



# JT-60Uにおける不純物、熱粒子制御

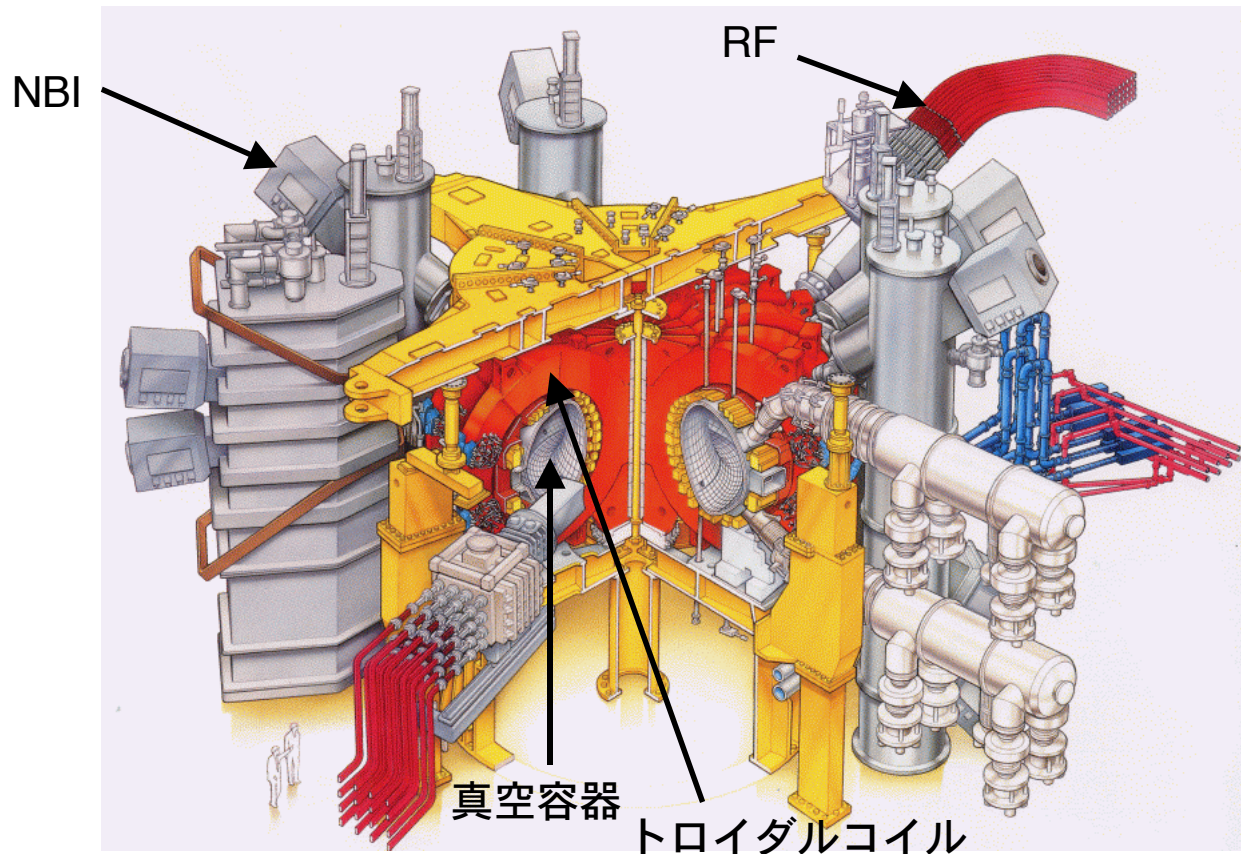
1. トカマク装置、ダイバータ
2. 低壁温運転による炭素不純物制御
3. ボロン化処理による酸素不純物制御
4. 非接触ダイバータプラズマにおける再結合粒子束の測定

日本原子力研究所、那珂研究所  
**仲野友英、JT-60チーム**



# JT-60U トカマク装置

JT-60U



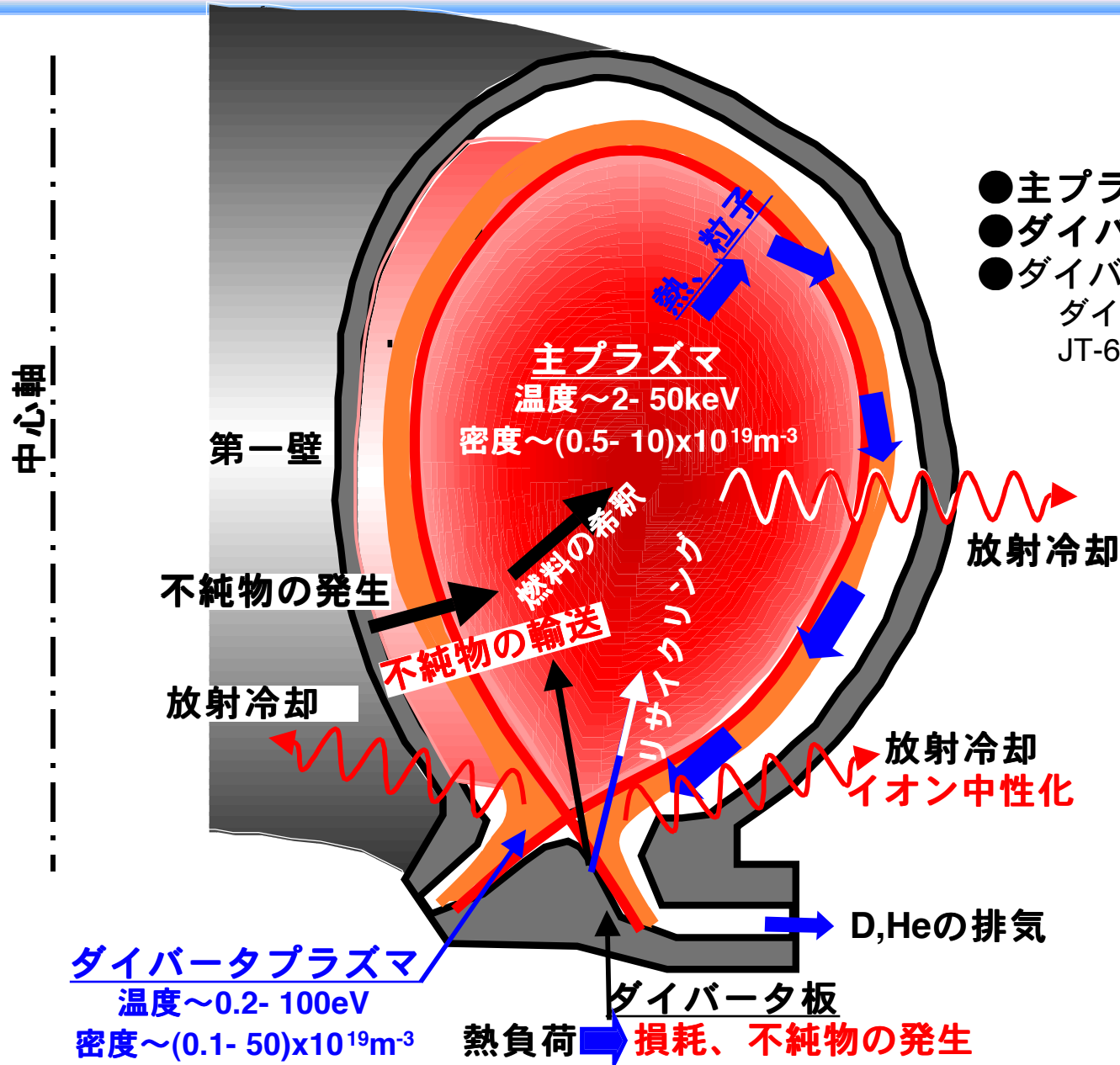
大半径3.4m  
小半径1m

プラズマ電流 <3MA  
トロイダル磁場 <4T  
中性粒子ビーム加熱パワー <25MW  
EC,IC,LH電磁波加熱装置 ~5MW



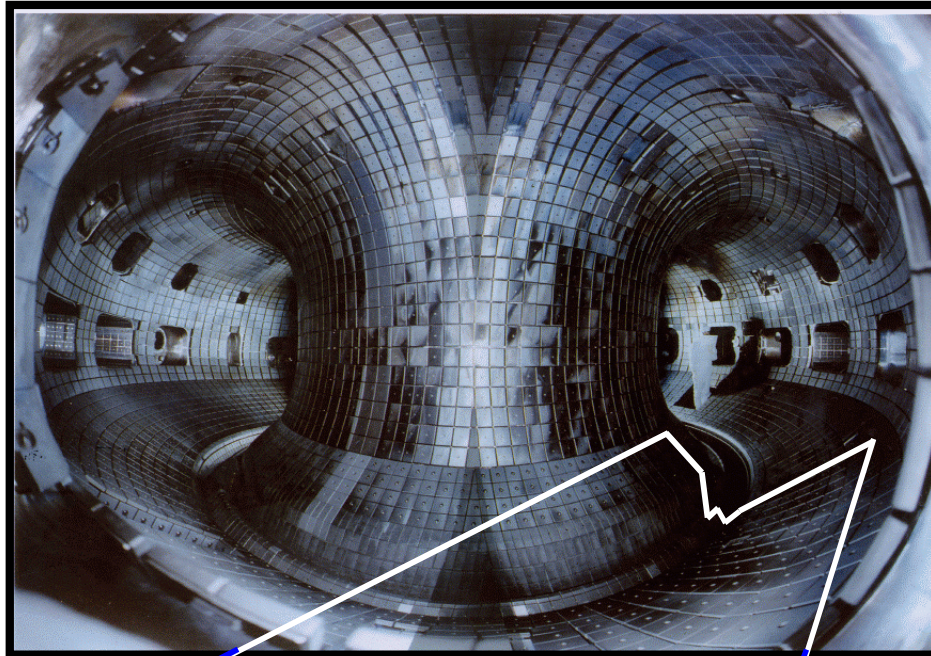
# トカマク装置における熱、粒子挙動

JT-60U



## 課題

- 主プラズマの不純物量低減
- ダイバータ板への熱負荷軽減
- ダイバータによる粒子制御  
ダイバータを用いた熱、粒子制御はJT-60Uの主要研究課題の1つ



### トカマク型核融合炉定常化のための ダイバータ機能

#### ● 粒子制御

燃料粒子の制御

粒子輸送現象の理解

ヘリウム排気

不純物の制御 (炭素、酸素)

炭素 ;

低温高密度のプラズマ

物理スパッタリング << 化学スパッタリング

=> **低壁温運転**

酸素 ;

真空容器大気開放による

容器内構造物への吸着

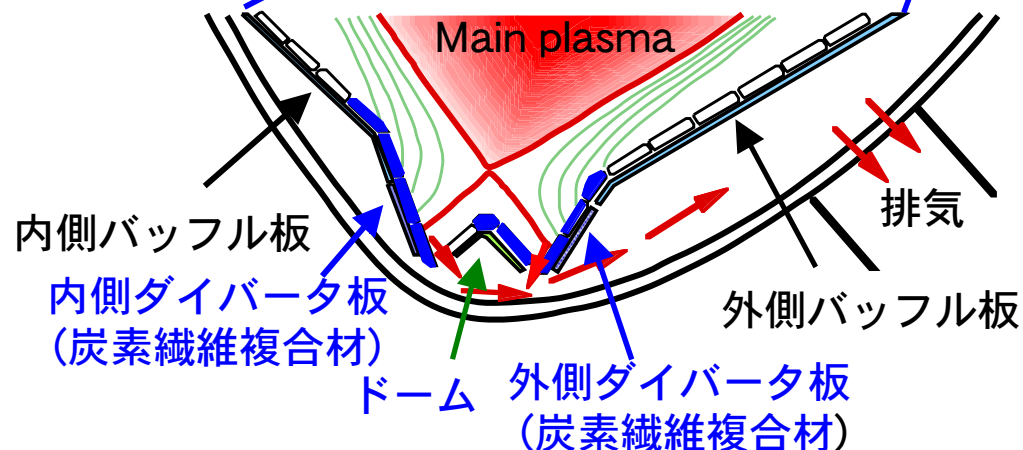
=> **ボロン化处理**

#### ● 熱制御

ダイバータ板への熱負荷の低減

非接触プラズマ

=> **水素イオンの体積再結合**







# 化学スパッタリング率測定

JT-60U

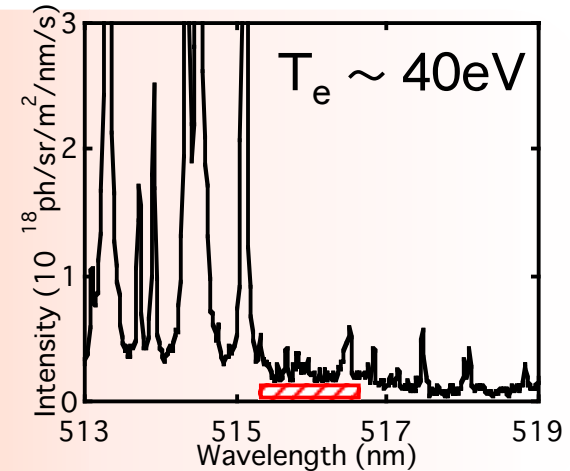
ダイバータプラズマの運転領域が低温高密度化

→  $C_2H_x/C_2D_x$  を考慮する必要がある。

従来のダイバータプラズマにおける  
化学スパッタリング率測定

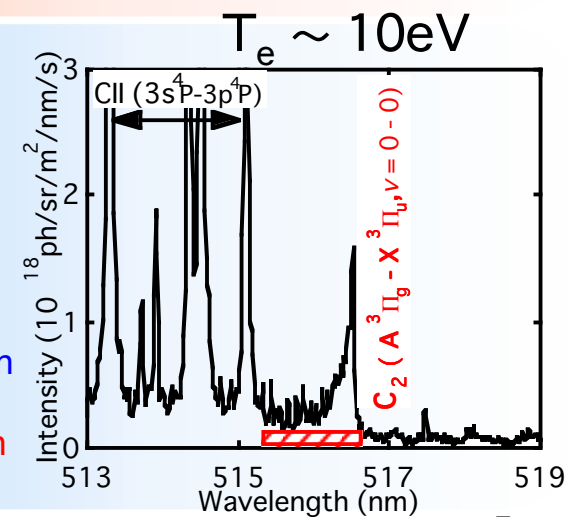
$$Y_{total} = Y_{CD_4} \\ = I^{CD} \times (D/XB^{CD}) / \Gamma_{ion}$$

D: Dissociation rate coefficient  
X: eXcitation rate coefficient  
B: Branching ratio



本研究では、  
CDバンド光と  $C_2$  バンド光を分光測定

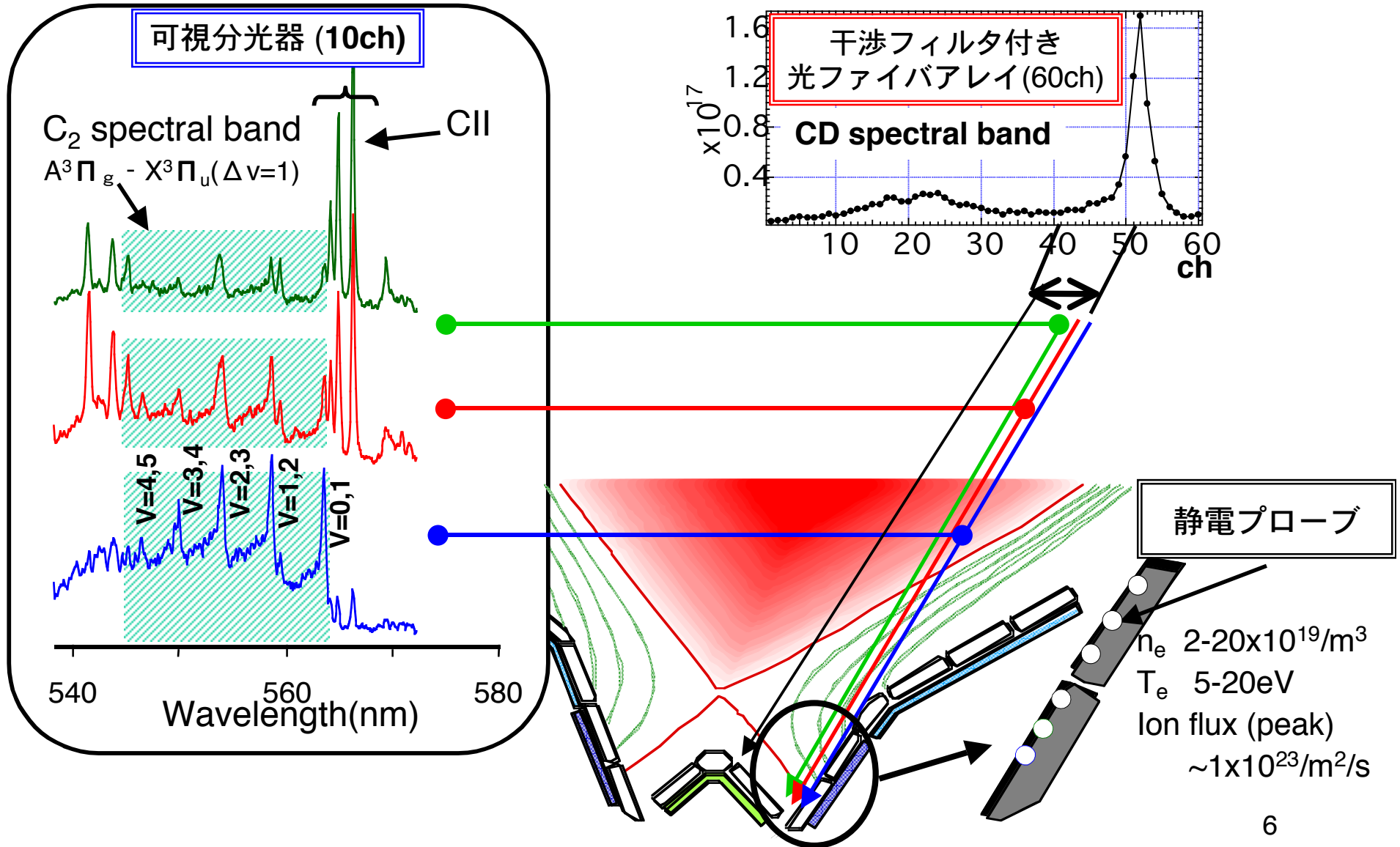
$$Y_{total} = Y_{CD_4} + 2 \times Y_{C_2D_x} \\ = (I_{CD_4}^{CD} - I_{C_2D_x}^{CD}) \times (D/XB^{CD}) / \Gamma_{ion} \\ + 2 \times I_{C_2D_x}^{C_2} \times (D/XB^{C_2}) / \Gamma_{ion}$$





# 分光計測 (分子発生量測定) 静電プローブ (イオン束測定)

JT-60U

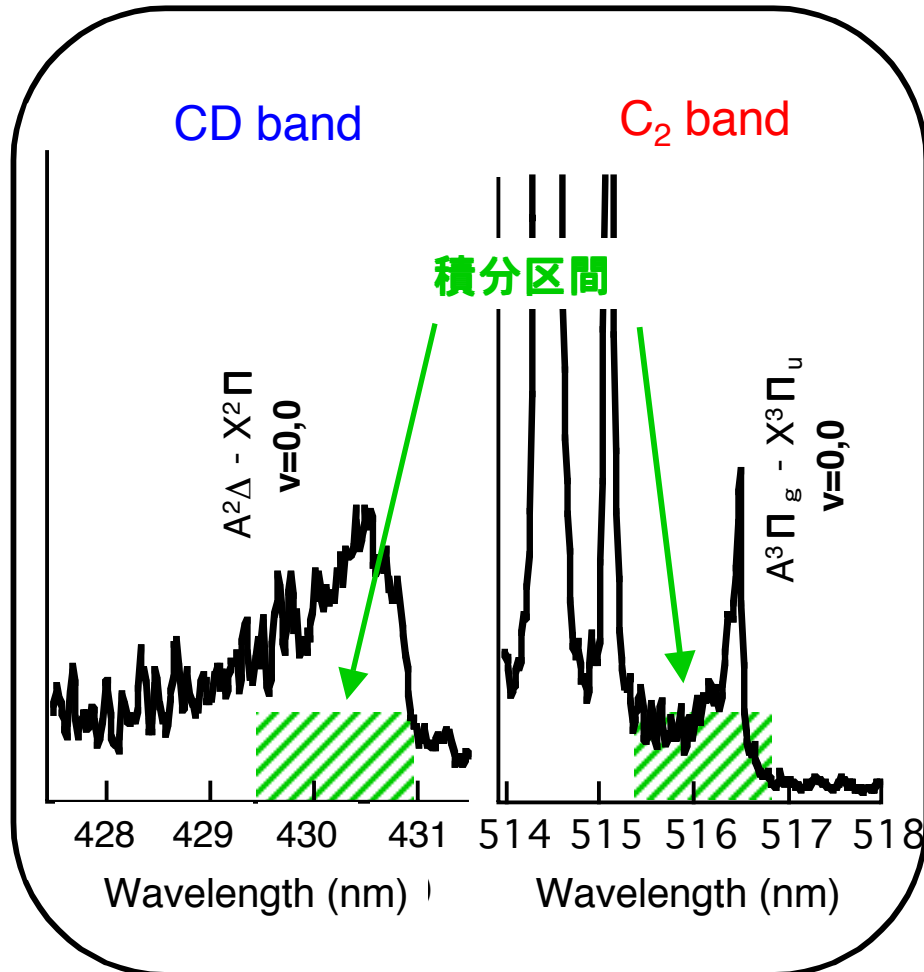




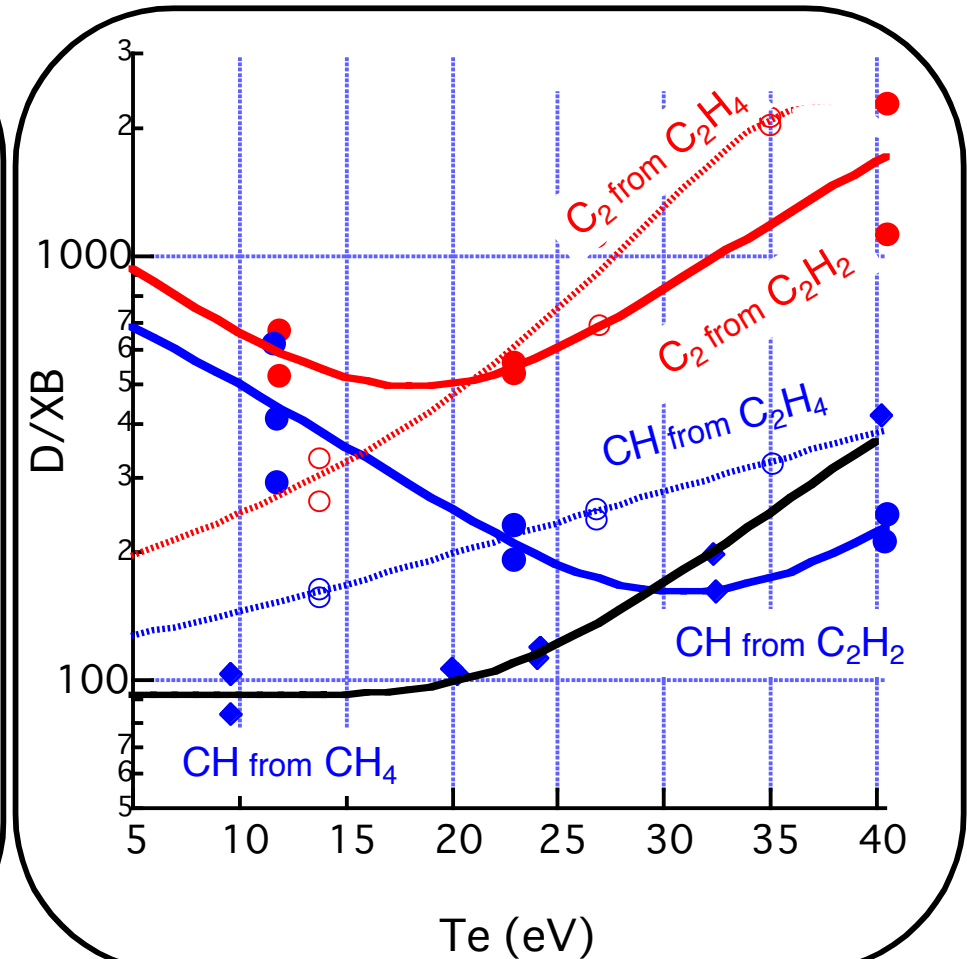
# 分子発生量の算出

JT-60U

## バンド光強度の定義



## 1光子あたりの解離分子数 (D/XB\*)

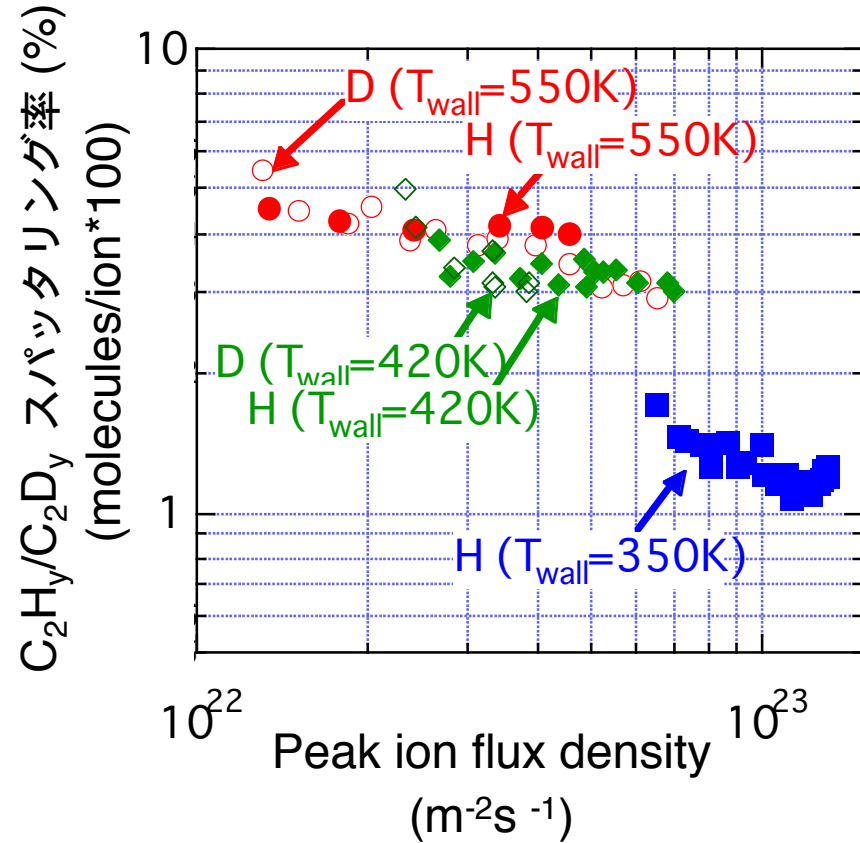
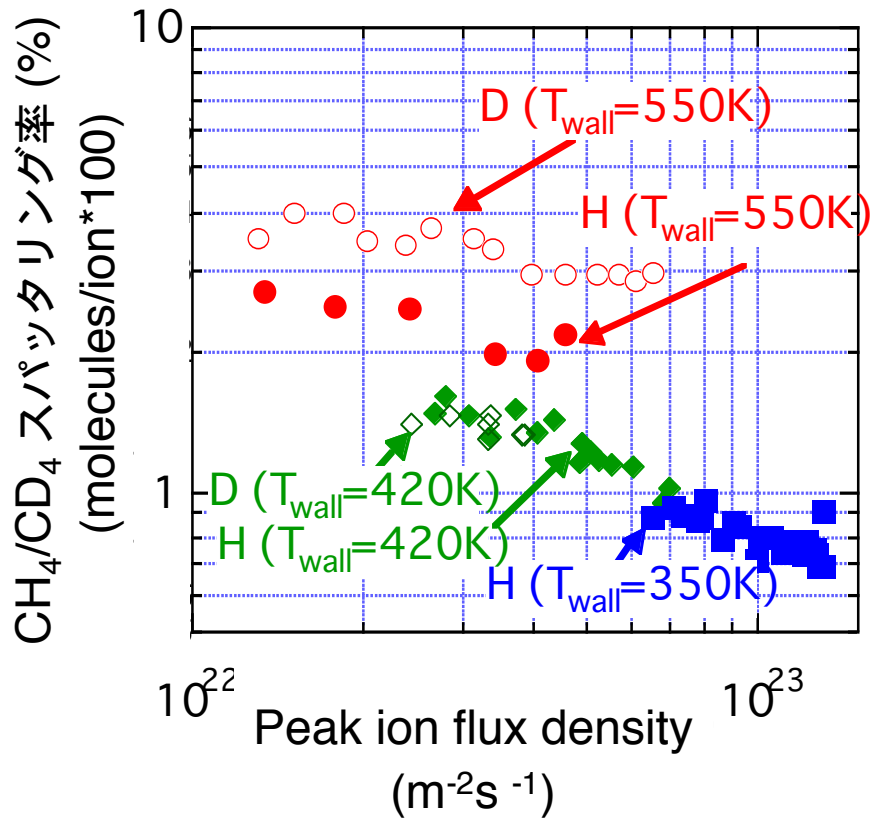


\*) Pospieszczyk A., et al., UCLA report PPG-1251(1989)



# 化学スパッタリング率測定結果\*)

JT-60U



壁温依存性  $\gamma_{550K}:\gamma_{420K}:\gamma_{350K} = 1:\sim 0.5:\sim 0.3$

イオン束依存性  $\gamma \propto \Gamma^{-0.1 \sim -0.4}$  (ITERでのタイル寿命を予測,  $\Gamma_{ion} \sim 1 \times 10^{24}$  (m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>))

\*) Nakano, T., et al., submitted to Nucl. Fusion.





# まとめ（化学スパッタリング率測定）

JT-60U

## 測定結果

1. 壁温依存性:  $Y^{550K} : Y^{420K} : Y^{350K} = 1 : \sim 0.5 : \sim 0.3$
2. イオン束依存性:  $Y \propto \Gamma^{-0.1 \sim -0.4}$
3.  $C_2H_x$  : 発生した炭化水素に含まれる炭素の約80%

## 今後の予定

1. 炭素を2個含む炭化水素分子 ( $C_2H_x$ )のダイバータプラズマにおける輸送
2. 炭化水素がプラズマデタッチメントに果たす役割

## 主プラズマの炭素量の制御

化学スパッタリングによる炭素発生量は低壁温運転によって抑制できる。  
⇒ 主プラズマの炭素量は低減する？



# 低壁温運転およびボロン化処理のプラズマへの効果

JT-60U

## ●JT-60Uの運転状況

1.5年間の運転で約4000ショット

3度の大気開放

13回のボロン化処理 (重水素デカボラン法,  $B_{10}D_{14}$ )

## ●低壁温運転およびボロン化処理のプラズマへの効果を調べる

JT-60Uのハードウェア的に**余裕のある運転領域**

**プラズマ配位固定** (第一壁とのクリアランスを一定に保つ)

1-2ショット / 1週間

重水素放電、軽水素放電

壁温 350K, 420K, 550K

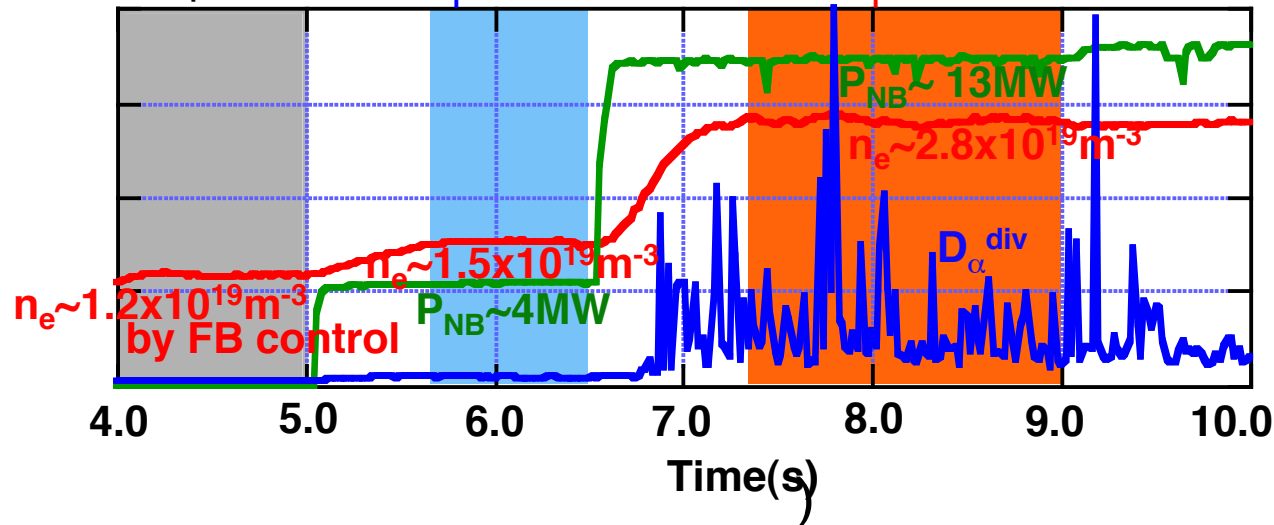
約100ショットからなるデータベースを構築

## ●放電波形

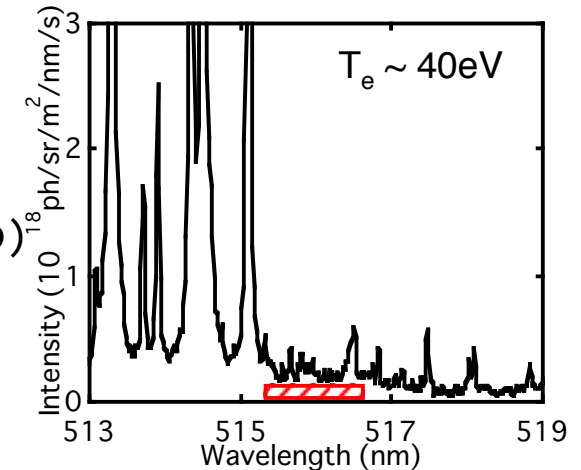
OH phase

L-mode phase

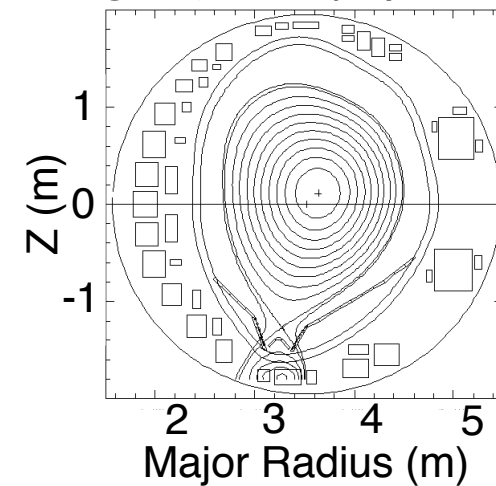
H-mode phase



## ● $Y_{CH_4} \gg Y_{C_2H_x}$



## ●プラズマ配位

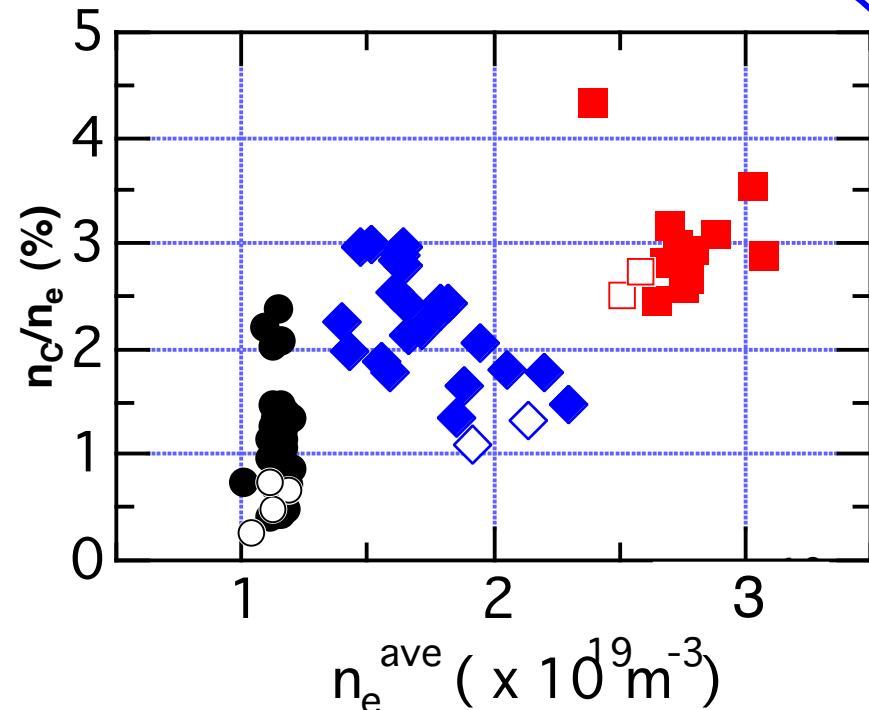
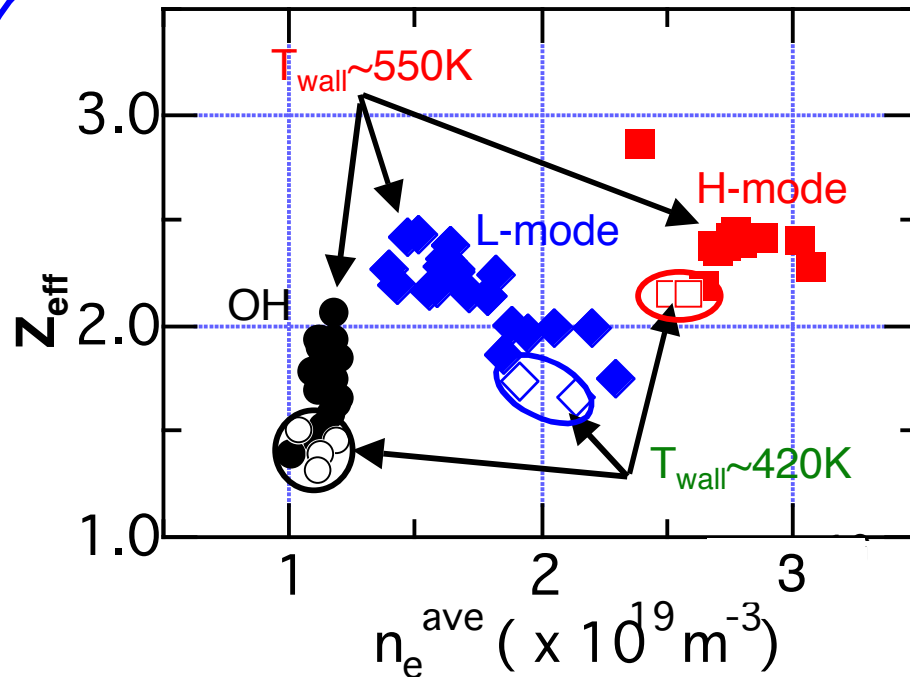




# $Z_{\text{eff}}$ decreases with low wall temperature

JT-60U

**Dataset** : Deuterium discharge,  $n_{\text{O}}/n_{\text{e}} < 1\%$  ,  $n_{\text{B}}/n_{\text{e}} < 1\%$ ,  $T_{\text{wall}} \sim 420\text{K}$  and  $550\text{K}$



$Z_{\text{eff}}$  and  $n_{\text{C}}/n_{\text{e}}$  at  $420\text{K}$  are in the lowest range of the dataset.

With low  $T_{\text{wall}}$ ,  $n_{\text{C}}/n_{\text{e}}$  decreases.

Carbon originating from chemical sputtering affects  $n_{\text{C}}/n_{\text{e}}$ .



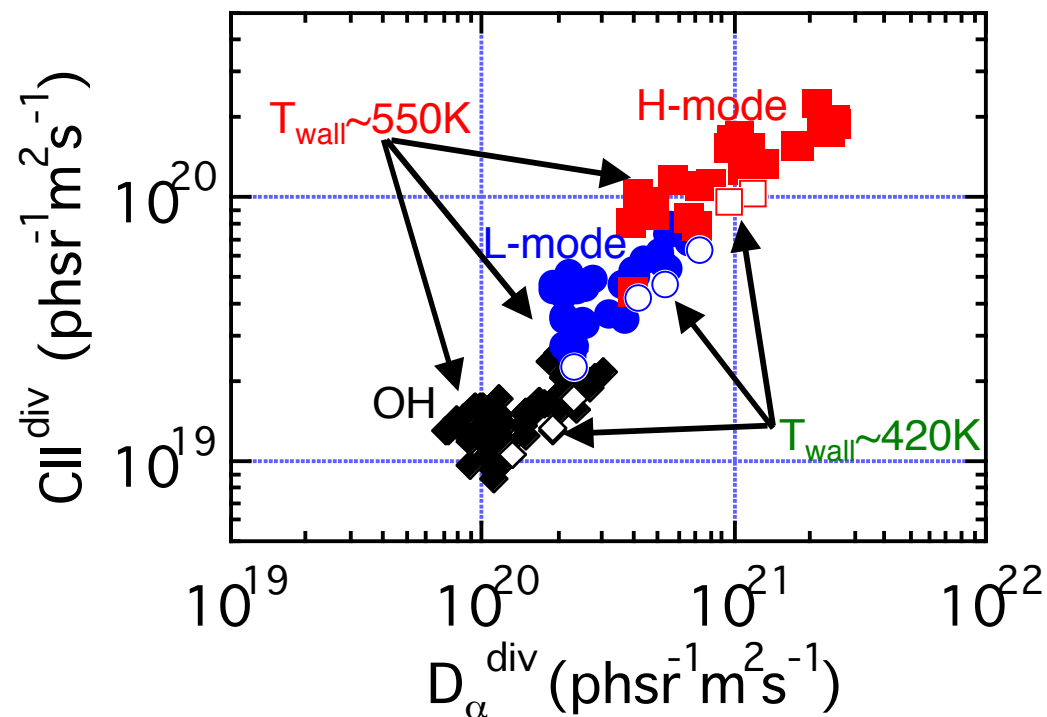
# Lower C<sup>+</sup> ionization flux with lower T<sub>wall</sub>

JT-60U

**Dataset** : Deuterium discharge

: T<sub>wall</sub> ~ 420K and 550K

: Fixed density (OH : n<sub>e</sub>=1.0-1.2x10<sup>19</sup>m<sup>-3</sup> L-mode : n<sub>e</sub>=1.4-1.7x10<sup>19</sup>m<sup>-3</sup> H-mode : n<sub>e</sub>=2.4-2.9x10<sup>19</sup>m<sup>-3</sup>)



C<sup>+</sup> ionization flux at 420K is lower than that at 550K in the wide range of recycling flux with fixed density.



# $\Gamma_{\text{chem}}$ contributes 30–80% of $N_{\text{C}}^{\text{core}}$

JT-60U

**Dataset** : Hydrogen & Deuterium discharge

:  $T_{\text{wall}} \sim 350, 420$  and  $550\text{K}$

: Fixed density

L-mode (Hydrogen, 4MW) :  $n_e \sim 1.45 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

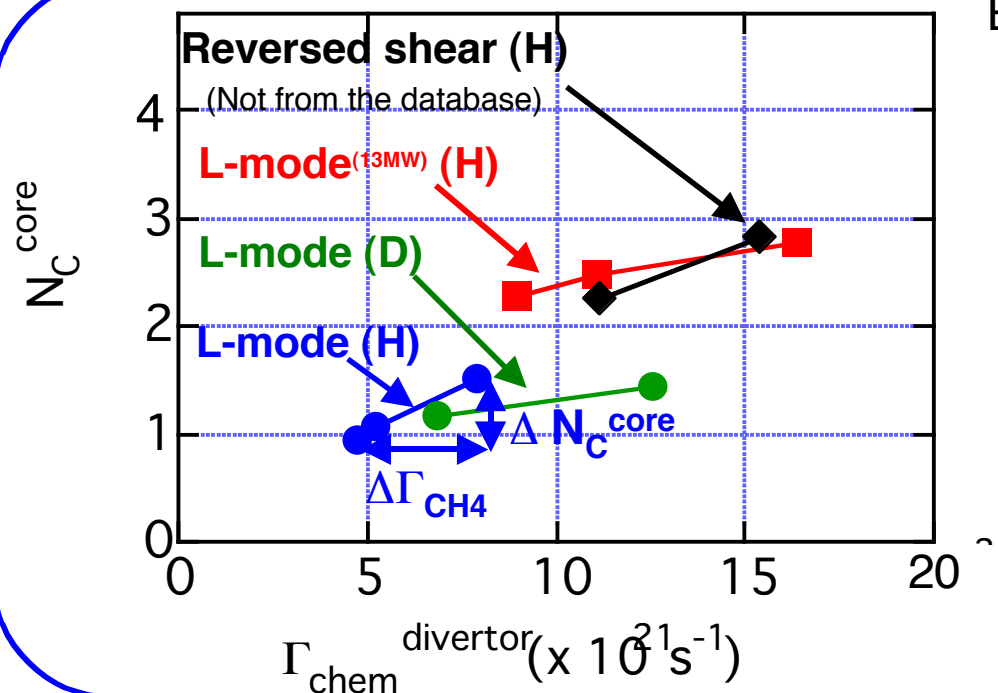
L-mode (Hydrogen, 13MW) :  $n_e \sim 2.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

L-mode (Deuterium, 4MW) :  $n_e \sim 1.9 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

Reversed Shear (Hydrogen) :  $n_e \sim 2.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$

: Fixed impurity density except Carbon ( $n_{\text{O}}/n_e < 0.6\%$ ,  $n_{\text{B}}/n_e < 0.5\%$ )

: Fixed recycling flux ( $\pm 10\%$ )



Estimation of contribution of  $\Gamma_{\text{chem}}$  to  $N_{\text{C}}^{\text{core}}$

$$N_{\text{C}}^{\text{core}}_{\text{chem}} = \frac{\Delta N_{\text{C}}^{\text{core}} / N_{\text{C}}^{\text{core}}}{\Delta \Gamma_{\text{chem}} / \Gamma_{\text{chem}}}$$

$\sim 80\%$  (Hydrogen, L-mode)

$\sim 30\%$  (Deuterium, L-mode)

$\sim 30\%$  (Hydrogen, L-mode, 13MW)

$\sim 65\%$  (Hydrogen, Reversed Shear)





# まとめ（低壁温運転による炭素量制御）

JT-60U

In order to investigate effects of low  $T_{\text{wall}}$  & boronization, the discharges with identical discharge conditions have been repeated ~ 100 times in 2 years.

The database is based on data from,

deuterium discharges at  $T_{\text{wall}} \sim 420$  and  $540\text{K}$  (13 times boronization)

& hydrogen discharges at  $T_{\text{wall}} \sim 350, 420$  and  $540\text{K}$ .

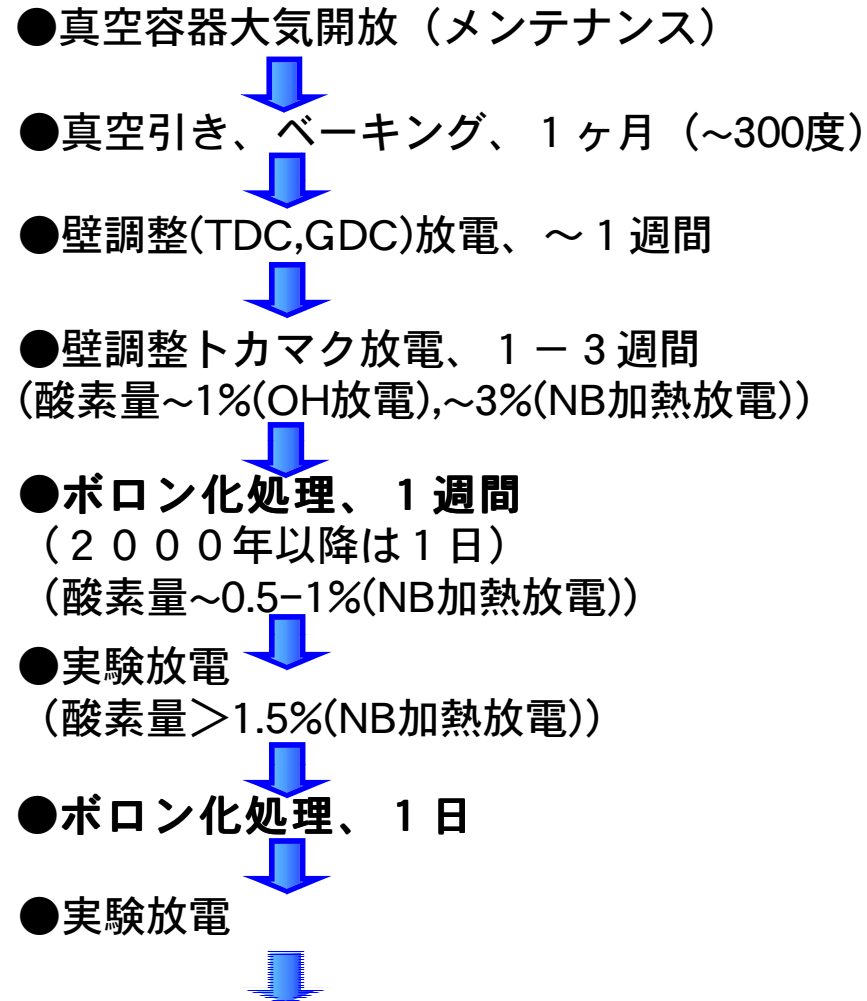
The database indicates,

1.  $n_{\text{C}}/n_{\text{e}}$  decreases at low  $T_{\text{wall}}$  due to reduction of  $Y_{\text{chem}}$ .
2.  $\text{C}^+$  ionization flux at  $420\text{K}$  is lower than that at  $550\text{K}$ .
3.  $\Gamma_{\text{chem}}$  contributes 30-80% of  $N_{\text{C}}^{\text{core}}$ . The contribution depends on confinement modes and working gases.



# 第一壁調整におけるボロン化処理の位置づけ

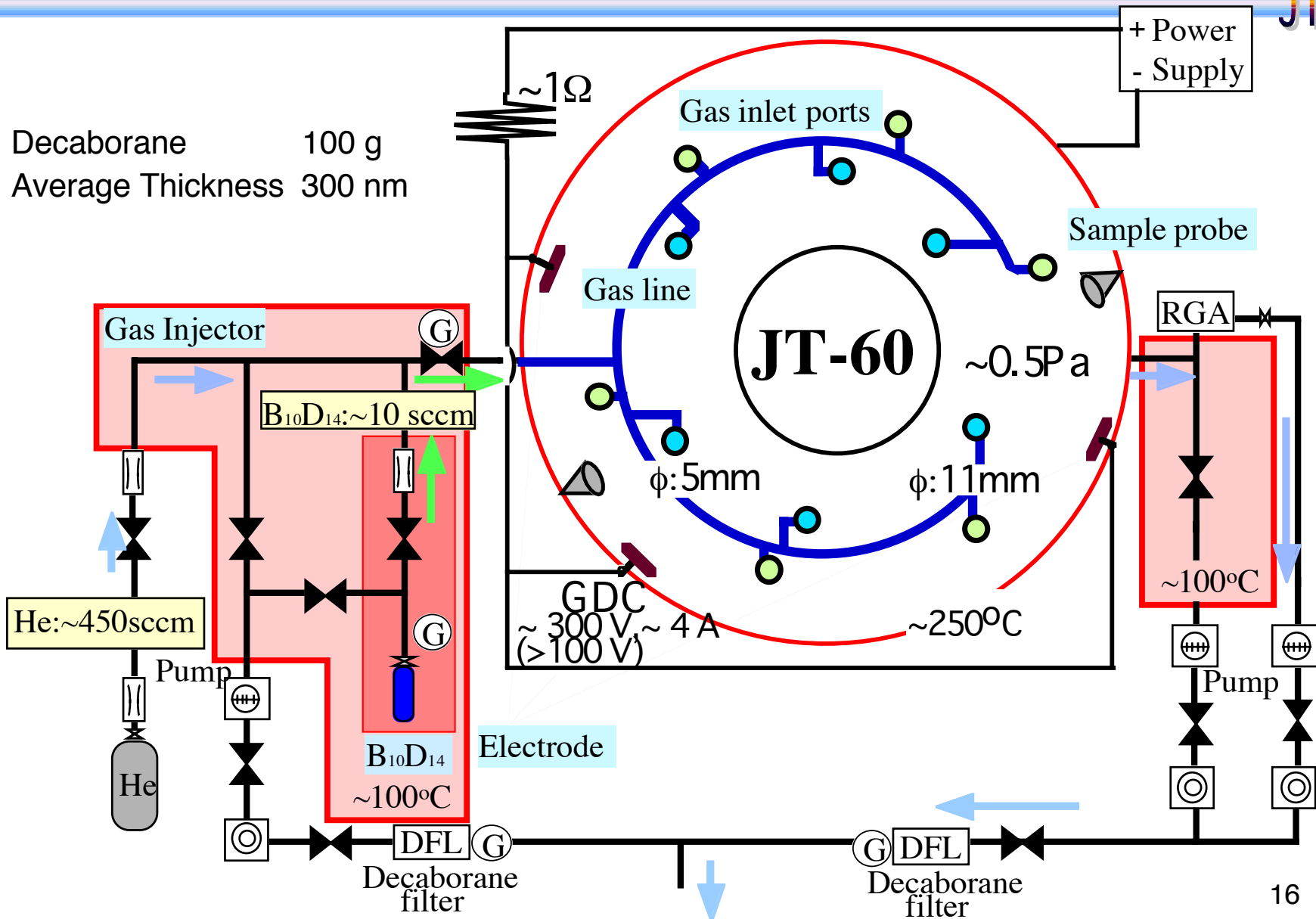
JT-60U





# ボロン化処理システム

JT-60U





# 酸素量低減効果の持続性 ~ 400-500ショット

JT-60U

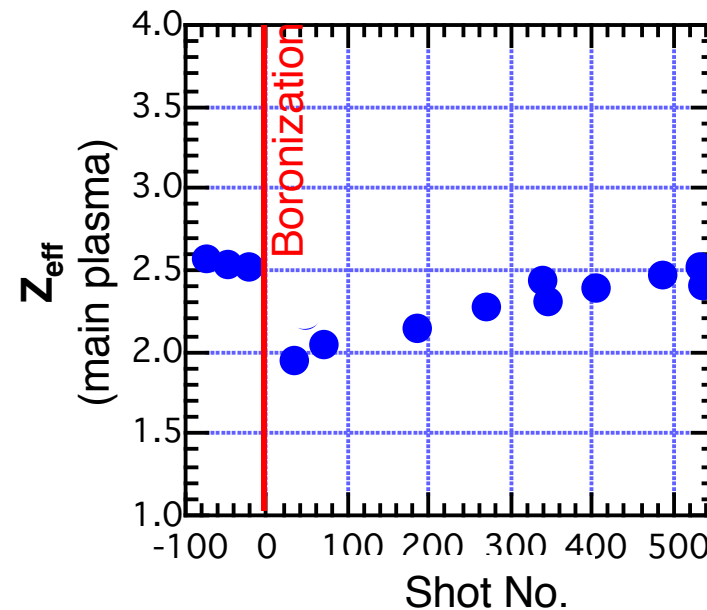
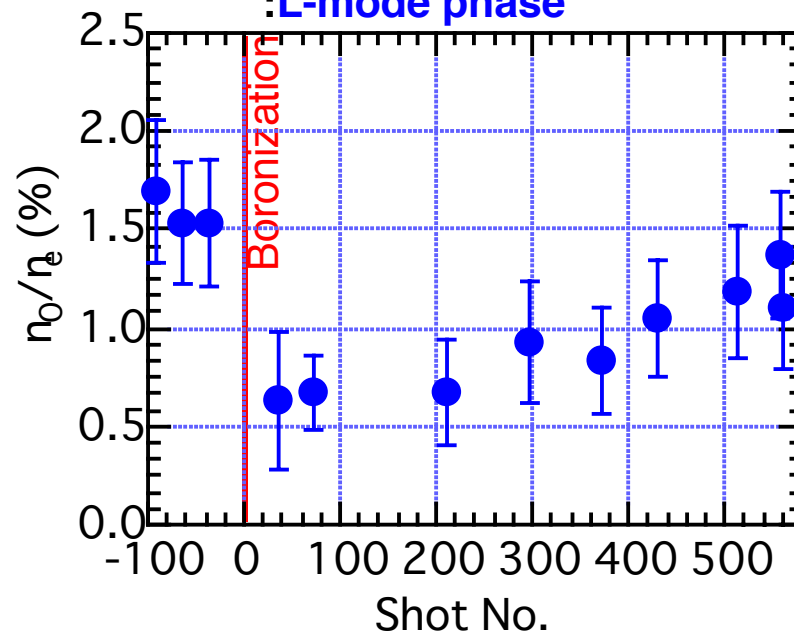
## 第12回ボロン化処理

:真空容器大気開放後

: $B_{10}D_{14}$  ~ 70 g

:測定膜圧 ~ 30 - 136 nm

:L-mode phase

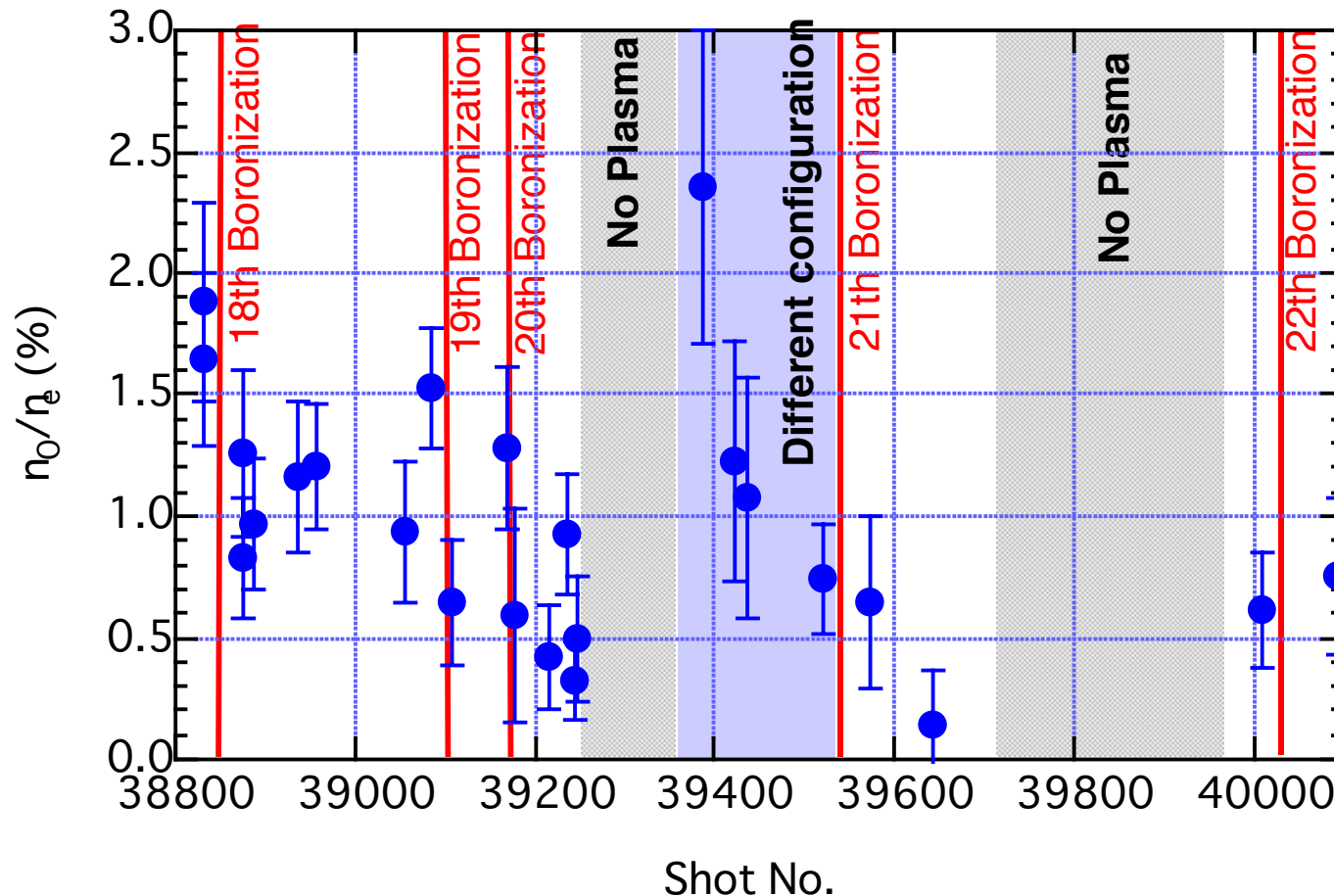


ボロン化処理後、酸素量 ( $n_0/n_e$ ) < 1%を約400 - 500ショット維持  
炭素量はほぼ一定、ボロン量は約50ショットで減少  
➡  $Z_{eff}$ は酸素量に類似したショット依存性



繰り返しボロン化処理を行い、 $n_o/n_e \leq \sim 1\%$ を維持

JT-60U



約200ショットごとにボロン化処理（デカボラン量 10-20g）を行い、酸素量約1%以下を維持



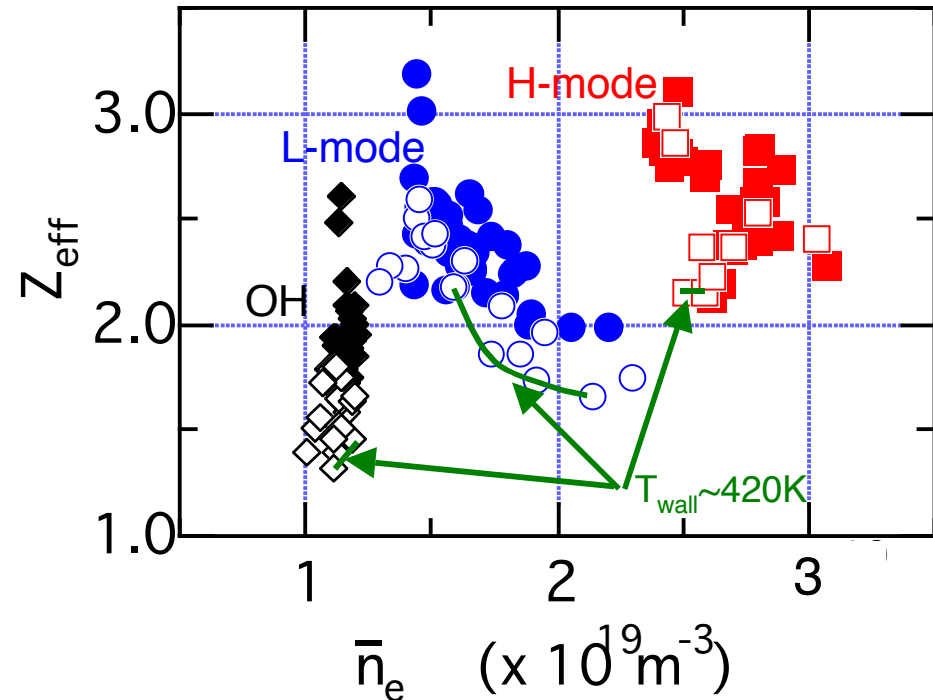
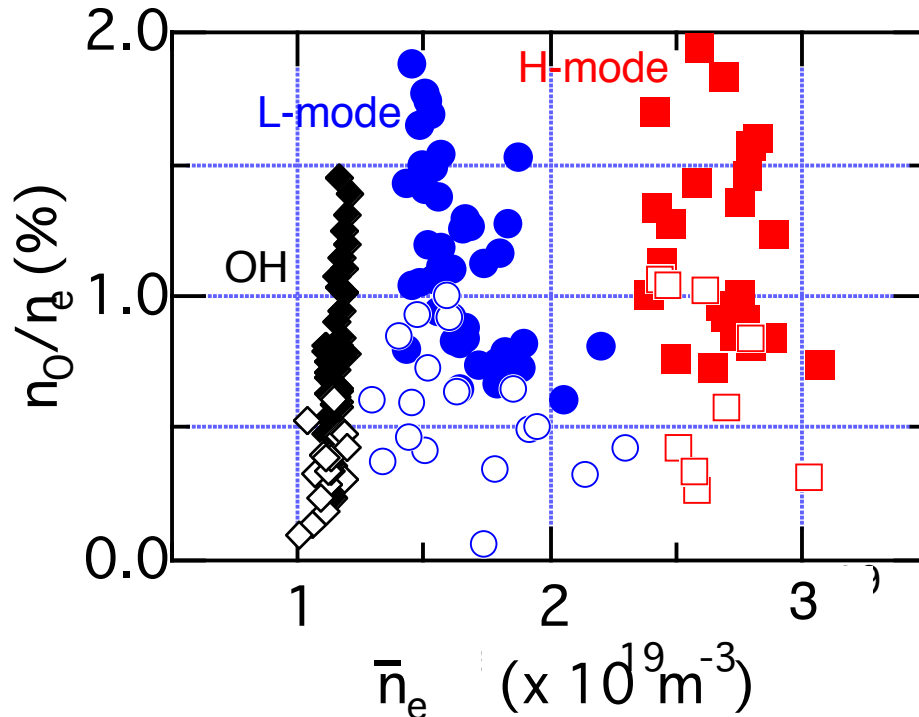


# ボロン化処理と低壁温運転で低 $Z_{\text{eff}}$ を達成

JT-60U

Dataset : 重水素放電  
: 壁温 ~ 420 and 550 K  
: 第12回から21回のボロン化処理

◇、○、□ in 50 shots  
After Boronization



●ボロン化処理、50ショット以内では、  
 $n_{\text{O}}/n_{\text{e}} < 1.1\%$  (L- & H-mode),  $< 0.7\%$  (OH)  
もっとも低い領域に属する $Z_{\text{eff}}$  が得られた。

●さらに、壁温を550Kから420Kに下げること、最も低い $Z_{\text{eff}}$  を達成  
完全非誘導電流駆動における核融合三重積の記録更新 ( $3.0 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \text{skeV}$ ) に貢献



# まとめ（ボロン化処理による酸素量制御）

JT-60U

## ボロン化処理手法の進展

- 92年から軽水素デカボラン法によるボロン化処理システムを導入し、95年より混合ガス法、00年より重水素デカボラン法に改良
- 重水素デカボラン法では、ボロン化処理に要する時間を短縮でき、処理後の放電調整が不要

## JT-60Uにおけるボロン化処理システムの稼働状況

- 1.5年間で約4000ショット、3度の大気開放に対し、13回のボロン化処理（重水素デカボラン法）

## ボロン化処理のプラズマに対する効果

（同一放電条件の放電を定期的に繰り返し、約100ショットからなるデータベースを構築）

- 酸素量低減効果は約400 - 500ショット（デカボラン、70g）
- ボロン化処理（デカボラン、10 - 20 g）を約200ショットごとに繰り返し、主プラズマの酸素量を約1%以下の維持に成功
- ボロン化処理と低壁温運転（壁温を550Kから420Kに下げる）で、データベースのなかで、最も低い $Z_{eff}$ を達成



# 非接触プラズマにおける再結合粒子束の測定

JT-60U

- ダイバータ板には炉心プラズマからの熱、粒子束が集中
- 熱負荷の低減には非接触プラズマ（イオン束が急速に減少する現象）が有効
  - シース加速
  - 表面再結合エネルギーの負荷を除去
- 非接触プラズマでは、水素イオンの体積再結合が重要

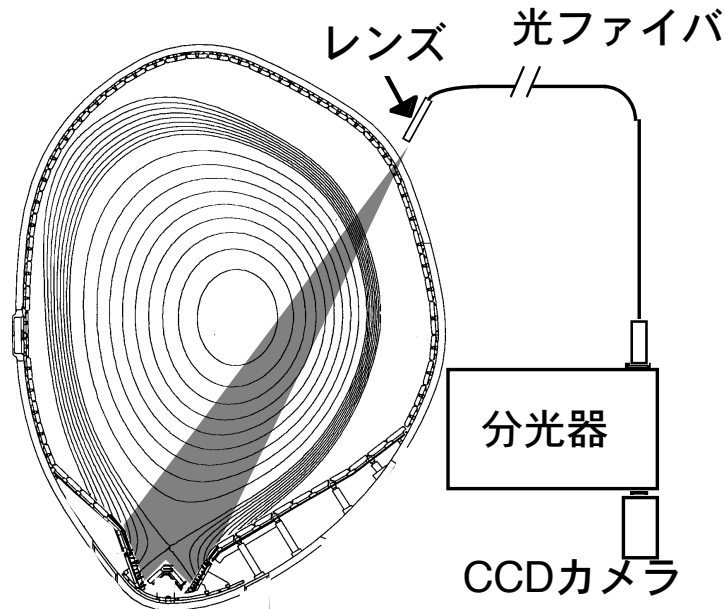
本研究では、非接触プラズマにおいて、水素原子のスペクトルから再結合粒子束および電子温度、電子密度を測定する。



# 分光計測器 (H I スペクトル測定) 静電プローブ測定器 (電子温度、密度測定)

IT-60U

## 可視分光器

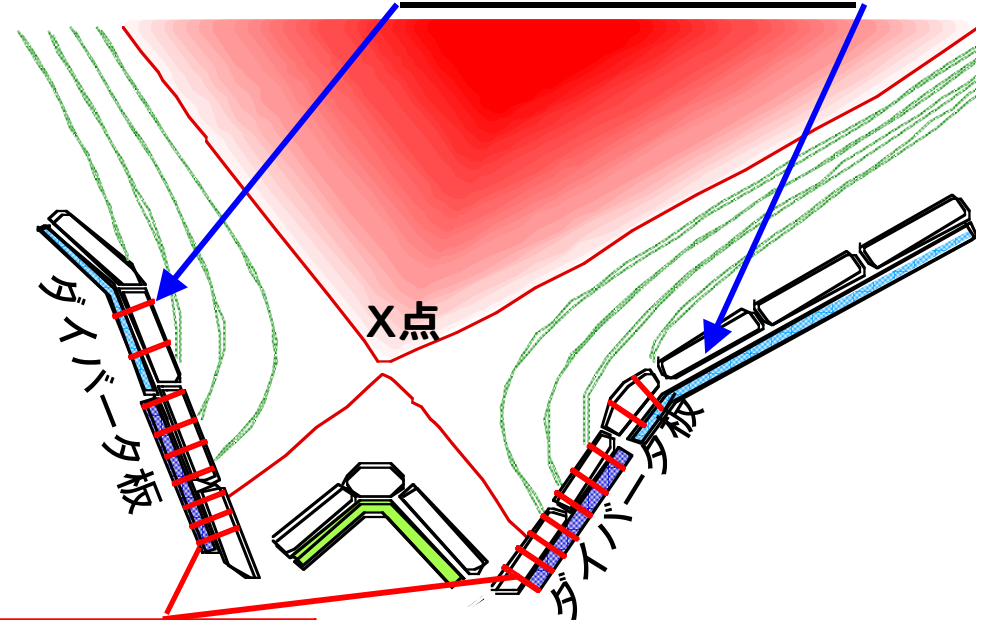


- ・空間分解能 : 1-2cm (16ch)
- ・焦点距離 : 50cm
- ・回折格子 : 600g/mm
- ・スリット幅 : 30 $\mu$ m
- ・CCD素子 : 512x512 pixel (22.5 mm)
- ・時間分解能 : 50ms

## Balmer Series limit; 可視分光器

2ショットで30chを測定  
(空間分解能 ~1-2cm)

H $\alpha$ , CII; 干渉フィルタ付き  
光ファイバアレイ60ch



## 固定静電プローブ

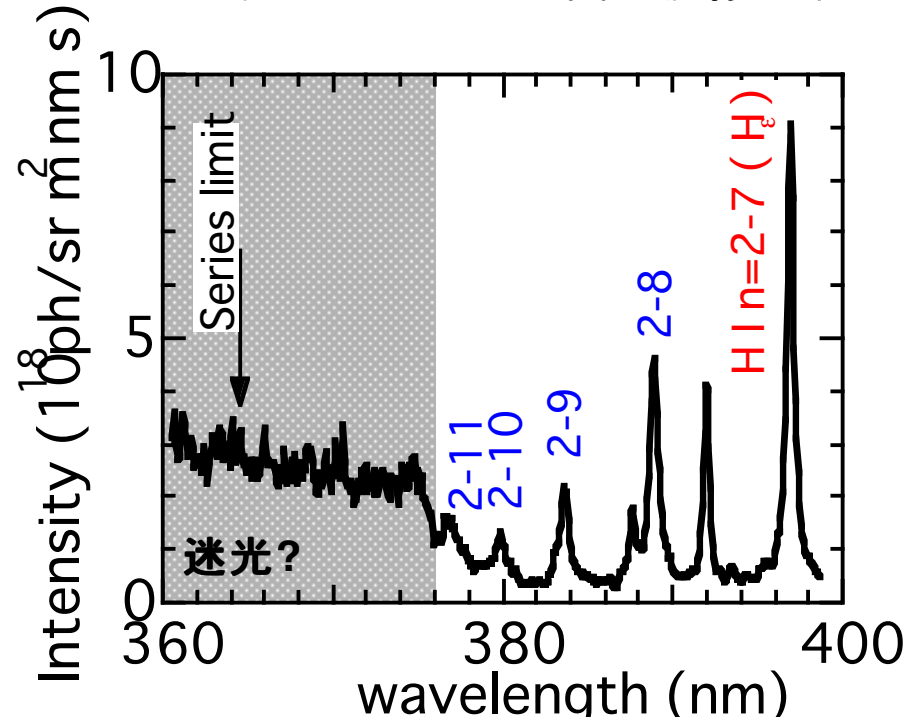
電子温度、電子密度、  
イオン束



# 水素原子のバルマー系列端付近のスペクトル

JT-60U

Marfeが発生時、X点を貫く視線で観測



再結合粒子束：H $\epsilon$ 線強度

電子温度：バルマー系列の線強度比

連続線の強度比

電子密度：連続線強度

スペクトル線幅

線スペクトルから連続スペクトルへの変化  
(Inglis-Tellerの式)

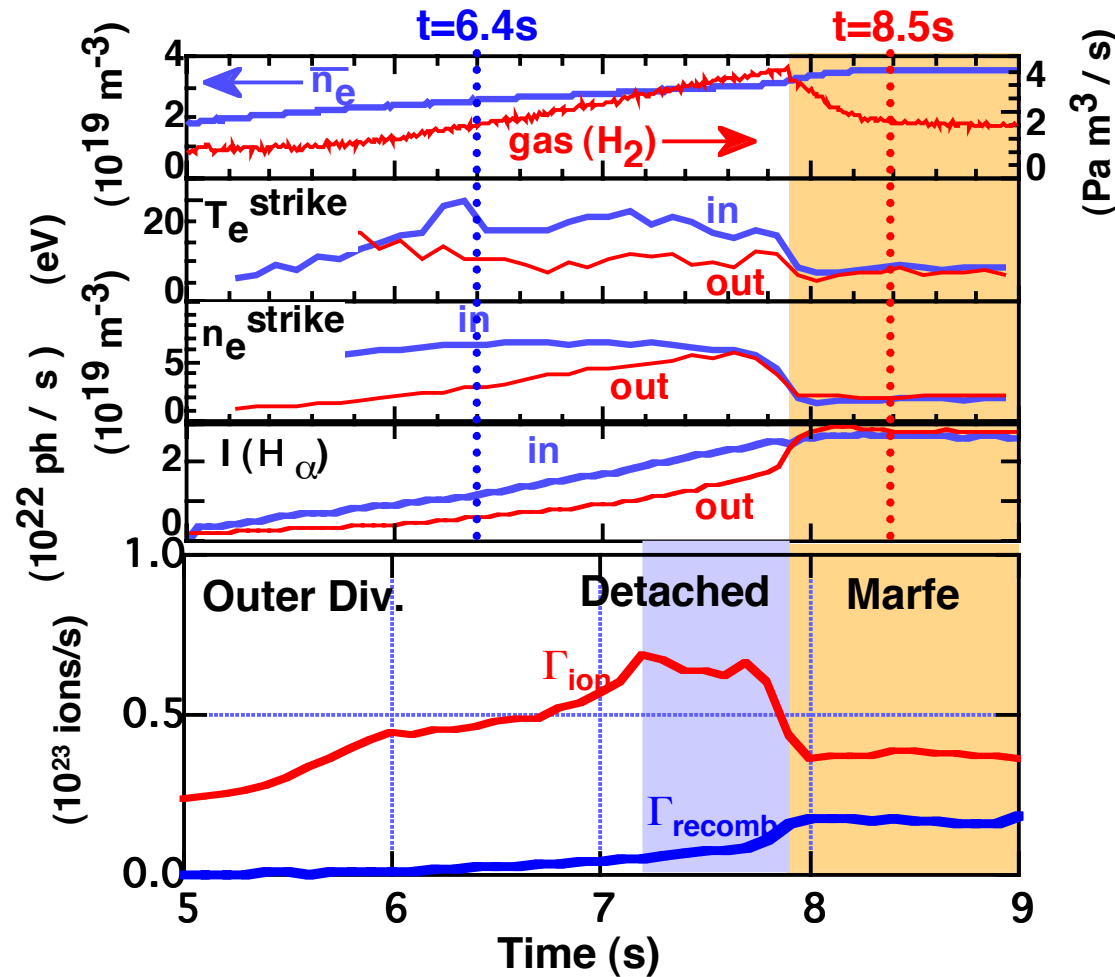




# 放電波形

JT-60U

軽水素放電、プラズマ電流1.5MA、トロイダル磁場3.5T、  
 ビーム加熱パワー~4MW



- 非接触プラズマへの移行  
 外側ダイバータ 7.2s
- X点Marfeの発生 7.9s
- Marfe発生時の再結合束  
 ~ダイバータ板へのイオン束の~40%  
 ~Marfe発生前のイオン束の~1/4  
 ( $\Gamma_{\text{recom}} \sim 135 \times I(\text{H}_\alpha)$ を仮定)



# $H_\alpha, H_\epsilon$ 線放射における電離成分と再結合成分

JT-60U

$$I = \text{再結合成分} + \text{電離成分}$$
$$\propto r_0 n_H^+ n_e + r_1 n_H n_e$$

$r_0$ : 再結合プラズマでの放射係数

$r_1$ : 電離プラズマでの放射係数

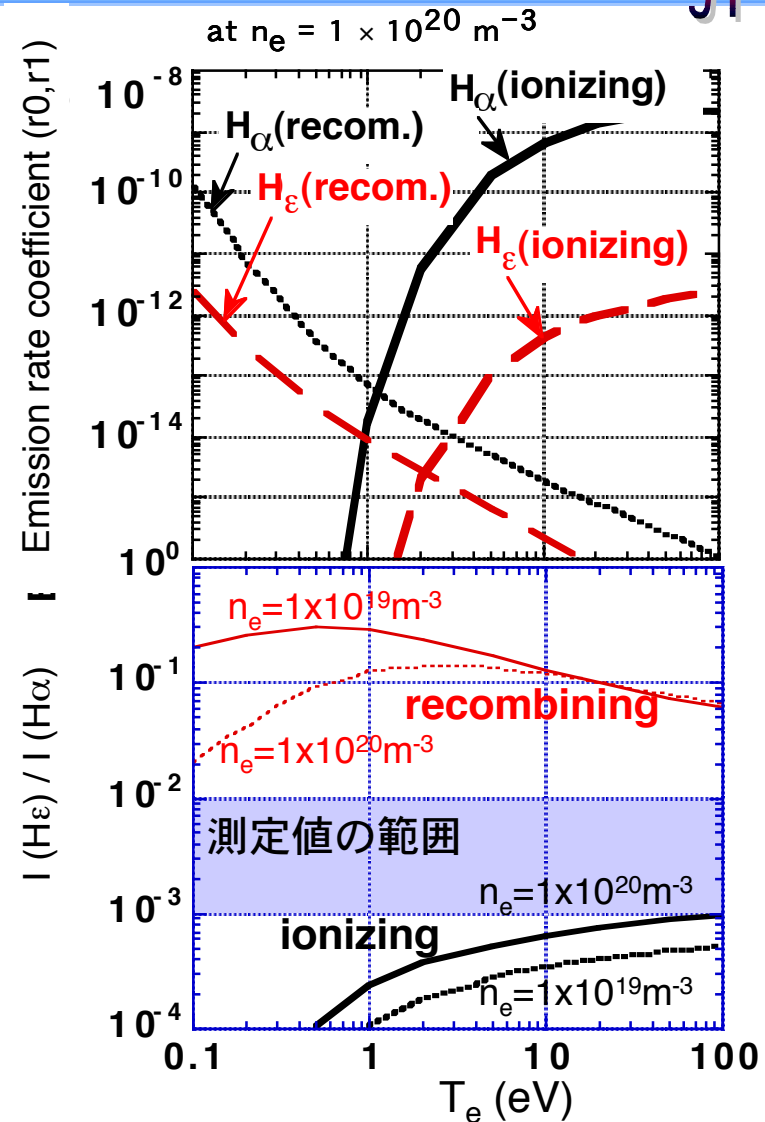
再結合プラズマ ;  $I(H_\epsilon) / I(H_\alpha) \sim 0.1$

電離プラズマ ;  $I(H_\epsilon) / I(H_\alpha) < 0.001$

測定値の範囲 ;  $I(H_\epsilon) / I(H_\alpha) \sim 0.001-0.01$

観測結果は、純粹な再結合プラズマでも電離プラズマでもない。

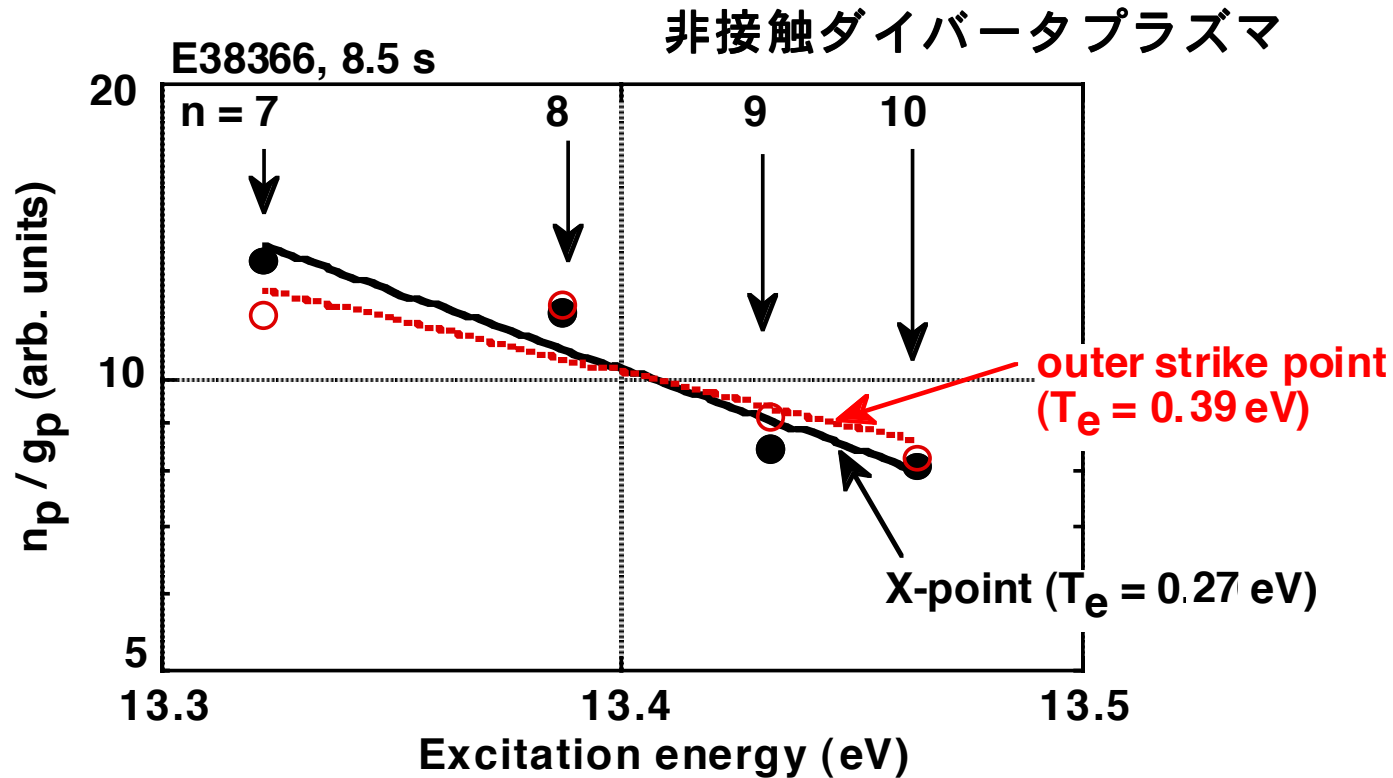
$H_\epsilon$ 線: 再結合成分、 $H_\alpha$ 線: 電離成分





# 主量子数 $n \geq 7$ の励起準位は再結合成分

JT-60U



主量子数 $n \geq 7$ の励起準位はSaha Boltzmann分布



$T_e \sim 0.3 - 0.4$  eVの再結合プラズマ

Saha Boltzmann分布 :  $n_p / g_p \propto \exp(-E_p / kT)$

$n_p$ : 主量子数 $p$ 励起準位の密度

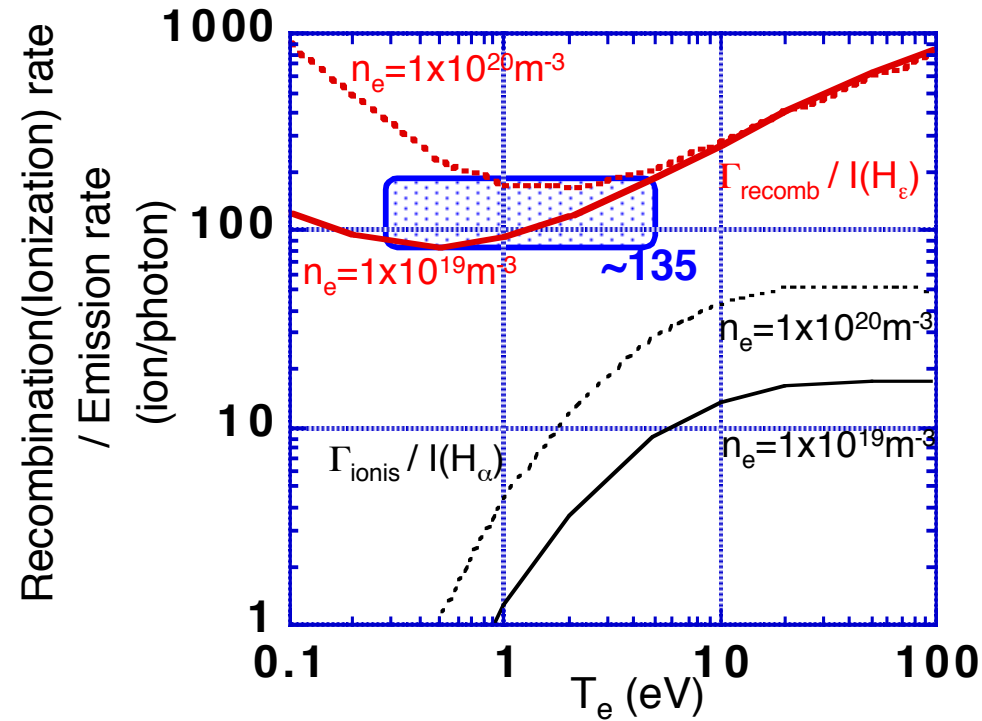
$g_p$ : 主量子数 $p$ 励起準位の統計的重率

$E_p$ : 主量子数 $p$ 励起準位の励起エネルギー



# H<sub>ε</sub>線(n=2-7)の放射と再結合の割合

JT-60U



測定された電子温度密度領域では、  
 $\Gamma_{\text{recomb}} \sim 135 \times I(\text{H}_\epsilon)$



# まとめ（再結合粒子束測定）

JT-60U

## 測定結果

1. X点Marfeが発生したとき（非接触状態）の再結合粒子束(外側ダイバータ)は、  
ダイバータ板へのイオン束の~40%  
Marfeが発生する前のダイバータ板へのイオン束の ~1/4
2. 電子温度 ~ 0.5eV, 電子密度 ~  $3 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$  の低温高密度プラズマ

## 今後の予定

1. 分子過程も考慮した解析  
水素および炭化水素分子の分子活性化再結合  
水素分子スペクトル線  
H $\alpha$ 線プロファイル
2. 2次元中性粒子輸送コード(DEGAS 2)の改造  
励起分子をモンテカルロ計算  
(信州大学、澤田助教授との共同研究)

