J. Plasma Fusion Res. Vol.98, No.1 (2022) 3-4

小特集

磁場閉じ込め核融合装置における水素原子分子輸送研究の新展開

The New Phase in Transport Studies of Hydrogen Atoms and Molecules in Magnetic Confinement Fusion Devices

1．はじめに

1. Introduction

蓮尾昌裕
HASUO Masahiro
京都大学

（原稿受付：2021年11月15日）

炉心プラズマにおける燃料粒子の輸送にとってプラズマ周辺領域における中性水素が重要であり，その発生源としてプラズマ対向壁が大きな役割を担っている．しかし，壁から炉心までの水素輸送は，固体～気体～プラズマと状態変化を伴いながら，無数と言ってよい程の電子・イオン・原子・分子が相互に現象を織りなす複雑系となっており，全体を自己無撞着に取り扱えるモデルはない．

核融合プラズマにおける中性水素輸送に関わる主な物理過程・現象を**図1**に示す．対向壁へのプラズマ粒子の入射およびそれに伴う水素の壁内や再堆積層への蓄積，壁面からの水素の放出，周辺領域でのプラズマ粒子や水素の輸送，炉心への中性水素の侵入やそれに伴うプラズマ粒子の運動量・エネルギー損失が相互に関連しながら生じている．従来，それぞれが個別の研究対象として，それ以外の部分を境界条件や前提条件として適切なパラメータを仮定し，モデル化や実験解析がなされてきた．しかし，それらの条件として必要な情報が他の研究から得られるとは限らない．各モデルにおける仮定や近似に対する相互理解とともにそれぞれに不足している情報をどう埋めるか，すなわち統合的な理解が課題となる．例えば，プラズマ対向壁への熱・粒子負荷を大きく低減できると期待されている非接触プラズマの予測と安定制御には，プラズマ・原子分子相互作用の定量的な理解が必須である．長時間の密度制御のためには，プラズマとその対向壁の分子原子表面過程がどのように整合しながら時間変化するかの理解が必須である．本小特集では中性水素輸送研究に関するいくつかの取組みを紹介しながら，その統合的な理解に向けた取組みにも言及する．

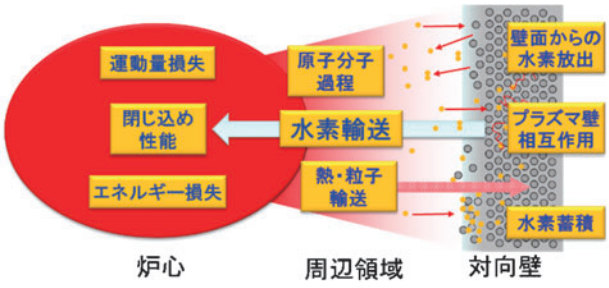


図1　磁場閉じ込め核融合プラズマにおける水素原子分子の輸送に関わる主な物理過程・現象の模式図．

2章では主にシミュレーションモデルによる取組みを紹介する．例えば，$H_2+e\rightarrow H^-+H$，$H_2+H^+\rightarrow H_2^++H$ のような分子活性化再結合の効率が，水素分子の振動量子数や回転量子数の増加に伴って桁違いに増加することが知られており[1-3]，ダイバータプラズマのエネルギーバランスや非接触化に大きな影響を及ぼすことが予想されている．そのため，周辺領域での中性水素輸送の定量的なモデル化において対向壁から放出される水素分子の振動回転状態の情報が必須であり（2.3節，2.4節），そのような情報を算出するためのプラズマ対向壁水素リサイクリングモデルが新たに構築されることとなった（2.2節）．また，プラズマ中の水素輸送の計算においては，背景となるプラズマのパラメータを前提条件としている（2.3節，2.4節）が，プラズ

Department of Mechanical Engineering and Science, Graduate School of Engineering Kyoto University, KYOTO 615-8540, Japan
author's e-mail: hasuo.masahiro.6u@kyoto-u.ac.jp

©2022 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

マと水素輸送はリサイクリング過程を通じて結合するために両者を統合するモデルが望まれており，その状況を紹介する（2.5節）．

3章では主に実験的な取組みを紹介する．まず，水素の活性化エネルギーや拡散定数を用いてリサイクリング率を定式化し，QUEST プラズマ対向壁の昇温離脱スペクトルから各種物理パラメータを推定する．この結果からQUEST壁モデルや粒子循環モデルを構築し，QUEST長時間放電に適用する（3.1節）．次に，可視分光からQUESTとLHDの水素分子計測（3.2節）とLHDの水素原子計測（3.3節）を紹介する．前者では壁面の温度評価や水素分子の振動回転状態分布推定が行われ，後者では周辺領域から炉心までの水素原子の空間分布評価とその輸送ダイナミクスおよびプラズマ閉じ込めに関する解析が行われている．

さて，**図1**に示した個々の物理過程や現象であっても，第一原理的に理解することは困難であり，マルチフィジックスとしてアプローチすることになる．本小特集で紹介する研究では，個々の研究対象に適した階層のシミュレーションモデルや解析モデルが採用されているが，今後はそれらの統合とともに，相互の整合範囲の確認も課題となるであろう．例えばプラズマ壁相互作用では，分子動力学計算を活用しながら個々の粒子の挙動を求め，その微視化を図ることによって例えば量子物理学における物理量との対応を評価する一方，平均し粗視化することでマクロな拡散方程式につなぐことも期待される．周辺領域や炉心での水素輸送でも同様に，モンテカルロ計算により個々の粒子の挙動を求めるが，その平均化によってボルツマン方程式につなぐことも期待される．またそれらの妥当性の確認には，やはり計測は必須である．実験的制約によって計測値はある程度時空間を積分した値とならざるを得ないが，マルチフィジックス間を橋渡しするような，より局所値を得るための工夫も引き続き必要であろう．

参考文献

［1］J. Horáček *et al., Rate Coefficients for Low-Energy Electron Dissociative Attachment to Molecular Hydrogen;* NIFS-DATA-73; NIFS: Toki, Japan (2003).

［2］A. Ichihara *et al.,* J. Phys. B **33**, 4747 (2000).

［3］A. Ichihara *et al.,* At. Plasma-Mater. Interact. Data Fusion **9**, 193 (2001).