

スーパーステージモデルを用いた TASK/TX における炭素不純物モデリング

Carbon impurity modeling with the superstage model in TASK/TX

本多充¹, 松山顕之², 本間裕貴²

HONDA Mitsuru¹, MATSUYAMA Akinobu², HOMMA Yuki²

京大工¹, 量研六ヶ所²

Kyoto Univ.¹, QST Rokkasho²

トラスプラズマ中の物理量の発展をシミュレーションする流体型輸送コード TASK/TX[1, 2] を開発している。TASK/TX は通常の輸送コードの支配方程式である拡散型方程式と異なり、二流体方程式系に対してドリフトオーダーリングを取ることで輸送現象に着目した方程式系に転換されており、さらに磁気面平均を取ることで、1次元流体方程式群となっている。また、新古典輸送を自己無撞着に扱うため、二流体方程式では通常扱わない熱流束のオーダーまで解いている。すなわち、運動論方程式の $(1, \mathbf{v}, \frac{1}{2}v^2, \frac{1}{2}v^2\mathbf{v})$ の流体モーメント方程式を解いていることになる。TASK/TX は物理量間での自己無撞着性が特徴であり、その特性から従来の輸送コードでは前提となっている準中性条件や両極性条件は陽に課していない。

近年、TASK/TX は不純物を扱うように拡張された。不純物拡張の実装の確認のため、完全線形衝突演算子を実装した Matrix Inversion[3] と TASK/TX の両方で両極性輸送のチェックを行い、どちらも両極性輸送が成立していること、両者の結果は一致していることを確認した。[4]

不純物がバルクイオンである水素同位体と大きく異なる点として、プラズマ内で複数の価数を持った状態で存在することがあげられる。炭素不純物は6価の完全電離状態であると仮定することが多いが、周辺部においては必ずしも妥当な仮定ではない。また、壁やダイバータの表面が炭素製と仮定すると、ダイバータに衝突するイオンによる物理スパッタリングや化学スパッタリング、ダイバータ壁での反射やポンプによる排出、不純物入射などのソースやシンクが考えられるが、いずれも不純物は中性粒子の形でプラズマ内に混入してくる。そのため、適切な不純物源のモデリングを行うためには、中性粒子から完全電離に至る多段階の電離、荷電交換過程を考慮する必要がある。これまででは不純物の価数状態は1つしか扱えなかったために、不純物粒子源モデリングも不完全な状態であった

が、スーパーステージモデル [5] を導入することで中性炭素の供給から完全電離までの状態を簡便に扱えるようになった。図1は0-5価までの炭素を1つのスーパーステージにまとめて、各価数分布は平衡状態を取ると仮定した場合の密度の時間発展を示しており、 C^{+6} を見ると $10^{-3}s$ 程度で全価数に対して反応速度方程式を解いた場合と同じ密度に収斂している。すなわち、TASK/TX の通常の時間刻み幅程度の時間のうちに0価から6価まで電離することから、0-5価の炭素をまとめて中性炭素として扱うスーパーステージモデルの適用は TASK/TX が注目する輸送過程の検討において妥当であることを示している。

講演では、TASK/TX へのスーパーステージモデルの実装と、中性炭素の粒子源、粒子シンクのモデリングについて詳述する。

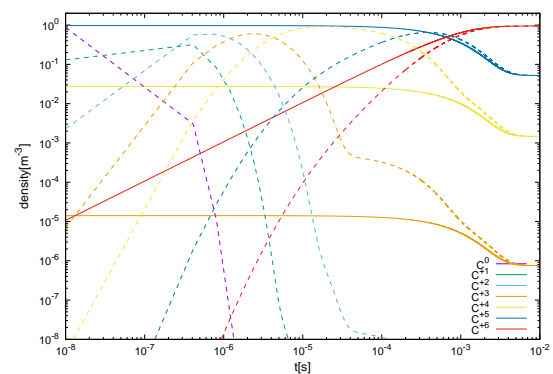


図1 実線が0-5価までの炭素をまとめて平衡状態を仮定した場合、破線が各価数に対して反応速度方程式を解いた場合の密度の時間発展。 $T_e = 200eV$ を仮定している。

References

- [1] M. Honda and A. Fukuyama. *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, pp. 2808–2844, 2008.
- [2] M. Honda and A. Fukuyama. *Comput. Phys. Commun.*, Vol. 208, pp. 117–134, 2016.
- [3] M. Honda. *Phys. Plasmas*, Vol. 21, p. 092508, 2014.
- [4] 本多充, 本間裕貴, 松山顕之. TASK/TX の不純物輸送モデリング. 23P-2F-12, 第38回プラズマ・核融合学会年会, 2021.
- [5] A. Foster. *On the Behaviour and Radiating Properties of Heavy Elements in Fusion Plasmas*. PhD thesis, University of Strathclyde, 2008.