QUESTにおける不純物イオン トロイダル回転の多視線分光計測

新居邦亮¹, 四竈泰一¹, 藤川祥亘¹, 花田和明², 図子秀樹², 恩地拓己², 蓮尾昌裕¹

¹京大院工,²九大応力研







九州大学応用力学研究所高温プラズマカ学研究センター 球状トカマク装置QUEST (Q-shu University Experiment with Steady State Spherical Tokamak)



(https://www.triam.kyushu-u.ac.jp/QUEST_HP)

装置サイズ 高さ:6.6 m 幅 :5 m



プラズマ中心値

Electron temperature (eV)	800
Electron density (m ⁻³)	1.0×10^{17}
Magnetic field (T)	0.16





 QUESTにおいては高温タングステン壁を導入し、 リサイクリング率の増加した状態で 粒子を制御することが目的の一つである.



- 周辺プラズマにおける圧力とイオンの トロイダル回転との関係を解明することを目指す.
- 不純物イオンのトロイダル回転を計測することで 水素イオンのトロイダル回転を推定.







2.多視線分光計測

3.逆変換法





- 2.多視線分光計測
- 3.逆変換法

多視線分光計測システム









最外殻磁気面	・ジュール加熱を重畳した8.2 GHz ECR加熱		
$\begin{array}{c} \cdot & \cdot $	・ガスパフ量を変化さ	させた3種類の放電を言	十測
	水素圧力P (mPa) (真空容器内壁付近)	プラズマ電流I _p (kA) (定常)	露光時間 (s)
$\begin{array}{c} \cdot \\ \cdot $	0.05	-30	0.7
	0.1	-30	0.7
	0.6	-30	0.35
L) Z 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	十測領域	(100)	466 468 470 472 472 wavelength (nm)
		視線10	で計測したスペクトル

計測





・ジュール加熱を重畳した8.2 GHz ECR加熱

・ガスパフ量を変化させた3種類の放電を計測

水素圧力 <i>P</i> (mPa) (真空容器内壁付近)	プラズマ電流I _p (kA) (定常)	露光時間 (s)
0.05	-30	0.7
0.1	-30	0.7
0.6	-30	0.35
C^{2+} (464.7418) (2s3s ³ S ₁ → 2s3p)	$\frac{200}{3P_2^{\circ}} \xrightarrow{H} 100$	
$\begin{array}{c} O^{+} & (464.1810) \\ (2p^{2} ({}^{3}P) 3s {}^{4}P_{3/2} \\ \end{array}$		
$\rightarrow 2p^2(^{3}P)3p^{-4}D_{5/}^{0}$	(₂) 405.5 404	wavelength (nm)
	視線10)で計測したスペクトル

8





2.多視線分光計測

3.逆変換法





発光線の広がりは ドップラー広がりが支配的

→局所的な発光線はガウス関数

 $g(\varepsilon,T,V)$

- $\varepsilon \rightarrow$ 発光強度 [W/(sr · m³)] T → 温度 [eV]
- $T \rightarrow$ 温度 [eV] $V \rightarrow$ トロイダル回転速度 [m/s]

計測される発光線は 局所的な発光線の視線積分値



シェルモデル

計測領域を視線数に相当する14の領域(シェル)に分割し, 各シェル内でイオンの発光強度,温度,速度が一定だと仮定

シェル1のパラメータ ε_1, T_1, V_1 \rightarrow 視線1で計測される発光線形状

$$I_1(\lambda) = \int_{s11} g(\varepsilon_1, T_1, V_1) \,\mathrm{d}s$$







+ $\int_{s22} g(\varepsilon_2, T_2, V_2) \,\mathrm{d}s$ — $I_{22}(\lambda)$ $I_{22}(\lambda)$ の式をフィッティング

・視線3,視線4,…に順次行い,各シェルの発光強度,温度,トロイダル回転速度を求める





- 発光強度が内側ほど大きい場合,外側シェルのパラメータ誤差が内側シェルの パラメータ決定に与える影響が小さく,この方法により短い計算時間で逆変換が可能
- ・QUESTプラズマ中イオンの発光強度,温度,速度を青線のように仮定
- ・各視線で計測される視線積分スペクトル
 +実際の実験データと同程度のノイズ
 →視線1におけるS/N = 10 (C²⁺), 3 (O⁺)







2.多視線分光計測

3.逆変換法





※発光強度の小さい領域(シェル2, 3, 4)ではシェルを統合した

✓ 発光強度

- ・最外殻磁気面より内側で大きく増加
- ・磁気軸(R = 600~640 mm)とセンタースタック(R = 225 mm)でピークを持つ

✓ 温度

14

・各圧力で一定となる傾向









「オーミック放電 →プラズマ電流方向
 ・炉心部における流れ
 ECR放電 →逆電流方向(実験)

・スクレイプオフ層では圧力変化に伴い,流れ方向の反転が見られる

14

スクレイプ層における速度







- ・ $E \times B$ ドリフト, $B \times grad B$ ドリフトは全条件下でプラズマ電流方向
- ・磁力線に沿ったイオン圧力勾配とドリフトのバランスが変化

→圧力変化に伴い,流れ方向が反転

15







電子衝突による電離により, イオンが失われるまでの時間

異なる温度(マクスウェル分布)を持つ2種類のイオンの クーロン衝突でのエネルギー移動による平均運動エネルギー(温度)の緩和時間

C²⁺とO⁺の比較





P = 0.1 mPaの放電におけるC²⁺とO⁺の各パラメータを比較



・温度,トロイダル回転速度はC2+とO+で同じ傾向となっている

→ C²⁺とO+は共に水素イオンの温度,トロイダル回転速度を反映している





- ・14本の視線を用いてQUESTプラズマを計測した.
- ・逆変換法を構築し、計測データに適用することで C²⁺とO⁺のトロイダル回転を計測した.
- ・圧力変化に伴うトロイダル回転速度の変化が計測された.
- ・不純物イオンの温度,トロイダル回転速度が水素イオンのものを 反映していることを確認した.







Appendix

装置詳細





分光器 : ツェルニ・ターナー型, 波長分解能(半値全幅) → 22 pm~55 pm





波長較正を行った後の CCDのピクセル番号550に対応する波長



波長の時間変化

~0.5 pm

```
 → ~ 350 m/sの速度に相当
 (昨年のデータでは ~ 2 km/s程度)
```

イオン圧力勾配







- ・炉心部から拡散により周辺部へ出た イオンは開いた磁力線に沿って リミタに向かって流れる
- ・中央平面上に存在するイオンを計測

→圧力勾配による流れの停留点が 上下にずれると計測される速度の 向きが変わる