

8. LHD周辺プラズマにおける水素原子・分子輸送機構の解明

構成員

分担責任者	藤本孝	京都大学大学院工学研究科
参加研究者	岩前敦	京都大学大学院工学研究科
	安宅誠	京都大学大学院工学研究科
	坂上篤史	京都大学大学院工学研究科
	澤田圭司	信州大学工学部
	後藤基志	核融合科学研究所
	片井隆志	核融合科学研究所
	森田繁	核融合科学研究所

はじめに

磁場閉じ込めプラズマにおいて、周辺領域における中性水素原子・分子は、粒子リサイクリングを通してプラズマ全体の粒子バランス・エネルギーバランスに重要な役割を担っている。水素原子・分子の電離・再結合・解離等の反応や空間的な流れなどの詳細な情報はプラズマの密度・温度分布、H-モードなど主プラズマの研究を深めるためにも不可欠であり、長時間放電ではとくにリサイクリングの理解が重要となる。しかしながら周辺部の水素原子・分子の挙動やプラズマパラメータ等は十分に明らかにはなっていない。

ヘリウム原子については、後藤・森田が Hel 728.1 nm 発光線スペクトルのゼーマンプロファイルから視線 2ヶ所の発光位置と視線方向相対速度を決定した[1]。水素原子バルマー線は、プラズマ中磁場構造が複雑なために偏光を分けず測定ではそのゼーマン・パターンが分離されなかったが、LHD 赤道面近傍の1視線において偏光を分けることでゼーマン・パターンが分離計測された[2]。プラズマ中磁場パラメータと組み合わせることによってバルマー線の発光位置、原子温度、プラズマ中心方向への移動速さが決定された。荷電交換衝突の結果と思われる高温成分のほかに、トーラス内側、外側ともに低温、中温の2成分が同定された。後者は水素分子ないし分子イオン起源であることが示唆された。

研究目的

ポロイダル断面全体を計測する複数の偏光分離観測視線を設け、各視線で観測されるプロファイルと発光線上準位原子密度の計測から周辺プラズマ原子流束を決定し、加えて中性粒子輸送コードによるそれらの実験結果の解析を通じ水素リサイクリングについての知見を得る。

実験方法

グラントムソプリズムを用いた偏光分離光学系(図 8-1)を製作した。偏光分離光学系により紙面垂直方向の偏光は直進し、紙面に平行な偏光は 45 度方向に反射され側面に射出される。10本の偏光分離光学系を LHD 1-O ポートに設置した。それらの視線はポロイ

ダル断面を覆う(図 8-2)。プラズマからの発光は偏光分離光学系・レンズ・光ファイバー(400 μm コア径 24 本)を通じ LHD 本体室のツェルニータナ分光器(McPherson209 焦点距離 1.3m 回折格子 1800 本/mm)に導入した。光ファイバーの 1 本に水素もしくはヘリウム放電ランプからの発光を導入し波長標準とした。光学系は計測シリーズ毎に絶対感度較正を行った。また、8-O ポートに 2 本の偏光分離光学系を設置し 0,45,90,135 度の偏光方向に分け、NBI の水素原子 Motional Stark 効果(MSE)によるバルマー線のスペクトル形状を計測した。1-O ポートではヘリウム・水素原子からの発光線のほかにアルゴンの多価イオンからの磁気双極子遷移による発光線プロファイルを観測した。

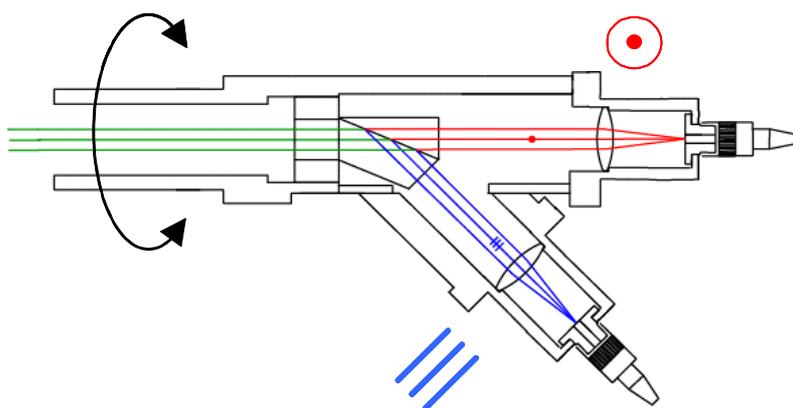
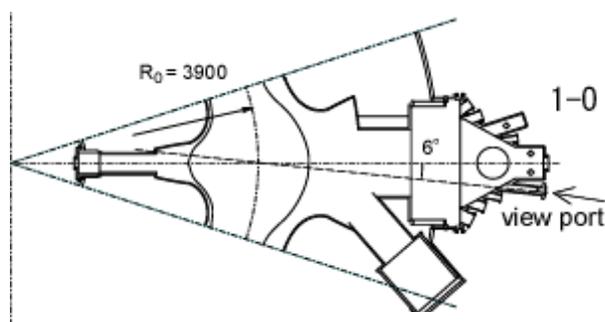
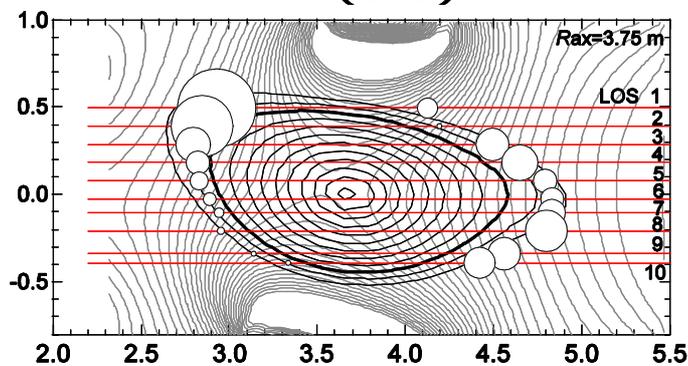


図 8-1 グラントムソンプリズムを用いた偏光分離光学系



(8-2a)



(8-2b)

図 8-2 LHD 1-O ポートに設置した偏光分離光学系

結果・考察

NBI1号機から入射された水素原子H α 線のMSEスペクトルは2つのイオン源による高速原子の寄与から成る。観測スペクトルプロファイルはプラズマ中での磁場配位と励起状態原子密度分布からほぼ再現できた。発光線強度の σ 成分に上準位のポピュレーション分布が等方的でない可能性が見出された。それを調べるためにNBIのイオン源を一つのみ動作させ中性粒子ビームのエネルギーを変えて主プラズマに入射し、H α 線のMSEスペクトルを計測した。その結果をもとに、プロトン衝突によるアライメント生成の可能性を定量的に評価する予定である。

ヘリウム放電に対し250ms毎にスペクトルを観測した。図8-3に視線5の位置で記録した発光線HeI λ 667.8nm(2^1P-3^1D)を示す。露光時間は231msである。図中左上の丸中の線は偏光方向を、縦線は667.81516nm(2^1P-3^1D)の波長位置を表している。放電ショット番号52105は逆磁場配位 $B = -2.640$ Tでありポロイダル外側では磁場は向かって左上から右下方向を、内側では左下から右上方向を向いている。図8-3上では外側位置での発光線 σ 成分と内側位置での π 成分が主な強度成分として観測され、下図には外側位置での発光線 π 成分と内側位置での σ 成分が主な強度成分として観測されている。図8-3上の光の中心波長がわずかに赤方に遷移していることから外側の原子集団は観測者から遠ざかる方向(プラズマ中心方向)に向かい、下の光の中心波長が青方に偏移していることから観測者に向かう方向(プラズマ中心方向)に向かっている。対応する σ 成分の波長位置を中心に σ 光2本の波長分離距離は発光位置の磁場強度に比例する。

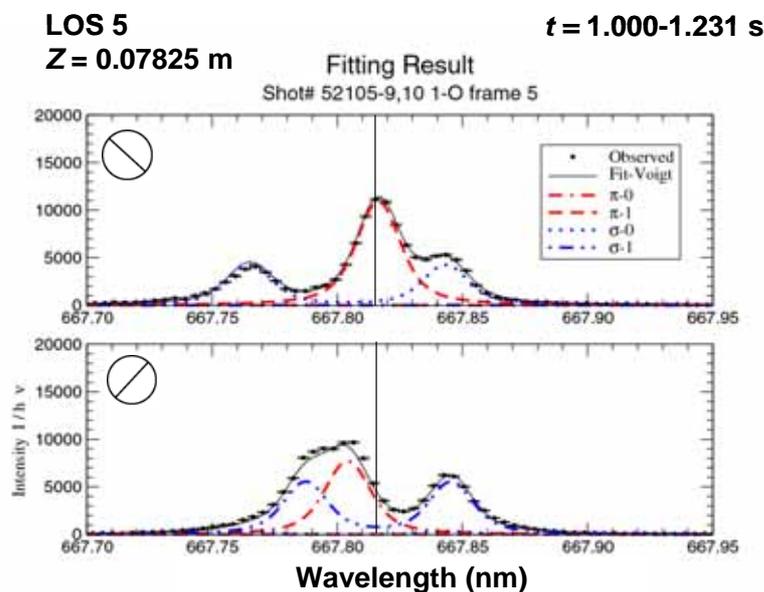


図 8-3 ヘリウム放電に対するスペクトル

He I 発光線プロファイルは一温度のガウシアンで表せない。Voigt プロファイルを仮定し、視線上の2ヶ所での発光位置を、磁場データを基にした最小自乗あてはめにより決定した。発光位置は内側 $R_{in} = 2.83$ m、($B_{in} = 1.88$ T)外側は $R_{out} = 4.79$ m、($B_{out} = 1.40$ T)と求ま

った。視線 1 - 10 での最小自乗あてはめの結果をまとめた(図 8-4)。円の直径は線積分がピュレーションに比例し、矢印の長さは視線方向速度成分を表す。同時刻のプラズマの映像も示されている。放電時間 3 秒の間の 12 枚の発光位置マップが得られた。

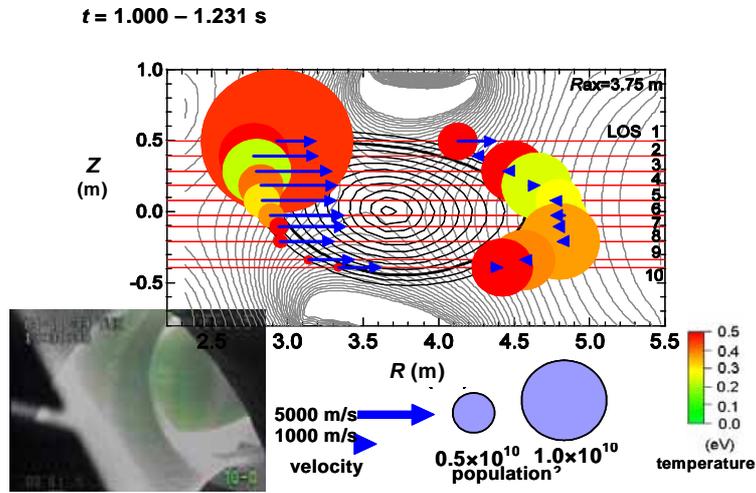


図 8-4 視線 1 - 10 での最小自乗あてはめの結果

H 線の偏光分離スペクトルを図 8-5 に示す。左・右図がそれぞれショット番号 52148 , 41292 である。各ゼーマン成分のスペクトル拡がりには左図 52148 の方が大きい。FIR による線平均電子密度は 52148, 41292 それぞれ 6.5×10^{19} , $1.1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であった。ゼーマン分離したスペクトル線のシュタルク広がりを定量的に検討中である。52148 はポロナイゼーションの翌日に得られたスペクトルであり、図 8-5 はリサイクリング粒子の状態(原子か分子、放出エネルギー)が壁表面の状態に大きく依存することを示している可能性もある。

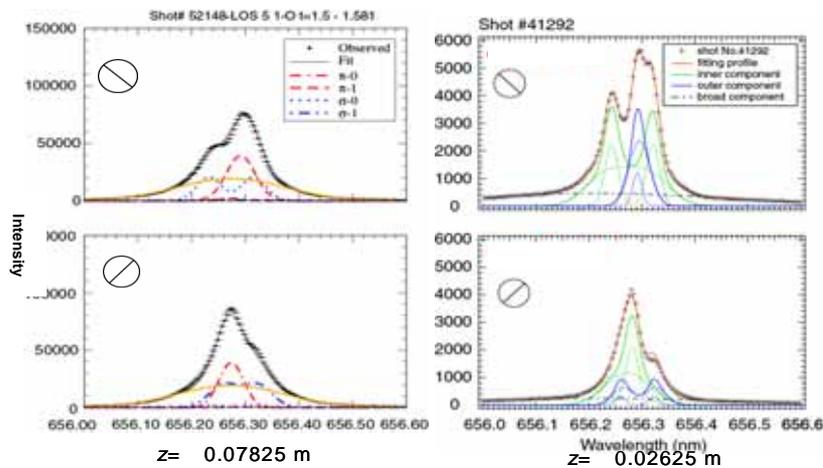
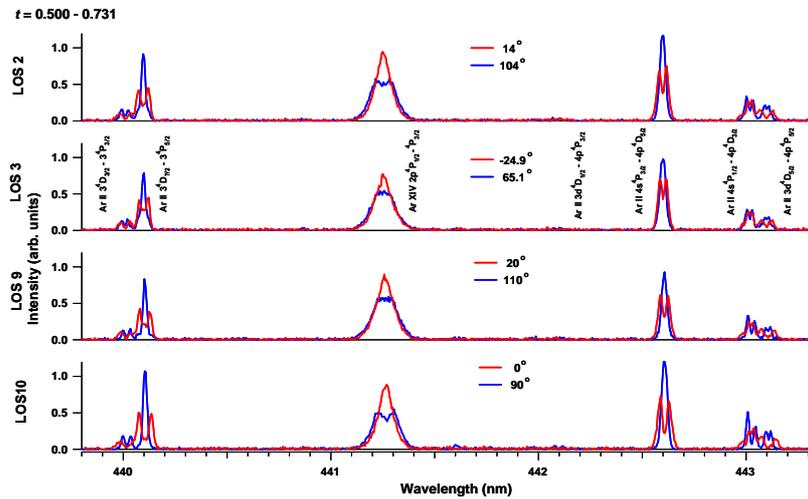


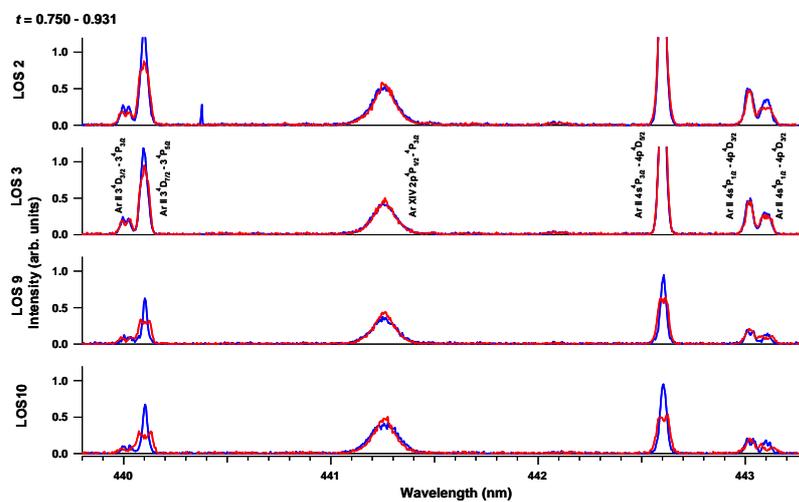
図 8-5 H 線の偏光分離スペクトル

アルゴンを動作ガスとし NBI 加熱によりプラズマを生成した。可視域 Ar X 553.3 nm, XI 691.7 nm, XIV 441.2 nm, XV 594.4 nm 磁気双極子遷移発光を偏光分離計測した(図 8-6)。異常ゼーマン効果による分裂が見られた。偏光方向と磁場方向との関係は電気双極子のそれと逆である。



(a)

図 8-6a 磁気双極子遷移発光の偏光分離計測



(b)

図 8-6b 磁気双極子遷移発光の偏光分離計測

中性粒子輸送モンテカルロシミュレーションコードによりプラズマ周辺部における励起状態水素原子 ($n=3$) の速度分布が得られた。磁場強度・方向と発光線の強度・偏光方向を踏まえた詳しい解析を現在進めている。

平成 16 年 12 月より京都大学から SNET を通じ NIFS の実験ネットワーク接続が可能となり、LHD 本体室に設置された分光器の波長を変化させるなどしてスペクトルデータを取得することが可能であることが確認された。

今後の計画

平成 17 年度には高分解分光器を一台増設し 1 視線上の異なる 2 波長のスペクトル計測を行う。ヘリウム原子の 2 本の発光線強度比から電子温度・密度の情報を得ることが期待される。NBI 入射時のアルゴン磁気双極子遷移の発光線の偏光はプロトンの速度分布関数の非等方性が現れている可能性が高い断面積データの整備を行い、偏光とプロトン速度分布の非等方性の定量評価を目指す。

【参考文献】

- [1] Goto M. and Morita S. Phys. Rev. E **65** (2002) 026401
- [2] Iwamae A., Hayakawa M., Atake M. and Fujimoto T. Phys. Plasmas **12** (2005) 042502

【成果発表】

Iwamae A., Hayakawa M., Atake M. and Fujimoto T. Phys. Plasmas **12** (2005) 042502
日本物理学会 2004 年秋季大会 LHD におけるモーショナルシュタルク効果の偏光観測
安宅誠, 岩前敦, 藤本孝, 後藤基志 A, 森田繁 A 京大院工, 核融合研 A