

研究課題：バルク荷電交換分光による水素／重水素比の空間分布計測

研究代表者：居田克巳（核融合科学研究所）

量研機構担当者：吉田麻衣子

研究協力者：吉沼幹朗（核融合科学研究所）、山崎広太郎（九州大学応用力学研究所）、  
小林達哉（核融合科学研究所）

研究期間：平成 28 年度-30 年度

### 「研究目的・意義」

本研究の目的は水素ラインの荷電交換分光成分（アクティブ H アルファ 652.8nm）と重水素ラインの荷電交換分光成分（アクティブ D アルファ 656.1nm）の波長差（0.18nm）を利用して、水素／重水素比を求める計測方法の開発である。この計測を大型ヘリカル装置（LHD）における重水素実験に応用して本計測法の妥当性を検証し、JT-60SA での計測条件を提案する。具体的には、以下の検討を行う。1）観測スペクトルから水素／重水素比を算出する解析法の開発、2）荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による波長補正值と不純物とバルクの速度差の推定、3）JT-60SA での水素／重水素比計測に向けた視線の検討。

### 「研究方法」

バルク荷電交換分光で計測された水素ライン（652.8nm）と重水素ライン（656.1nm）の荷電交換分光成分（高温成分）は受動発光成分（低温成分）の 10 分の 1 程度の強度である。従って、中性粒子ビームにオン・オフのモジュレーションを使って、ビームオンのスペクトルからビームオフのスペクトルの引き算（バックグラウンド差し引き）を行っても、現状では低温成分が残ってしまう。そのために、バックグラウンドを差し引かずスペクトルを水素と重水素の高温成分と低温成分の 4 つのガウス分布でフィットから、水素と重水素の荷電交換分光成分（高温成分）の比を算出する手法を開発する。ガウス分布のフィッティングパラメータは全部で 12 個となるので、安定な解を得るためには、フィッティングパラメータを少なくする必要がある。本研究では、炭素の荷電交換で計測したプラズマ回転速度を利用することで、フィッティングパラメータを 5 個に減らして解析し、水素と重水素の荷電交換分光成分（高温成分）の強度比を算出し、そこから水素と重水素の密度比を求める。

### 「研究成果」

1) 観測スペクトルから水素／重水素比を算出する解析法の開発

低温成分が 2 つのピークに分離できるだけの波長分解を得るために、高分解能の分光器を用いて、分光器スリットを 50 ミクロンに絞り装置幅 (FWHM) を 0.056nm にして計測を行った。対象としたプラズマは、中心電子密度  $3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、中心イオン温度 2 keV の放電である。図 1 はバルク荷電交換分光で計測した H アルファ D アルファ線のスペクトル分布とフィットした 4 つのガウス分布を示す。ここでは、水素と重水素の高

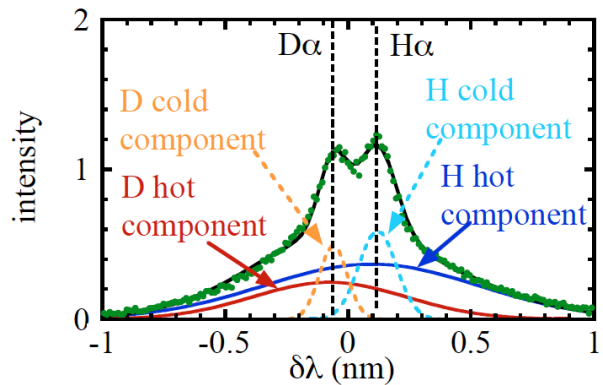


図 1. バルク荷電交換分光で計測した H アルファ D アルファ線のスペクトル分布

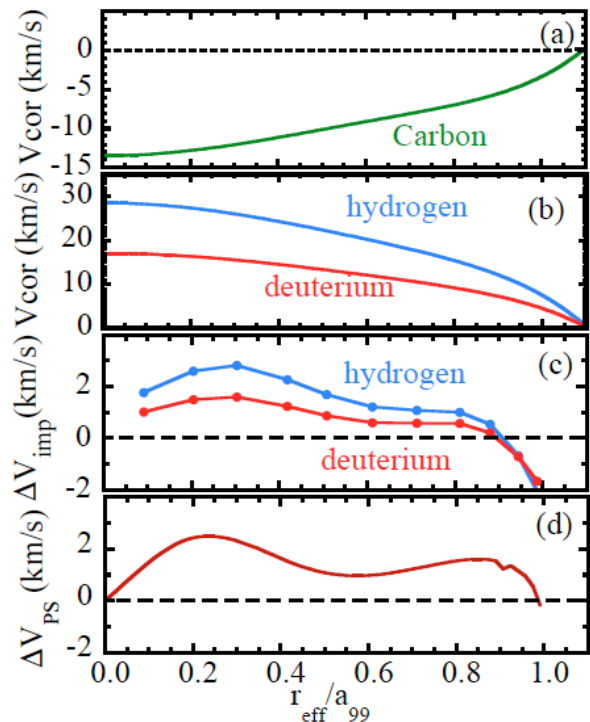


図 2. (a)炭素と(b)水素/重水素の荷電交換断面積補正速度。(c)不純物とバルクイオンの速度差 (d)フィルシュ・シュリューター流の速度差

温成分と低温成分の高さとイオン温度（水素と重水素は共通）をフリーパラメータとしている。水素と重水素スペクトルのドップラーシフトは、炭素の荷電交換分光で計測したプラズマ回転速度から、荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による波長補正值と不純物とバルクとの速度差を考慮して求めている。水素の量が増えるとスペクトル分布の非対称が強くなり長波長側に裾野が伸びるので、ビーム発光成分が短波長側に来るようにビームラインに対して60度傾けた視線を選んでいる。

2) 荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による波長補正值と不純物とバルクとの速度差の推定

図2に荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による炭素と水素・重水素の速度の補正值と不純物とバルクの磁気面平均速度の差 ( $\Delta V_{imp}$ ) とフィルシュ・シュリューター流速の差 ( $\Delta V_{ps}$ ) の空間分布を示す。荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による補正值は 15 - 30 km/s で、不純物とバルクとの速度差 (2 - 3 km/s) に比べ桁程度大きい。従って、荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による補正值を正確に評価することが重要であることが分かった。

図3は炭素の荷電交換で計測したプラズマ回転速度と図2で求められた補正を行なって求めた重水素割合（重水素密度を水素密度と重水素密度の和で割ったもの）の空間分布である。不純物とバルクとの速度差の影響は小さく、バルク荷電交換分光計測のばらつきに比べ無視できる程度である。炭素の荷電交換で計測したプラズマ回転速度には、分光器の波長絶対値の不確定性に起因する速度のオフセットがある。この速度オフセットは分光器の波長安定性により変化するが、LHDでは 5 km/s 程度である。（図2にはこの速度オフセットによる誤差は表示されていない。）この速度オフセットの重水素割合への影響を示したものが図4である。10 km/s のオフセットに対して、重水素割合が 0.08 変化している。従って、炭素プラズマ回転速度計測のオフセットを正確に求めることが極めて重要であることが分かった。

3) JT-60SA での水素/重水素比計測に向けた視線の検討

以上の結果から、JT-60SA での計測に応用する際に重要となるポイントをあげる。1) 速度オフセットの変化を最小にするために、波長安定性に優れた分光器（例えば波長固定型の透過型回折格子分光器）を採用する。2) 低温成分が2つピークに分離できるだけの波長分解を得るために装置幅 (FWHM) を 0.06nm 以下にする。3) ビーム発光成分が青方側に来るようにビームラインに対して60度傾けた計測視線を配置する。4) 荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による波長補正值を正確に評価するためには、同一点においてビームの上流と下流に傾けた2つの視線を配置する。5) 炭素プラズマ回転速度計測のオフセットを正確に評価するためには、同一点において co 方向と counter 方向の2つの視線を配置する。以上の5点に留意して JT-60SA のシステムを検討するのが望ましい。

まとめ

本研究では、高分解能の分光器を用いて、観測スペクトルを水素と重水素の高温成分と低温成分

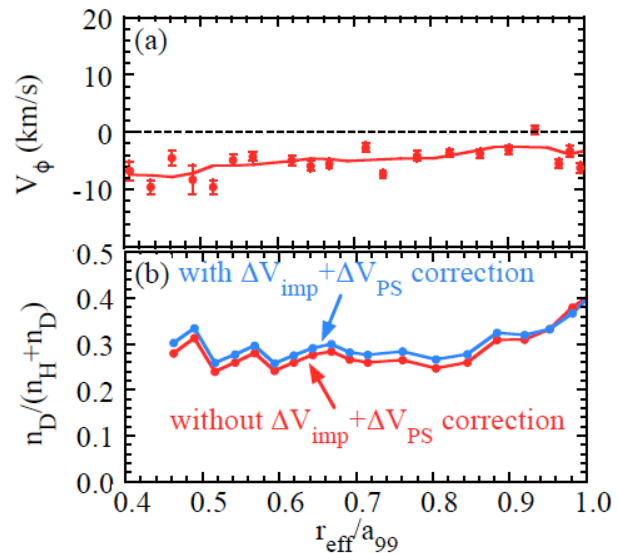


図 3. (a)炭素のトロイダル回転速度と(b)重水素割合の空間分布

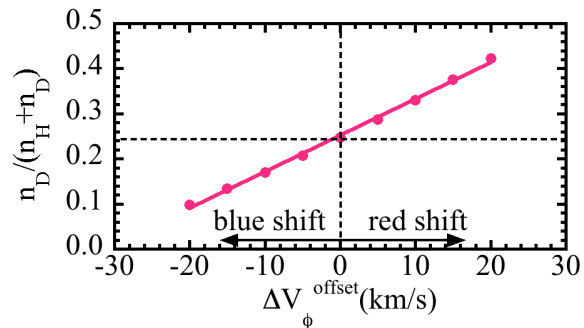


図 4. トロイダル回転速度のオフセットによる重水素割合の変化

の4つのガウス分布でフィットすることで、水素/重水素比を計測する解析手法を LHD において開発した。鍵となる荷電交換反応断面積のエネルギー依存性による波長補正值と不純物とバルクの速度差を評価し、また最適な視線を導き出した。LHD での結果を基に、JT-60SA での水素/重水素比計測に向けた視線を提案した。

成果リスト (2019 年度発表予定も含む)

論文発表

- 1) K.Yamasaki, K.Ida, et. al., "Observation of the Spatial Profile of Deuterium/Hydrogen Ratio Using Bulk Charge Exchange Emission", Plasma Fusion Res. 13 (2018) 1202103.
- 2) J.Chen, K.Ida, et. al., "Effect of energy dependent cross-section on flow velocity measurements with charge exchange spectroscopy in magnetized plasma" Phys. Lett. A 383 (2019) 1293.
- 3) K.Ida, et. al., "Isotope effect on impurity and bulk ion particle transport in the Large Helical Device", Nucl. Fusion, 59 (2019) 056029.
- 4) K.Ida et. al., "Verification of carbon density profile measurements with charge exchange spectroscopy using hydrogen and deuterium neutral beams", Plasma Fusion Res. 14 (2019) 1402079.
- 5) K.Ida, et. al., "Measurements of radial profile of hydrogen and deuterium density in isotope mixture plasmas using bulk charge exchange spectroscopy", Rev. Sci. Instrum. submitted.
- 6) K.Ida, et. al., "Observation of isotope separating and mixing states in the Hydrogen-Deuterium mixture plasmas", Phys. Rev. Lett. to be submitted.

国際会議発表

- 1) K.Ida, et. al., Isotope effect on impurity and ion particle transport in Large Helical Device<sup>2nd</sup> International Workshop on LHD Deuterium Experiment, 8<sup>th</sup> February, 2018, National Institute for Fusion Science, Toki, Japan (oral)
- 2) K.Ida, et. al., "Effect of isotope mass on bulk ion particle transport in isotope mixture plasma" 23rd Joint EU-US Transport Task Force Meeting 11<sup>th</sup> – 14<sup>th</sup> September 2018 Seville Spain (poster)
- 3) K.Ida, et. al., "Isotope effect on impurity and bulk ion particle transport in the Large Helical Device", 27th IAEA Fusion Energy Conference 22<sup>nd</sup> – 27<sup>th</sup> October 2018, Ahmedabad, India (oral)
- 4) K.Ida, et. al., "Observation of isotope separating and mixing states in isotope mixture plasmas in LHD" 22<sup>nd</sup> International Stellarator and Heliotron workshop 23-27 September 2019 Madison, U.S.A. (oral) 予定
- 5) K.Ida, et. al., "Observation of isotope separating and mixing states in isotope mixture plasmas in LHD" 61<sup>th</sup> APS-DPP Fort Lauderdale, 21-25 October 2019 Fort Lauderdale, U.S.A. (invited) 予定

国内会議発表

- 1) K.Ida, et. al., "Measurements of radial profile of isotope (H and D) density using bulk charge exchange spectroscopy in the Large Helical Device" 多種粒子系からなる燃焼プラズマ特性の理解に向けたトロイダルプラズマの閉じ込め・輸送に関する研究会、平成 30 年 12 月 12 日～14 日 核融合科学研究所 (口頭発表)