

# MAP-II 装置における 非接触ダイバータプラズマ中の 水素負イオンの役割に関する研究

## 発表内容

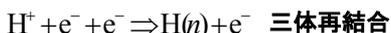
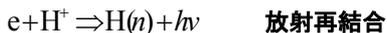
- 研究背景 ダイバータプラズマ中の再結合過程
- 本研究の目的
- 計測原理 (レーザー光脱離法, Fulcher- $\alpha$ 分光)
- 実験結果
- 非接触プラズマ中での負イオン計測の課題
- 課題へのアプローチ

梶田信, 門信一郎<sup>A</sup>, 田中知, MAP-IIグループ  
東大院工, 東大高温プラズマセンター<sup>A</sup>

## 非接触プラズマ中の原子分子過程 EIR & MAR

- ITERクラスの核融合実験炉では**数十MW/m<sup>2</sup>の熱負荷**  
⇒ダイバータ板の損耗
- 熱負荷軽減のために, **デタッチ(非接触)ダイバータ**を採用
- デタッチプラズマの主な物理機構として**体積再結合**

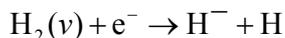
### EIR: Electron Ion Recombination



$$T_e \ll 1 \text{ eV}$$

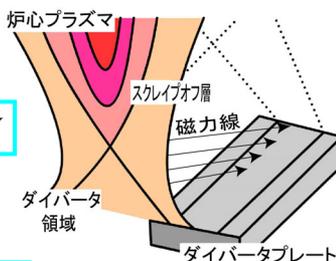
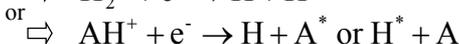
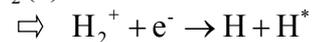
### MAR: Molecular Activated Recombination

解離性付着⇒相互中性化



$$T_e < 2\sim 3 \text{ eV}$$

イオン交換 or 荷電交換⇒解離性再結合



# MAR(Molecular Activated/Assisted Recombination)の研究

## 実験による観測

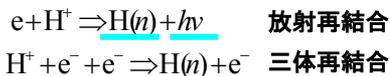
- 1990 M.J. deGraaf et al.  
プラズマジェットにて, ArプラズマにH<sub>2</sub>を加えることにより急激なイオン密度の減少を観測 (1993)
- 1995 Terry, et al.  
Alcator C-Modでライマン系列の発光強度を衝突輻射モデルと比較. n=2, 3がMARによって励起されている. (1998)
- Ohno, et al.  
直線型装置(NAGDIS-II)にて, H<sub>2</sub> puffとHe puff時のイオンフラックス, Heパルサー強度を比較. H<sub>2</sub>導入時にMARによる効果を観測. (1998)
- 2000 M.G.Rusbridge, et al.  
直線型装置(UMIST Linear System)において, イオン飽和電流の急激な減少がMARの効果と同オーダー. (2000)

## 理論研究

- Janev et al.  
H<sub>2</sub>を介した再結合過程を示唆(1984)
- Krasheninnikov, Pigarov, et al.  
H<sup>+</sup>, e, H<sub>2</sub>(ν), H<sub>2</sub><sup>+</sup>, Hのレート方程式を解きMARの影響を評価. MARはEIRの30倍(n<sub>H2</sub>/n<sub>e</sub>~0.1, T<sub>e</sub>=1 eV). (1996)
- Pigarov and Krashennikov  
水素励起原子, H<sub>2</sub><sup>+</sup>の振動励起状態を扱った衝突輻射モデルを構築. (1996)
- Greenland et al  
CRモデルを構築, Pigarovらと同様の結果を確認. (1996)
- Sawada et al  
各振動準位の効果を2つの再結合過程で比較. (2002)

## 非接触プラズマ中の原子分子過程 EIR & MAR

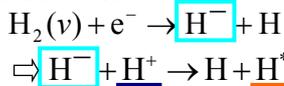
### EIR: Electron Ion Recombination



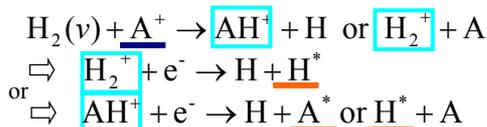
分光計測:  
連続スペクトル  
高励起準位からのスペクトル

### MAR: Molecular Activated Recombination

解離性付着⇒相互中性化



イオン交換 or 荷電交換⇒解離性再結合



静電プローブ:  
急激なイオンフラックスの減少

分光計測:  
特徴的なスペクトルと衝突輻射(CR)モデルとの比較

再結合の介在物となる H, H<sub>2</sub><sup>+</sup>を直接計測

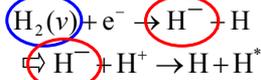
# 研究の目的

非接触プラズマにおける詳しい原子分子過程の理解のために、ダイバータ模擬装置MAP-IIにおいて

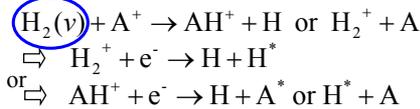
- レーザー光脱離法を用いた**負イオン(H<sup>-</sup>)**計測
- 可視分光(Fulcher- $\alpha$ ,  $d^3\Pi_u \rightarrow a^3\Sigma_g$ )による**水素分子振動励起分布(H<sub>2</sub>(v))**の評価

を行ない、負イオンと振動励起水素分子の振る舞いを調べる。

● 解離性付着⇒相互中性化

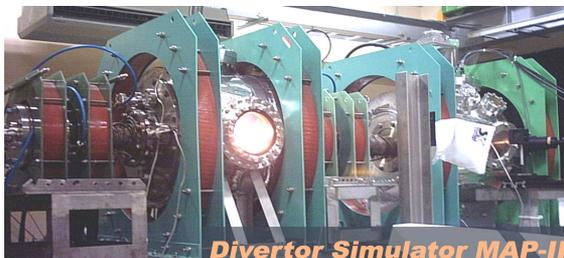
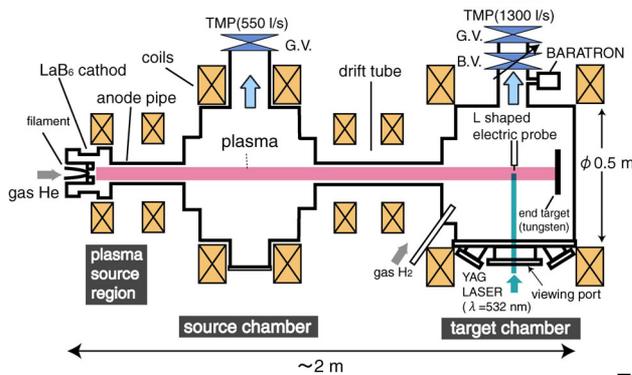


● イオン交換 or 荷電交換⇒解離性再結合



今回は接触プラズマにおける計測結果  
非接触プラズマ計測における課題 を報告

## 実験装置 ダイバータ模擬装置MAP-II

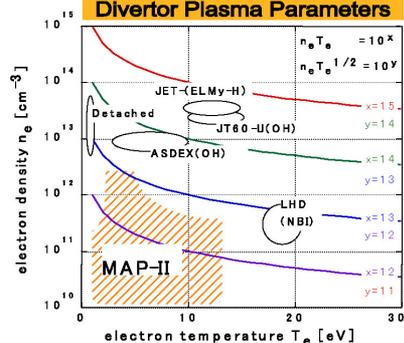


Divertor Simulator MAP-II

### Typical conditions

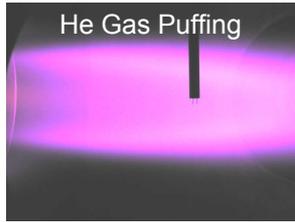
- DC discharge  
discharge voltage(He, H<sub>2</sub>)  
60~110[V]
- discharge current ~45[A]
- Magnetic Field:0.02[T]
- Plasma radius: about 5[cm]
- Gas pressure: 1~10mTorr
- n<sub>e</sub>: 10<sup>11</sup> - 2 × 10<sup>12</sup>[cm<sup>-3</sup>]
- T<sub>e</sub>: < 10[eV]

### Divertor Plasma Parameters

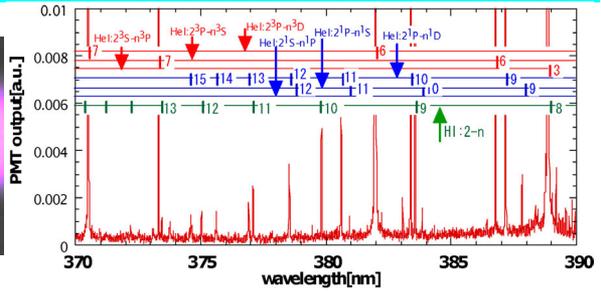


# MAP-IIにおける再結合 EIR & MAR

EIR dominant phase



※H<sub>2</sub>ガスを少量添加

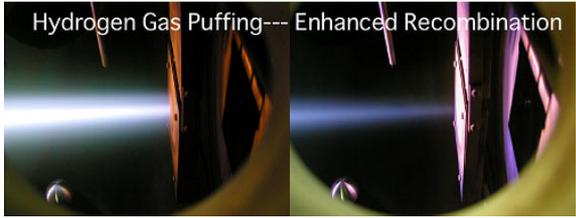


再結合に伴うHe I, H I の高準位からの発光が観測される

H<sub>2</sub> MAR at the target

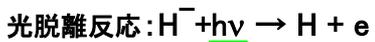


ionizing plasma

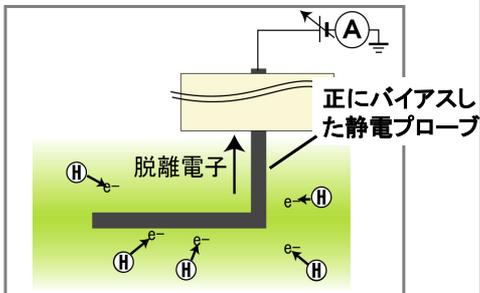


recombining plasma

## H<sup>-</sup> レーザー光脱離法



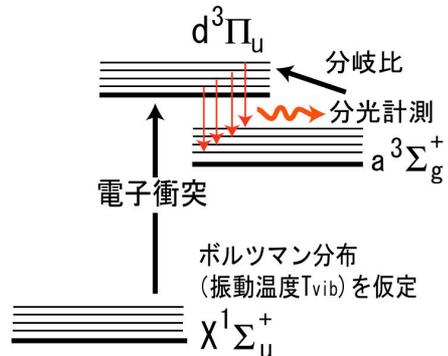
Laser Hの電子親和力: 0.754eV



$$n_- = n_e \frac{\delta I}{I_{es}} \left( 1 - \exp\left(-\frac{W \sigma_{pd}}{S_l h\nu}\right) \right)$$

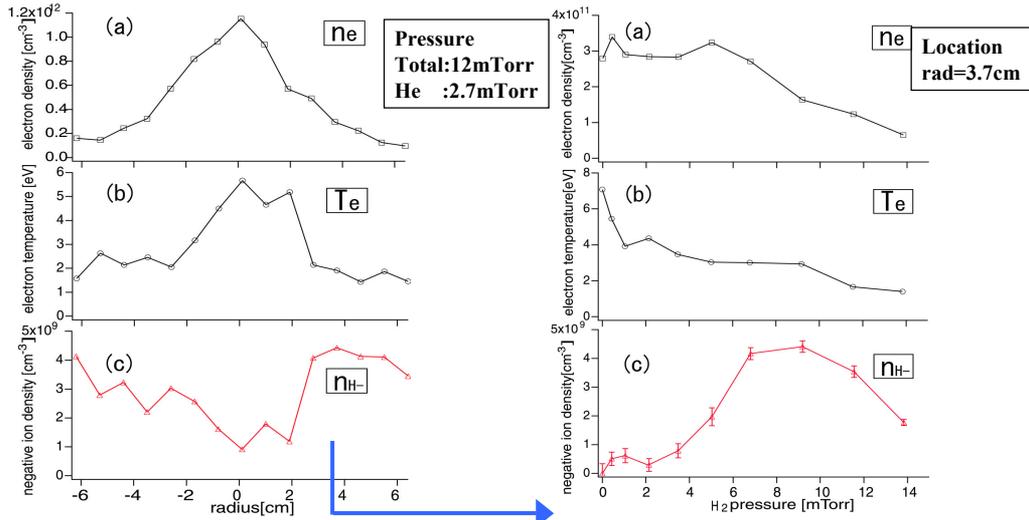
$I_{es}$  : 電子飽和電流.  $W$  : レーザー強度 [J]  
 $\delta I$  : レーザー照射時の  $I_{es}$  の増加分  $\sigma_{pd}$  : 光脱離断面積 [cm<sup>2</sup>]  
 $S_l$  : ビームの断面積 [cm<sup>2</sup>]

## H<sub>2</sub>(v) Fulcher- $\alpha$ 分光法



$d^3\Pi_u$  で Best fit する.  
 $X^1\Sigma_u^+$  の  $T_{vib}$  が得られる.

# 負イオン密度計測 H<sup>-</sup> (径方向分布と圧力依存性)



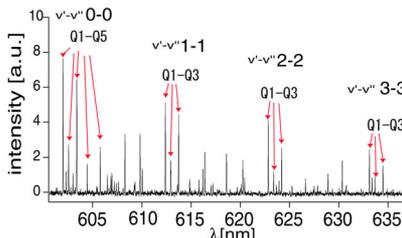
プラズマ径方向分布(実験)

- 負イオン密度は周辺部に局在化したホローな分布
- 負イオン密度は、電子温度の影響を強く受けている

水素圧力依存性(実験)

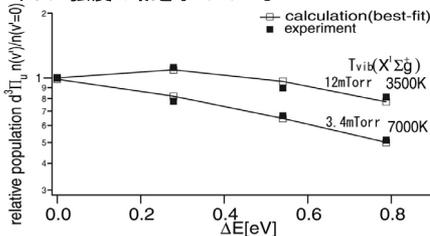
- 負イオン密度は圧力が上昇するにつれて、上昇.
- 10mTorr付近から下降し始める.
- 負イオン密度は電子密度の~2.5%以下

# 振動励起準位計測 (T<sub>vib</sub>の導出と圧力依存性)

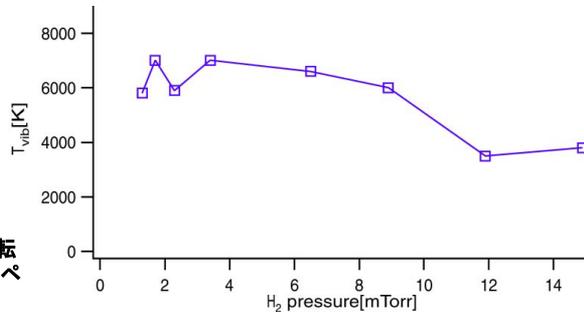


Fulcher-αスペクトルの一例

- 発光強度の強いQ-branchのみを使用。回転分布はボルツマン分布とし、T<sub>vib</sub>を算出しスペクトル強度の和を求めている。



Fulcher上準位(d<sup>3</sup>Π<sub>u</sub>)における相対振動励起分布

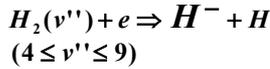


T<sub>vib</sub>の水素圧力依存性.

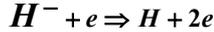
- 6000~7000K(9mTorr以下)
- 10mTorr付近から下降傾向。T<sub>vib</sub>は3500~4000Kまで下降した。

# 負イオンの生成と消滅

生成



消滅



輸送

$$\tau \approx L / C_s$$

レート方程式

$$\frac{dn_{H^-}}{dt} = n_e \sum_{4 \leq v'' \leq 9} n_{H_2(v'')} \alpha_{eH_2} - n_{H^-} (n_e \alpha_{eH^-} + n_{H^+} \alpha_{H^+H^-}) - \frac{n_{H^-}}{\tau}$$

$$C_s \approx \sqrt{\frac{kT_e}{M}}$$

L: plasma diameter 5cm  
(radial loss)

定常状態  $\frac{dn_{H^-}}{dt} = 0$  として、負イオン密度を計算する。

反応速度係数(Reference)

$\alpha_{eH_2}$  : J. W. Wadehara Appl. Phys. Lett. 35(1979)917.

$\alpha_{eH^-}$  : R.K. Janev et al., Elementary Processes in Hydrogen Helium Plasmas (Springer-Verlag, 1987).

$\alpha_{H^+H^-}$  : O. Fukumasa, J. Phys. D, 22(1989)1668.

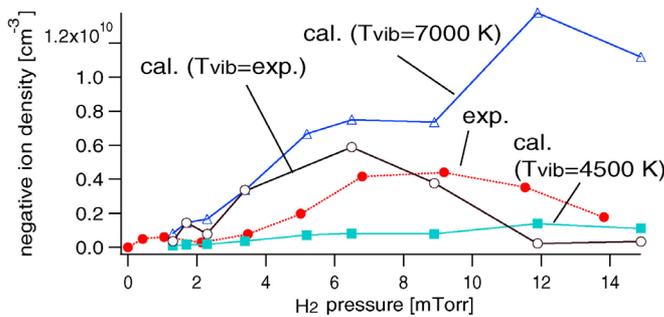
実験値

$n_{H^+} \approx n_e$  Langmuir-probe measurement

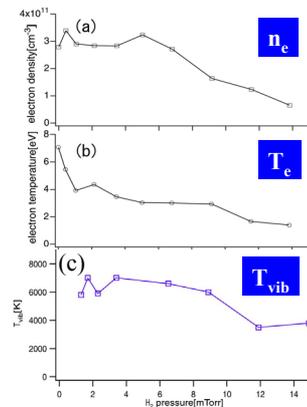
$T_e$

Pressure(BARATRON).  
Measured  $T_{vib}$ .

## 負イオンの圧力依存性 計算と実験の比較



負イオン密度の圧力依存性の実験結果と計算結果 (Tvib=4500K, Tvib=7000K, Tvib=exp.)との比較



0~8mTorr: H増加

振動温度がほぼ一定で水素ガス圧の増加による $H_2(v)$ の密度の増加の影響が大.

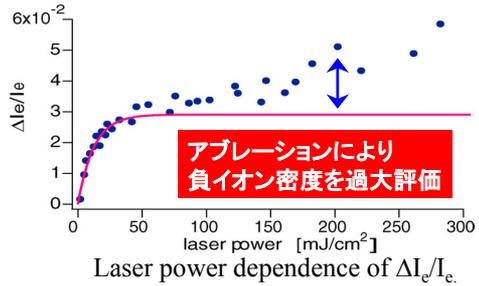
>10mTorr: Hの減少

• $v > 3$ 以上の振動準位分布, 輸送に関する評価の不確定さはあるが, 振動温度  $T_{vib}$ の減少が負イオン密度の減少に大きく影響している.

# 非接触プラズマでの負イオン計測の問題点

## ① 静電プローブ表面のアブレーション

- ・プラズマ中での静電プローブ表面へのレーザー照射
  - ⇒アブレーション
  - ⇒光脱離信号を乱す
  - ⇒負イオン密度の過大評価
- 電子密度が高い条件下で影響大



## ② 電子温度計測の限界

- ・probe anomalyの影響

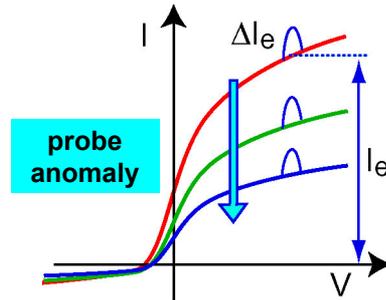
$$\Delta I / I_e = n_- / n_e \quad ?$$

- ・シングルプローブでは電子温度を過大評価してしまう。

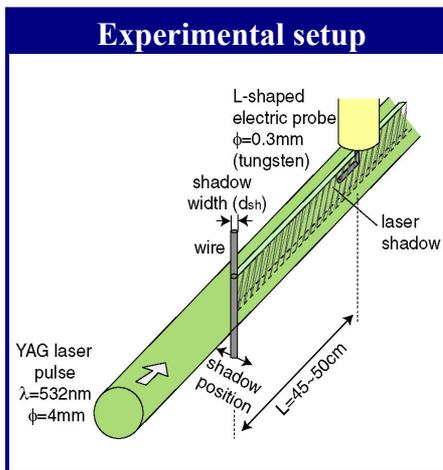
- ⇒負イオン密度の過小評価

$$n_- = n_e \frac{\Delta I}{I_e} = \frac{4I_e(\text{space potential})}{Se} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8kT_e}} \frac{\Delta I}{I_e}$$

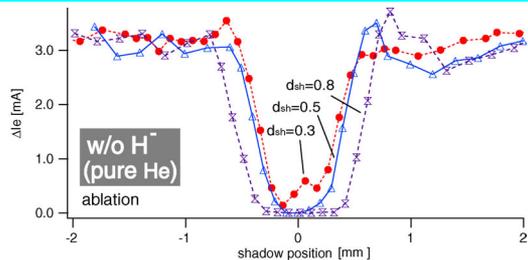
※現在検討中



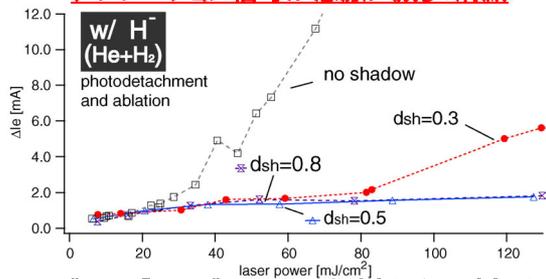
## Eclipse laser photodetachment method



- ・直接的なレーザー照射を避けるために、レーザー光路内にワイヤーを導入しシャドウを形成。



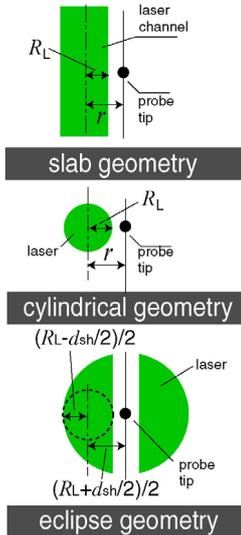
- ・シャドウのアライメントが合った時には、アブレーション信号が急激に減少/消滅。



- ・プローブチップ(0.3 mm)より太いシャドウでは、レーザー強度依存性も飽和。

# 負イオン密度の評価への影響

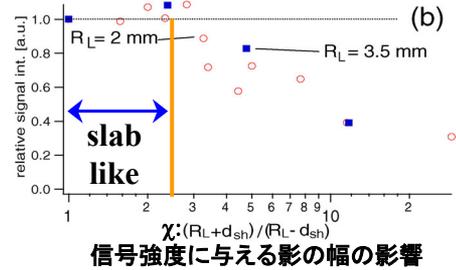
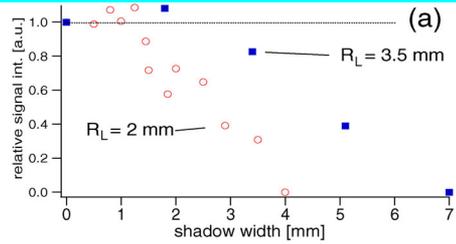
レーザービーム径 $R_L=2\text{ mm}$ ,  $3.5\text{ mm}$ で信号強度の影の幅 $d_{sh}$ 依存性を調べた。



•信号強度の $r$ に対する依存性なし。(減衰しない)

•信号強度は $r/R_L$ に依存。

•cylindricalとslab geometryの間。  
•cylindrical geometryの $r/R_L$ は $\chi: (R_L+d_{sh})/(R_L-d_{sh})$ に置き換わる。



•信号強度は $\chi$ に依存。 $\chi < 2.5$ では信号が減衰しない。 $\chi < 2.5$ を満たす場合には負イオン密度計測に影響しない。

## 結論

- ダイバータシミュレータMAP-IIIにおいて、接触プラズマの条件下で、光脱離法を用いた負イオン密度、Fulcher- $\alpha$ スペクトルから水素分子振動励起分布を計測した。
- 負イオンは径方向にホローな分布を持っており周辺部で負イオン密度:  $\sim 10^9\text{ cm}^{-3}$ 程度存在していた。水素ガス圧依存性では、10mTorr付近まで上昇し、その後下降してゆく傾向を示した。
- 振動温度 $T_{\text{vib}}$ はガス圧が低い場合には6000~7000 Kであったが、ガス圧が10mTorr付近では3500K~4000K程度まで減少していた
- 負イオンのレート方程式を用いて、負イオン密度の変化を評価した結果、増加はガス導入による水素分子密度の増加が効いており、減少には振動温度の減少が影響していることが示唆された。
- 非接触プラズマにおける負イオン密度計測では、静電プローブ表面のアブレーション、電子温度の評価が問題となり、静電プローブ表面のアブレーションを回避するために、レーザー光路中に影を導入するEclipse LPD methodの開発を行なった。
- レーザービームの半径 $R_L$ 、シャドウの幅 $d_{sh}$ とすると磁場強度0.02Tにおいては、 $(R_L+d_{sh})/(R_L-d_{sh}) < 2.5$ を満たす条件下で、レーザーとシャドウのアライメントが合っているときには負イオン密度計測手法として用いることができることを確認した。