

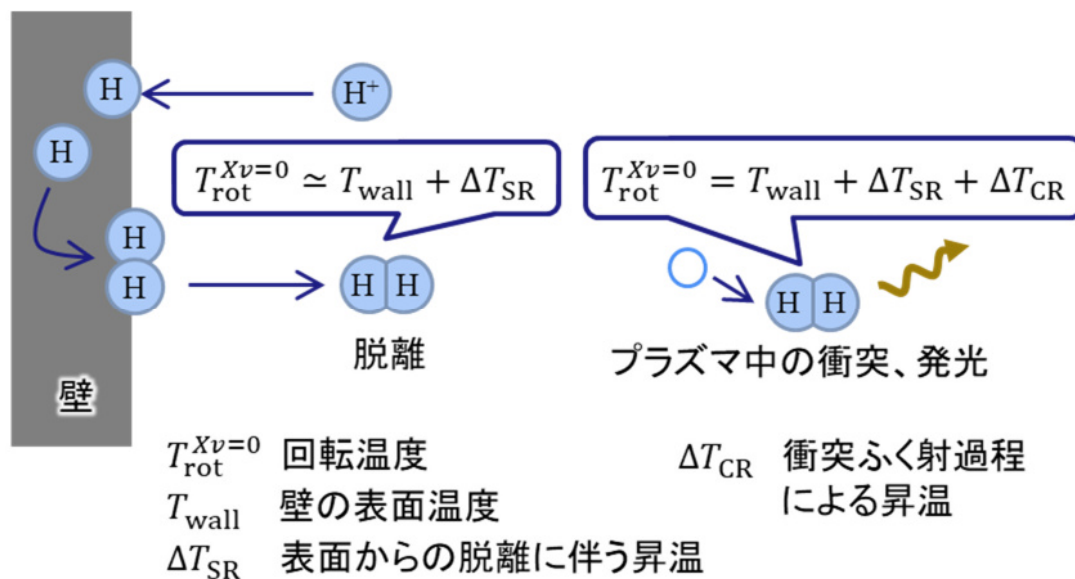
水素分子の回転温度を予測し、プラズマ再結合を効果的に起こす

概要

核融合発電では、磁場で閉じ込めた水素プラズマを1億度に加熱し、イオン同士が衝突して核融合する際に放出されるエネルギーを利用します。この際、閉じ込め領域から漏れ出たプラズマによって装置の壁が損傷することを防ぐため、壁の近くにガスを入射し、放射と再結合でプラズマを冷却します。再結合は、プラズマ中の水素分子の振動・回転温度に応じて起こりやすさが変わると考えられており、振動・回転温度を予測し、制御する方法が研究されています。

京都大学大学院工学研究科の米田奈生 博士課程学生（研究当時）、四竈泰一 准教授、蓮尾昌裕 教授、米国ローレンス・リバモア国立研究所 Filippo Scotti 研究員らの国際共同研究グループは、日本と米国の3種類の核融合実験装置を用いた水素分子の分光計測から回転温度を評価し、全ての装置で、回転温度における分子の壁表面との相互作用およびプラズマ中の電子・イオン衝突の寄与の評価可能性を明らかにしました。本成果により、プラズマ中の回転温度を予測し、制御できるようになる可能性があります。

本成果は2023年7月27日10:00（現地時刻）にオーストリアおよび英国の合同出版国際学術誌「*Nuclear Fusion*」にオンライン掲載されました。



水素分子の回転温度予測に用いたモデルの概要

1. 背景

核融合発電では、磁場で閉じ込めた水素プラズマを1億度に加熱し、イオン同士が衝突して核融合する際に放出されるエネルギーを利用します。この際、閉じ込め領域から漏れ出たプラズマによって装置の壁が損傷することを防ぐため、壁の近くにガスを入射し、放射と再結合^{※1}でプラズマを冷却します。再結合は、プラズマ中の水素分子の振動・回転温度^{※2}に応じて起こりやすさが変わると考えられており、振動・回転温度を予測し、制御する方法が研究されています。

本研究で対象とした、水素分子の低エネルギー準位の回転温度については、これまで、いくつかの核融合実験装置で計測され、壁の表面温度に依存した値になることや、プラズマ密度とともに高くなることが報告されていました。しかし、回転温度を決める普遍的なメカニズムは分かっておらず、メカニズムを解明し、回転温度を予測することが望まれています。

2. 研究手法・成果

水素分子の回転温度を決めるメカニズムの解明を目指し、プラズマの温度・密度と壁材料が異なる3種類の核融合実験装置（九州大学応用力学研究所 QUEST 装置^{※3}、米国プリンストンプラズマ物理研究所 LTX-β装置^{※4}、米国ゼネラル・アトムックス社 DIII-D 装置^{※5}）を用いた比較研究を行いました。これらの装置で、プラズマと接する壁近くから放射される水素分子の回転輝線（ $d^3\Pi-a^3\Sigma$ 遷移、波長 600-608 nm）を分光計測し、輝線強度と励起発光過程の解析により、低エネルギー準位の回転温度を評価しました。また、並行して、水素分子が壁から脱離し、プラズマ中に侵入して電子・イオン衝突により励起され、発光するモデルを提案し、モデルにもとづく回転温度の計算を行いました。その結果、3種類の装置で評価した回転温度の実験値は計算で説明できることが分かり、さらに、文献で報告されていた他装置の実験値も説明できることが分かりました。

3. 波及効果、今後の予定

提案したモデルを用いることで、将来の核融合発電炉や現在稼働している様々な核融合実験装置で、水素分子の回転温度を予測し、再結合が起こりやすい実験条件を探索できる可能性があります。今後、本研究で考慮しなかった高エネルギー準位の温度や表面励起の効果などを考慮することで、予測精度の向上が期待されます。また、同様のモデルを用いた振動温度の予測研究への展開も考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、一般財団法人森記念製造技術研究財団、自然科学研究機構 核融合科学研究所 双方向型共同研究および日米科学技術協力事業（核融合分野）、米国エネルギー省の助成を受けて実施しました。

<用語解説>

※1 再結合：電離などで生じた荷電粒子が、他の粒子や表面との衝突によってエネルギーを放出し、中性化される過程。

※2 振動・回転温度：分子の振動・回転エネルギー準位の占有数分布をマクスウェル=ボルツマン分布で近似したときに決まる温度。

※3 QUEST：九州大学応用力学研究所高温プラズマ理工学研究センターで稼働している中型のトカマク型核

融合実験装置（大半径 0.64 m、小半径 0.46 m、壁材料 大気プラズマ溶射タングステン・ステンレス）。

※4 LTX- β ：米国プリンストンプラズマ物理研究所で稼働している中型のトカマク型核融合実験装置（大半径 0.4 m、小半径 0.26 m、壁材料 固体または液体リチウムを蒸着したステンレス）。

※5 DIII-D：米国ゼネラル・アトミックス社で稼働している大型のトカマク型核融合実験装置（大半径 1.7 m、小半径 0.6 m、壁材料 グラファイト・炭素繊維複合材）。

<研究者のコメント>

博士課程在学中は、感染症の影響で海外渡航が制限された期間もありましたが、オンラインのミーティングツールのおかげで日本にしながら国際的な研究活動を行うことができました。国内外の多数の研究者と協力した成果を Nuclear Fusion 誌への掲載という形で発表できたことを、とても嬉しく誇りに思っています。(米田 奈生)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Spectroscopic measurement of increases in hydrogen molecular rotational temperature with plasma-facing surface temperature and due to collisional-radiative processes in tokamaks（トカマク装置における対向壁表面温度と衝突ふく射過程による水素分子回転温度上昇の分光計測）

著者：Nao Yoneda, Taiichi Shikama, Filippo Scotti, Kazuaki Hanada, Hiroki Iguchi, Hiroshi Idei, Takumi Onchi, Akira Ejiri, Takeshi Ido, Kaori Kono, Yi Peng, Yuki Osawa, Go Yatomi, Akihiro Kidani, Michihiro Kudo, Ryosuke Hiraka, Kosuke Takeda, Ronald E Bell, Anurag Maan, Dennis P Boyle, Richard P Majeski, Vlad Soukhanovskii, Mathias Groth, Adam G McLean, Robert S Wilcox, Charles Lasnier, Kazuo Nakamura, Yoshihiko Nagashima, Ryuya Ikezoe, Makoto Hasegawa, Kengoh Kuroda, Aki Higashijima, Takahiro Nagata, Shun Shimabukuro, Ichiro Niiya, Izumi Sekiya, and Masahiro Hasuo

掲載誌：Nuclear Fusion DOI：10.1088/1741-4326/acd4d1