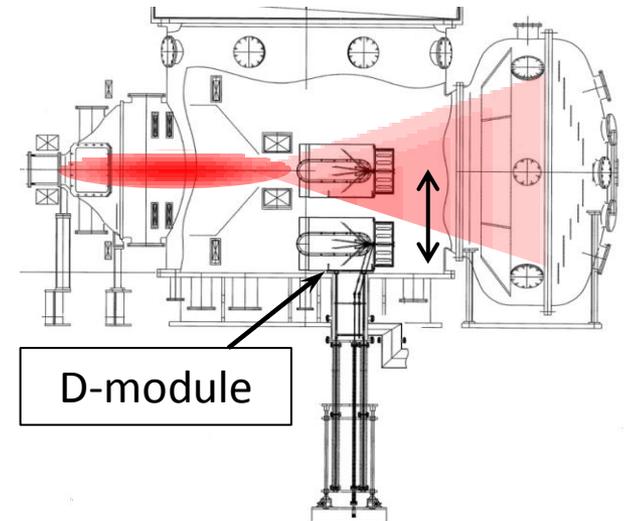
D-module(ダイバータ模擬実験モジュール)へ非接触プラズマ形成に向けてガス入射実験を行い、エンド部($Z=1073.5$ cm)、プラグ・バリア部($Z=923$ cm)、アンカー部外側($Z=730.3$ cm)における同時分光計測により、D-module内へ入射した不純物ガスの挙動を解析することで、不純物輸送の物理的機構を明らかにすること。

GAMMA 10/PDX



- セントラル部
 - RF加熱により水素プラズマを生成する。プラズマ閉じ込めの主領域である。
- アンカー部
 - 極小磁場配位によりプラズマを安定させる。
- プラグ・バリア部
 - サーマルバリア・プラグ電位を形成し、プラズマを閉じ込める。
- エンド部
 - 開いた磁力線構造をしている。プラズマが流出する部分

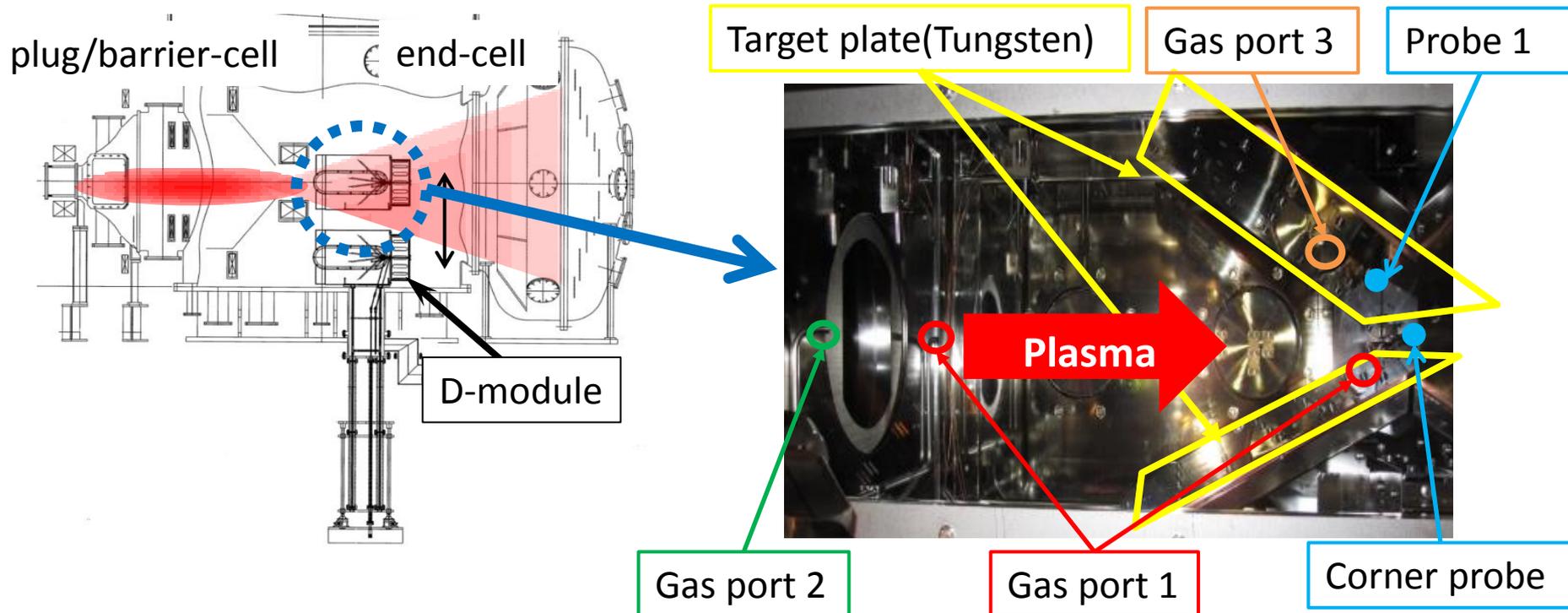
GAMMA 10/PDX west end-cell



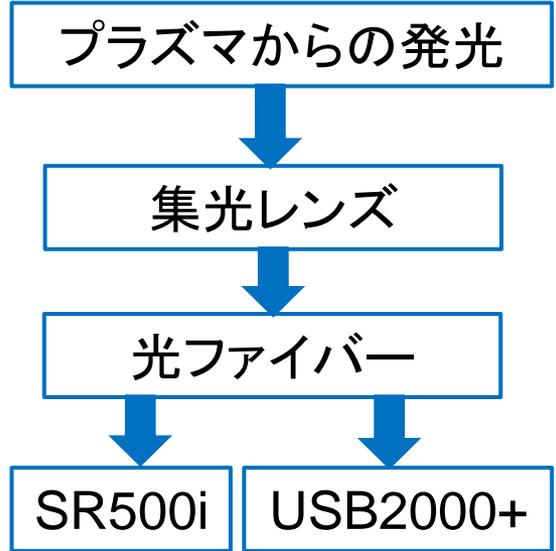
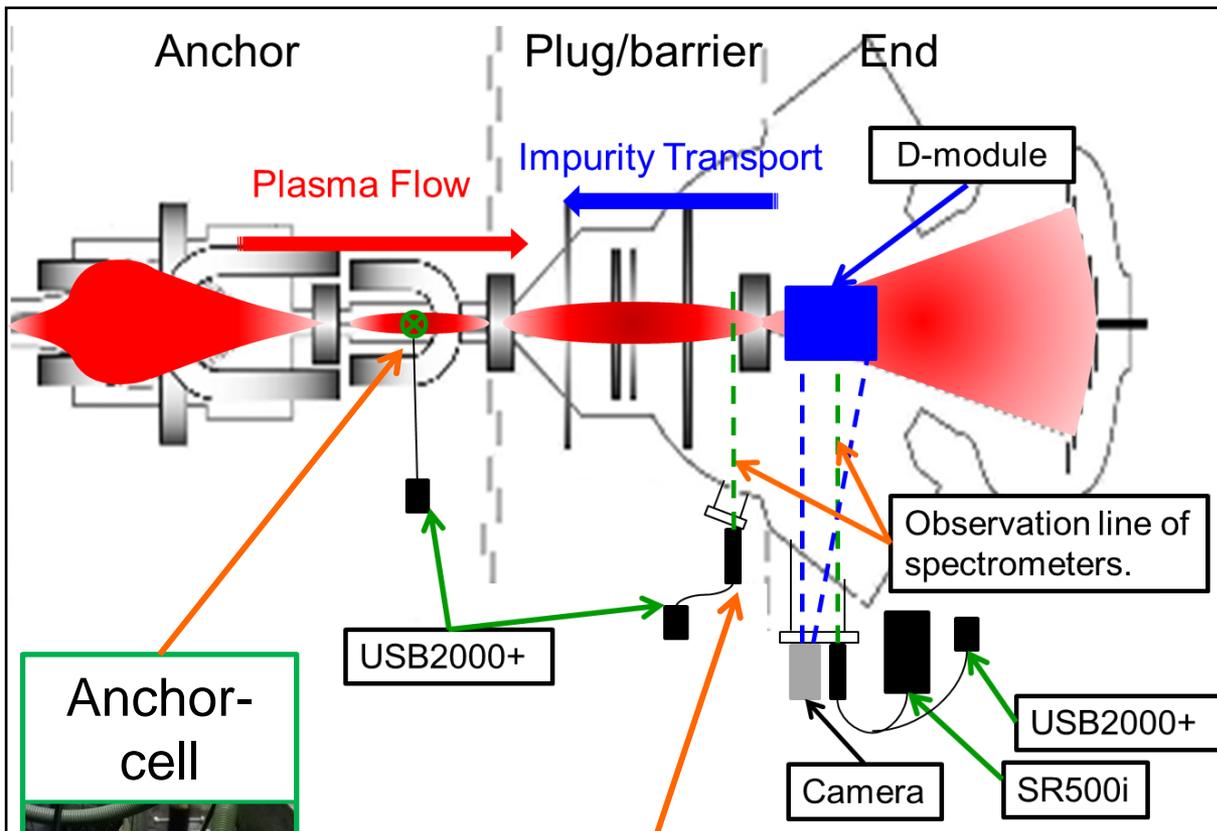
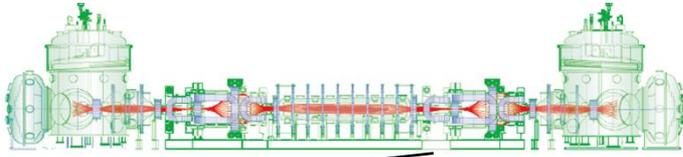
2012年にD-moduleを設置

D-module (ダイバータ模擬実験モジュール)

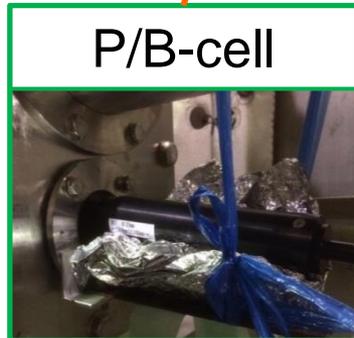
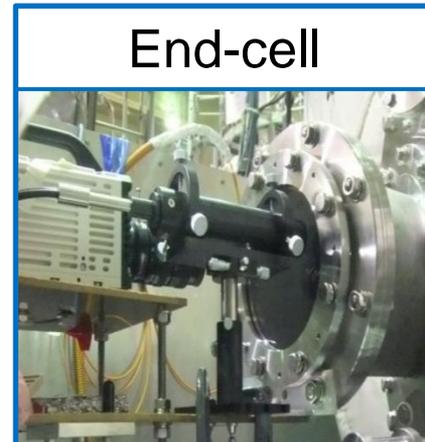
- D-moduleは、閉ダイバータを模した実験装置である。
- プラズマは磁力線に沿って入口側からターゲット板に向けて流れてくる。
- V字ターゲット板の角度は調整が可能である。(15-80°)
- 3種類のガスポートによるガスの入射が可能である。(H₂, N₂, He, Ne, Ar, Kr, Xe)



計測システム



Absolute sensitivity calibration is done.
(Only USB2000+)



分光器

USB2000+(From Ocean Optics)

Specifications	
Format	USB2000+(OceanOptics)
Grating	Holographic diffraction grating
Wavelength resolution	2.94 nm@656.27
Band pass	698 nm(190-888 nm)
Slit width	10, 25 μm
Pixel size	Width14 μm \times Length200 μm (2048pixel)
Exposure time	1 ms~65 s (This research 5 ms)



USB2000+

Shamrock500i(From ANDOR)

Specifications	
Format	ShamRock 500i(ANDOR)
Grating (L/mm)	150/600/1200/1800/2400
Wavelength resolution	0.018 nm@372.26 nm
Band pass	15 nm(2400L/mm)
Slit width	10 μm ~2.5 mm
Pixel size	16 μm \times 16 μm (1600 \times 200pixel)
Exposure time	10 ms~

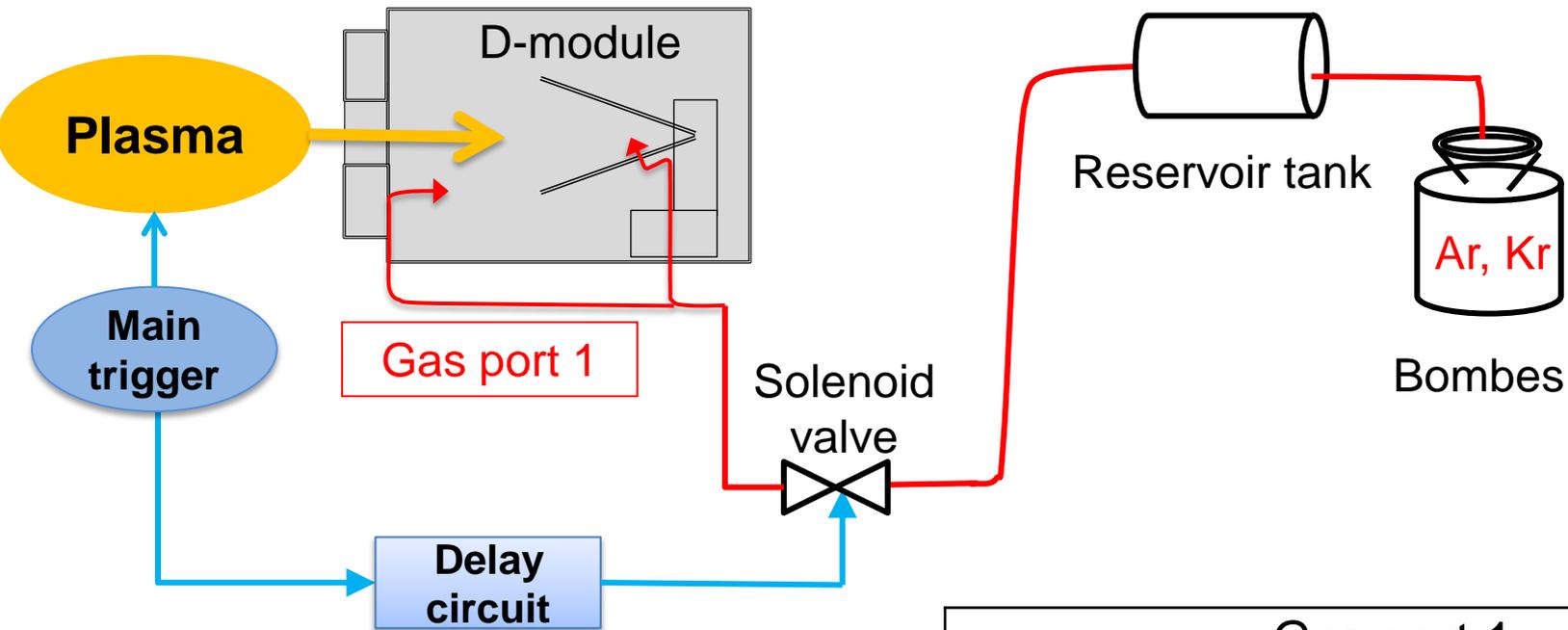


Shamrock500i

実験結果・考察

各測定位置におけるスペクトルの比較

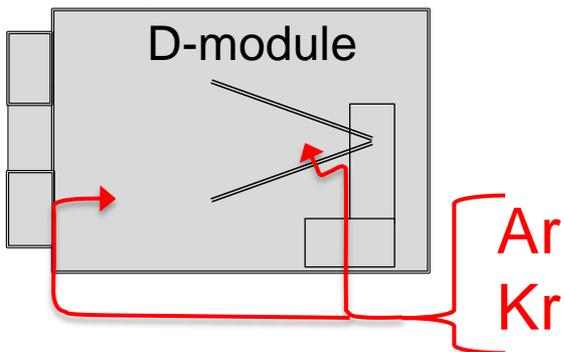
実験結果・考察



Ar, Krガスを入射した場合に複数の分光器を用いた同時計測を行った。V字ターゲットの角度は45°で固定した。プラズマの持続時間は400 msである。

Gas port 1			
Gasses	Plenum pressure	Delay	Width
	[mbar]	[s]	[s]
Ar, Kr	1000	0.05	0.5
	800		
	600		
	400		
	200		

Target plate : 45°



実験結果・考察

エンド部($Z=1073.5$ cm)、プラグ・バリア部(923 cm)とアンカー一部外側(730.3 cm)の比較(Ar & Krガス入射)

- Ar IとKr Iのスペクトルがエンド部で観測された。中性粒子からの発光が支配的であることが分かった。
- 入射した不純物ガスがプラグ・バリア部へ流れるにつれ電離された。
- アンカー一部外側で得られたスペクトルでは、Ar IIのスペクトル線数が増加し、Krから得られる発光線も減少した。

入射した不純物が上流部へ移るに渡って、イオン化が進むことが明らかとなった。

実験結果・考察

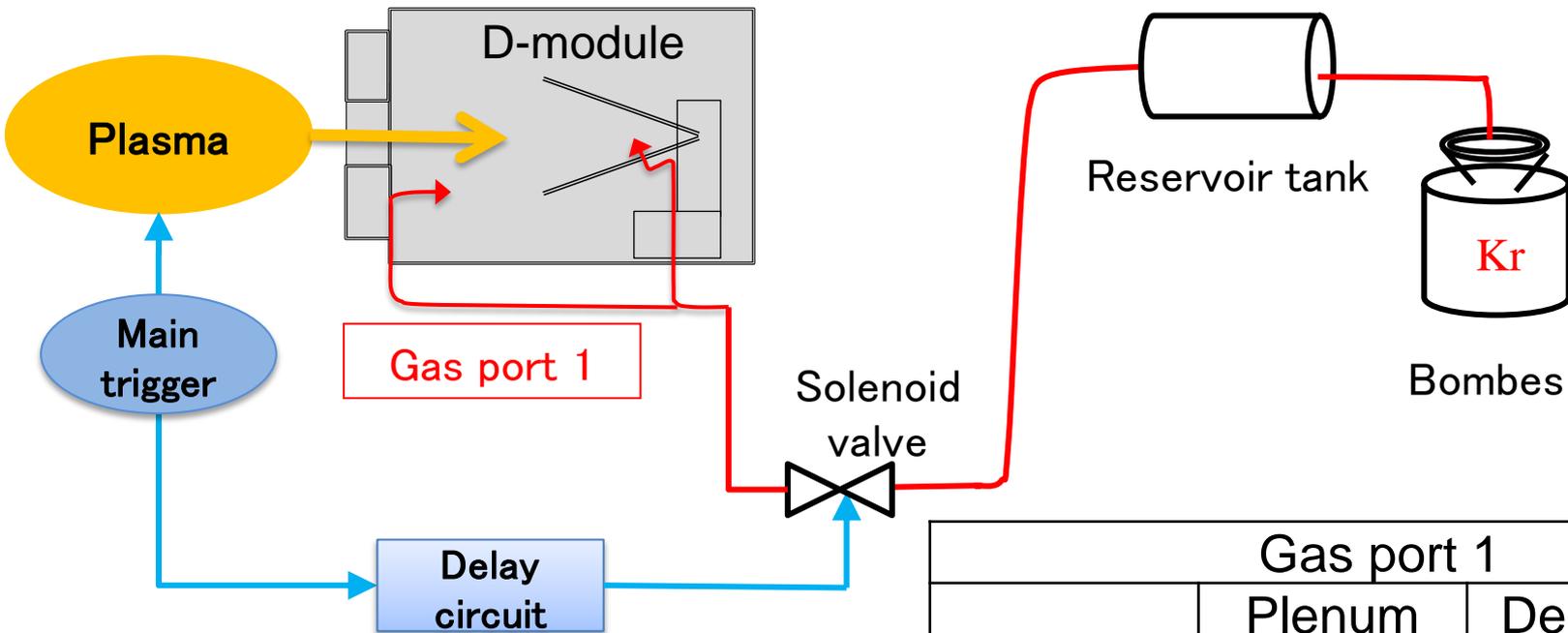
ArとKrの発光強度をエンド部(1073.5 cm)とプラグ・バリア部(923 cm)、エンド部とアンカー部外側(730.3 cm)において比較を行った。

- 上流側で得られたスペクトルでは、イオンからの発光がエンド部に比べ、強いことが分かる。
- イオンの発光量はプレナムガス圧を増加させるに連れ増加した。
- エンド部と上流部を比べると、 Kr^+ に比べ、 Ar^+ の上流側の発光は強くなることからArの方が上流側への輸送は大きいと考えられる。
- 中性粒子からの発光はエンド部に比べ上流部では、約1/1000である。

実験結果・考察

追加熱による不純物の挙動解析

実験結果・考察



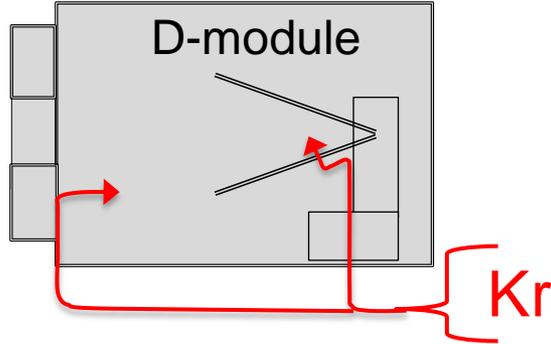
Ar, Krガスを入射した場合に複数の分光器を用いた同時計測を行った。V字ターゲットの角度は 45° で固定した。プラズマの持続時間は400 msである。

Gas port 1			
Gasses	Plenum pressure	Delay	Width
	[mbar]	[s]	[s]
Kr	1000	0.05	0.5

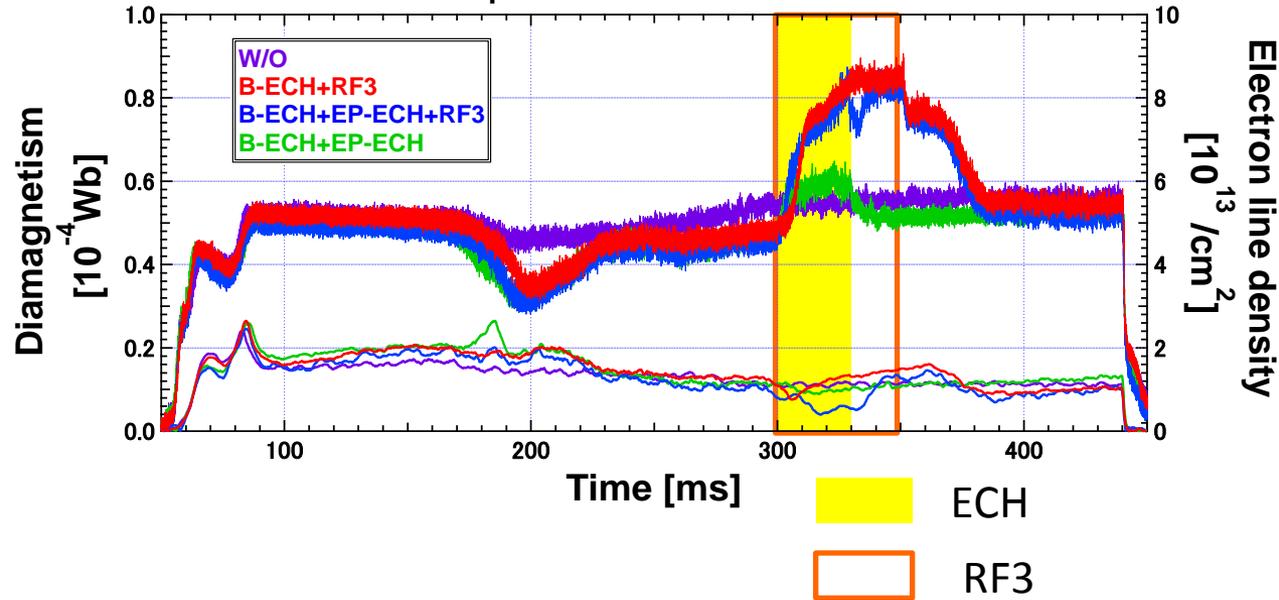
Heating	Out put	Time [ms]
B-ECH	100 kW	300-330
EP-ECH	230 kW	300-330
RF3(9.9 MHz)	110 kW	300-350

実験結果・考察

Target plate : 45°



Plasma parameter at central-cell



- エンド部(1073.5 cm)とプラグ・バリア部(923 cm)において得られたスペクトルを追加熱有の場合と無の場合を比較した。
- エンド部では、Kr IIの発光量が増加した。
- プラグ・バリア部では、Kr IIの発光量が減少し、壁由来の不純物であると考えられるC IIが増加した。

実験結果・考察

End (Z = 1073.5 cm)

- 西エンド部の端損失流は増加した。
- Krイオンの発光量がECH印加時間中で増加した。
- この上昇はEP-ECHによるものであると考えられる。

Krイオンの発光は以下の式で表すことが可能である。

$$I_{\text{Kr II}} \propto n_{\text{Kr}^+} \times n_e \times \langle \sigma v \rangle$$

Kr⁺
density

Electron
density

Rate
coefficient

D-module内の電子密度が約2倍に上昇した。

- Kr IIの発光量の上昇はKr⁺の密度と電子密度の上昇のいずれか片方、またはその両方が考えられる。
→ EP-ECHの追加熱によってエンド部へ端損失する電子とKr⁺が増加した為、発光量が増加したと考えられる。

実験結果・考察

Plug/barrier-cell (Z = 923 cm)

- 追加熱時間中では、Kr II は減少し、電子密度は上昇した。
- RF3を印加すると発光量の時間的な戻りが印加しない場合に比べてゆっくりになった。

$$I_{\text{Kr II}} \propto n_{\text{Kr}^+} \times n_e \times \langle \sigma v \rangle$$

Kr⁺
density

Electron
density

Rate
coefficient

ECH追加熱により、高温と高速の電子が生成され、RF3追加熱により密度が上昇したことから発光量が変わった。以下の理由が考えられる

- より高電離のイオン状態への遷移
- プラズマの摩擦力により、Kr⁺が下流部へ押し戻されたことによるKr⁺密度の減少

追加熱重畳後の発光量の戻りが時間的にゆっくりであるのは、不純物遮蔽効果による不純物粒子輸送低減の可能性が示唆される。

まとめと今後の課題

まとめ

1. 本実験では、新しい分光系をアンカー一部外側($Z=730.3$ cm)に設置し、エンド部(1073.5 cm)とプラグ・バリア部(923 cm)において観測されたスペクトルを比較した。
2. エンド部とプラグ・バリア部、エンド部とアンカー一部外側の発光量を比較した結果、エンド部では中性粒子からの発光が支配的であった。プレナムガス圧を上昇させると上流側でのイオンの発光がエンド部に比べ高くなった。
3. ECHとRF3を重畳した場合、エンド部では加熱時間帯において発光量が上昇した。
4. 一方、プラグ・バリア部では、Kr IIの発光量は減少しその時間的な戻りがゆっくりであった。
→不純物の遮蔽効果の可能性が示唆される。

今後の課題

1. プラグ・バリア部における電子温度の計測が必要である。
2. 複数の追加熱を重畳させたが、それぞれ単独で追加熱を行い、それぞれの不純物への効果を調べる必要がある。