

非接触 He プラズマ中の中性粒子温度計測

日大生産工(院) ○金森 裕也

名大院工 大嶋 啓嗣 鷹野 大輝 田中 宏彦 大野 哲靖
名大未来研 梶田 信 日大生産工 荒巻 光利

1 はじめに

現在, 原子力発電よりも安全かつ長期的なエネルギー供給, 環境問題の解決が可能な将来のエネルギー源として核融合炉の研究開発が進められている。しかし, 核融合炉の実用化に向けていくつか重要な課題がある。ダイバータの熱負荷の制御はその中の1つである。炉心プラズマから流出したプラズマ粒子束が直接ダイバータ板へ到達すると熱負荷は数百MW/m²にもなり, ダイバータ板が損耗する。ダイバータとは, 核融合によって生成されたHe灰の排気を担う装置で, 核融合炉内のプラズマの純度を保つ粒子制御機能が要求されている。

核融合プラズマでのダイバータの熱負荷制御の向上には, 効率よく電子とイオンを再結合させて, プラズマを消失させなければならない。そのためには, ダイバータ領域でプラズマをプラズマ-中性ガス相互作用による放射および荷電交換により冷却し, ダイバータ板に到達する直前の気相中で中性化する非接触プラズマの生成が有力な方法と考えられる。非接触プラズマの生成には, 電子温度を低く抑える必要がある。電子は中性粒子との衝突により冷却されるため, 中性粒子の温度測定は非接触プラズマの研究において重要である。しかし, 基底状態のヘリウム原子の測定はまだ研究段階であるため, 準安定ヘリウム原子に着目した。我々は準安定ヘリウム原子の温度測定のため, レーザー吸収分光システムを開発し, 直線型ダイバータ模擬試験装置である NAGDIS-II で生成されたプラズマの上流域で電離進行プラズマ中における準安定ヘリウム原子の温度測定を行った^{2) 3) 4) 5)}。

2 実験方法

2-1 実験装置

Fig.2 にNAGDIS-II 装置の概略図を示す。プラズマは, 放電領域内のLaB₆ディスクカソ

ードを使用して生成される。試験領域の長さは2 mであり, ターゲットによって終端される。NAGDIS-II は放電領域と試験領域にターボ分子ポンプをそれぞれ備えており, 非接触プラズマは試験領域内の圧力を増加させることで生成される⁷⁾。準安定ヘリウム原子のレーザー吸収分光測定は放電領域から0.15 m離れた上流域での電離進行プラズマ中で実施した。レーザーは準安定He原子の吸収分光に使用可能な波長1083 nmのDFBレーザーを用いて測定を行った。DFBレーザーは線幅が数MHzで, 波長1083 nm内の3つの $2^3S_1-2^3P$ 遷移をカバーすることができるが, $2^3S_1-2^3P_1$ と $2^3S_1-2^3P_2$ 遷移を選択した。選択した理由として2つの遷移は $2^3S_1-2^3P_0$ 遷移に比べて吸収断面積が数倍大きいからである。光アイソレータはミラーなどの光学部品からの戻り光を遮断し, 光源の不安定性や故障を防ぐために, DFBレーザーの前に設置している。レーザー強度は吸収の飽和を避けるため半波長板と偏光ビームスプリッタ(PBS)を用いて30 μWまで下げている。また, NAGDIS-II は磁場が0.1 T以上あるので, 磁場によるゼーマン広がり避けるため, レーザーの偏光は磁場と平行にそろえてプラズマに入射した。レーザーの透過光はフォトダイオード(PD)で検出した。

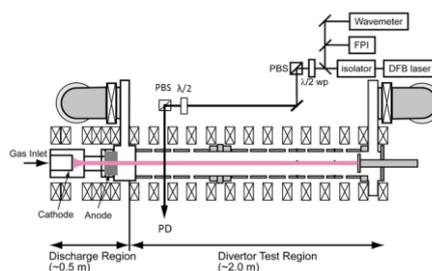


Fig.2 直線型ダイバータ模擬試験装置 (NAGDIS-II)

2-2 レーザー吸収分光法の原理

Fig.4は吸収分光法の原理を示す。レーザー吸収分光法はプラズマへレーザー光を入射し,

Measurement of Metastable He atom temperature in detached plasmas

Yuya KANEMORI

Hiroshi OSHIMA, Hiroki TAKANO, Hirohiko TANAKA, Noriyasu OHNO
Shin KAJITA and Mitsutoshi ARAMAKI

レーザーの透過光から減衰率を求め、プラズマ内部の原子や分子の密度・温度を計算する方法である。測定では共鳴周波数周辺の吸収係数の変化から、ヘリウムプラズマ中の準安定ヘリウム原子の温度・密度を計算した。吸収係数とは、光がある物質の中を進む時に、単位長さ当たりに光が吸収される割合である。以下に吸収係数 $k(\nu)$ と温度 T の計算方法を示す。

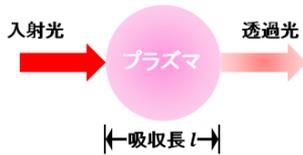


Fig.4は吸収分光法の原理

$$k(\nu) = -\frac{1}{l} \ln[1 - \alpha(\nu)]$$

$k(\nu)$: 吸収係数 l : 吸収長
 $\alpha(\nu)$: 吸収率

$$T = \frac{\Delta \nu_D^2 M c^2}{(8 \ln 2) \nu_0^2 k_B}$$

k_B : ボルツマン係数 M : 分子の質量
 T : 粒子の温度 c : 光速
 ν_0 : スペクトル線の中心周波数
 ν_D : スペクトルの半値全幅

4 実験結果

Fig.4 (a)は実験から計測された $2^3S_1-2^3P_2$ と $2^3S_1-2^3P_1$ 遷移の重ね合わさった吸収スペクトルであり、Fig.4 (b)は準安定ヘリウム原子の温度および密度のガス圧力依存性を調べたものである。ガス圧力はそれぞれ4, 10, 12 mTorr, 放電電流は30 Aで一定にし、吸収長は20 mmで計算した。

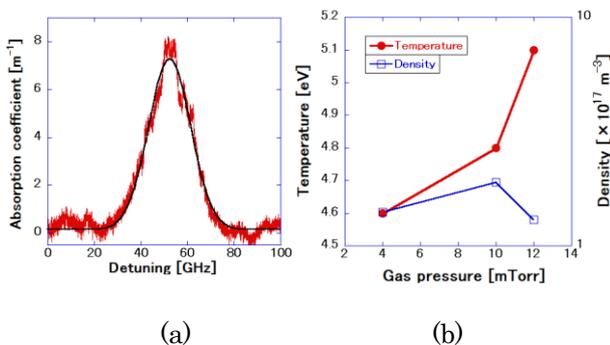


Fig.4 (a) 圧力12 mTorr時の吸収スペクトル
 (b) 圧力依存性

測定結果より電離進行プラズマ中でも準安定ヘリウム原子の吸収スペクトルは観測された。

準安定ヘリウム原子の温度は数eVと高温で、高いエネルギーを持ったイオンとの電荷交換衝突によってエネルギーが付与されたと考えられる。また、ガス圧力を下げると、準安定ヘリウム原子温度も減少した。これは、給排気速度の増加が中性粒子とイオンの相互作用時間を減少させたため、準安定原子の温度が減少したと考えられる。

5 まとめ

DFB レーザーを用いた直線型ダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-II の電離進行プラズマ領域での吸収分光測定を行った。測定より吸収スペクトルが観測され、準安定ヘリウム原子温度はガス圧力の変化に依存しており、高いエネルギーを持ったイオンとの電荷交換衝突からエネルギーが付与されていると考えられた。

今後の展望として、準安定ヘリウム原子測定を上流域だけだけでなく、中流・下流域の軸方向・径方向で吸収分光を行い、準安定ヘリウム原子温度の変化を観測する。プローブ測定やトムソン散乱計測を用いて、電子温度やイオン温度を計測し、粒子間の熱緩和プロセスの理解につなげていきたいと考えている。また、音波を用いた中性粒子温度測定も検討中である。

「参考文献」

- 1) 上田良夫, 原型炉に向けてのダイバータの研究開発課題, プラズマ・核融合学会誌 Vol.92, No.12 (2016), 868-869
- 2) M. Aramaki, T. Tsujihara, S. Kajita, H. Tanaka, N. Ohno, Measurement of He neutral temperature in detached plasmas using laser absorption spectroscopy, AIP Advances 8, 015308 (2018)
- 3) 大野哲靖, 田中直行, 高村秀一, BUDAEV Viatcheslav, 非接触再結合プラズマ中の揺動特性, Vol.78, No. 10 (2002) 1093-1101.
- 4) 朝倉伸幸, 大野哲靖, スクレイプオフ層とダイバータにおける ELM プラズマ輸送研究の進展, プラズマ・核融合学会誌. Vol. 82, No.9 (2006)p.582-589
- 5) 河野康則, 杉原正芳, 飛田健次, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 86, No.1 (2010)3-16
- 6) 今井貴博, 澤田博之, 服部徳文, 上杉喜彦, 高村秀一, インバータ式高周波電源を用いたプラズマ加熱時の加熱特性, 電気学会, Vol. 120-A, No. 7, (2000)