

GAMMA 10/PDXにおけるダイバータ模擬とPWI研究の進展

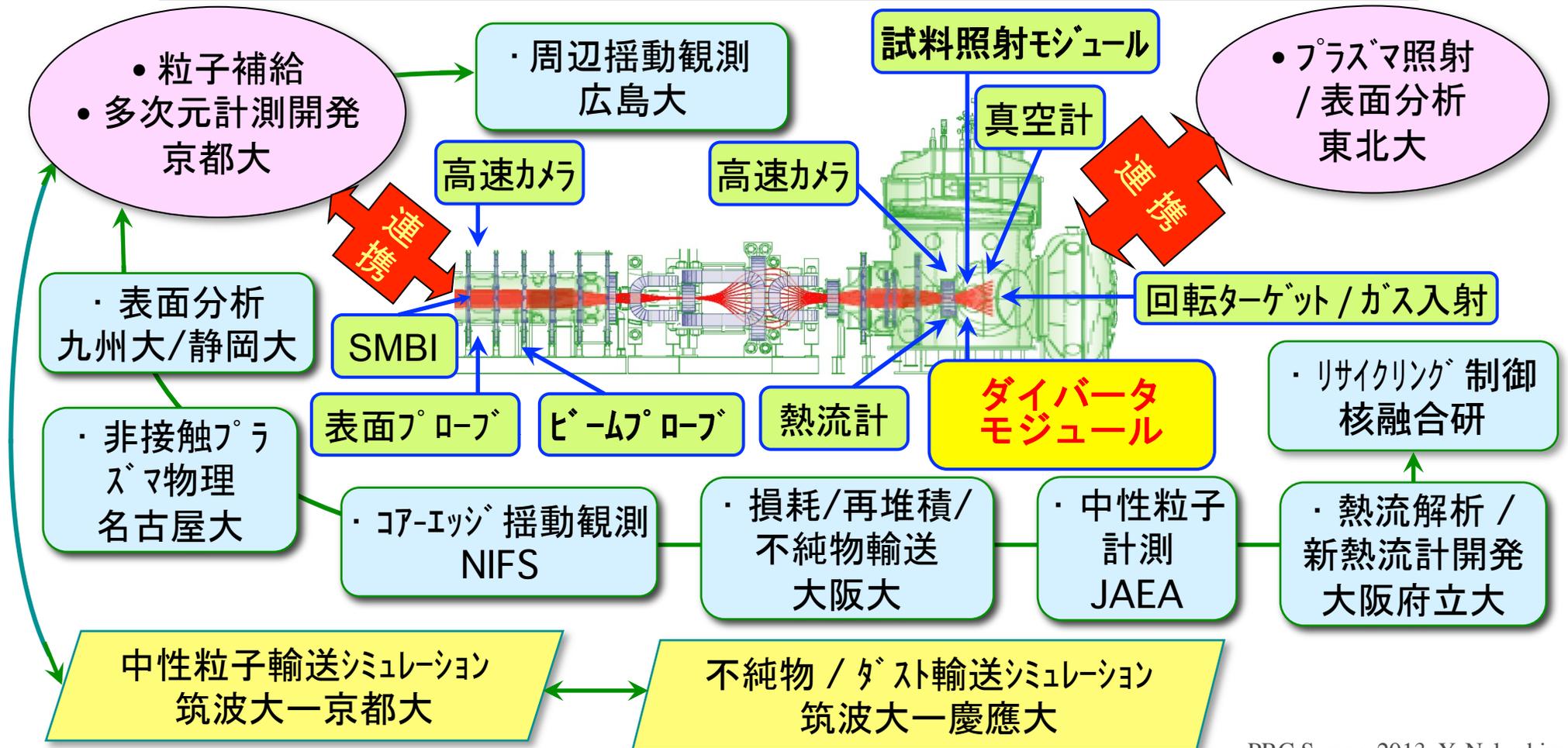
プラズマ研究センター 中嶋洋輔,
ガンマ10グループ

CONTENTS

1. はじめに
2. ガンマ10端部における高熱流プラズマ束生成実験
3. ダイバータ模擬実験モジュール用いた最近の実験結果
4. ダイバータ模擬実験に関するシミュレーション解析、今後の研究方針
5. まとめ

境界プラズマ制御を目標とした ダイバータ模擬/PWI研究の展開

- 高熱流粒子束制御, ○ 材料へのプラズマ照射 / 損耗・再堆積
- ダイバータ候補材とプラズマとの相互作用 / 不純物輸送
- 非接触プラズマ実現, ○ コア - エッジカップリング



GAMMA 10 の概略及びE-Divertorの目標性能

GAMMA 10 Device

Total length 27 m

B_{max} : 3 Tesla

ICRF: 500 kW × 4

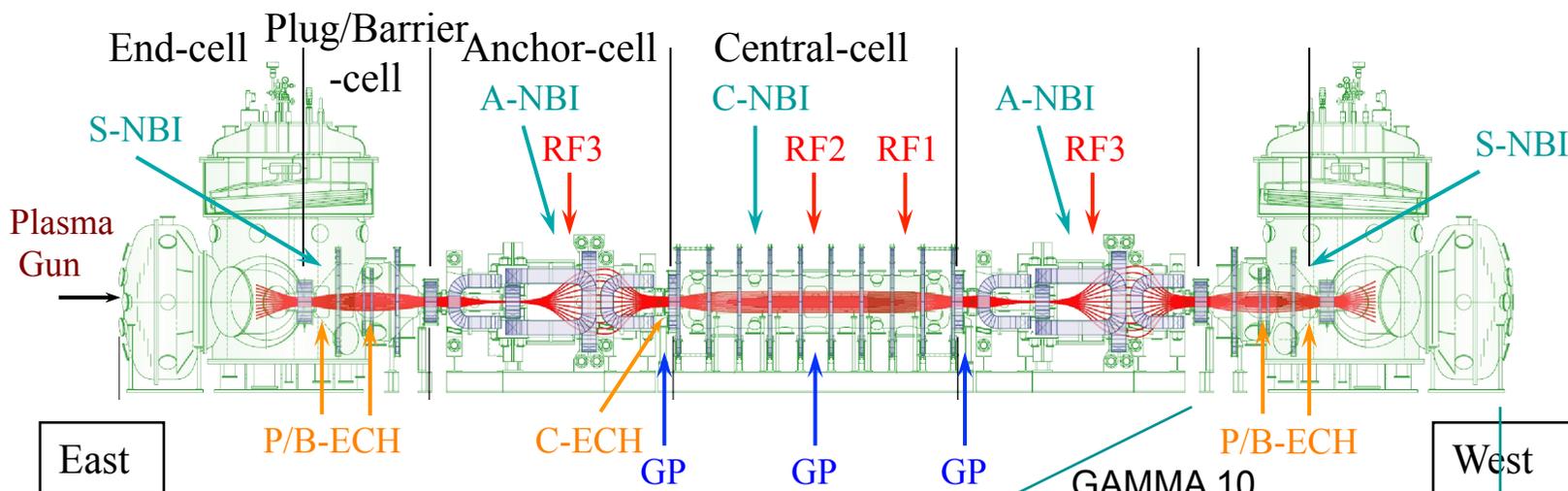
ECH: 400 kW × 3
200 kW × 2

NBI: 1.5 MW × 4
2.7 MW × 2

N_e : $\sim 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

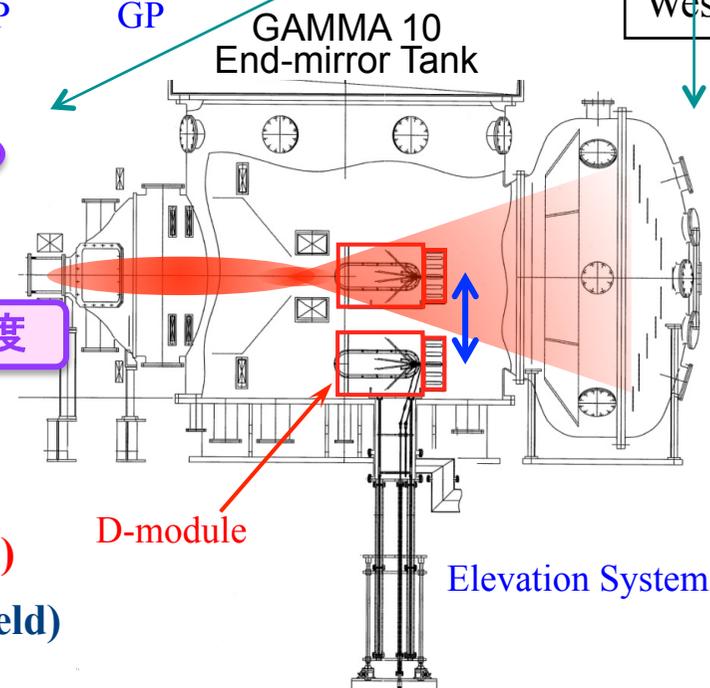
T_i : $\sim 10 \text{ keV}$

T_e : $\sim 100 \text{ eV}$



E-Divertor parameters (already achieved)

- Plasma diameter : **0.1 ~ 0.3 (1.0) m ϕ** ← 大口径プラズマ
- Plasma density : $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3} < 10^{18} \text{ m}^{-3}$
- Electron temperature : **30 eV (only RF), 100 eV (with ECH)**
- Ion temperature : **50 ~ 500 eV (only RF) $\sim 400 \text{ eV}$** ← 高温度
- Magnetic field : **0.15 ~ 1.5 Tesla** ← 強磁場環境
- Particle flux density : $10^{22} \sim 10^{24} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} < 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Heat flux density : **0.1 ~ 20 MW/m 2 $\sim 10 \text{ MW/m}^2$ (with ECH)**
- Plasma duration : **0.4 sec. ~ 4 sec. (10 sec. with low magnetic field)**
- Fluence : **$10^{23} \sim 10^{25} \text{ m}^{-2} / \text{day}$, $\sim 10^{26} \text{ m}^{-2} / \text{week}$**



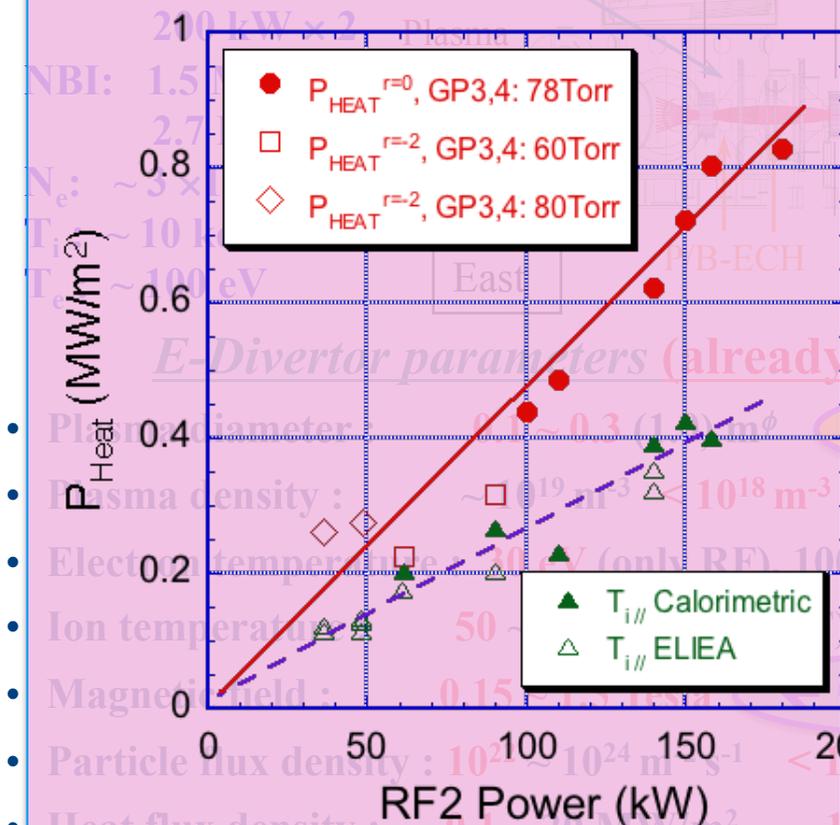
GAMMA 10 の概略及びE-Divertorの目標性能

GAMMA 10 Device

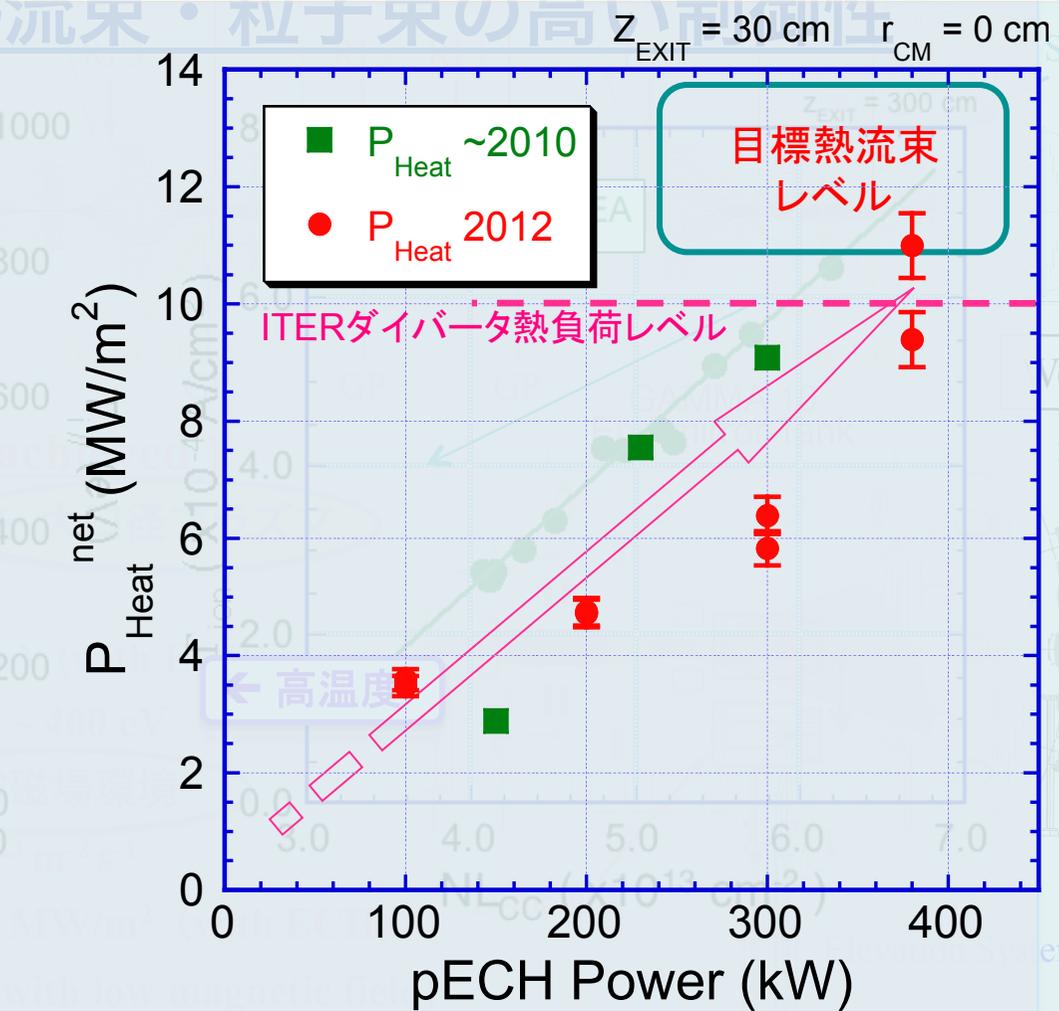
Total length 27 m

B_{max} : 3 Tesla
ICRF: 500 kW
ECH: 400 kW × 3
NBI: 1.5 MW

ICRF波動による熱



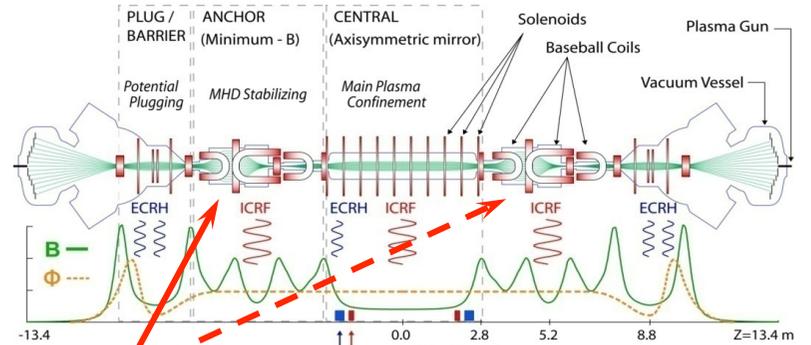
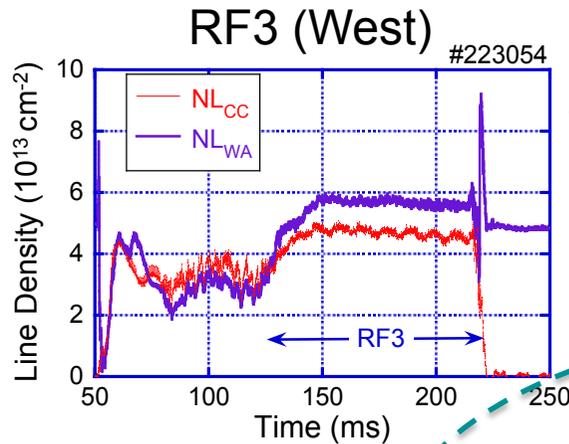
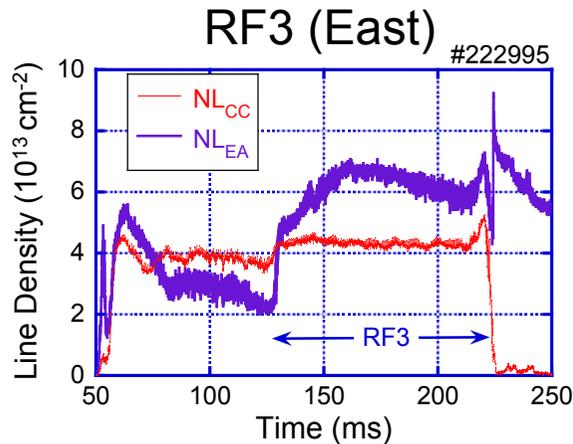
ECHによるITERリリバントな熱流束の発生



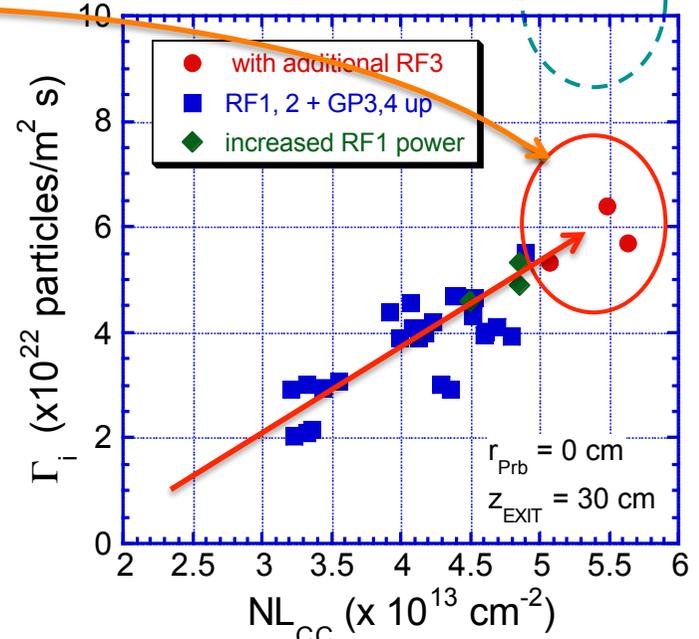
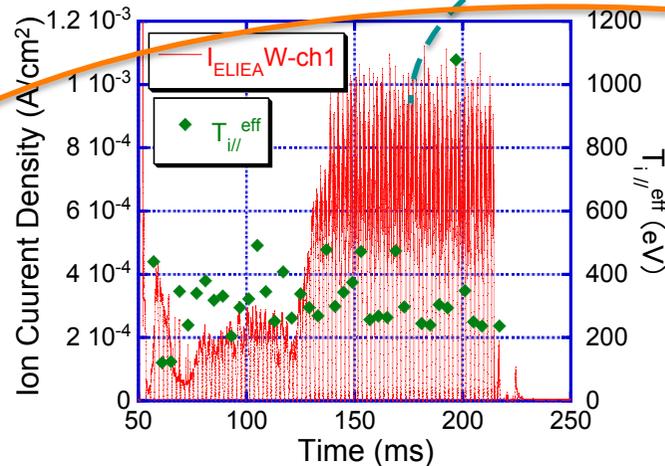
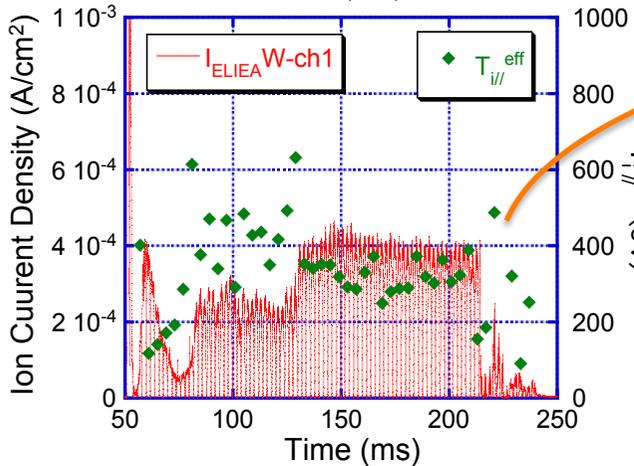
Fluence: $10^{23} \sim 10^{25} \text{ m}^{-2} / \text{day}$, $\sim 10^{26} \text{ m}^{-2} / \text{week}$

ICRFによる高熱流束生成実験

粒子束密度の更なる増加を目指してガンマ10東西極小磁場アンカー部にICRF (RF3) による追加加熱実験を行った。



RF3 $\Gamma_i > 10^{23}$ is expected.

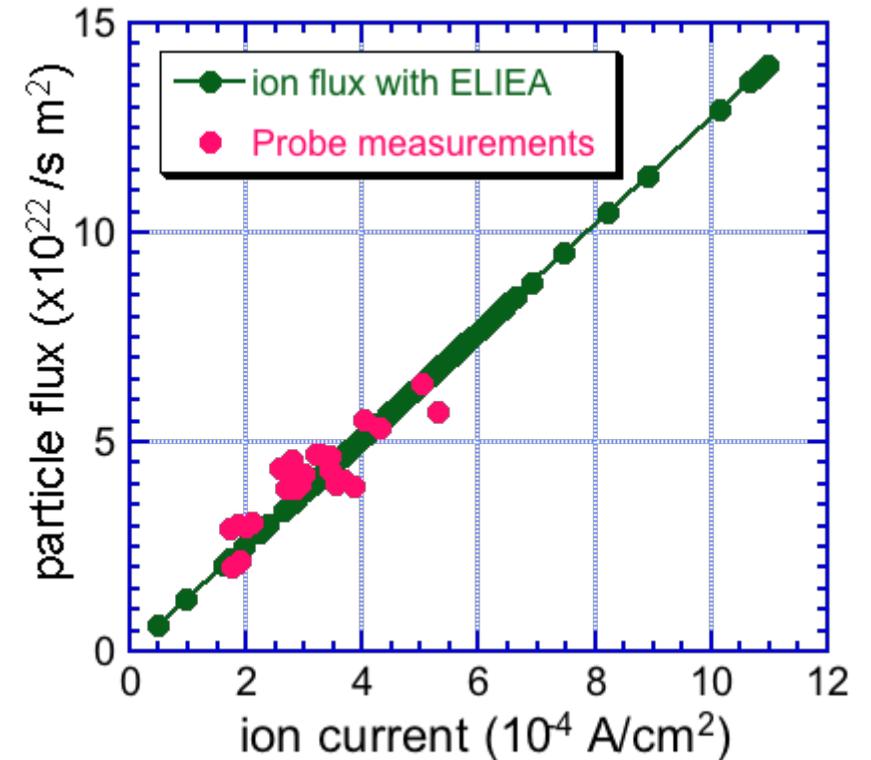
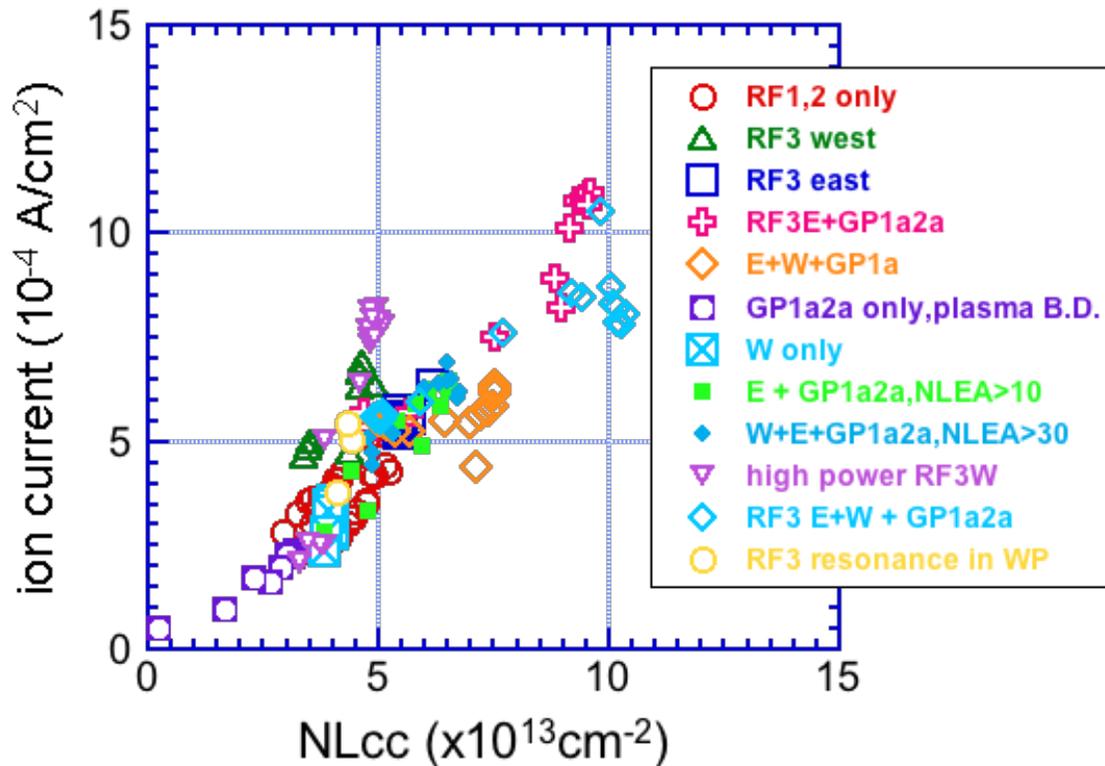


両アンカー部へのICRF加熱により、セントラル部及びアンカー部における顕著な密度増加が認められ、同時に端部粒子束密度の増加が認められた。

ICRF追加熱による粒子束の強化

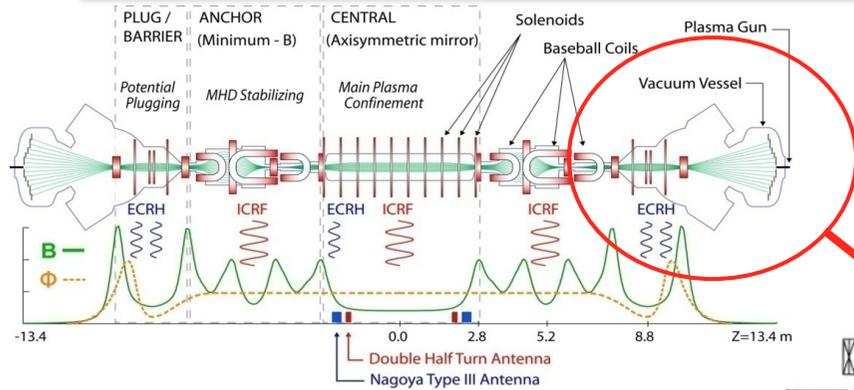
種々の実験条件におけるセントラル部
プラズマ線密度と端損失イオン電流の相関

方向性プローブによる粒子束密度と
ELIEAによる端損失イオン電流の相関

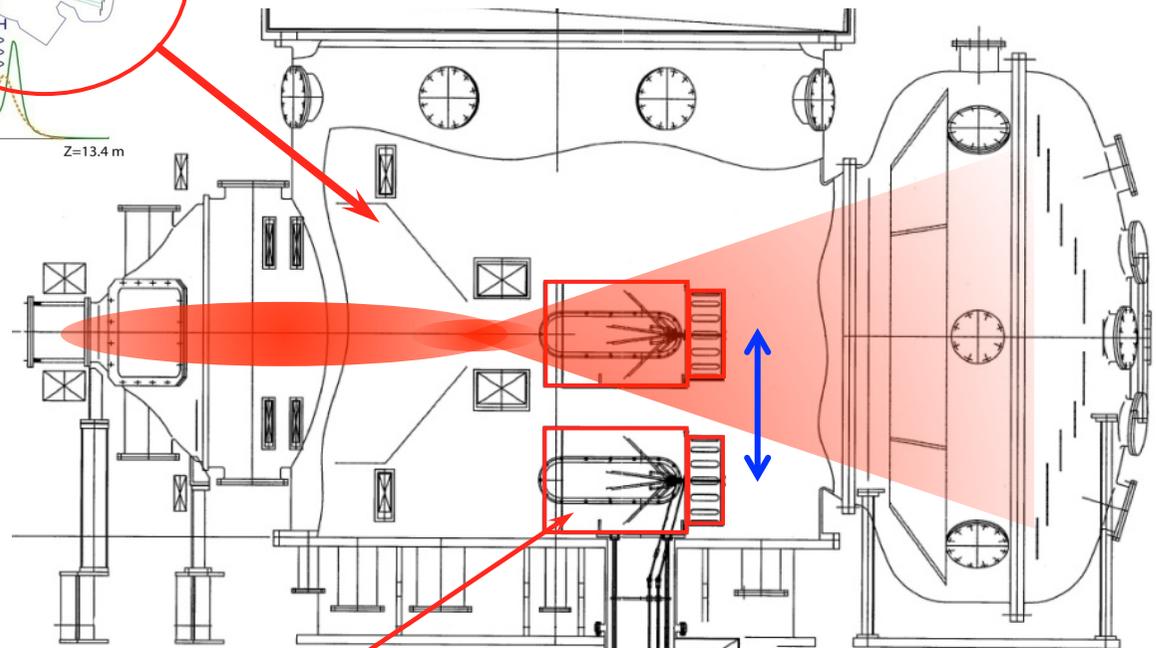


- 東西アンカー部におけるICRF追加熱によって得られた粒子束密度の増加を、ELIEAとプローブ計測の相関から、端部ミラー出口において $10^{23}/\text{m}^2\text{sec}$ を超える端損失粒子束が達成されていることを確認した。

ダイバータ模擬実験装置(D-module)の設置

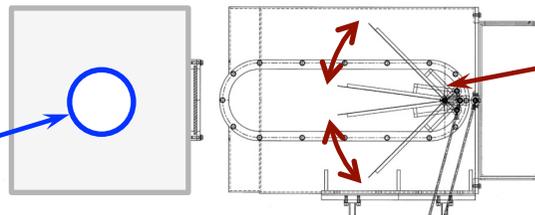


ガンマ10西エンド部真空容器



- 閉ダイバータ化に伴う中性粒子圧縮とリサイクリング促進, 排気
- ダイバータ内ガス導入による放射冷却機構の研究
- ダイバータ角度変更機能による磁力線との角度依存性の研究

ダイバータ模擬実験
モジュール(D-module)



昇降システム

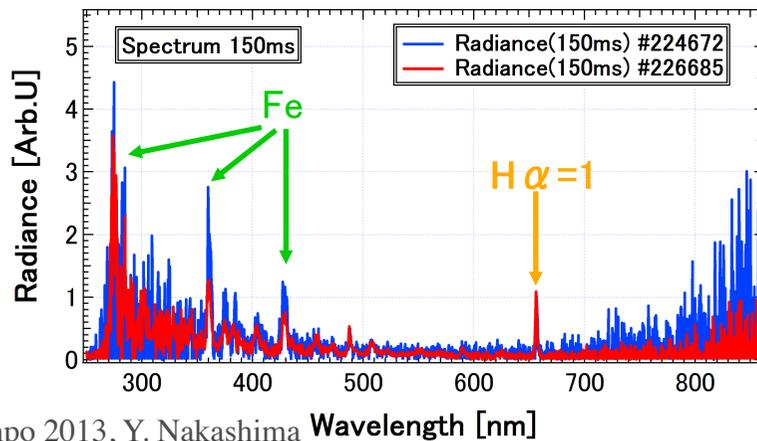
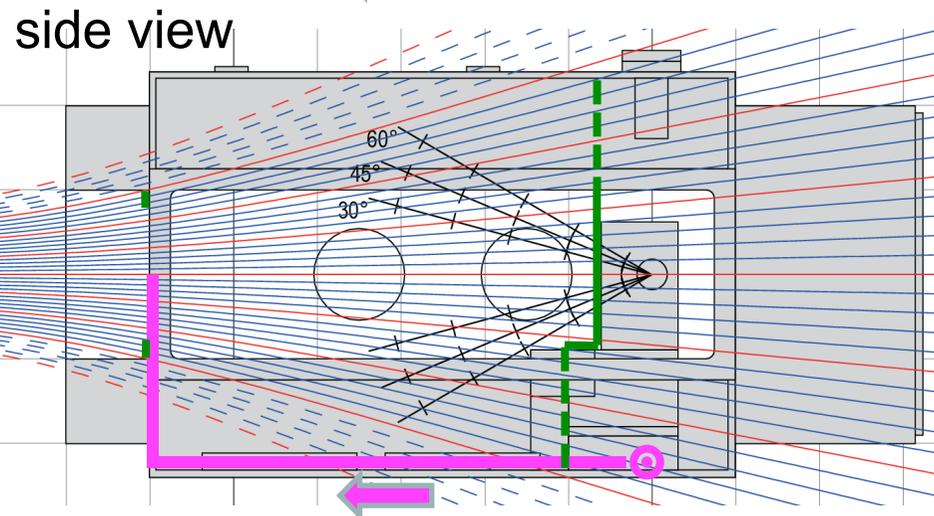
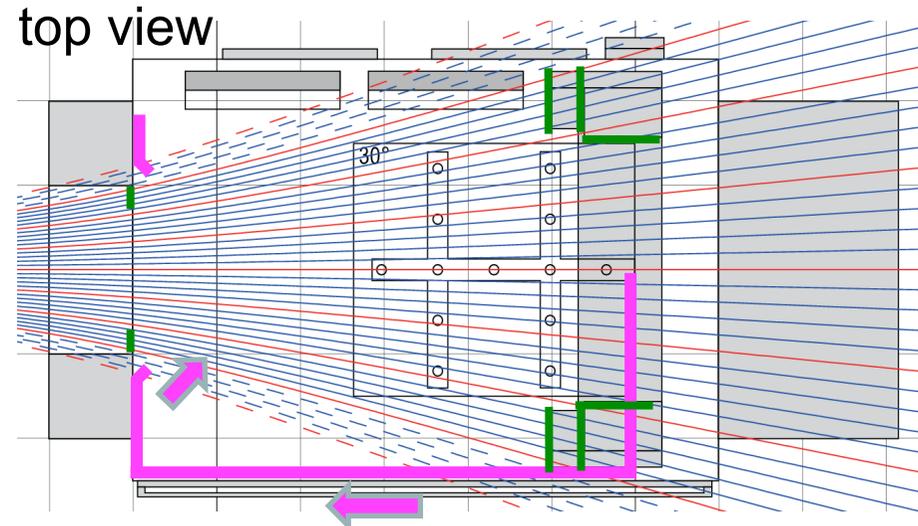
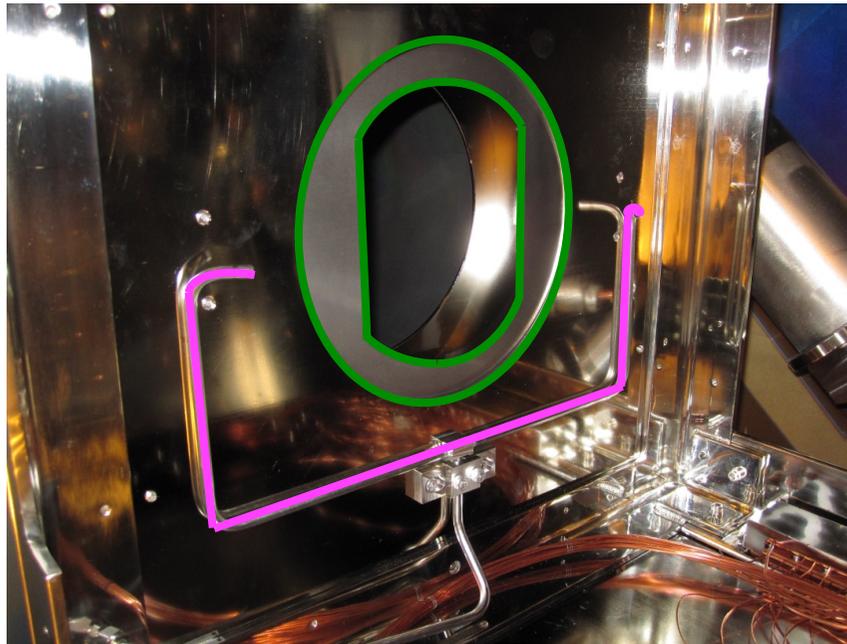
タングステンターゲットの
角度は、15°～80°で可変

放射冷却用ガス入射口
(He, Ne, N₂, Ar)

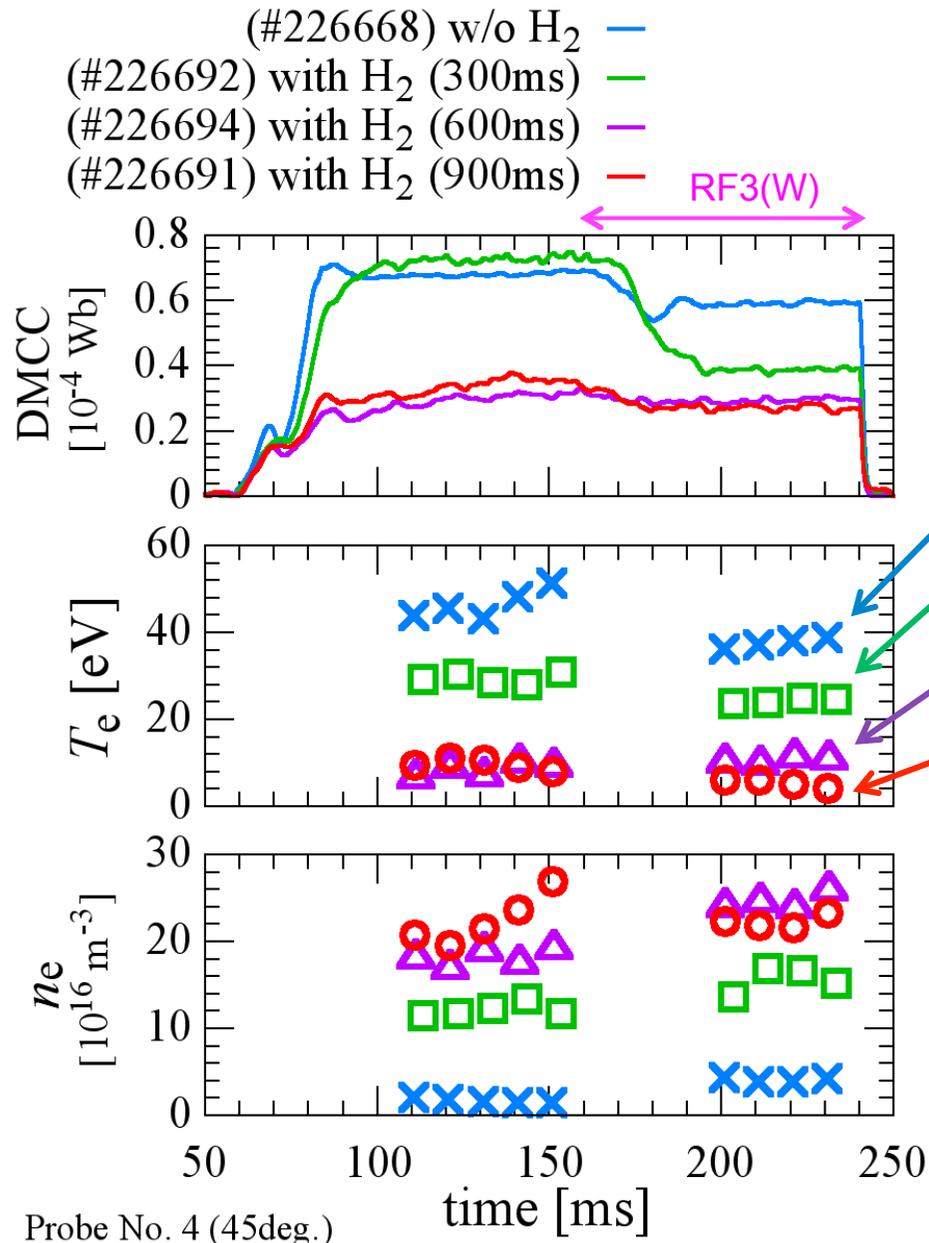
プラズマ流束入射口φ200

D-module用いた本格実験への向けた改造

- D-module内のプラズマ密度増加を目指して水素ガス導入ラインを増設した。
- 昨年度観測された不純物(主にFe)の輻射強度を抑える為に、モジュール入口にタングステン製リミターとプラズマが当たる面にタングステン板のカバーを設置した。



D-moduleへの水素ガス入射実験



- D-module内への水素ガス導入によって、ターゲット板上の密度を約10倍 ($2\sim 3 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$) に増加させることが出来た。
- 電子温度も当初、数10eVから数eV程度に低下した。(但しセントラル部の反磁性量も50%程度低下)

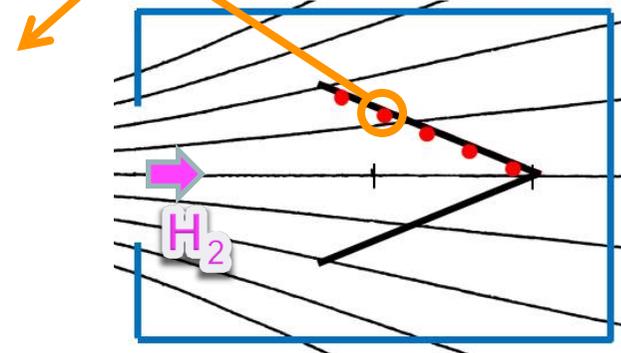
水素ガス入射なし

水素ガス入射 (パルス幅300ms)
 (プラズマ点弧から-0.6sにスタート)

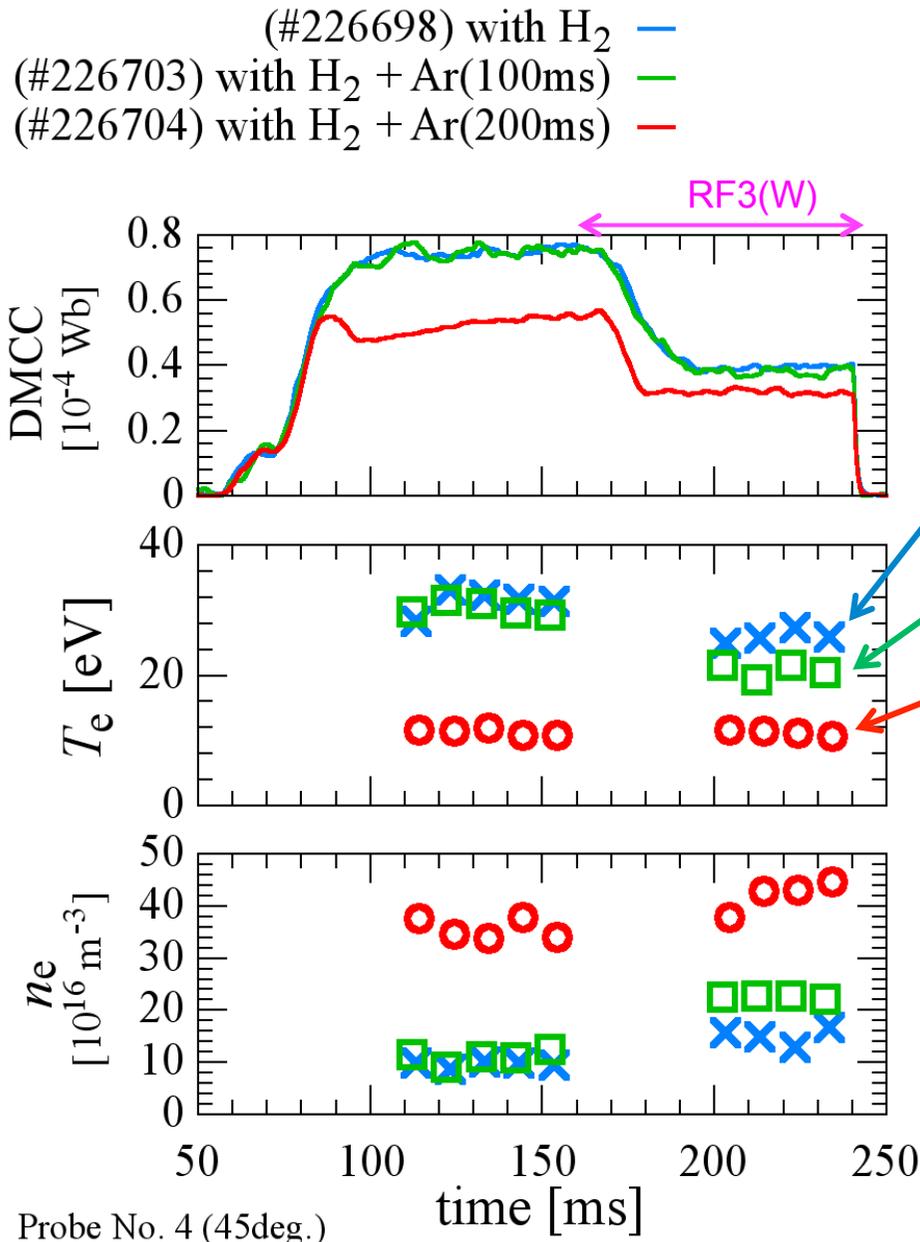
水素ガス入射 (パルス幅600ms)
 (プラズマ点弧から-0.6sにスタート)

水素ガス入射 (パルス幅900ms)
 (プラズマ点弧から-0.98sにスタート)

(全て1030mbar)



D-moduleへの水素及びArガスの同時入射実験

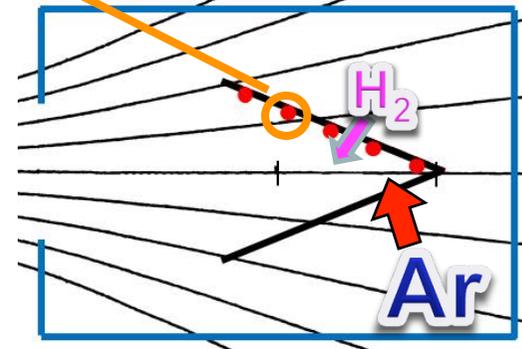


- D-module内への水素ガス導入及びArガスの同時入射によって、ターゲット板上の密度 $4\sim 5 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ に到達した。

水素ガス入射(パルス幅300ms)のみ
 (プラズマ点弧から-0.3sにスタート、1030mbar)

水素+Ar(パルス幅100ms)
 (dsub4.2+0.85s, 1200mbar)

水素+Ar(パルス幅200ms)
 (dsub4.2+0.7s, 1200mbar)



Ar入射実験時の分光計測結果

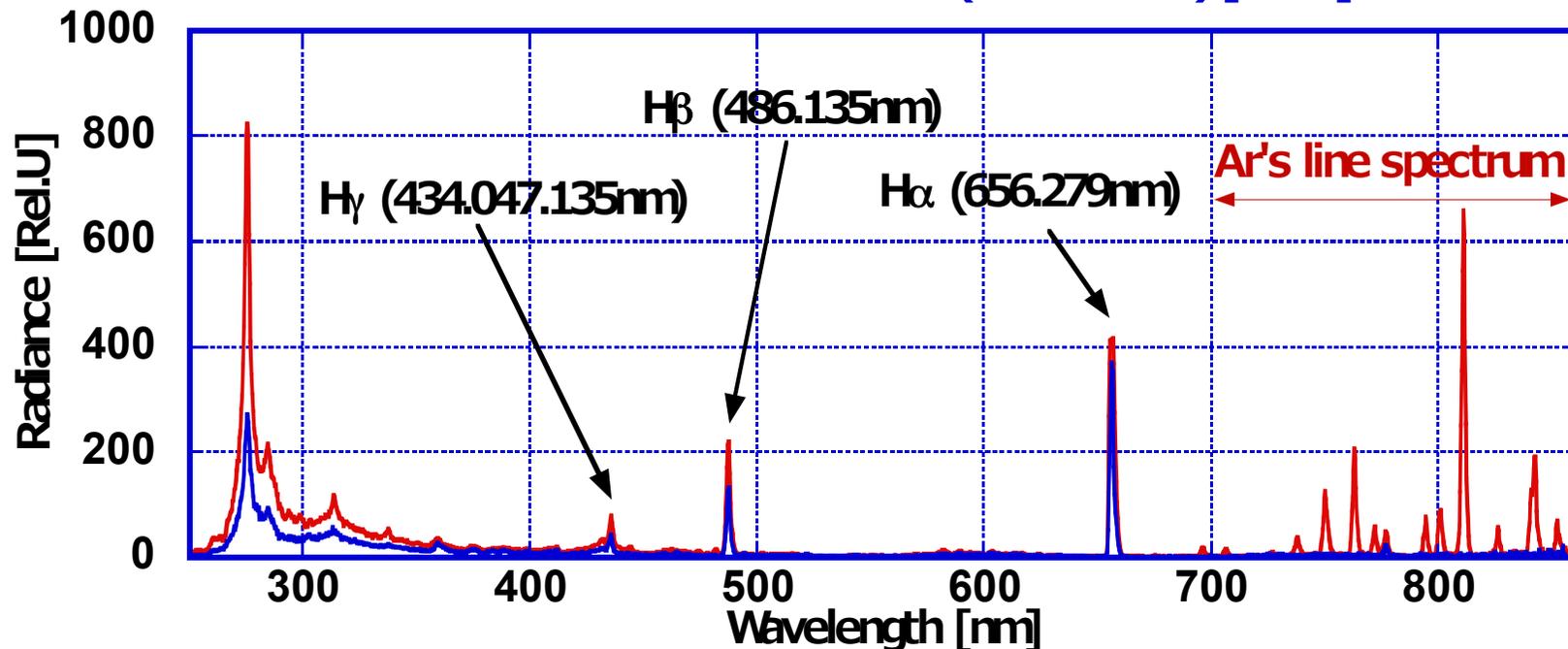
D-module 内へのArガス入射時の分光計測*を行い、波長680nmと860nm 間のアルゴンの線輻射を確認した。

ガス入射
条件

Shot No.	H2 Gas				Ar Gas		
	delay (start time)		width	Plenum pressure	delay	width	Plenum pressure
	Piezodriver						
226704-7	700ms	-0.3s	100ms	1030m bar	+0.7s	200ms	1200m bar
226699					-		

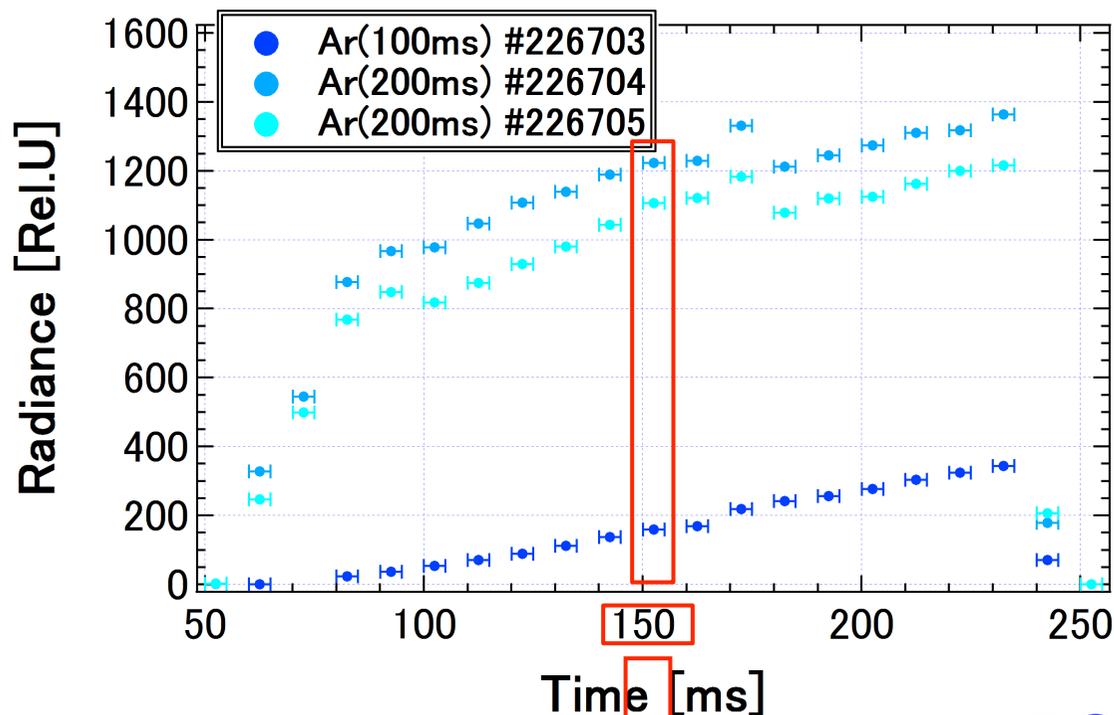
Measurement timing: 150ms

— Radiance (with Ar Gas) [Rel.U] #226706
— Radiance (without Gas) [Rel.U] #226698



※分光器の感度較正は標準光源を用いて2012年に行われた。

アルゴンに起因する輻射エネルギーの評価



Ar Iに起因する発光強度から輻射エネルギーの評価を行い、3種類の入射条件における比較を行った。

Arガスの発光量は時間と共に徐々に増加している。

D-module内のArガス導入に時間遅れが生じている為、**タイミングの最適化**が必要。

(150ms)

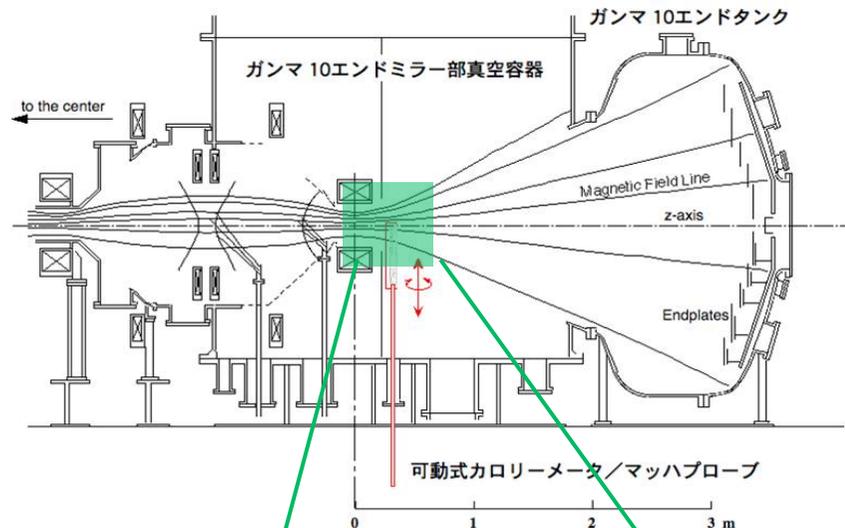
Shot No.	Ar Gas		Te [eV]
	width [ms]	Radiance [Rel.U]	
226698	-	0	24.7
226703	100ms	1566	22.3
226704	200ms	10564	8.9
226705	200ms	9576	10

この各ショットの150msの時間帯における放射輝度をもとに、プラズマの損失エネルギーと電子温度との関連を調べた。

ガス導入に伴う輻射損失エネルギーの増加と**電子温度の減少**が確認された。
→ 今後、**放射冷却効果との関係**を詳細に調べて行く。

E-Div.部の背景プラズマのシミュレーション解析

メッシュ構造と境界条件



慶応大学 畑山先生との
共同研究の元、数年前
から開始された。

計算領域:

X 軸方向 : 0 ~ 15 cm

Z 軸方向 : 0 ~ 70 cm

総メッシュ数: 3300

X 軸方向 : 50 , Z 軸方向 : 66

境界条件

Z 軸上 : 対称境界条件

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial T_e}{\partial x} = \frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{\partial u_{||}}{\partial x} = 0$$

ダイバータ板上境界条件

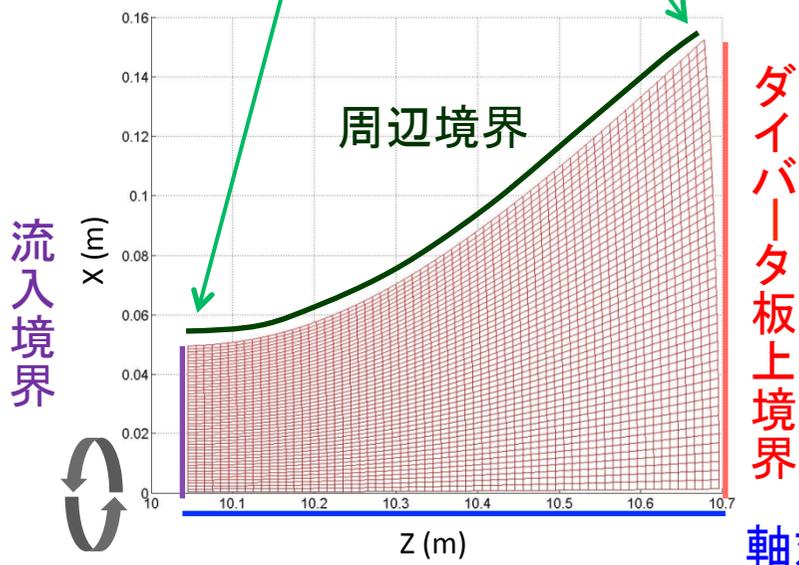
$$u_{||} = \sqrt{(T_i + T_e)/m}, Q_j = \alpha_j n u_{||} T_j, (j = i, e)$$

上流 : ディレクレ境界条件

$$T_i = 100eV \quad T_e = 30eV \quad n = 1.0 \times 10^{19} m^{-3}$$

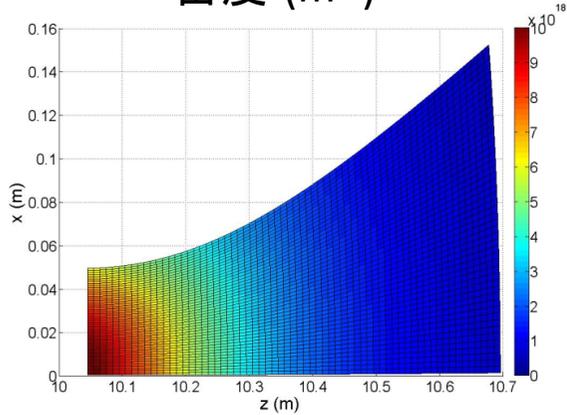
周辺 : ノイマン境界条件

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial T_i}{\partial x} = \frac{\partial T_e}{\partial x} = 0$$

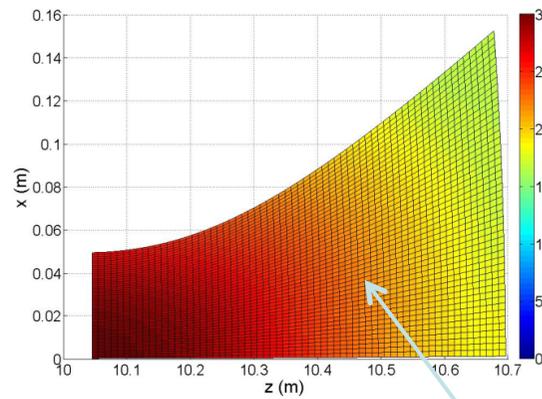


水素ガス導入効果のシミュレーション結果

密度 (m^{-3})

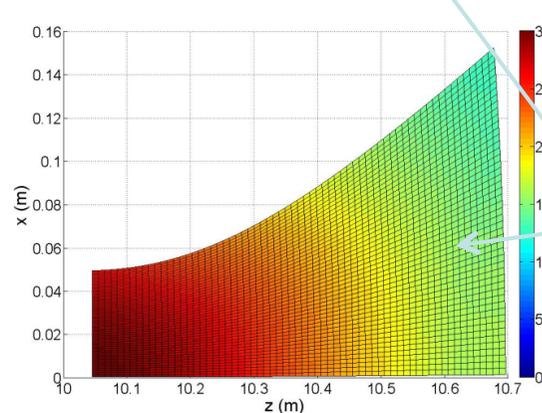
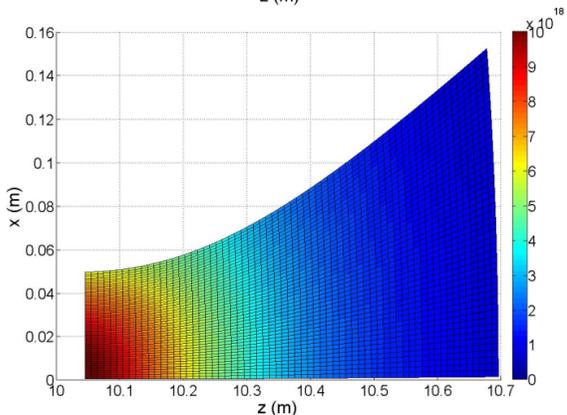


電子温度 (eV)



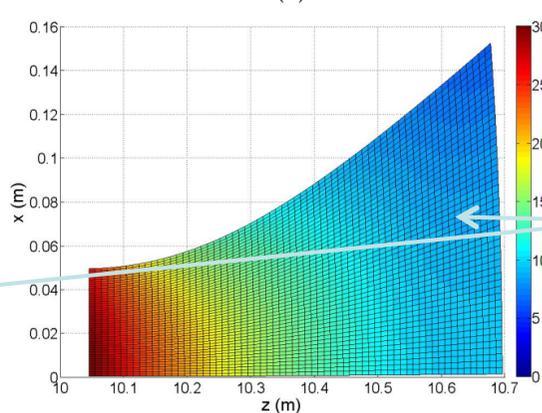
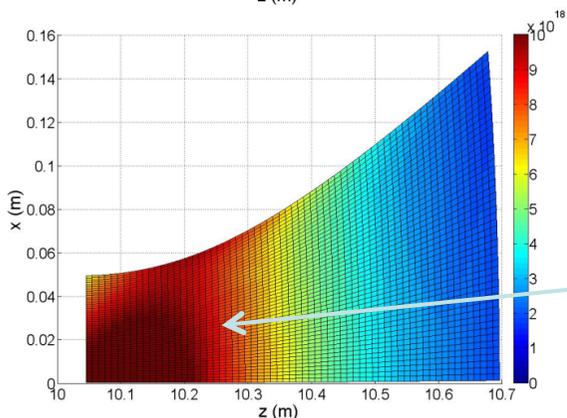
中性水素粒子は、計算系内に**一様**に分布させている。

中性粒子密度: $+ 5.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$



中性粒子密度: $+ 1.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

プラズマ密度の増加は余り見えない。
一方、z軸方向に電子温度減少が、
起こっている。



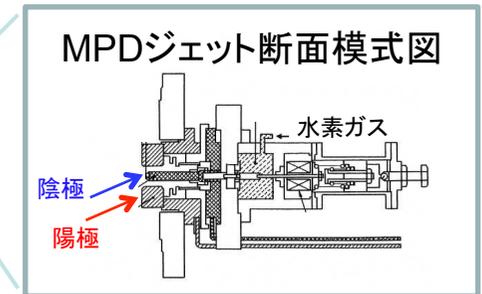
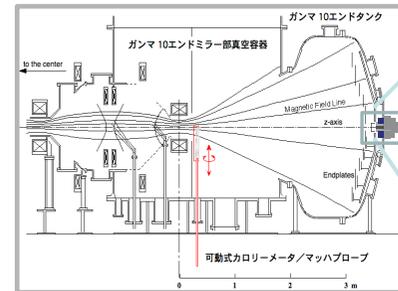
中性粒子密度: $+ 6.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

プラズマ密度増加により、密度の
ピーク値が**ターゲット側に移動**して
いる。
電子温度は、**更なる減少**を見せて
いる。

今後のダイバータ模擬に関する研究課題

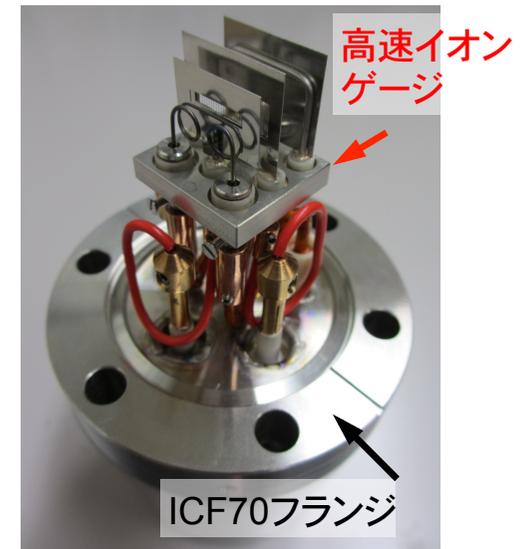
＜高熱流生成関連＞

- 加熱系増設(プラグバリア部アンテナ増設)による高粒子束の生成
- ECH等によるELM模擬実験を想定したパルス熱流の生成実験
- **ダイバータ模擬プラズマへのMPDプラズマジェットの入射実験**



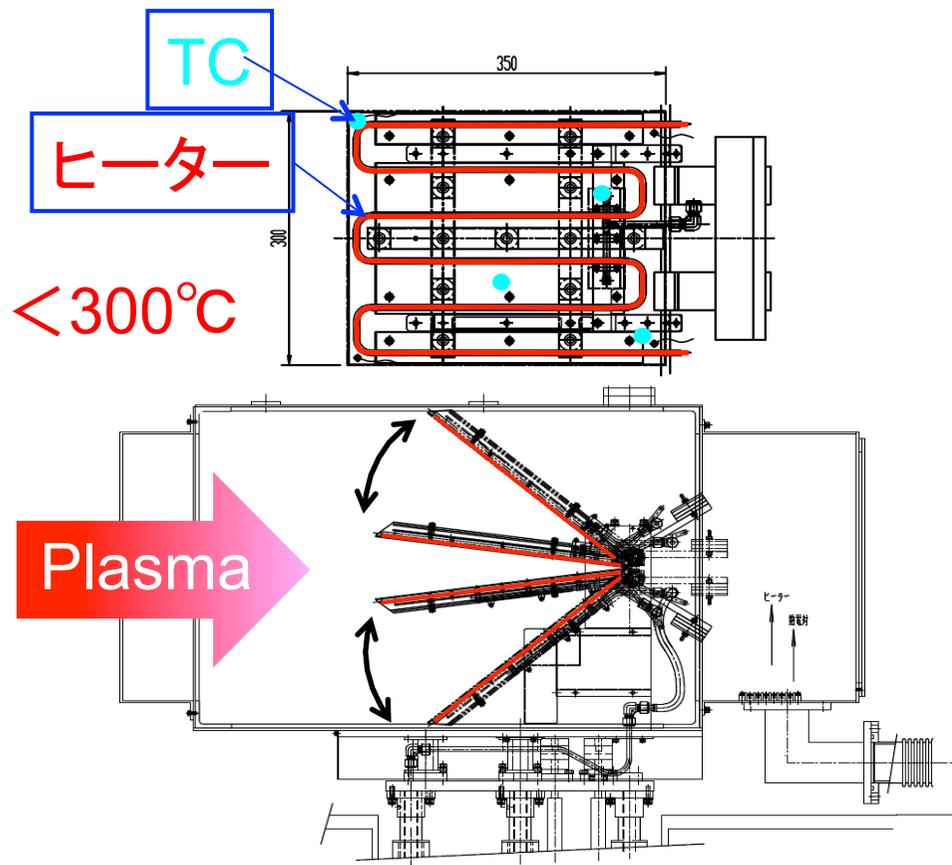
＜D-module関連＞

- V字ターゲット高温化実験
- 加熱系やガス導入によるダイバータ部密度の増加
- 希ガス導入の最適化による非接触プラズマ形成
- 高分解能分光器を用いた精密な分光計測
- **D-module内の高速イオンゲージによる真空度計測 (JAEA 福本先生 共同研究課題)**



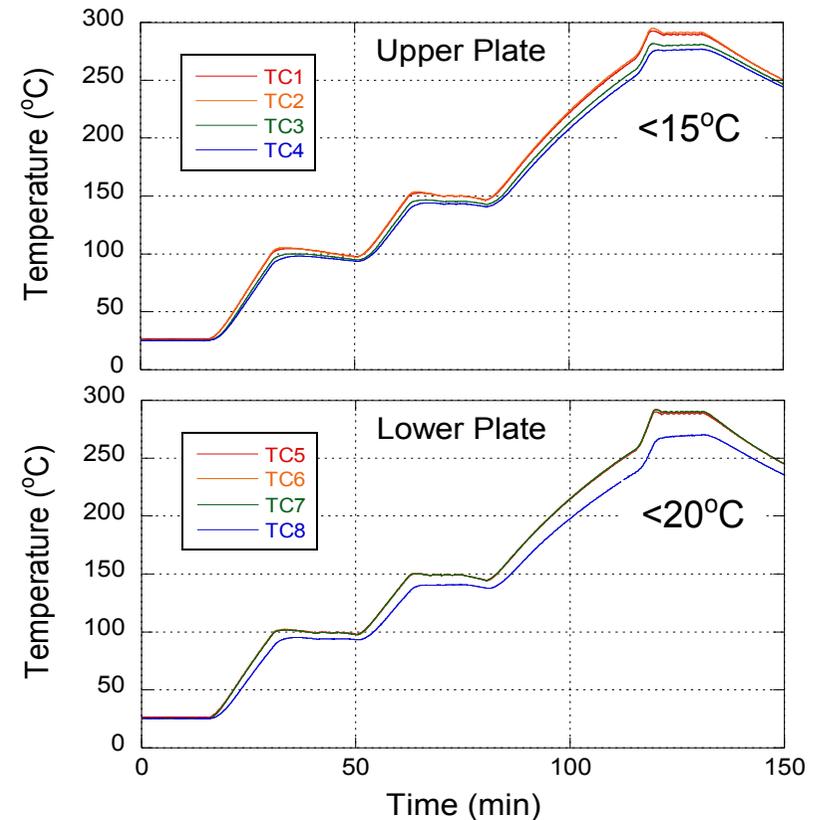
V字ターゲット高温化計画

目的: 高温壁での水素リサイクリングに関する
基礎過程の理解



D-module断面図

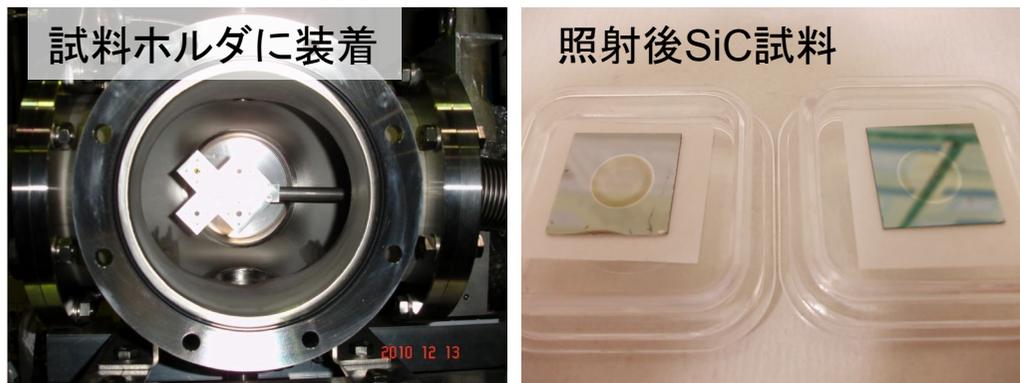
ターゲット板の高温化ベンチテスト



共同研究で進行中のPWI研究の例

東北大学 永田先生

端部ミラー出口にSiC等の試料を挿入し、プラズマ照射後、加速器を用いて表面分析を行った。



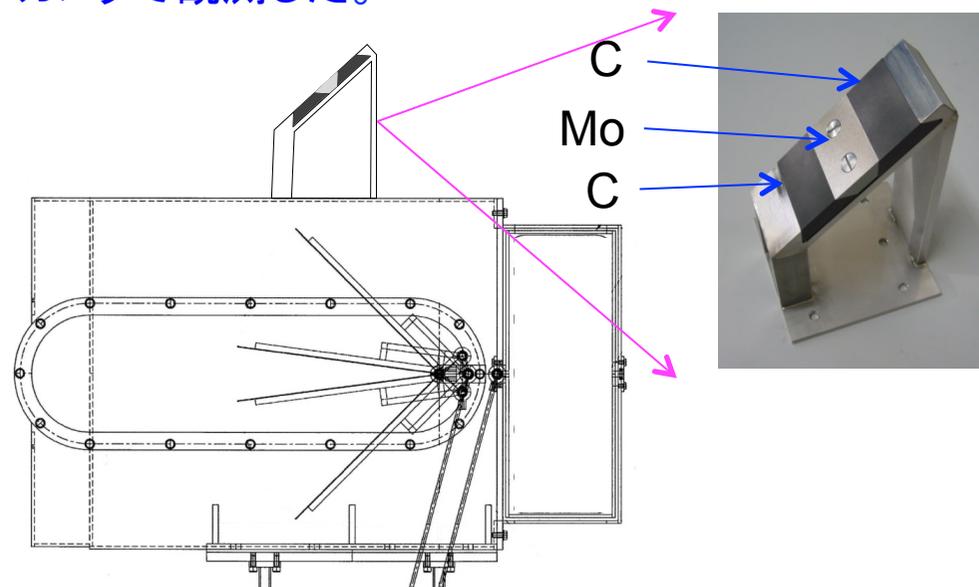
核融合研 廣岡先生

端部ミラー出口にW及びTiから成る円盤ターゲットを挿入し、端損失プラズマ流との相互作用に起因するリサイクリング及び堆積量の評価を行った。

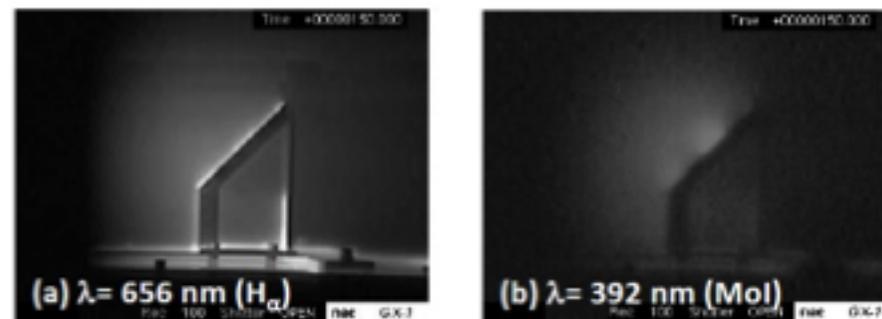


大阪大学 上田先生

D-moduleの頂上部にサンプルホルダを設置し、プラズマ照射に起因する発光をフィルタ付き高速カメラで観測した。



観測された高速カメラ画像



まとめ

本研究では、境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を、新たな研究課題に掲げ、既設ミラー端部に発生する高熱流粒子束を利用したダイバータ模擬実験研究 (*E-Divertor*) についてガンマ10西エンドミラー部にて実験的検証を行ってきた。

- ガンマ10極小磁場アンカー部に追加RF加熱を行うことにより、粒子束 $10^{23}/\text{m}^2\text{s}$ を達成した。これによりプラグバリア等の隣接セルにおけるRF追加加熱の有効性が大きく期待できる。
- D-module内への水素ガス導入により、約一桁の密度上昇とそれに伴う電子温度の低下が観測され、RF追加加熱を併用しての 10^{18}m^{-3} 達成に向けて大きな進展が見られた。
- D-moduleプラズマの分光測定により、水素及び不純物ガス導入に伴うプラズマの輻射挙動の詳細が明らかになってきた。今回得られている電子温度の変化と輻射損失の関係を今後明らかにして行く。
- エンドダイバータ部プラズマの数値シミュレーション解析により、ガス導入に伴う放射冷却等の電子温度の低下を再現するなどの進展が見られた。
- その他、ダイバータ模擬実験研究に関わる新しい試みの他、共同研究で進行中のPWI研究も含め、DEMOを視野に入れた研究を精力的に進めて行く。

End

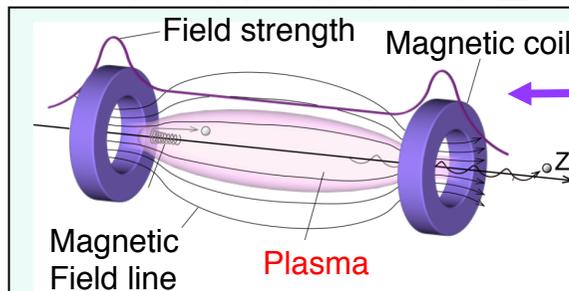
新研究計画の概要

既存装置タンデムミラー “GAMMA 10”



新ダイバータコイルを導入した新装置による新しい研究の発展

ミラー閉じ込めの原理



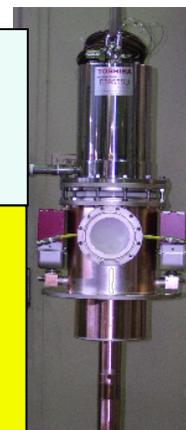
電位形成による閉じ込め改善研究

開放端磁場配位

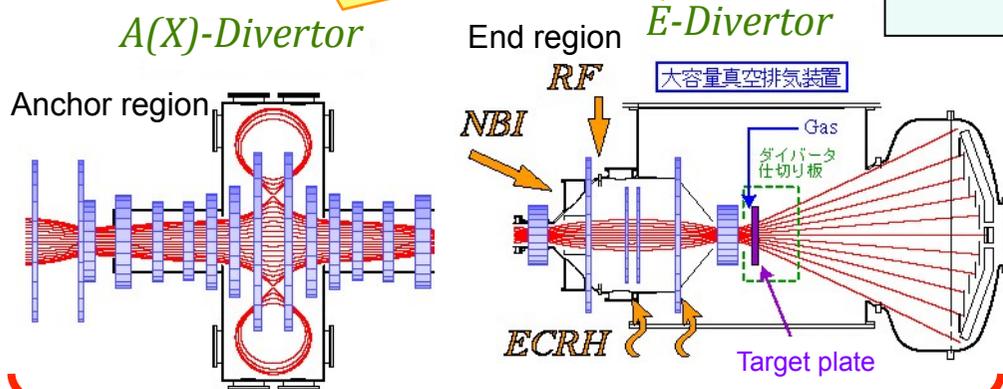
Microwave source for ECH

High power heating systems (RF, NBI)

プラズマ制御のキーツール



これまでの研究の展開を図る為以下の2つのプロジェクトを開始



電位 & 電場

(1) 電位形成によるプラズマ閉じ込め改善研究のコアプラズマから境界プラズマへの拡張

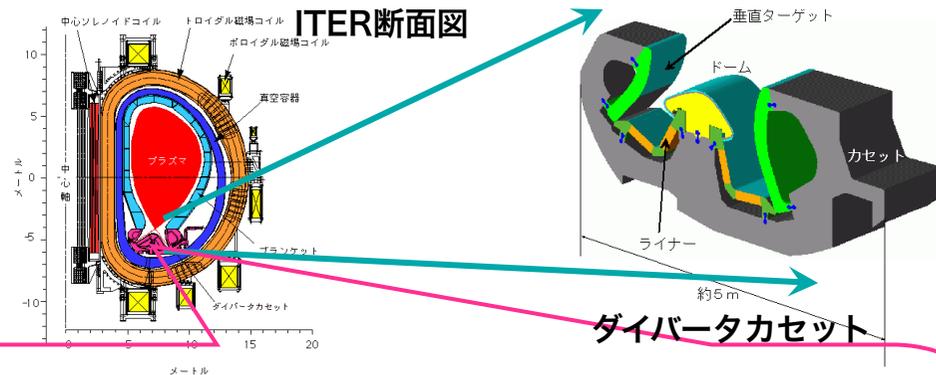
(2) 既存のタンデムミラー装置 (GAMMA 10) に新しいダイバータシステム (A(X)-Div., E-Div.) を導入し、ダイバータ模擬研究に基づく境界プラズマ研究を進める。

環状プラズマ研究への貢献

ダイバータ模擬実験研究課題

境界プラズマへの拡張

— 新ダイバータ装置の導入 —



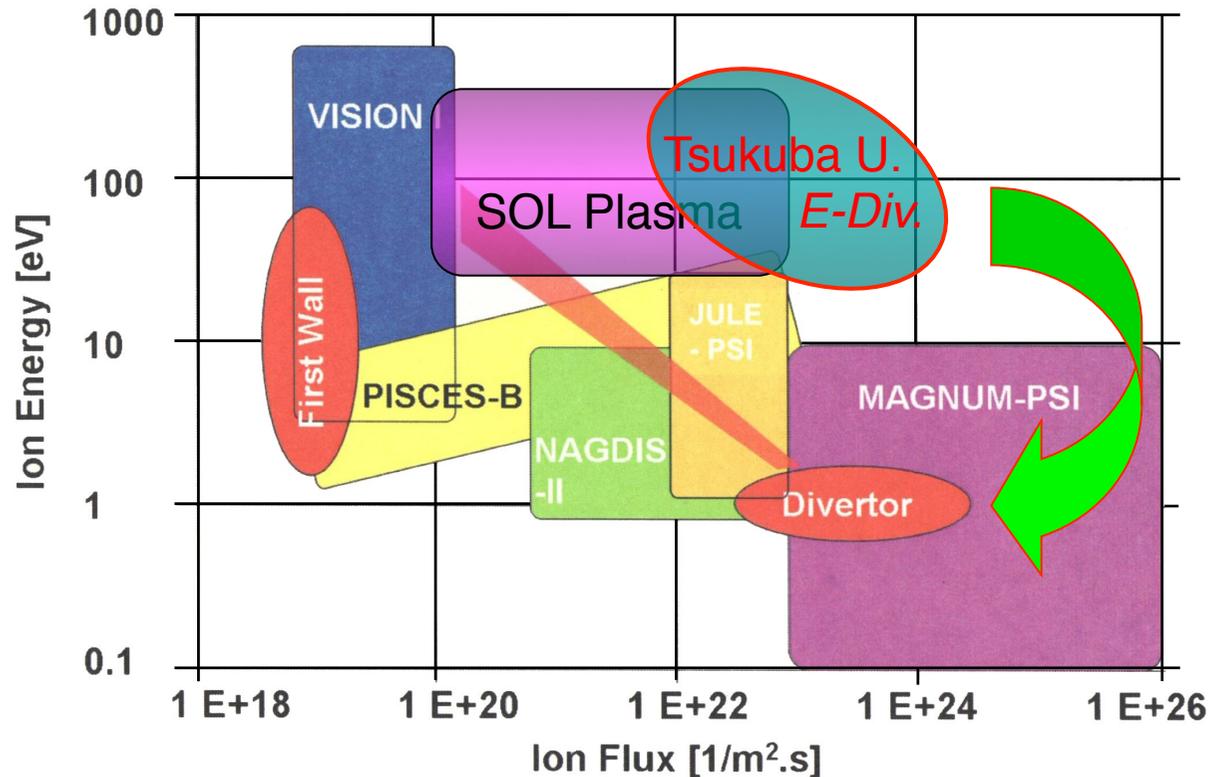
・ 斬新なアイデアを盛り込むことによる、新しいダイバータシミュレータの開発 (*A-Div.*) と、開放端磁場を活かした高熱粒子束シミュレータの開発 (*E-Div.*) を進める。

・ これらを導入した新装置により、電位／電場の物理の境界プラズマへの拡張を可能にし、ITER及び核融合炉の重要かつ緊急の課題である以下の実験を可能にする。

- ① ダイバータ領域におけるプラズマと対向材料との相互作用、不純物輸送制御（特に、ELM様パルス高熱粒子束環境下での表面現象）
- ② 非接触プラズマの定常維持とその物理機構／放射冷却プラズマの解明と定常制御（ダイバータ部における原子分子過程，等）
- ③ ペデスタル・ダイバータ領域における磁力線に沿った、或いは横切る熱・粒子制御

E-Divertorのパラメータと物理目標

Ion Energy vs Ion Flux Density



- タンデムミラー端部で生成されるイオンのエネルギーは、**トカマクのSOLプラズマ**に匹敵する程度に高い。
- ミラー端部では、比較的高い磁場強度を発生している。(0.15 ~ 1.5 Tesla)
- エンド部において、ガス導入、リサイクリング促進を図ることにより、**放射冷却**についての機構を解明し、**非接触プラズマ実現**へ向けての知見を得る。

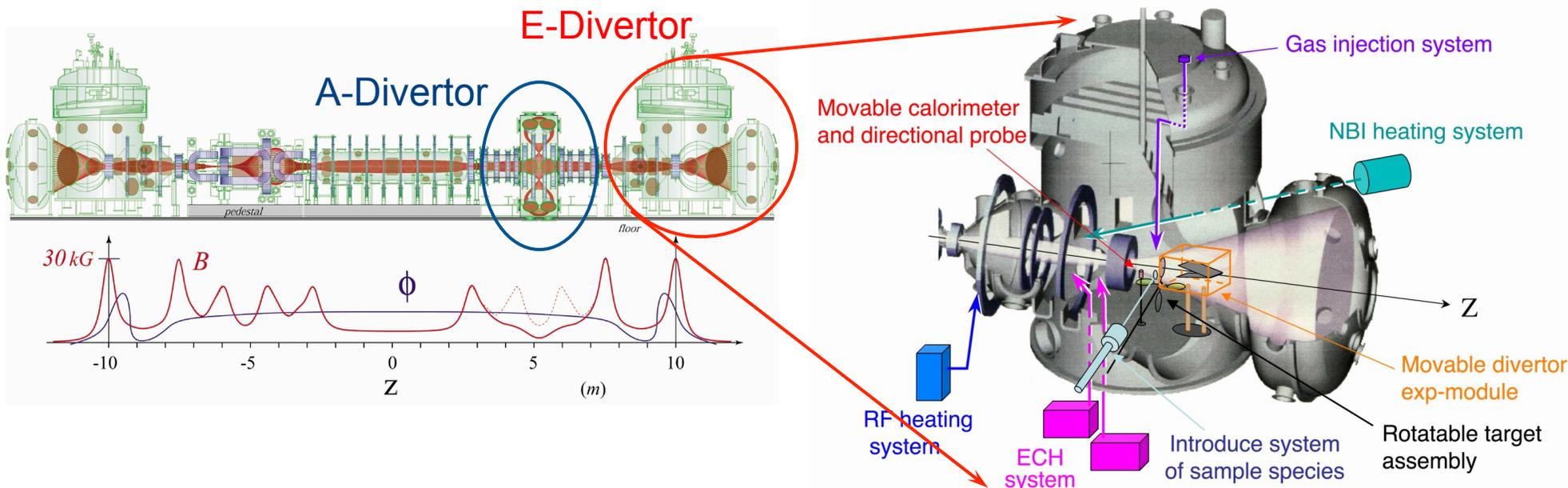
最終的に、環状系プラズマにおける**非接触プラズマの定常維持**の達成に貢献する。

開放端磁場を活かした新研究(*E-Div.*)

ダイバータ配位を持つ新しい磁場の設計例

端部ダイバータ模擬実験の概略図

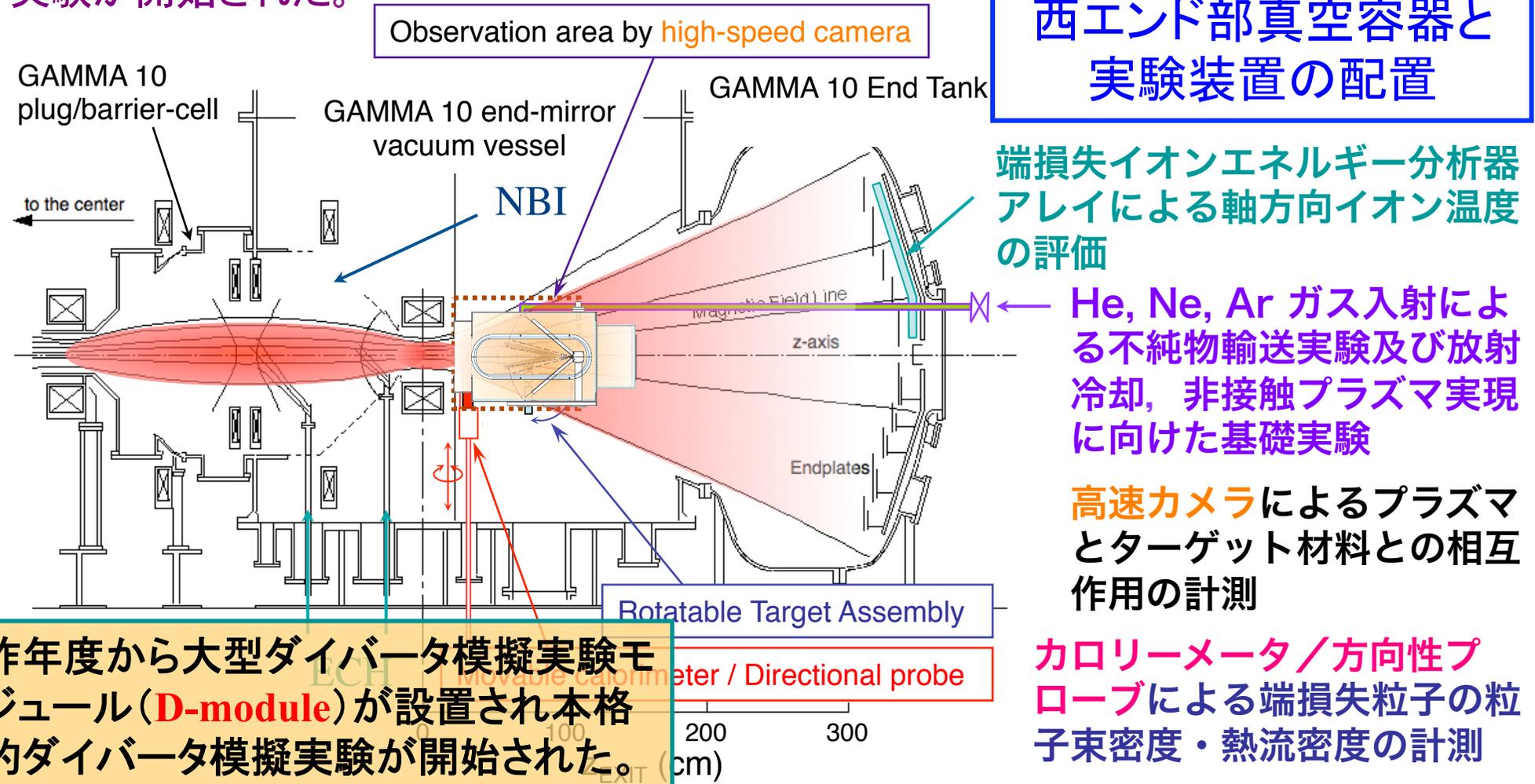
GAMMA10 end-mirror vacuum vessel



- ・ 既設の大出力ジャイロトロンによる強力な電子加熱，及び大電カイオン加熱装置 (ICRF, NBI) を用いた高エネルギーのプラズマ生成が可能で，他の小型ダイバータ模擬実験装置に比べて**大口径・高熱流束が期待**できる。
- ・ 大容量クライオ排気装置を用いたダイバータ排気実験が可能。
- ・ パルス運転を利用した**ELMを模擬した研究など実機プラズマのダイバータに近い環境**(強磁場，高イオン・電子温度，端部放電電極等の影響の無い条件下)での，**ダイバータプラズマ制御**実験を世界で初めて実施する。

ダイバータ模擬実験を目指したE-Div.実験

双方向型共同研究に基づいて、タンデムミラー端部を用いた高熱流束生成の為の基礎実験が開始された。



西エンド部真空容器と実験装置の配置

端損失イオンエネルギー分析器アレイによる軸方向イオン温度の評価

He, Ne, Ar ガス入射による不純物輸送実験及び放射冷却、非接触プラズマ実現に向けた基礎実験

高速カメラによるプラズマとターゲット材料との相互作用の計測

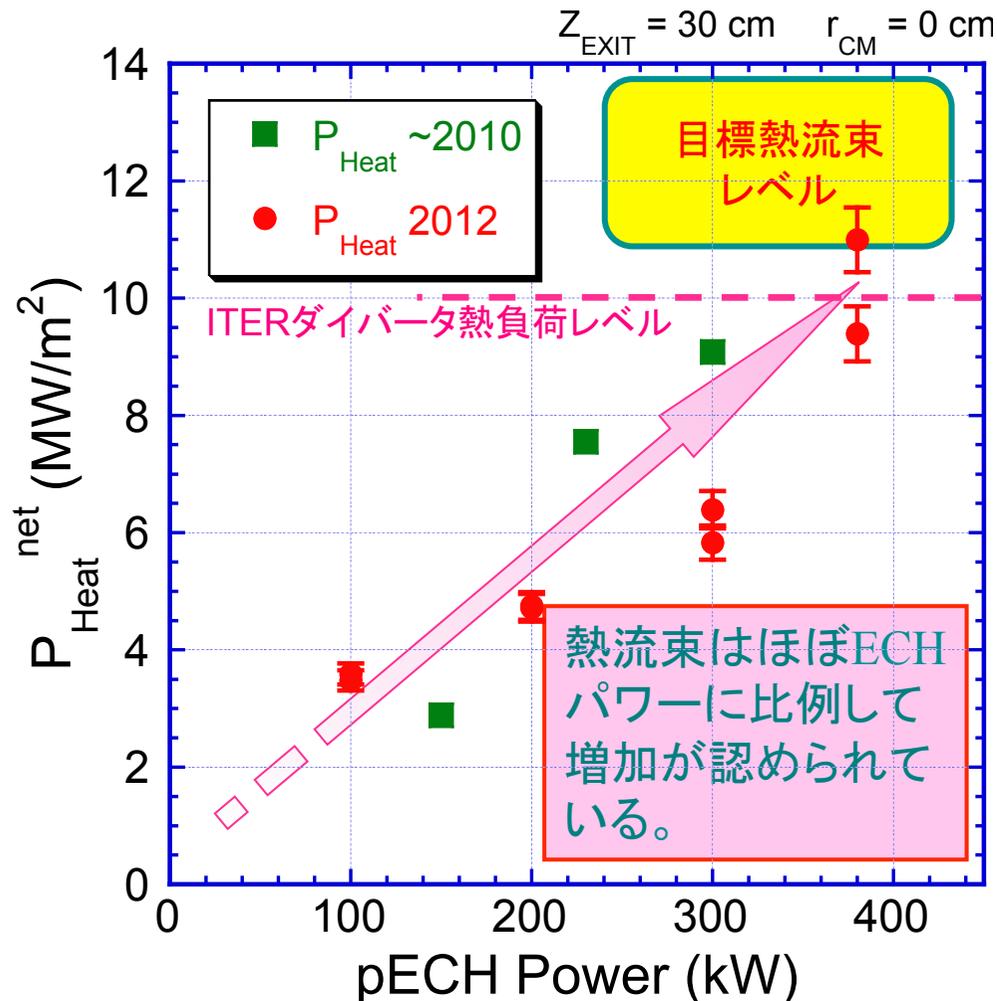
カロリメータ/方向性プローブによる端損失粒子の粒子束密度・熱流密度の計測

昨年度から大型ダイバータ模擬実験モジュール(D-module)が設置され本格的ダイバータ模擬実験が開始された。

ガンマ10によるダイバータ模擬研究への見通しの確立と共に、計測技術、照射技術に関するノウハウを蓄積する。

ECHによるITERリリバントな熱流束の発生

ピーク熱流束密度 $P_{\text{heat}}^{\text{net}}$ の
ECHパワー依存性



- ICRF生成プラズマ（セントラル部プラズマ密度 $2 \sim 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ，イオン温度 $\sim 5 \text{ keV}$ ）において，短パルス（ $5 \sim 25 \text{ ms}$ ）のECHを印加することにより，端部ミラー出口近傍で，端損失プラズマ流の熱流束の計測を行った。
- 380 kWのECH重畳により，ITERにおけるダイバータ板上の熱流密度に匹敵する値（ $\geq 10 \text{ MW/m}^2$ ）を達成した。
- 現有の出力でITERリリバントな熱流密度レベルに達したことから，今後の端部プラズマ加熱系の増強により，更に高熱流束を発生できる見通しが得られた。

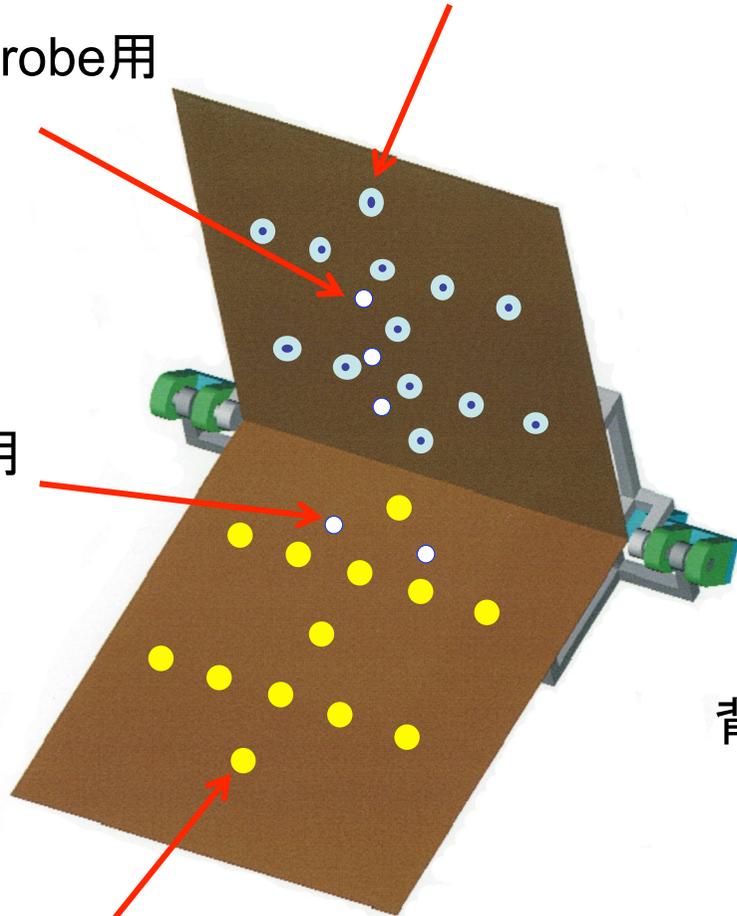
ダイバータ模擬実験モジュール(D-module)

ラングミュアプローブ(上面)

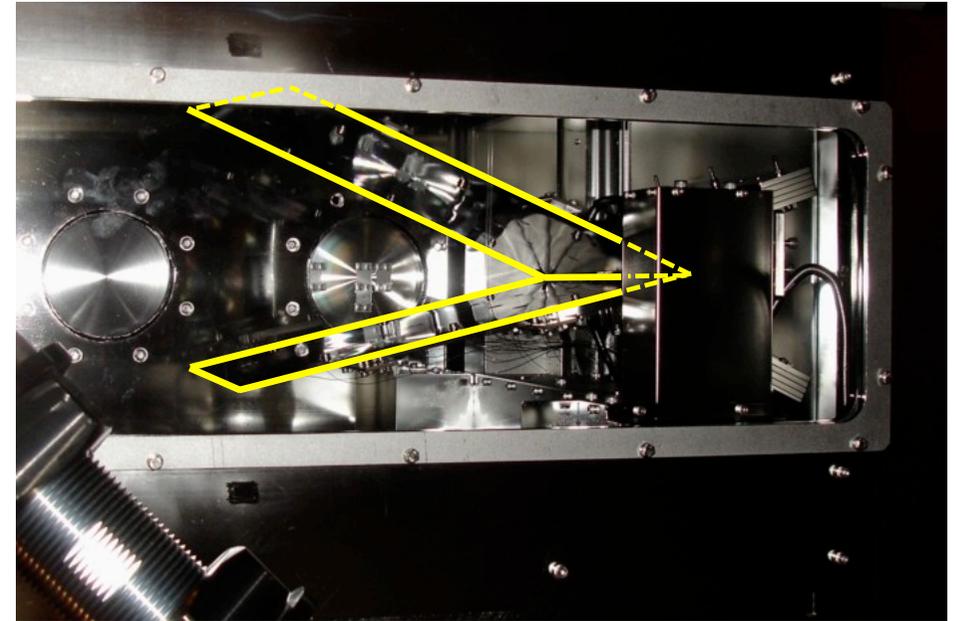
He beam probe用
ガス供給

放射冷却用
ガス供給

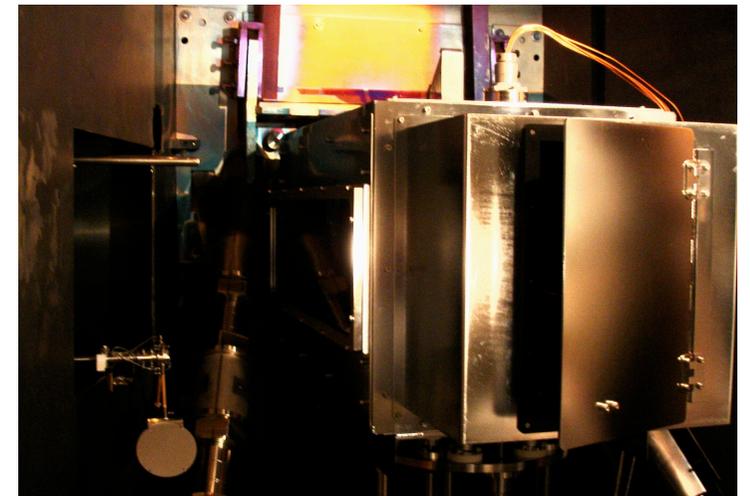
カロリメータ(下面)



V字ターゲット

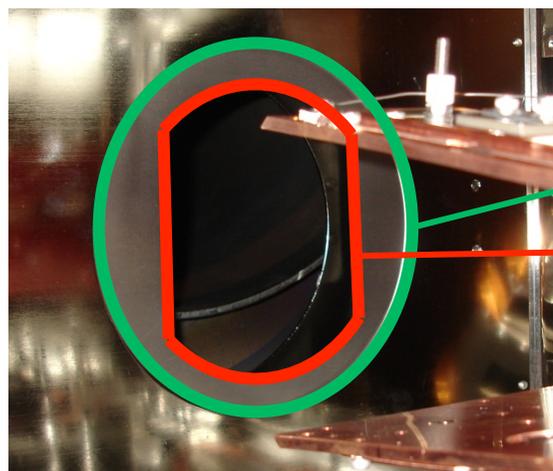


背面排気口



D-module内リミターとカバーの設置

昨年度観測された不純物(主にFe)の輻射強度を抑える為に、モジュール入口にタングステン製リミターとプラズマが当たる面にタングステン板のカバーを設置した。



プラズマ流入口

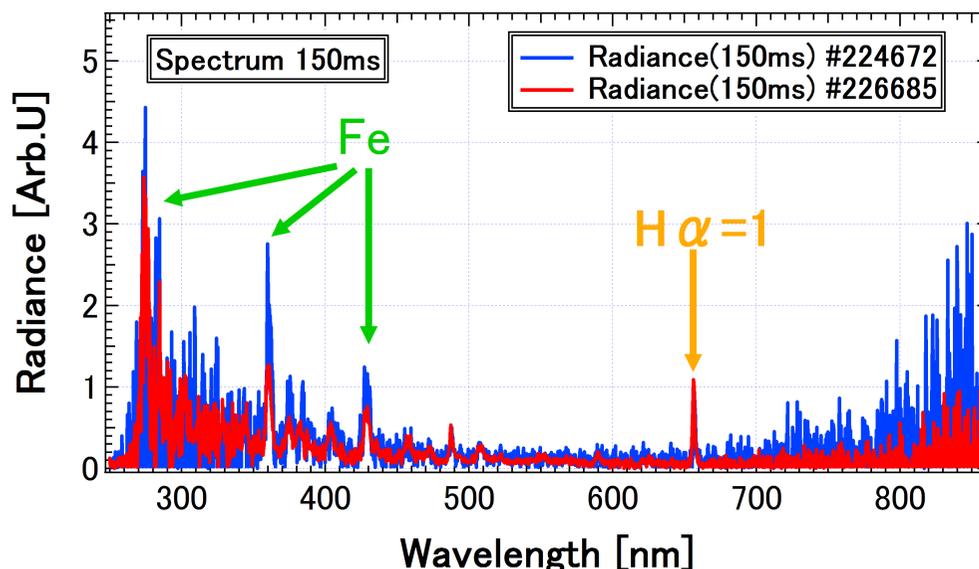
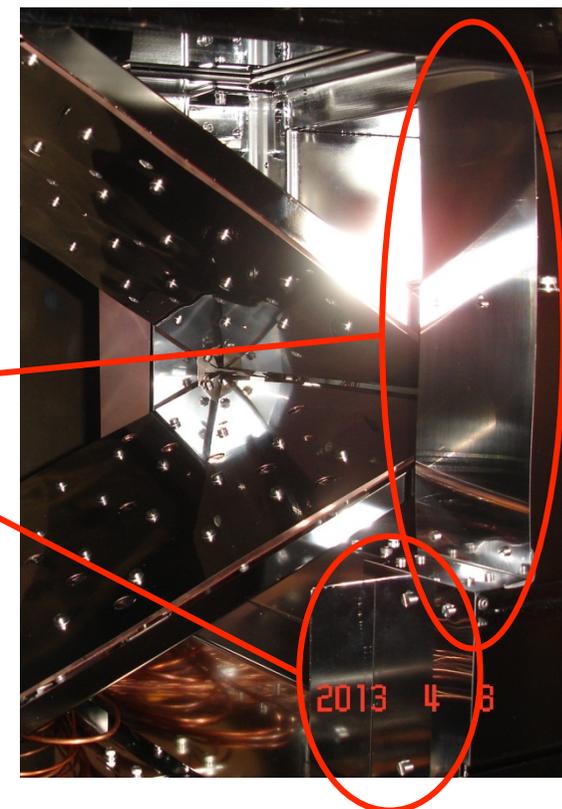
(2012)

(2013)

Tungsten limiter

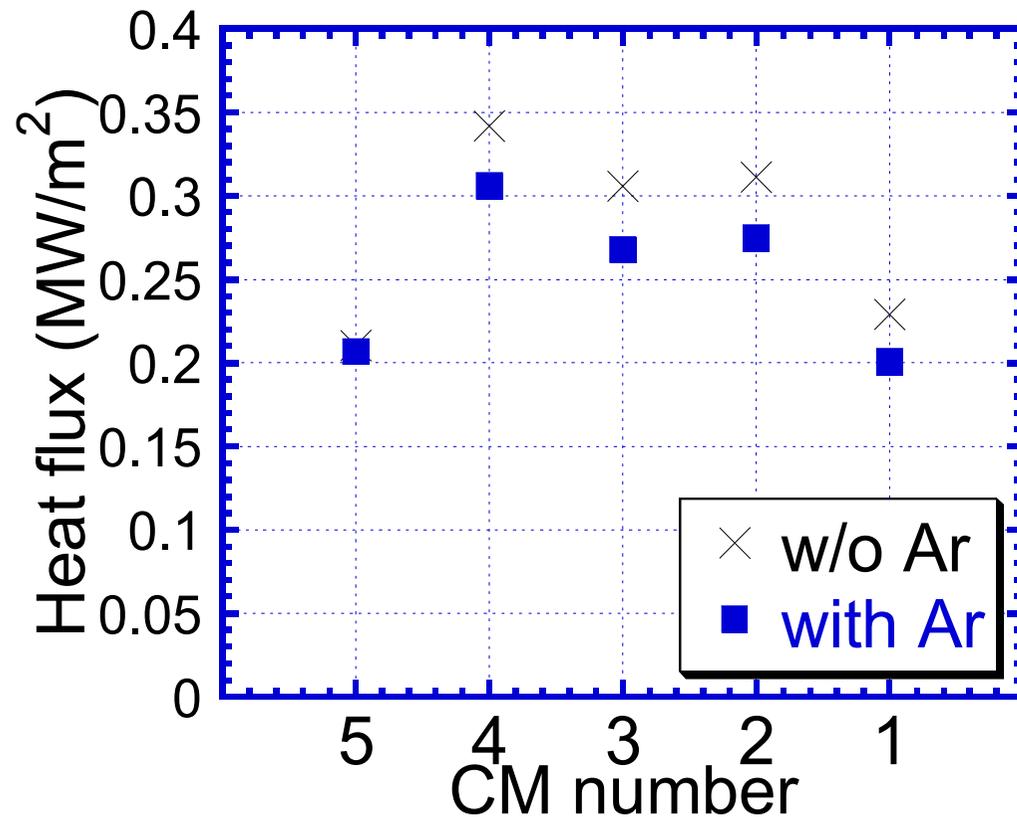
(2013)

Tungsten cover

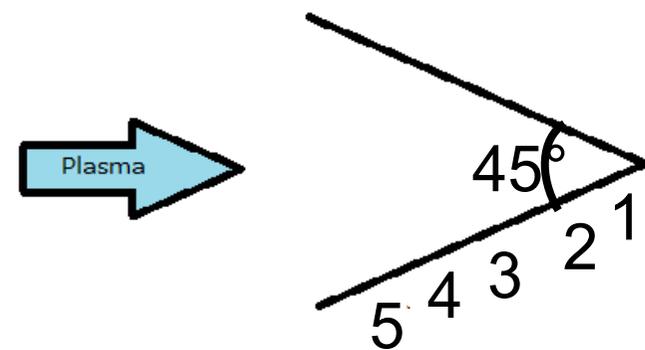


リミターとカバーの導入によって、プラズマのモジュール内壁との衝突を軽減し、不純物の発生を減少できた。

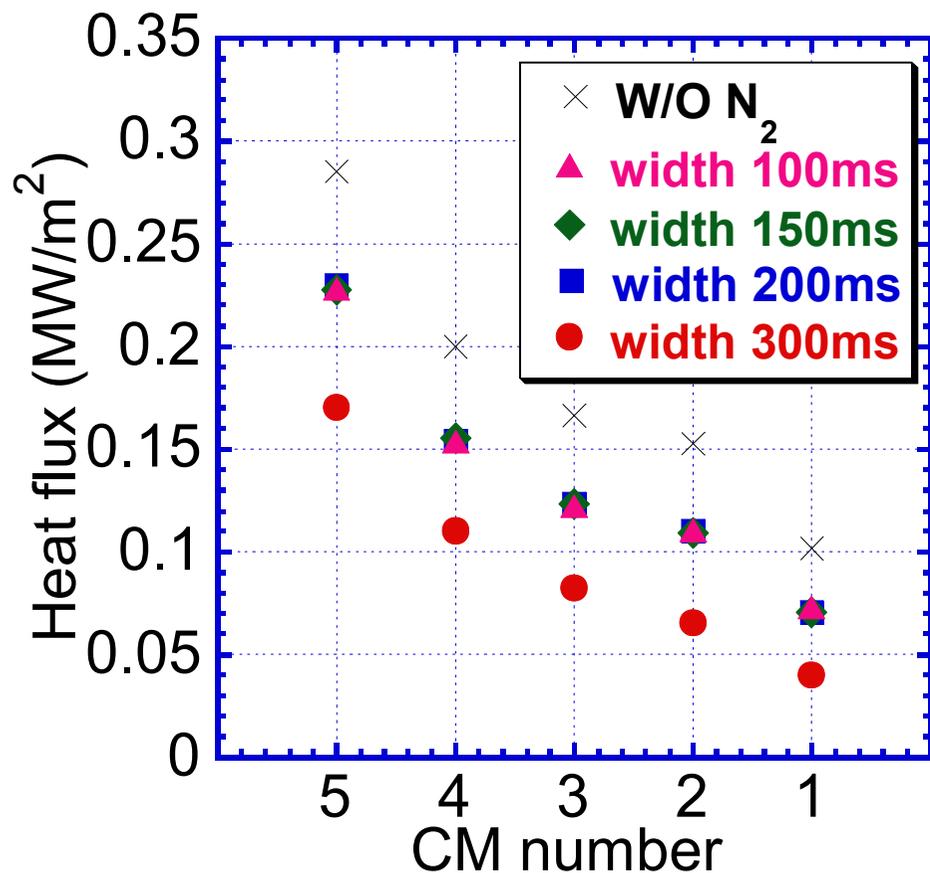
D-moduleへのArガス導入時の熱流計測



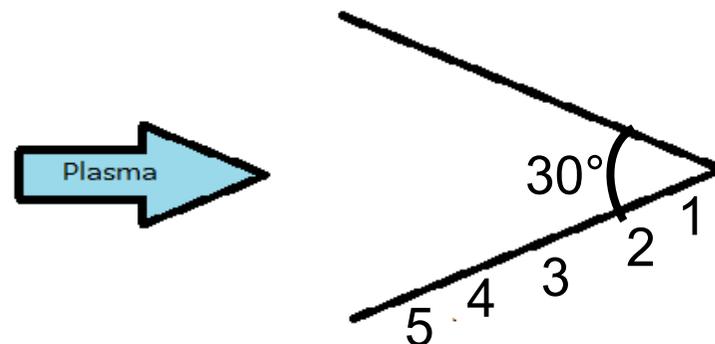
- Heat flux tends to decrease in the case Ar gas is injected.



D-moduleへのN₂ガス導入時の熱流計測

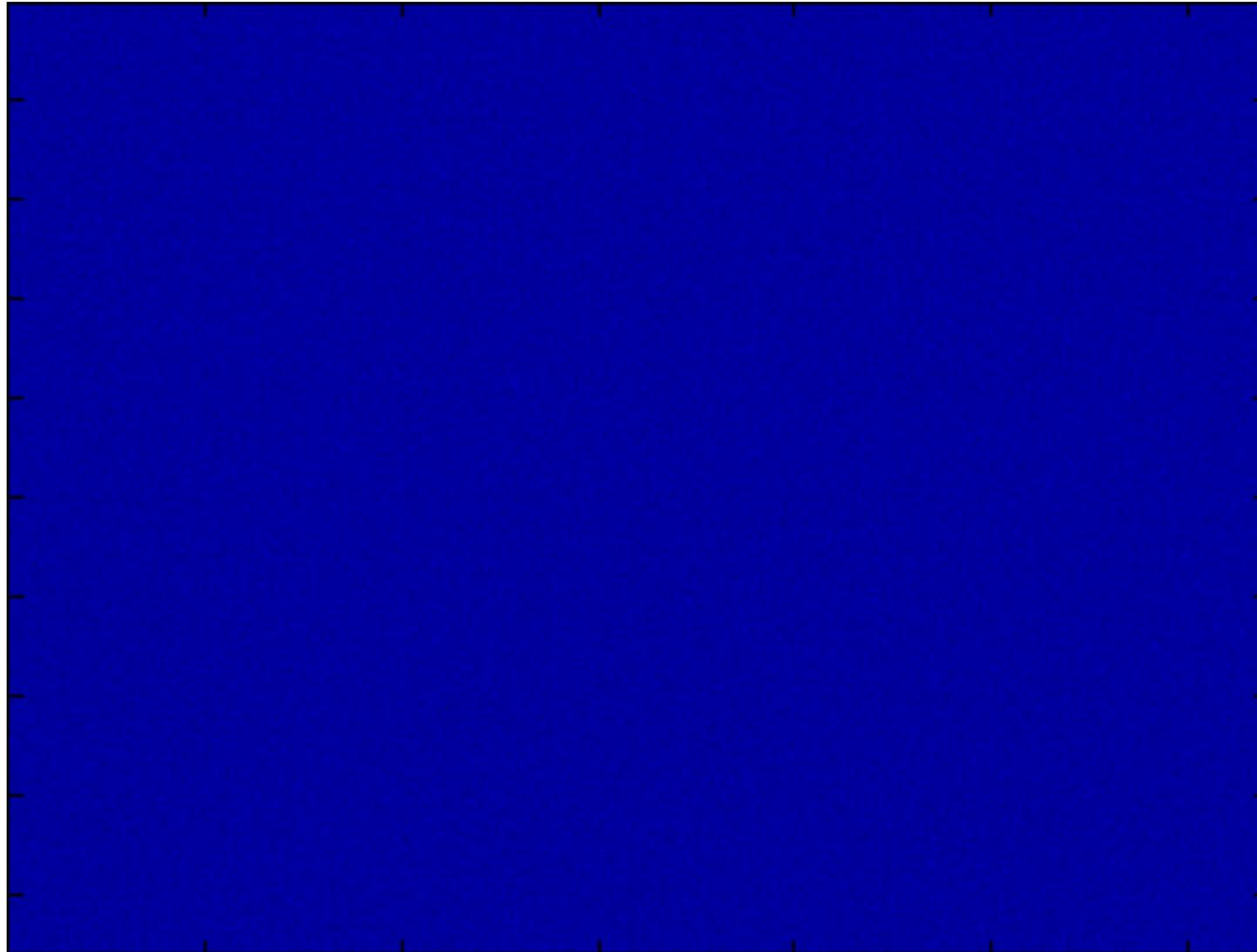


- Heat flux decreases in the case N₂ is injected.
- Heat flux is almost same between N₂ pulse width 100~200 ms.
- Heat flux decreases most at N₂ pulse width 300 ms.



D-moduleを用いた最近の実験結果

- 高速カメラによる可視光2次元イメージ計測 「木暮, 細井, 中嶋, 他」



Shot No.: #223324

Camera:

Phantom v710

Image size:

640×480 pixels

Shutter: Open

Frame rate:

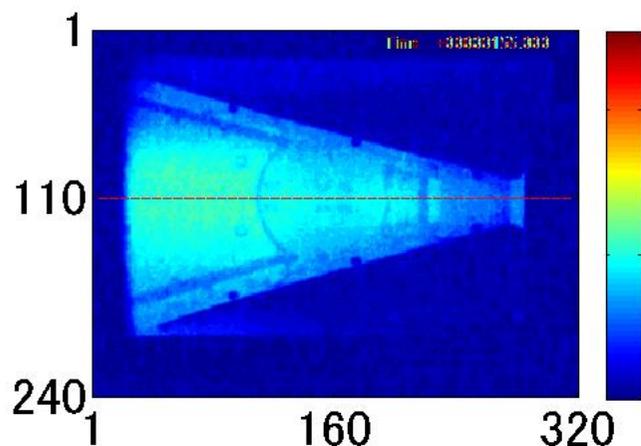
10,000 fps

Filter: Without

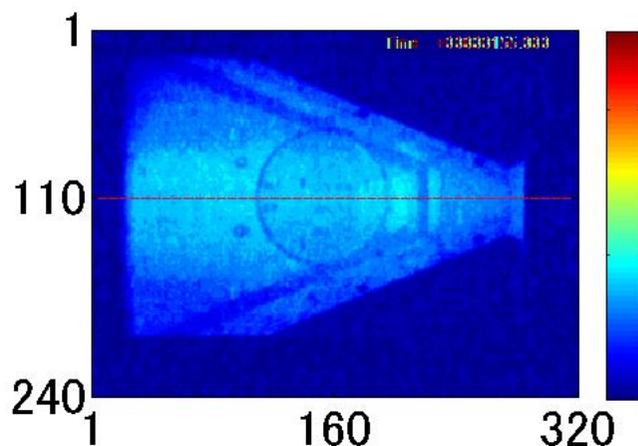
D-moduleを用いた最近の実験結果

- 高速カメラ計測（開口角度 α 依存性）「木暮, 細井, 太田, 中嶋, 他」

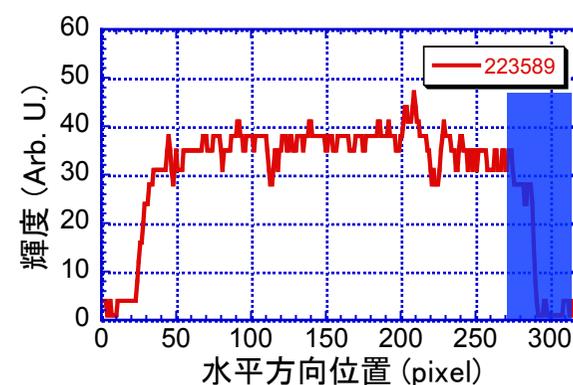
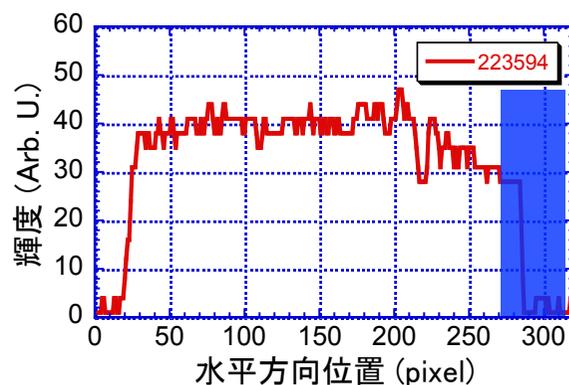
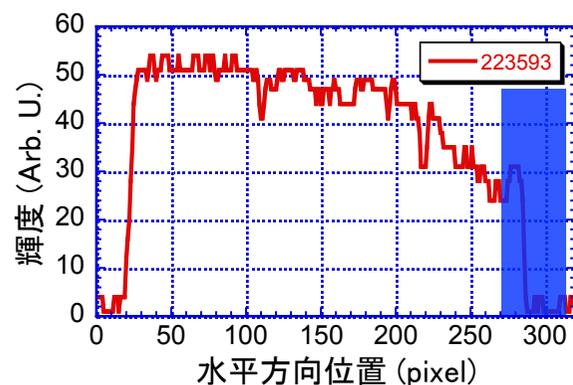
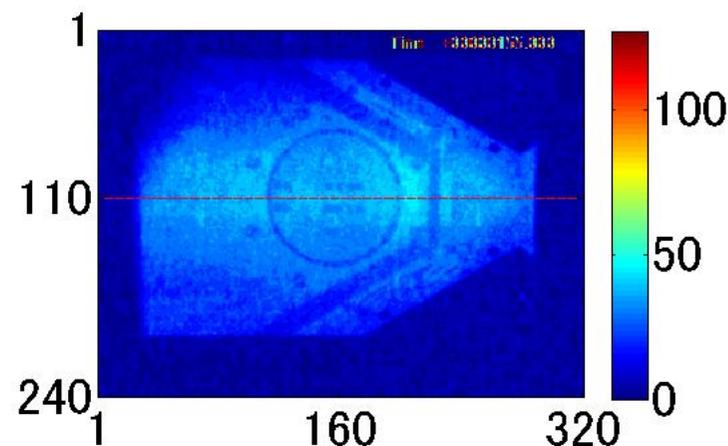
$\alpha = 30^\circ$



$\alpha = 45^\circ$



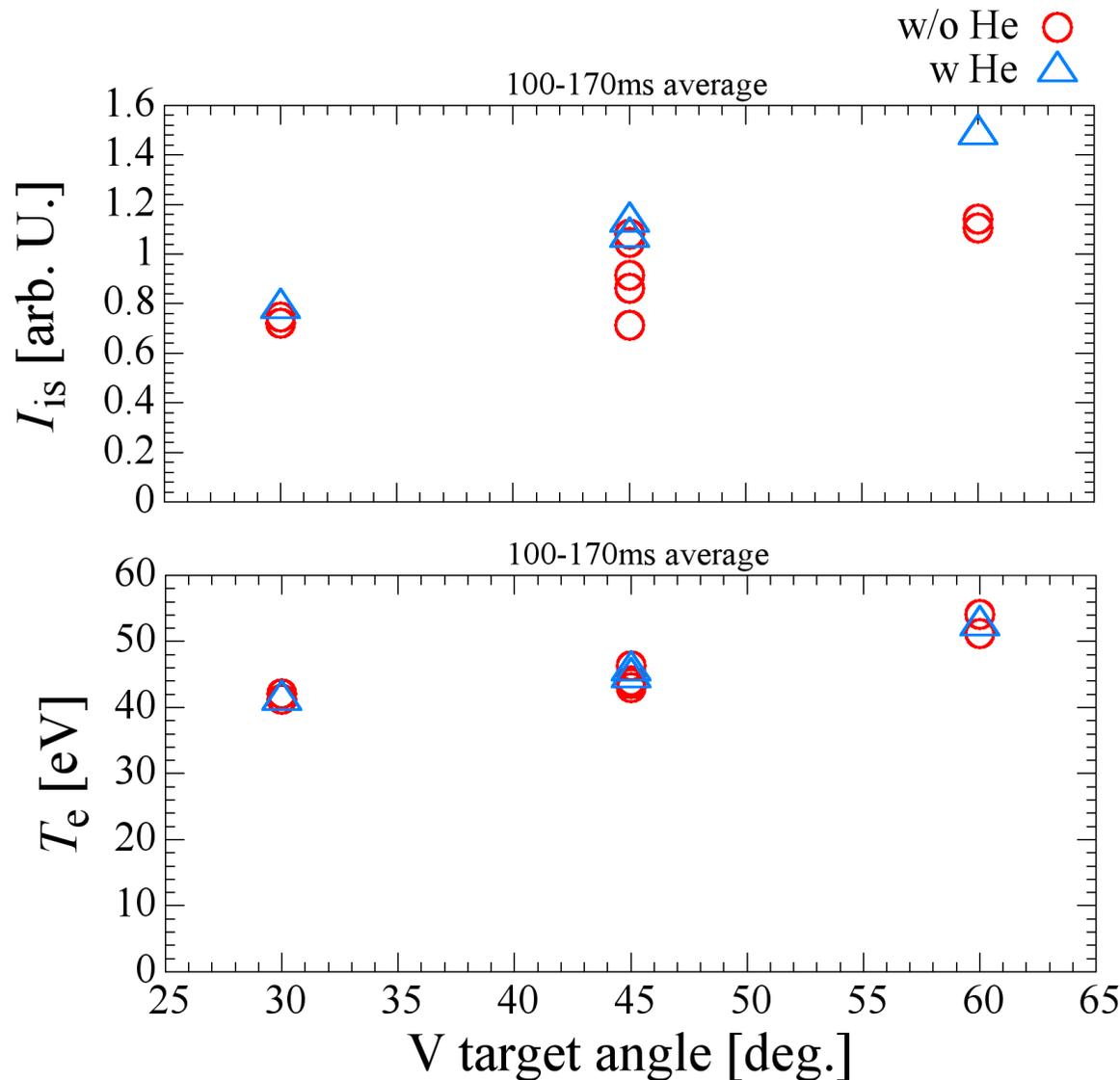
$\alpha = 60^\circ$



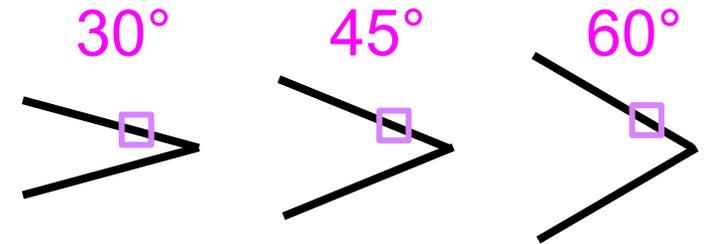
開口部角度が狭くなるにつれて先端部分の発光強度が増加し、ターゲットの奥に入ってゆくにつれて減少する傾向が見える。

D-moduleを用いた最近の実験結果

- 静電プローブ計測 (開口角度依存性) 「大木, 赤羽, 坂本, 他」



— He非入射時のショット
— He入射時のショット



角度が大きい程:

T_e, I_{is} ($n_e?$) が上昇する傾向



高速カメラ計測との相関あり?



位置に対する依存があるか?

D-moduleを用いた最近の実験結果

- 高速カメラ計測(希ガス入射実験)

「木暮, 細井, 太田, 他」

Ar 500mbar, t = 4.5 sec ~ 5.4 sec)



Shot No.: #223608

Camera: GX-1 plus

Shutter: Open

Frame rate:

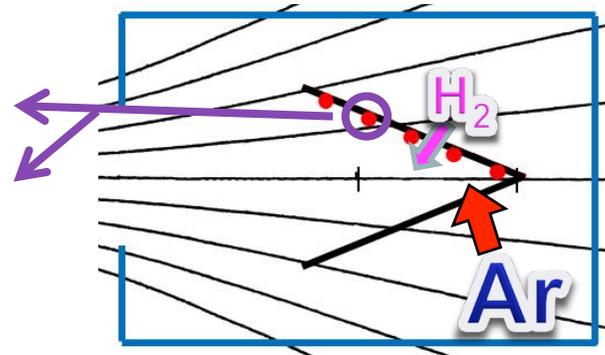
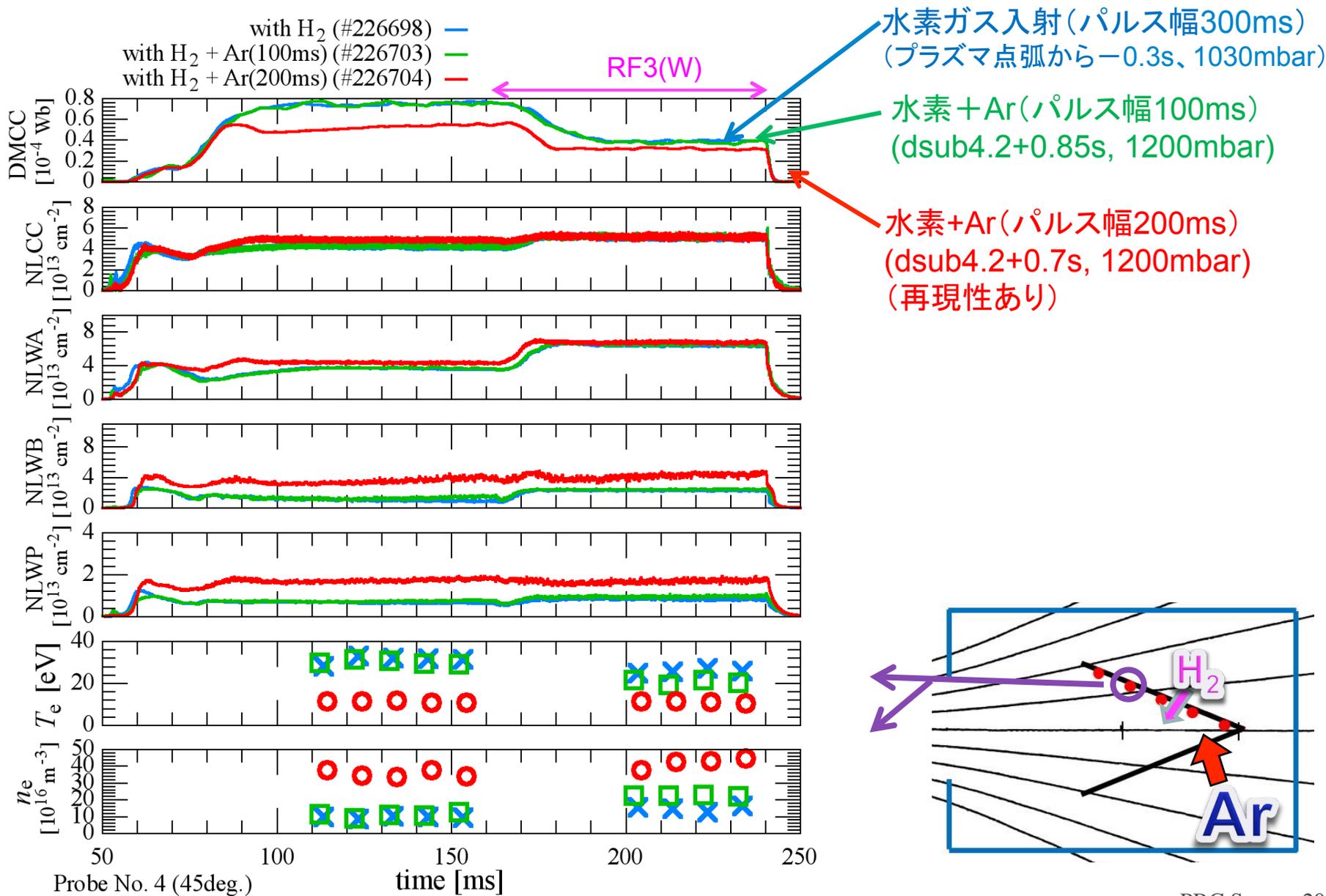
10,000 fps

Image size:

320×240 pixels

Filter: Without

D-moduleへの水素及びArガスの同時入射実験

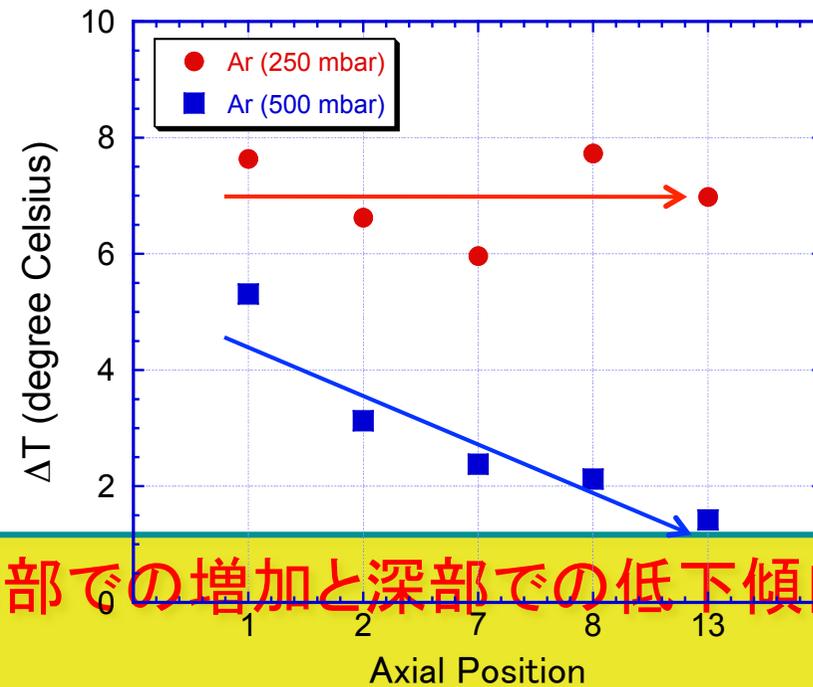
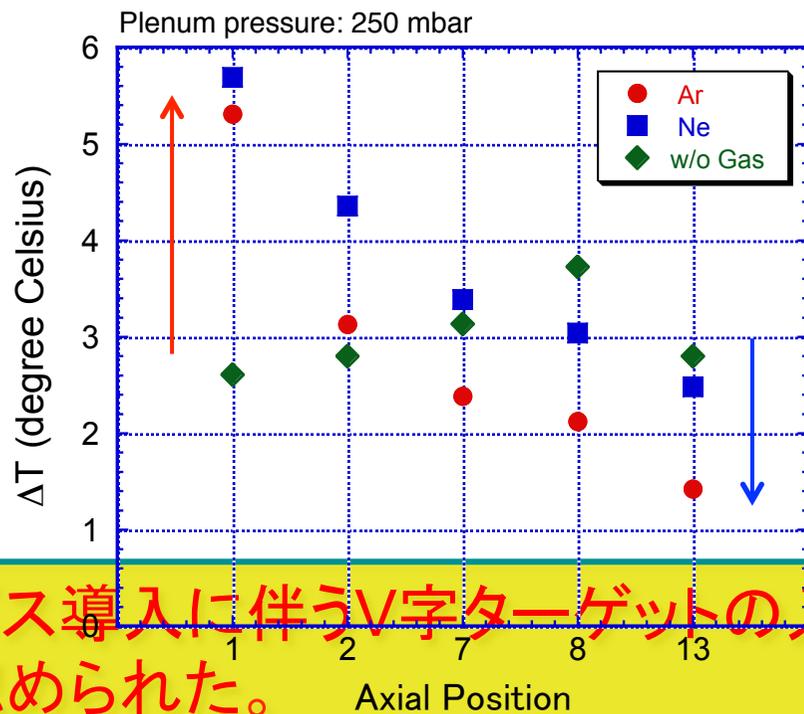
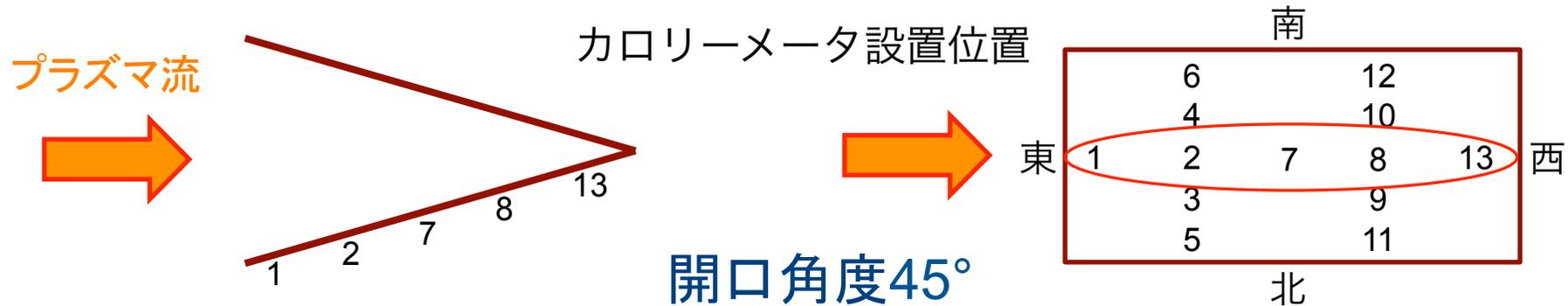


D-moduleを用いた最近の実験結果

カロリメータによる熱流計測

「武田, 岩元, 中嶋, 他」

(希ガス入射による放射冷却の基礎実験)

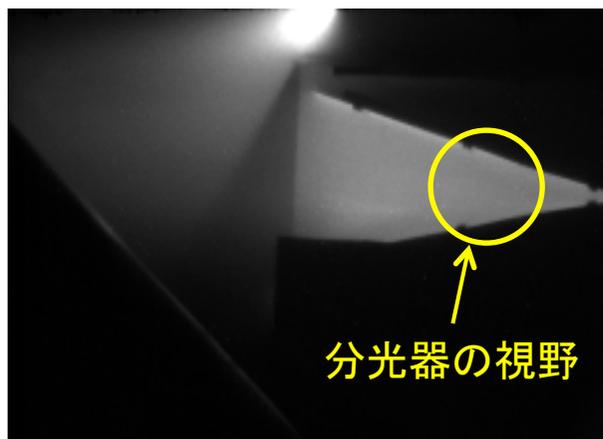


ガス導入に伴うV字ターゲットの入口部での増加と深部での低下傾向が認められた。

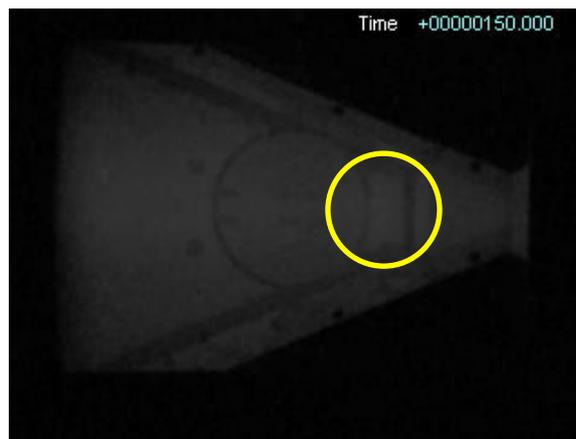
D-moduleを用いた最近の実験結果

・ ガス導入実験における分光計測 「細井, 中嶋, 細田, 他」

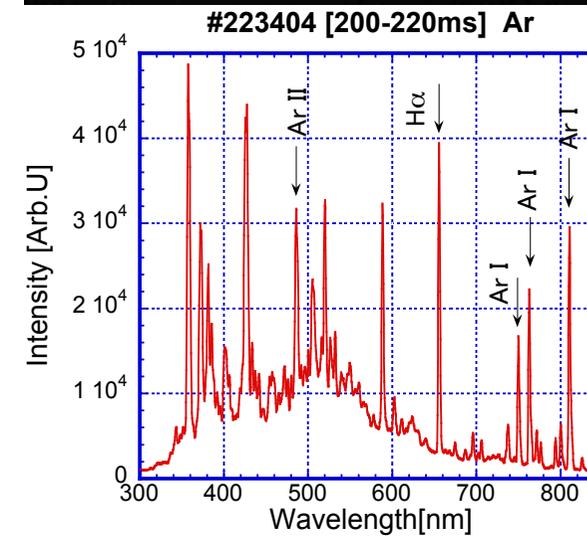
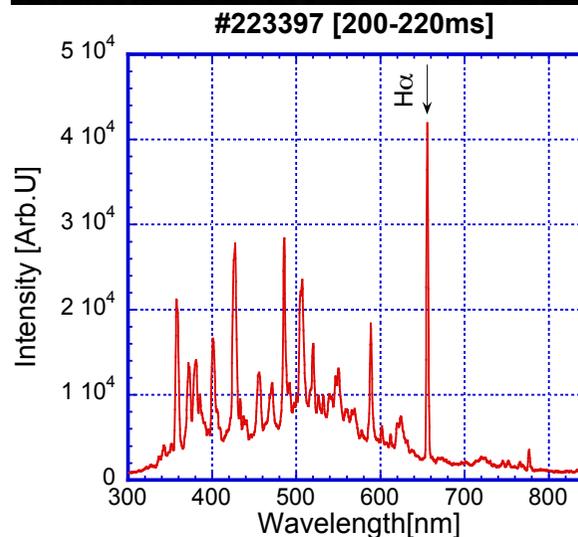
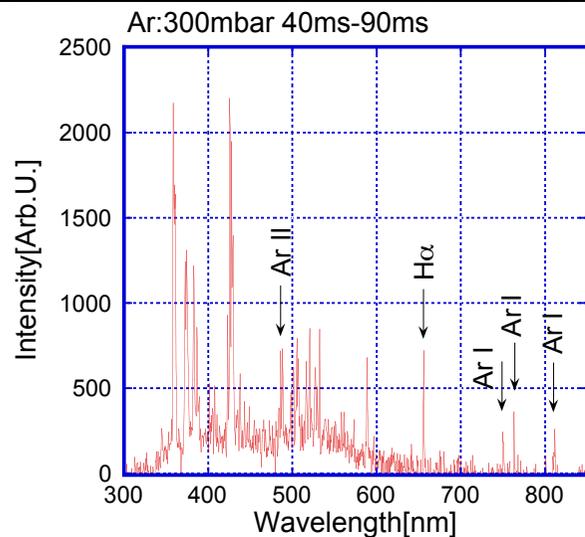
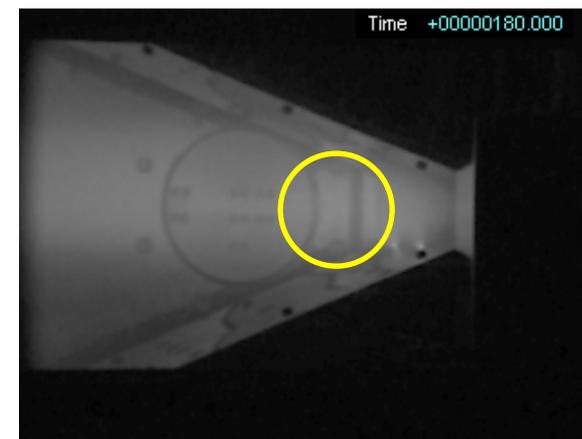
V字ターゲット簡易BOX付き



ダイバータモジュール
(without Gas)



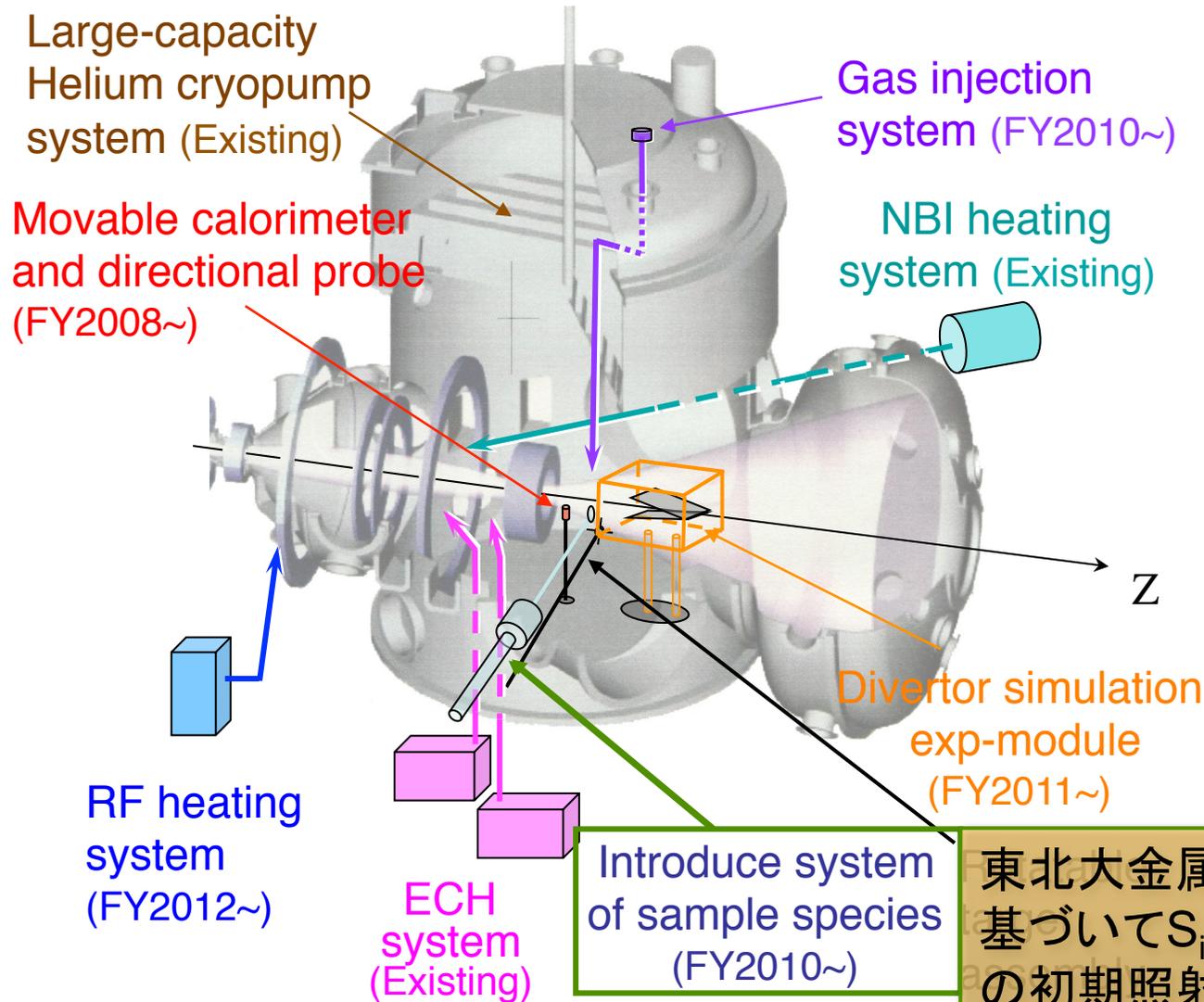
ダイバータモジュール
(with Gas)



ダイバータ領域のクローズド化により発光強度の顕著な増加が認められた。

ダイバータ研究の今後のスケジュール

GAMMA10 end-mirror vacuum vessel



研究項目

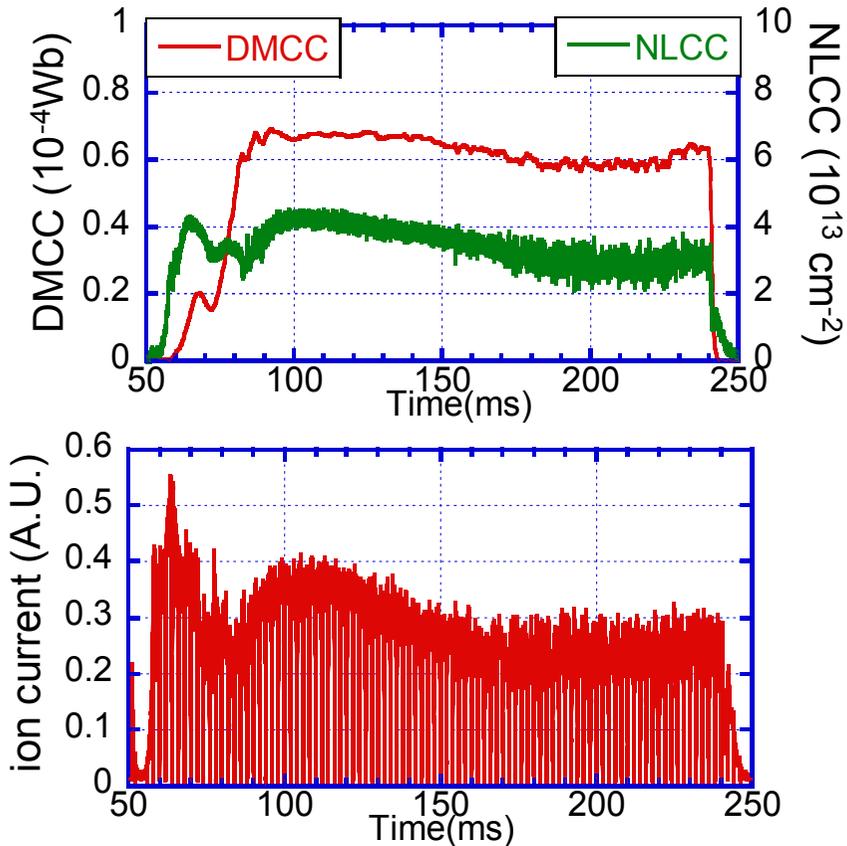
- ダイバータ模擬実験モジュール (D-module)を用いたガス入射による放射冷却, デタッチメントの基礎実験
- 試料導入装置の設置とD-モジュールへの試料導入, 高熱流束の照射及び表面分析の試行
- 大容量ヘリウムクライオ排気装置を用いたダイバータ排気の模擬実験とダイバータ板の高温化実験
- 高周波発振器の増強及びア

東北大金属材料研究所との連携協力に
基づいてSiC試料への端部プラズマ流
の初期照射実験が開始された。

ECRHによるプラズマ点火実験

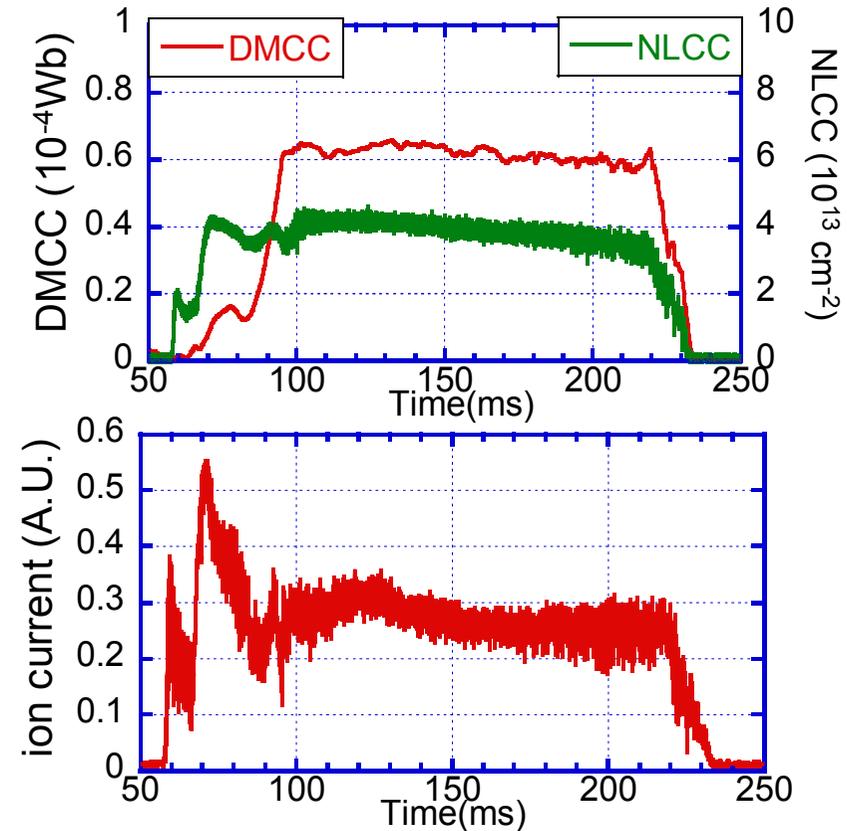
通常シーケンス

MPD jet 50.5~51.5ms, w/o ECRH



新シーケンス

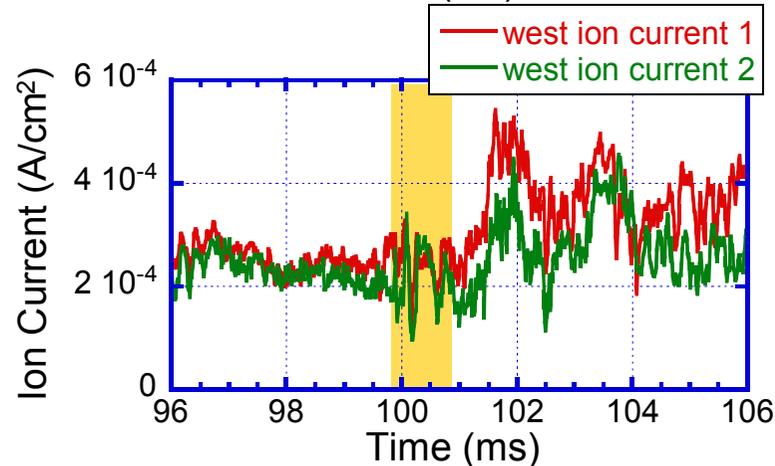
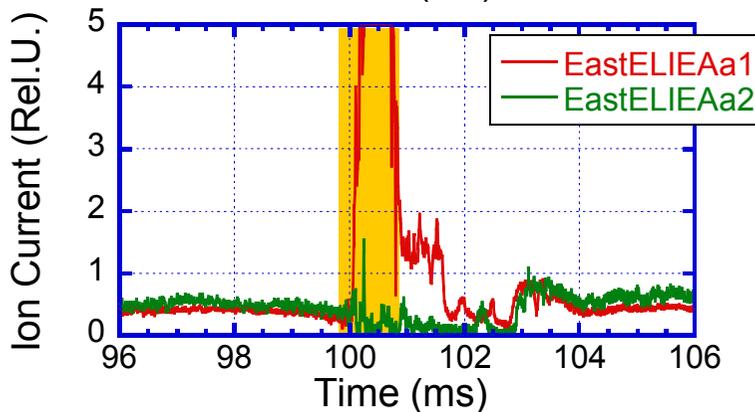
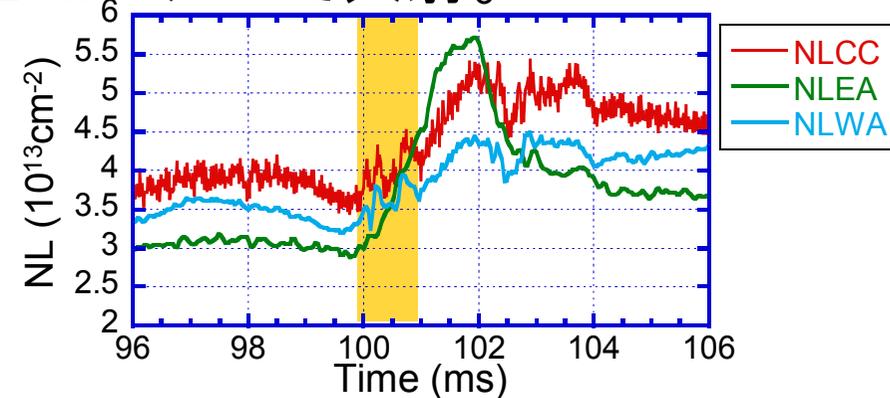
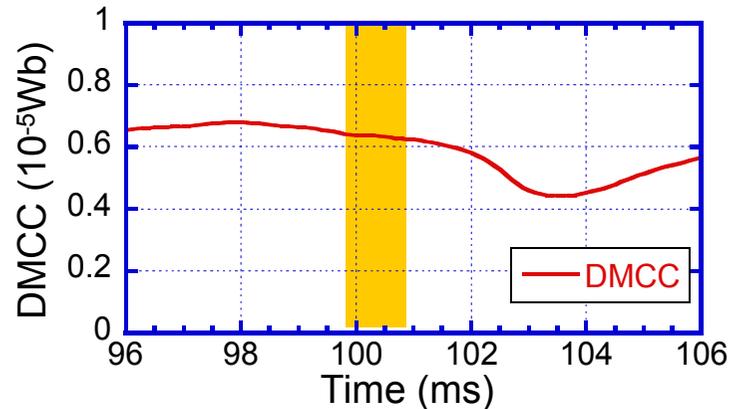
w/o MPD jet, ECRH 55~65ms



ECRHを使用したプラズマ点火においても、通常実験とほぼ同様なパラメータのプラズマを立ち上げることができた。端損失イオン電流の値も通常通りであり、ダイバータ模擬実験への適用も十分可能であると考えられる。

MPDプラズマ入射実験

東MPDジェットを99.9~100.9msの1msパルスで入射。



東エンド部ではプラグバリア部の強磁場部分でミラー反射された大量のイオンを検出。NLEAが大きく上昇しており、MPD入射が終了してからもしばらく上昇を続けている。

西イオン電流信号を見るとピークが3度発生している。入射粒子がミラー磁場内で往復運動した結果と思われる。イオン電流信号はMPD入射前 2.5 、入射後 $5 (10^{-4} \text{A/cm}^2)$ と2倍程度まで上昇した。

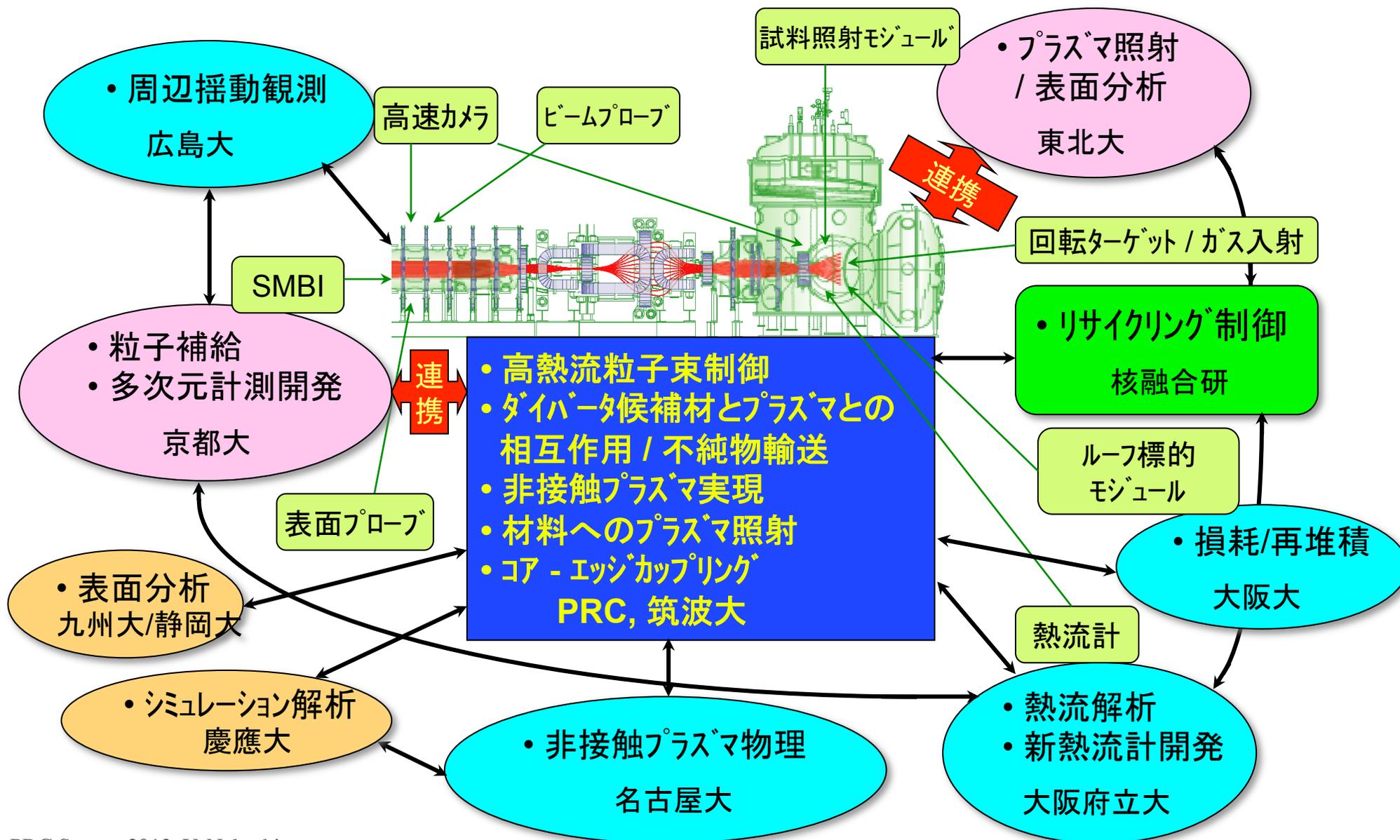
まとめ（続き）

昨年度末に、ガンマ10西エンド部への設置が完了したダイバータ模擬実験モジュール (*D-module*) を用いて閉ダイバータ化模擬実験が開始され、高速カメラ、カロリメータ、静電プローブ、分光器を用いた初期計測が行われた。

- 以前のターゲット照射実験に比べて、プラズマ-壁相互作用による発光強度が顕著に増加し、クローズド化によるリサイクリングの増加が認められた。
- モジュール内に設置したV字型タングステンターゲットの開口角度を狭めるにつれて、プラズマ発光強度が増加していることが分かり、中性ガスの圧縮効果を示唆する結果が得られた。
- ターゲット板の深部近傍のラングミュアプローブによるイオン飽和電流及び電子温度も開口角度が狭まるにつれて下がる傾向を示している。
- 希ガスを用いた端損失プラズマ流の放射冷却実験が行われ、カロリメータによる熱流計測の結果、ガス入射に伴うターゲット入口部での増加と深部での熱流束の低下傾向が認められた。

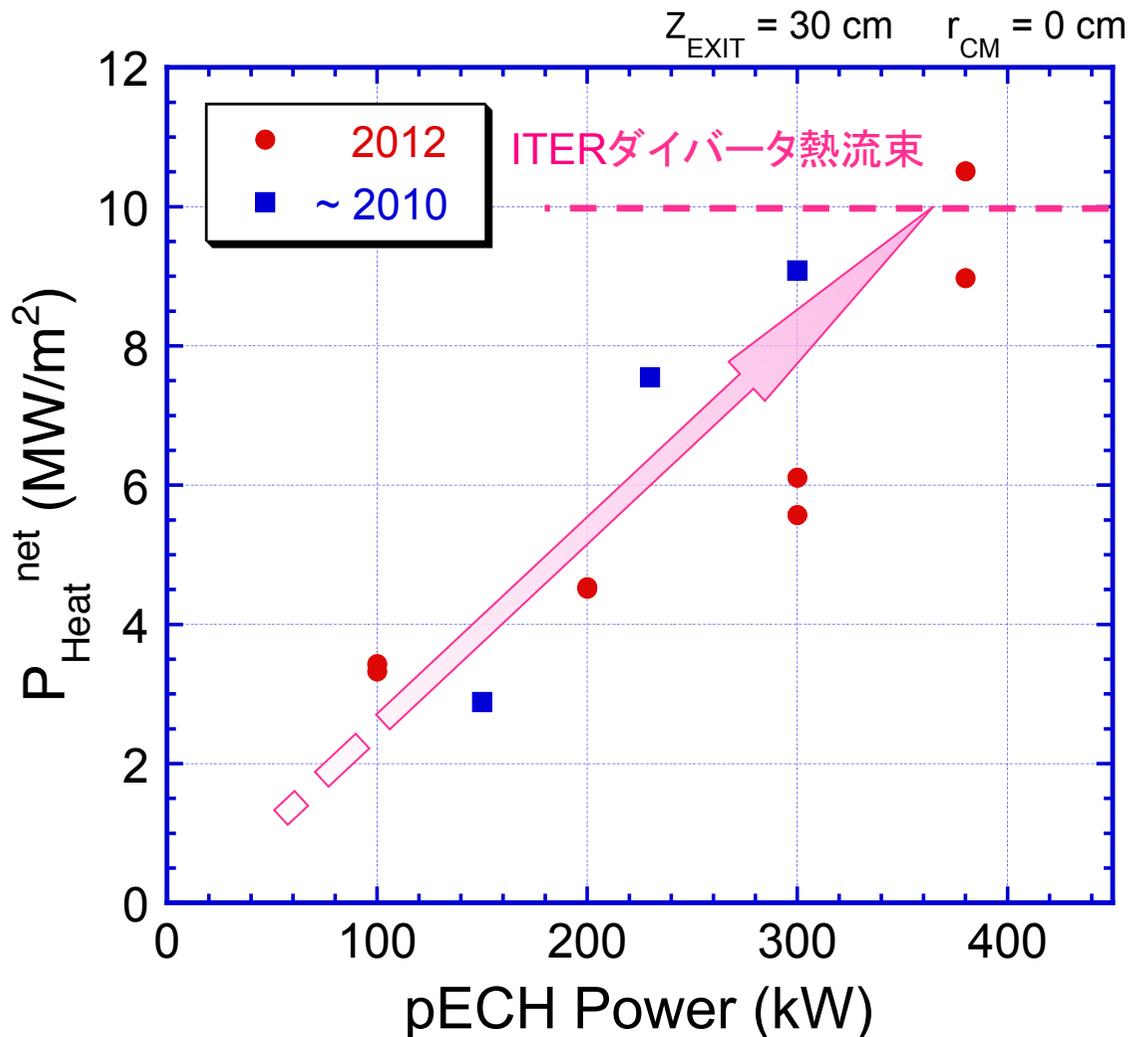
今後、双方向型共同研究の元で様々な共同研究を実施しつつ、更なる高熱流束の達成と非接触プラズマ状態の実現等、環状系閉じ込め装置のダイバータ実現に向けての研究を進めてゆく。

ダイバータ模擬/PWI研究の展開



ITERリリバントな熱流束の発生

ピーク熱流束密度のECHパワー依存性



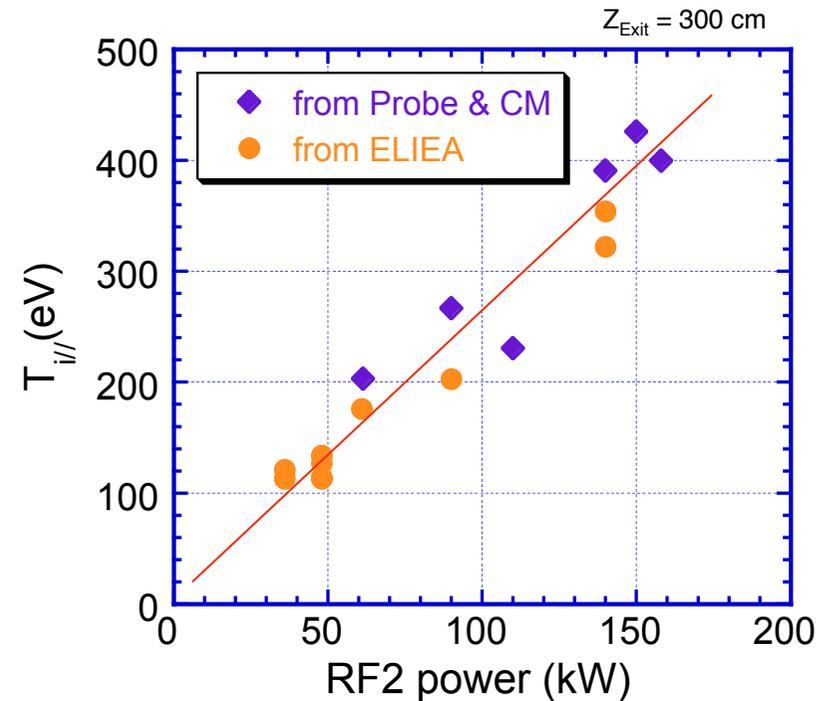
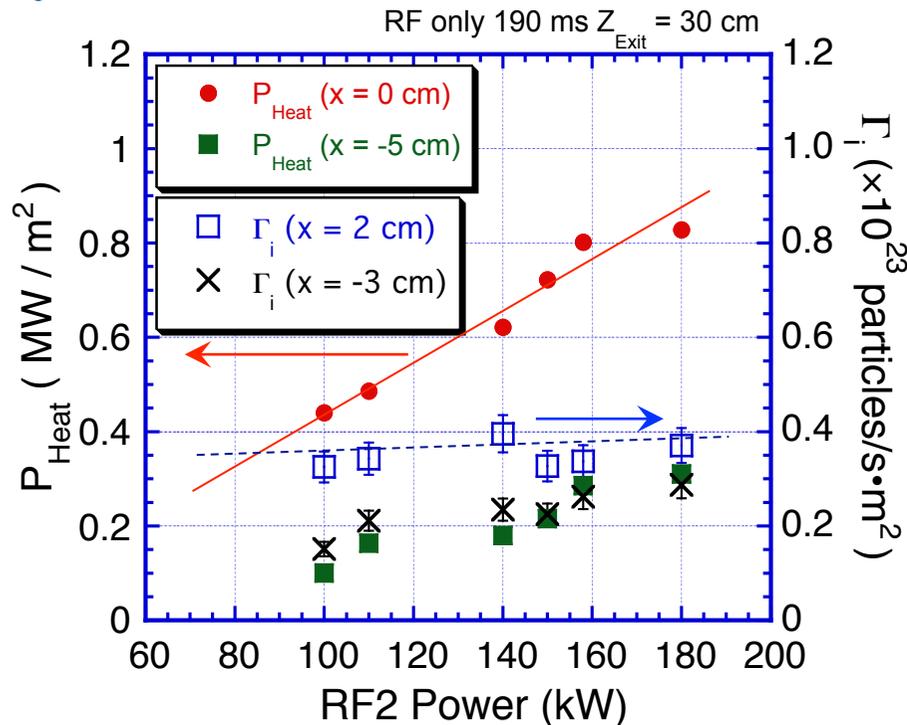
• ICRF生成プラズマ（セントラル部プラズマ密度 $2 \sim 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 、イオン温度 $\sim 5 \text{ keV}$ ）において、短パルス（5~25ms）のECHを印加することにより、端部ミラー出口近傍で、端損失プラズマ流の熱流束の計測を行った。

• その結果、380kWのECH重畳により、ITERにおけるダイバータ板上の熱流密度に匹敵する値（ $\geq 10 \text{ MW/m}^2$ ）を達成した。

• 現有の出力でITERリリバントな熱流密度レベルに達したことから、今後の端部プラズマ加熱系の増強により、更に高熱流束を発生できる見通しが得られた。

ICRFによる高熱流束生成実験結果

典型的なホットイオンモードプラズマ ($n_e(0) \sim 2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $T_i(0) \sim 5 \text{ keV}$), において端部ミラー出口及びエンドプレート上で熱流束・粒子束密度, 及びイオンエネルギーの直接計測が行われた。



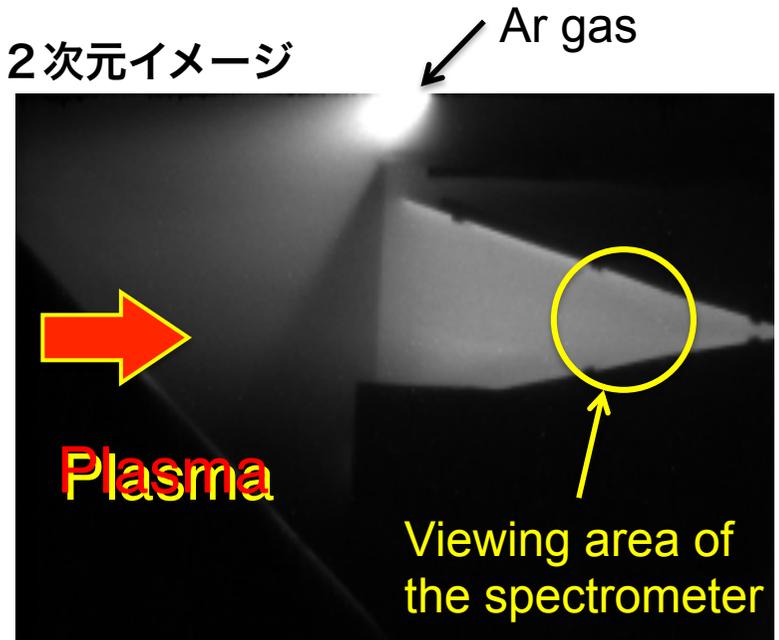
- ICRF加熱時, 熱流束密度 0.8 MW/m^2 粒子束密度 $4 \times 10^{22} \text{ H/s} \cdot \text{m}^2$ が中心軸上で得られ, 熱流束はRFパワーの増加と共に増加することが分かった。
- 端部ミラー出口近傍 ($Z_{\text{EXIT}} = 30 \text{ cm}$) で測定した軸方向 (磁力線方向に沿った) イオン温度 $T_{i//}$ とエンドプレート近傍 ($Z_{\text{EXIT}} = 300 \text{ cm}$) で測定した $T_{i//}$ は, ICRFパワーと共に増加し、お互いに良い一致を示した。

高速カメラを用いたPWIによる可視発光の 2次元イメージ計測と初期分光計測

端部ミラー出口に設置したV字ターゲット

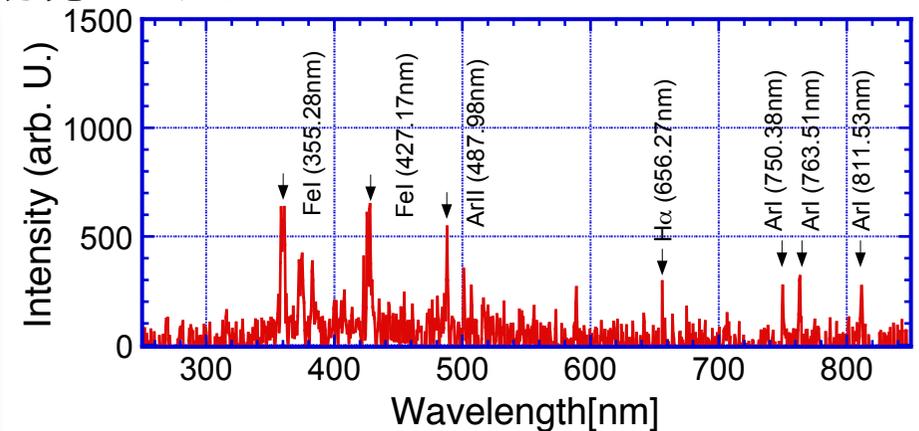


可視光の2次元イメージ



- タングステン製V字ターゲットを新たに端部ミラー出口に設置して、プラズマとの相互作用光を高速カメラでとらえた。
- ターゲット前面にアルゴンガスを照射し、ターゲット内の分光スペクトルを初めて測定した。

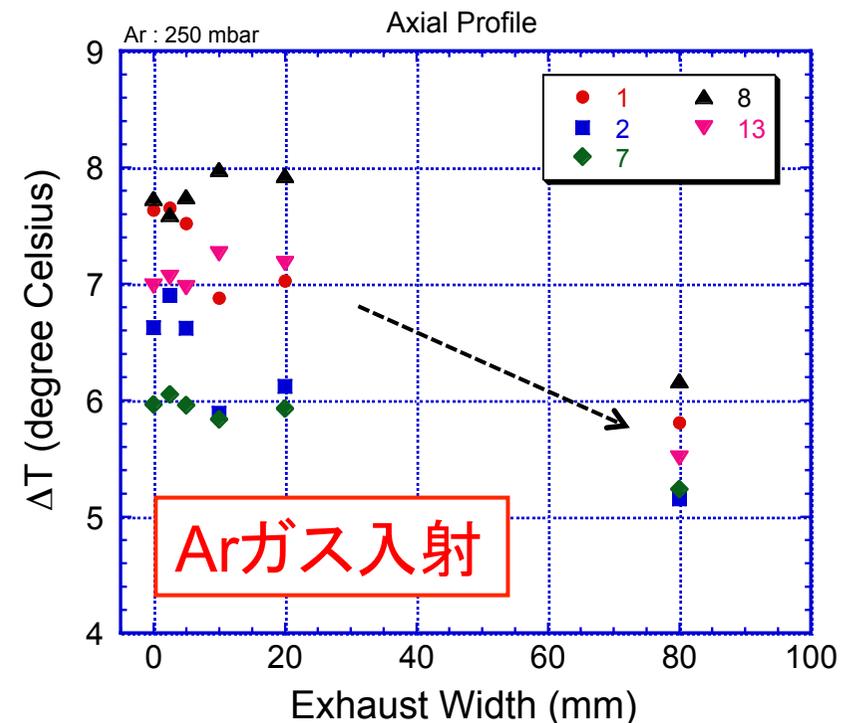
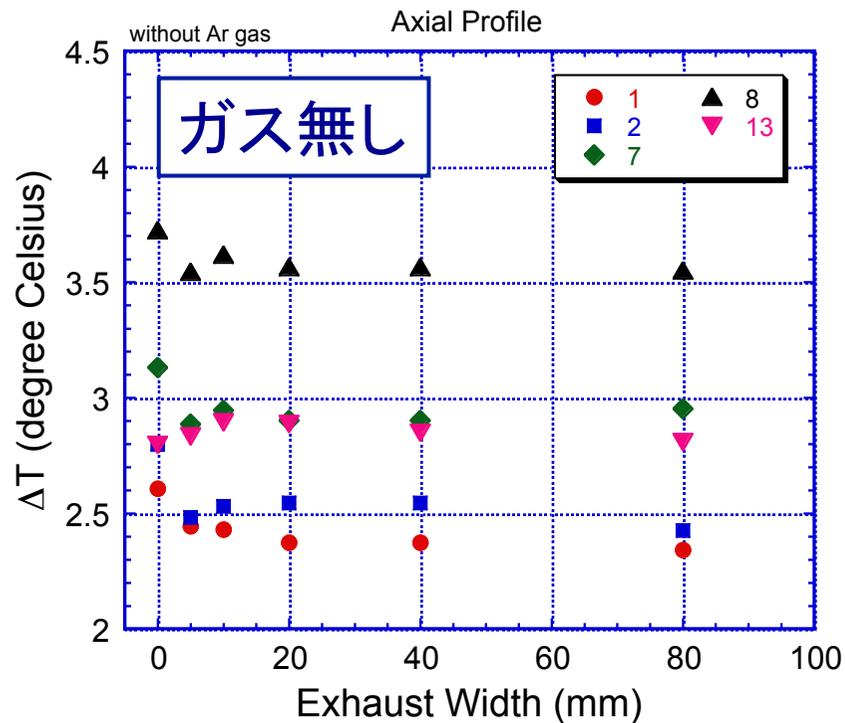
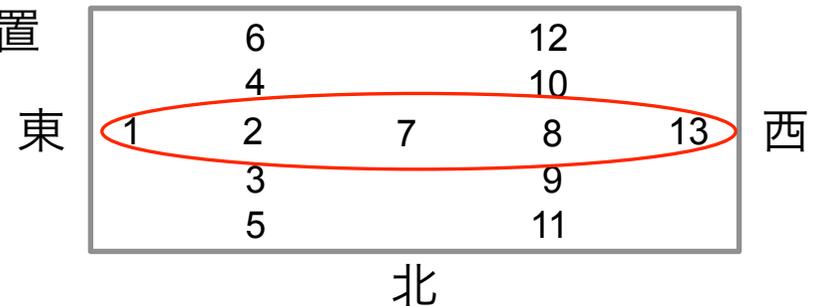
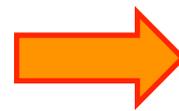
分光スペクトル



D-moduleを用いた最近の実験結果

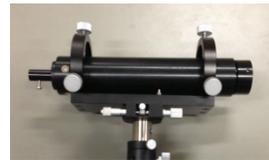
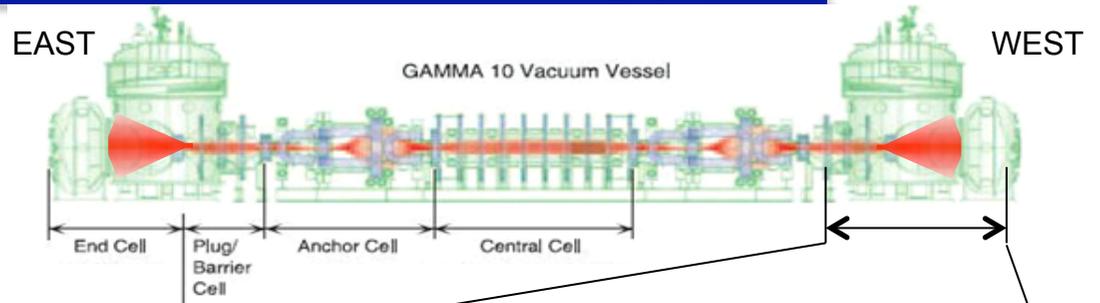
- ターゲット上熱流束の後部排気口幅依存性「武田, 岩元, 他」
(カロリーメータによる熱流計測)

カロリーメータ設置位置

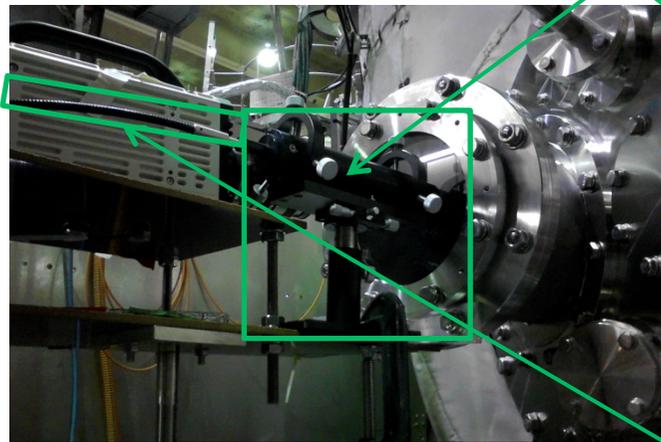


D-module内プラズマの分光計測

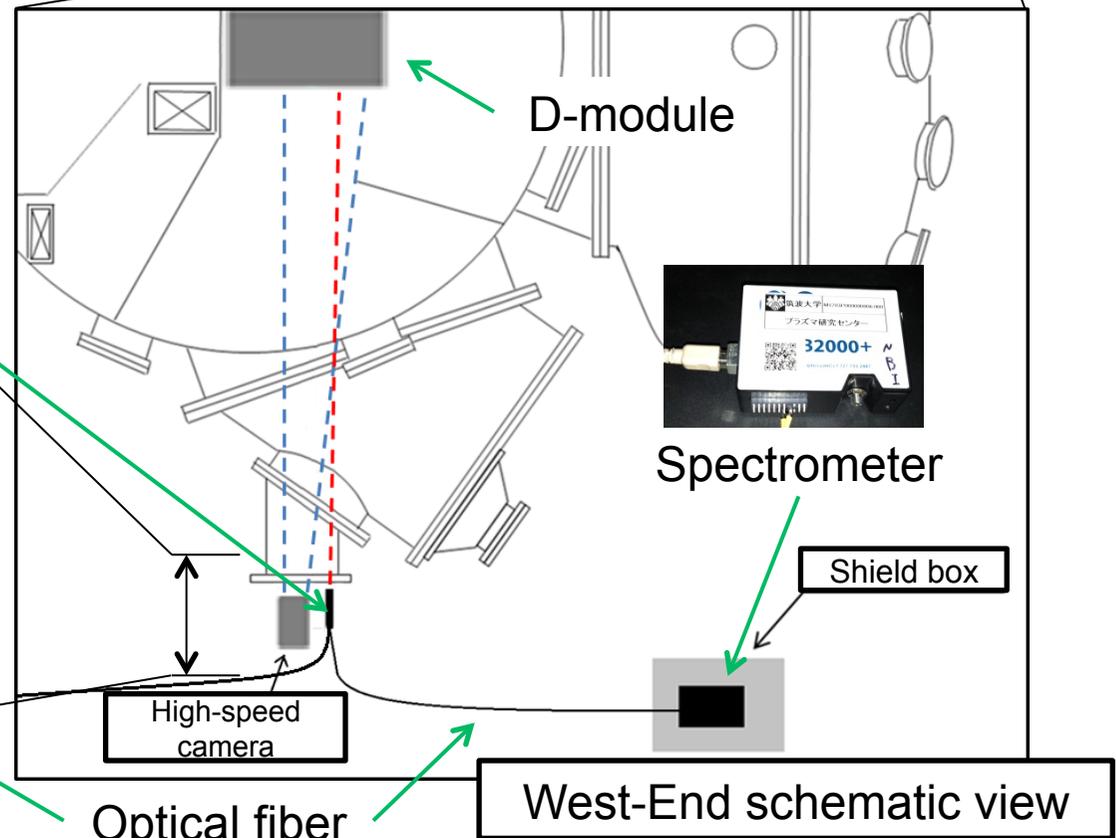
- D-module内を観測する高速カメラとほぼ同一の視線をもつ集光系を用いて分光器にプラズマ光を導入している。
- D-module内の軸上水平方向の空間分布が測定可能となっている。



Condenser lens



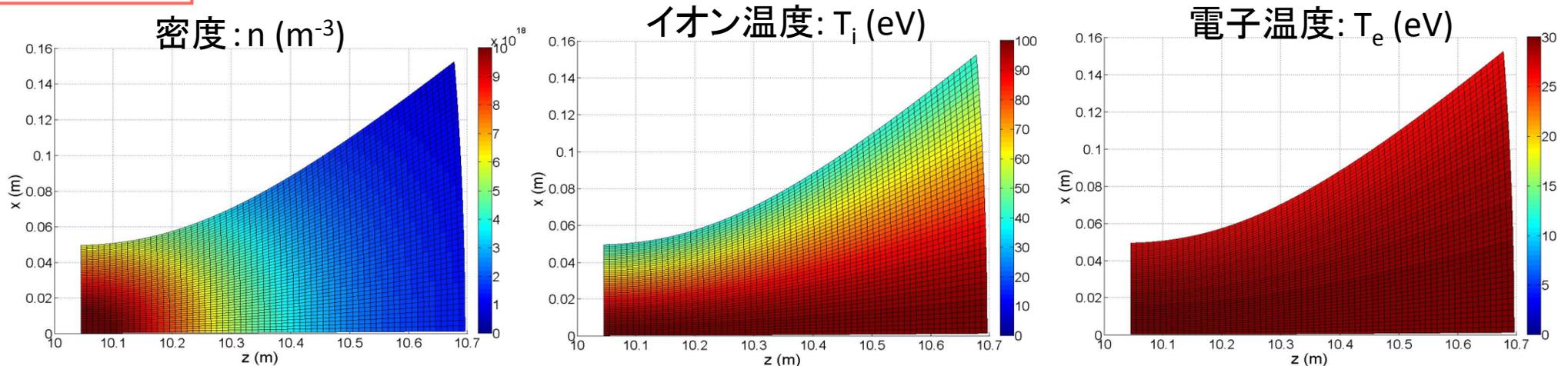
Optical system near the observation port



※分光器の感度較正は標準光源を用いて2012年に行われた。

2.4 初期条件と中性粒子モデル

初期条件



これらの初期条件は、実際の計測で推定された空間分布のデータを参考にして決定している。

中性粒子モデル

仮定： 中性粒子速度は一定。

→ 上記の仮定を元に、一次元での中性粒子における密度連続の式を解くことで、中性粒子密度分布を定義した。

$$\frac{\partial(n_n u_n)}{\partial z} = -n_n \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion} - n_n \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{cx} \Leftrightarrow \frac{\partial n_n}{\partial z} = -n_n \cdot \frac{\{n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion} + n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{cx}\}}{u_n} = -n_n \cdot \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow n_n = \exp\left\{-\int_L^z \frac{1}{\lambda}\right\}$$

$$n_n(z) = n_0 \cdot \exp\left\{-\int_L^z \frac{dz}{\lambda}\right\} \quad \because \lambda = \frac{u_n}{n_e \cdot \{\langle \sigma v \rangle_{ion} + \langle \sigma v \rangle_{cx}\}}$$

2. シミュレーションモデル (2.1 支配方程式)[1]

密度連続の式

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\vec{u}) = \underline{S_n}$$

S_n : イオン生成・損失項

運動量バランスの式

$$\frac{\partial}{\partial t} (mnu) + \nabla \cdot (nm\vec{u}\vec{u}) - \vec{\eta} \cdot \nabla u_{||} = -\nabla p + \underline{S_{mu}}$$

S_{mu} : 運動量生成・損失項

拡散式

$$v = -D_n \frac{\partial}{\partial y} (\ln n)$$

D_n : ボーム拡散係数

電子エネルギーバランス式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_e T_e \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{5}{2} n\vec{u}T_e - \kappa^e \nabla T_e \right) \right] = \vec{u}_e \cdot \nabla p_e - k(T_e - T_i) + \underline{S_E^e}$$

S_E^e : 電子エネルギー生成・損失項

イオンエネルギーバランス式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} n_i T_i + \frac{1}{2} nm\vec{u}_{||}^2 \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{5}{2} n\vec{u}T_i + \frac{1}{2} mn\vec{u}\vec{u}_{||}^2 \right) - \nabla \left(\kappa^i T_i + \frac{1}{2} \eta u_{||}^2 \right) \right] = -\vec{u}_e \cdot \nabla p_e + k(T_e - T_i) + \underline{S_E^i}$$

S_E^i : イオンエネルギー生成・損失項

n : プラズマ密度, T_i, T_e : イオンと電子温度, u : 流速,
 p_i, p_e : イオンと電子の圧力 ($p = p_i + p_e$)
 η : 粘性係数, κ : 熱伝導係数, k : エネルギー緩和係数, D_n : 拡散係数

これらの方程式の、境界値問題の定常解を算出している。

2.2 原子分子過程

方程式中で使用している各生成・損失項は、以下の様に定義している。

イオン生成・損失項

$$S_n = n_0 \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion.} - n_e \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{recomb.}$$

電子衝突電離

再結合

電子エネルギー生成・損失項

$$S_E^e = n_0 \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion.} \cdot \delta_e - n_e \cdot n_e \cdot \langle \sigma v \rangle_{recomb.} \cdot T_e$$

電子衝突電離

$\therefore \delta_e = -25 \text{ eV}$

再結合

イオンエネルギー生成・損失項

$$S_E^i = n_0 \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{ion.} \cdot E_{n0} - n_0 \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{cx} \cdot (T_i - E_{n0}) - n_i \cdot n_i \cdot \langle \sigma v \rangle_{recomb.} \cdot T_i$$

電子衝突電離

荷電交換反応

再結合

運動量生成・損失項

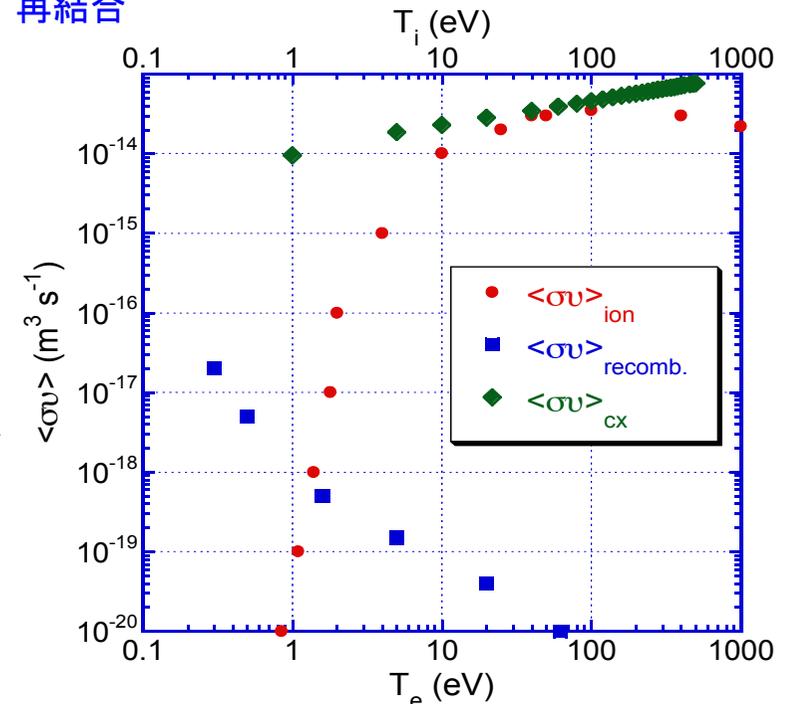
$$S_{mu} = -\langle \sigma v \rangle_{cx} \cdot n_0 \cdot n_i \cdot (u_i - u_0) \cdot m - \langle \sigma v \rangle_{recomb.} \cdot n_i \cdot n_i \cdot u_i \cdot m$$

荷電交換反応

再結合

- 電子による衝突電離の速度係数 $\langle \sigma v \rangle_{ion.}$ 、
- 荷電交換反応の速度係数 $\langle \sigma v \rangle_{cx}$ 、
- 電子-イオン間の再結合の速度係数 $\langle \sigma v \rangle_{recomb.}$

は、右図に示すように定義したものをを用いている。



$\langle \sigma v \rangle$ のイオン、電子温度依存性

E-Div.における中性粒子入射効果

GAMMA 10ターゲットモジュールでは、モジュール内にプラズマが到達する以前に、中性ガスを入射する事が可能になっている。

入射中性粒子

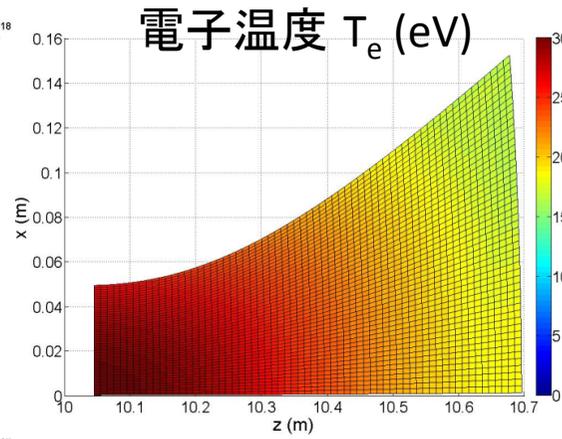
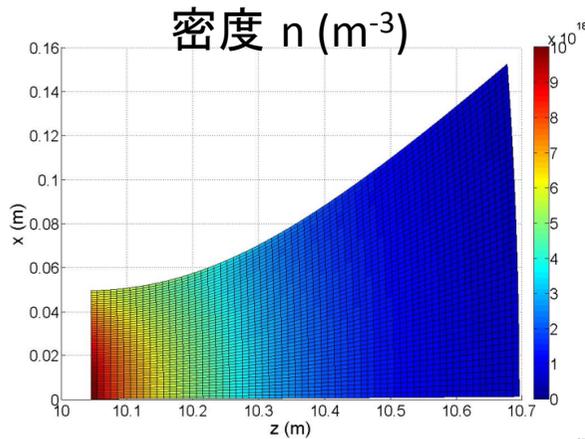
- H → 主として、プラズマ密度増加に寄与。
(GAMMA 10の電子温度領域では、水素中性粒子の電子衝突電離が、優勢である。)
- Ar → 電子温度減少に強く寄与。
(本発表では、Ar原子の寄与しか考えない為。)

ガス入射における、これらの中性粒子分布は、上記している様にプラズマ入射前に中性ガスが入射されるので、系内で一様分布していると仮定している。

$$n_n(z) = n_0 \cdot \exp\left\{-\int_L^z \frac{dz}{\lambda}\right\} + \alpha$$

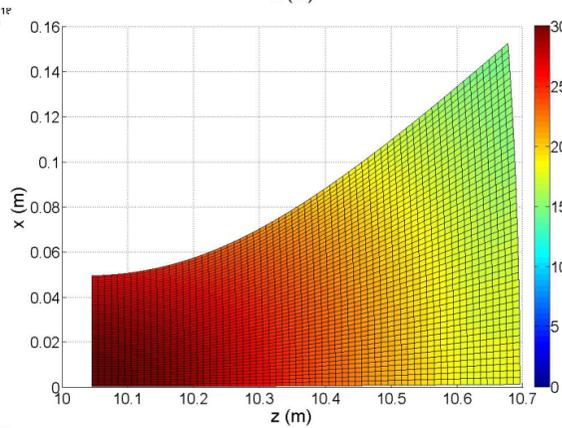
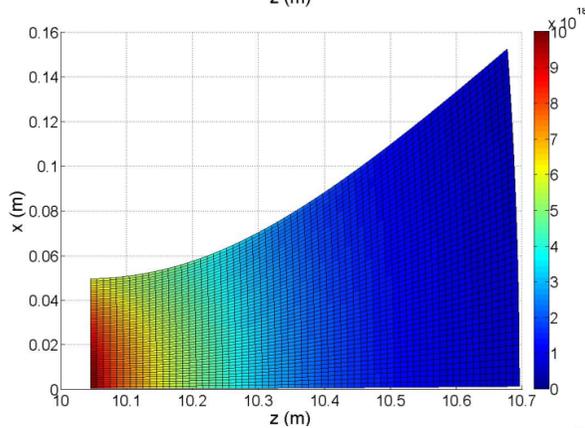
モジュール内の中性粒子密度を変化させる事により、背景プラズマパラメータがどの様に変化していくか知る事は、非常に重要である。

Arガス導入効果のシミュレーション結果



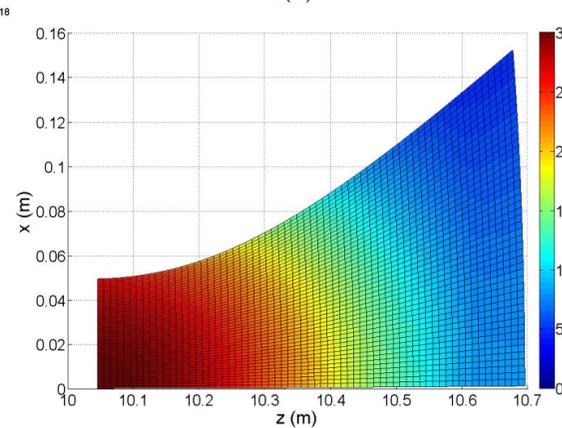
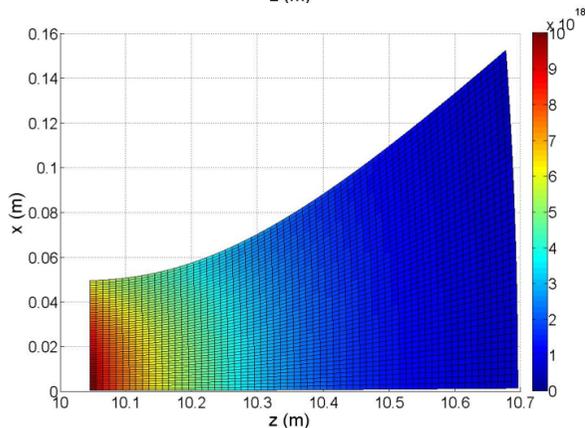
Ar中性粒子密度は、計算系内に一様に分布させている。この密度を変化させ計算を行った。

Ar中性粒子密度: $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$



Ar中性粒子密度: $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

電子温度のz軸方向における、減少効果が見える。



Ar中性粒子密度: $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

電子温度冷却効果は、大きく効いている事が分かる。
密度は、径方向の減少を見せ始めているが大きな変化は見られない。

研究の背景と目的

- プラズマ研究センターにおける第2期中期計画における主要な柱として、新ダイバータ装置を導入した境界プラズマにおける粒子輸送制御研究を課題に掲げ、ダイバータ模擬の研究を進めている。
- 上記研究計画では、2つのダイバータ装置が挙げられ、一つはセパラトリックスを有するトロイダルダイバータ様の磁場配位を持ち (A(X)-Divertor)、もう一つは既設ミラー端部に発生する高熱流粒子束を利用したダイバータ模擬研究 (E-Divertor) である。
- 本研究の目的は、タンデムミラープラズマ閉じ込め装置ガンマ10のダイバータプラズマの模擬装置としての可能性を探るために、端部ミラー (E-Div.) における基礎実験及び数値計算に基づいた検討を行うことである。これによって、開放端磁場配位を活かし、ダイバータ開発における課題解決に向けた貢献を行う。

新装置において目標とする性能

<E-Divertor>

- プラズマ口径：0.1 ~ 1.0 m ϕ
- プラズマ密度：~ 10^{19} m $^{-3}$
- 粒子束密度： 10^{22} ~ 10^{24} m $^{-2}$ s $^{-1}$
- 熱流束密度：1.0 ~ 20 MW/m 2
- プラズマ持続時間：0.4 秒 ~ 4 秒（10秒 低磁場運転下）
- フルエンス： 10^{24} ~ 10^{25} m $^{-2}$ /shot, ~ 10^{27} m $^{-2}$ /week

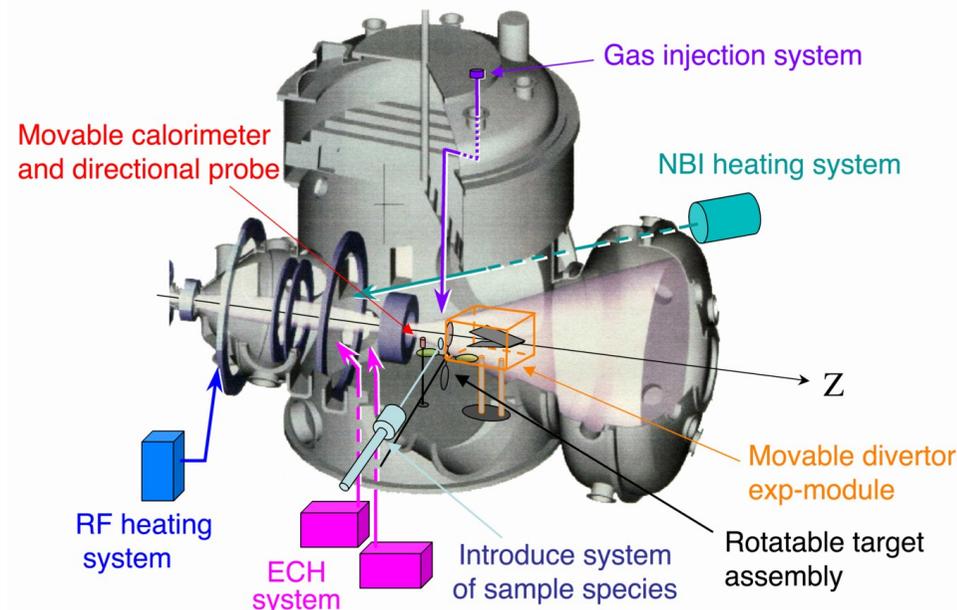
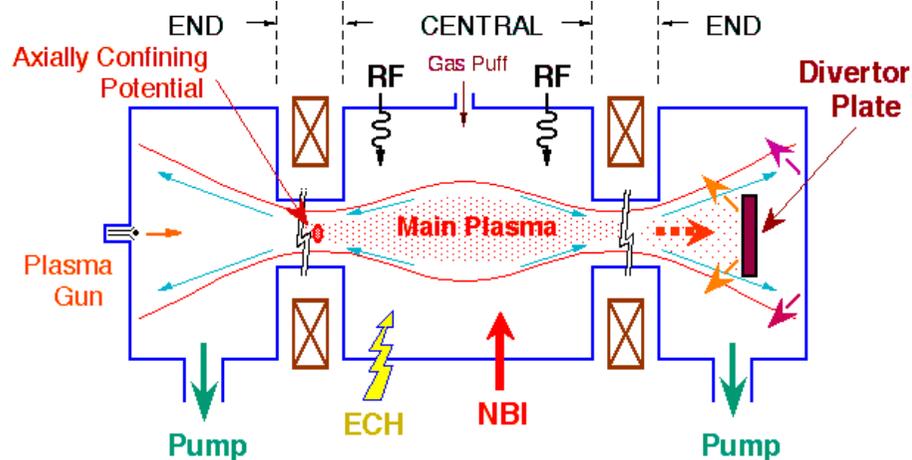
<A-Divertor>

- プラズマ口径：~ 3 m ϕ \times 0.05 m w （同心円環状）, 10 \times 5 cm
- プラズマ密度： $\leq 10^{18}$ m $^{-3}$
- 粒子束密度： 10^{20} ~ 10^{22} m $^{-2}$ s $^{-1}$ （定常プラズマ運転）
- 熱流束密度：0.1 ~ 10 MW/m 2
- プラズマ持続時間：0.4 秒 ~ 4 秒（10秒 低磁場運転下）

開放端磁場を活かした新研究(*E-Div.*)

開放端磁場配位とダイバータ模擬装置の概念

GAMMA10 end-mirror vacuum vessel



開放端磁場配位は元々ダイバータに酷似した構造を有しており、セントラル部で生成された粒子は磁力線に沿って端部へ輸送される。

- ・ 既設の大出力ジャイロトロンによる強力な電子加熱，及び大電カイオン加熱装置（ICRF，NBI）を用いた高エネルギーのプラズマ生成が可能で，他の小型ダイバータ模擬実験装置に比べて**大口径・高熱流束が期待**できる。
- ・ 大容量クライオ排気装置を用いたダイバータ排気実験が可能。
- ・ パルス運転を利用した**ELMを模擬した研究など実機プラズマのダイバータに近い環境**（強磁場，高イオン・電子温度，端部放電電極等の影響の無い条件下）での，**ダイバータプラズマ制御実験**を世界で初めて実施する。

今後必要となる計測系

<プラグバリア部>

- ミッドプレーンマイクロ波干渉計 (中心部プラズマ密度評価)
- 静電プローブ, 方向性プローブ (周辺部粒子束の評価)
- カロリメータ (周辺部熱流の評価)
- 分光器 (2次元イメージ) 複数箇所のを計測 (不純物挙動)
- 周辺部計測用マイクロ波反射計 (周辺部密度評価)
- 軟X線計測器 (電子温度、高温電子評価)

<エンド部>

- 分光器 (エンド部不純物生成機構, 放射冷却効果の評価)
- 高速カメラ (非接触プラズマと揺動の関係の検証)
- 赤外線カメラ (中速~高速) (熱流・材料表面温度の評価)
- 高速イオンゲージ (ダイバータ部中性粒子圧縮効果の検証)
- 残留ガス分析器 (ダイバータ部の不純物ガス量の定量評価)
- 昇温脱離計測系 (照射材料の*in situ*表面分析)

来年度ハードウェア整備計画

<エンド部>

1. 排気ダクトの改造とダイバータモジュール設置 [外注] 「年度末」
2. ダイバータモジュール駆動装置 [外注] 「年度末」
3. 試料導入装置 (垂直型@ $Z_{EXIT} = 30 \text{ cm}$) [自作] 「8月大気開放時」
4. 高速カメラ計測装置 (NAC, HX-1) プラグバリアと共有 「年度末」
5. 残留ガス分析器 (Pfeiffer, PrismaPlus) 「8月大気開放時」
6. 簡易ダイバータBox [自作] 「8月大気開放時」
7. 新型熱流束計測器 [自作@大府大松浦先生] 「年度末」

<プラグバリア部>

1. 分光器 (広帯域観測用 USB2000, etc.) 「8月大気開放時」
2. ミッドプレーンマイクロ波干渉計 「8月大気開放時」
3. 高速カメラ計測装置 (NAC, HX-1) エンド部と共有 「年度末」
4. 周辺部プローブアレイ [自作] 「年度末」
- 5.

ダイバータ研究比較一覧表

ダイバータ性能比較表

2009.12.1

実験装置	種類	研究対象部位	プラズマ源/ 加熱装置	排気装置	装置・プラズマ等のパラメータ						
					磁場強度 [Tesla]	プラズマ密度 [m ⁻³]	プラズマ温度 Ti/Te [eV]	粒子束密度 [m ⁻² s ⁻¹]	熱流束密度 [MW / m ²]	フルエンス [m ⁻²]	プラズマ断面 [m ^φ]
ITER	閉込装置	ダイバータ部	-/NBI,RF,ECH	クライオポンプ	—	~10 ²⁰ (D)		~10 ²⁴	5~20		—
JT-60U	閉込装置	ダイバータ部	-/NBI,RF,ECH	クライオポンプ?	—	~10 ¹⁹ (D)					—
新装置	閉込装置/ Div模擬装置	E-Div (プラグ バリ部分生成)	プラズマ銃/ RF, NBI, ECH	クライオポンプ	3.4~0.3	≤10 ¹⁹ (H)	100~500 /10~500	10 ²³ ~10 ²⁴	0.1~20	10 ²⁴ ~25/shot ~10 ²⁷ /week	0.1~1
		A-Div (セントラル部生成)	プラズマ銃/ RF, NBI, ECH	クライオポンプ	≤0.1	≤10 ¹⁸ (H)	100~500 /10~500	10 ²⁰ ~10 ²¹ 10 ²² /shot	0.01~0.1	10 ²¹ ~22/shot ~10 ²⁴ /week	~1 ^φ × 0.05 ^w
NAGDIS-II	Div模擬装置	装置端部	アーク放電/RF	TMP	0.25	2.4 × 10 ¹⁸ (H)	? / ~5	10 ²² ~10 ²³	?	10 ²⁵ ~10 ²⁶	~0.05
MAP-II	Div模擬装置	装置端部	アーク放電	TMP	0.1~0.02	~2 × 10 ¹⁸ (He)	? / ~5	?	?	?	~0.05
PISCES	Div模擬装置	装置端部	アーク放電	TMP	0.2~0.5	~3 × 10 ¹⁸ (D)	? / ~5	~3 × 10 ²²	?	~10 ²⁷	~0.04
実験装置	種類	研究対象部位	プラズマ源/ 加熱装置	排気装置	研究課題					備考	
					ダイバータ 排気	照射損耗/ 再堆積	原子・分子 過程	SOLプラズ マ物理	ETBの物理 /揺動・輸送		
ITER	閉込装置	ダイバータ部	-/NBI,RF,ECH	クライオポンプ	○	○	?	△	○		
JT-60U	閉込装置	ダイバータ部	-/NBI,RF,ECH	クライオポンプ?	△	○	△	◎	◎		
新装置	閉込装置/ Div模擬装置	E-Div (プラグ バリ部分生成)	プラズマ銃/ RF, NBI, ECH	クライオポンプ	◎	○	◎	○	×		
		A-Div (セントラル部生成)	プラズマ銃/ RF, NBI, ECH	クライオポンプ	○	×	◎	◎	○		
NAGDIS-II	Div模擬装置	装置端部	アーク放電/RF	TMP	×	○	◎	?	×	名古屋大	
MAP-II	Div模擬装置	装置端部	アーク放電	TMP	×	×	◎	△	×	東京大	
PISCES	Div模擬装置	装置端部	アーク放電	TMP	×	○	?	△	×	カリフォルニア大サンディエゴ校	

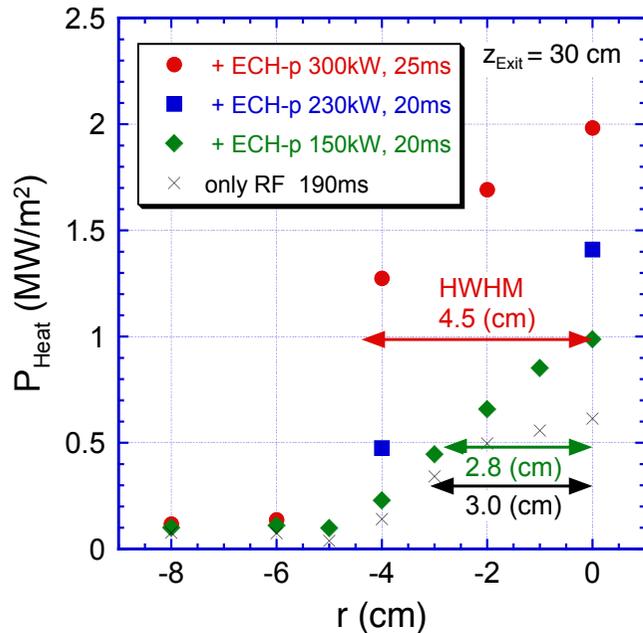
※新装置の特長

- ・既存の小型ダイバータ模擬装置に比べて、プラズマ加熱パワーが桁違いに大きい為、高熱粒子束のプラズマ流が発生可能で、より実機ダイバータに近い環境での実験が可能。
- ・ダイバータを端部のみならず、途中（アンカー部など）にダイバータ配位を設置することで、磁力線に沿った輸送・揺動現象の物理などSOLプラズマ物理の解明に貢献できる。
- ・これまでに培ってきた電位形成とプラズマ輸送の研究を更に周辺輸送障壁の物理解明へ向けて発展できる。

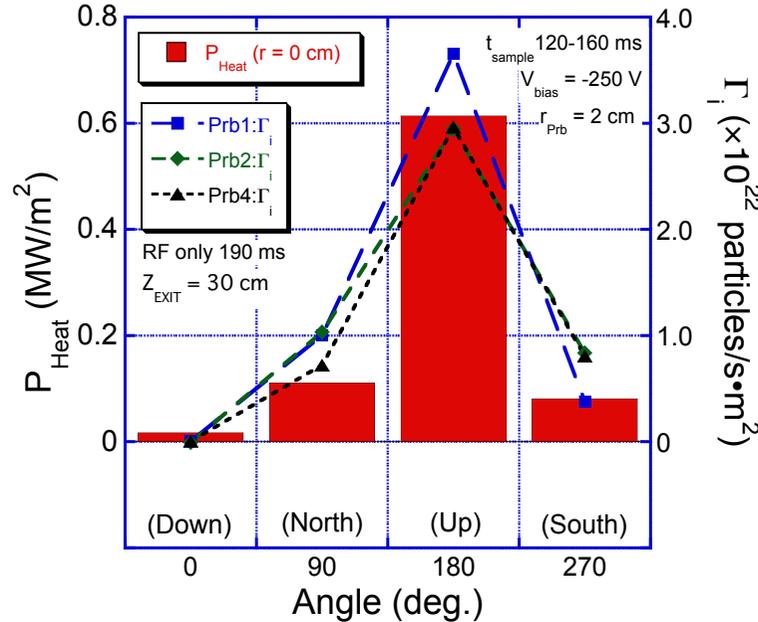
新研究計画の基礎実験 (双方向型共同研究)

カロリメータ及びマッハプローブによる熱流・粒子束計測及び高速カメラによる可視光イメージ計測結果

熱流密度の径方向分布 (ECHパワー依存性)



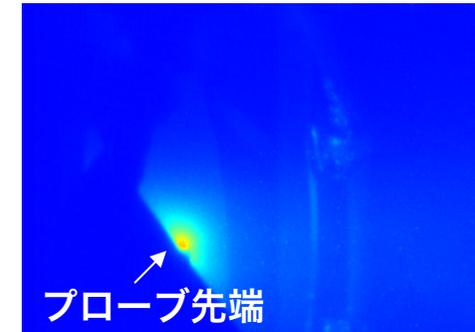
熱流・粒子束密度の角度依存性



プラズマ銃による初期プラズマ入射時



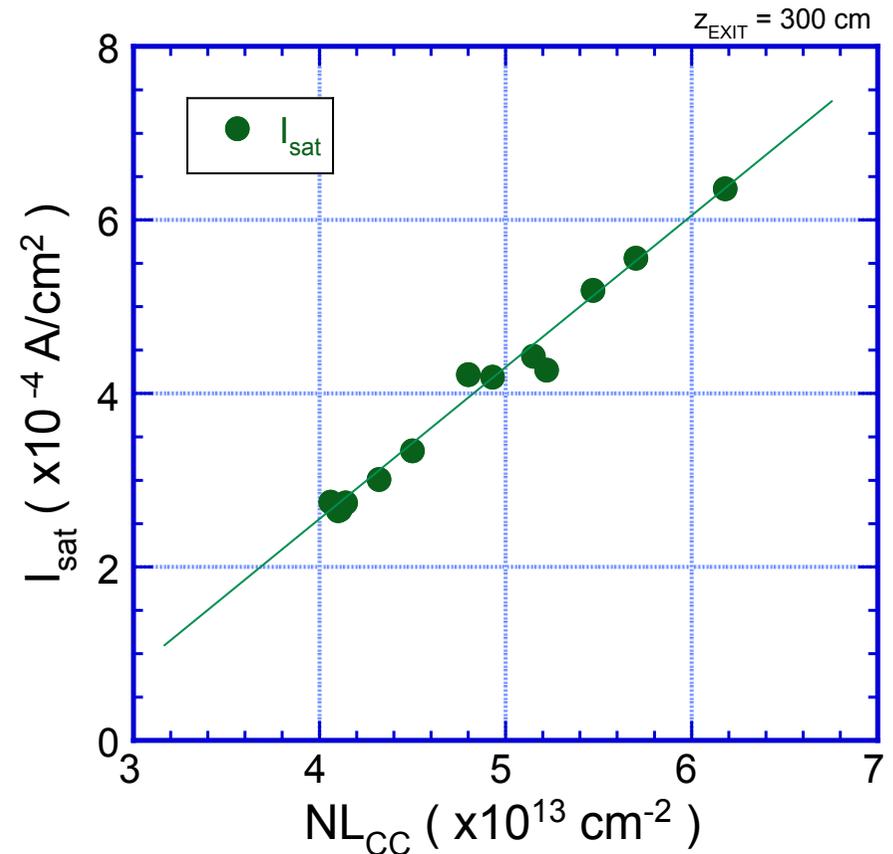
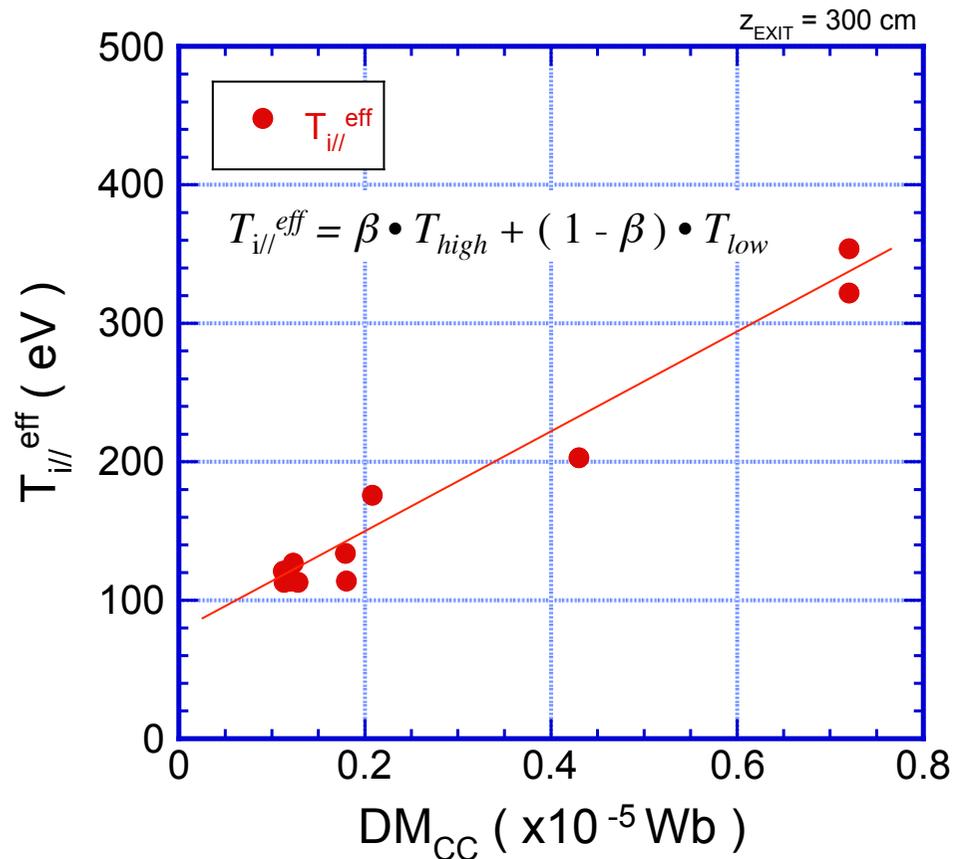
プローブ挿入時の流出プラズマによる発光



典型的なホットイオンモードプラズマでの電位閉じ込め実験 (セントラル部密度 $2-3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, イオン温度 5 keV 程度) において, 端部軸上での熱流計測を行った結果, RFのみのプラズマ生成時で 0.6 MW/m^2 , ECH重畳時で 2 MW/m^2 の熱流密度が半値直径で 9 cm にわたって得られた。特にECH印加中には, ITERにおけるダイバータ板の熱流密度に匹敵する値 ($\sim 8 \text{ MW/m}^2$) を示し, 今後の端部プラズマ加熱系の増強により, 更に高熱流束を発生できる見通しが得られた。

*E-Div.*の基礎実験結果 (双方向型共同研究)

By using the end-loss ion energy analyzer (ELIEA), the dependences of effective ion temperature $T_{i//}^{eff}$ and ion current density I_{sat} on the mail plasma parameters are investigated. by K. Ichimura

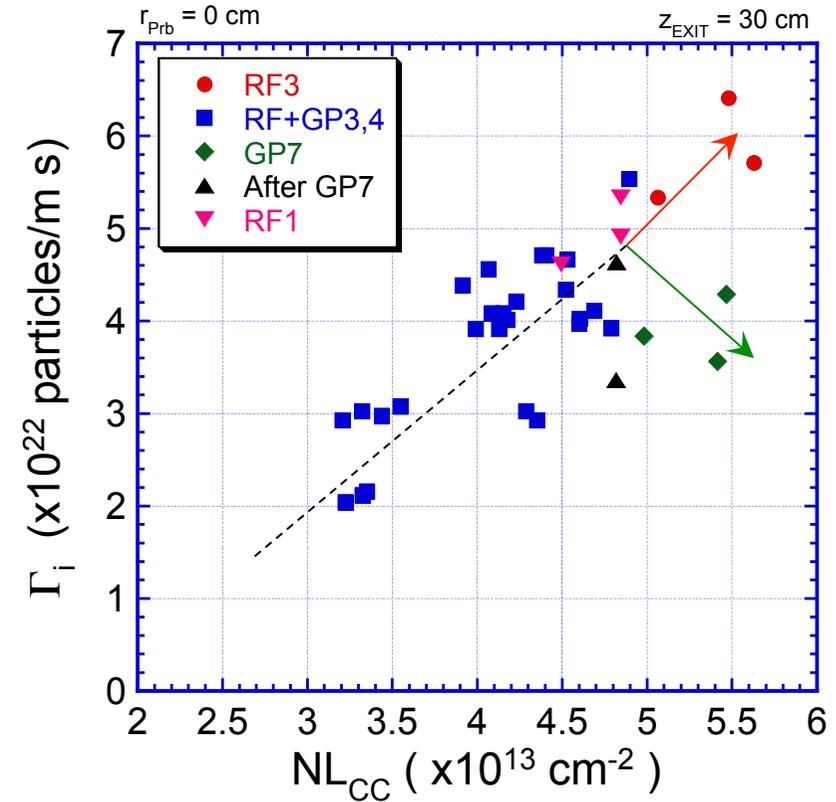
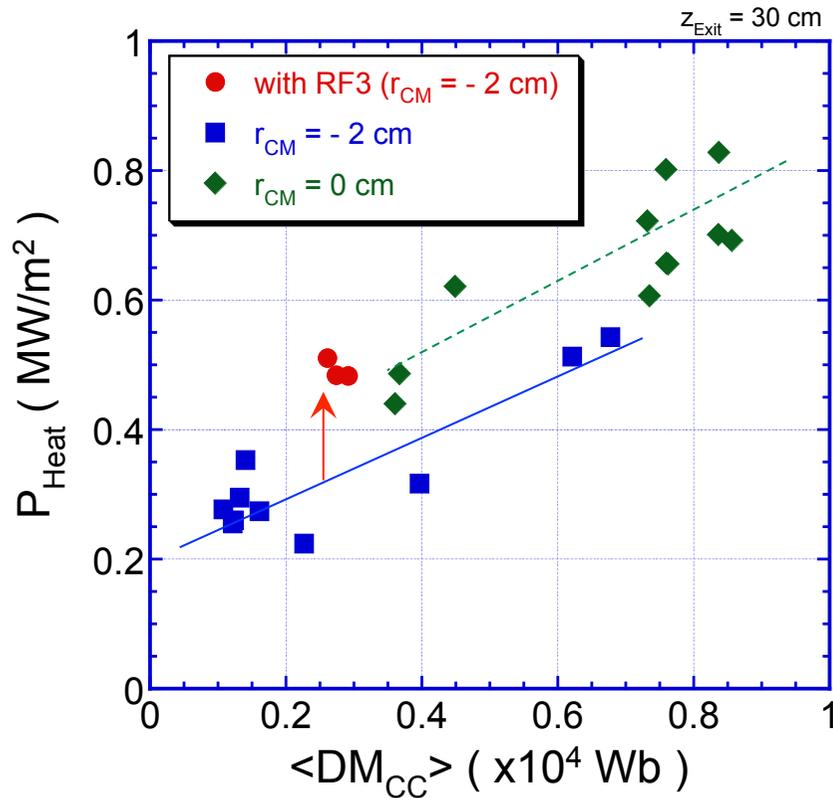


Both data showed a good lineality and it is clearly found that the central-cell plasma parameters can control the parameters of end-loss ion flux.

*E-Div.*の基礎実験結果 (双方向型共同研究)

熱流束・粒子束密度の制御性を調べるために、それらのメインプラズマパラメータや各種プラズマ生成・加熱系に対する依存性が調べられた。

by H. Takeda



- 熱流束密度は、セントラル部の蓄積エネルギー(反磁性量)の増加と共に上昇し、粒子束密度は、同部電子の線密度と共に増加することが分かった。
- 両者のデータは、極小磁場アンカー部のICRF追加熱により有意に上昇し、その効果が確認された。

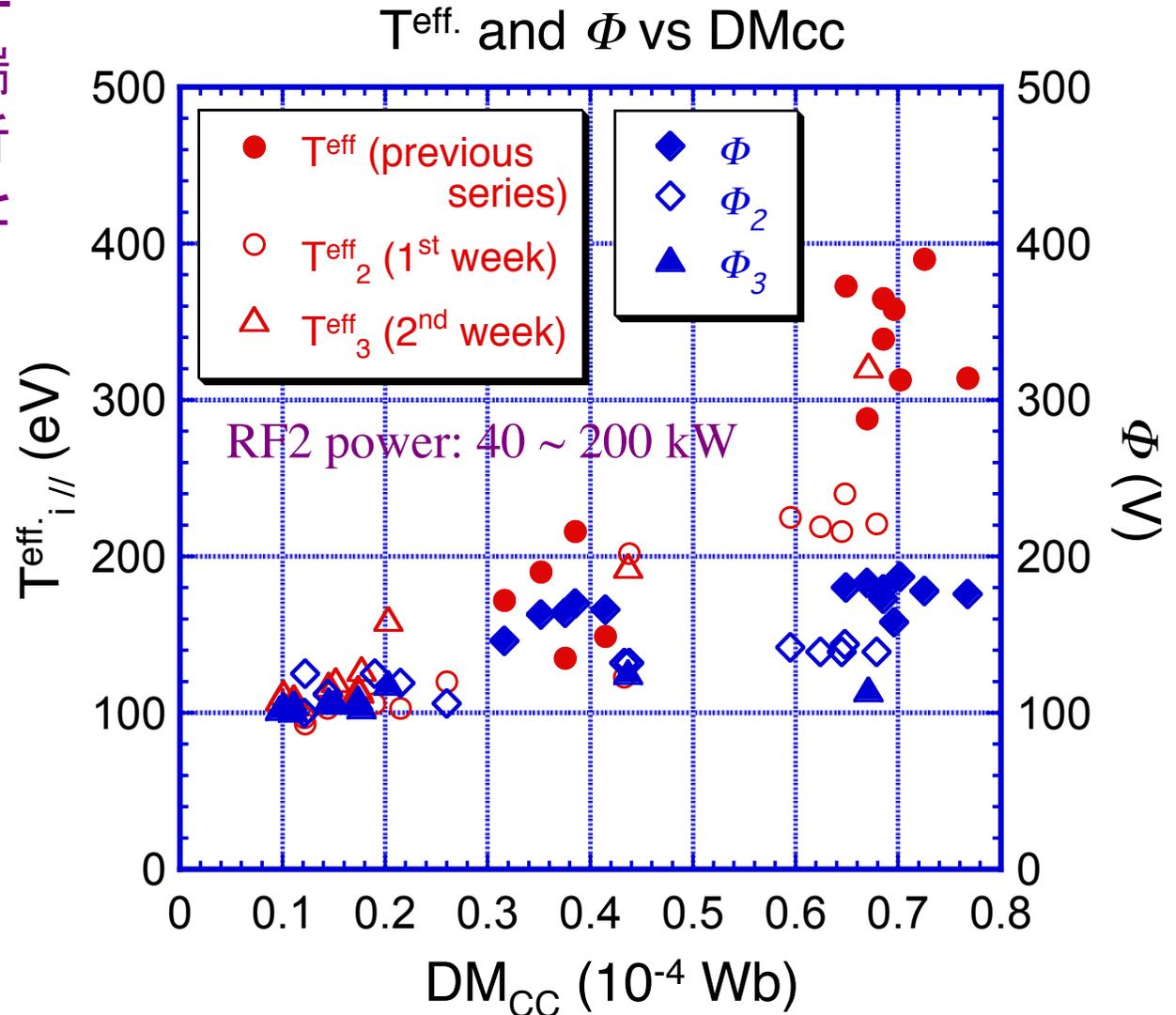
端損失イオンのエネルギー分析

2010.10.4

K. Ichimura, Y. Nakashima

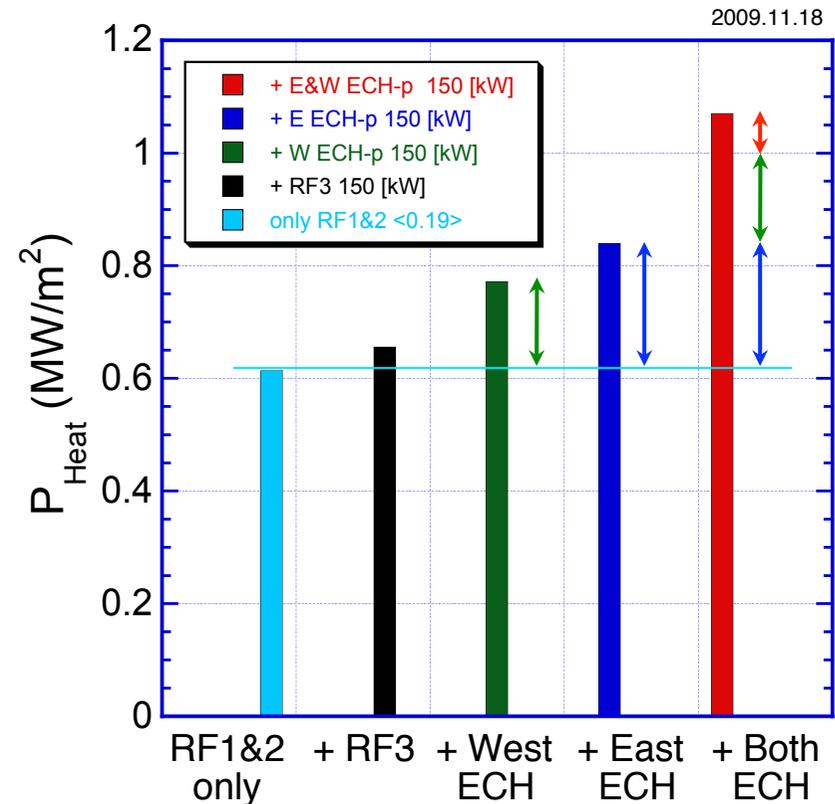
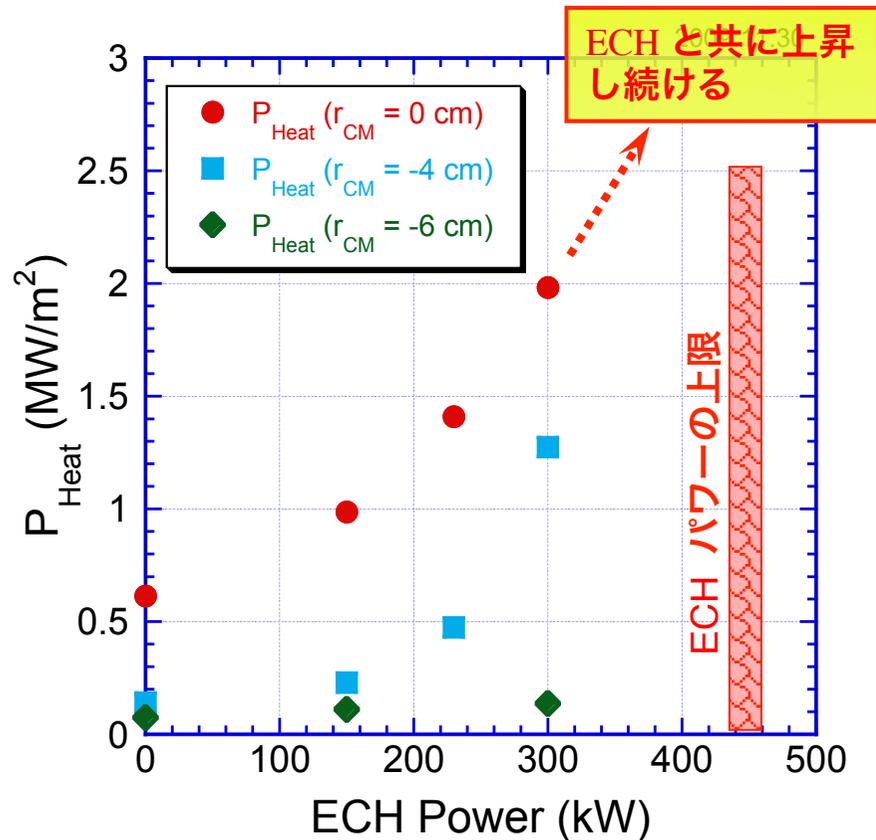
西エンド部真空容器内に設置した端損失イオンエネルギー分析器(ELIEA)を用いて、端損失イオンのエネルギー分析を行い、軸方向イオン温度 $T_{i//}$ と電位 ϕ を求めた。

- 端損失イオンの実効温度 $T_{i//}^{\text{eff}}$ は、DMccの増加と共に上昇し、100 ~ 400 eVの範囲で制御可能
- 通常のホットイオンモードプラズマのDMcc値($\geq 0.5 \times 10^{-4}$ Wb)では、200 ~ 400 eVと従来の値を再現
- 電位 ϕ は、温度に比べて緩やかに100 ~ 200 eVで増加



新研究計画の基礎実験 (双方向型共同研究)

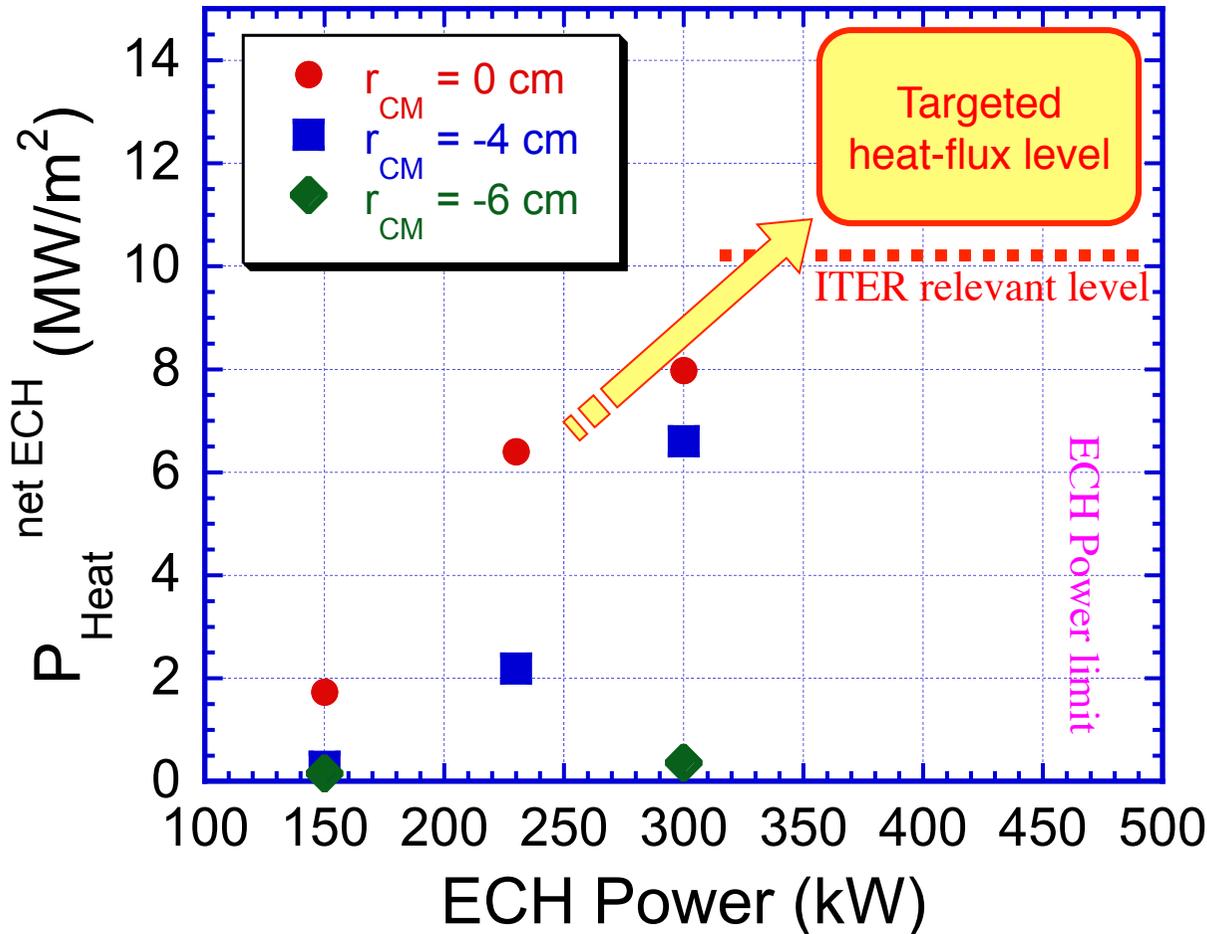
ECH パワー依存性及び加熱系の組み合わせ効果



- ECHパワーの増加に従って、熱流束強度は半径~4 cm の領域で増加し続けていることがわかった。
- 東西の ECH や RF の追加熱による組み合わせ効果を調べた結果、近い側（西）の ECH に比べ、遠い側（東）の ECH の方が、熱流速の発生に対して、より強い効果を示し、東西同時入射が別々の場合の和を凌いでいることがわかった。

Preparative Experiments at End-Mirror (*E-Div.*)

Estimation of net heat-flux density during ECH



$$P_{\text{Heat net ECH}} \equiv$$

$$(Q_{\text{Heat with ECH}} - Q_{\text{Heat only RF}}) / t_{\text{ECH}}.$$

Here,

$Q_{\text{Heat with ECH}}$: total calorific value in the plasma discharge with ECH.

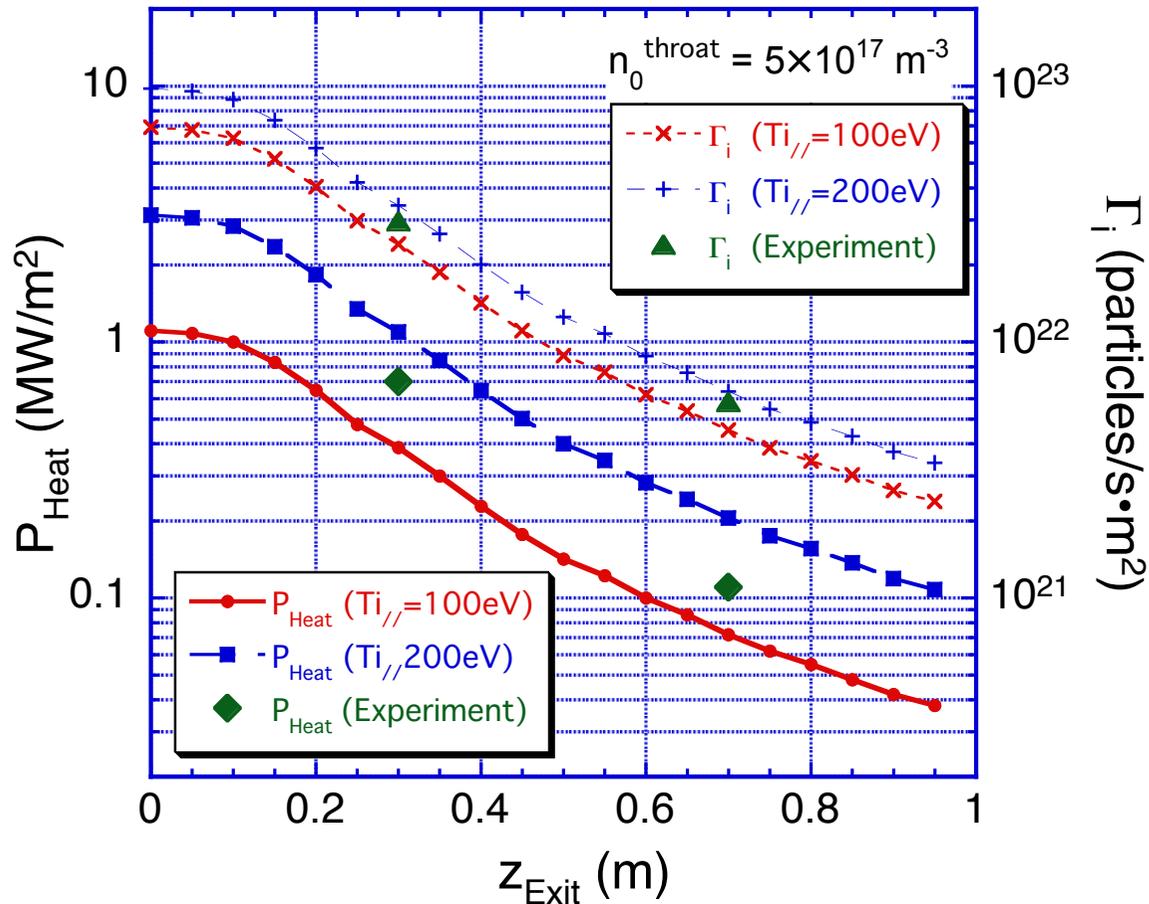
$Q_{\text{heat only RF}}$: total calorific value in the plasma discharge with only RF.

t_{ECH} : duration of the ECH pulse.

The net heat-flux continues to increase with the ECH power and is expected to be achieved up to the level of 10 MW/m^2 within the available power of ECH, which almost corresponds to the heat load of the divertor plate of ITER.

Preparative Experiments at End-Mirror (*E-Div.*)

Axial distribution of heat and particle flux density



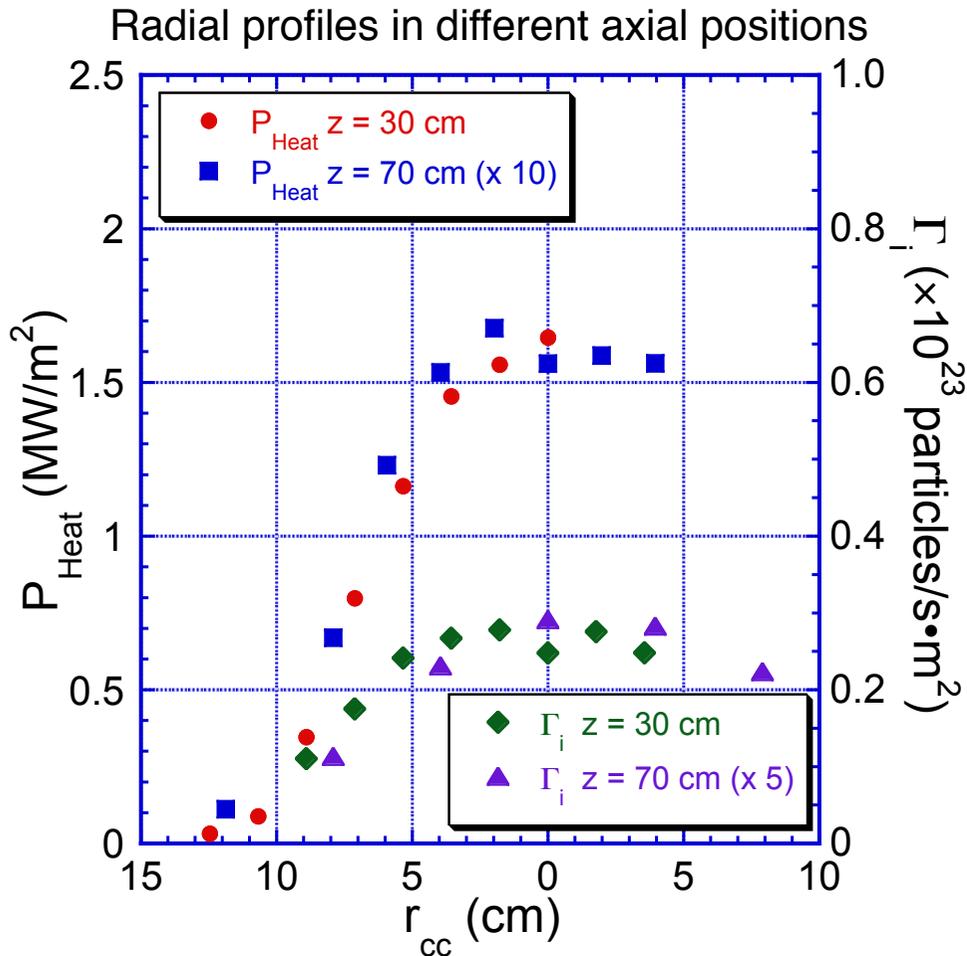
Data points with connected lines represent the calculation results of the heat and the particle flux taking into account of the effect of the density reduction due to the expansion of magnetic flux tube in the downstream side from the end-mirror exit.

In this calculation, the plasma ion density at the end-mirror throat is given to be $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ based on the measured results of heat and particle flux density at $z_{\text{Exit}} = 30 \text{ cm}$. Each value measured at the different axial positions occupies the intermediate position between the two calculation lines ($T_{i//} = 100 \text{ eV}$ and 200 eV).

These results give a good agreement with the measured ion temperature of 140 eV, which indicates that the ion behavior is fundamentally restricted in the magnetic field configuration.

Preparative Experiments at End-Mirror (*E-Div.*)

— Characteristics of heat flux and particle flux densities —



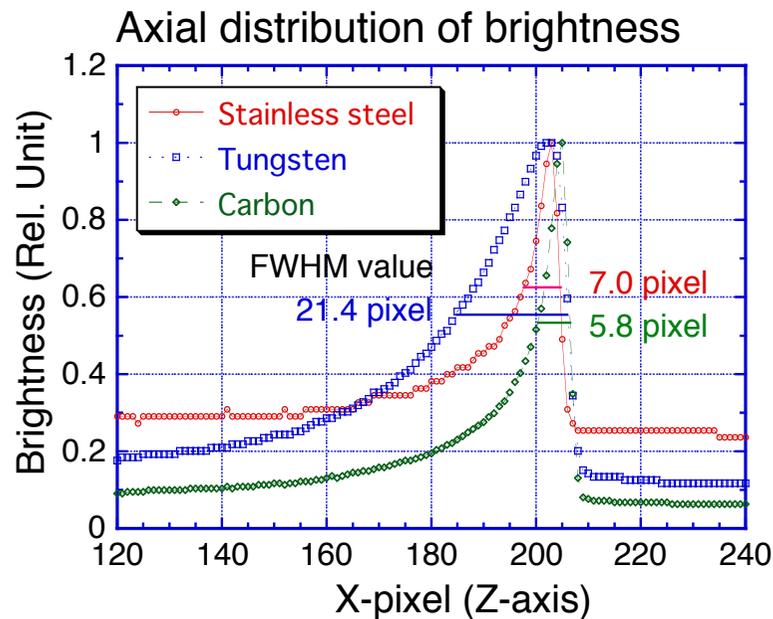
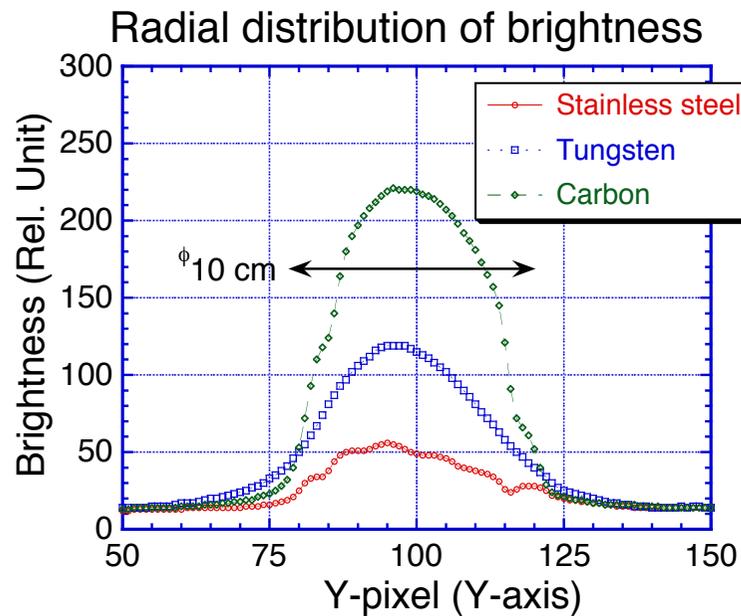
In RF produced plasma cases;

- Radial profiles of heat and particle flux densities measured at different positions along the z-axis ($z_{\text{EXIT}} = 30$ and 70 cm).
- Each position is normalized at the central-cell midplane position according to the shape of the magnetic flux tube.
- In both heat and particle flux profiles, it is found that a good agreement is obtained.

It is confirmed that the transport of the heat and particle fluxes from the end-mirror exit is basically governed by the magnetic field configuration in the end-mirror region.

新研究計画の基礎実験 (双方向型共同研究)

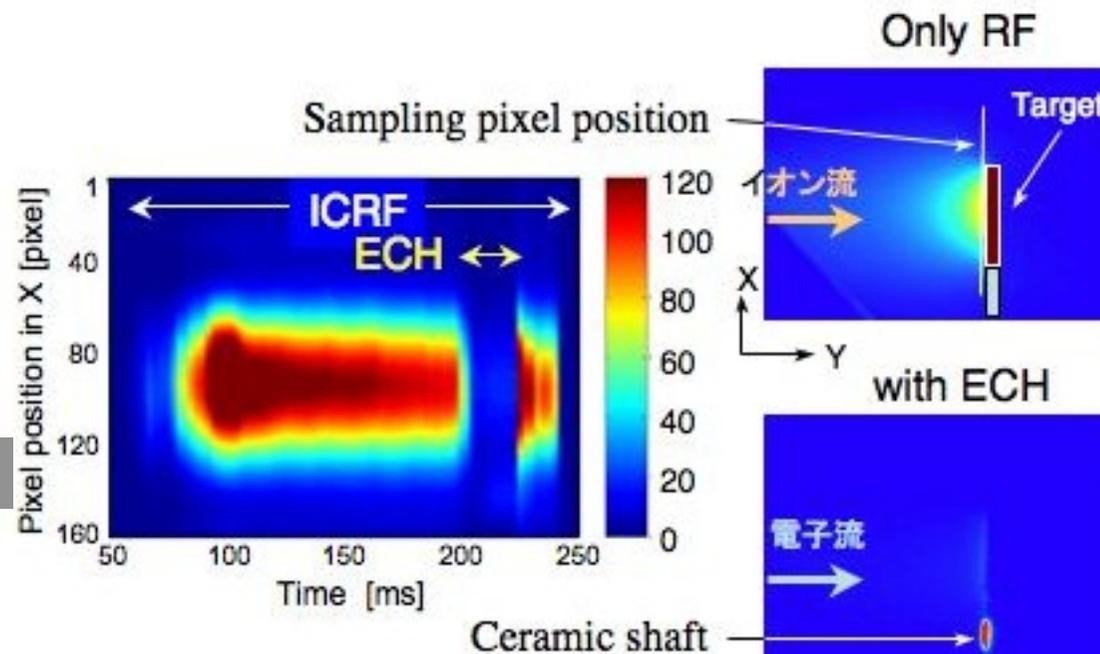
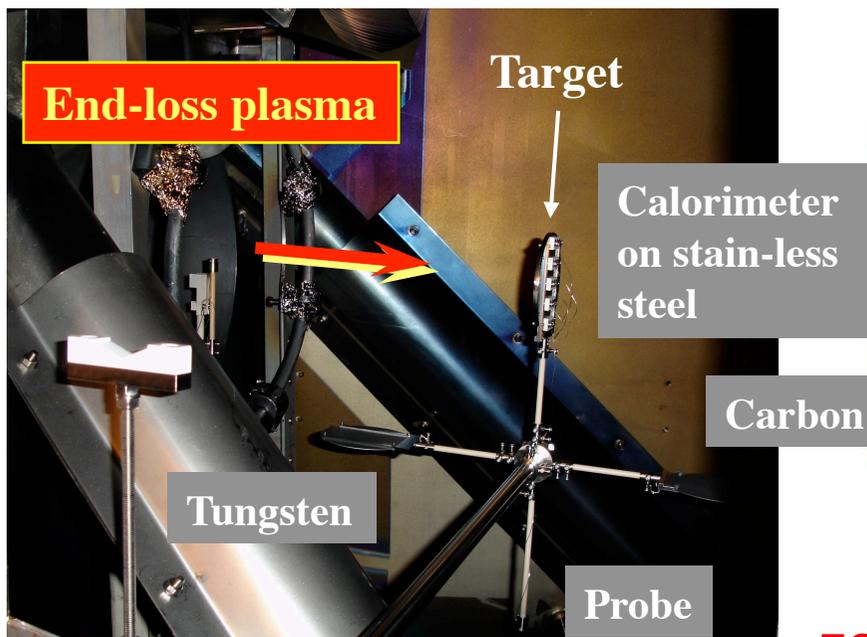
異なるターゲット材における可視光放射イメージの比較



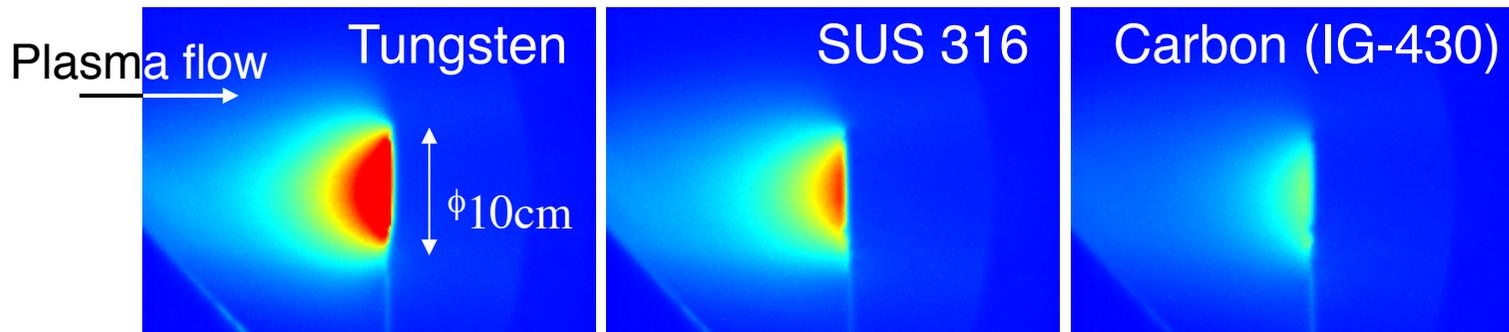
- FWHM value:
 $W > SS > C$
- Energy reflection coefficient R_E :
 $R_E^W > R_E^{SS} > R_E^C$
- Energy of reflected hydrogen atom E_h :
 $E_h^W > E_h^{SS} > E_h^C$

高速カメラによるプラズマ-材料相互作用に伴う可視発光の2次元イメージ計測

ミラー出口に設置した回転ターゲット



ECH入射時、端損失プラギングによる発光強度の減少を観測



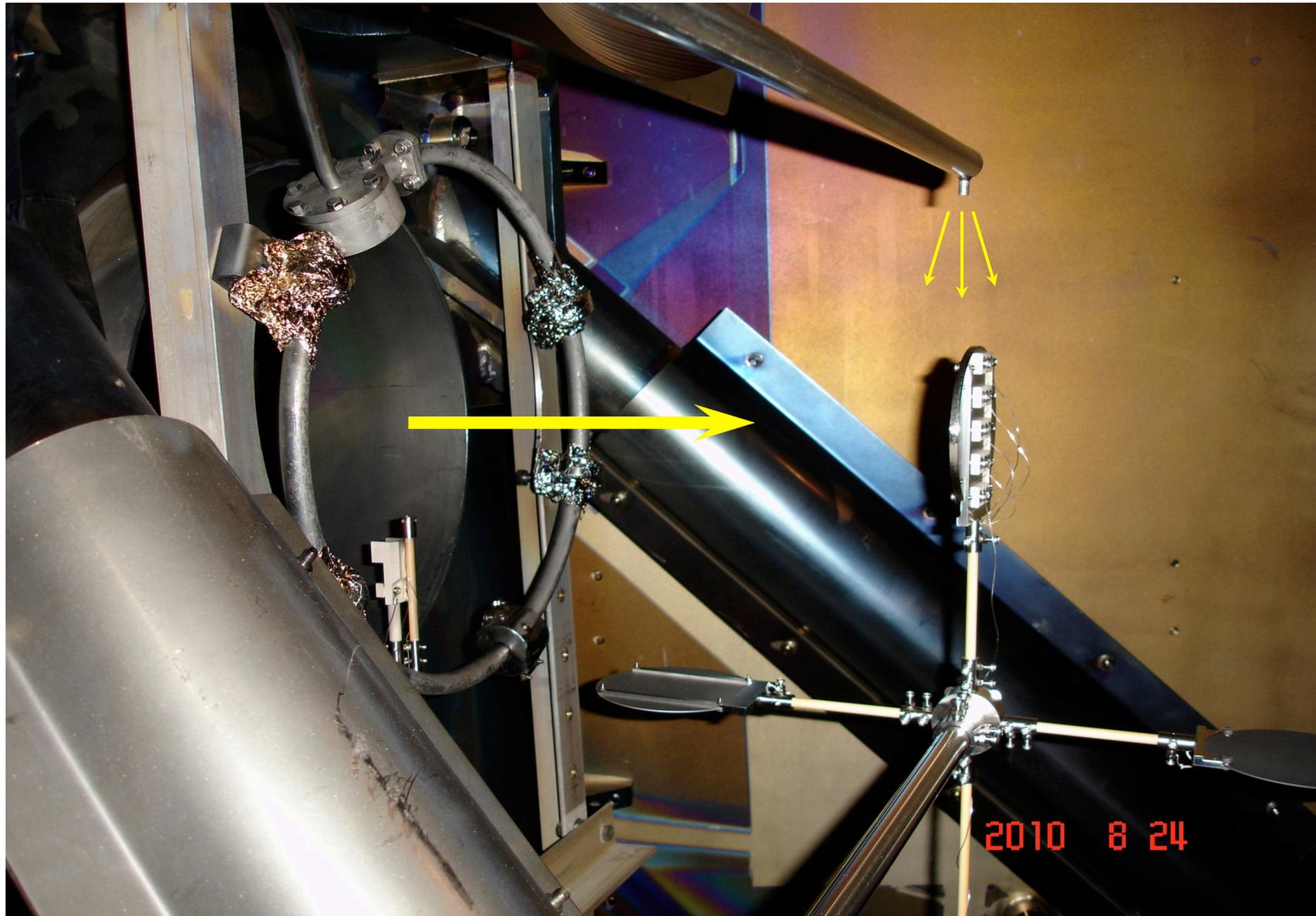
端損失プラズマ流と材料表面との相互作用による強い発光を観測

Camera: HAS 220
 Frame rate: 400 fps
 Shutter: Open
 Filter: Without

R. Yonenaga, Y. Nakashima

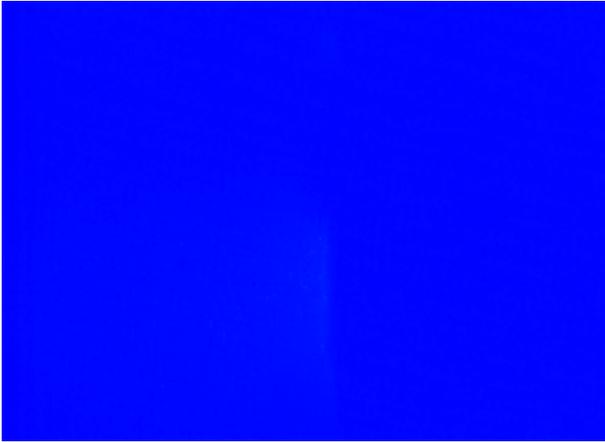
PRC Sympo 2011, Y. Nakashima

回転ターゲットとガス導入系

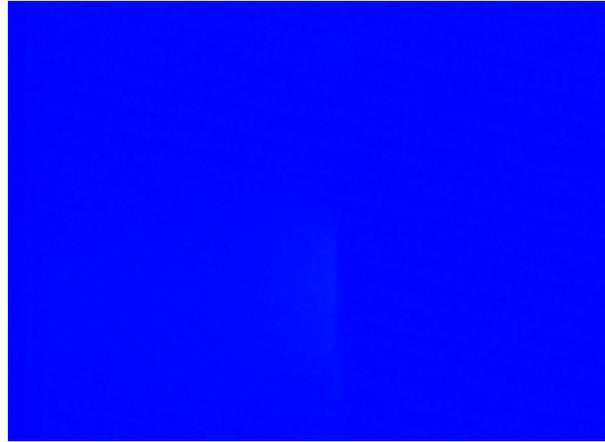


中速カメラによる発光計測

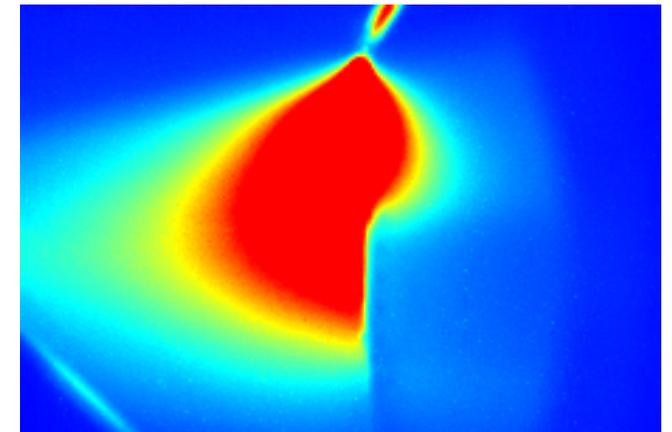
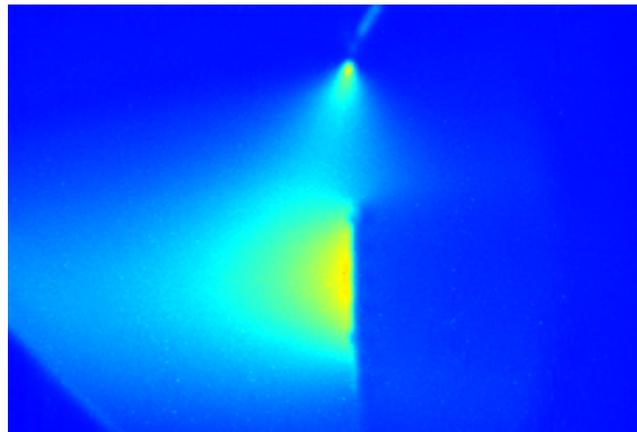
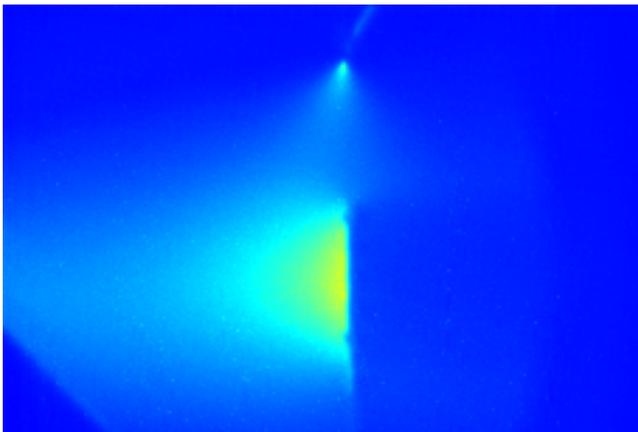
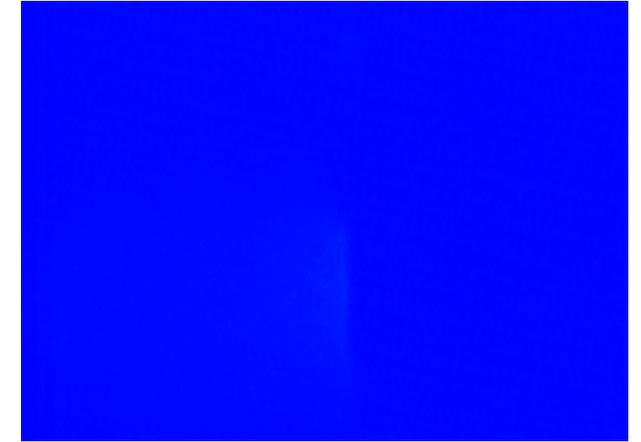
He 500 mbar 40-100 ms



Ne 500 mbar 40-100 ms



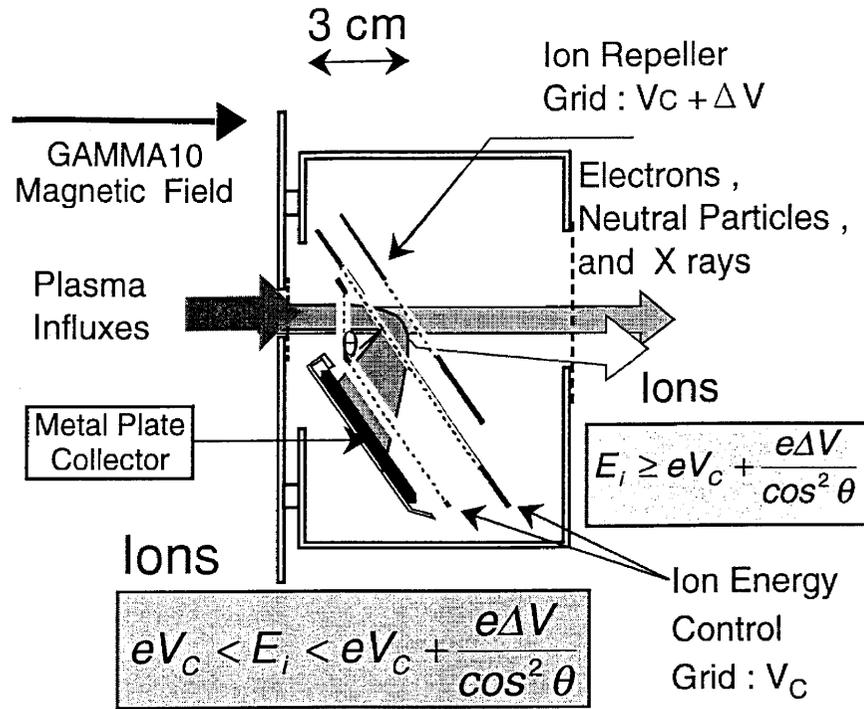
Ar 500 mbar 40-100 ms



- 発光の強度は $\text{He} < \text{Ne} < \text{Ar}$ の順であった。
- 非接触プラズマに持ってゆくには、当然のことながら多量のガスパフと中性ガス遮蔽・リサイクリング促進による周辺圧力の上昇が必要。

端損失イオンエネルギー分析器

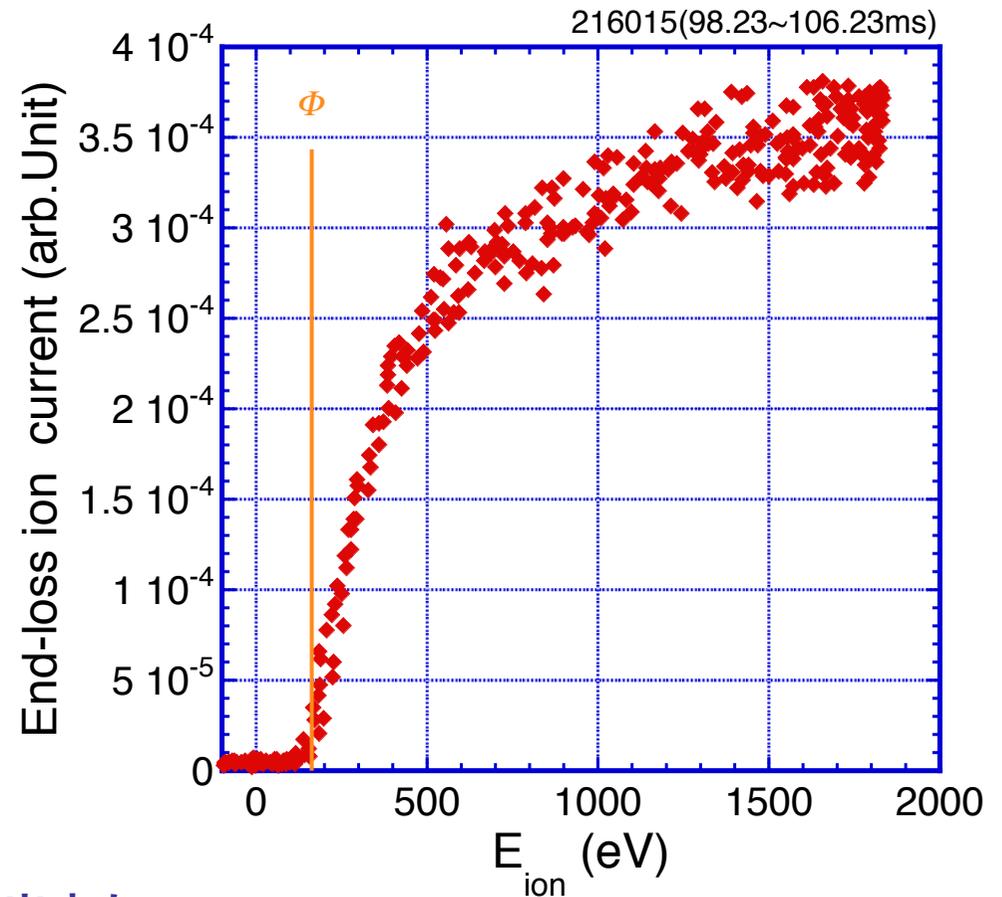
分析器(ELIEA)の概略図 (平成12年流石修論より)



ELIEAによるエネルギースペクトル

2010.9.25
K. Ichimura, Y. Nakashima

Energy Spectrum of End-loss ions



ガンマ10西エンド部に設置されている端損失イオンエネルギー分析器アレイを用い、プラズマの安定な時間帯で、イオンリペラー電圧を数回~10回sweepさせ、スペクトルを重ね合わせることで、比較的きれいなエネルギー分布を得ることが出来た。

ポスター講演：01P28, 市村 他「ダイバータ模擬、直接発電実験の為の端損失イオン流分析」

T_i// 導出プログラム

I ELI 1 file name: -I-End Loss Ion.txt
 V ELI file name: -V-End Loss Ion.txt
 I ELI 2 file name: -I-End Loss Ion2.txt
 Cache Folder: E:\experiment\GamViewCatch
 DMCC filename: -DMCC.txt
 NLCC filename: -NLCC.txt

Shot #: 216275
 start time (4ms step): 100
 TIME RANGE: (95.80~195.80ms)
 fitting para: 10
 fitting para2: 25
 skip point: 0
 time range (0.02ms step): 100
 MIDDLE TIME: 145.8
 port1/port2:

 data point: 5000
 forward point: 0

T eff 2: 352.696
 double fit 2 para: 128.999, 914.796, 1.10802E-6, 56.817
 Vmin: 230
 V max: 1600
 残差: 4.64778E-16
 T eff: 357.417
 double fit: 112.91, 679.218, 0.000198485, 0.000150811
 Vmin: 200
 V max: 1850
 plug offset: 1E-5
 x*y: 167.724
 7.58219
 V plug: 167.724
 残差: 7.01419E-10

DMCC:
 NLCC:
 Current Density Ie [mA]:
 I ELI 1:
 I ELI 2:
 V ELI:
 E:
 Spline fitting:
 2成分のイオン温度でfitting:

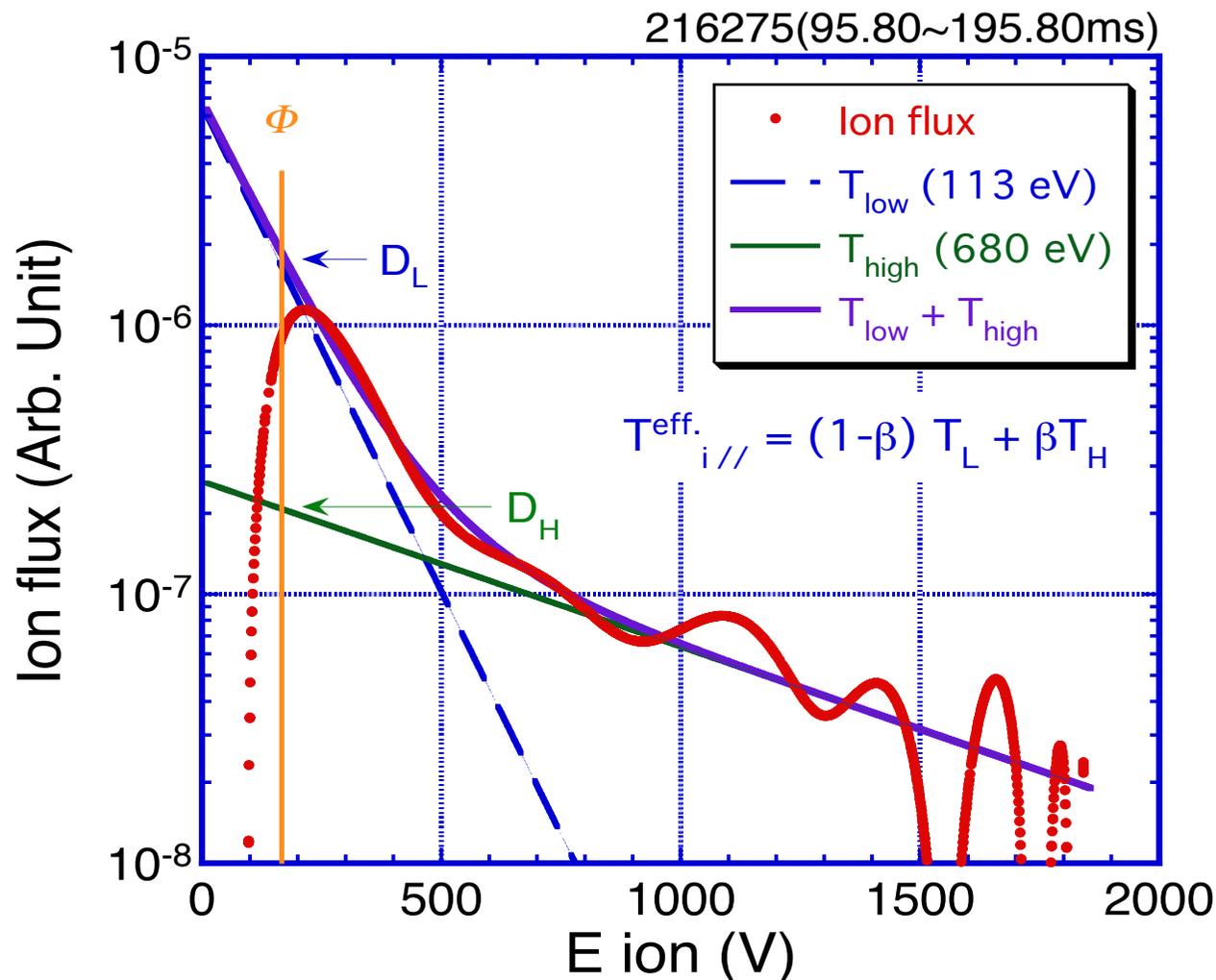
0.00033202
 313.508
 100.255
 177.459
 200
 1.34223E-6

エンドロスイオンのエネルギースペクトル

2010.9.25

K. Ichimura, Y. Nakashima

Energy Spectrum of End-loss Ions



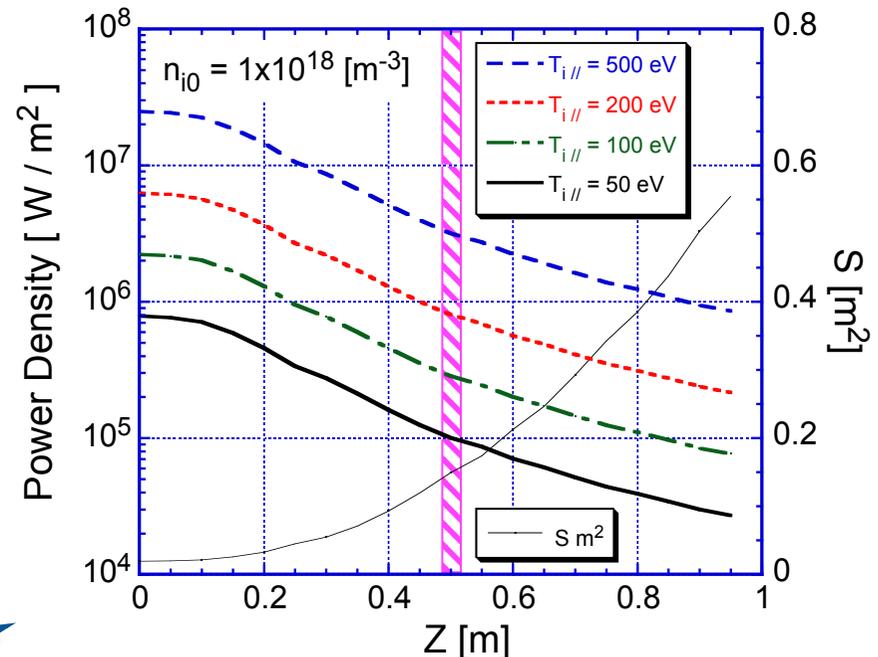
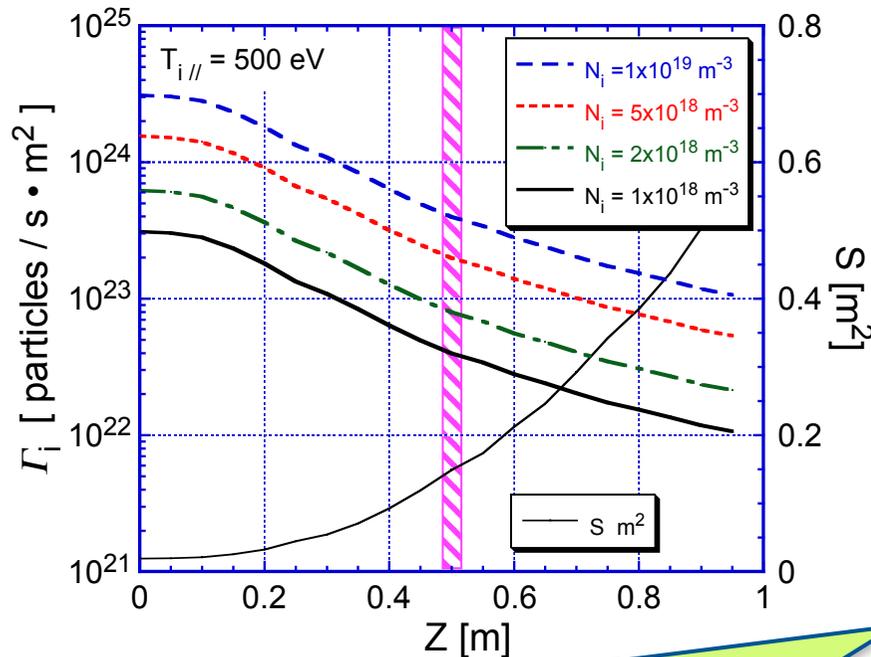
比較的高いパワーRFによる生成プラズマの場合、端損失イオンのエネルギー分布が2成分を形成していることが判明した。

得られたエネルギー分布を高温度と低温度成分にて、フィッティングすることにより、成分比を導出して実効的な端損失イオンの温度

$T_{i//}^{eff.}$
を求めた。

開放端磁場を活かした新研究(*E-Div.*)

エンド部熱流束・粒子束密度の見積



エンドミラー部に各種加熱系を併用することによりミラーズロート部において、密度： 10^{19} m^{-3} 台、温度：数100 eVのプラズマを生成出来れば、エンドミラー部下流 0.5m 付近で、

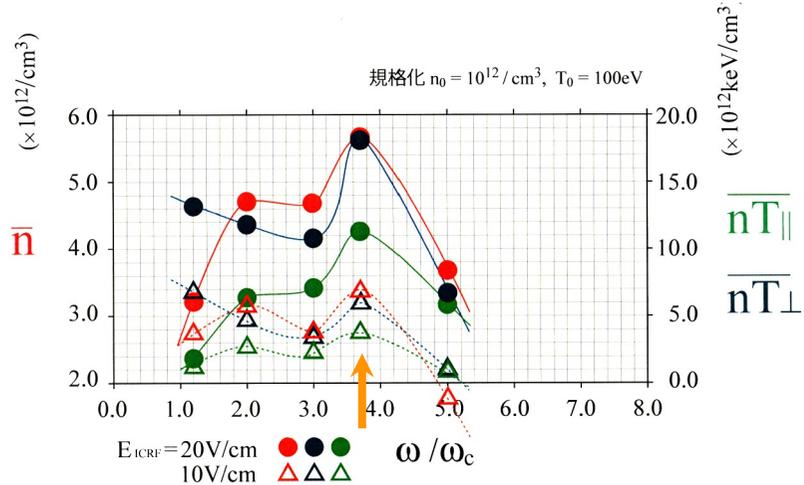
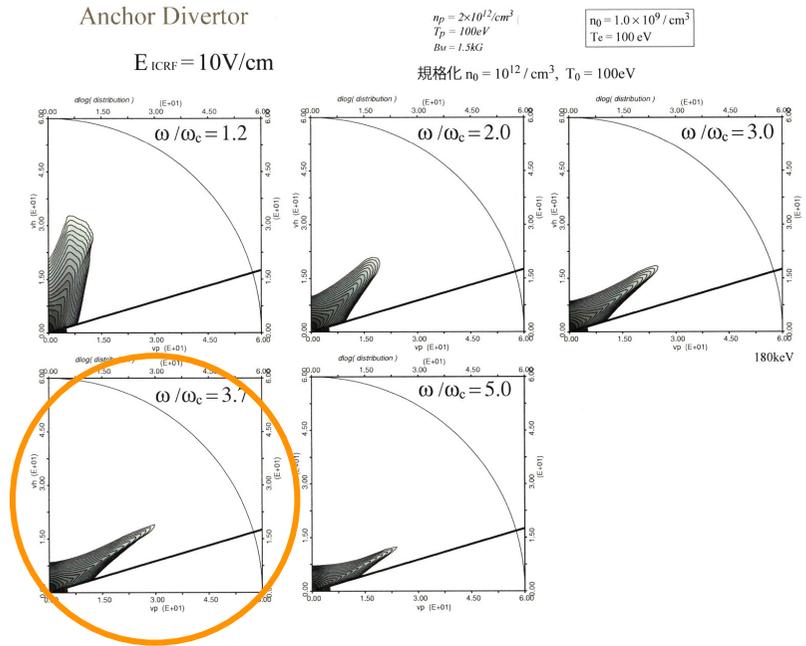
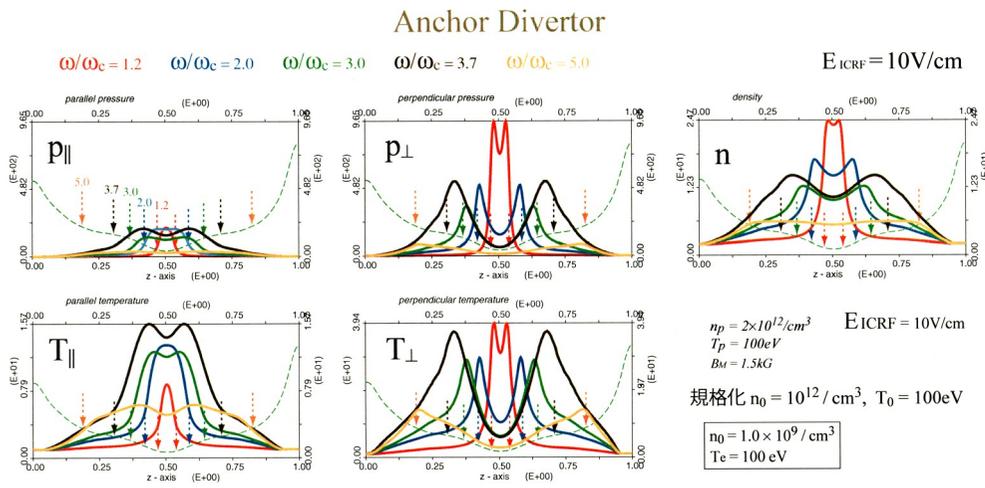
- **フラックス**： $\text{several} \times 10^{23 \sim 24} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$,
- **熱流密度**： $0.1 \sim \text{several} \times 10 \text{ MW m}^{-2}$ が期待できる。

新研究計画の準備状況

- 新装置の設計

- 2) 加熱設計 <A-Div. & E-Div.> 「I. Katanuma」

- 軌道平均フォッカープランクコード(mulreco)を用いたA-Div.におけるICRF共鳴位置の最適化



今回設計した磁場配位では、 $\omega/\omega_c = 3.7$ 近傍に加熱効率の良い領域が存在している。

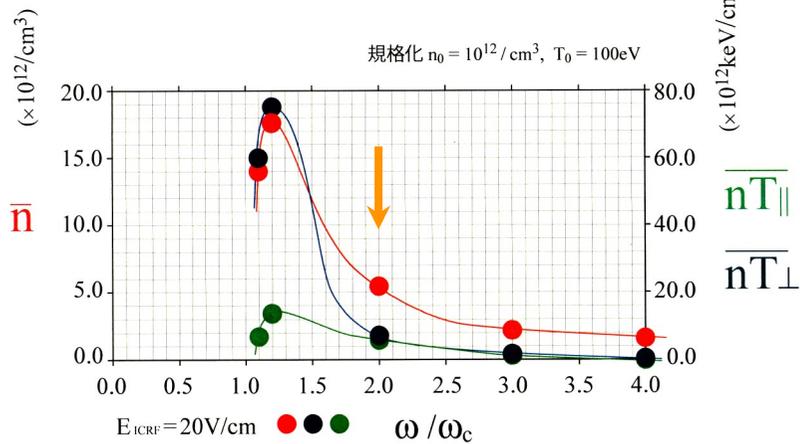
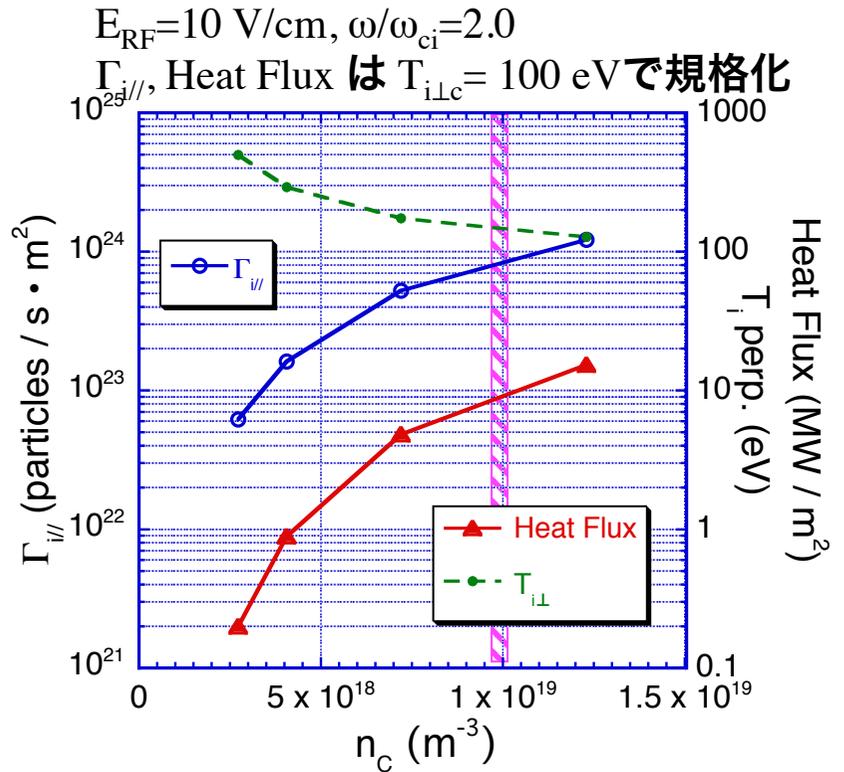
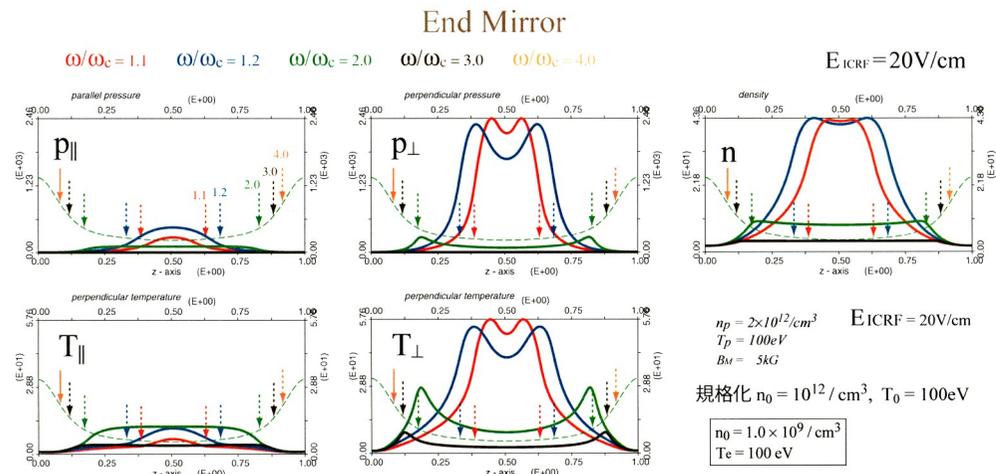
→ これに基づいてA-Div.部のアンテナ設計が進行中

新研究計画の準備状況

- 新装置の設計

- 2) 加熱設計 <A-Div. & E-Div.> 「I. Katanuma」

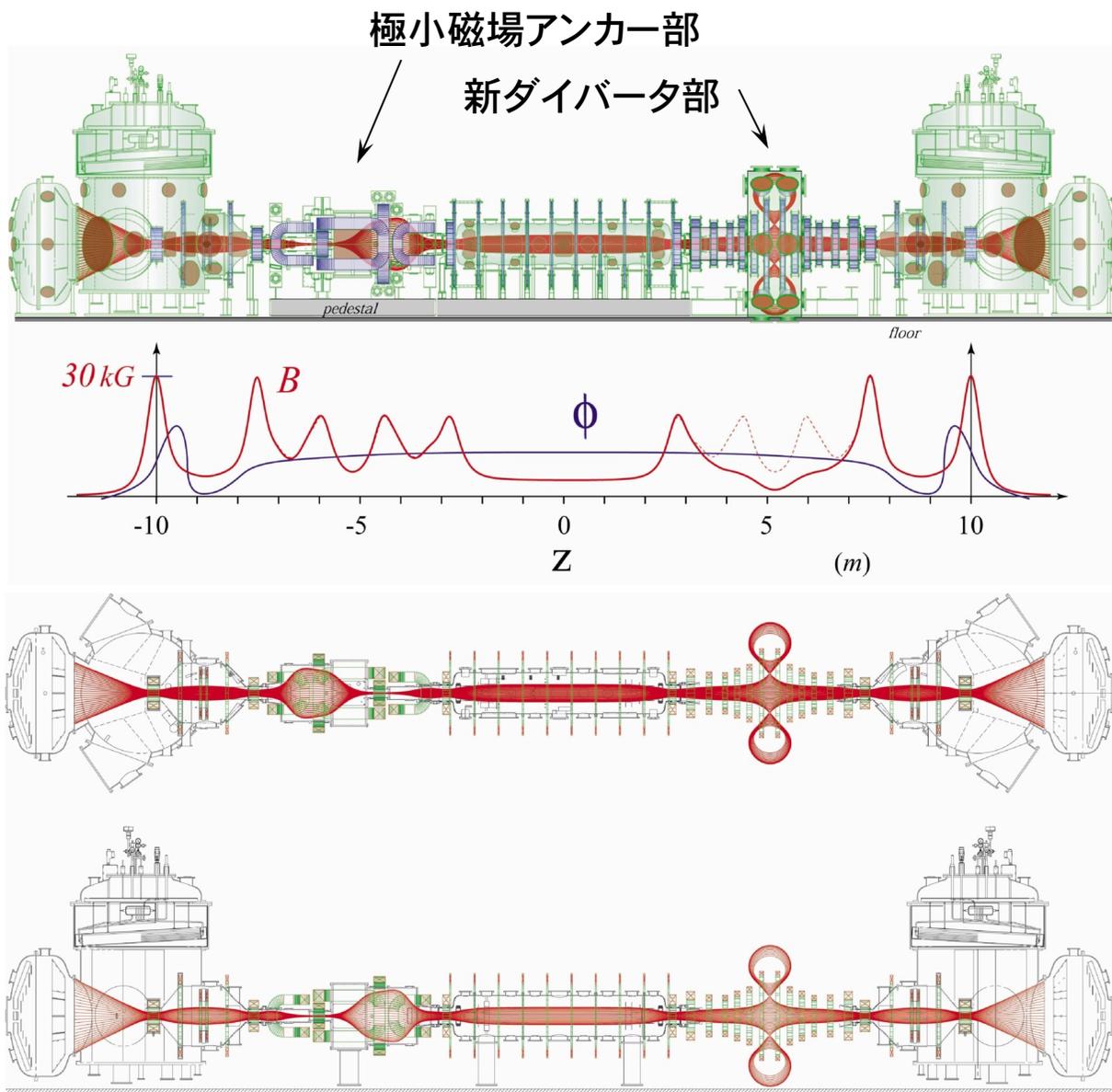
- mulrecoを用いたE-Div.におけるICRF共鳴位置の最適化、及びミラー端部熱流・粒子束強度の密度依存性



$\omega/\omega_c = 2.0$ 近傍におけるICRF加熱で、プラグ/バリア部に $10^{19}cm^{-3}$ のプラズマ生成することにより、端部粒子束密度 10^{24} 個/s · m²、熱流密度 $10MW/m^2$ に到達可能であることが判った。

開放端磁場を活かした新研究(A-Div.)

磁場配位の最適化設計



既存の電源設備が利用できる条件下にて、最適な磁場配位の設計が進行中

磁場最適化条件

- セパトトリックスの磁力線が壁に接しない
- ヌル点直下の軸上磁場強度が1kG以上
- 極小磁場部のプラズマ断面楕円度40以上
- 極小磁場部とエンドミラー部で再円形化

新研究計画の準備状況

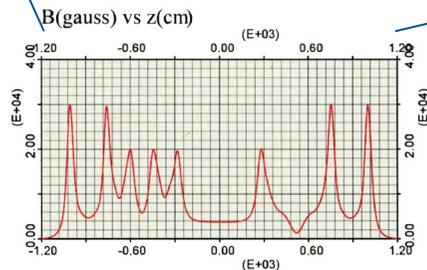
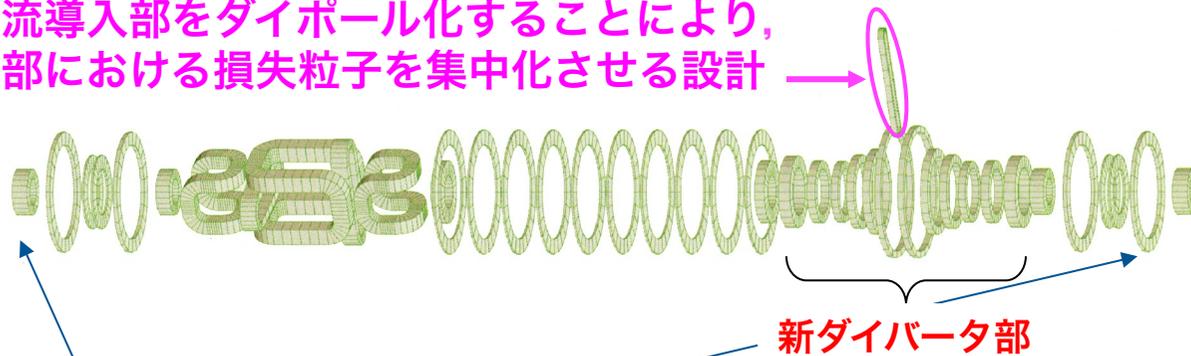
- 新装置の設計

- 1) 磁場設計 <A-Div.> 「I. Katanuma」

- ・ 既設電源設備との整合性（経済性）
- ・ セパトリックスが真空容器を横切らない（SOLの確保）
- ・ NULL点直下の磁場強度の確保（閉じ込めと加熱条件）
- ・ 片側アンカーでのプラズマのMHD安定化条件（プラズマ生成条件）
- ・ 磁束管の再円形化条件（プラズマ生成条件）

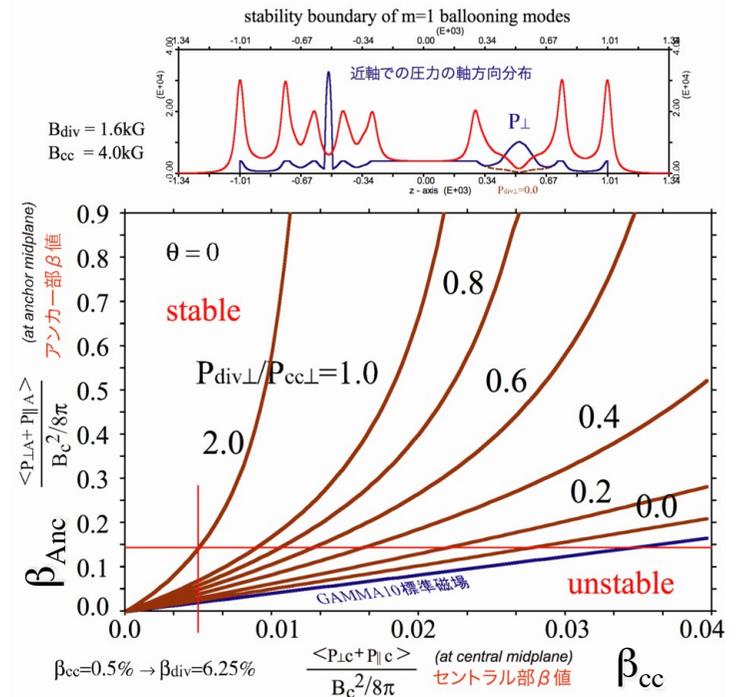
新ダイバータ部を含むコイル配置図

電流導入部をダイポール化することにより、同部における損失粒子を集中化させる設計



β_{cc} を0.5%程度に抑えることにより、ダイバータ部に6%程度のプラズマ生成が期待できることが分かった。

ダイバータ部捕捉プラズマ圧力/中央部圧力の比を一定にしたときの安定性境界



今後のスケジュール (tentative)

- 新装置の設計:
 - 磁場の最適化……………平成21年度末
 - コイルの設計……………平成22年度前半
 - 真空容器・排気系の設計……………平成22年度前半
 - 加熱系・計測系の設計……………平成22年度中
- 端部予備実験:
 - 熱流束粒子束の特性評価と最適化……………平成21~22年度
 - 端部プラズマの可視光計測……………平成21~22年度
 - 簡易試料導入装置と初期照射実験……………平成22年度~
- 新装置の製作……………平成23年度以降？