

# GAMMA 10/PDXにおける 最近の成果

筑波大学プラズマ研究センター

中嶋洋輔, ガンマ10/PDXグループ

## *CONTENTS*

1. はじめに (センターの現状と研究計画)
2. 筑波大PRCにおけるMWジャイロトロン開発の現状
3. ダイバータ模擬実験モジュールを用いた最近の実験結果
4. 双方向型共同研究に基づく最近の研究成果
5. まとめ

# 筑波大学プラズマ研究センターの現状と計画

## プラズマ研究センター第2期中期目標・中期計画 (平成22年度 - 27年度)の展開

筑波大学第2期中期目標・中期計画      筑波大学ホームページ参照

### ● 共同利用・共同研究等に関する具体的方策

「双方向型共同研究等の新しい取組を積極的に推進する。」

4つの全国共同利用・共同研究施設（26の学内共同教育研究施設）

（計算科学研究センター、下田臨海実験センター、遺伝子実験センター、  
**プラズマ研究センター**）

### ● 研究・技術・教育の3本柱

プラズマ物理学及びその応用に関する研究教育

#### 1. 「電位/電場によるプラズマの閉じ込め・輸送とダイバータ プラズマ模擬研究」

（数億度の高性能コアプラズマと常温壁の両立）

2. 関連機器開発等      （大電力ジャイロトロン開発）

3. 人材育成・教育

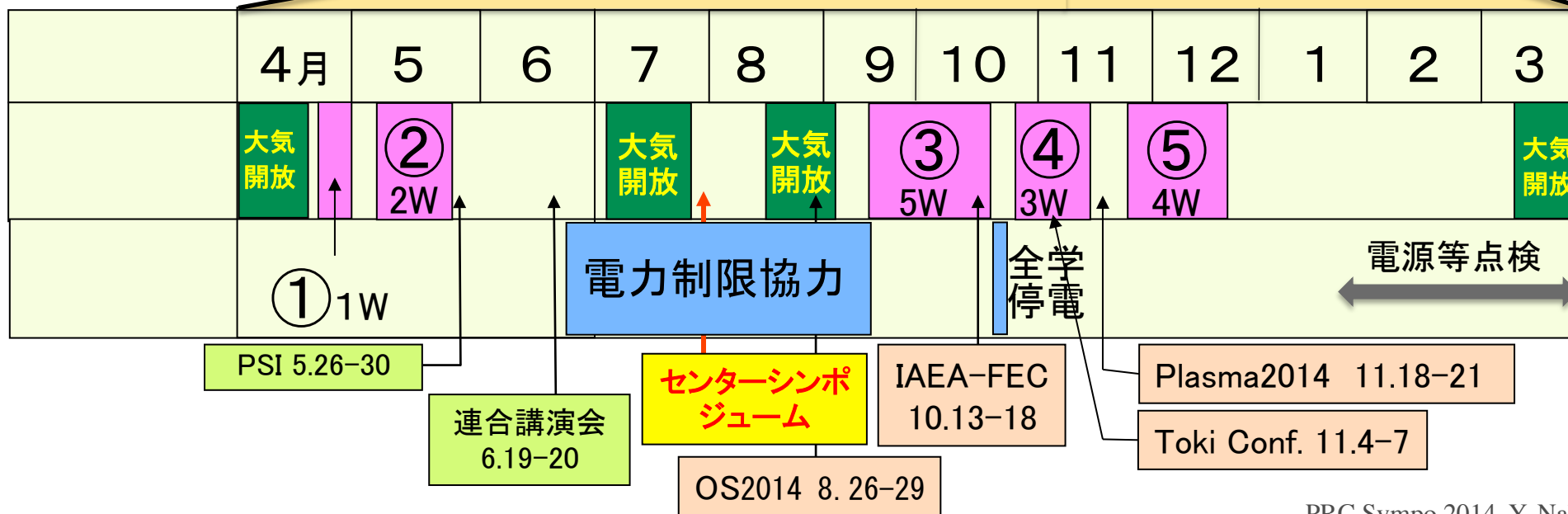
# センター中期計画と実験年間計画概要

ダイバータモジュールによる  
境界プラズマ研究の本格化と展開

## 第2期中期計画

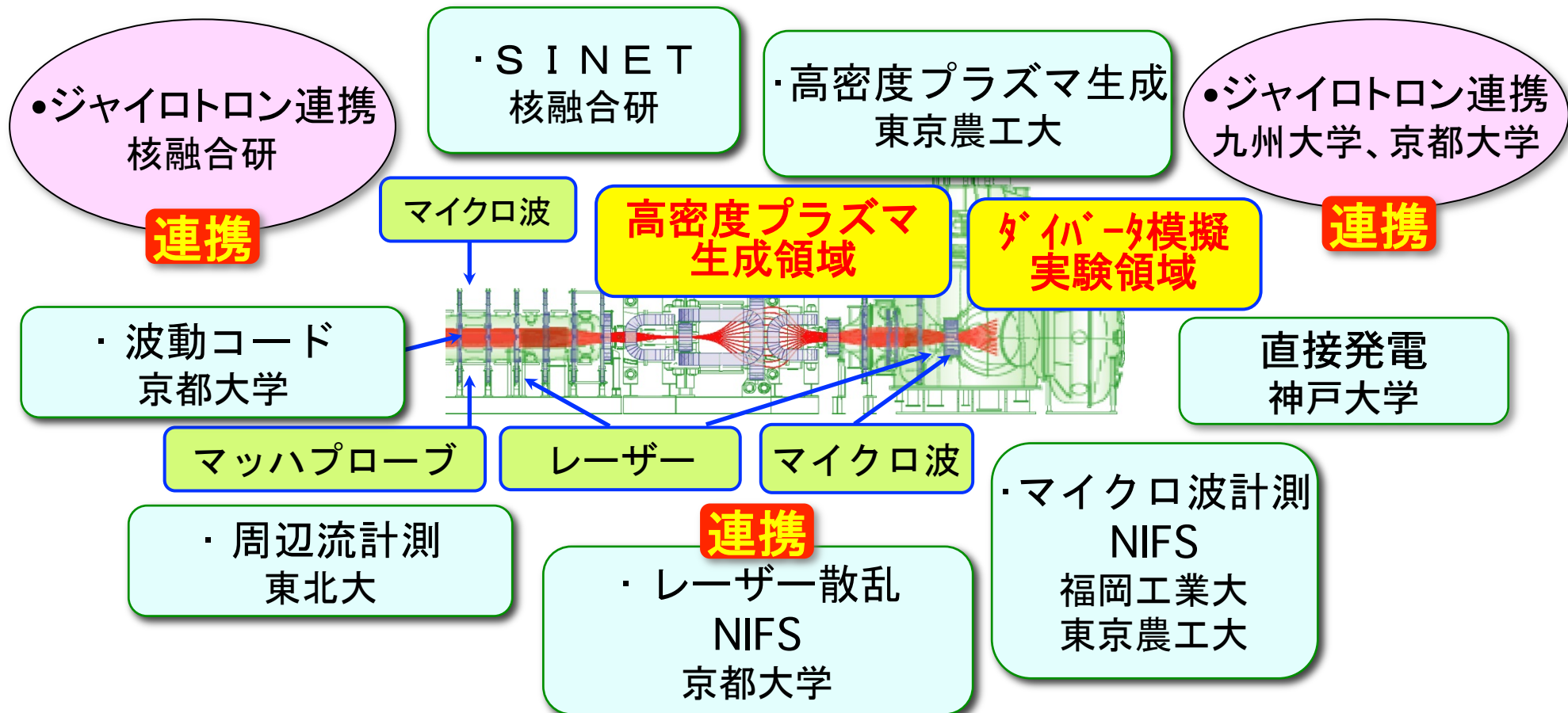
	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
電位によるプラズマ閉じ込め改善の物理解明			<ul style="list-style-type: none"> <li>境界プラズマ（ダイバータ）研究</li> <li>電位/電場による輸送制御</li> <li>加熱/計測開発（ジャイロトロン開発等）</li> </ul>						直線型装置を利用したプラズマ壁相互作用研究の推進	

## H26年度計画案



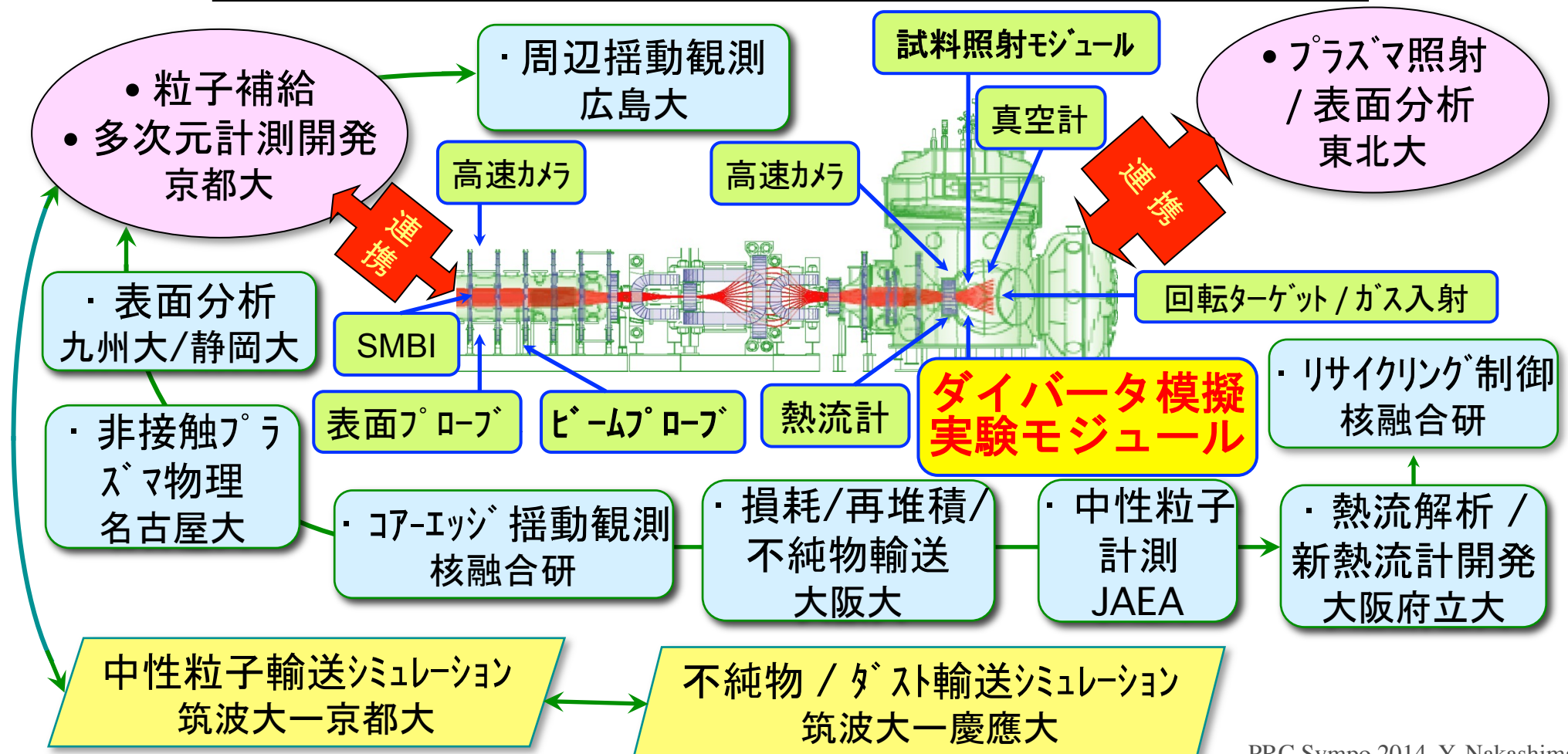
# ジャイロトロン連携研究、及び 計測、基礎、基盤的双方向共同研究の展開

- 高密度プラズマ生成
- 多次元計測（マイクロ波、レーザー）
- ダーダ模拟実験に向けたプラズマ制御
- 直接発電基礎研究
- 波動コード



# 境界プラズマ制御を目指した周辺プラズマ &PWI研究の展開

- 高熱流粒子束制御、
- 材料へのプラズマ照射
- 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



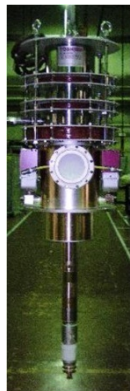
# 筑波大PRCにおける MWジャイロトロン開発の現状

筑波大PRCにおける  
MWジャイロトロン開発の現状

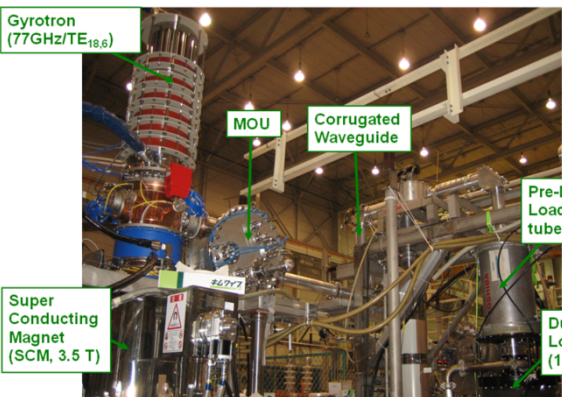
# MW Gyrotron開発研究

- 14 ~ 300 GHz 広周波数領域で開発 -

28GHz for  
GAMMA10




77GHz for LHD



Labels in image: Gyrotron (77GHz/TE<sub>18,6</sub>), MOU, Corrugated Waveguide, Pre-Dummy Load (Teflon tube), Super Conducting Magnet (SCM, 3.5 T), Dummy Load (1 MW/CW)

JAEAと協力  
TETD(東芝)の協力

NIFSと共同研究

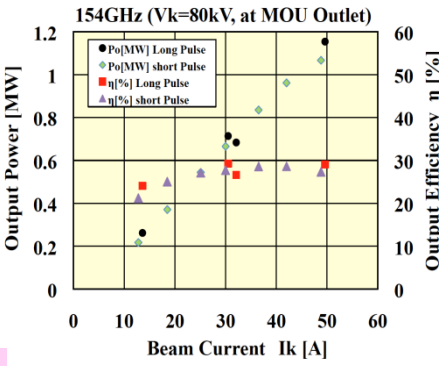


LHD

77GHz (秒レベル)  
1.5-1.8 MW達成 (世界最高出力)  
LHDへ4.6MW入射

高密度プラズマECH  
154GHz開発進展

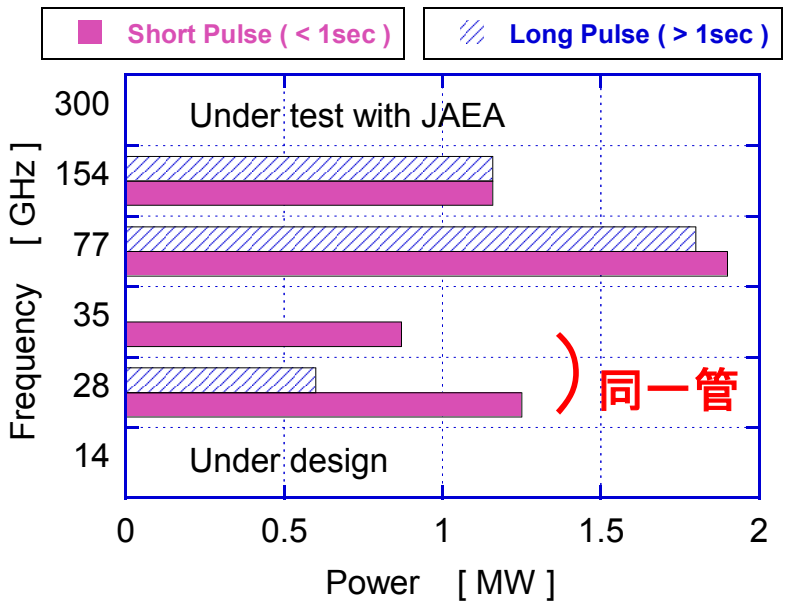
- 1.16 MW/1秒 発振成功
- LHDへ入射
- 計4.6 MW入射 (ECHのみ)



154GHz (Vk=80kV, at MOU Outlet)

Legend: ● Po[MW] Long Pulse, ○ Po[MW] short Pulse, ■ η[%] Long Pulse, ▲ η[%] short Pulse

双方向型共同研究を活用



**G-10用28 GHz管**

1.25 MW (数ms)  
0.6MW 2秒 発振

2 MW設計進展  
改造管試験



QUEST/ Hel.-J / G-10/PDX

QUESTでの双方向連携研究  
による実験開始



# 28 GHz管開発研究

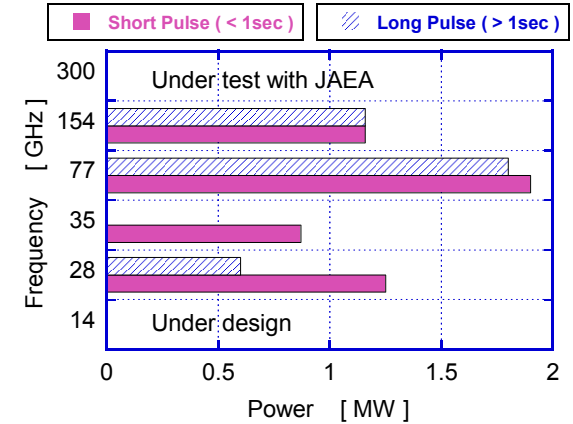
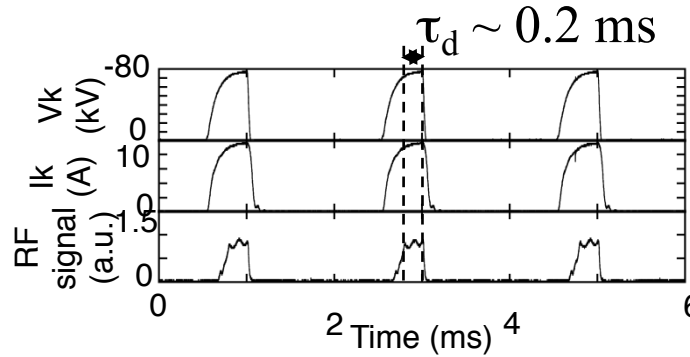
短パルス繰り返し運転 (ELM模擬)

G-10用28 GHz管

1.25 MW (数ms)

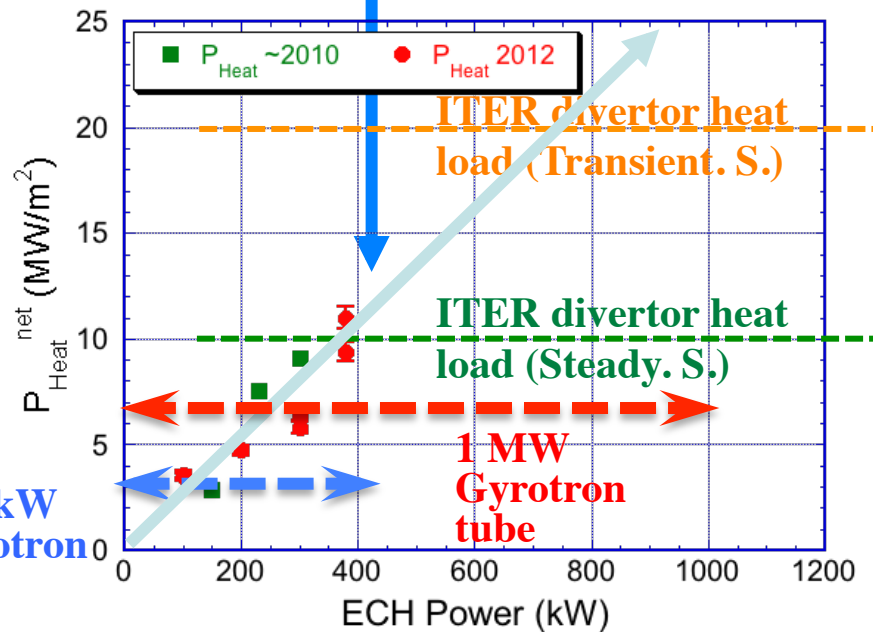
0.6MW 2秒 発振

2 MW設計進展  
改造管試験



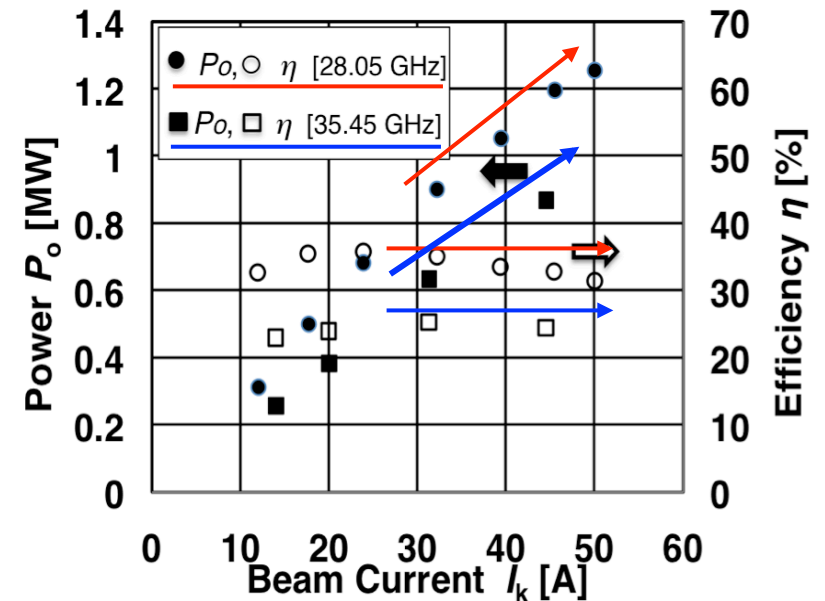
Heat flux densityの増大

Present ECH power limit



## 2周波数発振

効率30%前後で28GHzと35GHzの2周波数で1MWオーダーの発振を確認

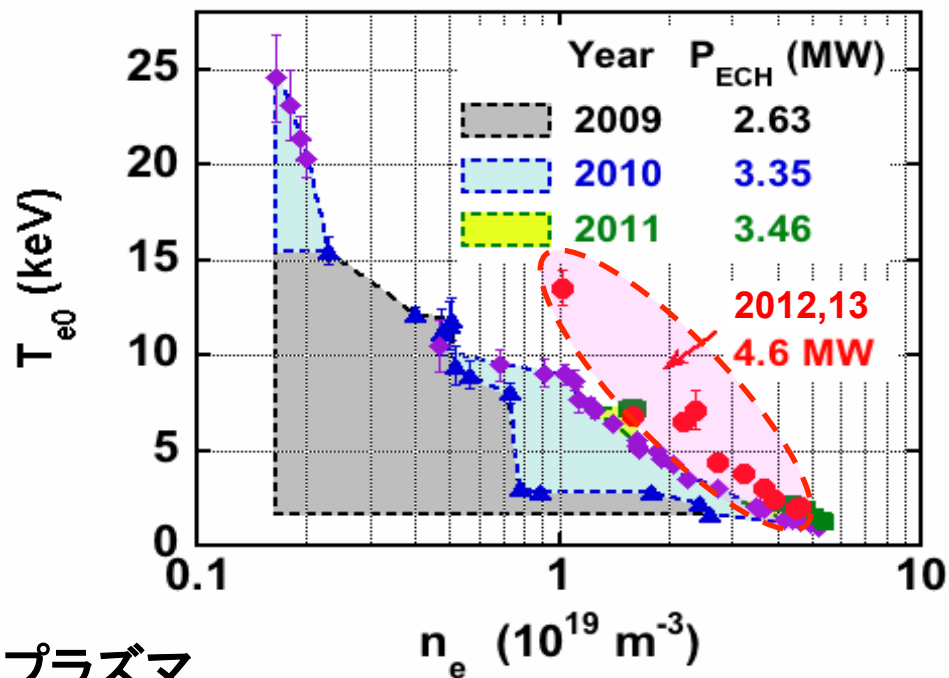




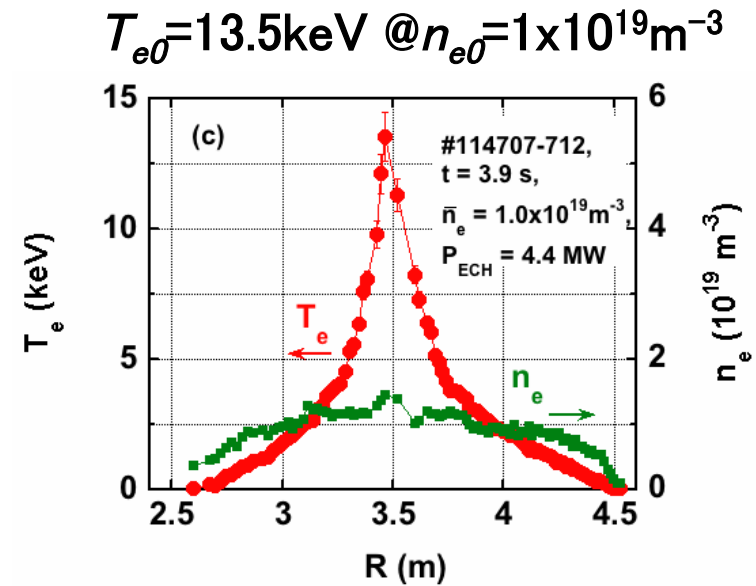
# 77GHz, 154GHz入射による高密度領域での高温度化

77GHz, 154GHzの高パワー入射により、高密度領域で高電子温度化が進められた

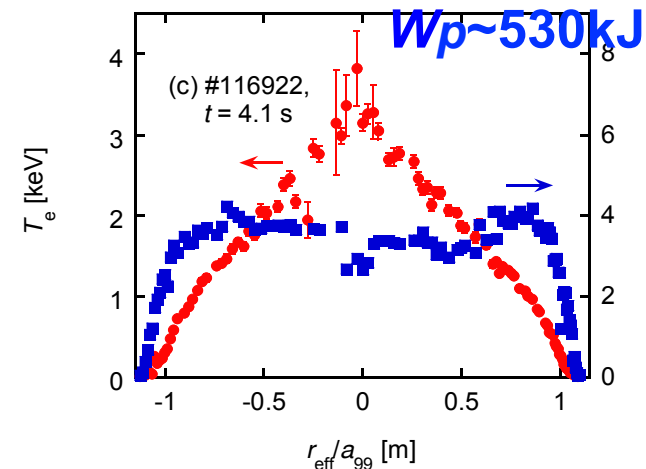
- 密度  $0.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  以下  $\rightarrow T_{e0} > 20 \text{keV}$
  - 密度  $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \rightarrow T_{e0} \sim 13.5 \text{keV}$
  - 密度  $3.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \rightarrow T_{e0} \sim 3.5 \text{keV}$
- ECHパワー4.4MW入射のみで、蓄積エネルギーは約530kJを達成



ECR プラズマ



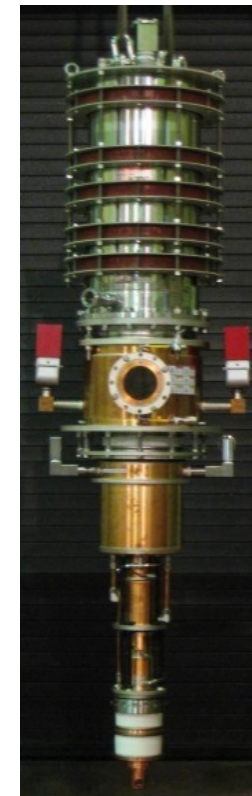
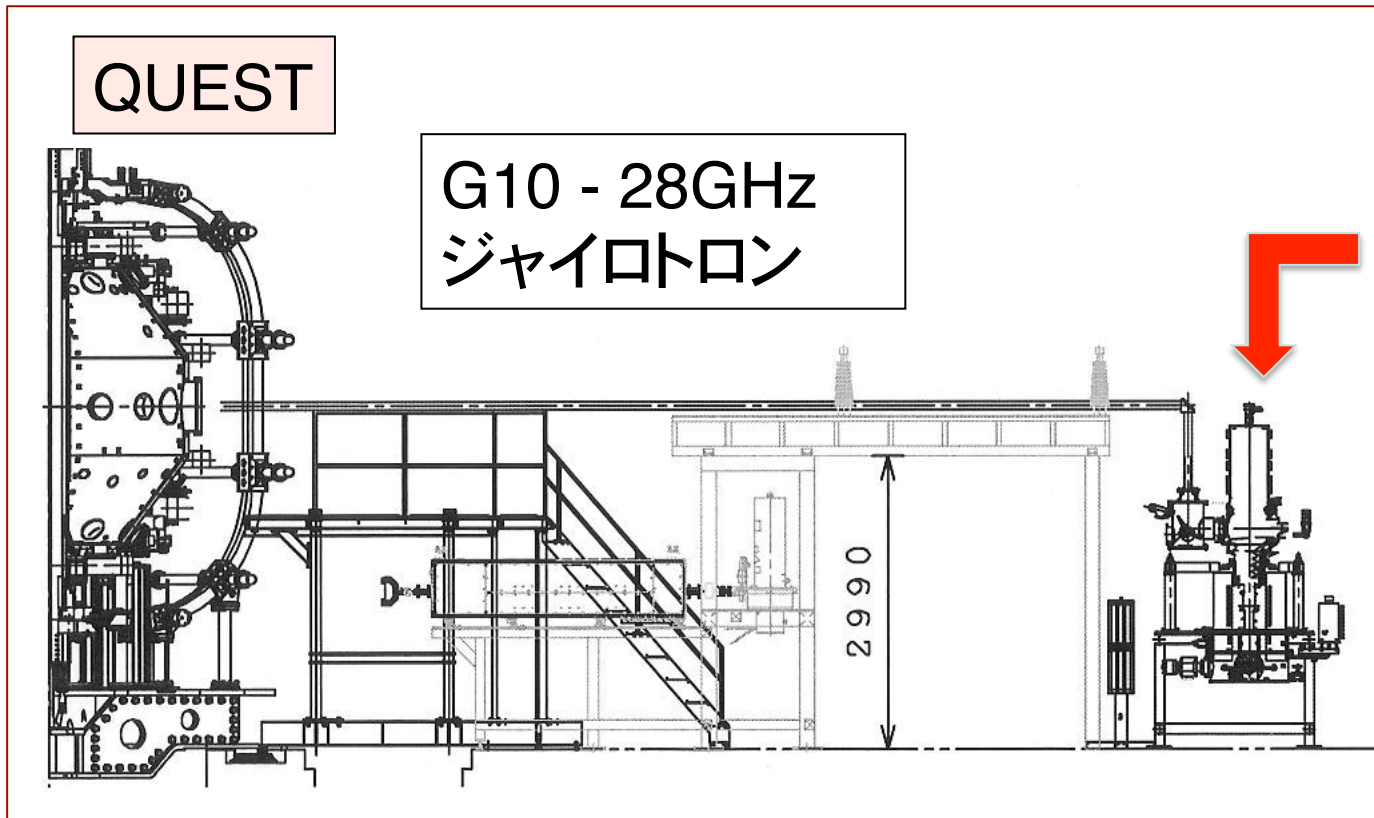
$T_{e0} = 3.5 \text{keV} @ n_{e0} = 3.3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$



# 九州大学QUESTへの筑波大28GHzジャイロトロン

導入 - 双方向型共同研究センター間連携研究による実験開始 -

Further CD by 2<sup>nd</sup> Harmonic 28 GHz Off-axis ECCD

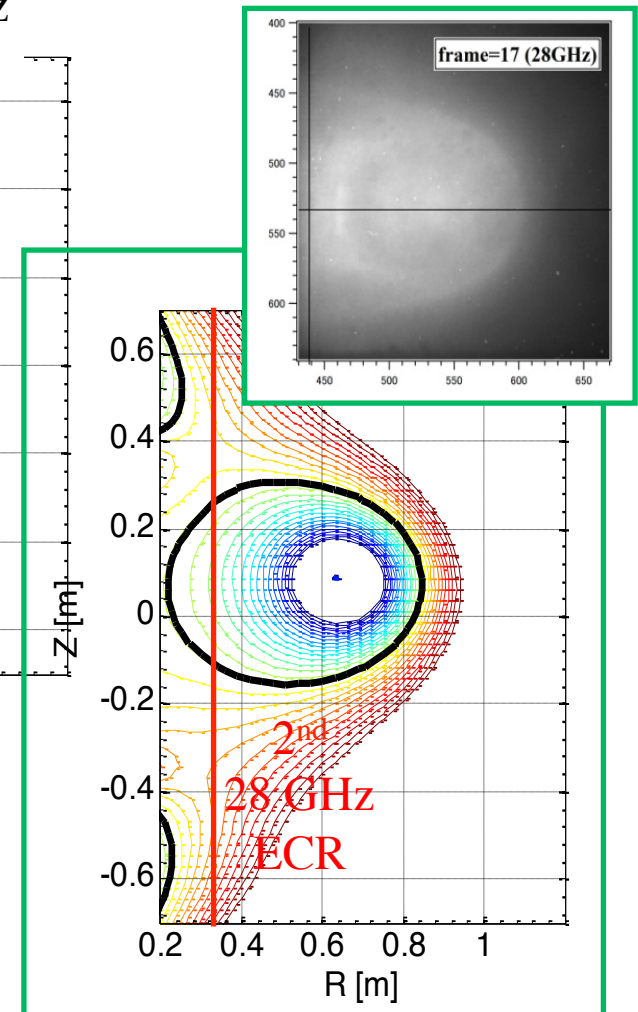
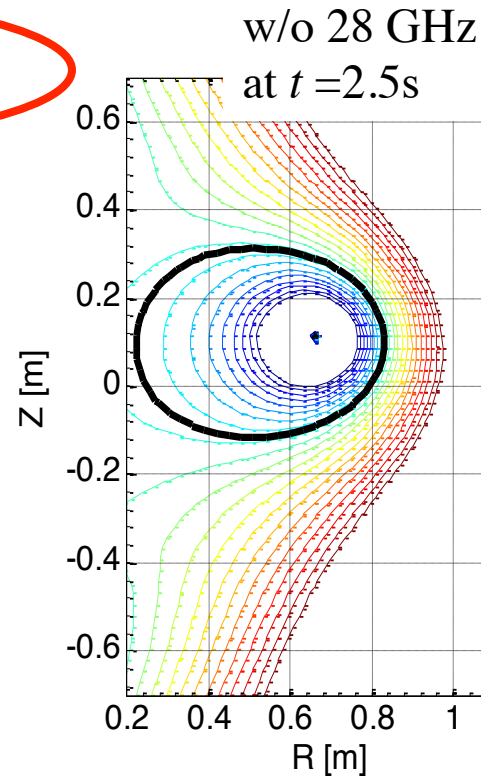
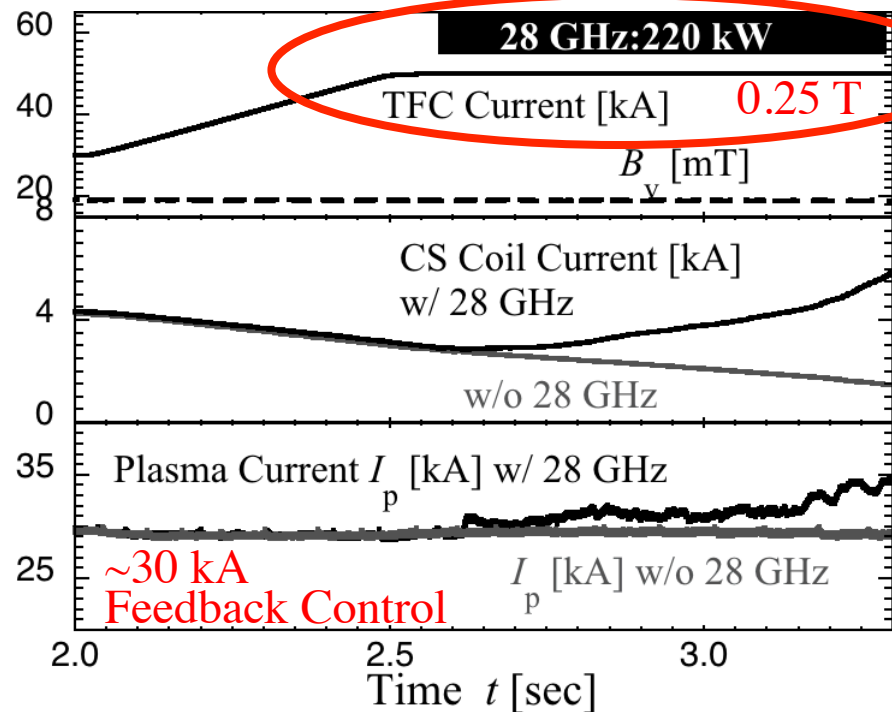


# 九州大学QUESTへの筑波大28GHzジャイロトロン

導入 - 双方向型共同研究センター間連携研究による実験開始 -

## Further CD by 2<sup>nd</sup> Harmonic 28 GHz Off-axis ECCD

w/ 28 GHz  
at  $t = 3.3$  s



- Recharging phenomena in the CS coil power supply were clearly observed.
- The plasma current was fully driven only by the 2<sup>nd</sup> harmonic off-axis 28GHz injection.

# ダイバータ模擬実験モジュールを用いた 最近の実験結果

ダイバータ模擬実験モジュールを用いた  
最近の実験結果

# GAMMA 10/PDX 及びE-Divertorの目標性能

## GAMMA 10 Device

Total length 27 m

$B_{max}$ : 3 Tesla

ICRF: 300 kW × 4

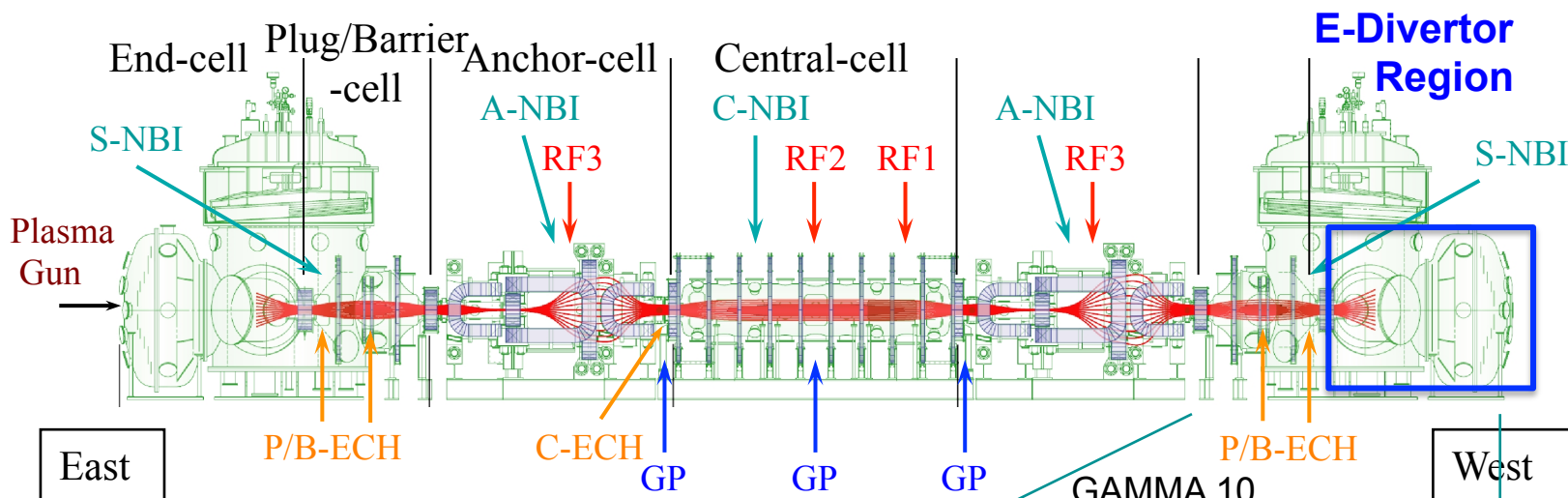
ECH: 400 kW × 3  
200 kW × 2

NBI: 1.5 MW × 4  
2.7 MW × 2

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

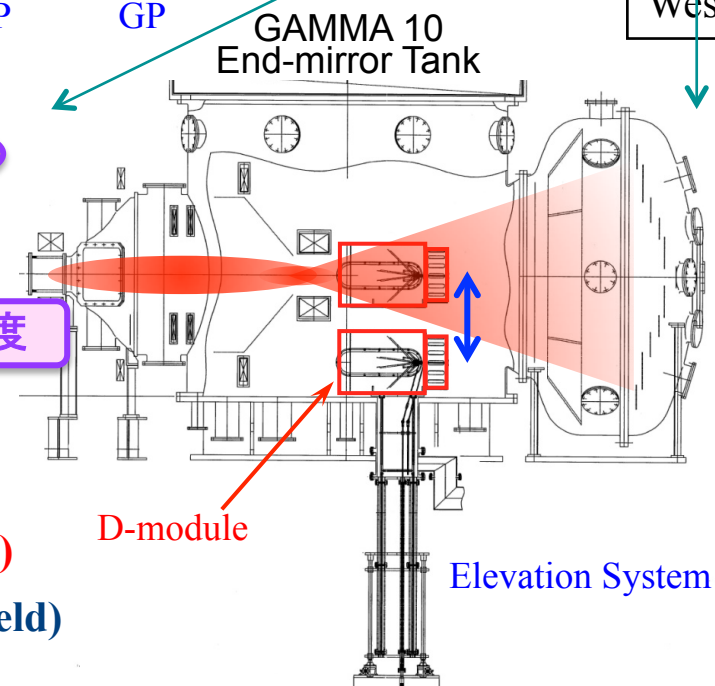
$T_i$ :  $\sim 10 \text{ keV}$

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



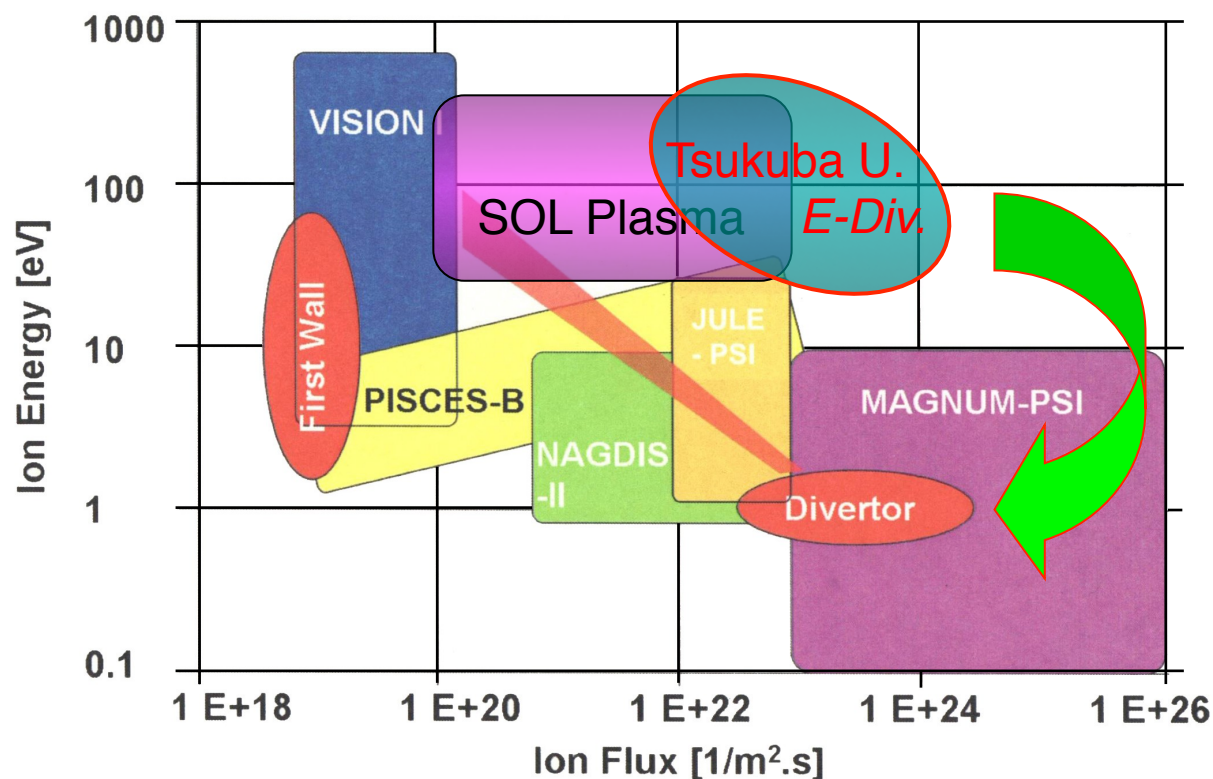
## E-Divertor parameters (already achieved)

- Plasma diameter : 0.1 ~ 0.3 (1.0) m $\phi$  ← 大口径プラズマ
- Plasma density :  $\sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$  2 ~  $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
- 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 :  $10^{22} \sim 10^{24} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$   $\sim 1.4 \times 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Heat flux density : 0.1 ~ 20 MW/m $^2$   $\sim 11 \text{ MW/m}^2$  (with ECH)
- Plasma duration : 0.4 sec. ~ 4 sec. (10 sec. with low magnetic field)
- Fluence :  $10^{23} \sim 10^{25} \text{ m}^{-2} / \text{day}$ ,  $\sim 10^{26} \text{ m}^{-2} / \text{week}$



# E-Divertorのパラメータと物理目標

Ion Energy vs Ion Flux Density



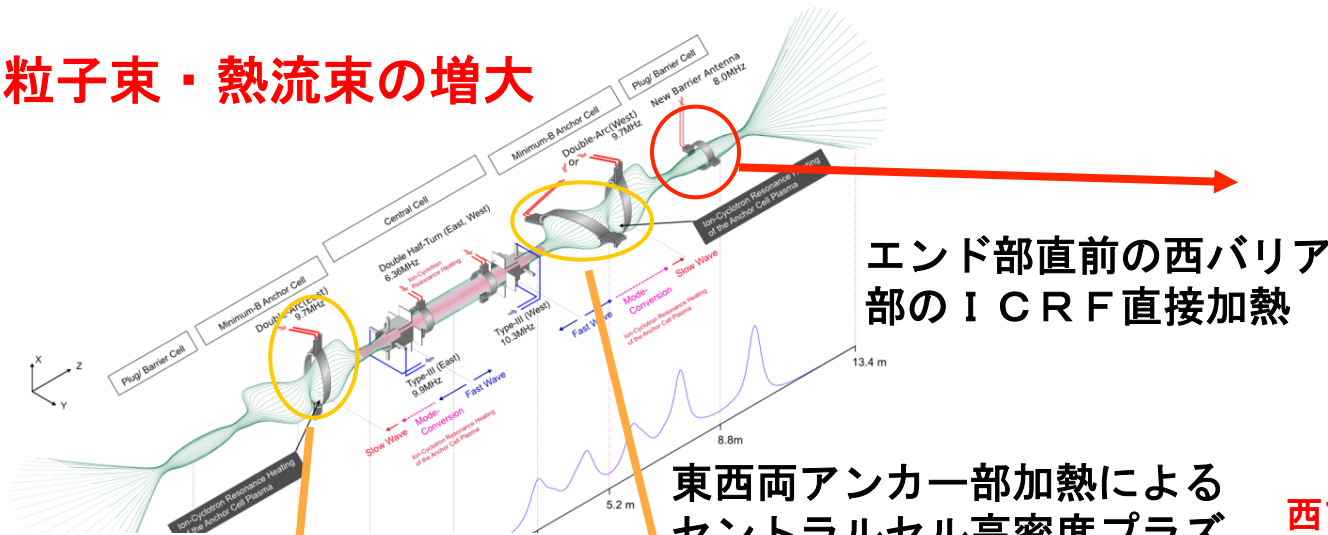
- タンデムミラー端部で生成されるイオンのエネルギーは、**トカマクのSOLプラズマ**に匹敵する程度に高い。
- ミラー端部では、比較的高い磁場強度を発生している。(0.15 ~ 1.5 Tesla)
- エンド部において、ガス導入、リサイクリング促進を図ることにより、**放射冷却**についての機構を解明し、**非接触プラズマ実現**とその特性評価を行う。

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。

# ダイバータ模擬実験

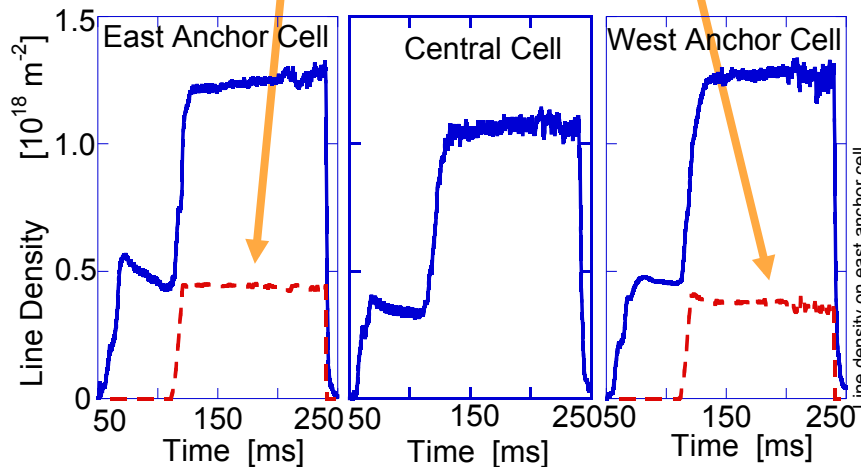
- ICRFによる端損失イオンの生成・制御 -

## 粒子束・熱流束の増大

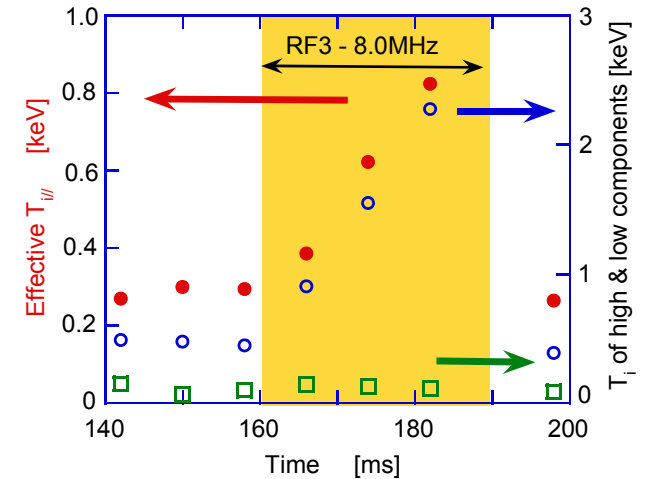
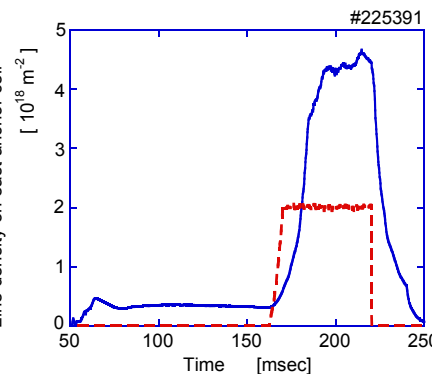


エンド部直前の西バリア部の ICRF 直接加熱

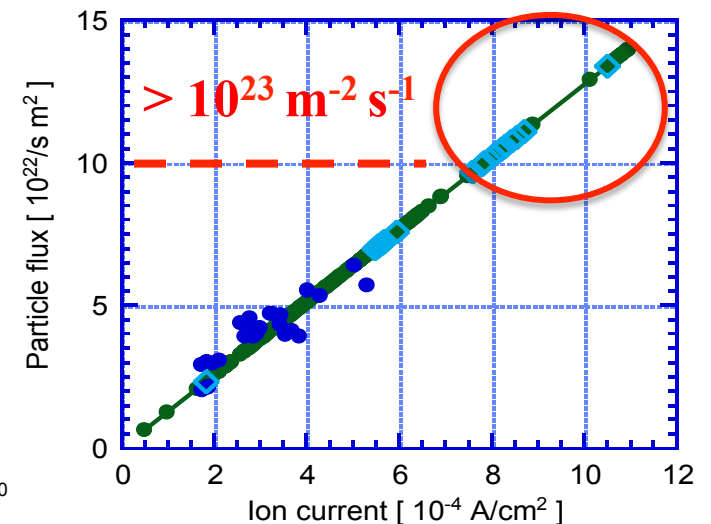
東西両アンカー部加熱による  
セントラルセル高密度プラズマ生成  
~  $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$



アンカー部における  
高密度プラズマ生成  
>  $10^{19} \text{ m}^{-3}$

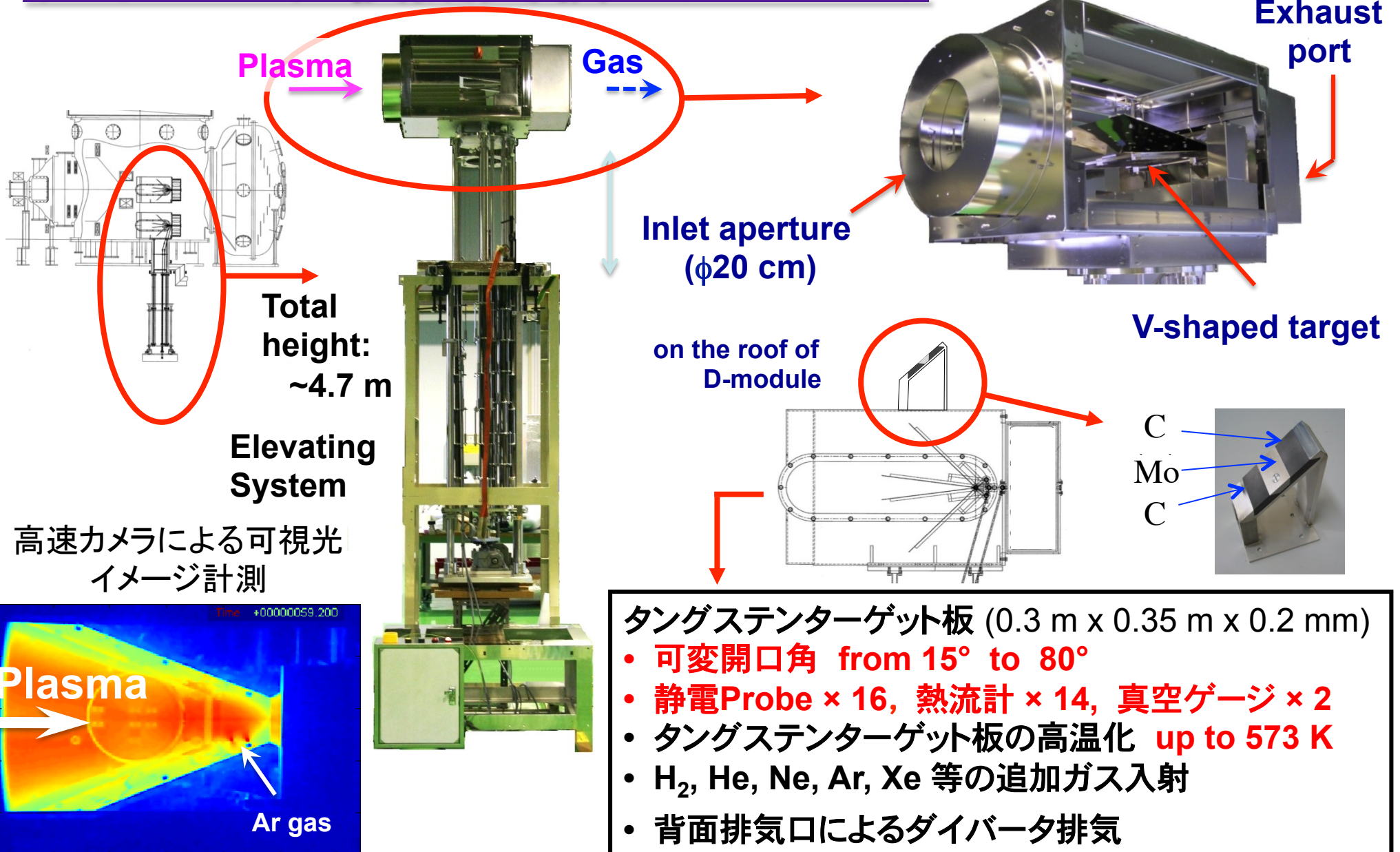


西アンカー部アンテナを用いた予備実験  
西バリア部の共鳴に周波数を合わせた  
ICRF加熱でイオン温度上昇の確認



# ダイバータ模擬実験モジュール

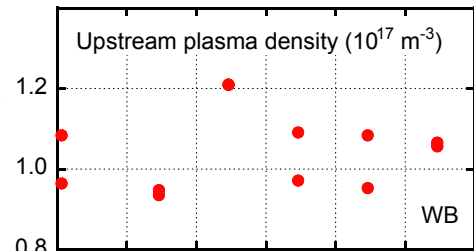
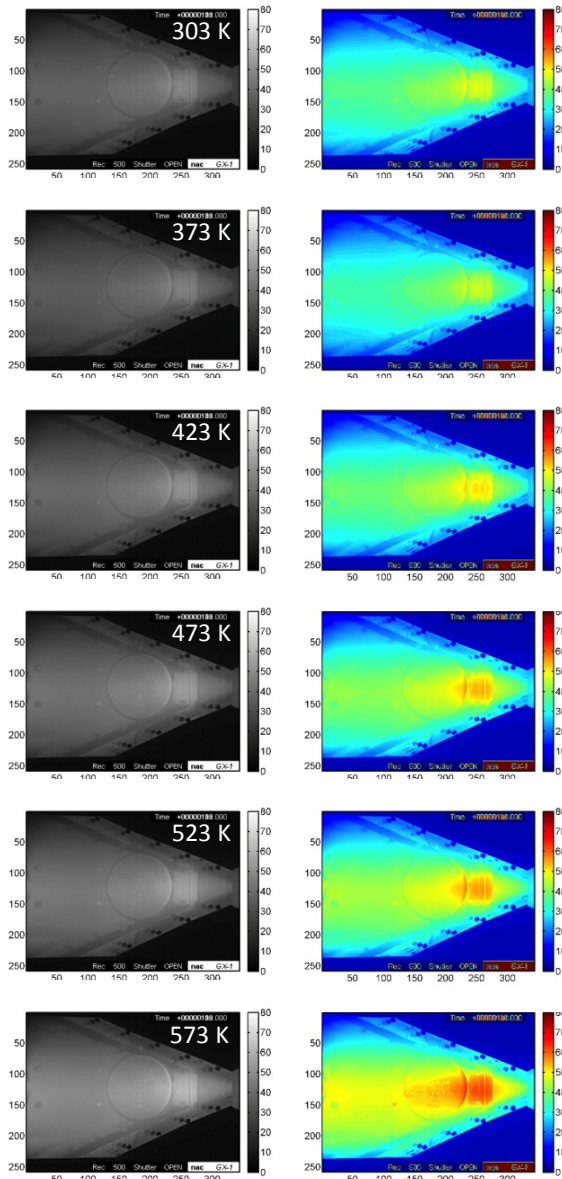
D-module





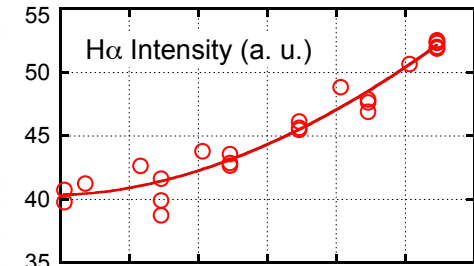
# ダイバータ模擬実験

## - 水素リサイクリングの壁温度依存性 -



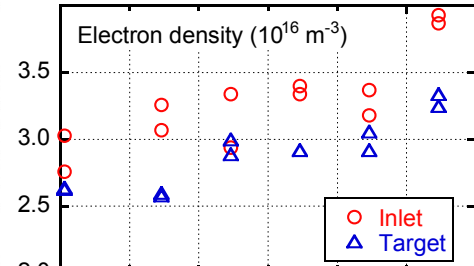
水素リサイクリングの増大

上流密度



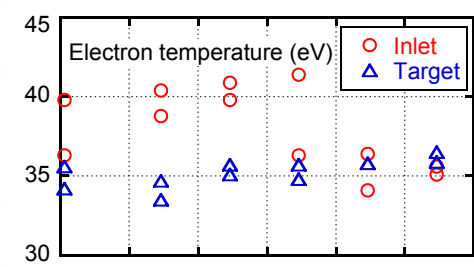
H $\alpha$  intensity

30%  $\uparrow$   
(60%  $\uparrow$   
by 分光計測)



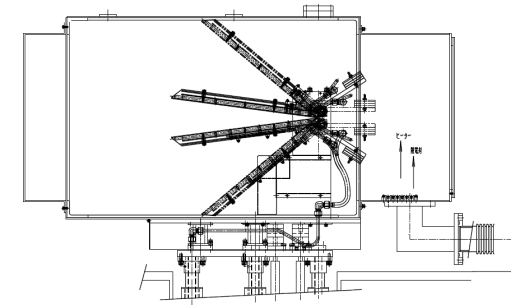
電子密度

25%  $\uparrow$

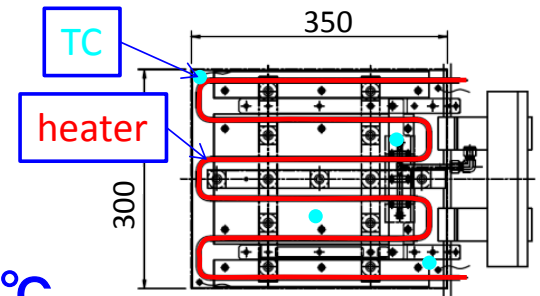


電子温度

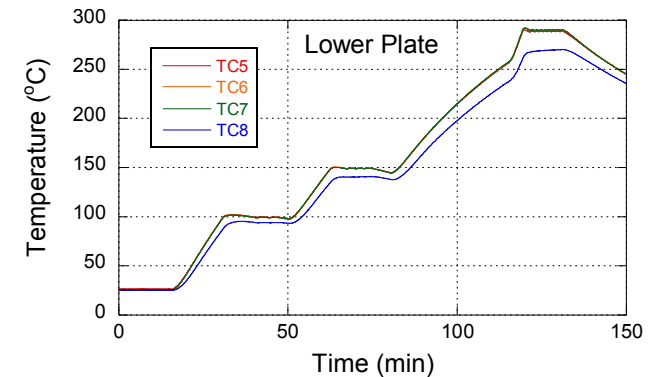
ターゲット板温度



ターゲット板高温化

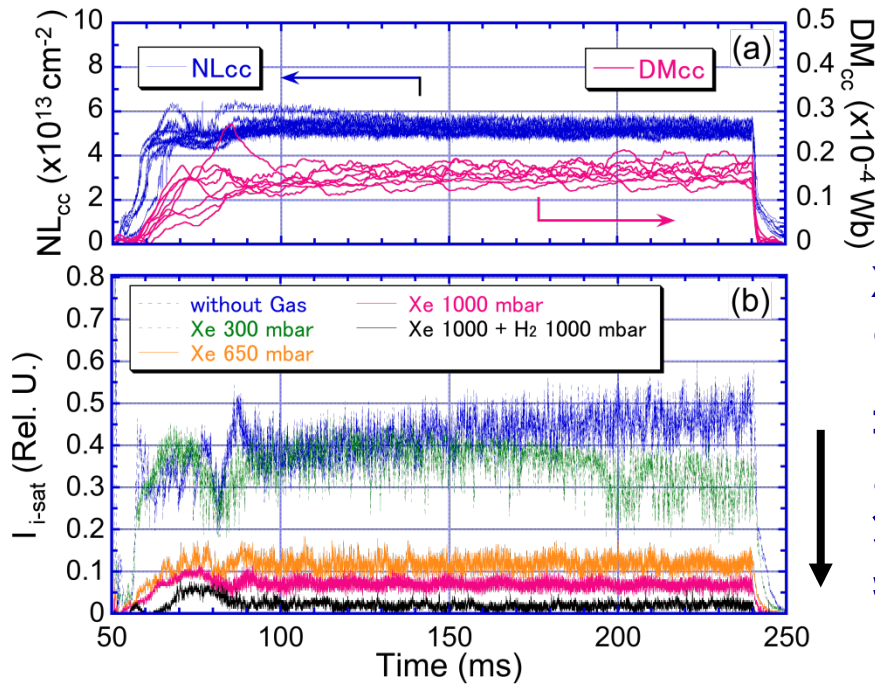


< 300°C



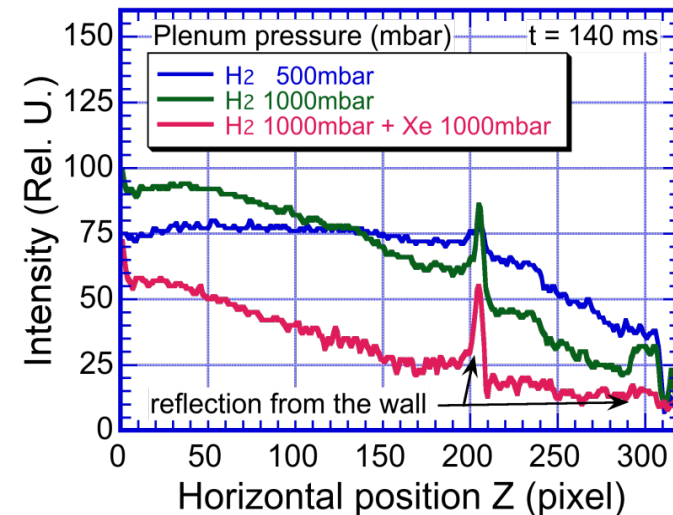
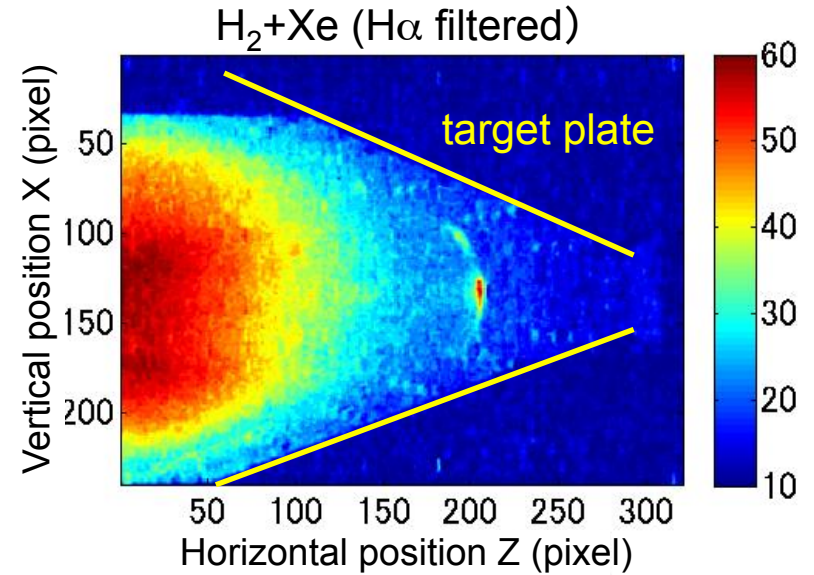
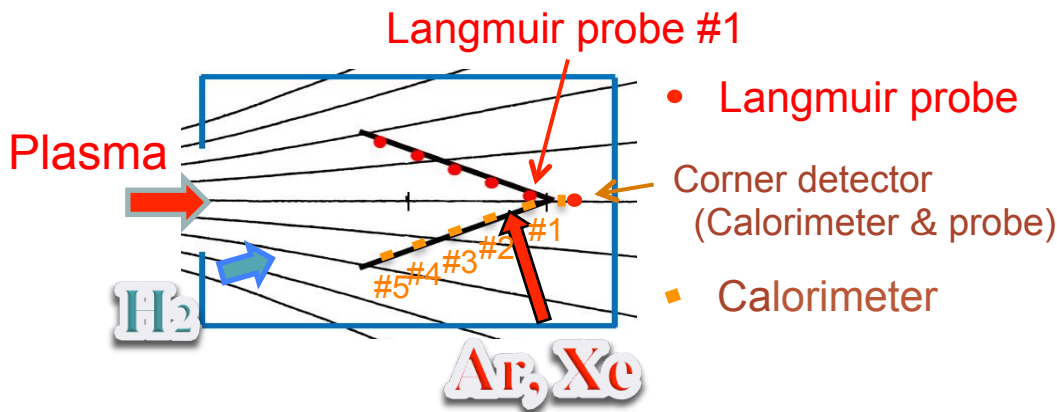
# ダイバータ模擬実験 - 非接触化 (Ar, Xe + 水素ガス入射) -

上流側プラズマ(セントラルセル)のプラズマパラメータとターゲットコーナー部のイオン束の時間変化 高速カメラによるD-module内H $\alpha$ 発光の二次元イメージ



Xeガス圧力の上昇

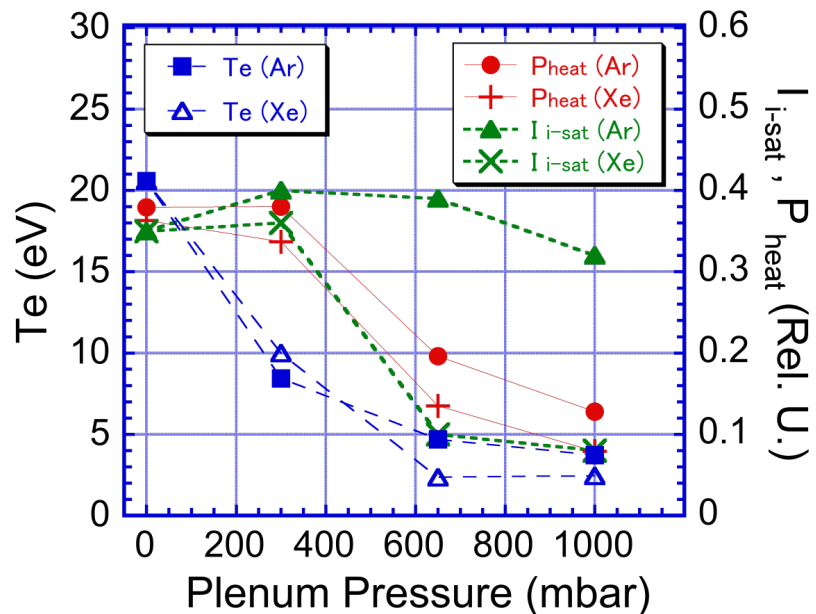
コーナーにおけるイオン飽和電流の顕著な減少 (< 3%)



# ダイバータ模擬実験

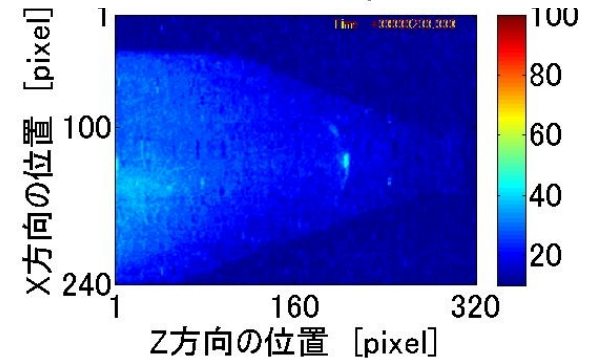
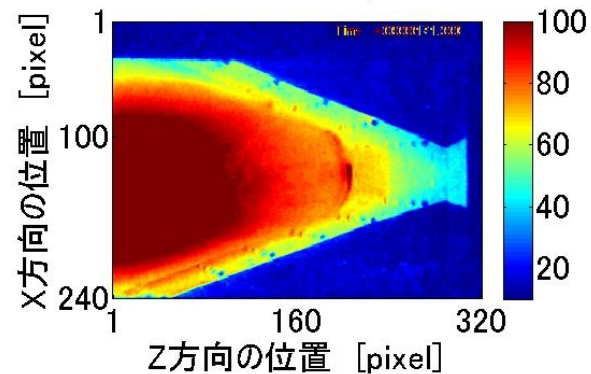
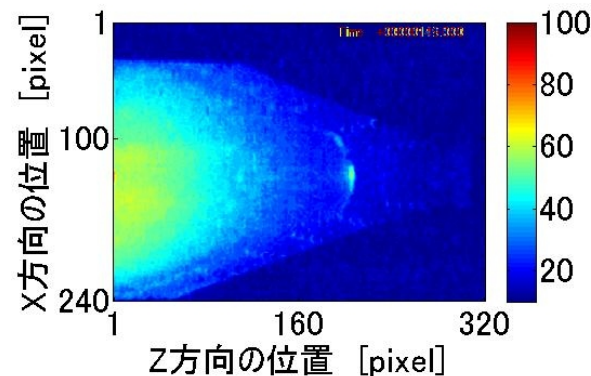
## - 非接触プラズマの特性評価 -

D-module内プラズマパラメータの導入ガス量依存性

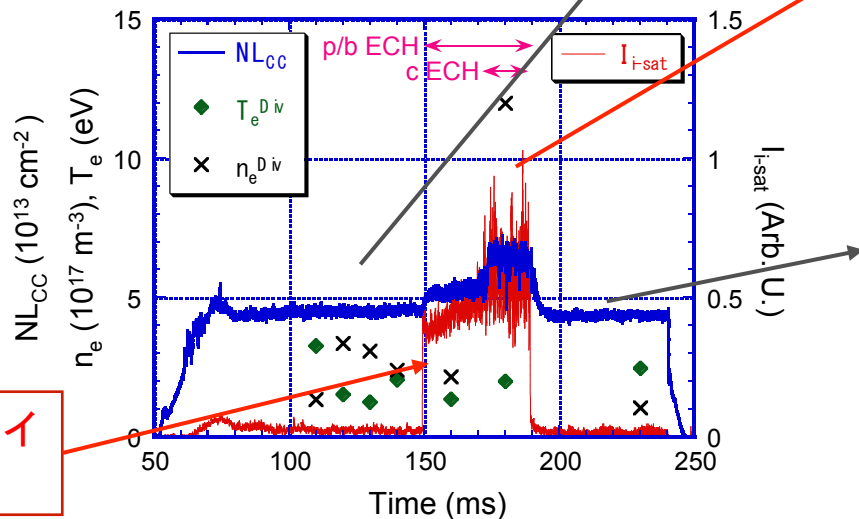


導入ガス種による電子冷却、非接触の程度の違いが認められた。

高速カメラによるD-module内 H $\alpha$ 発光の二次元イメージ



加熱系の重畳による非接触状態から接触状態、接触状態から非接触状態への遷移を観測した。

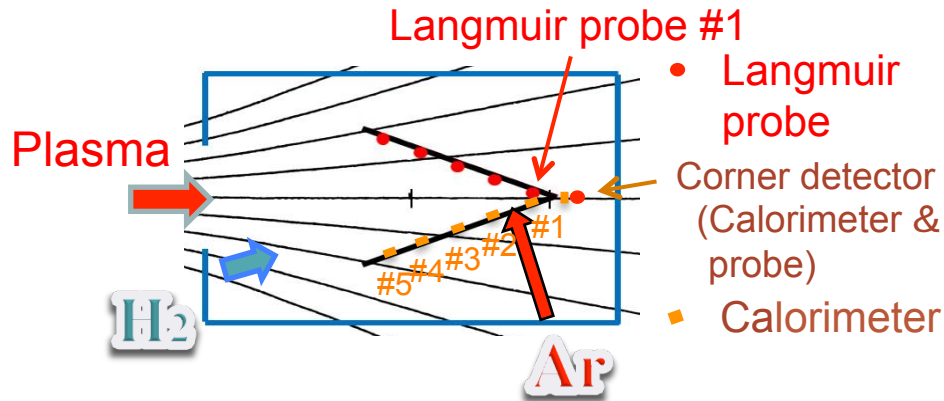


コーナーにおけるイオン飽和電流

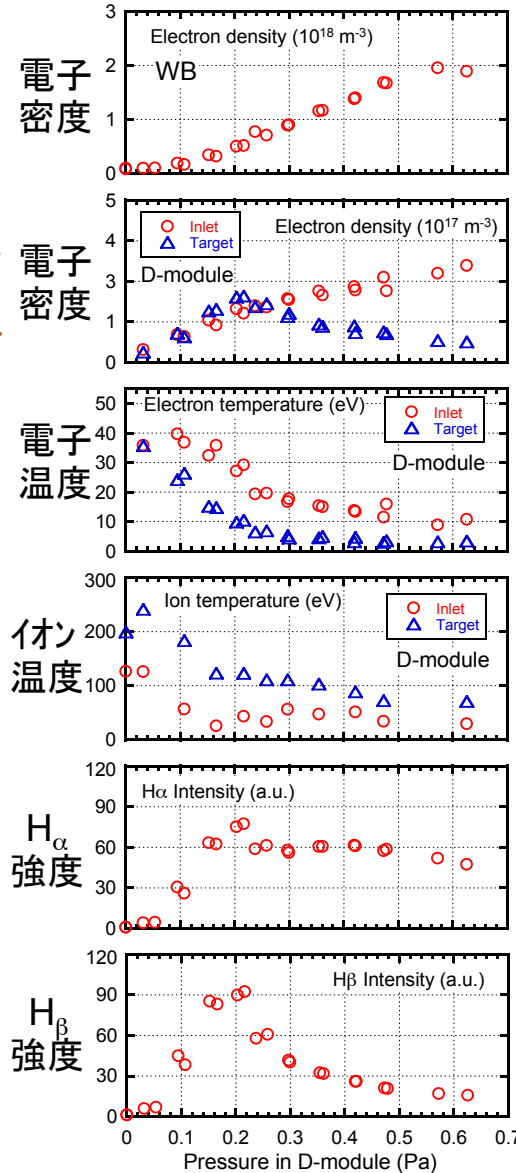
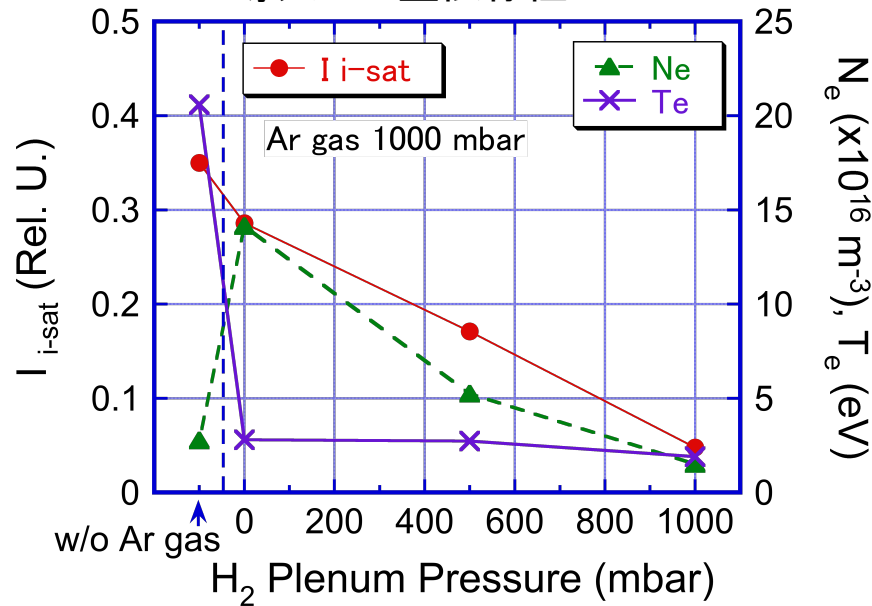
# ダイバータ模擬実験

## - 非接触プラズマの特性評価 -

D-module内ガス導入による再結合過程の促進が認められた。



D-module内プラズマパラメターの  
導入ガス量依存性



＜水素ガスのみ＞

ガス圧力の増大と共に、  
・ターゲット前面N<sub>e</sub>のロールオーバー

・T<sub>e</sub>, T<sub>i</sub>の減少(数eV, 数10eV)  
・H<sub>α</sub>, H<sub>β</sub>強度の変化

＜希ガス+水素＞

水素ガス圧力の増大に伴って、  
・ターゲット前面N<sub>e</sub>のロールオーバー

・T<sub>e</sub>: 2 - 3 eVで一定  
・コーナー部でのイオン束の減少

→ 非接触化

＜共通する現象＞

T<sub>e</sub>が2 - 5 eVの領域で発生

→ 分子活性化再結合  
(MAR)の可能性

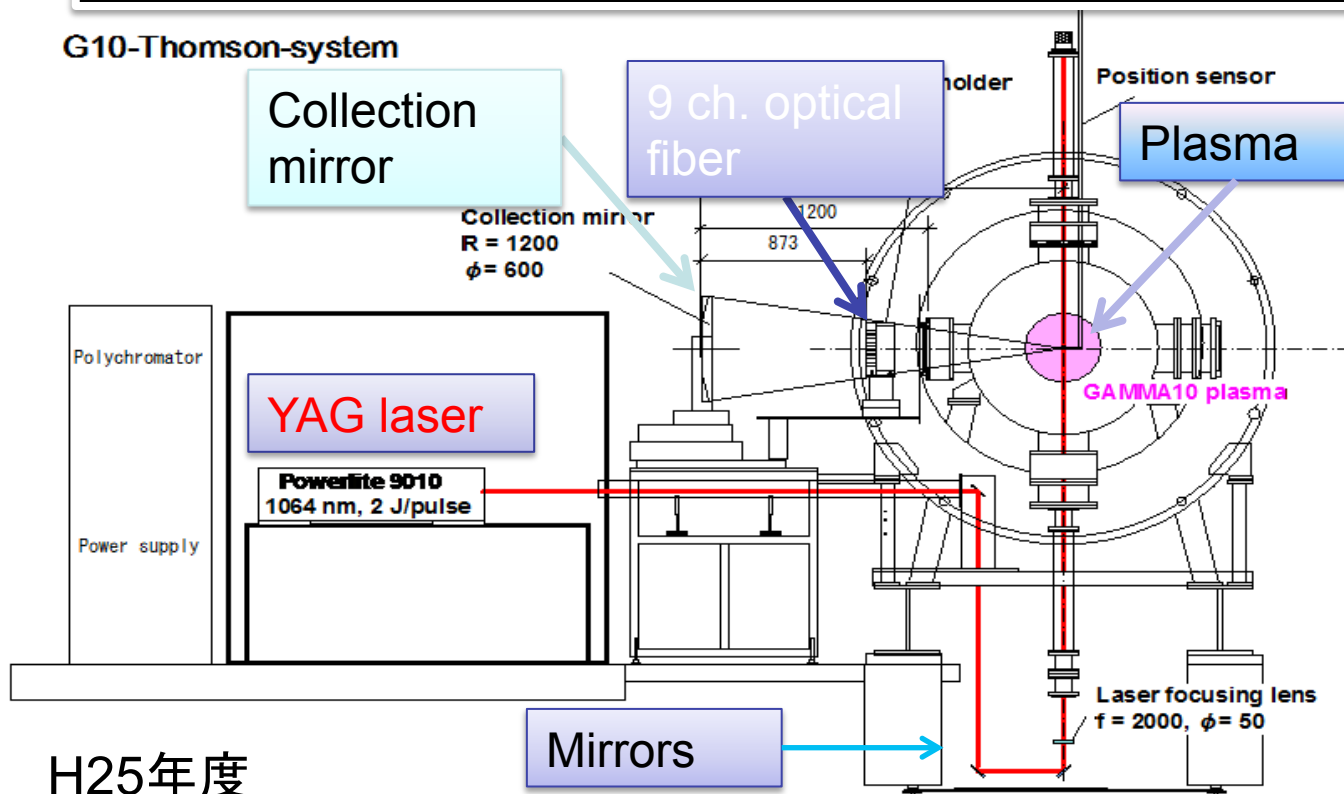
# 双方向型共同研究に基づく 最近の研究成果

最近の研究成果

双方向型共同研究に基づく

# 1. トムソン散乱計測の進展

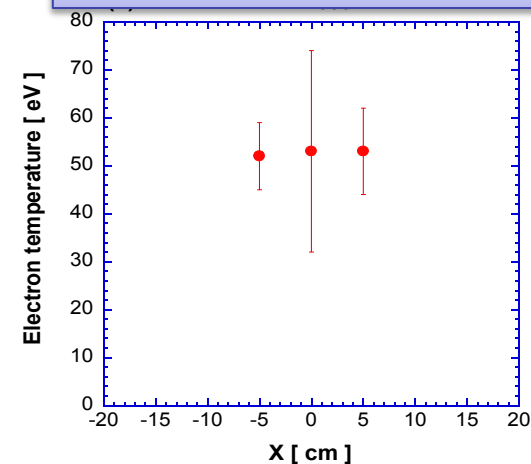
## 空間多点同時計測とマルチパス・トムソンの開発



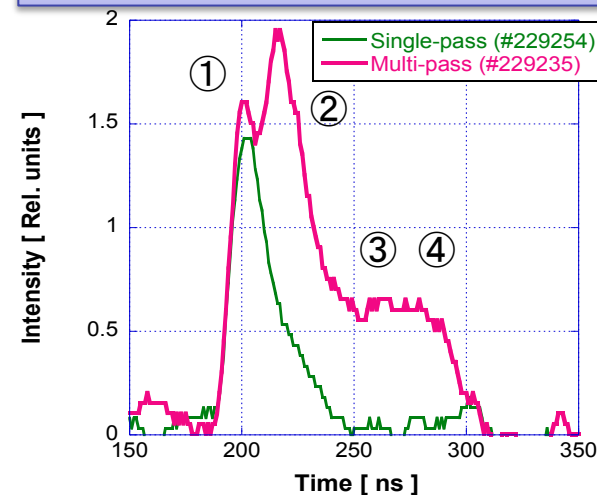
H25年度

- 光ファイバー、ポリクロメーターを増設し、空間3点の電子温度、電子密度のプラズマ1ショットでの同時計測を可能とした。
- マルチパス・トムソン散乱計測システムを開発し、4パスまでのトムソン散乱信号の取得に成功し、散乱信号の約3倍増加と、電子温度計測精度の2倍以上の向上が見られた。

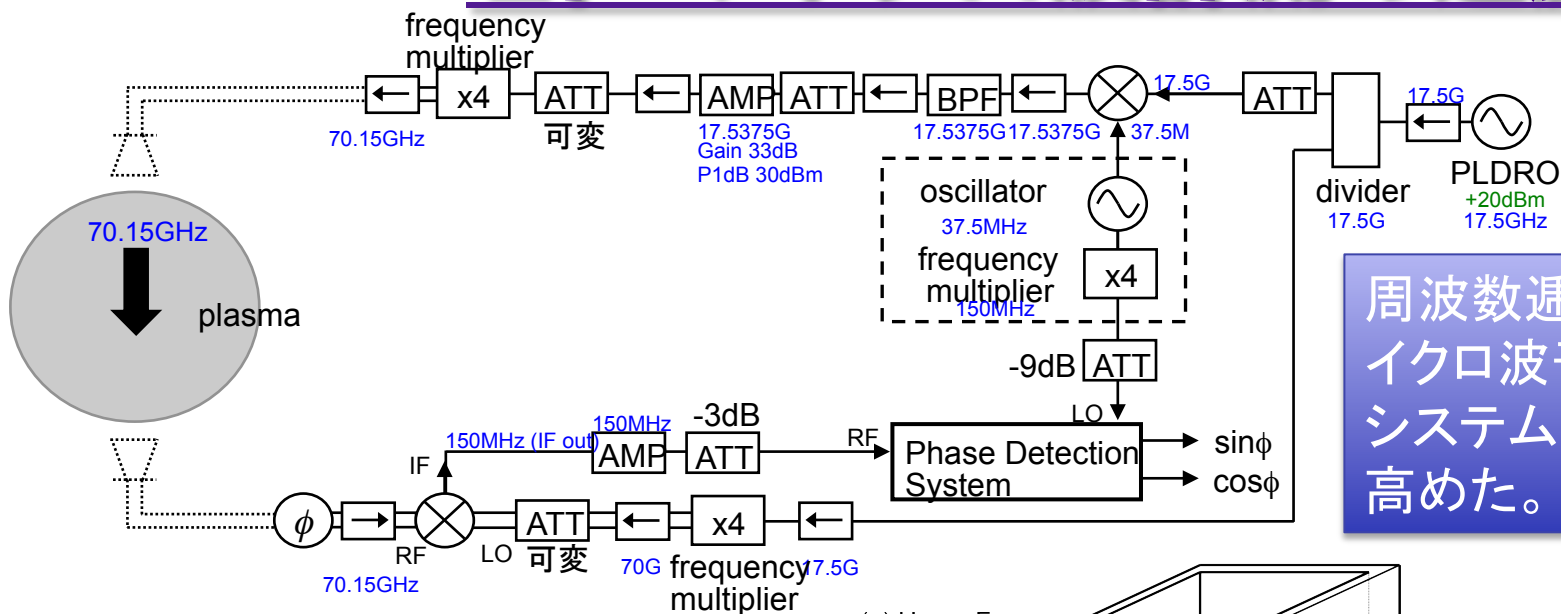
### 多点同時計測電子温度



### マルチパス・トムソン散乱信号

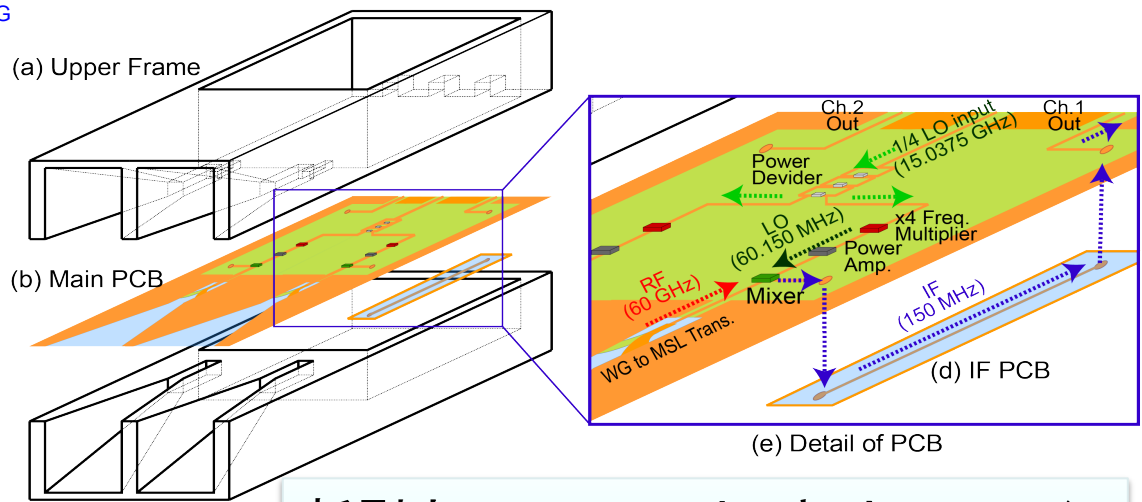


# 2. マイクロ波計測の進展



周波数通倍型70 GHzマイクロ波干渉計を構築し、システム全体の安定性を高めた。

D-モジュールにおける2次元密度計測を目指し、「GAMMA 10ダイバータ模擬実験のためのマイクロ波イメージング干渉計用1次元アンテナアレイの開発・東京農工大:桑原先生」を進めた。

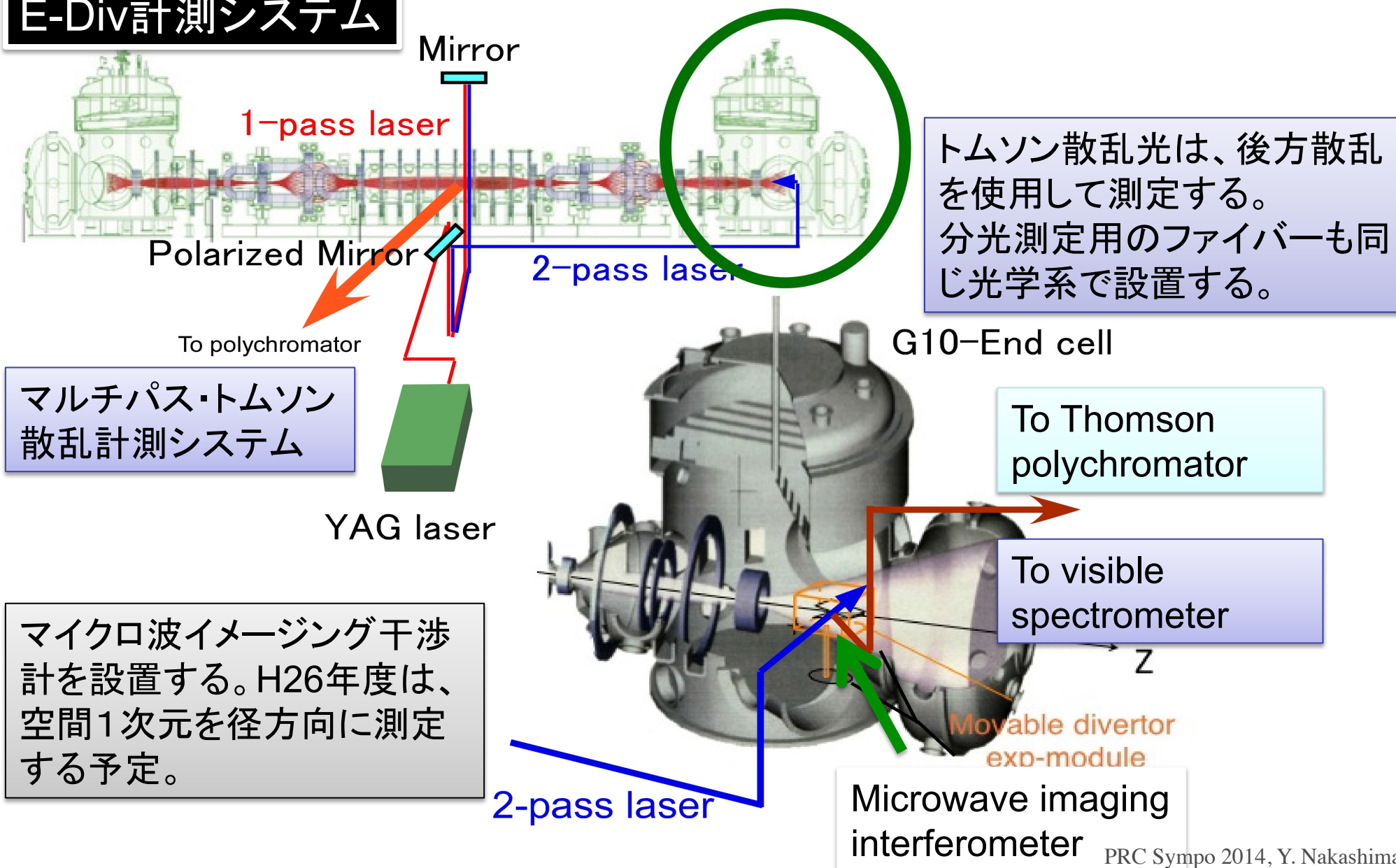


新型ホーンアンテナミキサーアレイ

「ホーンアンテナ型ヘテロダイン・イメージング受信器、1次元ホーンアンテナ型ヘテロダイン・イメージング受信器及び2次元ホーンアンテナ型ヘテロダイン・イメージング受信器」でH26年特許出願(NIFS長山先生外)

# 3. H26年度E-Div.部計測計画

## E-Div計測システム



トムソン散乱光は、後方散乱を使用して測定する。分光測定用のファイバーも同じ光学系で設置する。

マルチパス・トムソン散乱計測システム

マイクロ波イメージング干渉計を設置する。H26年度は、空間1次元を径方向に測定する予定。

To Thomson polychromator

To visible spectrometer

Microwave imaging interferometer



# 「磁場閉じ込めプラズマにおける粒子補給最適化」

研究代表者: 京都大学・エネルギー理工学研究所 小林進二  
筑波大学・プラズマ研究センター 中嶋洋輔

## 背景・目的と昨年度までの成果

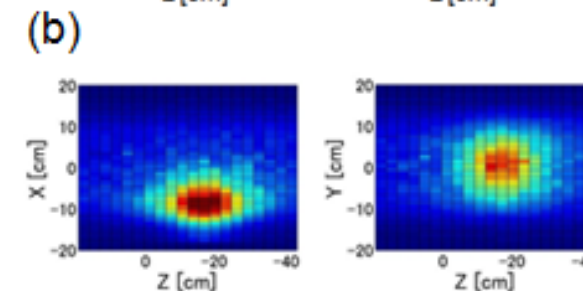
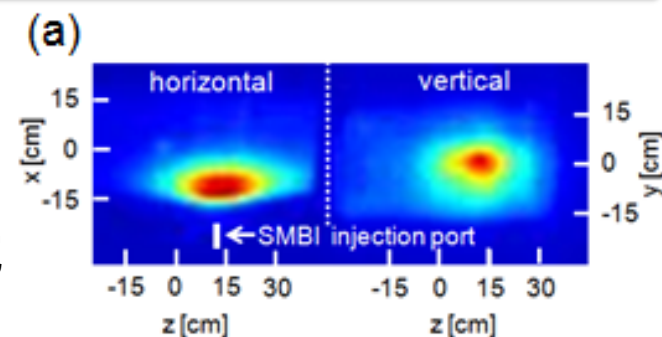
定常環状プラズマ型核融合炉における課題解決を指向した連携研究  
→ 高密度プラズマ制御を目指した粒子補給の最適化

筑波大学での課題: 超音速分子性ビーム入射(SMBI)の特性解明

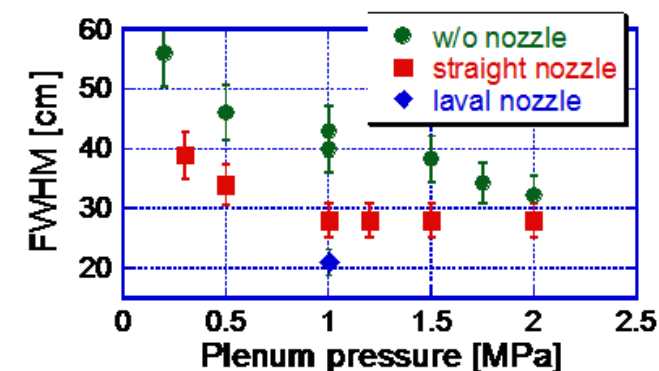
- ✓ 直線型配位を生かした高度計測システムの構築
- ✓ 数値シミュレーションによるSMBIの粒子供給モデル化
  - SMBIのノズル形状による指向性の違いを定量評価した。
  - 指向性を持つビームを模擬できるようにシミュレーションコードを改良することで、実験結果をよく説明できるようになった。

## 今年度の予定

- ✓ 種々のノズル(ラバールノズル)を用いて、ビームの入射指向性の基礎データを取得
  - ✓ 電子温度等の非一様性を考慮したシミュレーションの高度化
- 京都大学との連携推進:
- ✓ ヘリオトロンJに最適なSMBIラバールノズルの提案
  - ✓ 改良したSMBIシミュレーションのヘリオトロンJプラズマへの適用



H $\alpha$ 線発光強度の2次元分布の比較  
(a)多視線カメラ同時計測の結果  
(b)シミュレーション結果



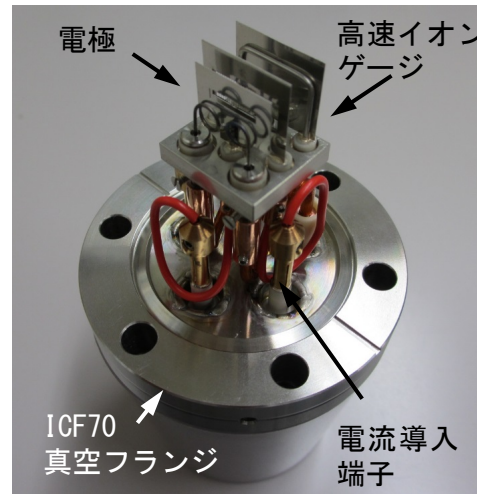
種々のノズル形状におけるビーム指向性  
PRC Sympo 2014, Y. Nakashima

# 「ガンマ10V字ターゲットへの熱粒子束の低減に対する中性粒子の影響」

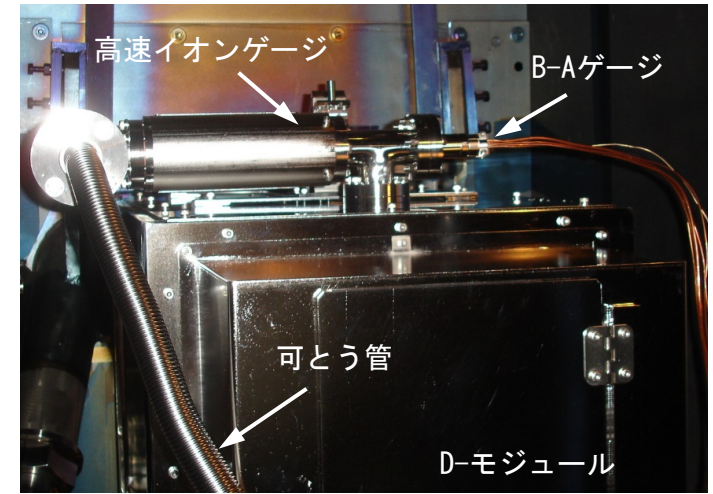
## 研究の目的と昨年度の成果

- 本研究では、ガンマ10のダイバータ模擬実験において、ダイバータ模擬実験モジュール (D-Module) 内やV字ターゲット内の中性粒子圧力を測定し、プラズマ照射時におけるV字ターゲット前面での電子温度・密度やV字ターゲットへの熱粒子束に対する中性粒子の影響を調べることを目的とする。
- 昨年度は、D-Module内の中性粒子圧力の変化を測定するため、高速イオンゲージを取り付けるための真空フランジを製作し、D-Moduleに取り付けた。その後、無磁場環境下でD-Moduleに水素ガスを導入し、高速イオンゲージの動作を確認した。さらに、プラズマ照射時におけるD-Module内の中性粒子圧力の変化を初期計測した。

研究代表者 日本原子力研究開発機構 福本正勝  
世話人 筑波大学プラズマ研究センター 中嶋洋輔



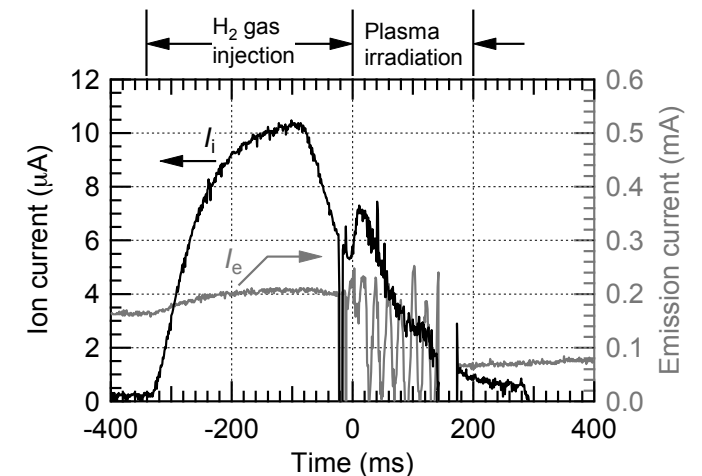
製作した電流導入端子付真空フランジと高速イオンゲージ



D-モジュールに取り付けた高速イオンゲージ

## 今年度の予定

プラズマ照射時の磁場を印加した状態で、既知の量の水素ガスをD-Moduleに導入し、絶対圧力の校正を行う。さらに、水素以外のガス(Ne, Ar, Xe等の希ガス)に対する感度校正も行う。また、プラズマ照射時のエミッション電流に発生したノイズの原因を特定し、ノイズを低減するための対策を行う。また、エミッション電流を一定に保つ制御回路の構築を検討する。秋以降の実験シリーズにおいて、10月期及び12月期で2回程度の実験を計画している。



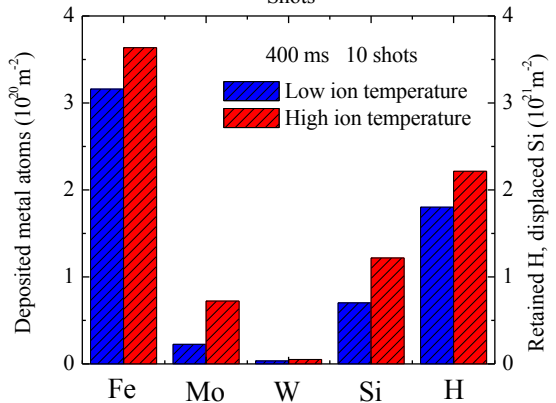
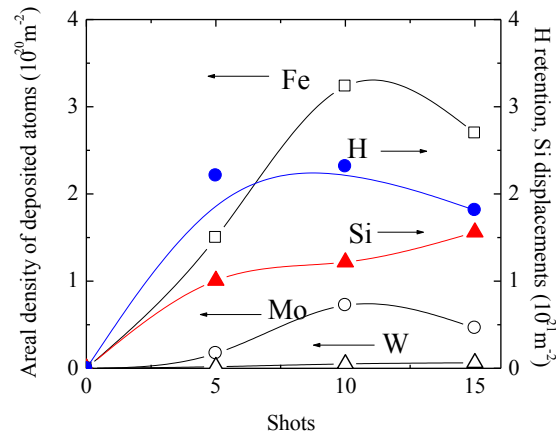
プラズマ照射時におけるイオン電流とエミッション電流 PRC Sympo 2014, Y. Nakashima

# 「核融合材料における水素挙動のプラズマ照射効果に関する研究」

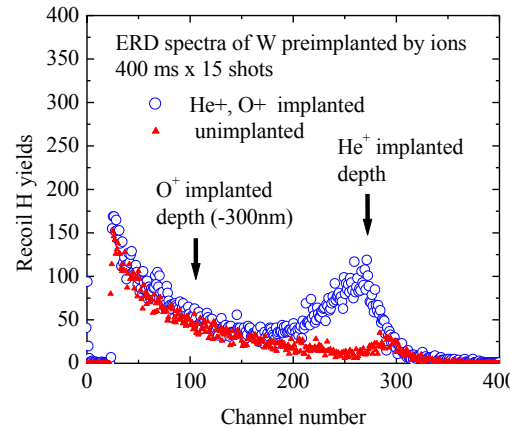
昨年度照射したSiC, W 試料表面の分析結果 研究代表者 東北大学金属材料研究所 永田晋二

筑波大学プラズマ研究センター 中嶋洋輔

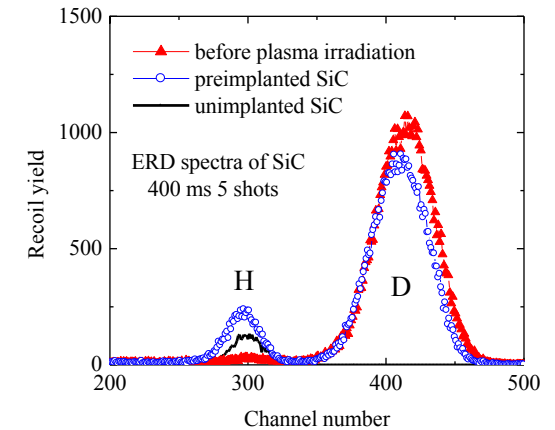
SiC表面の捕捉水素量、堆積元素量 (O, Fe, Mo, W) および損傷量(C, Si)のプラズマ照射量・温度依存性



He予照射Wにおける水素捕捉



D予照射SiCにおける水素同位体置換



- SiC表面での堆積元素、捕捉水素、損傷量はイオン温度 350 eV、0.4 s、10ショット程度の照射で飽和し、それ以上のプラズマ照射では堆積層が減少する。イオン温度依存性は高Z元素と損傷量において顕著である。
- Wでは堆積量、損傷量、捕捉水素量はSiCのおよそ10分の1以下であるが、水素注入深さへのHe予照射によって水素捕捉が起こる。
- SiCでは水素同位体置換現象が観測される一方で、イオン予照射に伴う欠陥形成による水素捕捉量への影響は見られない。

今年度は、これまでの照射条件に加え、低照射量と高照射量での実験を行い、堆積層の形成と捕捉水素量との関係を明らかにする。さらに、イオン注入による欠陥形成や前処理による表面組成・形態の変化を付加し、これら表面状態が水素挙動にあたる影響について、系統的な解析を行う。また、SiC、W以外にTi、Zr合金を用いた試料を作成し、入射フルエンス、フラックスの測定を試みる。秋以降の実験シリーズにおいて、10月期及び12月期で2~3回の照射実験を計画している。

# まとめ

筑波大学プラズマ研究センターでは、「数億度の高性能コアプラズマと常温壁の両立」を目指して、電位/電場によるプラズマの閉じ込め・輸送とダイバータプラズマ模擬研究並びに関連機器開発、人材育成を積極的に推進している。

## □ MW級ジャイロトロン開発

大電力化・長パルス化を幅広い周波数領域（14～300 GHz）にわたりMWレベルで推進，国内の研究拠点との密接な連携研究。

## □ ダイバータ模擬実験

制御性の高いICRF，ECHを用いた端損失プラズマ流（高イオン温度、電子熱流束）の発生と高性能化，ダイバータ模擬実験モジュールの設置，希ガス等の導入による高温プラズマの非接触化に成功，非接触プラズマの特性評価とその物理機構解明へ向けた着実な進展。

## □ 双方向型共同研究

トムソン散乱マイクロ波計測をはじめとする高度先進計測，粒子補給の最適化，およびダイバータ計測の進展，ダイバータ模擬プラズマにおける中性粒子計測，ダイバータ候補材へのプラズマ照射と材料表面分析。

*End*