



## 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

### 4. おわりに

#### 4. Summary

小林 政弘<sup>1,2)</sup>

KOBAYASHI Masahiro<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>核融合科学研究所, <sup>2)</sup>総合研究大学院大学

(原稿受付: 2021年11月25日)

あらゆる元素の中で水素は最もシンプルな内部構造を持つ元素である。にもかかわらず、磁場閉じ込め核融合装置において今日議論されているような水素の極めて複雑な挙動を予測できた人がどれほどいたのだろうか？

水素原子・分子がプラズマと相互作用する際には電離・励起・脱励起・荷電交換等によってプラズマとのエネルギー・運動量の交換が行われることはよく知られている。これらの反応の速度係数のプラズマパラメータに対する依存性は、その複雑さの要因の一つである。

核融合プラズマのような電離度が高い高温プラズマでは、水素原子・分子（水素中性粒子）は主に周辺部に多く存在する。したがって、これら水素原子・分子はダイバータ・壁近傍の領域でのプラズマに重要な影響を及ぼすことが認識されてきた。特に、10 eV 以下では水素原子の電離の速度係数が急激に減少するため、ダイバータ領域のプラズマの振る舞いに強い非線形性をもたらすことが知られている[1]。例えば、電離領域の空間移動や、荷電交換によるプラズマ圧力の損失とそれに伴う粒子束の減少などである。また同時に、周辺部は閉じ込め領域の境界条件を与える場所でもある。周辺輸送障壁の形成に荷電交換による運動量損失が与える効果は早くから指摘されていた[2]。最近では、密度分布に見られる輸送障壁と電離ソースの空間位置の関係が議論されている。すなわち、原型炉のような高温・高密度のプラズマで、電離ソースと密度ペDESTALが乖離したときに、それでもペDESTALが維持されるかどうかという問題である[3]。

もう一つの複雑さの要因は、本小特集でも何度か述べられているように、水素分子の回転・振動状態の内部自由度の多さであり、それは量子化されたエネルギー準位にして数千におよぶ。それら励起準位によって水素分子が関連した化学反応の速度が数桁にわたって変化する。

また、プラズマと固体壁との相互作用においては、固体表面での水素の反射・放出過程が固体の表面状態に強く依存していると同時に、その表面状態がプラズマ放電中に時々刻々変化することによる複雑さがある。固体壁中の水素の挙動には、その材料固有の拡散係数と、堆積によって

できた層中の拡散、さらには固体表面での再結合速度によって、様々な律速と相互作用が現れる。

このように、水素原子・分子の挙動は、依然として最も重要な研究課題の一つである。本小特集では、磁場閉じ込め核融合装置における装置壁、周辺プラズマ、コアプラズマにまたがる領域での中性粒子の挙動について様々な研究成果を集約することで、パラメータ（中性粒子およびプラズマの密度、温度）が大きく異なる環境下での中性粒子の興味深い振る舞いを概観できる貴重な機会となったと言える。

プラズマが壁と接触することにより、壁中に取り込まれた水素が材料原子と運動エネルギー・ポテンシャルエネルギーをやり取りしながら、再び壁から放出されるまでの経過が分子動力学 (MD) シミュレーションによってつぶさに追えることが可能になってきた。なかでも、タングステン表面での水素原子との相互作用において、ポテンシャルエネルギーの分布に特殊な空間構造が現れ、これによって放出される水素がエネルギーを得ることが明らかになったことは MD シミュレーションならではの成果であり、大変興味深い。これまで TRIM[4]コードのようなモデル計算によって近似されてきた壁での反射過程が、第一原理に基づいた MD シミュレーションによって置き換わる時代がくることが予感される。

周辺部の中性粒子の輸送シミュレーションでは新たに上述の分子の回転・振動状態を取り込んだ計算が始められている。また、実際に分子の回転・振動温度が計測され、その空間分布や温度が明らかになりつつある。今後、実験とシミュレーションとの比較によって、水素分子・プラズマ・壁の間のエネルギー輸送が明らかになることが期待される。分子の回転・振動状態は分子活性化再結合 (MAR) の反応速度を変化させるだけでなく、高密度・低温プラズマにおけるエネルギーの損失チャンネルとしても重要であると思われる。その割合が全体のパワーバランスにどの程度寄与しているかは今後の原型炉ダイバータの設計に大きく影響するであろう。さらに、原子・分子過程の空間スケールは装置・プラズマサイズに関係なくほぼ一定

となる。したがって本特集の数値シミュレーションで示されたように、将来の原型炉では装置に対する原子・分子過程の相対スケールが小さくなり、中性粒子の挙動に明確な違いが現れると予測される。

同時に、このようなマイクロな原子・分子の量子的な内部構造に起因して光の放出・吸収が起り、これによって引き起こされる遠隔的なエネルギーの輸送が、クーロン衝突に起因するマクロなプラズマの挙動とどのような相互作用を及ぼしているかということ、学術的な観点からも興味深い研究課題である[5]。

QUESTで行われた数千秒におよぶ長時間放電時の粒子バランス解析は、各種材料の物性値や温度の違いが如何にプラズマ放電に影響するかを如実に表しているとともに、数千秒以上の時定数をもった物理プロセスが存在していることを示している。このような非常に長い時定数はおそらく放電中に変化する堆積層によるものと思われるが、このプロセスが最終的にどの程度の時定数で定常状態に収束するかは、今後に残された研究課題である。

高S/N比による分光計測によって水素原子のスペクトルを計測することにより、コア領域での水素原子の分布の詳細が明らかになった。得られた分布は数値シミュレーションとの比較によるコードの検証に用いることができるとともに、荷電交換によるエネルギー損失の評価が可能であり、コアプラズマを含めた全体のパワーバランスがより詳

しく議論できることを意味している。

一方で、自然界には低温で電離度の低いプラズマが多く存在しており、そのような環境下では水素原子・分子は支配的な役割を担っている。例えば地球の周りの電離圏や星間空間では、電離度は $10^{-3} \sim 10^{-7}$ 程度であり、温度は数百K程度以下であるため、分子の励起・脱励起が重要なエネルギーチャンネルの一つになっていると考えられている[6]。また、プロセスプラズマやプラズマ医療の分野においてもプラズマと中性粒子、ラジカル、およびそれらと基板・生体細胞との相互作用の詳細は未解明の課題である。本小特集で紹介した研究が、これら他の分野へと波及していくことも十分可能であろう。

### 参考文献

- [1] C.S. Pitcher and P.C. Stangeby, *Plasma Phys. Control. Fusion* **39**, 779 (1997).
- [2] S.-I. Itoh and K. Itoh, *Nucl. Fusion* **29**, 1031 (1989).
- [3] S. Mordijck, "Role of transport versus fueling upon the pedestal density", 3rd IAEA TM on Divertor Concept, (Nov. 4-7 2019, IAEA Headquarters, Vienna, Austria).
- [4] J.P. Biersack and W. Eckstein, *Appl. Phys. A* **34**, 73 (1984).
- [5] 岸本泰明 他：プラズマ・核融合学会誌 **84**, 333 (2008).
- [6] J.K. Jorgensen *et al.*, *Garrod, Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **58**, 727 (2020).