

## 核融合プラズマのタングステン不純物蓄積における大域的効果

菅野 龍太郎

磁場により閉じ込めている核融合プラズマに、閉じ込め装置の壁から発生した金属などの原子が電離されて、核融合反応に不要な不純物イオンとなって混入することがあります。この不純物イオンがプラズマの中に蓄積すると、プラズマの中心温度が下がるなどの核融合炉の定常運転を妨げる要因になります。このため、不純物イオンがどのように蓄積するのか、また、不純物の蓄積をいかに抑制するかは、核融合炉の開発において重要な研究課題となっています。

将来の核融合炉(原型炉)においては、プラズマと接触する装置の壁に、高い熱負荷・粒子負荷がかかると予想されており、その負荷に耐えうる材料として、タングステンの利用が検討されています。高い負荷に耐えられるタングステンであっても、僅かながらプラズマ中に混入していきます。原型炉では、タングステンの数密度は、核融合プラズマの10万分の1程度に抑える必要があると言われています。この記事では、そのような極めて希薄なタングステンイオンがプラズマ中でどのように振舞って蓄積するのかについて、最近行ったシミュレーション研究の成果[R. Kanno et al., Nucl. Fusion 60 (2020) 016033]を紹介したいと思います。

定常運転中の核融合炉において、プラズマ中心部にどのように不純物が蓄積していくのかを調べるためには、プラズマを閉じ込めている磁気かご(磁気面と呼ばれる。図1(a)を参照)を、不純物が単位面積当たり毎秒何個横切るのか(つまり、粒子束を)知ることが必要です。この不純物の粒子束を求めるために、本研究では、プラズマ中の不純物イオンの状態を空間3次元・速度空間2次元の5次元空間における分布によって表現するという方法を用います。ここで、本来、速度空間も3次元なのですが、強い磁場があることを使って、粒子運動を2次元と近似しています。不純物イオンの分布は、位置 $\mathbf{x}$ に存在し、かつ速度 $\mathbf{v}$ の値をもつ不純物の粒子が何個存在するのを示します。そして、定常状態にあるプラズマの中で、ほぼ定常になった不純物イオンの分布を求め粒子束を計算します。これにより、定常プラズマ中でゆっくりと蓄積していく不純物の量が分かるようになります。

不純物イオンの分布を求めるためには、プラズ

マ中での不純物イオンに働く力とその動きを計算する必要があります。先行して行われた理論研究によって、不純物イオンに影響を及ぼす力は、主に水素イオンからの摩擦力と熱力という二つの力(粒子の衝突によって生じる平均力)であることが知られています。そこで、これら摩擦力と熱力を受けた不純物イオンの5次元空間における分布を求めるシミュレーションコードを開発しました。不純物イオンの動きについては、先行研究の理論計算(手計算)では「局所近似モデル」が用いられていました。これは、計算を単純化するため、不純物イオンは磁気面にほぼ沿って運動すると仮定したモデルです。この局所近似モデルを用い、シミュレーションで不純物イオンの粒子束を計算しました。その値は、先行研究で与えられた理論値(手計算による値)と一致しており、これにより、シミュレーションコードが適切に開発できていることが確認できました(この後の説明で、図示します)。

ところで、不純物イオンは、実際には磁気面を横切る運動を行っています(図1(b)参照)。そのため、局所近似モデルは、この不純物イオンの運動の効果を十分に反映していないという欠点があります。そこで、新たな試みとして、磁気面を横切る運動の影響も考慮した「グローバルモデル」を考案しました。そして、このグローバルモデルを用いてシミュレーションを行い、不純物イオンの粒子束を求めました。計算結果は局所近似モデルを用いた結果と異なっており、不純物イオンの磁気面を横切る運動の効果が無視できないことが分かりました。特に、この運動が原因で、不純物イオンが広い領域にわたって影響を及ぼし合うようになりますが、この「大域的効果」が不純物イオン蓄積において重要な役割を果たす可能性があることを、本研究で示すことができました。

図2に計算結果を示します。これは、不純物イオンを電荷が+4のタングステンイオンと仮定してテスト計算を行った結果です。図2(a)は局所近似モデルに基づいて、磁気面を横切る粒子束の値を求めたものです。横軸に磁気軸からの径方向の距離(小半径)を、縦軸に粒子束の値を取っています(磁気軸や小半径の説明については、図1(a)を参照)。小半径は  $r/a$ により表記し、 $r/a=0$ は磁気軸(プラ

ズマ中心)、 $r/a=1$ は入れ子状の磁気面の一番外側をそれぞれ意味します。粒子束の値は、手計算による理論値(黒色破線)とシミュレーション(赤色実線)で一致しています。図2(b)の青色実線が今回新たに開発した「グローバルモデル」を用いた場合の結果です。このシミュレーション結果と局所近似モデルを用いた理論値とが広い範囲にわたって明らかに異なる値になりました。この効果は、不純物イオンが磁気面を横切る運動を行うことから生じますので、特定の電荷数のときのみには現れるわけではありません。このため、実際のタングステニオンにも同様の効果が現れると予想されます。

次に、大域的効果について詳しく説明します。ある磁気面における不純物イオンの分布は、その磁気面近傍の微小領域に存在する多数の不純物の粒子によって与えられます。不純物の粒子は、時間と共に位置や速度を変えていきますので、その領域に対して粒子の出入りが生じます。磁気面を横

切る運動により、隣にある磁気面近傍領域に入った粒子は、その領域における摩擦力及び熱力の影響を受けます。各領域の摩擦力は、その領域における不純物イオンの平均速度(つまり、不純物イオンの分布から決まる値)に依存しています。このため、各磁気面近傍領域の不純物イオンの分布は、隣り合う磁気面近傍領域における分布の影響を受けることとなります。その結果、各磁気面における不純物イオンの分布は、摩擦力を介して、広い範囲で(つまり大域的に)お互いに影響を与え合い、局所近似モデルの場合とは異なる分布になるのです。

このように、本研究で考案したグローバルモデルによって、プラズマ中の不純物の蓄積における大域的効果を示すことができました。今後、シミュレーションモデルを更に改良して、将来の核融合炉におけるタングステン不純物の蓄積評価や混入抑制方法の考案に役立てたいと考えています。

(核融合理論シミュレーション研究系 准教授)

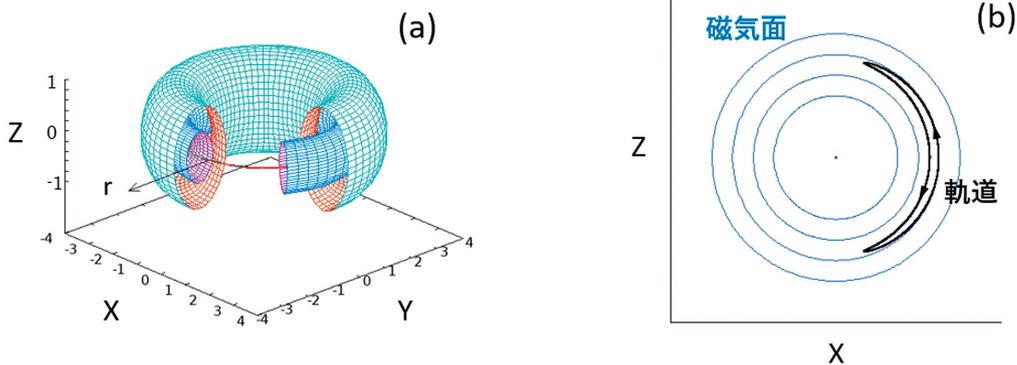


図1 (a) 入れ子になったドーナツ状の磁気かごの模式図。ただし、見やすさのために、磁気かご(磁気面)の一部を切り取っています。この図では、2枚の磁気面(表側が水色で内側が茶色の面、及び表側が青色で内側が紫色の面)と、磁気軸(入れ子の中心にある赤色の線)を表示していますが、ドーナツ状の磁気面は、実際には隙間無く存在します。また、図中の $r$ は、各磁気面の太さ(磁気軸からの径方向の距離)である小半径を表しています。(b) 入れ子になったドーナツ状の磁気面のX-Z断面図(複数の青色実線)とその上に射影した磁気面を横切る運動をしている粒子の軌道の典型例(黒実線)。シミュレーションでは、このような軌道に沿って、不純物イオン分布に対する摩擦力・熱力の影響の大きさを計算します。

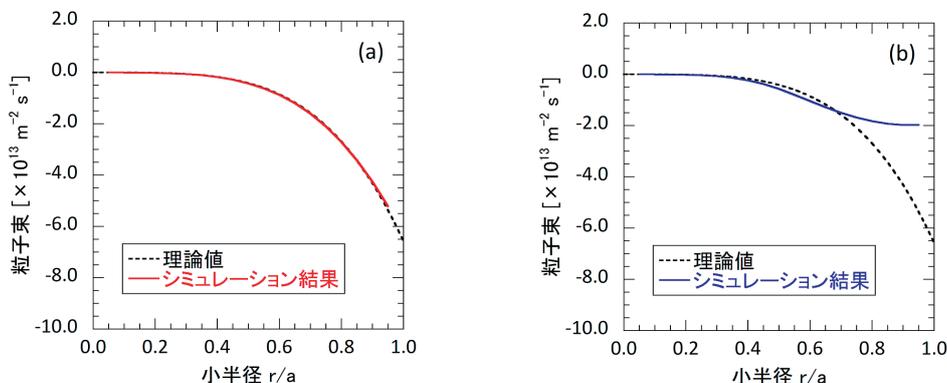


図2 シミュレーションによって求めた(a)局所近似モデルによる磁気面を横切るタングステニオンの粒子束(赤色実線)、及び(b)グローバルモデルによる粒子束(青色実線)。負の値の粒子束は、不純物イオンがプラズマ中心部へ蓄積していくことを意味します。ここで、手計算による理論値は、黒色破線で示しています。不純物の蓄積における「大域的効果」をより明確に示すために、プラズマの温度が全体的に実際より低温であると仮定して、全範囲( $0 \leq r/a \leq 1$ )にわたって粒子束を求めています。